



Masterplan Ems 2050

Technischer Test im Sommer 2020

Ergebnisse des Monitorings

EXPOSEE

Technischer Test des Emssperrwerks zur
Tidesteuerung -
Lösung des Schlickproblems und Verbesserung der
Gewässergüte mit dem Ziel besserer
Lebensbedingungen für die Gewässerfauna und
-flora in der Unterems

Engels, Andreas
Borgsmüller, Christine
Schöl, Andreas
Krebs, Martin
Maushake, Christian
Rosenhagen, Anton
Oberrecht, Dennis
Van der Wel, Rens
Bruckert, Patrick
Dirks, Holger
Tants, Rabea
Amman, Bärbel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Ergebnisse des Monitorings - Zusammenfassung	9
Ergebnisse des Monitorings - Kurzfassung	10
I. Einleitung	10
a. Aufbau des Monitoringberichts – schnelle Kurzfassung und detaillierte Langversion	10
b. Hintergrund – Ausbau der Unterems	11
c. Heutiger Zustand der Unterems – Feststoffimport, schlechte Gewässergüte und hohe Kosten 11	
e. Der Technische Test im Sommer 2020 und das begleitende Messprogramm	13
f. Danksagung	14
II. Messkampagne während des Technischen Tests	14
III. Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Versuch	15
a. Ist der Test trotz Unterbrechungen aussagekräftig?	15
b. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Schwebstoffkonzentration und auf den Flüssigschlick	16
c. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sedimentation im Emden Fahrwasser, im Emden Außenhafen und im Bereich der Liegewannen	17
d. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Bewirtschaftung des Emden Außenhafens	18
e. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sauerstoffverhältnisse	19
f. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salzgehalte	20
g. Verträglichkeit der Tidesteuerung für das Emssperrwerk	20
h. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstandsverhältnisse der Oberflächengewässer	21
j. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Strömungsverhältnisse	23
k. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Außenmuhden	24
l. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sielentwässerung	24
m. Auswirkung der Tidesteuerung auf den Hochwasserschutz im Leda-Jümme-Gebiet	25
n. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tideniedrigwasserproblematik im Leda-Jümme-Gebiet 26	
o. Auswirkung der Tidesteuerung auf den Sportbootverkehr im Leda-Jümme-Gebiet	26
p. Auswirkung der Tidesteuerung auf den Schiffsverkehr	26
IV. Schlussfolgerungen	27
V. Was lernen wir für die Zukunft?	27
Ergebnisse des Monitorings - Langfassung	29
1 Veranlassung des Technischen Tests Sommer 2020	29
2 Die Funktion des Emssperrwerks als multifunktionales Wasserbauwerk	29
2.1 Bisheriger Einsatz des Emssperrwerks	29

2.2	Die Variante „Tideniedrigwasseranhebung“	30
2.3	Die Variante „Flutstromtidesteuerung“	32
3	Der Technische Test im Sommer 2020.....	34
3.1	Ursprünglich geplanter Testablauf.....	34
3.2	Ausgeführter Testablauf.....	35
4	Randbedingungen des Technischen Tests.....	38
4.1	Hydro-meteorologische Randbedingungen	38
4.2	Betrieb des Ledasperrwerks während des Technischen Tests.....	44
4.3	Baggerkampagne Unterems zur Überführung der "Spirit of Adventure"	47
4.4	Randbedingungen der Gewässergüte und Definition eines Referenzzustands	49
4.4.1	Ausgangssituation und Referenzzustand der Salzgehalte.....	49
4.4.2	Ausgangssituation und Referenzzustand der Schwebstoffkonzentrationen	51
4.4.3	Ausgangssituation und Referenzzustand der Sauerstoffwerte.....	52
4.4.4	Zusammenfassung zur Ausgangssituation der Gewässergüte	54
4.5	Bewertung der Randbedingungen vor und nach der mehrtägigen Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.2020)	56
5	Monitoringprogramm zum Testbetrieb im Sommer 2020.....	58
5.1	Veranlassung des Monitorings	58
5.2	Übersicht des Messprogramms.....	58
5.3	Wasserstandsmessungen zwischen Borkum und Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet	61
5.4	Messung der Grundwasserstände.....	63
5.5	Begleitende Modelluntersuchung zur Auswirkung der Tidesteuerung auf Wasserstände, Strömungen und Salzgehalte	65
5.6	Strömungsmessung am Emssperrwerk	66
5.7	Strömungsmessungen zwischen Knock und Herbrum	68
5.8	Schwebstoffkonzentration und Strömungsparameter - Dauermessung im Vertikalprofil Soltborg	72
5.9	Gewässergüte - Dauermessung im Vertikalprofil Weekeborg, Soltborg, Terborg und Ditzum 74	
5.10	Multiparameter - Vertikalprofile über einzelne Ebbephasen bei Weener und Soltborg.....	74
5.11	Gewässergüte - Längsprofilmessungen Borkum - Herbrum	76
5.12	Flüssigschlickverteilung und Gewässergüte, Tiefen- und Längsprofile zwischen Knock und Herbrum	76
5.13	Gewässergüte – Langzeitmessungen der Stationen von Knock bis Herbrum.....	79
5.14	Bathymetrie - Längsprofile der Gewässersohle	81
5.15	Bathymetrie - Querprofilmessungen in mehreren Abschnitten der Unterems.....	82

5.16	Bathymetrie - Referenzprofil Emders Fahrwasser/ Emders Außenhafen	82
5.17	Bathymetrie - Flächenpeilungen im Emders Außenhafen und sedimentologische Untersuchungen	82
5.18	Bathymetrie - Flächenpeilung im Bereich des Emssperrwerks	83
5.19	Bathymetrie - Außenmuhden.....	84
5.20	Sedimentproben zwischen Borkum und Herbrum.....	84
5.21	Schwingungsmessung am Emssperrwerk und computergestützte Belastungsanalysen.....	84
6	Ergebnisdarstellung der jeweiligen Messungen.....	86
6.1	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände der Ems.....	86
6.1.1	Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung	86
6.1.2	Zusammenfassung zur Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung an den untersuchten Pegeln	95
6.1.3	Der Absink des Wasserstands bei Emden	96
6.1.4	Untersuchung der Wellenbildung und Strömungsspitzen infolge der Tideniedrigwasseranhebung	101
6.1.5	Auswirkung der Flutstromtidesteuerung	102
6.2	Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Sielentwässerung entlang der Ems.	103
6.2.1	Schwallwelle und „Stauphase“	104
6.2.2	Bestimmung der Wasserstandsanhhebung und Betrachtung der natürlichen Streuung	104
6.2.3	Interesse an niedrigerem Tideniedrigwasser – Sielentwässerung	105
6.2.4	Untersuchung des Extremfalls und mögliche Defizite der bestehenden Mündungsbauwerke	106
6.2.5	Mögliche Beeinträchtigung der Entwässerung während des Technischen Tests	107
6.2.6	Zusammenfassung und Ausblick	109
6.3	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände im Leda-Jümme-Gebiet.....	110
6.3.1	Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Wasserstände im Leda-Jümme-Gebiet	110
6.3.2	Beurteilung der Wasserstandsanhhebung unter Berücksichtigung einiger Interessenskonflikte im Leda-Jümme-Gebiet.....	122
6.3.3	Auswirkung der Flutstromtidesteuerung auf die Wasserstände im Leda-Jümme-Gebiet	131
6.4	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Grundwasserstände	132
6.4.1	Betrachtung der Monatsmittelwerte der Grundwasserstände	132
6.4.2	Betrachtung der Tagesmittelwerte der Grundwasserstände.....	134
6.4.3	Betrachtung der zeitlich höher aufgelösten Messwerte der Grundwasserstände	139
6.5	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Strömungs-verhältnisse der Ems	142

6.5.1	Veränderung der maximalen Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Tideniedrigwasseranhebung	142
6.5.2	Veränderung der gemittelten Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Flutstromtidesteuerung	147
6.6	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände und Strömungen der Ems und Leda (begleitende Modelluntersuchung).....	147
6.7	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Strömungs-verhältnisse am Emssperrwerk	151
6.7.1	Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Strömungs-verhältnisse am Emssperrwerk.....	152
6.7.2	Auswirkung der Flutstromtidesteuerung auf die Strömungsverhältnisse am Emssperrwerk.....	153
6.7.3	Vergleich Tideniedrigwasseranhebung vs. Flutstromtidesteuerung.....	154
6.7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	158
6.8	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Schwebstoffverhältnisse der Unterems (stationäre Betrachtung).....	159
6.8.1	Beschreibung der aufsummierten instantanen Schwebstofftransporte in der Unterems zwischen Papenburg und Pogum	159
6.8.2	Fazit und Zusammenfassung der Analyse der stationären Messung und ergänzenden Messkampagnen:	177
6.9	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Gewässergüte (Längsprofilmessungen von Borkum bis Herbrum).....	179
6.9.1	Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Schwebstoffgehalte – vor und während des Technischen Tests.....	179
6.9.2	Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Salzgehalte – vor und während des Technischen Tests.....	180
6.9.3	Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Sauerstoffgehalte – vor und während des Technischen Tests	181
6.9.4	Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Nährstoffgehalte – vor und während des technischen Tests.....	182
6.9.5	Einfluss der Tideniedrigwasseranhebung bzw. der geänderten Trübung auf das Phytoplankton	184
6.10	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sauerstoff- und Schwebstoffverhältnisse sowie auf gelöste Stickstoffverbindungen (Vertikalprofile einzelner Ebbephase bei Weener und Soltborg)	186
6.11	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Gewässergüte (Vertikalprofil-Dauermessung Weekeborg, Soltborg, Terborg und Ditzum)	193
6.12	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salz- und Sauerstoffgehalte im Längsprofil zwischen Knock und Herbrum	202
6.12.1	Auswirkung auf die räumlich gemittelten Sauerstoffwerte	202

6.12.2	Auswirkung auf die räumlich gemittelten Salzgehalte.....	204
6.12.3	Zusammenfassung.....	204
6.13	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Schwebstoff- und Sauerstoffgehalte in Tiefenprofilen zwischen Knock und Herbrum.....	205
6.13.1	Übersicht der Messergebnisse	205
6.13.2	Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung der Messergebnisse	207
6.13.3	Zusammenfassung.....	215
6.14	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Gewässergüte – Beurteilung anhand der Langzeitmessungen von Knock bis Herbrum.....	217
6.14.1	Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen durch die Tidesteuerung.....	218
6.14.2	Zunahme der Sauerstoffgehalte durch die Tidesteuerung	227
6.14.3	Abnahme der Salzgehalte durch die Tidesteuerung	239
6.15	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salzgehalte der Ems (begleitende Modelluntersuchung).....	245
6.16	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Flüssigschlickverteilung zwischen Knock und Herbrum	246
6.16.1	Zusammenfassung Flüssigschlick	250
6.17	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse des Emders Fahrwassers und Emders Außenhafens	251
6.17.1	Das Referenzprofil	251
6.17.2	Barre im Einfahrtsbereich des Außenhafens.....	256
6.18	Auswirkungen der Tideniedrigwasseranhebung auf die Bewirtschaftung des Emders Hafens - Monitoringbericht NPorts Emden	260
6.18.1	Allgemein.....	260
6.18.2	Veränderte Einsatzzeiten, Mehrstunden und veränderte Einsatzschwerpunkte	260
6.18.3	Mengenentwicklungen, auch im Hinblick auf Vergleichszeiträume in den Vorjahren.....	263
6.18.4	Auffälligkeiten während des Testbetriebs.....	272
6.18.5	Auffälligkeiten nach Beendigung des Testbetriebs	272
6.18.6	Umschlag / Beschreibung der Rampenproblematik	276
6.18.7	Schleusen.....	277
6.18.8	Binnenhafen	278
6.18.9	Maschinentchnik	278
6.18.10	Belegung der Warteplätze für die Binnenschiffe	278
6.19	Auswirkungen der Tidesteuerung auf den Schiffsverkehr	279
6.20	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse mehrerer Querprofile der Unterems.....	280
6.20.1	Querprofile Emden (Ems-km 40,7 bis 43)	281

6.20.2	Querprofile Jemgum (Ems-km 19 bis 24)	284
6.20.3	Querprofile bei Papenburg (Ems-km 0 bis 5)	288
6.21	Mögliche Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sedimentzusammensetzung	292
6.21.1	Darstellung der Sedimente von Papenburg bis zur Knock	293
6.21.2	Sedimentuntersuchung der Liegewannen im April, Mai und Juni 2020	300
6.22	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse im Bereich des Emssperwerkes 303	
6.22.1	Durchgeführte Flächenpeilungen	303
6.22.2	Die vorhandenen Tiefenverhältnisse am Emssperwerk und dessen Umgebung	304
6.22.3	Verhalten der Gewässersohle in der Versuchsphase der Tideniedrigwasseranhebungen 307	
6.22.4	Auswirkungen der Flutstromtidesteuerung auf die Gewässersohle am Emssperwerk 309	
6.23	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse von Außenmuhden	312
6.23.1	Ausführung der Messung	312
6.23.2	Die mittlere Höhendifferenz der Schlickoberfläche	313
6.23.3	Stärkste Zu- und Abnahmen der Tiefenverhältnisse	314
6.23.4	Zusammenfassung	323
6.24	Belastung der Verschlusskörper (Nebenöffnungen) durch die Tidesteuerung	324
7	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung	326
7.1	Aspekt Aussagekraft des Technischen Tests	326
7.1.1	Unterbrechung der Tidesteuerung	326
7.1.2	Natürliche Randbedingungen des Tests - Ausgangssituation der Gewässergüte	326
7.1.3	Art des Monitorings	327
7.2	Aspekt Schwebstoff und Flüssigschlick	328
7.2.1	Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Schwebstoffsituation und Flüssigschlickbildung	328
7.2.2	Auswirkung der Flutstromtidesteuerung auf die Schwebstoffsituation und Flüssigschlickbildung	330
7.2.3	Betrachtung der Auswirkungen der Tidesteuerung während des gesamten gesteuerten Zeitraumes	330
7.2.4	Langfristige Auswirkung der Tidesteuerung	331
7.2.5	Übertragung der Aussagen auf das Leda-Jümme-Gebiet	331
7.3	Aspekt Sedimentation und Erosion in der Ems	332
7.3.1	Bereich Emden	332
7.3.2	Bereich Jemgum	332

7.3.3	Bereich Papenburg	332
7.4	Aspekt Sedimentation im Emdener Fahrwasser, in den Liegewannen und im Außenhafen Emden 333	
7.5	Aspekt Beeinflussung der Hafenwirtschaft - NPorts	334
7.6	Aspekt Sauerstoff	336
7.6.1	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sauerstoffverhältnisse	336
7.6.2	Intermittierender Betrieb der Tidesteuerung	337
7.6.3	Unterbrechung der Tidesteuerung.....	337
7.6.4	Nachhaltigkeit der Tidesteuerung	338
7.6.5	Unterschiedliche Wirkung der Steuerungsvarianten	338
7.6.6	Übertragung der Aussagen auf das Leda-Jümme-Gebiet.....	338
7.7	Aspekt Salz.....	339
7.7.1	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salzgehalte	339
7.7.2	Unterbrechung der Tidesteuerung.....	340
7.7.3	Übertragung der Aussagen auf das Leda-Jümme-Gebiet.....	340
7.8	Aspekt Verträglichkeit der Tidesteuerung für das Emssperrwerk	341
7.8.1	Sohlsicherung	341
7.8.2	Tore.....	342
7.9	Aspekt Wasserstand	342
7.9.1	Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung.....	342
7.9.2	Auswirkung der Flutstromtidesteuerung	343
7.10	Aspekt Grundwasserstand	343
7.11	Aspekt Sunk Emders Außenhafen.....	344
7.11.1	Der Absink des Wasserstands im Emders Außenhafen	344
7.11.2	Möglichkeit zur Verringerung des Absinks.....	344
7.12	Aspekt Sunk, Schwall und Stauphase in der Ems	344
7.12.1	Sunk und Schwall.....	344
7.12.2	Stauphase	345
7.13	Aspekt Strömung	345
7.13.1	Veränderung der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Tideniedrigwasseranhebung	345
7.13.2	Veränderung der maximalen Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Flutstromtidesteuerung	347
7.13.3	Auswirkung der Tidesteuerung auf die Strömungsverhältnisse am Emssperrwerk ...	348
7.14	Aspekt Außenmuhden.....	348
7.15	Aspekt Sielentwässerung.....	349

7.15.1	Sielentwässerung entlang der Ems.....	349
7.15.2	Sielentwässerung im Leda-Jümme-Gebiet	350
7.16	Aspekt Flusstauraum und Hochwasserschutz im Leda-Jümme-Gebiet.....	351
7.17	Aspekt Beeinflussung der Tideniedrigwasser in den oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer im Leda-Jümme-Gebiet.....	352
7.17.1	Vermeidung extrem niedriger Tideniedrigwasser im Leda-Jümme-Gebiet	352
7.17.2	Überschneidung der Wirkung von Tidesteuerung und Oberwasser auf die Tideniedrigwasseranhebung	352
7.18	Aspekt Sportbootverkehr im Leda-Jümme-Gebiet.....	353
7.19	Aspekt Schifffahrt	354
8	Literaturverzeichnis	354
9	Anlagen.....	356

Aurich im März 2022

Kontakt:

Andreas Engels (andreas.engels@nlwkn.niedersachsen.de)

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

Betriebsstelle Aurich (NLWKN Aurich)

Oldersumer Straße 48

26603 Aurich / Germany

www.masterplan-ems.info

Masterplan Ems 2050- Technischer Test im Sommer 2020

Ergebnisse des Monitorings - Zusammenfassung

Während des Sommerhalbjahres kennzeichnen hohe Schwebstoffkonzentrationen, eine mächtige Flüssigschlickschicht, niedrige Sauerstoffgehalte und hohe Salzkonzentrationen die Unterems. Zudem verursacht die Unterhaltung der Fahrwassertiefen hohe Kosten. Ein vorrangiges Ziel des Masterplans ist die Lösung des Schlickproblems in der Unterems. Damit im Zusammenhang steht die Verbesserung des Gewässerzustandes in der Tideems, womit günstige Erhaltungszustände im Sinne der entsprechenden Richtlinien erreicht werden sollen.

Im Sommer 2020 wurde in 42 Tiden die Variante „Tideniedrigwasseranhebung“ und in fünf Tiden die Variante „Flutstromtidesteuerung“ getestet und durch eine umfangreiche Messkampagne begleitet.

Das wichtigste Ergebnis: Grundsätzlich stellte sich heraus, dass bereits vereinzelt Tideniedrigwasseranhebungen einen positiven Effekt auf die Gewässergüte hatten. Die Schwebstoffgehalte sanken deutlich, in einzelnen Flussabschnitten wurde die Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht deutlich reduziert, die Salzgehalte nahmen ab und die Sauerstoffwerte stiegen. Diese Ergebnisse zeigten sich je nach Intensität der Steuerung in unterschiedlichem Maße, der positive Effekt aber war klar erkennbar.

Zusammenfassend sind folgende Ergebnisse zu nennen:

- Trotz häufiger Unterbrechungen ist der Technische Test aussagekräftig.
- Je häufiger die Tidesteuerung ausgeführt wurde, desto größer war deren Effizienz und Nachhaltigkeit.
- Es trat eine signifikante Abnahme der Schwebstoffgehalte ein.
- Die mobile Flüssigschlickschicht wurde verringert.
- In der Unterems stellte sich bis mindestens zur Geisespitze eine ebbstromdominante Strömungscharakteristik ein, die sich positiv auf den Feststofftransport auswirkte.
- Die Sauerstoffverhältnisse wurden deutlich verbessert.
- Das Vordringen salzhaltigen Wassers wurde vermindert.
- Das Emssperrwerk ist baulich für die Tidesteuerung geeignet. Von der Tideniedrigwasseranhebung ging keine zusätzliche Belastung der Sohlsicherung aus; die Sohlsicherung hielt den Belastungen der Flutstromtidesteuerung stand.
- Die Tideniedrigwasseranhebung führte zur zusätzlichen Sedimentation im Emders Fahrwasser und im Emders Außenhafen.
- Die Bewirtschaftung des Emders Außenhafens wurde durch die erhöhte Sinkgeschwindigkeit des Wasserstandes sowie den niedriger eintretenden Tideniedrigwasserständen ungünstig beeinflusst. Aus der Verzögerung des Ladebetriebs resultiert eine Verlängerung der Liegezeiten. Damit geht eine Beeinträchtigung der Unterhaltungsbaggerung in den Liegewannen einher, die durch zusätzliche Personal- und Gerätezeiten kompensiert werden müssen.
- Die Tideniedrigwasseranhebung führte oberhalb des Emssperrwerks zu einer Schwallwelle, die in Richtung Herbrum an Stärke abnahm. Unterhalb des Bauwerks führte diese

Steuerungsvariante zu einer Sunkwelle, die in Richtung Knock auslief. Unterhalb des Emssperrwerks führte das rasche Absinken des Wasserstands sowie die niedriger eintretenden Tideniedrigwasser zur Beeinträchtigung der Hafenvirtschaft im Emdener Außenhafen. Darüber hinaus führte die Wasserstandsbewegung weder ober- noch unterhalb des Emssperrwerks zu einer Beeinträchtigung oder Gefährdung des Schiffs- oder Bootsverkehrs. Im Zusammenhang mit dem Sunk und Schwall wurden im Bereich der Liegestellen entlang der Ems auch keine kritischen Strömungsgeschwindigkeiten beobachtet.

- Von der intermittierenden Tideniedrigwasseranhebung ging keine Beeinträchtigung der Siedentwässerung aus. Ein Nachteil für die Unterhaltung der Außenmuhden konnte aufgrund der vorliegenden Datenlage und vor dem Hintergrund der natürlichen Sedimentumlagerung nicht nachgewiesen werden. Eine turnusmäßige Vermessung der Außenmuhden wird angeraten.
- Die Tideniedrigwasseranhebung führte zu keiner Beeinflussung des Hochwasserschutzes im Leda-Jümme-Gebiet.
- Die Tideniedrigwasseranhebung kann das Eintreten sehr niedriger Tidewasserstände im Leda-Jümme-Gebiet verhindern.

Für die Schifffahrt relevante Beobachtungen wurden vom WSA Ems-Nordsee und von NPorts dokumentiert und gehen jeweils in ein gesondertes Gutachten ein.

Ergebnisse des Monitorings - Kurzfassung

I. Einleitung

a. Aufbau des Monitoringberichts – schnelle Kurzfassung und detaillierte Langversion

Der Monitoringbericht ist als fortzuschreibendes Dokument zu verstehen, da es sich um eine Zusammenstellung von Auswertungen komplexer Sachverhalte handelt, die nicht in allen Einzelheiten aufeinander abgestimmt sind. Dabei geben die Beiträge der beteiligten Institutionen die Auffassung der jeweiligen Bearbeiter wieder.

Die Kurzfassung des Monitoringberichts gibt einen schnellen Überblick über den Technischen Test und nennt die Veranlassung und die wichtigsten Fragen und Antworten. Die daran anschließende Langfassung enthält eine detaillierte Schilderung der Entwicklung der Gewässergüte, der hydro-meteorologischen Randbedingungen des Versuchs, der aktuellen Ausgangslage der Gewässergüte und der Funktionsweise des Emssperrwerks. Der Langfassung sind alle Details der Messungen zu entnehmen, und zwar wann – was – wo gemessen wurde und welche Messtechnik zum Einsatz kam. Anschließend werden alle Messergebnisse vollständig dargelegt und interpretiert. Am Ende der Langfassung befindet sich eine Bewertung der Tidesteuerung aus verschiedenen Perspektiven. Zu jedem Aspekt erfolgt dort eine zusammenfassende Erläuterung des Sachverhaltes. Einige Institutionen haben über die von Ihnen ausgeführten Messungen einen eigenständigen Monitoringbericht verfasst. Diese Berichte sind der Langfassung als Anlage beigelegt.

b. Hintergrund – Ausbau der Unterems

Natürlicherweise bildet sich am oberen Rand der Brackwasserzone die sogenannte Trübungszone aus, in der die Schwebstoffkonzentration im Wasser sowie der Schlickanfall an der Gewässersohle naturgemäß besonders ausgeprägt ist. Je nach Randbedingungen können die Konzentrationen von Schwebstoff, Sauerstoff und Salz verhältnismäßig stark schwanken. Die über mehrere Jahrzehnte durchgeführten Begradigungen und Vertiefungen der Tideems führten einerseits zur landeinwärts gerichteten Verschiebung der Brackwasserzone und andererseits zu massiven Änderungen des Sedimenthaushaltes mit einer Ausweitung der Trübungszone über die eigentliche Brackwasserzone hinaus, sowie gleichzeitig zum Anstieg des Trübungsmaximums. Im ursprünglichen Zustand der Ems lag das Trübungsmaximum zwischen Gandersum und Leerort. Die bis in die 1980er Jahre ausgeführten Ausbaumaßnahmen verlagerten das Trübungsmaximum in den Abschnitt zwischen Terborg und Leerort. Nach den Vertiefungen Anfang der 1990er Jahre veränderte sich dann die Gestalt der Trübungszone, so dass zwischen Gandersum und Herbrum insgesamt höhere Trübungen festzustellen waren. Damit war die Trübungszone bis weit in den Süßwasserbereich, in diesem Fall bis zum Tidewehr Herbrum, vorgedrungen. Während des Sommerhalbjahres kennzeichnen hohe Schwebstoffkonzentrationen, eine mächtige Flüssigschlickschicht, niedrige Sauerstoffgehalte und hohe Salzkonzentrationen die Unterems. Zudem verursacht die Unterhaltung der Fahrwassertiefen hohe Kosten.

c. Heutiger Zustand der Unterems – Feststoffimport, schlechte Gewässergüte und hohe Kosten

Der Ausbau der Unterems setzte mehrere Mechanismen in Gang, deren Zusammenwirken dazu führen, dass die Unterems mehr Feststoffe importiert als exportiert und sich somit mit diesen auflädt. Als wesentliche Eigenschaften sind zu nennen:

- Abnahme der Dämpfung der von See einschwingenden Tidewelle, so dass mehr Tideenergie in das Ästuar stromaufwärts gelangt,
- Zunahme des seeseitigen Einflusses (ästuarine Zirkulation),
- Intensivierung der Strömung (besonders während der Flutphase),
- Verkürzung der Flutstromdauer und Verlängerung der Ebbestromdauer,
- Zunahme des Tidehubs bzw. des Tidevolumens,
- Intensive Flutströmung und gemächliche Ebbströmung,
- um Tidehochwasser niedrige Strömungsgeschwindigkeit, wodurch sich Schwebstoffe absetzen und in der nachfolgenden Ebbephase erst spät durch die Strömung aufgenommen und begrenzt stromab transportiert werden,
- Um Tideniedrigwasser kaum Strömungsstillstand, wodurch Feststoffe in Schwebelag bleiben und mit der einsetzenden Flut sofort wieder weit stromauf transportiert werden,
- Intensivere Durchmischung des Wassers mit Schwebstoffen während der Flutphase als in der Ebbephase (Schichtung während der Ebbephase),
- Verringerung des Feststoffaustrags im Winter, Verstärkung des Feststoffeintrags im Sommer,
- Abnahme der Reibung, weitere Strömungskonzentration und Intensivierung des Transports, inkl. Salz,
- Aufladung der Unterems mit Feinsediment, hoher organischer Anteil,
- Schlechter ökologischer Zustand: Mächtige Flüssigschlickschicht, hohe Schwebstoffkonzentrationen, niedrige Sauerstoffkonzentrationen und erhöhte Salzkonzentrationen, hohe Variabilität in der Tide und innerhalb des Jahres,

- Hoher Kostenaufwand.

Ein ungünstiger Einfluss auf den Sedimenthaushalt der Unterems wird auch im Zusammenhang mit der Änderung der Unterhaltungsbaggerung im Emdener Außenhafen diskutiert. Seit 1995 wird dort kein Sediment mehr entnommen und an Land verbracht, so dass seitdem mehr Material im Gesamtsystem verbleibt.

Der Feststofftransport wird stets durch die Variation der Tide und des Frischwasserzuflusses (Oberwasserzufluss) überlagert. Der stromaufwärts gerichtete Transport nimmt mit zunehmender Tideintensität (z.B. Springtide) zu. Der Anstieg des Oberwasserzuflusses wirkt sich dagegen reduzierend auf den stromauf gerichteten Transport aus und kann diesen sogar umkehren. Dieses geschieht allerdings nur, wenn der Oberwasserzufluss eine kritische Marke überschreitet, die oberhalb des Jahresmittelwertes liegt.

d. Lösung des Schlickproblems - die Flexible Tidesteuerung

Die Lösung des Schlickproblems und die Verbesserung der Gewässergüte sind die wichtigsten Ziele des Masterplans Ems 2050. Dafür haben die Bundeswasserstraßenverwaltung und der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NWLKN) die „Flexible Tidesteuerung“ entwickelt. Über die Flexible Tidesteuerung nimmt das Emssperrwerk einen günstigen Einfluss auf die Tidebewegung, insbesondere auf den Feststofftransport der Ems. Die Tidesteuerung wirkt der Dominanz des Flutstroms entgegen. Bei der Tidesteuerung gibt es zwei Varianten:

Die Tideniedrigwasseranhebung: Dabei schließen die Tore des Sperrwerks während des ablaufenden Wassers, rd. eineinhalb Stunden vor Niedrigwasser. Dadurch wird Wasser oberhalb des vollständig geschlossenen Emssperrwerks zurückgehalten, wodurch dort der Wasserstand rund einen bis eineinhalb Meter höher stehen bleibt als bei „normalem“ Niedrigwasser. Stromab vom Sperrwerk läuft das Wasser im normalen Tideverlauf weiter ab und steigt in der danach einsetzenden Flut wieder an. Bei gleichem Wasserstand auf beiden Seiten des Sperrwerks werden die Tore wieder geöffnet. Das in der Unterems zurückgehaltene Wasser beruhigt sich während dieser Zeit und vermindert nach Öffnung des Sperrwerks den intensiven Flutstrom. Bei dieser Variante ist das Emssperrwerk für drei bis vier Stunden innerhalb einer Tide geschlossen, in der übrigen Zeit ist das Bauwerk vollständig geöffnet.

Die Flutstromtidesteuerung: Dabei werden die Tore bei Einsetzen der Flut teilweise geschlossen; die Hauptschiffahrtsöffnung komplett und die Nebenöffnungen bis auf unterschiedlich große Durchflussöffnungen. Durch die Einengung wird der Flutstrom großräumig gebremst. Wegen der lokal in der Nähe des Sperrwerks entstehenden höheren Fließgeschwindigkeiten ist für eine dauerhaft betriebene Flutstromsteuerung - anders als bei der Tideniedrigwasseranhebung - die Erweiterung der Sohlsicherung erforderlich. Daher wurde diese Variante während des Tests nur kurz ausprobiert. Bei dieser Steuerungsvariante ist das Emssperrwerk für etwa vier Stunden innerhalb einer Tide teilweise geschlossen und bleibt in der übrigen Zeit vollständig geöffnet.

e. Der Technische Test im Sommer 2020 und das begleitende Messprogramm

Ab dem 29. Juni 2020 wurde die Flexible Tidesteuerung über zwei Monate im Naturbetrieb getestet. Der Versuch wurde durch ein aufwändiges Messprogramm begleitet, um die Reaktion der Tideems auf die Steuerung zu erfassen.

Ursprünglich war geplant, während eines ersten Abschnitts des Tests die Tideniedrigwasseranhebung in jeder Tide durchzuführen. In einem Zweiten Abschnitt sollte die Tidesteuerung dann nur in etwa jeder zweiten Tide erfolgen, um eine geringere Beeinträchtigung des Schiffsverkehrs zu gewähren. Aus Rücksicht auf die Hafenwirtschaft Emden wurden während des Tests weniger Tiden gesteuert als geplant. Zudem ließ es sich auch nicht immer einrichten, dass immer direkt aufeinander folgende Tiden gesteuert wurden. Letztlich erfolgte die Tidesteuerung variabel, d.h. in unterschiedlichen Intensitäten. Dabei gab es Phasen, in denen direkt aufeinander folgende Tide gesteuert wurden, aber auch Zeitabschnitte vorkamen, in denen das Sperrwerk nur in jeder zweiten Tide oder auch seltener geschlossen wurde. Zwischen den gesteuerten Tiden gab es zum Teil längere Zeiträume, in denen das Sperrwerk nicht zum Einsatz kam. Tatsächlich glich die Steuerung durch die häufigen Unterbrechungen eher der verkehrsverträglichen Tidesteuerung, die zur Gewährleistung der Durchgängigkeit des Emssperrwerks für die Berufsschiffahrt und den Bootsverkehr auch ungesteuerte Tiden vorsieht.

Modelltechnisch lassen sich die Tidebewegung und der Feststofftransport in der Ems nachbilden. Darüber hinaus ist damit zu ermitteln, welche Einflussnahme die Tidesteuerung darauf ausübt. Die Aufgabe des Technischen Tests war, den positiven Effekt dieser Maßnahme unter realen Bedingungen sowie die Gebrauchstauglichkeit des Emssperrwerks unter Beweis stellen.

Folgende Fragen soll der Technische Test beantworten:

- Tritt eine signifikante Senkung der Schwebstoffgehalte ein?
- Wie verhält sich die Flüssigschlickschicht?
- Kann eine Flutstromdominanz unterbunden werden?
- Werden die Sauerstoffverhältnisse deutlich verbessert?
- Wird das Vordringen salzhaltigen Wassers in die Unterems gehemmt?
- Ist das Emssperrwerk an sich für die Tidesteuerung geeignet und hält die Sohlsicherung den Belastungen stand?
- Welcher Einfluss wird auf die Sedimentation und Erosion in der Ems ausgeübt?
- Gibt es negative Auswirkungen auf die Sedimentation im Emders Fahrwasser, im Emders Außenhafen und im Bereich der dortigen Liegewannen?
- Wird die Bewirtschaftung des Emders Außenhafens ungünstig beeinflusst?
- Wie wirkt sich die Tidesteuerung genau auf die Wasserstands- und Strömungsverhältnisse aus?
- Welche Auswirkungen sind auf die Sielentwässerung und auf die Unterhaltung der Außenmuhden zu erwarten?
- Gibt es eine Beeinflussung des Hochwasserschutzes im Leda-Jümme-Gebiet?
- Kann die Tideniedrigwasseranhebung das Eintreten sehr niedriger Tidewasserstände im Leda-Jümme-Gebiet verhindern?
- Wie wirken sich unterschiedliche Häufigkeiten oder Pausen der Tidesteuerungen auf die Wirkung aus?

f. Danksagung

Der technische Test wurde durch eine umfangreiche Messkampagne begleitet. Die daran beteiligten Institutionen waren das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ems-Nordsee (WSA), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Niedersachsen Ports Niederlassung Emden (NPPorts) und der NLWKN (Forschungsstelle Küste und Betriebsstelle Aurich). Die vielfältigen Messungen in der gesamten Tideems erforderten einen hohen personellen und materiellen Aufwand und waren nur durch den engagierten und persönlichen Einsatz aller beteiligten Kolleginnen und Kollegen sowie durch eine gut funktionierende Zusammenarbeit der Institutionen zu realisieren. Dafür ist allen Beteiligten zu danken!

II. Messkampagne während des Technischen Tests

Die verschiedenen Messungen erfolgten von Borkum bis Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet, zum einen stationär in hoher zeitlicher Auflösung und zum anderen mobil mit höherer räumlicher Information. Die stationären Messungen finden z.T. bereits seit mehreren Jahrzehnten statt und zeigen die Dynamik der jeweiligen Parameter in Abhängigkeit von Tide, Mondzyklus und Jahreszeit. Zudem lassen sich an den Langzeitmessungen Veränderungen ablesen, die durch den Ausbau der Ems hervorgerufen wurden. Die mobilen Messungen ermöglichten eine Datenerfassung an einer Vielzahl von Positionen und waren damit eine Ergänzung zu den stationären Messungen. Die Messungen begannen z.T. bereits vor dem Technischen Test und wurden auch über den Versuch hinaus weitergeführt. Zudem erfolgten die Messungen sowohl in gesteuerten als auch in ungesteuerten Tiden. Vor diesem Hintergrund ist die Wirkung der Tidesteuerung deutlich zu erkennen und lässt sich von der natürlichen Schwankung unterscheiden.

Es liegen Messwerte vor:

- Zu den meteorologischen Verhältnissen,
- Zum Abfluss aus dem Binnenland,
- Zur Torstellung des Emssperrwerks,
- Zur Tor-Schwingung / Emssperrwerk,
- Zu den Wasserständen der oberirdischen Gewässer und des Grundwassers (Ems, Leda-Jümme-Gebiet),
- Zu Wellen (Ems),
- Zur Strömung und Turbulenz (Ems)
- Zum Schwebstoffgehalt (Ems, untere Leda),
- Zum Sauerstoffgehalt (Ems, untere Leda),
- Zum Salzgehalt (Ems, Leda, Jümme),
- Zur Wassertemperatur (Ems, Leda, Jümme)
- Zu den Tiefenverhältnisse (Ems, Emssperrwerk, Emders Außenhafen, Liegewannen Emders Fahrwasser, Außenmuhlen der Siele und Schöpfwerke)
- Zu den Abmessungen, zur Ausdehnung und zu den Dichteverhältnissen der Flüssigschlickschicht (Ems, Emders Außenhafen, Liegewannen Emders Fahrwasser, Außenmuhlen der Siele und Schöpfwerke)
- Zur Sedimentzusammensetzung.

Die Wetterverhältnisse waren vor und während des Tests sehr unterschiedlich. Der Juli war insgesamt sehr wechselhaft, windig, kühl und nass. In der ersten und letzten Juliwoche waren jeweils über mehrere Tage Windstärken von über 7 Beaufort festzustellen. In der ersten Augushälfte stellten sich

stabilere Wetterverhältnisse ein. Eine mehrtägige Hitzewelle brachte in der letzten Woche des Tests heißes ($> 30^{\circ}\text{C}$) und trockenes Wetter. Die Wassertemperaturen während des Testzeitraums änderten sich mit der jeweiligen Witterung. Im Juni und August lagen die Wassertemperaturen deutlich über dem langjährigen Monatsmittelwert, während die Temperatur im Juli sogar unterdurchschnittlich war.

Die Abflussverhältnisse aus dem Binnenland waren zu Beginn und während des Tests unterdurchschnittlich. Im Juni und Juli wurden 70 bis 75% des jeweiligen Monatsmittelwertes erreicht und im August betrug das Oberwasser bis zum Versuchsende nur rd. 50 % des Monatsmittelwertes. Die Tidewasserstände wichen aufgrund der Windverhältnisse zeitweilig deutlich vom astronomischen Verlauf ab, wie z.B. bei der Sturmflut am 6. Juli (Windstau). In anderen Fällen waren sehr niedrige Wasserstände zu beobachten (Windsunk).

Vor Versuchsbeginn waren die Salzgehalte oberhalb von Terborg relativ niedrig und unterhalb davon relativ hoch. Die Schwebstoffkonzentrationen waren zwischen Knock und Weener relativ niedrig und bei Papenburg relativ hoch. Die Sauerstoffwerte waren zwischen Pogum und Weener relativ hoch, in Papenburg, Herbrum und an der Knock waren diese vor Versuchsbeginn relativ niedrig.

Aus Rücksicht auf die Schiffs- und Umschlagssituation im Emdener Außenhafen und den dazugehörigen Liegestellen entlang der Ems wurden insgesamt rd. 60% der ursprünglich vorgesehenen Tiden gesteuert. Diese Tidesteuerungen folgten nicht immer zeitlich direkt aufeinander, sondern fanden in unterschiedlicher Form intermittierend statt. In einem Fall musste die Tidesteuerung für mehrere Tage unterbrochen werden. Insgesamt wurden 42 Tiden nach der Methode der Tideniedrigwasseranhebung gesteuert und zudem 5 Flutstromtidesteuerungen ausgeführt.

III. Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Versuch

a. Ist der Test trotz Unterbrechungen aussagekräftig?

Insgesamt war während des Testzeitraums ein breites Spektrum unterschiedlicher Randbedingungen vorhanden: Die Tidesteuerung erfolgte phasenweise in direkt aufeinander folgenden Tiden und auch mit Unterbrechungen unterschiedlicher Dauer. In einem Fall war der Test sogar für 17 Tiden auszusetzen. Daneben herrschten ganz unterschiedliche hydro-meteorologische Randbedingungen während des Testzeitraums.

Zum einen konnten in den 47 Tidesteuerungen wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der technischen Eignung des Emssperrwerks, als zentrales Instrument dieser Maßnahme, gesammelt werden. Zum anderen war es im mehrwöchigen Beobachtungszeitraum trotz der Variabilität der hydro-meteorologischen Randbedingungen und der Steuerungsintensität möglich, einen guten Einblick in die Wirksamkeit der Tidesteuerung zu erhalten. Darüber hinaus lassen die Ergebnisse einen Ausblick hinsichtlich der Durchführbarkeit eines zukünftigen Dauerbetriebs und der Reduzierung des stromaufwärts gerichteten Feststofftransportes sowie der Verbesserung der Gewässerökologie (Gewässergüte) zu.

Eine wichtige Erkenntnis des Technischen Test ist, dass das Emssperrwerk technisch imstande ist, die Tidesteuerung auszuführen und dass bereits vereinzelt Tideniedrigwasseranhebung einen positiven Effekt auf die Gewässergüte ausübten. Allerdings reichte die Wirkung bei der Steuerung nur einer Tide nicht über diese hinaus. Wurden allerdings mehrere direkt aufeinander folgende Tideniedrigwasser angehoben, so zeichnete sich eine rasche und signifikante Verbesserung ab, die sich auch über den Zeitraum der gesteuerten Tide hinaushielt. Bei Übergang zu einer Steuerung jeder zweiten Tide war zwar eine Verschlechterung der Güte festzustellen, dieser war aber trotzdem besser als der Referenzzustand.

b. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Schwebstoffkonzentration und auf den Flüssigschlick

Tideniedrigwasseranhebung

Die Schwebstoffgehalte nahmen mit Beginn der Tidesteuerung unmittelbar über einen langen Abschnitt der Unterems stark ab, und zwar von der Wasseroberfläche bis zur Oberfläche des Flüssigschlicks. Im Verlauf des technischen Testbetriebs war von der Wasseroberfläche bis zur Oberkante des bis dahin noch vorhandenen Flüssigschlicks nur noch eine geringe Schwebstoffkonzentration vorhanden. Eine mobile Flüssigschlickschicht war an den Messpunkten dann nicht mehr zu beobachten, die ortsfeste (stationäre) Schicht nahm dafür an Mächtigkeit zu. Dadurch stand weniger Feststoff in Form von mobilem Flüssigschlick für den Transportprozess zur Verfügung. Durch die Reduzierung der vertikalen Durchmischung wurden Schwebstoffe nur noch in sehr geringem Umfang in die obere Wassersäule eingemischt und damit auch nicht mehr so intensiv (stromauf) transportiert. Da es durch die Tideniedrigwasseranhebung insbesondere zu einer Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten beim Einsetzen des Flutstromes kommt, konnte auch in Bezug auf die Schwebstoffgehalte während der Flutphase die deutlichste Reduzierung der Schwebstoffkonzentrationen beobachtet werden. Die transportierten Mengen konnten durch die Steuerung sowohl während Ebbstrom als auch während Flutstrom reduziert werden. Allerdings fiel die Reduzierung der Transporte bei Flutstrom stärker aus, da die besonders hohen Strömungsgeschwindigkeiten zu Beginn der Flutphase durch die Steuerung nicht mehr auftraten.

Die Tideniedrigwasseranhebung führte in den Abschnitten zur stärksten Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen, wo vor Testbeginn die höchsten Schwebstoffwerte gemessen wurden und wo sich bis dahin eine Flüssigschlickschicht ausgebildet hatte. Neben der verminderten Durchmischung des Wassers konnte mit dem Beginn der Tideniedrigwasseranhebung auch eine Ausdehnung der Flüssigschlickbildung Ems abwärts sowie eine Abnahme der Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht oberhalb von Papenburg beobachtet werden. Dieses Verhalten ist auf die Reduzierung der Tideenergie in der Unterems zurückzuführen.

Mit Beginn der Tideniedrigwasseranhebung konnte im Emders Fahrwasser eine Zunahme der stationären Schlickschicht bis zur mehrtägigen Unterbrechung der Steuerung beobachtet werden. Diese Zunahme könnte aufgrund der starken Tidevolumenreduzierung auf eine lokale Sedimentation innerhalb des Emders Fahrwassers hinweisen.

Die Naturmessungen ermöglichen in begrenztem Rahmen Aussagen hinsichtlich der Dauer, über die sich nach Beendigung der Tidesteuerung die Verhältnisse wieder bis in den ursprünglichen Zustand zurückbilden. In einer ungesteuerten Tide, die auf eine Tideniedrigwasseranhebung folgte, war die vertikale Durchmischung gegenüber dem Referenzfall noch reduziert und die Schwebstoffkonzentrationen blieben damit niedriger. Mit zunehmender Dauer der Unterbrechung stellten sich zunehmend wieder Verhältnisse ein, die mit denen des Referenzfalls vergleichbar waren. Daraus lässt sich ableiten, dass wahrscheinlich nach Beendigung der Steuerung innerhalb weniger Tiden wieder quasi unbeeinflusste Verhältnisse eintreten.

Flutstromtidesteuerung

Die Flutstromtidesteuerung soll einen höheren Feststofftransport bei Ebbe als bei Flut bewirken (netto-Stärkung des Ebbstromtransportes). Bei langfristiger Steuerung würde darüber die Feststoffmenge in der Unterems reduziert werden, woraus sich eine entsprechende Verminderung der Flüssigschlickbildung und der Schwebstoffkonzentrationen ergäbe.

Während des Technischen Tests deuteten die stationären Messungen dieses Verhalten grundsätzlich an. Die Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit war bei der Flutstromtidesteuerung nahezu so groß wie bei Tideniedrigwasseranhebung. Ein wesentlicher Unterschied beider Varianten war jedoch, dass bei der Tideniedrigwasseranhebung ein Zeitraum von ca. 2 h mit sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten vorkam, in dem sich ein großer Anteil der Schwebstoffe zur Sohle hin absetzen konnte. Dagegen verblieb bei der Flutstromtidesteuerung ein höherer Schwebstoffgehalt in der Wassersäule, der während der Ebbe unmittelbar stromab transportiert werden konnte. Da nur fünf Tiden mit dieser Variante gesteuert wurden, sind Aussagen über den Einfluss auf die Schwebstoffdynamik nur sehr begrenzt möglich. So ist auch kaum eine Aussage zur langfristigen Verlagerung oder Kompaktierung der Flüssigschlickschicht in Folge der Flutstromtidesteuerung möglich. Es zeigt sich jedoch, dass sich ebenfalls nach einer gesteuerten Tide eine Verlagerung bzw. horizontale Ausdehnung der mächtigen Flüssigschlickschicht einstellt, was dem Zustand bei der Tideniedrigwasseranhebung entspricht.

c. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sedimentation im Emders Fahrwasser, im Emders Außenhafen und im Bereich der Liegewannen

Die große natürliche Variabilität der Sedimentation und Erosion im Emders Fahrwasser erschwerte die Interpretation der dort erhobenen Messergebnisse hinsichtlich der Abhängigkeit von der Tideniedrigwasseranhebung. Allerdings spricht die Langzeitbeobachtung eines Referenzprofils dafür, dass tatsächlich größere Feststoffmengen transportiert wurden und sich so vom Emders Fahrwasser ausgehend auch im Außenhafen ablagern konnten. Neben einer Sedimentation, die sich im Fahrwasser insbesondere in den Bereichen mit Querschnittsaufweitung ergab, waren allerdings auch (Tiefen-) Bereiche vorhanden, in denen eine Erosion eintrat.

Es zeigte sich, dass generell ausgeprägte saisonale Schwankungen vorhanden sind, die zumindest für die Bereiche der emsnahen Liegewannen größere Bedeutung besitzen als die vermutliche Wirkung des Technischen Tests. So war anhand von Sedimentuntersuchungen bereits vor dem Test und direkt in den Liegewannen ein Anstieg des Sandgehaltes an einer überwiegenden Anzahl der Beprobungsstellen dokumentiert. Dieses wird hauptsächlich in Verbindung gebracht mit einer Intensivierung des Transportes mariner Sedimente, wie sie in den Sommermonaten und weit in den Herbst und Winter hinein unter geringen Oberwasserabflüssen typisch sind.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Sedimentation im Emders Außenhafen durch die Tideniedrigwasseranhebung zunahm. Auch die Umlagerung innerhalb des Außenhafens nahm möglicherweise dadurch zu, denn durch das größere Austauschvolumen infolge stärkerer Absenkung der Tideniedrigwasserstände und höherer Druckunterschiede infolge des Absunks könnten die stabilen Verhältnisse des bereits vorhandenen Flüssigschlicks beeinflusst haben. Darüber hinaus war eine Absenkung der Oberfläche des Flüssigschlicks im Außenhafen zu beobachten. Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass infolge der Tideniedrigwasseranhebung vermehrt Sand eingetragen wurde, der zu einer stärkeren Konsolidierung der Sedimente führte. Eindeutig belegt ist dieser Vorgang allerdings nicht - dieser Aspekt ist nur durch langfristige Messungen abzuklären.

Aufgrund der charakteristischen Strömungsverhältnisse im Einfahrtbereich des Außenhafens kommt es dort generell zu einer typischen Sedimentation, deren Gestalt als Barre bezeichnet wird. Die Ausprägung dieser Barre ist nicht statisch, sondern ändert sich entsprechend der stets dynamischen Einflussfaktoren. Die Barre weist im gemessenen Querschnitt die mehr oder weniger typische Form eines Sedimentationsmusters im Bereich von Hafeneinfahrten/Einmündungen auf, welche sich durch die sich ausbildende Scherzone und damit angrenzende Bereiche deutlich niedrigerer

Strömungsgeschwindigkeit sowie Turbulenz ergeben. Während des Technischen Tests lag hier eine sogenannte Mindertiefe vor, die für den Schiffsverkehr kritisch zu bewerten ist.

Nach dem Technischen Test wurde ein deutlicher Anstieg der Barrenhöhe und auch eine Verlagerung der Barre Hafen einwärts festgestellt. Die im September erreichte Höhe der Barre wurde allerdings bereits im Frühjahr vor dem Test übertroffen. Somit war ein Sedimentationsverhalten wie während und nach dem Technischen Test auch schon unabhängig davon zu beobachten.

Aufgrund der Vielzahl der beeinflussenden Faktoren ist anhand der bisher vorliegenden Daten die Ursache dieser Bewegung nicht zu benennen. Denkbar ist eine saisonale Änderung im Strömungs- oder Sedimentregime. Zur weiteren Beobachtung werden die Peilungen auf dem Referenzprofil weiter fortgesetzt.

d. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Bewirtschaftung des Emden Außenhafens

Der im Vorfeld des Technischen Tests prognostizierte Absink des Wasserstands bei Emden trat wie erwartet ein. Dieser führte allerdings zu vorher nicht von NPorts abgeschätzten Schwierigkeiten im Bereich des Außenhafens und den dazu gehörenden Liegewannen, so dass mehrfach Tidesteuerungen ausgesetzt werden mussten, um die Verzögerung der Ladevorgänge und den damit einhergehenden verlängerten Liegezeiten möglichst zu vermeiden. U.a. musste zeitweise der Ladevorgang von Autotransportern unterbrochen werden, da dieses die spezielle Konstruktion der Rampen erforderte. Grundsätzlich kann eine Verschiebung der Abfahrtszeiten zu Rückständen in den Folgehäfen führen. Es wurde erkannt, dass längere Schiffs Liegezeiten zu einer stärkeren Belegung der vorhandenen Liegeplätze führen, wodurch wiederum weniger Zeitfenster für die erforderlichen Unterhaltungsmaßnahmen (Unterhaltungsbaggerung/Rezirkulation) dieser Bereiche zur Verfügung stehen. Während des Testbetriebs konnte NPorts die erforderliche Unterhaltungsbaggerung nicht im normalen Rahmen durchführen. Es war eine intensive Abstimmung freier Zeitfenster erforderlich, da zum einen das Sediment häufiger zu bearbeiten war, um die Wassertiefen jederzeit sicherstellen zu können, zum anderen waren aufgrund der besonderen Umstände teilweise längere Liegezeiten der Schiffe vorhanden, wodurch die jeweiligen Liegestellen nicht jederzeit für die erforderlichen Arbeiten zugänglich waren. Durch diese außerplanmäßigen Einsatz- und Bereitschaftsstunden entstanden NPorts zusätzliche Kosten. Anhand der während des Tests gemachten Erfahrungen prognostiziert NPorts, dass bei einem Dauerbetrieb der Tidesteuerung die Einsatzzeiten des Nassbaggers ausgeweitet werden müssten, was zusätzliche Kosten verursachen würde und bei weiterer Zunahme nur mit einer Erweiterung des Gerätebestands abgedeckt werden könnte.

Die Kontrollpeilungen wurden während des Technischen Tests durch NPorts intensiviert. Bei Bedarf erfolgte eine zusätzliche Unterhaltungsmaßnahme in Form einer Rezirkulation in den Liegewannen. Im Außenhafen war keine nennenswerte Sedimentation in den Liegewannen festzustellen und die dortige Wochenrezirkulationsmengen blieben während des Technischen Tests im Rahmen der normalen Schwankungen. In den Liegewannen Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz und auch in den Zufahrtbereichen zu diesen Liegeplätzen war allerdings ein erhöhter Rezirkulationsaufwand nötig.

Im Normalfall beobachtet NPorts im Tidebereich des Hafens wechselnde Sandanteile. Dabei werden mittlere Anteile von etwa 25 % im Außen- und Vorhafen und von etwa 35 % im Bereich der Emsliegeplätze und ihrer Zufahrten festgestellt. Die im Zusammenhang mit der Beobachtung der Barre im Zufahrtbereich des Außenhafens erstellten Kornkurven ergeben außergewöhnlich hohe Sandanteile von etwa 50 %. Dieses Ergebnis ist allerdings noch eingehender vor dem Hintergrund der saisonalen Änderung im Strömungs- oder Sedimentregime zu bewerten. Zur weiteren Beobachtung werden durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ems-Nordsee Peilungen auf einem Referenzprofil weiter fortgesetzt.

Durch die Tidesteuerung entstand der Hafenbetriebszentrale (HBZ) ein zusätzlicher Aufwand: Für jedes Schiff musste im Vorfeld geprüft werden, ob unter Berücksichtigung des jeweiligen Tiefgangs und der Beeinflussung der Wasserstandsverhältnisse ausreichend Wassertiefe in der Liegewanne vorhanden sein würde. Jedes Schiff musste intensiv durch die Nautik betreut und ggfs. Ladungsvorgänge unterbrochen werden, woraus sich im Einzelnen eine zeitliche Verzögerung des Ladungsvorganges und darüber auch die o.g. Einschränkung des Zeitfensters für erforderliche Baggereinsätze folgte.

Der Hafentreiber NPorts weist ausblickend darauf hin, dass der Anteil der tiefgehenden Schiffe zukünftig zunimmt und damit die Beeinflussung der Wasserstandsverhältnisse um Tideniedrigwasser zunehmend ins Gewicht fallen wird.

e. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sauerstoffverhältnisse

Die Absolutwerte der Sauerstoffkonzentrationen waren vor Beginn des Tests niedrig, auch wenn diese abschnittsweise höher waren, als zu vergleichbaren Zeiten der Vorjahre. Mit Einsetzen der Tideniedrigwasseranhebung wurde das Sauerstoffniveau oberhalb von Gandersum insgesamt deutlich angehoben. Dabei äußerte sich die positive Wirkung am deutlichsten im oberen Abschnitt der Unterems, wo vor dem Test besonders niedrige Sauerstoffkonzentrationen vorhanden waren. Unterhalb von Gandersum nahm der wind- und tidebedingte Einfluss auf die Sauerstoffgehalte zu, allerdings war auch hier eine Verbesserung der Situation zu erkennen. Die sich einstellenden hohen Sauerstoffkonzentrationen waren als untypisch für die sonst sehr niedrigen Werte des Sommers zu bezeichnen und traten in vergleichbarer Art bisher nur bei außergewöhnlichen Randbedingungen auf, wie z.B. bei hohem Oberwasserzufluss oder niedriger Wassertemperatur.

Die vertikalen Sauerstoffgradienten änderten sich z.T. stark mit dem Wechsel der natürlichen Randbedingungen und der Steuerungsintensität. Bei intensiver Tidesteuerung traten relativ hohe Sauerstoffwerte über die ganze Wassersäule bis oberhalb der Flüssigschlickschicht auf. Je nach Kombination der Einflussfaktoren wurden jedoch zeitweise auch niedrige Sauerstoffgehalte im Sohlbereich, verbunden mit einem starken vertikalen Gefälle, beobachtet.

Je mehr Tideniedrigwasseranhebungen in direkter Folge ausgeführt wurden, desto geringer war das Volumen der mobilen Flüssigschlickschicht, insbesondere oberhalb von Weener, und desto niedriger waren die Schwebstoffkonzentrationen zwischen Herbrum und Gandersum. Da im Flüssigschlick nur sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen oder gar kein gelöster Sauerstoff vorhanden ist, führte dessen Volumenabnahme auch zur Ausdehnung des sauerstoffreicheren Milieus. Darüber hinaus nahmen die Sauerstoffkonzentrationen im Wasserkörper insbesondere oberhalb von Leerort zu. War vorher oberhalb von Weener ein Bereich mit sehr niedrigen Sauerstoffwerten festzustellen, nahmen diese über die Folge der Tideniedrigwasseranhebungen zu. Dabei verkürzte sich die Strecke mit niedrigen Sauerstoffgehalten, bis dass überall relativ hohe Werte vorhanden waren.

Bei Aussetzen einer Tidesteuerung traten nicht sofort hohe Schwebstoffkonzentrationen bzw. niedrige Sauerstoffwerte auf. Im Technischen Test wurde zeitweise ein Anteil von > 60% der Tiden gesteuert, womit gegenüber dem Referenzzustand eine wesentliche Verbesserung der Verhältnisse erreicht werden konnte. Erst bei Steuerung eines geringeren Anteils der Tiden, insbesondere bei einem Aussetzen der Tidesteuerung über mehrere Tiden in Folge, setzte eine signifikante Verschlechterung der Gewässergüte ein.

Ein wesentlicher Unterschied der Steuerungsvarianten ist, dass bei der Tideniedrigwasseranhebung die Tideenergie in der Unterems sehr viel stärker reduziert wird als bei der Flutstromtidesteuerung. Dieses führt zu einer Beruhigung der Bewegungsvorgänge, zur Verminderung der Resuspension und

insbesondere im oberen Abschnitt der Unterems zur Abnahme der Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht. Der Wechsel der Steuerung von der Tideniedrigwasseranhebung auf die Flutstromtidesteuerung führt daher wieder zur Zunahme der Schichtdicke der Flüssigschlickschicht und es kommt zur Neubildung der mobilen Flüssigschlickschicht durch lokale Resuspendierung. Erst über eine längere Dauer als während des Technischen Tests für diese Variante zur Verfügung stand, würde sich der eigentliche Effekt zeigen, indem u.a. ein ebbseitiger Nettotransport zum Austrag von Feinsediment, zur Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen und darüber zur Zunahme der Sauerstoffwerte in der Unterems führt. Die Anzahl von fünf Flutstromsteuerungen am Ende des Technischen Tests reichte nicht aus, um die Wirkung dieser Variante unter Beweis zu stellen.

f. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salzgehalte

Unmittelbar vor Beginn des Tests waren von Herbrum/Heede bis Terborg niedrigere Salzgehalte als im langjährigen Mittel vorhanden. Dieses traf insbesondere für die Stationen Leerort, Leer (Leda) und Weener zu. Unterhalb von Terborg waren dagegen höhere Salzgehalte festzustellen. Unter den gegebenen Randbedingungen führte die Tidesteuerung zur weiteren Abnahme der Salzgehalte, und zwar am deutlichsten von Terborg bis Weener. Der Einfluss der Steuerung hob sich deutlich von dem der natürlichen Randbedingungen ab. Im Zeitabschnitt vor der mehrtägigen Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.) betrugen die maximalen Salzgehalte bei Terborg rd. 50%, bei Leerort rd. 40% und bei Weener rd. 75% des Ausgangszustands. Die Schwankung der Werte unterhalb von Terborg gingen im Wesentlichen auf die Variation der Salzgehalte im Mündungsbereich und die Werte bei Papenburg zumeist auf die Salzgehalte im zufließenden Oberwasser zurück.

Während der Unterbrechung des Tests nahmen die Salzgehalte synchron mit der zunehmenden Anzahl der ungesteuerten Tiden zu.

g. Verträglichkeit der Tidesteuerung für das Emssperrwerk

Sohlsicherung

Die Tideniedrigwasseranhebung lässt grundsätzlich keine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in Bauwerksnähe erwarten. Dagegen ist bei der Flutstromtidesteuerung durch den Spaltdurchfluss des teilweise geöffneten Sperrwerks prinzipiell mit erhöhten Geschwindigkeiten und zu Umlagerungen des Sohlmaterials zu rechnen. Für die Flutstromtidesteuerung wurde im Vorfeld des Versuchs eine Torsteuerung entworfen, die zu einer möglichst gleichmäßigen Verteilung des Durchflusses im gesamten Querschnitt führen soll. Schädliche Strömungsverhältnisse, so wie diese beim Versuch im August 2010 vorkamen, sind dadurch zu vermeiden.

Bei den durchgeführten Flutstromtidesteuerungen waren in direkter Sperrwerksnähe auf Oldersumer Seite Turbulenzen und an den Dalben Wirbel zu beobachten. Diese gingen aufgrund der gewählten Torsteuerung mit zunehmendem Abstand zum Sperrwerk in eine ruhige und über die gesamte Gewässerbreite verteilte Strömung über, ohne großräumige Wirbel auszubilden. Auf Emders Seite waren keine vergleichbaren Bedingungen in unmittelbarem Sperrwerksbereich zu erkennen. Die Strömungsverhältnisse der Flutstromtidesteuerung führten zu einer örtlich begrenzten Erosion der Schlickauflage, die sich über längere Zeit vor dem Technischen Test auf der befestigten Sohle abgelagert hatte. Es war daher festzustellen, dass dort ausschließlich das auf der Sohlsicherung liegende Sediment abgetragen wurde, die Steinschüttung selber nicht angegriffen wurde. Nach jeder Flutstromtidesteuerung fand eine Kontrollmessung statt. Bereits in der Machbarkeitsstudie zur

Tidesteuerung wurde die mögliche Kolkentwicklung im Sperrwerksbereich durch ein Gutachten, das sich auf eine morphodynamische Modellrechnung stützte, prognostiziert. Die dabei berücksichtigte Torsteuerung entsprach der tatsächlich ausgeführten Steuerung, allerdings wurde eine durchweg höhere Tideintensität und über längere Zeit dauerhafte Steuerung zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Randbedingungen stimmte die Gestalt der Erosionsflächen auf Oldersumer Seite grundsätzlich mit dem Ergebnis dieser morphodynamischen Berechnung überein. Allerdings wurde darin angenommen, dass sich die Auskolkungen nicht nur im Abstrom des Sperrwerks (also auf Oldersumer Seite) auftreten, sondern auch im Anstrom. Der Grund dieser Prognose war, dass sich dort kurz vor dem Eintritt in die Sperrwerksöffnungen die Strömung konzentriert und diese dabei beschleunigt. Dieses kann dazu führen, dass an jeder Stelle dieses Bereichs mehr Sediment abtransportiert als antransportiert wird, was eine Kolkbildung zur Folge haben kann. Zusätzlich zu dieser Prognose kann auch angenommen werden, dass bei häufiger Tidesteuerung die Verlagerung der Hauptströmung dazu führt, dass sich diese ein neues Gerinne schafft. Der für die Emders Seite prognostizierte Erosionsprozess trat während des Test nicht in Erscheinung. Dieses kann mit der relativ geringen Anzahl der Flutstromtidesteuerungen zu tun haben, die insbesondere auch nicht dazu ausreichte, dass sich die Strömung ein neues Gerinne schuf.

Tore

Wie weit die Lasten und Anregungen der Teilöffnung der Hubtore Auswirkungen auf die Beanspruchung und Tragfähigkeit der Struktur haben, wurden durch Messungen erfasst bzw. Berechnungen ermittelt. Auf dieser Grundlage wurden computergestützte Belastungsanalysen der Festigkeit eines Hubtors durchgeführt sowie die Belastung durch eine dauerhafte Tidesteuerung bei einer kalkulatorischen Restnutzungsdauer der Verschlüsse beurteilt. Dabei wurde das am stärksten belastete Hubtor stellvertretend für alle Nebenöffnungen intensiv beobachtet. Aus den Messdaten lässt sich keine relevante Schwingungsanregung während der Tidesteuerung erkennen. Der Ermüdungsnachweis zeigt, dass infolge der betrachteten Fahrweisen über die kalkulatorische Restnutzungsdauer der Verschlüsse keine Schädigung der Struktur zu erwarten ist.

h. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstandsverhältnisse der Oberflächengewässer

Tideniedrigwasseranhebung

Die Auswirkungen der Tideniedrigwasseranhebung auf die Wasserstände waren von Dukegat bis Herbrum und im Leda-Jümme Gebiet bis über den Pegel Dreyschloot hinaus nachweisbar.

Die Steuerung führte oberhalb des Emssperrwerks zu einer Anhebung der Tideniedrigwasser bis nach Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet über Dreyschloot hinaus. Der Zeitbereich, über die der Wasserstand gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht war, begann mit dem beeinflussten Tideniedrigwasser, danach folgte der zügige Anstieg des Wasserstands (Schwall) und dann die „Stauphase“. Oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks, wo der Schwall und die sogenannte „Stauphase“ auftraten, wurden die Wasserstandsverhältnisse im Niedrigwasserbereich nur unvollständig durch die Höhe des beeinflussten Tideniedrigwassers charakterisiert, da dieses hauptsächlich den Schließwasserstand repräsentierte und nur für sehr kurze Zeit vorhanden war. Über eine Dauer von rd. zwei Stunden war oberhalb des Emssperrwerks der Wasserstand gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht. Insbesondere zur Beurteilung der Entwässerung im Freigefälle (Sielzug) war in diesen Abschnitten das sich nach dem beeinflussten Tideniedrigwasser einstellende

Wasserstandsniveau sowie die Dauer, über die der Wasserstand über dem einer unbeeinflussten Tide liegt, relevant.

Das Schließen des Emssperrwerks im Ebbstrom führt zur Ausbildung einer Schwallwelle, die sich oberhalb des Sperrwerks in Richtung Herbrum und auch in die Leda fortbewegt. Vor dem Hintergrund der durch den Schiffsverkehr verursachten Wellen führte die Steuerung des Emssperrwerks zu keinen negativen Auswirkungen.

Seewärts des Emssperrwerks führte die Steuerung zu einer Absenkung des Tideniedrigwassers, die sich bis zum Pegel Knock nachweisen ließ. Bei Emden fiel der Wasserstand in dieser zeitlich begrenzten Sunkwelle zumeist um 40 bis 45 cm. Dabei sank der Wasserstand mit 4-5 cm/min sehr viel schneller als in einer unbeeinflussten Tide (1-2 cm/min). Das Tideniedrigwasser trat anschließend gegenüber dem Referenzfall verfrüht und im Mittel 35 cm niedriger ein. Die schnellen Wasserstandsveränderungen stellten für den Hafen Emden speziell bei der Be- und Entladung eine Einschränkung dar. Die Sunkwelle, die sich unterhalb des Emssperrwerks ausbreitete und in Richtung Außenems auslief, stellte für in Fahrt befindliche Schiffe keine Beeinträchtigung dar. Mit Ausnahme der Schiffe in den Liegewannen des Emdener Außenhafens, war keine Beeinträchtigung der auf den ausgewiesenen Liegestellen der Ems befindlichen Schiffe festzustellen.

Flutstromtidesteuerung

An den Pegeln Dukegat bis Pogum führte die Flutstromtidesteuerung zu einer Erhöhung der Tideniedrigwasser. Im Abschnitt oberhalb des Emssperrwerks traten dagegen niedrigere Tideniedrigwasser ein. Dieses traf auch auf das Leda-Jümme-Gebiet zu. Allerdings lässt sich keine gesicherte Angabe der zu erwartenden Absenkung machen, da lediglich fünf Flutstromtidesteuerungen bei wechselnden Randbedingungen durchgeführt wurden.

i. Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Grundwasserstände

Der Großteil der Grundwassermessstellen reagierte unmittelbar auf die Tideniedrigwasseranhebung. Diese Reaktion resultierte aus der Kommunikation des Grundwassers mit dem, durch die Tidesteuerung beeinflussten, Oberflächengewässer und lässt mit zunehmender Entfernung zum Emssperrwerk, mit größer werdendem Abstand zu einem tidebeeinflussten Gewässer sowie einer größeren Filtertiefe der Grundwassermessstelle nach. Vor dem Hintergrund der ungewöhnlichen Witterungsverhältnisse mit dem zeitlich und lokal sehr unterschiedlichen Niederschlagsgeschehen sowie der kurze Beobachtungszeitraum lassen sich die beobachteten Wasserstandsschwankungen nicht eindeutig der Tidesteuerung zuordnen und auch keine langfristigen Auswirkungen durch die Steuerung prognostizieren.

Daher wird ein weiteres Monitoring, über einen längeren Zeitraum mit weiteren Messstellen verschiedener Filtertiefen und Entfernungen empfohlen, um auch die Wirkung der Tideniedrigwasseranhebung bis ins Binnenland differenzierter beurteilen zu können. Zudem sollten alle Parameter des Wasserhaushalts lokal erfasst und für die Auswertung herangezogen werden. Ein wichtiger Parameter, der bisher nicht berücksichtigt wurde, ist die Veränderung der Leitfähigkeiten während der Tideniedrigwasseranhebung. Dieser sollte im künftig analog zur Überwachung der Grundwasserstände erfasst werden. Für die Auswertung dieser zahlreichen und komplexen Datengrundlagen wird ein hydrogeologisches Gutachten erforderlich sein.

Ein weiteres Monitoring an der Deponie Breinermoor wird als nicht erforderlich angesehen, da die Messungen zeigten, dass die Tideniedrigwasseranhebung keinen Einfluss auf die Grundwasserstände hat.

Bei einer Flutstromtidesteuerung wird dagegen keine Veränderung der Grundwasserstände erwartet, da das Tidevolumen nur unwesentlich reduziert wird.

j. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Strömungsverhältnisse

Tideniedrigwasseranhebung

Die Tideniedrigwasseranhebung führte in der Unterems zur Ebbstromdominanz. Die Wirkung reichte mindestens bis zur Geisespitze. Die Tideniedrigwasseranhebung reduzierte die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten wesentlich stärker als die der Ebbe. Die Steuerung verhinderte vor allem am Anfang der Flutphase die typischerweise hohen Flutstromgeschwindigkeiten.

Oberhalb des Emssperrwerks, in Papenburg, Leerort und Terborg, war zu beobachten, dass durch die Tideniedrigwasseranhebung in der verbleibenden Zeit der Flutphase, die auf das Öffnen der Tore folgte, deutlich niedrigere maximale Flutstromgeschwindigkeiten auftraten als im ungesteuerten Zustand. Darüber hinaus war eine Phase von etwa 2 h zu beobachten, in der sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschten. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten waren von der Tideniedrigwasseranhebung dagegen kaum betroffen. Damit ergab sich eine günstige Änderung des Verhältnisses von Flut- zu Ebbgeschwindigkeiten - eine deutlichen Ebbstromdominanz.

Unterhalb des Emssperrwerks, in Emden, stellte sich ebenfalls eine eindeutige Ebbstromdominanz ein. Selbst nahe der Geisespitze wurde noch eine Ebbstromdominanz bewirkt, die allerdings weniger stark war als noch in Emden.

Da es durch die Tideniedrigwasseranhebung insbesondere zu einer Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten beim Einsetzen des Flutstromes kam, konnte auch in Bezug auf die Schwebstoffgehalte während der Flutphase die deutlichste Reduzierung der Schwebstoffkonzentrationen beobachtet werden. Auch wenn die darauffolgende Tide nicht gesteuert wurde war die vertikale Durchmischung noch teilweise reduziert. Die transportierten Mengen wurden durch die Steuerung während des Flutstroms reduziert, da die Zeiträume mit transportrelevanten Strömungsgeschwindigkeiten kürzer waren und weniger Material in die Wassersäule eingemischt wurde. Aber auch während des Ebbstrom war eine geringere Schwebstoffkonzentration zu beobachten. Durch die starke Verminderung des flutseitigen Transports ergab sich letztlich eine deutliche Ebbstromdominanz des Sedimenttransports in den gesteuerten Tiden.

Das vollständige Verschließen des Durchflussquerschnittes bei Ebbstrom führte zur Ausbildung einer Sunkwelle, die sich vom Emssperrwerk in Richtung Emden/Außenems bewegte sowie zur Bildung einer Schwallwelle, die von Gandersum in Richtung Herbrum lief. Aus den Strömungsmessungen ergaben sich keinerlei Hinweise auf eine signifikante Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten, die den Schiffs- oder Sportbootverkehr gefährden könnten.

Im Nahfeld des Emssperrwerks wurden die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten gegenüber dem Referenzzustand deutlich reduziert.

Flutstromtidesteuerung

Die Reduktion der transportwirksamen hohen Flutstromgeschwindigkeiten ist die Hauptwirkung der Flutstromtidesteuerung. Die Reduktion stellt sich in Abhängigkeit vom gewählten Verschlussgrad des Emssperrwerks ein und ist damit regelbar. Die eingetretene Wirkung war im Nahfeld des Emssperrwerks am größten und nahm in Richtung Papenburg deutlich ab. Die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten durch die Tideniedrigwasseranhebung war im Vergleich dazu bedeutend größer. Anders als bei der Tideniedrigwasseranhebung fehlt bei der Flutstromtidesteuerung der Zeitraum von ca. 2 h, in dem das Sperrwerk komplett verschlossen ist und ganz geringe Strömungsgeschwindigkeiten in der Unterems auftreten.

Im Nahfeld des Emssperrwerks führte die Flutstromtidesteuerung geringe bis keine Abnahmen der Geschwindigkeiten gegenüber unbeeinflussten Tideverhältnissen. Im unmittelbaren Bauwerksbereich, d.h. in weniger als 150 m Distanz, war von erhöhten Flutstromgeschwindigkeiten auszugehen. Hierzu lassen sich aus den durchgeführten Messungen jedoch keine Aussagen ableiten.

k. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Außenmuhden

Die vorliegenden Ergebnisse beruhen nur auf einer Vor- und einer Nachmessung, die in einem zeitlichen Abstand von zwei bis drei Monaten durchgeführt wurden. Im betreffenden Zeitraum gab es Phasen mit stärkerem Wind und es traten sogar leichte Sturmfluten auf. Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren ergibt sich eine starke Variabilität des Sedimentationsverhaltens. Im Weiteren ist davon auszugehen, dass die Sedimentationsvorgänge saisonal schwanken. Vor diesem Hintergrund lassen die vorliegenden Messergebnisse die Umlagerung in den Muhden selbst und den Ein- bzw. Austrag von Sediment nicht der intermittierenden Tidesteuerung zuordnen.

Werden die in den Muhden festgestellten Höhendifferenzen vorbehaltlich der großen Streuung der Messwerte als Resultat des Nettotransports interpretiert, wäre in den meisten Fällen zwischen der Vor- und der Nachmessung ein leichter Eintrag zwischen 0 und 5 cm und an der Knock sogar von 30 cm anzunehmen. Jedoch wäre in einigen Muhden dann aber auch ein Austrag von mehr als 20 cm vorhanden gewesen. Anhand des Nettoeintrags bzw. -austrags unterscheiden sich die oberhalb des Emssperrwerks befindlichen Muhden nicht grundlegend von denen unterhalb des Bauwerks, obwohl dieses grundsätzlich anzunehmen wäre. Insbesondere ist der relativ hohe Eintrag an der Knock nicht auf die ebenfalls unterhalb des Sperrwerks befindlichen Ausläufe Borßum, Ditzum und Petkum zu übertragen, wo sich die mittlere Höhenlage entweder kaum änderte oder sogar deutlich abnahm.

Um die von der Tidesteuerung verursachte Sedimentation bzw. Erosion generell von den natürlichen Transportvorgängen unterscheiden zu können, wäre eine längere Beobachtungsdauer erforderlich, z.B. über turnusmäßige Flächenpeilungen.

l. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sielentwässerung

Während des Technischen Tests war oberhalb des Emssperrwerks stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich, da die Tideniedrigwasseranhebung in intermittierender Form ausgeführt wurde. Eine reale Beeinträchtigung des Sielbetriebs bestand daher nicht. Selbst bei extremen Randbedingungen (hoher Außenwasserstand und hohe Abflussspende in den Einzugsgebieten der Mündungsbauwerke) wäre keine Gefahrensituation zu befürchten gewesen. Der Zeitbereich, über den der Wasserstand gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht war, betrug im Mittel rd. 2 Stunden. Mit Ausblick auf einen möglichen Dauerbetrieb der Tideniedrigwasseranhebung

wäre eine größere Aufmerksamkeit in den Übergangszeiten (Oktober / November und März / April) geboten, in denen einerseits noch eine Tidesteuerung sinnvoll sein kann, andererseits aber bereits höhere Abflussspenden vorhanden sein können. In diesen Zeiten ist bei Bedarf in Rücksichtnahme auf die Gebiete, die ausschließlich mit einem Siel entwässert werden und über kein Schöpfwerk verfügen, ein rasches Ändern des Betriebsplans mit Anpassung an die aktuellen hydrologischen Randbedingungen erforderlich

Sielentwässerung entlang der Ems

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser in der Unterems oberhalb von Emden aufgrund der Ausbaumaßnahmen abgenommen. Die Wasserstandsanhhebung durch die Tidesteuerung entsprach in Herbrum und Papenburg in etwa dem Maß, um das sich der Tideniedrigwasserstand in dem betreffenden Abschnitt in den letzten 50 Jahren abgesenkt hatte. Unterhalb von Papenburg war die Wasserstandsanhhebung größer als die zurückliegende Absenkung. An der Knock stieg in der Vergangenheit das Tideniedrigwasser auf natürlichem Wege leicht an. Die Tideniedrigwasseranhebung verursachte in diesem Abschnitt dagegen eine leichte Absenkung des Niedrigwasserstandes, was dem natürlichen Trend an der Knock entgegenstand.

Sielentwässerung im Leda-Jümme-Gebiet

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser im Leda-Jümme-Gebiet abgenommen, woraus sich günstigere Umstände für die Sielentwässerung ergaben. Die Wasserstandsanhhebung entsprach in etwa dem Maß, um das sich die Tideniedrigwasserstände in den letzten 50 Jahren absenkte. In der unteren Leda war die Wasserstandsanhhebung größer als die zurückliegende Absenkung.

m. Auswirkung der Tidesteuerung auf den Hochwasserschutz im Leda-Jümme-Gebiet

Durch die Absenkung des Tideniedrigwassers, die sich in den letzten Jahrzehnten durch den Ausbau der Ems ergab, nahm im Gegenzug die Größe des Flusstauraums zu. Dem steht zwar eine Abnahme des Flusstauraums durch eine Verschlickung und Verschlammung gegenüber, diese dürfte jedoch geringer sein als die Volumenänderung durch das sehr deutliche Absinken der Tideniedrigwasserstände. Im heutigen Zustand steht während eines Hochwasserfalls ein tendenziell größerer Stauraum im Gewässersystem zur Verfügung als in der Vergangenheit.

Ausblickend auf einen Dauerbetrieb der Tideniedrigwasseranhebung ist festzustellen, dass im Zeitraum von Mai bis September auf den dann vorhandenen meteorologischen Randbedingungen keine Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes durch die Tideniedrigwasseranhebung zu erwarten ist. Im Zeitraum von Anfang Oktober bis einschließlich April ist jedoch eine höhere Vorsicht geboten und die Tideniedrigwasseranhebung stets durch eine Prognose der Windverhältnisse (Windstau) sowie der Niederschlags- und Abflusssituation im Leda-Jümme-Gebiet zu begleiten. Zur Sicherheit sollte die Tidesteuerung in den Übergangszeiten auf ein Minimum zurückgefahren werden, sobald sich eine Phase erhöhter Tideniedrigwasserstände ankündigt, insbesondere, wenn zusätzlich zu den erhöhten Wasserständen ergiebige Niederschläge vorhergesagt werden. Die Phase des Technischen Tests, von Ende Juni bis Mitte August, befand sich in einem Zeitraum, in dem der Eintritt eines Hochwasserereignisses unwahrscheinlich ist.

n. Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tideniedrigwasserproblematik im Leda-Jümme-Gebiet

Die Änderung der hydrologischen Randbedingungen und die durch den Fahrwasserausbau abnehmenden Tideniedrigwasserstände in der Unterems führten in den letzten Jahrzehnten in den oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer zum häufigeren Eintritt außergewöhnlich niedriger Pegelstände. Dieses trifft für das abflussärmere Sommerhalbjahr und, im Zusammenhang mit der Betriebsweise des Ledasperrwerks, auch auf die Monate Oktober und November zu. In den betreffenden Gewässerabschnitten ist eine Vermeidung außergewöhnlich niedriger Wasserstände gewünscht und daher die Anhebung bzw. Stützung des Tideniedrigwassers willkommen. Hier ist besonders das Aper Tief zu nennen, in dem die außergewöhnlich niedrigen Wasserstände u.a. aus Sicht der Ökologie kritisch zu bewerten sind. Die betroffenen Abschnitte profitierten von der Tideniedrigwasseranhebung des Technischen Tests, da unter unbeeinflussten Bedingungen häufiger niedrigere Wasserstände eingetreten wären. Bei einer dauerhaften Tideniedrigwasseranhebung würde die Anzahl der extremen Tideniedrigwasser vermindert und zudem auch deren Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert.

o. Auswirkung der Tidesteuerung auf den Sportbootverkehr im Leda-Jümme-Gebiet

Seitens der Sportschifffahrt im Leda-Jümme-Gebiet besteht sowohl Interesse an niedrigen als auch hohen Tideniedrigwasserständen. Eine Anhebung des Tideniedrigwasserstandes erleichtert einerseits die Befahrbarkeit der Gewässer, andererseits kann diese die Durchfahrt unter den festen Brücken im Leda-Jümme-Gebiet begrenzen, wie z.B. in der Ortschaft Stickhausen, wo die feste Straßenbrücke (Burgstraße) und die Eisenbahnbrücke (Linie Leer-Oldenburg) den Nordgeorgsfehkanal queren.

Entsprechend der astronomischen und witterungsbedingten Einflussfaktoren unterliegen die Tidewasserstände einer natürlichen Schwankung. Hinzu kommt die Beeinflussung durch den Betrieb des Ledasperrwerks. Eine Tidesteuerung würde bei hohen Wasserständen im Leda-Jümme-Gebiet, verursacht durch hohes Oberwasser und/oder Windstau, pausieren. Die geringen Durchfahrtshöhen unter den festen Brücken würden daher nur durch die natürlichen Umstände hervorgerufen. Unter den Umständen, die zu sehr niedrigen Wasserständen führen, würde allerdings häufig eine Steuerung erfolgen, so dass in diesen Fällen niedrigere Durchfahrtshöhen vorhanden wären, als unter natürlichen Umständen zu erwarten.

p. Auswirkung der Tidesteuerung auf den Schiffsverkehr

Der technische Test ist für die gewerbliche Schifffahrt aufgrund umfangreicher Vorgespräche und Abstimmungen ohne größere Probleme verlaufen – die Schifffahrtstreibenden waren bereit, konstruktiv mitzuwirken.

Alle während des Versuches vorgetragenen Hinweise bzw. Anmerkungen oder Beschwerden wurden während des Tests im WSA Ems-Nordsee zentral erfasst und durch nachträgliche Interviews validiert und ausgewertet. Die Seeschifffahrt im Emdener Hafen kam wegen der umfangreichen und detaillierten Einzelabsprachen zwischen allen Beteiligten, hinsichtlich der prognostizierten Auswirkungen in dieser kurzen Testphase relativ gut zurecht. Durch die konstruktive Herangehensweise und das zeitweilige Aussetzen des Tests bei bestimmten Wasserständen, konnte der Umschlag im Hafen jederzeit sicher durchgeführt werden.

Trotz der grundsätzlich positiven Resonanz sollte insgesamt die Information der Schifffahrt, insbesondere der Binnen- und der Sportschifffahrt, noch weiter intensiviert werden.

Die Schließungen im Zuge der Tidesteuerungsmodelle bedingen diverse zeitweilige Sperrungen der Seeschiffahrtsstraße Ems für die gesamte dort verkehrende Schifffahrt. Es gibt Hinweise, dass die Unterems dann nicht mehr zu jeder Zeit ungehindert befahren werden kann, wodurch u.a. Konzentrationswirkungen des im Status Quo uneingeschränkten Verkehrsablauf zu besorgen sind.

IV. Schlussfolgerungen

Das Emssperrwerk ist technisch zur Tideniedrigwasseranhebung und zur Flutstromtidesteuerung geeignet. Während des Technischen Tests wurden weder am Bauwerk selbst noch an der Sohlsicherung Schäden durch die Steuerung verursacht. Bei einer dauerhaften Anwendung der Flutstromtidesteuerung wird die Verstärkung der Sohlsicherung empfohlen, die Tideniedrigwasseranhebung macht dieses nicht erforderlich.

Mit der Tideniedrigwasseranhebung nahmen die Schwebstoffkonzentrationen und auch die Salzgehalte deutlich ab, die Sauerstoffwerte stiegen deutlich an. Der mobile Flüssigschlack wurde vermindert und die vormals eindeutig flutstromdominanten Strömungsverhältnisse der Unterems wurden in eine Ebbstromdominanz umgekehrt, wodurch eindeutig ein positiver Einfluss auf den Sedimenttransport ausgeübt wurde. Die Flutstromtidesteuerung wurde nur sehr kurz getestet, allerdings zeichnete sich in den Ergebnissen ebenfalls der positive Effekt auf die o.g. Parameter ab.

Eine Flexible Tidesteuerung würde in saisonaler Ausführung zur Verbesserung der Gewässergüte führen sowie den Erhalt der Bundeswasserstraße Ems als leistungsfähigen Verkehrsweg für die Emshäfen sowie für die hafenauffine und wasserstraßenauffine Wirtschaft gewährleisten.

Um Abhilfemaßnahmen für die prognostizierten Auswirkungen im Emdener Hafen zu ermitteln, wurde von N-Ports bereits ein Gutachten in Auftrag gegeben. Auch das WSA Ems-Nordsee hat zwischenzeitlich ein Gutachten in Auftrag gegeben, in dem die Art der Betroffenheit bei dauerhafter Einführung einer flexiblen Tidesteuerung ermittelt wird und wodurch diese Auswirkungen minimiert werden können. Für die Schifffahrt allgemein sowie auch der Fahrgastschifffahrt gilt es, eine für beide Seiten passende Lösung zu finden.

V. Was lernen wir für die Zukunft?

Die Tidesteuerung muss nur saisonal angewendet werden und wird bei Überschreitung eines kritischen Oberwassers, vornehmlich im Winterhalbjahr, nicht erforderlich sein. Es wird empfohlen, die Tidesteuerung möglichst nicht länger als eine Tide auszusetzen. In Ausnahmefällen kann aber auch in zwei direkt aufeinanderfolgenden Tiden die Steuerung pausieren. Darüber hinaus ist es vorteilhaft, über eine bestimmte Dauer zu Beginn der Steuerungsphase sowie auch in der Springphase jede Tide zu steuern. Ein unmittelbarer Wechsel von Tideniedrigwasseranhebung und Flutstromtidesteuerung ist wenig sinnvoll. Allerdings ist eine phasenweise Anwendung der jeweiligen Variante in Abhängigkeit des Oberwassers denkbar und soll in die Entwicklung zukünftiger Steuerungsszenarien berücksichtigt werden. Zudem bietet ein zukünftiger Dauerbetrieb die Möglichkeit der weiteren Optimierung der flexiblen Tidesteuerung.

Eine dringende Aufgabe ist, die von der Tideniedrigwasseranhebung ausgehende Beeinträchtigung der Bewirtschaftung des Emders Außenhafens zu lösen. Zudem sind mit den Entwässerungsverbänden die Ergebnisse zur Wasserstandsanhebung und der möglichen Zunahme des Unterhaltungsaufwands der Außenmuhden zu diskutieren.

Masterplan Ems 2050- Technischer Test im Sommer 2020

Ergebnisse des Monitorings - Langfassung

1 Veranlassung des Technischen Tests Sommer 2020

Ein vorrangiges Ziel des Masterplans ist die Lösung des Schlickproblems in der Unterems. Damit im Zusammenhang steht die Verbesserung des Gewässerzustandes in der Tideems, womit günstige Erhaltungszustände im Sinne der entsprechenden Richtlinien erreicht werden sollen. Dabei sind die Reduzierung des stromaufwärts gerichteten Feststofftransportes, insbesondere während der abflussarmen Sommermonate, und die Verbesserung der Gewässerökologie (Gewässergüte, bessere Lebensbedingungen für die Gewässerfauna und -flora) angestrebt. Die Bewegungs- bzw. Transportvorgänge der Tide lassen sich durch ein gezieltes Steuern des Emssperrwerks günstig beeinflussen, so dass damit der flussaufwärts gerichtete Sedimenttransport nachhaltig vermindert und ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung des derzeitigen Schlickproblems geleistet werden kann.

Das Emssperrwerk in Gandersum ist ein multifunktionales Wasserbauwerk, welches zum Aufstau der Ems und zum Sperren von Sturmfluten eingesetzt wird. Der Einsatz zur Tidesteuerung ist eine Erweiterung dieser bisherigen Aufgaben. Der im Sommer 2020 durchgeführte Technische Test diente in erster Linie dazu, die technischen Anlagen für die zukünftige Tidesteuerung zu testen. Dabei wurde hauptsächlich die Tideniedrigwasseranhebung (TnWA) und für einige Tiden auch die Flutstromtidesteuerung (FsTs) getestet¹. Darüber hinaus erfolgte ein umfangreiches Monitoring, welches einen Einblick in die Wirkungsweise der Steuerung, u.a. auf die Gewässergüte, gibt.

2 Die Funktion des Emssperrwerks als multifunktionales Wasserbauwerk

2.1 Bisheriger Einsatz des Emssperrwerks

Im Jahre 2002 erfolgte die Fertigstellung des Emssperrwerks bei Gandersum, rd. 45 Kilometer unterhalb des Tidewehres Herbrum. Mithilfe dieses Mehrzweck-Wasserbauwerks ist seitdem ein besserer Sturmflutschutz bis in die Stauhaltung oberhalb des Wehres Herbrum gewährleistet. Außerdem ergibt sich auch ein zusätzlicher Schutz des Leda-Jümme-Gebietes, das seit 1954 zwar durch das Ledasperrwerk geschützt ist, dessen Konstruktion und Abmessungen allerdings nicht mehr den heutigen Sicherheitsanforderungen entsprechen. Zudem ermöglicht das Sperrwerk den Aufstau der Ems zur Überführung tiefgehender Werftschiffe von Papenburg in Richtung See. Der Einsatz des Bauwerks ist im Planfeststellungsbeschluss und dem darauf basierenden Betriebsplan geregelt².

¹ Antrag auf Erlaubnis gem. § 8 Abs. 1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) i. V. m. § 9 Abs. 1 Nr. 2 WHG für die Durchführung eines technischen Tests am Emssperrwerk für max. 8 Wochen in der Zeit vom 29.06.2020 bis zum 21.08.2020; Betriebsstelle Aurich des NLWKN, 10.03.2020

² Planfeststellungsbeschluss von 1998 und nachfolgende Planänderungsbeschlüsse

Ein Aufstau der Ems beginnt zumeist mit dem gleichzeitigen Schließen aller Sperrwerkstore zur Zeit des Tidehochwassers. In der nachfolgenden Zeit schwingt die Tidebewegung in der Ems oberhalb des geschlossenen Sperrwerks aus. Gleichzeitig steigt der Wasserstand in der Stauhaltung durch die Zuläufe maximal bis zum festgelegten Stauziel, wodurch die für die Überführungsfahrt erforderlichen Wassertiefen hergestellt werden. Während der Schließzeit existieren unterhalb des Sperrwerks weiterhin Tidebedingungen und damit wechselnde Höhendifferenzen zwischen den Wasserständen ober- und unterhalb der Tore. Die Sperrwerkstore sind für eine maximale Wasserstands Differenz von $> 5,5$ m ausgelegt. Zum Ende des Staus werden die Sperrwerkstore während einer Flutphase stufenweise gehoben und damit der Wasserstand in der Stauhaltung langsam abgesenkt. Die Sohlsicherung ist für eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von $8,4$ m/s im Spalt zwischen Drempe und Torunterkante ausgelegt. Somit beginnt die Öffnung erst nach Unterschreitung einer maximal zulässigen Wasserstands Differenz. Etwa bei Wassergleichstand des Ober- und Unterpegels kann das Sperrwerk vollständig geöffnet werden. Die Hauptschifffahrtsöffnung wird allerdings erst geöffnet, wenn alle anderen Tore gänzlich aus dem Wasser gehoben wurden. Damit wird eine unerwünschte Anströmung und damit Belastung dieses Verschlusskörpers vermieden. Im Mittel dauert der Öffnungsvorgang zwei bis drei Stunden. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten treten bei diesem Sperrwerkseinsatz während des Öffnungsvorganges auf der Emdener Seite auf. Mit bis zu drei Überführungen pro Jahr wurden bis 2020 insgesamt 43 tiefgehende Werftschiffe mit Hilfe eines Aufstaus der Ems überführt.

Im Planfeststellungsbeschluss ist festgelegt, dass nur Sturmfluten mit einer Scheitelhöhe von mindestens $\text{NHN} +3,7$ m (Gandersum) ausgesperrt werden. Bei Erwartung dieser Scheitelhöhe, ist das Sperrwerk erst ab einem Wasserstand von $\text{NHN} +3,5$ m zu schließen. Beim Schließvorgang tauchen die Tore in den Flutstrom ein, so dass im kleiner werdenden Spalt unterhalb der Torunterkanten für kurze Zeit eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit existiert. Die Hauptschifffahrtsöffnung wird vorab als erstes Tor geschlossen, erst danach folgen alle anderen Tore. Dadurch wird die Belastung dieses Verschlusskörpers minimiert. Die Öffnung des Sperrwerks erfolgt bei Wassergleichstand des Ober- und Unterpegels, indem alle Toröffnungen gleichzeitig freigegeben werden. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten treten bei diesem Sperrwerkseinsatz während des Schließvorganges auf der Oldersumer Seite auf.

Mit der ersten Sperrung im Dezember 2005 fanden bisher 15 Sturmflutschließungen statt. Im Mittel betrug der Zeitabstand zwischen den Sperrungen rd. ein Jahr, allerdings traten in manchen Jahren sogar vier Sturmfluten in einer Saison auf. Der kürzeste Zeitabstand zwischen zwei Sperrungen betrug nur ein Tag und der längste rund sechs Jahre.

2.2 Die Variante „Tideniedrigwasseranhebung“

Funktion³

Bei der Steuerungsvariante Tideniedrigwasseranhebung werden die Tore des Emssperrwerks ab einem bestimmten Wasserstand vor Eintritt des Tideniedrigwassers vollständig geschlossen und in der anschließenden Flutphase bei Wassergleichstand wieder geöffnet. Nach dem Schließzeitpunkt tritt oberhalb des Emssperrwerks zunächst eine Schwallwelle auf, die sich vom Sperrwerk aus stromaufwärts bewegt. In der Folgezeit schwingen dort Tidebewegung und Schwallwelle aus, sodass sich Strömung und Wasserstandsschwankung bis zum Öffnen der Tore zunehmend beruhigen. Damit geht eine Abnahme der Schwebstoffkonzentration, eine Sedimentation sowie eine Konsolidierung des Materials im Sohlbereich einher. Da das Sperrwerk bei ablaufendem Wasser schließt, wird gegenüber

³ Siehe auch Oberrecht, D. & Wurpts, A. (2019): Auswirkungen des geplanten technischen Testbetriebs zur Wirkung der flexiblen Tidesteuerung (Hydro- und Morphodynamische Modelluntersuchung); NLWKN-Forschungsstelle Küste; Gutachten 04/19; unveröffentlicht; Norderney im Nov. 2019, aktualisiert 13.05.2020

der freien Tide Wasser zurückgehalten. Somit stellt sich oberhalb des Emssperrwerks während der Schließzeit ein Wasserstandsniveau ein, welches höher ist als die dortigen Tideniedrigwasserstände einer unbeeinflussten Tide. Unterhalb des Sperrwerks ruft der Schließvorgang dagegen eine Sunkwelle hervor, die in Richtung Außenems ausläuft. Zudem tritt das Tideniedrigwasser unterhalb des Sperrwerks niedriger als in einer ungesteuerten Tide ein. Dieser Einfluss nimmt in Richtung Außenems, mit zunehmendem Abstand zum Sperrwerk, ab. Mit dem Öffnen der Sperrwerkstore bei Wassergleichstand setzt oberhalb des Emssperrwerks wieder der Tideeinfluss ein und setzt damit auch den dort zurückgehaltenen Wasserkörper wieder in Bewegung. Da dieses gegenüber einer unbeeinflussten Tide mit zeitlicher Verzögerung erfolgt, bildet sich in der noch verbleibenden Flutstromphase eine Strömungsintensität aus, die niedriger als im Referenzfall ist. Der Zeitraum, bei dem die nötige kritische Schubspannung zur Erosion durch die Strömung überschritten wird, verkürzt sich deutlich. Hierdurch werden weniger Feinsedimente aus dem Sohlbereich remobilisiert.

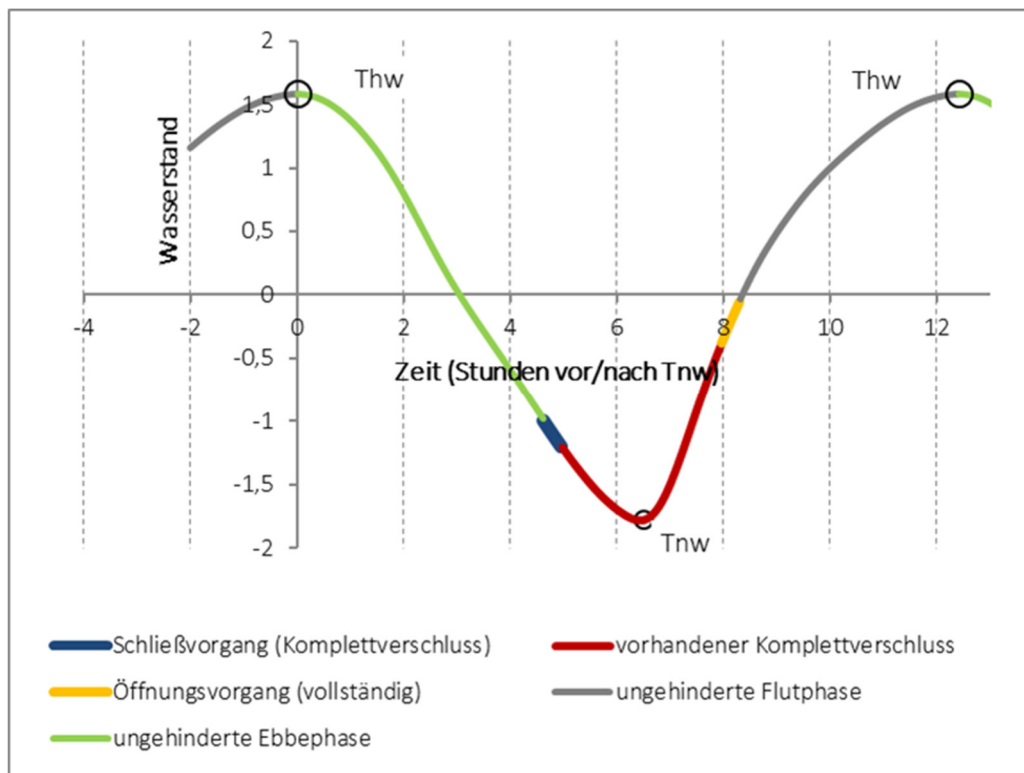


Abbildung 1: Zeitablauf der Tideniedrigwasseranhebung - exemplarische Darstellung

Praktische Ausführung der Tideniedrigwasseranhebung während des Technischen Tests

Die praktische Umsetzung sah so aus, dass die Unterkanten der Hubtore und des Drehsegments der Binnenschiffahrtsöffnung erst auf dem Wasser aufsetzten, als die Hauptschiffahrtsöffnung aus dem Wasser auftauchte. Dadurch wurde vermieden, dass bei der intensiven Ebberströmung der Verschlusskörper der Hauptschiffahrtsöffnung überströmt wurde, da sie sich darüber in Schwingung versetzt hätte. Unter Berücksichtigung der Fahrtgeschwindigkeiten wurde die Tore ab einem Wasserstand von NHN -0,8 m zeitlich gestaffelt verschlossen. Damit konnte erreicht werden, dass das gesamte Sperrwerk bei Eintritt des Zielwasserstands NHN -1,0 m geschlossen war. Die gewählte Steuerung gewährleistete zudem, dass alle Tore zum gleichen Zeitpunkt auf ihrem Drempel aufsetzten und damit eine ungünstige Strömungsverteilung im Gesamtquerschnitt vermieden wurde. Nach Ausspiegelung stellte sich am Oberpegel ein Wasserstand von etwa NHN -0,5 m ein. Das vollständige Schließen des Sperrwerks nahm im Mittel 25 Minuten in Anspruch. Da der Unterpegel weiterhin dem Tideeinfluss unterlag, stellte sich während der Schließzeit eine Wasserstandsdifferenz zwischen Ober- und Unterpegel ein, die zu Tideniedrigwasser bis zu 2,1 m betrug. Die Zeit, über die eine Wasserstandsdifferenz vorhanden war, betrug 1 ½ bis > 3 Stunden und steht für die Dauer, über die

das Sperrwerk einen direkten Einfluss auf die Hydrodynamik ausübte. Sobald der Wassergleichstand am Sperrwerk eintrat, wurden alle Tore gleichzeitig geöffnet. Für das vollständige Öffnen der Tore waren im Mittel 40 Minuten erforderlich. Zusammen mit den Sicherheitszeiten zur Sperrung bzw. Freigabe der Schifffahrt (Signalstellung), ergab sich eine Dauer der Schifffahrtssperrung von im Mittel 3½ Stunden je Tide. Während des Technischen Tests wurde hauptsächlich die Tideniedrigwasseranhebung durchgeführt. Insgesamt wurden nach dieser Variante 42 Tiden innerhalb des festgesetzten Testzeitraums gesteuert.

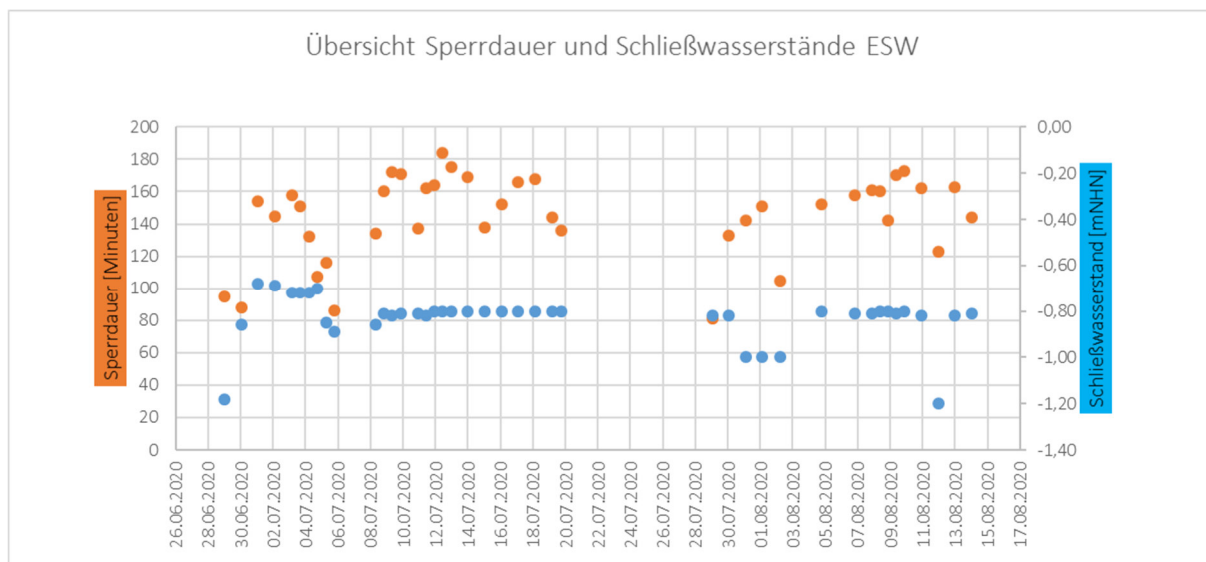


Abbildung 2: Schließdauer (rot, in Minuten) und Schließwasserstände (blau, in mNHN) des Emssperrwerks bei Ausführung der Tideniedrigwasseranhebung im Zeitraum 29.06. bis 14.08.2020; Anmerkung: bei den gewählten Schließwasserständen von zumeist NHN-0,8 m stellte sich oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks ein Wasserstand von etwa NHN -0,5 m ein.

2.3 Die Variante „Flutstromtidesteuerung“

Funktion⁴

Bei der Flutstromtidesteuerung wird das Emssperrwerk etwa bei Tideniedrigwasser teilgeschlossen, der Zustand über mehrere Stunden gehalten und noch vor Ende der Flutphase wieder vollständig geöffnet.

In der verbleibenden Zeit der Flutphase erfolgt eine ungehinderte Füllung der Ems oberhalb des Sperrwerks, womit das Tidevolumen letztlich nur unwesentlich reduziert wird. Während des Schließzeitraums erfolgt unter freien Tidebedingungen der intensivste, stromaufwärts gerichtete Sedimenttransport in die Unterems. Bei dieser Variante führt die Verringerung des Durchflussquerschnittes zu einer Drosselung der besonders starken, aufwärts gerichteten Strömungsintensität und damit zur Abschwächung der stromauf gerichteten Bewegungskomponente. Die Hauptschiffahrtsöffnung wird während dieser Zeit aus statischen Gründen vollständig geschlossen und somit weder unter- noch überströmt. Durch die optimierten Öffnungshöhen der anderen Tore wird grundsätzlich eine optimale Verteilung des Durchflusses über den Gesamtquerschnitt am Emssperrwerk erreicht und darüber eine ungünstige Strömungsbelastung auf das Bauwerk, sowie die Erosionstendenz im Sohlbereich ober- und unterstrom des Bauwerks minimiert. Da diese Variante jedoch trotzdem zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten im Nahbereich des Sperrwerks führt, geht von einem längeren Einsatz - anders als bei der Tideniedrigwasseranhebung – eine starke Belastung des

⁴ Siehe auch Oberrecht, D. & Wurpts, A. (2020): Hydro- und morphodynamische Auswirkungen der 4h-Flutstromsteuerung im Rahmen des geplanten technischen Testbetriebs zur Wirkung der flexiblen Tidesteuerung; NLWKN-Forschungsstelle Küste; Gutachten 01/20; unveröffentlicht; Norderney im Mai 2020

Sohlbereichs aus. Daher wurde diese Variante während des unten Technischen Tests nur für wenige Tiden ausprobiert.

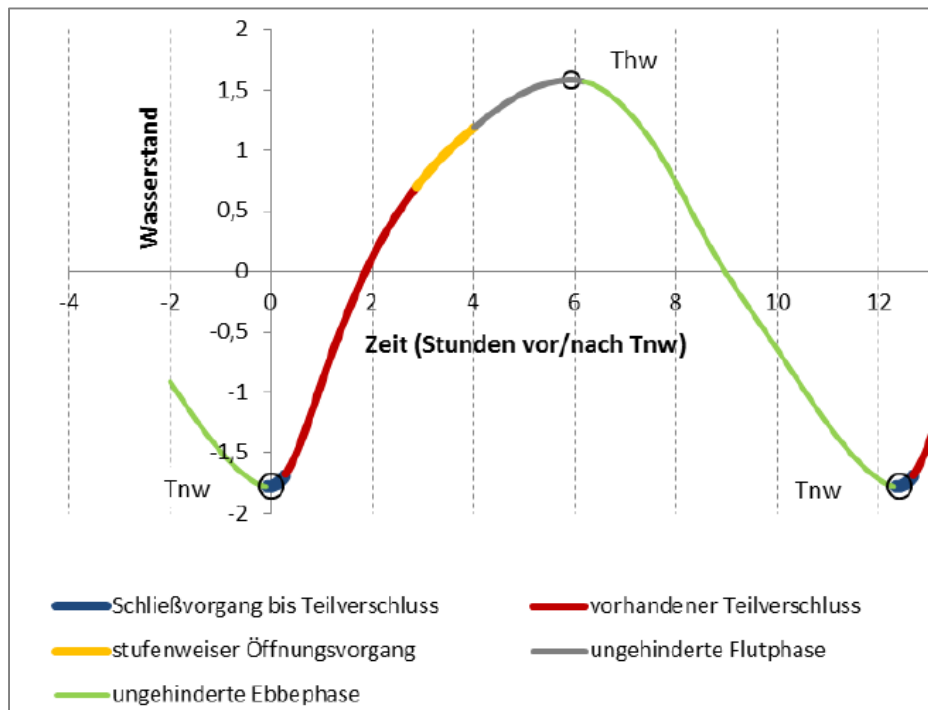


Abbildung 3: Zeitablauf der Flutstromtidesteuerung - exemplarische Darstellung

Praktische Ausführung der Flutstromtidesteuerung während des Technischen Tests

Bei der praktischen Umsetzung orientierte sich der Beginn des Schließvorgangs am prognostizierten Eintrittszeitpunkt der Ebbekehrung. Die Hauptschiffahrtsöffnung wurde vollständig und die Nebenöffnungen sowie die Binnenschiffahrtsöffnung bis auf die vereinbarten Spaltöffnungen geschlossen und nach einer bestimmten Dauer wieder stufenweise geöffnet.

Beim Schließvorgang wurde die Hauptschiffahrtsöffnung so in Bewegung gesetzt, dass diese zum Eintritt der vermuteten Ebbekehrung aus dem Wasser austrat. In gleichförmiger Bewegung setzte sie ihren Weg bis zum Erreichen der Staustellung fort. Die Hubtore der Nebenöffnungen und das Drehsegment der Binnenschiffahrtsöffnung wurden so gesteuert, dass deren Unterkanten erst ins Wasser eintauchten, nachdem der Verschlusskörper der Hauptschiffahrtsöffnung aus dem Wasser austrat. Zwar herrscht zum Zeitpunkt der Ebbekehrung eine geringe Strömungsgeschwindigkeit, bestenfalls ein Stillstand, so dass eigentlich alle Tore inklusive der Hauptschiffahrtsöffnung gleichzeitig gefahren werden könnten. Dennoch wurde aus Sicherheitsgründen die o.g. Abfolge gewählt um zu vermeiden, dass die Hauptschiffahrtsöffnung überströmt wird und sich diese darüber in Schwingung versetzen könnte. Während des Teilverschlusses (Spalthöhen je nach Tor 1,0 bis 2,5 m) lag ein Versperrgrad von rd. 70% vor. Die Drosselung der sich aufbauenden Flutströmung führte zu Wasserstandsunterschieden von 0,8 bis 1,0 m am Sperrwerk.

Da die Öffnung des Sperrwerks bei voll entwickeltem Flutstrom erfolgt, wurden die Nebenöffnungen und die Binnenschiffahrtsöffnung schrittweise geöffnet, um die Wasserstandsunterschiede zwischen Ober- und Unterpegel langsam zu reduzieren und darüber die Schwallbildung zu minimieren. Ebenfalls war es wichtig, die Steuerung der einzelnen Tore so aufeinander abzustimmen, dass deren Unterkanten gleichzeitig aus dem Wasser auftauchten. Die Hauptschiffahrtsöffnung wurde so bewegt, dass diese erst eintauchte, als die Unterkanten der anderen Tore aus dem Wasser austraten. Dadurch wurde vermieden, dass der Verschlusskörper der Hauptöffnung überströmt und sich darüber in Schwingung versetzen würde. Das Sperrwerk war bis zum Erreichen des angestrebten Endzeitpunktes der Steuerung wieder komplett geöffnet.

Insgesamt wurden am Ende des Technischen Tests fünf Flutstromtidesteuerungen durchgeführt. Die Zeit, über die eine Wasserstands­differenz vorhanden war, betrug 2 ½ bis > 4 Stunden und steht für die Dauer, über die das Sperrwerk einen direkten Einfluss auf die Hydrodynamik ausübte. Zusammen mit den Sicherheitszeiten zur Sperrung bzw. Freigabe der Schifffahrt (Signalstellung), ergab sich eine Dauer der Schifffahrtssperrung von 3 bis 4 ½ Stunden je Tide.

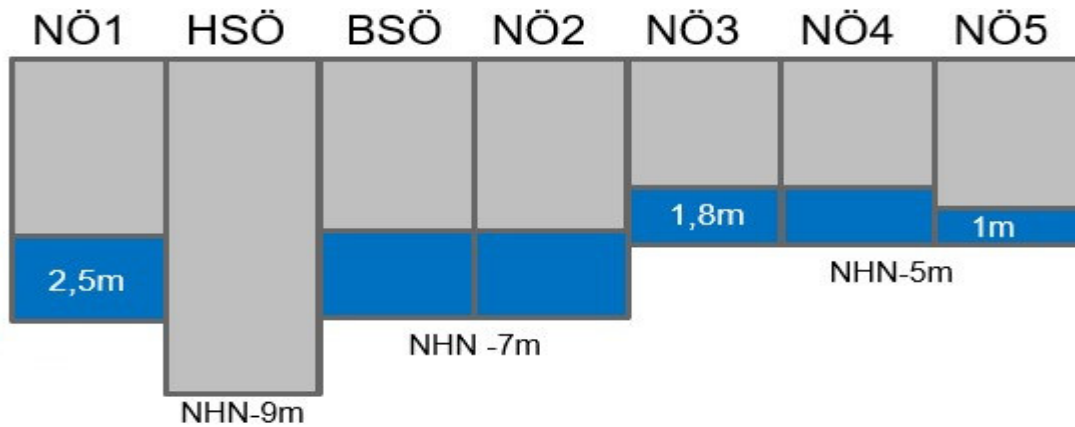


Abbildung 4: Vereinbarte Öffnungshöhen der Tore bei der Flutstromtidesteuerung zur optimalen Verteilung des Durchflusses über den Gesamtquerschnitt am Emssperrwerk. Darüber wird die ungünstige Strömungsbelastung auf das Bauwerk, sowie die Erosionstendenz im Sohlbereich ober- und unter-strom des Bauwerks minimiert.

3 Der Technische Test im Sommer 2020

3.1 Ursprünglich geplanter Testablauf

Im Zeitraum vom 29.06. bis zum 17.08. 2020 wurde die Tidesteuerung getestet. Der Test sah ursprünglich drei sich voneinander unterscheidende Phasen vor:

Phase I: 29.06. bis 27.07.2020 - Tideniedrigwasseranhebung (TnWA) in jeder Tide

Phase II: 27.07. bis 14.08.2020 - TnWA als verkehrsverträgliche Variante. Dabei sollte das Steuerungsmodell 2 zur Anwendung kommen, bei dem werktags nur etwa jede zweite Tide gesteuert würde. Lediglich am Wochenende (sonntags bis 14:00 h) sollte das Emssperrwerk zu jeder Tide geschlossen werden.

Phase III: 14.08. bis 17.08.2020 - Flutstromtidesteuerung (FS) in sechs direkt aufeinander folgenden Tiden

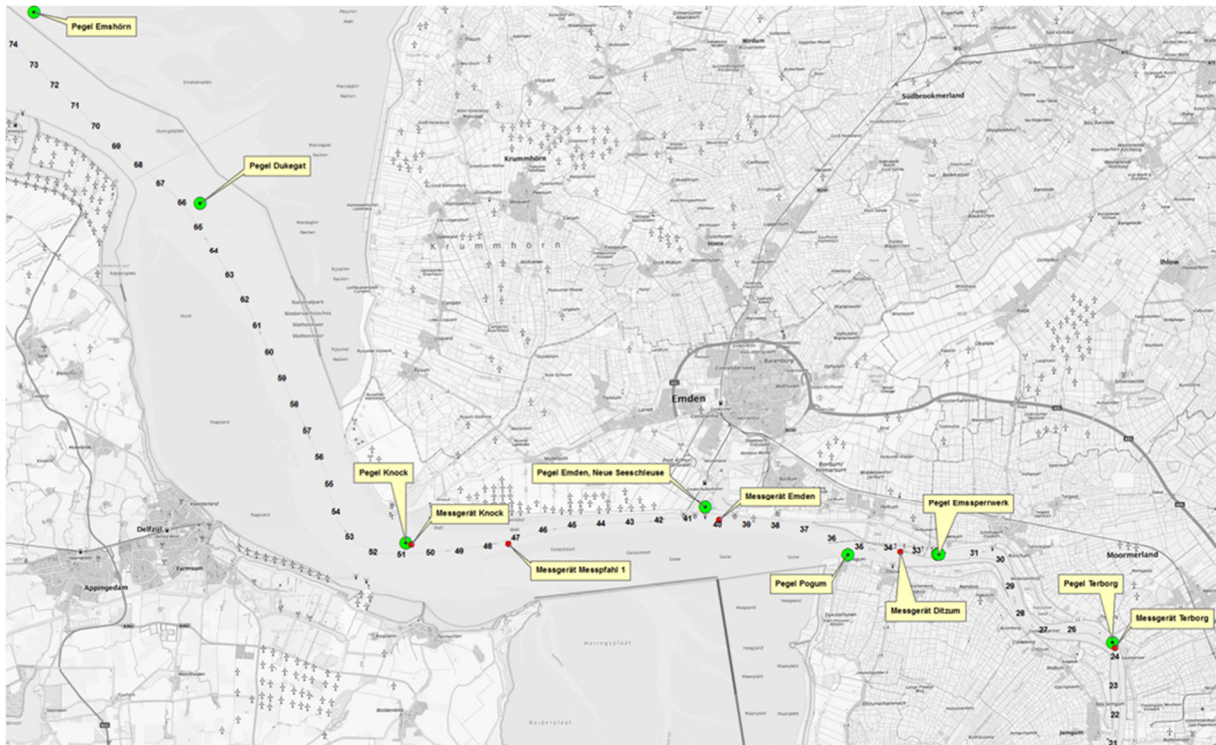


Abbildung 5: Untersuchungsgebiet im Bereich Unterems – Emden Fahrwasser – Außenems (Quelle: WSA Ems-Nordsee)

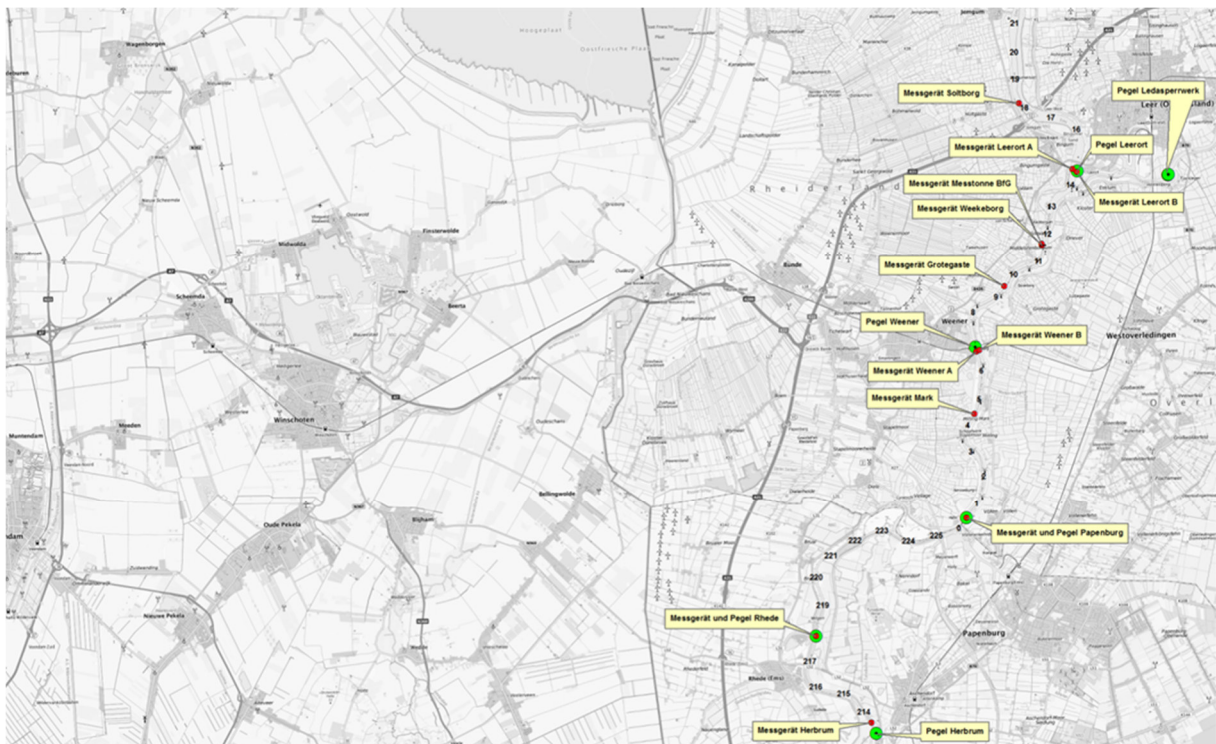


Abbildung 6: Untersuchungsgebiet im Bereich Dortmund-Ems-Kanal (DEK) – Unterems (Quelle: WSA Ems-Nordsee)

3.2 Ausgeführter Testablauf

Grundsätzlich ist festzustellen, dass zu keinem Zeitpunkt ein Anlass zum Aussetzen des Tests bestand, welcher auf das Auftreten von Gefahren für Menschen und Umwelt zurückzuführen gewesen wäre.



Abbildung 7: Totalansicht des Emssperrwerks (Quelle: BAW)

Aus Rücksicht auf die Schiffs- und Umschlagssituation im Emdener Außenhafen und den dazugehörigen Liegestellen entlang der Ems waren die o.g. Phasen I und II des Tests nicht wie geplant zu realisieren. Von den ursprünglich vorgesehenen 54 Sperrungen der Phase I wurden 26 Fälle umgesetzt, die jedoch nicht zeitlich direkt aufeinander folgten, sondern in unterschiedlicher Form intermittierend stattfanden. Im Zeitraum, in dem ursprünglich jede Tide gesteuert werden sollte, befanden sich letztendlich drei Abschnitte, in denen jeweils maximal sechs aufeinander folgende Tiden gesteuert werden konnten. Zudem wurde in zwei Abschnitten jede zweite Tide gesteuert. Am Ende der Phase I ergab sich eine längere Unterbrechung, in der das Emssperrwerk in 17 direkt aufeinander folgenden Tiden nicht geschlossen wurde.

Von den 20 Tiden der Phase II wurden 16 Tiden gesteuert, wobei auch diese nicht alle wie geplant ausgeführt wurden. In zwei Blöcken konnte tatsächlich jede zweite Tide gesteuert werden, lediglich an einem Wochenende wurde gemäß Steuerungsmodell 2 jede Tide gesteuert und in einem weiteren Zeitabschnitt war das Sperrwerk nur sporadisch zu schließen. Die Phase III wurde für eine Tide unterbrochen. Dieses wurde nicht durch die Hafenwirtschaft veranlasst, sondern die Pause wurde genutzt, um die Entwicklung der Tiefenverhältnisse im Nahfeld des Emssperrwerks eingehender bewerten zu können. Es lässt sich zusammenfassen, dass 42 Tiden nach der Methode der Tideniedrigwasseranhebung gesteuert und zudem 5 Flutstromtidesteuerungen ausgeführt wurden. In Abbildung 8 sind die ursprünglich geplanten und durchgeführten Sperrungen des Testzeitraums zusammengestellt.



Abbildung 8: Zeitschiene des geplanten (oben) und durchgeführten (unten) Testverlaufs vom 29.06. bis zum 17.08.2020 (zu steuernde bzw. gesteuerte Tiden sind farbig markiert – grün: Tideniedrigwasseranhebung und blau: Flutsteuerung)

Mehrtägige Unterbrechung der Tidesteuerung (19. bis zum 29.07.2020)

Wird der gesamte Testzeitraum in einen Abschnitt vor und einen weiteren Abschnitt nach der mehrtägigen Unterbrechung (17 Tiden) eingeteilt, dann lassen sich zwischen diesen beiden Zeitbereichen folgende Unterschiede feststellen: Die Steuerungsintensität war im ersten Abschnitt höher als in der Zeit nach der Unterbrechung. Im ersten Abschnitt gab es mehrere Blöcke, in denen mehrere direkt aufeinander folgende Tiden oder jede zweite Tide gesteuert wurden. Bis zum Beginn der Unterbrechung betrug der Anteil der gesteuerten Tiden im ersten Abschnitt über 60%. In der Zeit

nach der Unterbrechung fand die Tidesteuerung z.T. nur unregelmäßig statt, wobei auch zwischendurch mehrere Tiden ungesteuert blieben. Insgesamt betrug der Anteil der gesteuerten Tiden im zweiten Abschnitt weniger als 50%.

Tabelle 1: Zusammenstellung der gesteuerten Tiden (TnWA = Tideniedrigwasseranhebung, FsTs = Flutstromtidesteuerung, die Bezeichnung Phase I bis III kennzeichnet die ursprünglich geplante Einteilung des Testzeitraums)

Steuerungsart	Lfd. Nr. der gesteuerten Tide	Schließzeit HSÖ Eintrittszeit (MESZ)	Dauer der Wasserstands-differenz am Emssperrwerk [Stunden]
TnWA (Phase I)	1	Mo, 29.06.2020 00:12	1,6
TnWA (Phase I)	2	Di, 30.06.2020 01:02	1,5
TnWA (Phase I)	3	Mi, 01.07.2020 01:32	2,6
TnWA (Phase I)	4	Do, 02.07.2020 02:48	2,4
TnWA (Phase I)	5	Fr, 03.07.2020 03:47	2,6
TnWA (Phase I)	6	Fr, 03.07.2020 16:18	2,5
TnWA (Phase I)	7	Sa, 04.07.2020 04:54	2,2
TnWA (Phase I)	8	Sa, 04.07.2020 17:38	1,8
TnWA (Phase I)	9	So, 05.07.2020 05:57	1,9
TnWA (Phase I)	10	So, 05.07.2020 19:13	1,4
TnWA (Phase I)	11	Mi, 08.07.2020 08:00	2,2
TnWA (Phase I)	12	Mi, 08.07.2020 20:18	2,7
TnWA (Phase I)	13	Do, 09.07.2020 08:17	2,9
TnWA (Phase I)	14	Do, 09.07.2020 20:51	2,9
TnWA (Phase I)	15	Fr, 10.07.2020 21:51	2,3
TnWA (Phase I)	16	Sa, 11.07.2020 09:39	2,7
TnWA (Phase I)	17	Sa, 11.07.2020 22:15	2,7
TnWA (Phase I)	18	So, 12.07.2020 10:05	3,1
TnWA (Phase I)	19	So, 12.07.2020 22:47	2,9
TnWA (Phase I)	20	Mo, 13.07.2020 23:24	2,8
TnWA (Phase I)	21	Mi, 15.07.2020 00:33	2,3
TnWA (Phase I)	22	Do, 16.07.2020 01:25	2,5
TnWA (Phase I)	23	Fr, 17.07.2020 02:28	2,8
TnWA (Phase I)	24	Sa, 18.07.2020 03:30	2,8
TnWA (Phase I)	25	So, 19.07.2020 04:37	2,4
TnWA (Phase I)	26	So, 19.07.2020 17:18	2,3
Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung für 17 Tiden			
TnWA (Phase II)	27	Mi, 29.07.2020 00:55	1,4
TnWA (Phase II)	28	Do, 30.07.2020 01:22	2,2
TnWA (Phase II)	29	Fr, 31.07.2020 02:20	2,4

TnwA (Phase II)	30	Sa, 01.08.2020 03:23	2,5
TnwA (Phase II)	31	So, 02.08.2020 05:12	1,7
TnwA (Phase II)	32	Di, 04.08.2020 18:53	2,5
TnwA (Phase II)	33	Do, 06.08.2020 20:11	2,6
TnwA (Phase II)	34	Fr, 07.08.2020 20:39	2,7
TnwA (Phase II)	35	Sa, 08.08.2020 08:40	2,7
TnwA (Phase II)	36	Sa, 08.08.2020 21:23	2,4
TnwA (Phase II)	37	So, 09.08.2020 09:10	2,8
TnwA (Phase II)	38	So, 09.08.2020 21:34	2,9
TnwA (Phase II)	39	Mo, 10.08.2020 22:07	2,7
TnwA (Phase II)	40	Di, 11.08.2020 23:07	2,1
TnwA (Phase II)	41	Mi, 12.08.2020 23:19	2,7
TnwA (Phase II)	42	Fr, 14.08.2020 00:20	2,4
FsTs (Phase III)	43	Fr, 14.08.2020 14:55	4,2
FsTs (Phase III)	44	Sa, 15.08.2020 03:35	2,5
FsTs (Phase III)	45	Sa, 15.08.2020 16:18	4,3
FsTs (Phase III)	46	So, 16.08.2020 17:45	4,3
FsTs (Phase III)	47	Mo, 17.08.2020 06:15	3,3

Anmerkung: Die Dauer, über die am Emssperrwerk eine Wasserstandsdifferenz zwischen Ober- und Unterpegel vorhanden war, steht für die Dauer der Einflussnahme auf die Hydrodynamik.

4 Randbedingungen des Technischen Tests

4.1 Hydro-meteorologische Randbedingungen

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN Aurich)

4.1.1.1 Der Wetterverlauf

Die Wetterverhältnisse waren vor und während des Tests sehr unterschiedlich. Der **Juni** war hinsichtlich seiner Niederschlagssumme insgesamt zwar als durchschnittlich zu bezeichnen, allerdings waren diese sehr ungleich auf den Monat verteilt. Zur Mitte des Monats traten Starkregen auf, die zur Zunahme der Abflüsse führten. Insgesamt war der Juni wärmer als im Mittel und am Monatsende traten mehrere Sommertage ($\geq 25^\circ\text{C}$) in Folge ein.

Der **Juli** war insgesamt sehr wechselhaft: windig, kühl und nass. An den meisten der 26 Regentage war nur eine geringe Niederschlagsmenge zu messen, an wenigen Tagen der ersten Monathälfte traten auch Starkregen ein. Trotzdem war die Niederschlagssumme des Monats unterdurchschnittlich.

In der **ersten Augushälfte** stellten sich stabilere Wetterverhältnisse ein. Eine mehrtägige Hitzewelle brachte in der letzten Woche des Tests heißes ($> 30^\circ\text{C}$) und trockenes Wetter. Im Weiteren werden die Abfluss- und Wasserstandsverhältnisse in Ems und Leda beschrieben, die sich in Folge von Wind und Wetter einstellten.

4.1.1.2 Die Abflussverhältnisse der Ems

Das Oberwasser der Ems (Versen) lag im Februar und März 2020 bei 120 bis 130% des langjährigen Mittelwertes dieses Zeitbereichs. Im April und Mai betrug dieses nur noch rd. 50 % des jeweiligen Monatsmittelwertes.

Tabella 2: Oberwasser der Ems während des Testzeitraums

Oberwasser der Ems (Versen)	Langjähriger Monatsmittelwert [m ³ /s]	eingetretener Monatsmittelwert 2020 [m ³ /s] bzw. Anteil vom Mittelwert [%]
Juni	45	33 (73%)
Juli	36	25 (69%)
August (bis Versuchsende)	33	16 (49%)

Die Niederschläge im Juni und Juli führten zu einer leichten Zunahme des Abflusses, so dass 70 bis 75% des jeweiligen Durchschnitts erreicht wurden. Im August betrug das Oberwasser bis zum Versuchsende rd. 50 % des Mittelwertes. Deutlich erhöhte Niederschlagsmengen Mitte Juni führten zu einer zeitlich begrenzten Zunahme des Oberwassers, so dass am 16.06. in Versen sogar ein Tagesmittelwert von 59 m³/s registriert wurde.

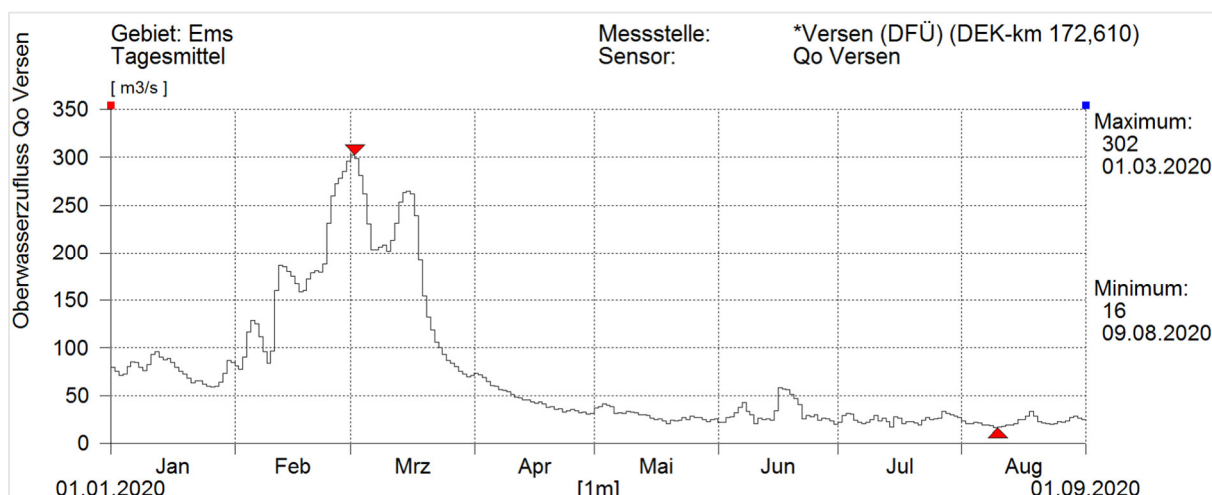


Abbildung 9: Oberwasser der Ems (Versen, Tagesmittelwerte) vom 01.01. bis 01.09.2020 und Kennzeichnung des Maximums und Minimums dieses Zeitbereichs.

4.1.1.3 Längerfristige Rückschau auf die Oberwasserverhältnisse - als beeinflussende Größe der Gewässergüte der Ems

Seit Anfang der 2000er Jahre hebt sich vom Grundrauschen und dem zyklischen Wechsel nasser und trockener Jahre das sehr seltene Eintreten höherer Oberwasser deutlich ab.

Ein Oberwasser von > 400 m³/s fehlt seit Feb. 2008, ein Wert von > 500 m³/s sogar seit Jan.2003. Die jeweilige Unterschreitungsdauer wurde seit Beginn der Aufzeichnung (Nov.1915) nicht übertroffen! Im Winter 2019/20 wurde seit langer Zeit wieder ein Oberwasser von rd. 300 m³/s erreicht. Vorher war dieses ebenfalls für eine längere Zeit nicht aufgetreten.

Nach dem erhöhten Oberwasser im Winter 2019/20 (max. Qo = 302 m³/s am 01.03.2020) wurden in 2020 Oberwasserwerte von 60 m³/s im Frühjahr zeitig unterschritten, wobei dieser Zustand über eine längere Dauer anhält. Dieses trat selbst in den Trockenjahren 2018 und 2019 nicht in dieser Form auf.

Bezeichnend für den Sommer 2020 war, dass der Flüssigschlick verstärkt im oberen Abschnitt der Unterems vorkam und dessen Schichtdicke unterhalb von Leerort gering war. Es ist denkbar, dass das o.g. spezielle Abflussverhalten einen signifikanten Einfluss auf die Bildung von Flüssigschlick und darüber möglicherweise wiederum einen Einfluss auf die Hydrodynamik und die Gewässergüte ausübte.

4.1.1.4 Die Abflussverhältnisse der Leda

Das Oberwasser der Leda (Leer) betrug im Februar und März 2020 rd. 130 bzw. rd. 115 % des jeweiligen Monatsmittelwertes. Im April und Mai waren 85 bzw. 100 % des Mittelwertes festzustellen. Die Niederschlagssummen des Junis waren im Leda-Jümme-Gebiet höher als im langjährigen Mittel. Dieses traf insbesondere auf den südlichen Bereich zu. Insgesamt führte dieses zu einer Zunahme des Oberwassers, so dass rd. 130 % des Juni-Monatsdurchschnitts erreicht wurde. Aufgrund des Nord-Süd-Gefälles der Niederschläge waren die Wasserstände der von Süden kommenden Gewässer, insbesondere die der Sagter Ems, auch deutlicher erhöht. Im südlichen Leda-Jümme-Gebiet ging der Niederschlag zeitweise als Starkregen nieder. Dabei waren Tagessummen von fast 40 mm zu messen (13.06., Cloppenburg), was zu einer starken Zunahme des Oberwassers führte.

Tabelle 3: Oberwasser der Leda während des Testzeitraums

Oberwasser Leda (Leer)	Langjähriger Monatsmittelwert [m ³ /s]	eingetretener Monatsmittelwert 2020 [m ³ /s] bzw. Anteil vom Mittelwert [%]
Juni	13	17 (131%)
Juli	11	12 (109%)
August (bis Versuchsende)	11	8 (73%)

Unter anderem wurde eine ausgeprägte Abflusswelle in der Sagter Ems und im Burlager-Langholter Tief beobachtet, die im letztgenannten Gewässer auch lokal zur Überschwemmung führte. Am 15.06. betrug der Tagesmittelwert des Oberwassers bei Leer sogar 44 m³/s. Die Niederschlagssummen des Julis waren niedriger als im langjährigen Mittel, wobei der meiste Regen in der ersten Julihälfte fiel. Die Niederschlagsereignisse führten nach dem noch nassen Juni zu einer verzögerten Abnahme des Abflusses. Insgesamt stellte sich im Juli ein Oberwasser von rd. 110 % des Monatsmittelwertes ein. Im August fiel bis zum Ende des Technischen Tests nur wenig Regen, so dass bis zum Versuchsende ein Oberwasser von rd. 70 % des Monatsmittelwertes vorhanden war.

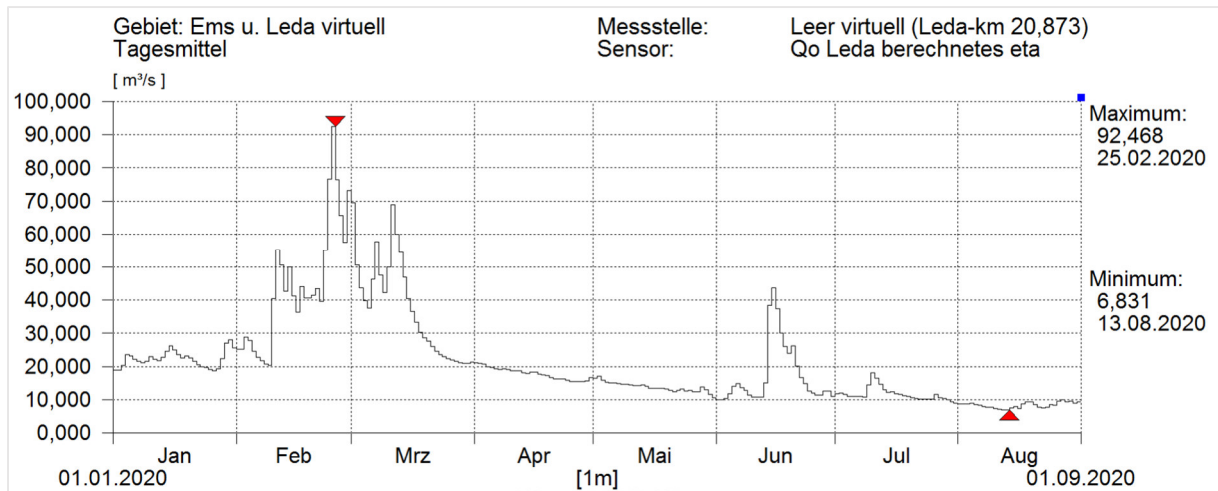


Abbildung 10: Oberwasser der Leda (Ledasperrwerk, Tagesmittelwerte) vom 01.01. bis 01.09.2020 und Kennzeichnung des Maximums und Minimums dieses Zeitbereichs.

4.1.1.5 Die Windverhältnisse

Im Versuchszeitraum traten sehr unterschiedliche Windverhältnisse auf. In der ersten und letzten Juliwoche waren jeweils über mehrere Tage Windstärken von über 7 Beaufort festzustellen. Insbesondere waren dieses die Zeitbereiche vom 04. bis 06.07. sowie vom 26. bis 29.07. ebenfalls traten Zeitabschnitte niedriger Windgeschwindigkeiten auf. Hier sind besonders die Zeitbereiche 11. bis 18.07., 06. bis 08.08. sowie auch der 14. und 15.08. zu nennen. Bis Anfang August herrschten Windrichtungen zwischen Südwest und Nord-Nordost vor. Nach dem 04.08. traten zunehmend östliche Windrichtungen ein, insbesondere vom 07. bis zum 14.08. In den letzten Tagen des Versuchs setzten sich dann wieder nordöstliche bis nördliche Winde durch.

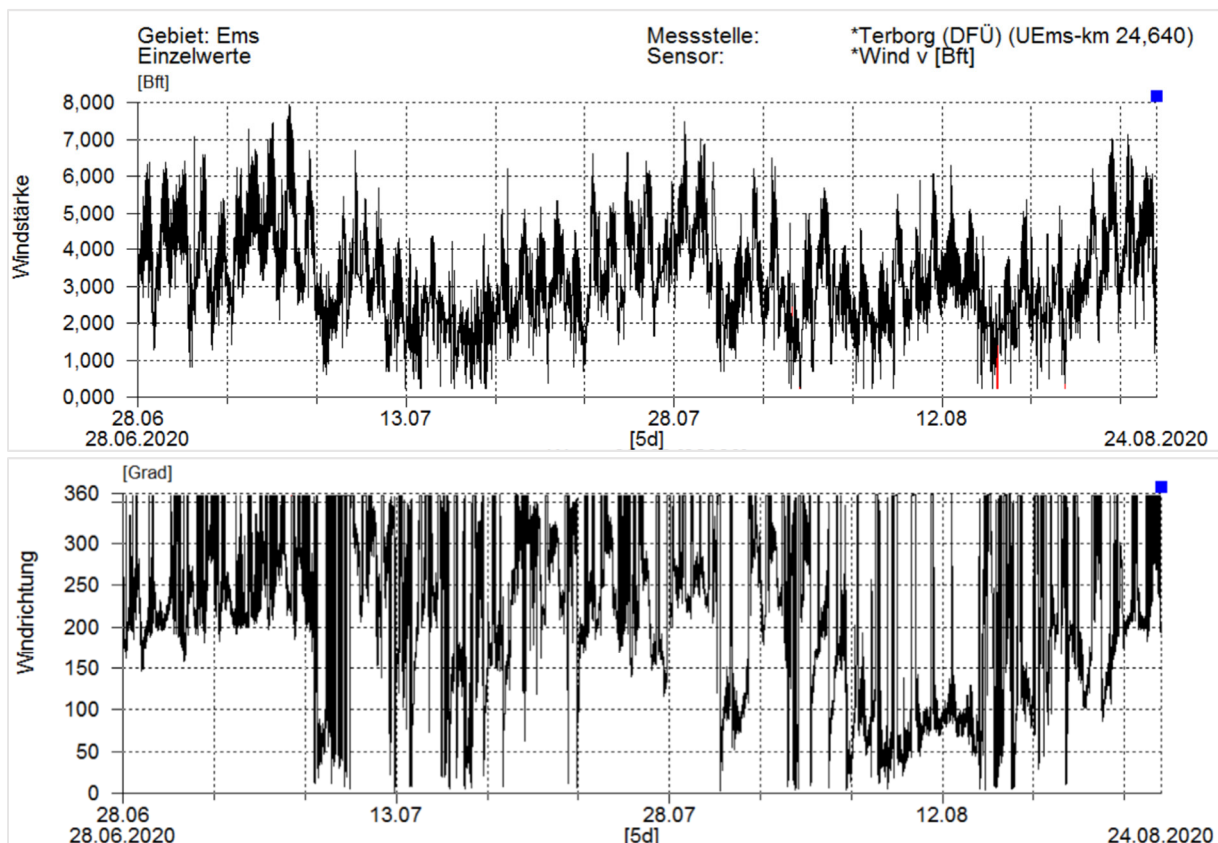


Abbildung 11: Windstärke (Bft) und Windrichtung (Grad) an der Messstation Terborg vom 28.06. bis 24.08.2020

4.1.1.6 Die Tideverhältnisse

Resultierend aus den o.g. Windverhältnissen wichen die Tidewasserstände phasenweise vom astronomischen Verlauf ab. Besonders deutlich war der Windstau vom 04. bis 06.07. sowie vom 28. und 29.07. Das Tideniedrigwasser (Tnw) am 06.07. trat rd. 1,15 m über dem astronomischen Tnw ein. Ein Windsunk herrschte vornehmlich zwischen dem 06.07. und 13.07., vom 30.07. bis 01.08. und vom 04.08 bis zum Versuchsende.

Phasenweise waren geringe Tidehübe vorhanden. Dieses war vom 08.07. bis 18.07. und vom 10.08. bis zum Versuchsende der Fall. Diese Zeitbereiche überschnitten sich mit Mitt- und Nipp-Phasen des astronomischen Zyklus.

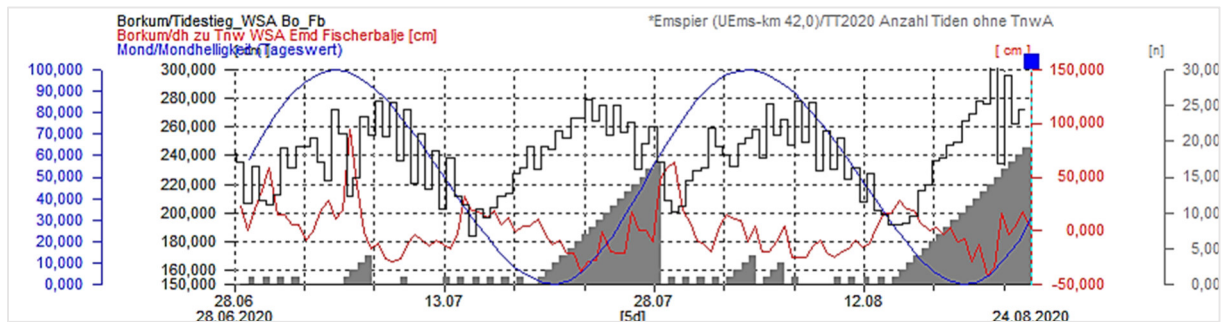


Abbildung 12: Tidenstieg (schwarz, cm), Differenz des Tideniedrigwassers zum Mittelwert (rot, cm) am Pegel Borkum Fischerbalje, Mondphase (blau) und Unterbrechungen der Tideniedrigwasseranhebung (grau, kumulierte Anzahl). Anmerkungen: Der mittlere Tidehub am Pegel Borkum Fb beträgt 239 cm und das mittlere Tideniedrigwasser 383 cmPN (2016/20); Mondhelligkeit 0% = Neumond und 100% = Vollmond. Zwischen dem 19. und 29.07. wurde die Tideniedrigwasseranhebung für insgesamt 17 direkt aufeinanderfolgende Tiden ausgesetzt (Spitze des grauen Dreiecks n = 17), nach dem 14.08. wurde die Flutstromsteuerung für insgesamt 5 Tiden ausgeführt.

4.1.1.7 Längerfristige Rückschau auf die Entwicklung der Tideniedrigwasserstände der Ems und im Leda-Jümme-Gebiet

Bei **Borkum** ist über die Dauer der zur Verfügung stehenden Daten (ab 1936) ein leicht steigender Trend der Tideniedrigwasserhöhen zu erkennen. In den letzten 50 Jahren betrug der Anstieg etwa 4 cm, wobei der Trend deutlich von der Nodaltide (s.u.) überlagert wurde. Auch an der **Knock** stieg das Tideniedrigwasser an. Die zur Verfügung stehende Zeitreihe reicht bis Ende der 1970er Jahre zurück, so dass der Anstieg innerhalb der letzten 50 Jahren auf rd. 0,1 m geschätzt wird. Oberhalb der Knock ändert sich die Charakteristik der Wasserstandsänderungen. Bei **Emden** setzte Ende der 1940er Jahre ein leicht fallender Trend ein. In den vergangenen 50 Jahren nahm das Tideniedrigwasser um rd. 0,1 m ab. Weiter Ems aufwärts nahm die Wasserstandsänderung an Stärke zu. So nahm das Tideniedrigwasser von Anfang der 1970er bis Mitte der 2010er Jahre bei **Pogum** um rd. 0,3 m und bei **Terborg** um 0,4 m ab. Seitdem nahmen die Höhen bis zum aktuellen Zeitpunkt wieder leicht (um 5 bis 10 cm) zu.

In **Leerort** setzte zu Beginn der 1970er Jahre ein stark fallender Trend ein, der sich zu Beginn der 1990er Jahre nochmals verstärkte. Etwa ab Ende der 1990er Jahre wurde der abnehmende Trend wieder etwas schwächer und seit Mitte der 2010er Jahre ist wieder eine leichte Zunahme festzustellen. Das Tideniedrigwasser sank zwischen Beginn der 1970er und Mitte der 2010er Jahre um rd. 0,8 m ab und stieg danach wieder bis heute um etwa 0,1 m an. Auch in **Weener** sank das Tideniedrigwasser bis Mitte 2010er Jahre um rd. 0,8 m ab und nahm bis heute wieder um rd. 0,1 m wieder zu.

In **Papenburg** sanken die Tideniedrigwasserstände in gleicher zeitlichen Abfolge wie in Leerort, allerdings nahmen die Absolutwerte sehr viel stärker ab. Das Tideniedrigwasser sank zwischen Beginn der 1970er und Mitte der 2010er Jahre um rd. 1,4 m ab und stieg danach wieder bis heute um etwa

0,1 m an. Seit Mitte der 2010er Jahre sind die Tideniedrigwasser Papenburg über Leerort bis nach Emden praktisch auf gleicher Höhe.

In **Herbrum** setzte bereits Mitte der 1950er Jahre ein stark fallender Trend ein, der sich zu Beginn der 1970er und dann nochmal zu Beginn der 1990er Jahre verstärkte. Etwa ab Ende der 1990er Jahre wurde der abnehmende Trend wieder etwas schwächer. Seit Mitte der 2010er Jahre ist wieder eine leichte Zunahme festzustellen. Das Tideniedrigwasser sank zwischen Beginn der 1970er und Mitte der 2010er Jahre um rd. 1,3 m ab und stieg danach wieder bis heute um < 0,1 m an.

Die **Nodaltide** (Periode 18,613 Jahre), die schon immer in den Zeitreihen der Pegel Borkum und auch Emden deutlich in Erscheinung trat, zeichnet sich seit Mitte der 1990er Jahre auch an den Pegeln der Unterems ab. Der seit Mitte der 2010er Jahre zu beobachtende Anstieg der Tideniedrigwasserstände in der Unterems fällt mit dem durch die Nodaltide verursachten Anstieg des Niedrigwassers bei Borkum zusammen.

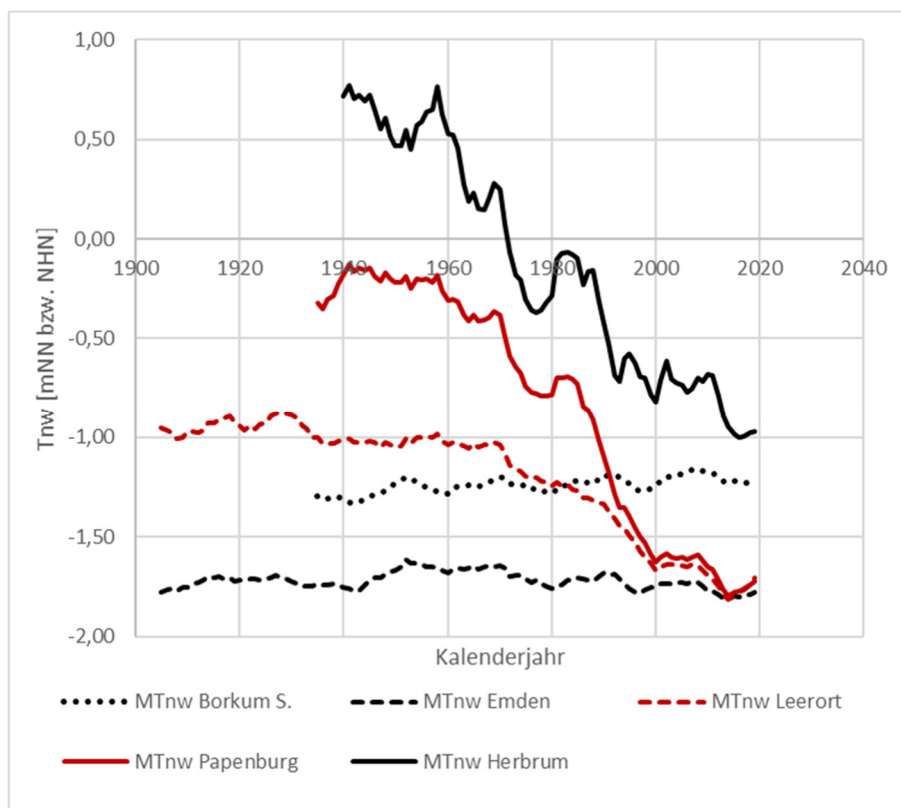


Abbildung 13: Entwicklung der mittleren Tideniedrigwasser an ausgewählten Pegeln der Ems von Borkum bis Herbrum (jeweils gleitende Mittelwerte über 5 Jahre, Datenquelle WSA Ems-Nordsee und NLWKN)

Auch im Leda-Jümme-Gebiet sanken in den letzten Jahrzehnten die Tideniedrigwasserstände. Diese Entwicklung geht auf die Abnahme der Niedrigwasserstände in der Ems und u.a. auf die Veränderung der Geometrie der Hauptgewässer sowie der hydro-meteorologischen Randbedingungen zurück. Dazu gehört auch der Anstieg des Meeresspiegels, der zu einer zunehmend häufigeren Schließung des Ledasperrwerks führt und über die Reduzierung des Tidevolumens ein Absinken des Niedrigwassers zur Folge haben kann. Die Entwicklung der Randbedingungen führte zu einem deutlich abnehmenden Trend der Tideniedrigwasserstände, sowie zum häufigeren Eintritt außergewöhnlich niedriger Pegelstände⁵.

⁵ ENGELS, A. (2019 a): Ledasperrwerk Leer - Entwurf zur Anpassung der Sturmflutsperrungen an die Oberwasserverhältnisse des Leda-Jümme-Gebietes (unveröffentlicht); NLWKN Aurich, März 2019

Der zeitliche Verlauf der Tideniedrigwasserentwicklung in der unteren Leda (Pegel **Leer** am Ledasperrwerk) zeigt eine große Übereinstimmung mit der Entwicklung am Pegel Leerort (Ems). Etwa 15 Km oberhalb der Ledamündung sank das Tideniedrigwasser in den letzten 50 Jahren um 0,3 m (Pegel **Nortmoor**/Jümme bzw. **Westringaburg**/Leda). In einer Entfernung von 20 Km oberhalb der Mündung fiel das Tideniedrigwasser in den vergangenen 50 Jahren um 0,2 bis 0,3 m (Pegel **Stickhausen**/Jümme bzw. **Potshausen**/Leda). Die lange Zeitreihe des Pegels Potshausen zeigt sogar seit Beginn der 1940er Jahre eine Abnahme der Niedrigwasserstände. In der oberen Jümme und Leda (Pegel **Barge** bzw. **Dreyschloot**, rd. 27 bzw. 24 km oberhalb des Ledasperrwerks) nahm das mittlere Tideniedrigwasser in den vergangenen 50 Jahren um rd. 0,1 m ab. In den Jahresmittelwerten spiegeln sich die Extremwerte nicht wieder. So treten in den zufließenden Gewässern der Leda und Jümme zunehmend häufig auch niedrige Tideniedrigwasser auf.

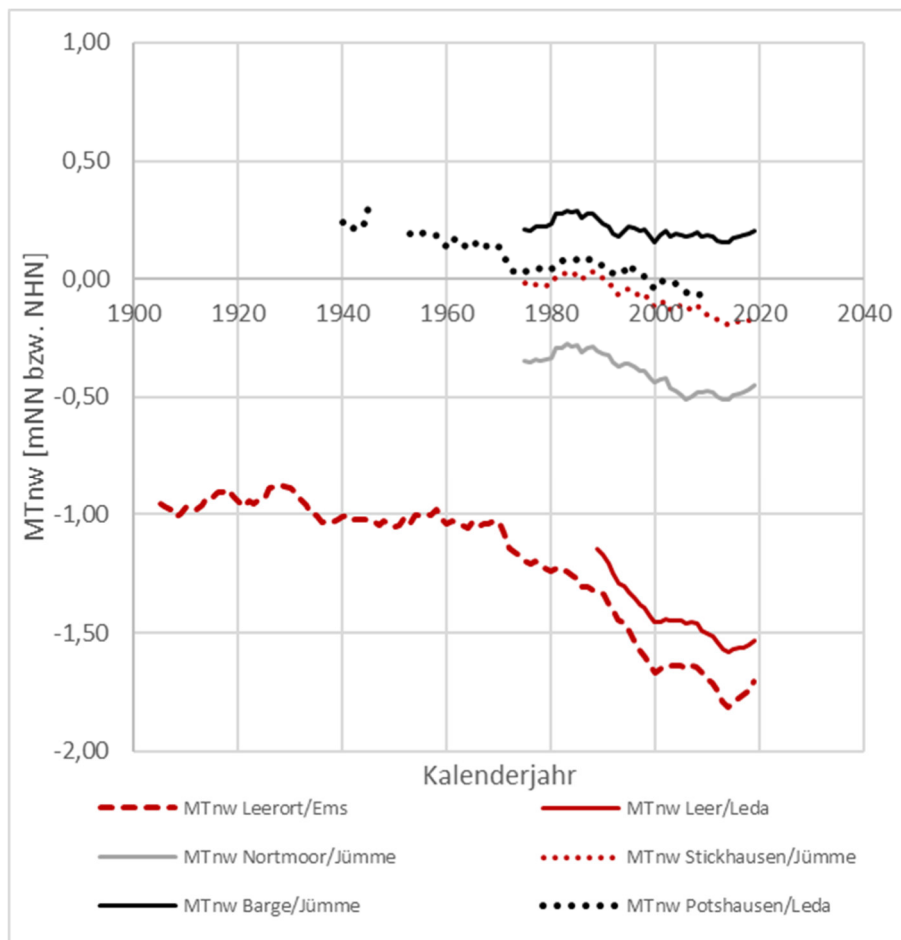


Abbildung 14: Entwicklung der mittleren Tideniedrigwasser am Pegel Leerort/Ems und an ausgewählten Pegeln des Leda-Jümme-Gebietes (jeweils gleitende Mittelwerte über 5 Jahre, Datenquelle WSA Ems-Nordsee und NLWKN). Die Wasserstände am Pegel Barge (obere Jümme) weichen nur geringfügig von denen des Pegels Dreyschloot (obere Leda) ab.

4.2 Betrieb des Ledasperrwerks während des Technischen Tests

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN)

Rund vier Kilometer oberhalb der Ledamündung befindet sich das 1954 in Dienst gestellte Ledasperrwerk, welches das Niederungsgebiet von Leda und Jümme vor zu hohen Wasserständen schützt.

Im Zeitraum 1. November bis 31. März (Winterbetrieb) werden zu hohe Tiden vollständig ausgesperrt und im Zeitraum 1. April bis 31. Oktober (Sommerbetrieb) werden lediglich die Scheitel der zu hohen

Tidehochwasser gekappt. Die Grenze, ab der ein Tidehochwasser als zu hoch bezeichnet wird, ist im Winter und Sommer unterschiedlich. So werden im Winter Tiden vollständig ausgesperrt, deren Tidehochwasserscheitel bei $> \text{NHN}+2,0$ m liegen und im Sommer laufen Tiden mit einer Scheitelhöhe von maximal $\text{NHN} +2,3$ m frei in die Leda ein⁶.

Durch den Sperrbetrieb nimmt das Ledasperrwerk einen Einfluss auf die Tideintensität der tidebeeinflussten Gewässer des Leda-Jümme-Gebietes. Bei niedrigem Oberwasser kann die Reduzierung des Tidevolumens zur starken Absenkung der Tideniedrigwasserstände in den oberen Abschnitten der Gewässer führen. In der Zeit vom 01.04. bis zum 31.10. findet die Sperrwerksschließung erst zu einem späteren Zeitpunkt der Flutphase statt, so dass das Tidevolumen weniger stark reduziert wird und die Tideniedrigwasser betriebsbedingt weniger stark abgesenkt werden.

Tabelle 4: Anzahl Sperrungen durch das Ledasperrwerk

	Juni	Juli	August
Mittlere Anzahl (2011/20)	5	7	7
Anzahl in 2020	10	12	12

Das Ledasperrwerk musste aufgrund der Wind- und Tideverhältnisse auch während des Technischen Tests mehrfach schließen, wobei die Sperrhäufigkeit des Sommers 2020 über die des langjährigen Mittelwertes lag. Die Tore wurden jeweils erst zu einem späteren Zeitpunkt der Flutphase geschlossen, so dass lediglich der Tidehochwasserscheitel gekappt wurde. Der Schließvorgang erfolgte erst bei Wasserständen zwischen $\text{NHN} +1,5$ und 2 m und die Schließdauer betrug 2 bis rd. 5 Stunden. Das Öffnen des Sperrwerks erfolgt grundsätzlich bei Gleichstand des Ober- und Unterpegels. Vom 05. bis 07.07. wurden fünf direkt aufeinanderfolgende Tidehochwasserscheitel ausgesperrt und am 28. und 29.07. erfolgte die Sperrung von drei Tidehochwassern in Folge. Alle anderen Sperrungen fanden im zeitlichen Abstand von einer oder mehrerer Tiden statt.

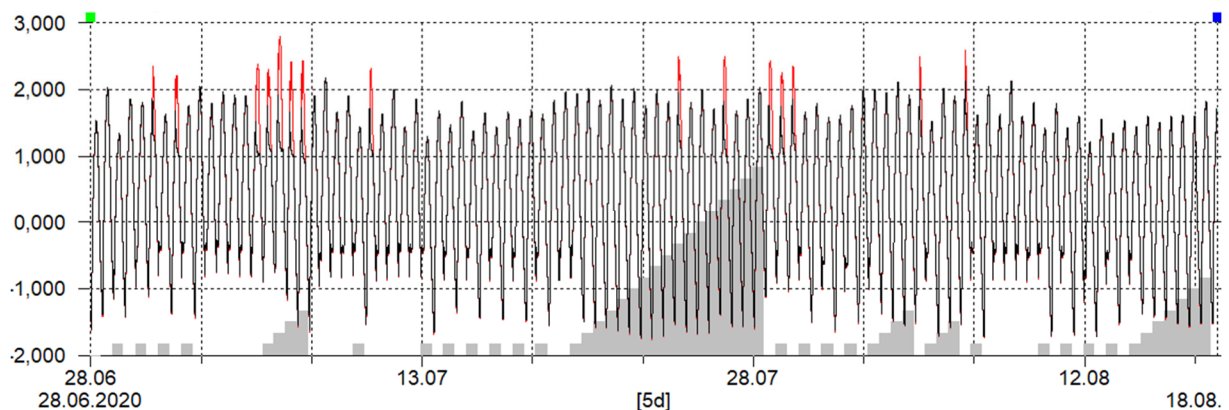


Abbildung 15: Ober- und Unterpegel des Ledasperrwerks (mNHN) im Zeitraum 28.06. bis 18.08.2020 und Unterbrechungen der Tideniedrigwasseranhebung (grau, kumulierte Anzahl).

4.2.1.1 Längerfristige Rückschau auf die Charakteristik und Entwicklung der Sperrhäufigkeit des Ledasperrwerks

Die Anzahl der Sperrungen hat seit Inbetriebnahme des Ledasperrwerks im Jahre 1954 deutlich zugenommen. In den Anfangsjahren wurde dieses im Winterhalbjahr etwa 50-mal und im Sommerhalbjahr etwa 20-mal geschlossen. Heute erfolgen über 120 Sperrungen im Winter und über 50 Sperrungen im Sommer.

⁶ WSA Emden 1997: Betriebsordnung für das Leda-Sperrwerk; Emden März 1997

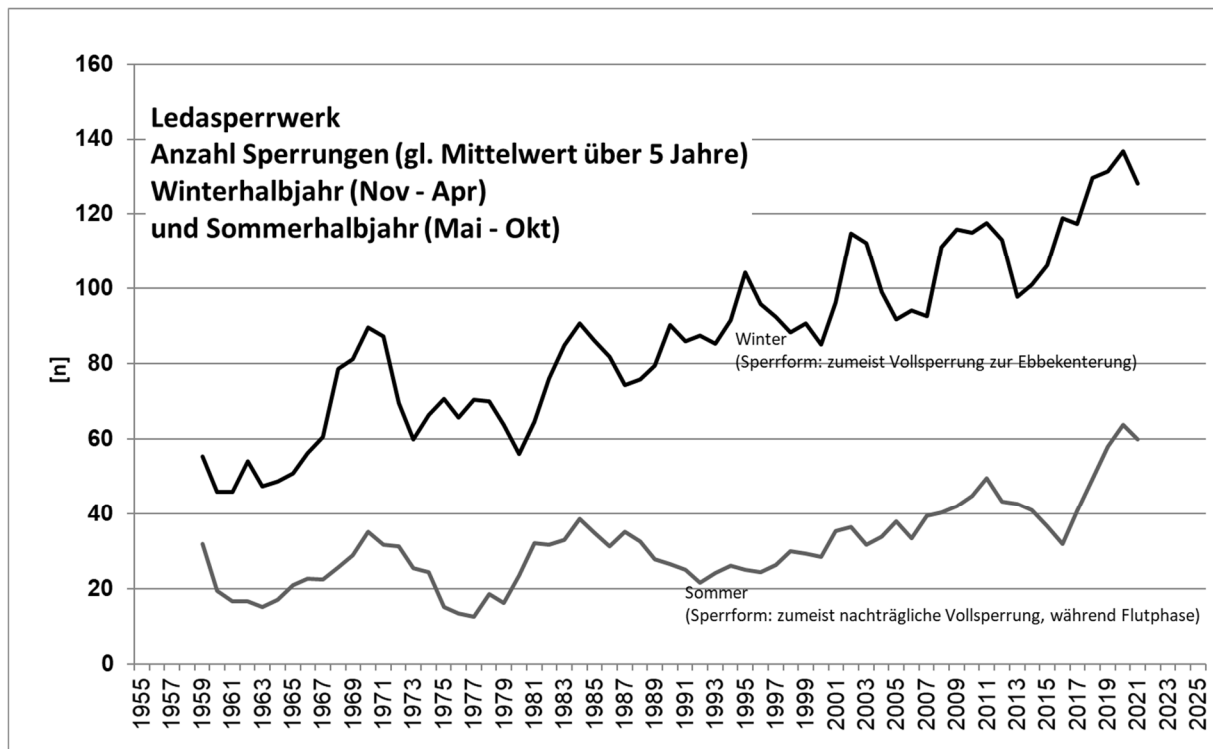


Abbildung 16: Entwicklung der Sperrhäufigkeit des Ledasperrwerks im Winter- und Sommerhalbjahr seit Inbetriebnahme des Bauwerks im Jahre 1954 (gleitender Mittelwert über 5 Jahre; Datenquelle WSA Ems-Nordsee, Auswertung A. Engels/NLWKN).

Der Einsatz des Ledasperrwerks erfolgt hauptsächlich im Rahmen des Hochwasserschutzes. Selten wird das Bauwerk auch aus anderen Anlässen geschlossen, u.a. im Zusammenhang mit Schiffsüberführungen oder Wasserbaumaßnahmen in den Hauptgewässern des Leda-Jümme-Gebietes. Es ist grundsätzlich eine deutliche Saisonalität bei der Anzahl und der Art der Sperrungen vorhanden. Der Sturmfluteinsatz im Winter ist häufiger als im Sommer. In den letzten 20 Jahren wurden in den sturmreichen Wintermonaten November bis Februar 30 bis 40% der Tiden und in den Sommermonaten weniger als 10% der Tiden gesperrt. Dabei fanden die winterlichen Sperrungen hauptsächlich als Vollsperrung zum Beginn der Flutstromphase (d.h. zur Ebbekenterung) statt, während im Sommer fast ausschließlich nachträgliche Vollsperrungen zu einem späteren Zeitpunkt der Flutphase erfolgten.

Während die Vollsperrungen im Niedrigwasserbereich beginnen, beginnen die nachträglichen Vollsperrungen zu einem höheren Wasserstand. In den vergangenen 20 Jahren lagen die Schließwasserstände der nachträglichen Vollsperrungen im Winterhalbjahr zwischen NHN +1,2 und +1,4 m und im Sommerhalbjahr zwischen NHN +1,5 und > +1,6 m.

Tabelle 5: Charakteristik des bestehenden Sperrwerkseinsatzes (Datengrundlage: > 2100 Sperrungen; Winterhalbjahr: 01.11. bis 30.04. / Sommerhalbjahr: 01.05. bis 31.10.), Betrachtungszeitraum 1999 bis 2018 (Datenquelle WSA Ems-Nordsee, Auswertung A. Engels/NLWKN)

Art der Sperrung	Saison	Anteil an allen Sperrungen [%]	Anteil an jeweiliger Klasse [%]
Alle Sperrungen	Gesamt	<u>100</u>	
	Sommerhalbjahr	24	
	Winterhalbjahr	76	
V		46	<u>100</u>
	Sommerhalbjahr	4	8
	Winterhalbjahr	42	92
nV		45	<u>100</u>
	Sommerhalbjahr	18	40
	Winterhalbjahr	27	60
§7		5	<u>100</u>
	Sommerhalbjahr	< 1	1
	Winterhalbjahr	5	99
B		3	<u>100</u>
	Sommerhalbjahr	2	63
	Winterhalbjahr	1	37
P		0,3	<u>100</u>
	Sommerhalbjahr	0,3	100
	Winterhalbjahr	0,0	0
S		1	<u>100</u>
	Sommerhalbjahr	0,5	45
	Winterhalbjahr	1	55

Erläuterung zur Art der Sperrungen: V (Vollsperrung = Schließen bei Ebbekenterung), nV (nachträgliche Vollsperrung zu einem späteren Zeitpunkt der Flut), §7 (hohes Oberwasser, Sielbetrieb des Sperrwerks); B und P (Schließung zur Vermeidung eines zu hohen Wasserstandes [Sperrung] oder zur Gewährleistung eines erforderlichen Wasserstandes [Stau]) und S (Vermeidung eines zu hohen Wasserstandes bei Aufstau der Ems im Rahmen einer Schiffsüberführung)

4.3 Baggerkampagne Unterems zur Überführung der "Spirit of Adventure"

Daten: Britta Schulte (WSA Ems-Nordsee), Text: Andreas Engels (NLWKN Aurich)

In der Zeit vom 1. Mai bis zum 30. August war die Fahrwassertiefe der Unterems für die Überführung des Werftschiffes SPIRIT of ADVENTURE vorzubereiten. Damit überschneidet sich die Baggerkampagne mit dem Zeitraum des Technischen Tests. Der Aufstau der Ems und die Überführungsfahrt des Werftschiffes erfolgten am 30.08.2020 und damit nach Ende des Testzeitraums.

Zum Einsatz kamen sogenannte Laderaumsaugbagger („Hopperbagger“), welche in langsamer Vorwärtsfahrt über eine zur Gewässersohle abgesenkte Vorrichtung Sediment lösen können, das als Boden-Wasser-Gemisch durch einen Saugkopf und ein Saugrohr in den Laderaum im Schiffinneren gepumpt wird⁷. In der Unterems wird der Saugkopf auf Höhe der nautischen Tiefe abgehängt und das dort befindliche hochkonzentrierte Sediment-Wasser-Gemisch ansaugt und in den Laderaum fördert.

⁷ Siehe auch Erläuterungen in BFG 2016; Sedimentmanagementkonzept Tideems; BfG-JAP-Nr. M39630104029; Koblenz Oktober 2016

Sobald dieser gefüllt ist, steuert der Saugbagger eine speziell für diesen Zweck ausgestattete Anlegestelle an, von wo das Baggergut über ein Rohrleitungssystem an Land verbracht wird.

Zunächst war nur ein Saugbagger eingesetzt, der bis zum 09.07. schwerpunktmäßig die Strecke km 0 bis km 4 bearbeitete, vom 10. bis 14.07. in die untere Leda wechselte und ab dem 15.07. seinen Einsatz im Abschnitt km 11 bis km 15 fortsetzte. Ab dem 21.07. kamen zwei Baggerschiffe zum Einsatz, die bis zum 29.07. gemeinsam auf dem Abschnitt km 7 bis km 11 tätig waren und ab dem 30.07. auf die Strecke km 0 bis km 7 wechselten. Ab dem 29.07. kam ein dritter Saugbagger hinzu, der auf der Strecke km 20 bis km 36 arbeitete.

Den jeweiligen Strecken wurden bis zum 21.07. Tagessummen von 6.000 bis 7.000 m³ Baggergut entnommen. Bei der Angabe der Baggermengen handelt es sich um sogenannte Transportmengen, die einer festen Laderaummenge entsprechen (Quelle: Baggerdatenprogramm „MoNa“ der WSV). Mit dem Hinzukommen eines zweiten Baggerschiffes wurden die Tagessummen auf 10.000 bis 15.000 m³ gesteigert. Zusammen mit dem dritten Saugbagger fielen dann täglich bis zu 20.000 m³ Baggergut an. Damit nahm die Baggerintensität zum Ende der Baggerkampagne deutlich zu.

In Rücksichtnahme auf die Hafenwirtschaft Emden musste die Tideniedrigwasseranhebung zwischen dem 19. und 29.07. für 17 direkt aufeinander folgende Tiden ausgesetzt werden. Der Beginn dieser Pause fiel zufällig zusammen mit der Steigerung der Baggerintensität und der räumlichen Ausweitung der Arbeiten auf die ganze Unterems.

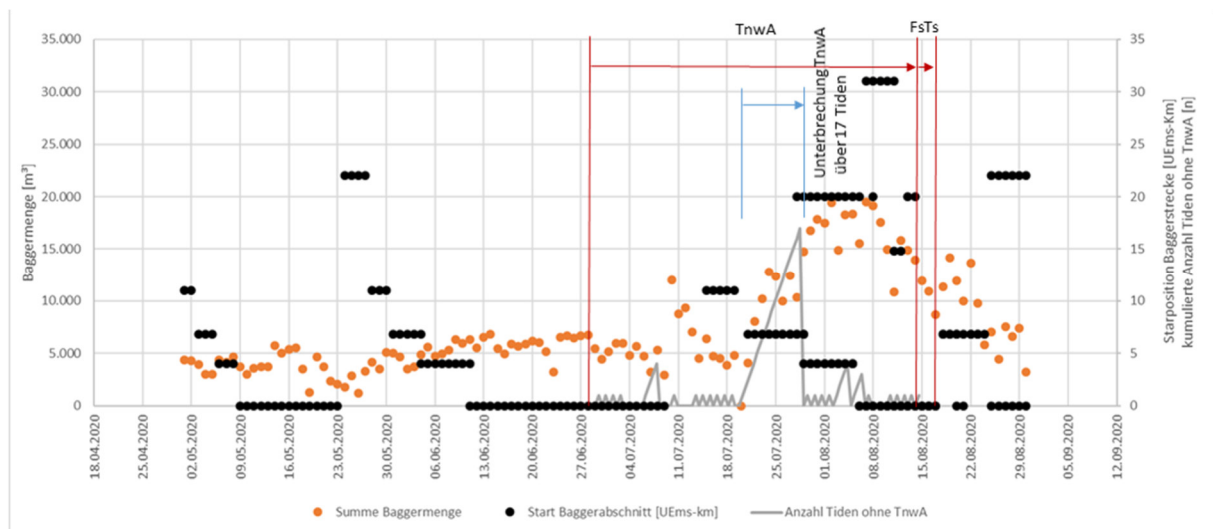


Abbildung 17: Tagessummen der Transportmengen (feste Laderaummenge) und Einsatzstrecken der Laderaumsaugbagger während der Baggerkampagne SPIRIT of ADVENTURE vom 01.05. bis 30.08.2020. Die Baggerkampagne überschneidet sich mit dem Zeitraum des Technischen Tests. Erläuterung zur Lokalisierung der Baggerstrecke: die Baggerstrecken waren zumeist 3 bis 4 km lang. Zur Vereinfachung ist in der Abbildung lediglich die Startposition der jeweiligen Strecke eingezeichnet. Zur Verdeutlichung der Intensität der Tidesteuerung ist die Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (kumulierte Anzahl) mit dargestellt.

4.4 Randbedingungen der Gewässergüte und Definition eines Referenzzustands

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN Aurich)

Die Wassertemperaturen während des Testzeitraums änderten sich mit der jeweiligen Witterung. Im Juni und August lagen die Wassertemperaturen deutlich über dem langjährigen Monatsmittelwert, während die Temperatur im Juli unterdurchschnittlich war.

Tabelle 6: Oberflächennahe Wassertemperaturen an der Station Leer/Leda vor und während des Testzeitraums und Abweichungen vom langjährigen Mittelwert (1984 – 2020)

Wassertemperatur Leda (Leer)	Langjähriger Monatsmittelwert (1984 – 2020) [°C]	Eingetretener Monatsmittelwert 2020 und Abweichung vom langjährigen Mittelwert [°C]
Januar	3,4	5,3 (+1,9)
Februar	3,6	6,2 (+2,6)
März	5,9	7,6 (+1,7)
April	10,5	11,9 (+1,4)
Mai	15,2	15,1 (- 0,1)
Juni	18,2	19,7 (+1,5)
Juli	20,1	19,6 (- 0,5)
August (bis Versuchsende)	19,9	22,6 (+2,7)

Die Parameter Schwebstoffkonzentration, Sauerstoffkonzentration und Salzgehalt wurden durch die Tidesteuerung beeinflusst. Das Maß der Beeinflussung ist eine zentrale Fragestellung des Technischen Tests und wird in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich beschrieben. An dieser Stelle sollen daher nur die Ausgangsbedingungen dieser Parameter genannt werden:

4.4.1 Ausgangssituation und Referenzzustand der Salzgehalte

Im Sommer 2018 endete der Steinkohlebergbau in Ibbenbüren, in dessen Rahmen seit 1981 in sehr hohem Maße chloridhaltige Grubenabwässer in die Ibbenbürener Aa geleitet wurden. Von dort aus gelangte das belastete Wasser über die Dreierwalder Aa, die Speller Aa und die Große Aa unterhalb der Schleuse Gleesen (DEK-km 137,9) in die Ems. Die Wasserhaltung der Betriebsanlagen wurde über das Stilllegen des Bergbaus hinaus betrieben und erst Anfang Juni 2020 eingestellt, so dass seitdem kein belastetes Wasser mehr eingeleitet wird.

Bei niedrigem Oberwasser und damit geringer Verdünnung machte sich die Salzbelastung bis zum Tidewehr Herbrum deutlich bemerkbar (Gütestation Herbrum DEK-Km 212,4, seit Sommer 2019 Heede DEK-Km 210,8). Damit ging auch eine im Sommer messbare Erhöhung der Grundversalzung in der Unterems bis etwa Weener einher.

Seit September 2019 pausiert die Einleitung hochkonzentrierter Sole aus dem Kavernenbau der Energieversorger EWE und WINGAS. Bei Rysum (etwa Unterems-Km 54) wurden in den Vorjahren bis zu 3000 m³ gesättigte Sole je Stunde, entsprechend etwa 1000 Tonnen Salz pro Stunde, in die Ems eingeleitet. In Ausnahmen darf auch eine geringere Soleeinleitung bei Gandersum/Ditzum (etwa Unterems-Km 33) erfolgen, davon wurde allerdings bereits seit Ende 2017 kein Gebrauch gemacht.

Die Salzgehalte der Unterems sind u.a. stark von der Höhe des Oberwassers abhängig. Die daraus hervorgehende Variabilität erlaubt nur bedingt den Vergleich von Salzgehalten, die zu unterschiedlichen Zeiten bzw. Oberwasserzuflüssen ermittelt wurden. Dieses gilt sowohl für die

Schwankung, die auf die saisonalen Unterschiede des Abflusses zurückzuführen sind, als auch auf die längerfristigen Schwankungen, die durch die Abflussverhältnisse insgesamt nasser oder trockener Jahre verursacht werden. Unter Berücksichtigung der variierenden Oberwasserbedingungen lassen sich die Salzgehaltsverhältnisse wie folgt charakterisieren, wobei zwischen den Abschnitten unter- und oberhalb von Terborg zu unterscheiden ist: an den Stationen unterhalb von Terborg (Knock bis Gandersum) ist im Zeitraum der letzten 25 Jahre ein indifferenter bis leicht positiver Trend der Salzgehalte zu erkennen. An den Stationen Terborg bis Papenburg hatten sich bis Mitte der 1990er Jahre die Verhältnisse in Folge der Ausbauzustände und Unterhaltungsmaßnahmen soweit verändert, dass zunehmend höhere Salzgehalte festzustellen waren. Diese traten vermehrt bei niedrigem Oberwasser und hohen Tiden ein. Diese Veränderung führte nur zu einer leichten Zunahme der Monatsmittelwerte. Nach 2004 setzte insbesondere unter sommerlichen Bedingungen eine stärkere Zunahme der Salzkonzentrationen ein, die oberhalb von Terborg als gravierend zu bezeichnen ist und die sich auch durch eine entsprechende Änderung der Monatsmittelwerte äußerte. In den Salzgehalten spiegelte sich seither auch die Einleitung von Sole (Sohlbetrieb s.o.) wider. Der positive Trend der Salzgehaltsentwicklung hielt bis etwa 2014 an, wobei die stärkste Zunahme zwischen etwa 2008 und 2010 zu beobachten war. Seit 2014 zeichnet sich wieder eine leichte Abnahme der Salzgehalte ab, mit Ausnahme der sehr trockenen Jahre 2018 und 2019, in denen wiederum sehr hohe Konzentrationen in der gesamten Unterems zu messen waren.

Ein festgelegter Referenzzustand der Salzgehalte repräsentiert die Verhältnisse der Unterems nur bedingt, da sich in den vergangenen Jahren eine sehr dynamische Entwicklung vollzog. Dieses gilt insbesondere für den Abschnitt oberhalb von Terborg. Um die Salzgehaltsverhältnisse vor Beginn des Technischen Tests bewerten zu können, werden die Mittelwerte der Jahre 2010 bis 2019 als Referenz gewählt: Im Januar 2020 waren die Salzgehalte aufgrund des niedrigen Oberwassers dieses Monats sowie auch der vorhergehenden Trockenphase noch relativ hoch. Die Zunahme des Oberwassers im Februar und März führte zu einer Abnahme der Salzkonzentrationen, die während dieser Zeit sogar unterhalb der jeweiligen Mittelwerte lagen. Nach Abklingen der Oberwasserwelle blieben die Salzgehalte oberhalb von Terborg relativ niedrig. Im Vergleich zu den Verhältnissen der Vorjahre wurden hier höhere Salzgehalte erwartet, die jedoch nicht eintraten. Hingegen waren unterhalb von Terborg relativ hohe Salzgehalte zu beobachten.

*Tabelle 7: Mittlere Salzgehalte [%] der Ems und unteren Leda vor Beginn des Technischen Tests und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (im tidebeeinflussten Abschnitt: Monatsmittelwerte des Salzgehaltes zur Flutkenterung; Station Heede/oberhalb des Tidewehrs: Monatsmittelwert). An der Station Leer/Leda erfolgt die Messung an der Wasseroberfläche, an allen anderen Stationen im Sohlbereich. Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **rot**, Unterschreitungen **blau** und die neutralen Monate **grau** gegenzeichnet.*

Station	Jan 2020	Feb 2020	Mrz 2020	Apr 2020	Mai 2020	Jun 2020
Knock	22,9 (+1,9)	21,7 (+1,6)	18,1 (- 2,6)	21,3 (- 0,7)	24,7 (+0,9)	26,3 (+1,0)
Pogum	12,5 (+1,9)	9,8 (- 0,7)	7,8 (- 4,1)	14,9 (+0,8)	19,0 (+2,5)	20,6 (+1,6)
Terborg	2,8 (+0,4)	1,2 (- 1,0)	1,1 (- 2,5)	5,2 (- 0,1)	8,1 (+0,9)	8,6 (- 0,2)
Leerort	0,5 (+/-0)	0,4 (- 0,1)	0,3 (- 0,4)	0,8 (- 0,6)	1,3 (- 1,1)	1,5 (- 1,7)
Leer/Leda	0,4 (+/-0)	0,2 (- 0,2)	0,2 (- 0,3)	0,6 (- 0,2)	0,9 (- 1,0)	0,9 (- 1,6)
Weener	0,4 (+0,1)	0,4 (+/-0)	0,3 (- 0,1)	0,5 (- 0,1)	0,6 (- 0,2)	0,7 (- 0,6)
Papenburg	0,4 (+0,1)	0,3 (+/-0)	0,3 (- 0,1)	0,4 (+/-0)	0,4 (- 0,1)	0,4 (- 0,2)
Herbrum/Heede	0,5 (+0,1)	0,4 (+/-0)	0,3 (- 0,1)	0,4 (+/-0)	0,4 (- 0,1)	0,4 (- 0,1)

Wie bereits genannt, änderten sich die Salzgehaltsverhältnisse der Unterems nach 2004. Die ab Frühjahr 2020 oberhalb von Terborg gemessenen Werte fügen sich allerdings trotz Berücksichtigung der jeweiligen Randparameter nicht in den Datensatz des Zeitbereichs 2005 bis 2020 ein, stattdessen ist die Übereinstimmung mit den Verhältnissen bis einschließlich 2004 größer.

4.4.2 Ausgangssituation und Referenzzustand der Schwebstoffkonzentrationen

Die Schwebstoffverhältnisse werden u.a. stark durch die Höhe des Oberwassers beeinflusst, wodurch sich eine deutliche Saisonalität ergibt. Die in der Vergangenheit ausgeführten Ausbaumaßnahmen hatten bereits bis Mitte der 1990er Jahre zu deutlichen Änderungen des Sedimenthaushaltes geführt, welche sich insbesondere im Sommer in einer Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen sowie einer Veränderung der Lage und Ausdehnung der Trübungszone äußerte. Diese Entwicklung setzte sich auch über den Zeitpunkt der letzten Ausbaustufe hinaus fort (1994, bedarfsweise Vertiefung für ein 7,3 m tiefgehendes Schiff). Ergänzend dazu ist darauf hinzuweisen, dass im Jahr 1994 die An-Land-Verbringung von Baggergut aus dem Emdener Hafen (ca. 1,5 Mio. m³/a) und des Emdener Fahrwassers (ca. 3,5 Mio. m³/a) eingestellt wurden und seitdem das Material nicht mehr entnommen, sondern in dafür ausgewiesene Klappstellen innerhalb des Systems verbracht wird.

An der Station Papenburg ist eine stetige Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen bis heute zu beobachten. Im Abschnitt Weener bis Pogum nahmen die Konzentrationen bis in den Zeitraum zwischen 2010 und 2015 zu, danach stellte sich wieder eine leichte Abnahme ein, die bis heute anhält. Für die in diesem Abschnitt befindliche Station Gandersum wird diese Entwicklung auch angenommen. Allerdings wurde dort die Messung von der Wasseroberfläche in den Sohlbereich verlegt, weswegen kein konsistenter Datensatz vorliegt. Für den Zeitraum ab 2014 ist allerdings auch in Gandersum eine Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen zu bestätigen. Im Bereich Emden begann erst Ende 2010 die kontinuierliche Schwebstoffmessung, an deren Daten sich ebenfalls eine stetige Abnahme seit 2014 ablesen lässt. Wie sich die Konzentrationen in Emden bis 2010 verhielten, kann aufgrund der fehlenden Daten nicht beantwortet werden. Die vorgenannte Entwicklung zeichnet sich in den Zeitreihen der Sommer- und Winterhalbjahre ab, wobei die Konzentrationen im Sommerhalbjahr sehr viel höher sind und der Entwicklungstrend sehr viel deutlicher ist als im Winterhalbjahr. Im Gegensatz dazu sind an der Station Knock saisonale Unterschiede der Schwebstoffentwicklung zu erkennen. In den Wintermonaten nahmen die Konzentrationen bis in den Zeitbereich 2010 bis 2015 zu, danach stellte sich wieder eine leichte Abnahme ein, die bis heute anhält. In den Sommermonaten gab es bislang keinen Trendwechsel, es ist eine stetige Abnahme zu erkennen.

Aufgrund der sehr großen Variabilität der Schwebstoffkonzentrationen sowie deren dynamischer Entwicklung in den vergangenen Jahren, repräsentiert ein festgelegter Referenzzustand die Verhältnisse in der Unterems nur eingeschränkt. Um die Schwebstoffverhältnisse vor Beginn des Technischen Tests bewerten zu können, werden die Mittelwerte der Jahre 2010 bis 2019 als Referenz gewählt: Im Januar 2020 waren die Schwebstoffgehalte an den Stationen Terborg bis Papenburg aufgrund des niedrigen Oberwassers dieses Monats sowie auch der vorhergehenden Trockenphase noch relativ hoch. Im Gegensatz dazu waren die Werte an den Stationen Pogum und Knock relativ niedrig. Die Zunahme des Oberwassers im Februar und März führte zu einer Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen, so dass diese insbesondere im März relativ gering waren. Bemerkenswert ist, dass nach Abklingen der Oberwasserwelle die Schwebstoffgehalte in der Unterems relativ niedrig blieben. An den Stationen Leerort und Weener wurde die Unterschreitung der Mittelwerte zum Juni hin sogar noch größer und erreichte ein außergewöhnlich hohes Maß. Im Vergleich zu den Verhältnissen der Vorjahre waren hier somit wesentlich höhere Schwebstoffgehalte zu erwarten gewesen. An der Station Papenburg waren im April noch relativ niedrige Schwebstoffwerte zu messen. Anschließend nahmen dort allerdings die Konzentrationen zu und erreichten später sogar ein relativ hohes Niveau. Die vorgenannten Aussagen gelten für die mittleren Schwebstoffkonzentrationen beider Tidephasen.

In der nachfolgenden Zusammenstellung sind die mittleren Schwebstoffkonzentrationen von Januar bis Juni 2020, sowie deren Abweichungen vom Mittelwert (2010/19) aufgeführt. In der Vergangenheit wurde an den Stationen Weener und Papenburg zeitweise der maximale Messbereich überschritten, der anschließend jedoch an die steigenden Schwebstoffgehalte angepasst wurde. Da die höchsten Schwebstoffgehalte während der Flutphase auftreten, sind die Daten der Ebephase weniger davon betroffen. Zur Beurteilung der langfristigen Entwicklung wurden daher die Mittelwerte der Ebbe verwendet, da deren Zeitreihe konsistenter ist als die der Flut. Zur Vollständigkeit werden jedoch auch die Daten der Flut aufgeführt.

Tabelle 8: mittlere Schwebstoffgehalte [g/l] der Ems vor Beginn des Technischen Tests und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der mittleren **Ebbe**-Konzentration). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **rot**, Unterschreitungen **blau** und die neutralen Monate **grau** gegenzeichnet.

Station	Jan 2020	Feb 2020	Mrz 2020	Apr 2020	Mai 2020	Jun 2020
Knock	0,2 (- 0,2)	0,4 (+/-0)	0,3 (+/-0)	0,3 (+/-0)	0,1 (+/-0)	0,1 (+/-0)
Pogum	1,5 (- 0,7)	1,4 (- 0,8)	0,9 (- 1,3)	0,8 (- 0,9)	0,5 (- 0,7)	0,5 (- 0,3)
Terborg	1,8 (+0,4)	1,0 (- 0,3)	0,5 (- 1,2)	1,2 (- 0,5)	1,0 (- 0,5)	0,9 (- 0,4)
Leerort	1,5 (+0,3)	0,5 (- 0,5)	0,2 (- 1,5)	0,8 (- 1,7)	1,5 (- 1,9)	1,4 (- 2,3)
Weener	1,7 (+0,6)	0,7 (- 0,3)	0,2 (- 1,8)	0,7 (- 3,1)	1,7 (- 5,3)	2,5 (- 6,3)
Papenburg	1,2 (+0,6)	0,3 (- 0,4)	0,1 (- 1,4)	1,5 (- 1,9)	6,0 (+0,3)	8,9 (+0,7)

Anmerkung: an der Messstation Herbrum/Heede wird keine Schwebstoffkonzentration erfasst

Tabelle 9: mittlere Schwebstoffgehalte [g/l] der Ems vor Beginn des Technischen Tests und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der mittleren **Flut**-Konzentration). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **rot**, Unterschreitungen **blau** und die neutralen Monate **grau** gegenzeichnet.

Station	Jan 2020	Feb 2020	Mrz 2020	Apr 2020	Mai 2020	Jun 2020
Knock	0,3 (- 0,2)	0,5 (+/- 0)	0,5 (+/- 0)	0,4 (+/- 0)	0,2 (- 0,1)	0,2 (- 0,1)
Pogum	1,2 (- 0,8)	1,1 (- 0,8)	0,6 (- 1,2)	0,6 (- 0,8)	0,4 (- 0,6)	0,4 (- 0,2)
Terborg	2,6 (+0,3)	1,4 (- 0,7)	0,6 (- 2,3)	1,9 (- 1,4)	1,6 (- 1,7)	1,5 (- 1,2)
Leerort	3,0 (+0,7)	0,8 (- 1,1)	0,2 (- 3,4)	1,3 (- 4,8)	2,7 (- 6,8)	2,4 (- 8,0)
Weener	7,4 (+3,4)	1,7 (- 2,1)	0,2 (- 7,2)	3,1 (-11,6)	10,7 (-12,0)	12,6 (-14,0)
Papenburg	2,9 (+1,7)	0,3 (- 1,1)	0,1 (- 3,5)	3,9 (- 5,5)	10,9 (- 3,3)	14,6 (- 1,4)

Anmerkung: an der Messstation Herbrum/Heede wird keine Schwebstoffkonzentration erfasst

4.4.3 Ausgangssituation und Referenzzustand der Sauerstoffwerte

Die Sauerstoffverhältnisse werden u.a. stark durch die Wassertemperatur und den Schwebstoffgehalt beeinflusst, wodurch sich eine deutliche Saisonalität ergibt.

Ab Anfang der 1990er wurde während des Sommers das erste Mal ein Sauerstoffminimum von < 4 mg/l beobachtet, und zwar im Abschnitt oberhalb von Weener/Papenburg bis etwa Aschendorf. Nach den Ausbaumaßnahmen Mitte der 1990er Jahre, sowie der Einstellung der An-Land-Verbringung des Baggermaterials aus dem Emdener Außenhafen und dem Emdener Fahrwasser erfolgte ein weiterer signifikanter Anstieg der Schwebstoffkonzentrationen, mit denen häufiger und zudem über längere

Zeiträume Sauerstoffwerte an der Wasseroberfläche von < 4 mg/l eintraten. Im Abschnitt um Weener bildete sich in den Sommermonaten zunehmend ein sogenanntes Sauerstofftal aus, das dadurch entsteht, dass weder bei Ebbe noch bei Flut sauerstoffreicherer Wasser dorthin gelangt. In diesem Abschnitt herrschten dann seitdem die schlechtesten Sauerstoffverhältnisse in der Unterems. Mit zunehmender Regelmäßigkeit traten zwischen Gandersum und Papenburg bereits ab etwa Mai geringe Sauerstoffwerte auf, wobei diese zum Sommer hin weiter abnahmen und sich der Abschnitt mit niedrigen Sauerstoffkonzentrationen räumlich ausweitete. Eine weitere Verschlechterung der sommerlichen Sauerstoffsituation trat nach 2004 ein, die sich an den jeweiligen Stationen wie folgt fortsetzte: Bei Pogum nahmen die Konzentrationen weiterhin bis etwa 2010 ab, danach setzte wieder eine Zunahme ein, die bis heute anhält. Mit Vorbehalt kann dieses Verhalten auch auf die Station Gandersum übertragen werden, wo allerdings aufgrund des Wechsels der Messung von der Wasseroberfläche in den Sohlbereich keine konsistente Zeitreihe zur Verfügung steht. Bei Terborg und Leerort ist bei der Trendbetrachtung zwischen den Sommer- und Wintermonaten zu unterscheiden: im Winter nehmen die Sauerstoffwerte nach wie vor ab. Im Sommer war eine Abnahme bis in den Zeitbereich zwischen 2010 und 2015 zu beobachten und danach bis heute eine Zunahme. In Weener und Papenburg nehmen die Sauerstoffwerte weiterhin ab und haben mittlerweile ein sehr niedriges Niveau erreicht. Allerdings deutet sich in Weener in den Sommermonaten eine Trendwende an, da in der Zeit nach 2015 vereinzelt wieder leicht höhere Werte eintraten. An der Knock ist ein abnehmender Trend zu beobachten, der sich nach 2010 leicht verstärkte.

Die vorgenannten Angaben gelten für die mittleren Konzentrationen der Tide sowie auch für die mittleren Tiefstwerte innerhalb der Tide. Da die Sonden im Sohlbereich installiert sind, ist eine zumindest zeitweise Beeinflussung durch die Flüssigschlickschicht an den Stationen Papenburg und Weener nicht ausgeschlossen, so dass bei starker Ausprägung auch die Tidemittelwerte geringer sind und sogar 0 mg/l betragen können. Die Tiefstwerte der Sauerstoffgehalte verdeutlichen die angespannte ökologische Situation besonders. Der Eintritt des Sauerstoffminimums erfolgt je nach Position in der Unterems und hydrologischer Randbedingungen zu unterschiedlichen Zeiten innerhalb der Tide. Allerdings weichen an jeder Position für sich betrachtet die mittleren Minimalwerte der Tidephasen (Monatsmittelwerte) kaum voneinander ab.

Neben der Entwicklung Tidemittelwerte und der mittleren Tiefstwerte sollen auch die mittleren Höchstwerte der Tide der Vollständigkeit halber mitgenannt werden:

An der Knock ist durchgängig ein leicht abnehmender Trend zu beobachten. Dieses trifft auch für die Wintermonate an den Stationen Pogum bis Papenburg zu. In den Sommermonaten ist in diesem Abschnitt die Streuung der Daten sehr groß, so dass nur mit Vorbehalt ein Trend anzugeben ist. Demnach nehmen hier die Konzentrationen auch im Sommer leicht ab, wobei in Terborg und Leerort seit etwa 2015 die Werte wieder etwas ansteigen.

Aufgrund der sehr großen Variabilität der Sauerstoffkonzentrationen sowie deren dynamischer Entwicklung in den vergangenen Jahren, repräsentiert ein festgelegter Referenzzustand die Verhältnisse in der Unterems nur eingeschränkt. Um die Sauerstoffverhältnisse vor Beginn des Technischen Tests bewerten zu können, werden die Mittelwerte der Jahre 2010 bis 2019 als Referenz gewählt: Im Januar 2020 waren die Sauerstoffgehalte an den Stationen Knock bis Papenburg aufgrund des niedrigen Oberwassers dieses Monats sowie auch der vorhergehenden Trockenphase noch relativ niedrig. Allerdings waren auch in Heede, oberhalb des Tidewehrs, relativ geringe Sauerstoffgehalte zu beobachten, woran sich auch in den folgenden Monaten – bis zum Jahresende – nichts änderte. Mit Zunahme des Oberwassers nahmen die Sauerstoffwerte im Februar leicht zu, blieben jedoch trotzdem deutlich unterhalb ihrer Mittelwerte. Ab März blieben die Sauerstoffkonzentrationen dann auf einem relativ hohen Niveau, wobei besonders ab April deutlich höhere Werte als in den Vorjahren eintraten. Die Stationen Papenburg und Knock nahmen sich von dieser Entwicklung aus, dort waren nur kurzzeitig relativ hohe Werte vorhanden, die bis zum Beginn des Tests jedoch wieder abnahmen und auch als relativ niedrig zu bezeichnen sind.

In der nachfolgenden Zusammenstellung sind die mittleren Tiefstwerte der Sauerstoffkonzentrationen von Januar bis Juni 2020, sowie deren Abweichungen vom Mittelwert (2010/19) aufgeführt. Dabei handelt sich um die Mittelwerte der minimalen Ebbe-Sauerstoffkonzentrationen. Im Vergleich dazu sind auch die maximalen Ebbe-Konzentrationen, die weniger stark durch die Flüssigschlickschicht beeinflusst sind, in der darauffolgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 10: mittlere **Tiefstwerte** der Sauerstoffgehalte [mg/l] der Ems vor Beginn des Technischen Tests und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der minimalen Ebbe- Konzentration). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **blau**, Unterschreitungen **rot** und die neutralen Monate **grau** gekennzeichnet.

Station	Jan 2020	Feb 2020	Mrz 2020	Apr 2020	Mai 2020	Jun 2020
Knock	10,2 (-0,5)	9,7 (- 0,9)	9,2 (- 0,5)	8,6 (+0,2)	7,4 (+/-0)	6,1 (- 0,2)
Pogum	9,8 (-0,2)	9,4 (- 0,5)	8,9 (+0,3)	7,9 (+1,3)	7,2 (+2,1)	5,6 (+0,9)
Terborg	9,2 (-0,4)	9,4 (+/-0)	9,1 (+1,3)	7,3 (+1,5)	5,8 (+2,3)	4,3 (+1,7)
Leerort	8,7 (-1,1)	8,9 (- 0,9)	8,3 (+0,3)	6,6 (+1,0)	4,2 (+1,3)	2,7 (+1,0)
Weener	9,0 (-1,5)	9,5 (- 1,0)	9,5 (+1,2)	6,5 (+1,2)	3,0 (+1,3)	1,3 (+0,9)
Papenburg	9,7 (-0,8)	9,7 (- 0,8)	9,4 (+0,4)	6,9 (+1,2)	1,8 (- 0,1)	0,2 (- 0,3)
Herbrum/Heede ¹⁾	11,9 (-1,1)	10,6 (- 2,5)	10,3 (- 2,4)	11,4 (- 0,4)	9,7 (- 0,6)	7,8 (- 0,5)

¹⁾ oberhalb des Tidewehrs, kein Tideeinfluss

Tabelle 11: mittlere **Höchstwerte** der Sauerstoffgehalte [mg/l] der Ems vor Beginn des Technischen Tests und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der maximalen Ebbe- Konzentration). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **blau**, Unterschreitungen **rot** und die neutralen Monate **grau** gekennzeichnet.

Station	Jan 2020	Feb 2020	Mrz 2020	Apr 2020	Mai 2020	Jun 2020
Knock	10,6 (-0,8)	10,4 (-1,1)	10,0 (- 0,8)	9,2 (- 0,4)	8,0 (- 0,4)	6,6 (- 0,4)
Pogum	10,7 (-0,2)	10,2 (-0,8)	9,6 (- 0,4)	8,9 (+0,2)	7,8 (+0,3)	6,4 (- 0,2)
Terborg	9,7 (-0,5)	9,9 (-0,2)	9,5 (+0,8)	8,1 (+1,0)	7,5 (+2,1)	5,7 (+0,8)
Leerort	9,4 (-1,4)	9,5 (-1,4)	9,3 (+/-0)	7,5 (+0,2)	5,9 (+0,7)	4,3 (+0,5)
Weener	11,2 (-0,5)	10,6 (-1,1)	10,3 (- 0,2)	8,3 (- 0,3)	4,9 (- 0,8)	3,4 (- 0,1)
Papenburg	11,7 (-0,1)	10,7 (-1,4)	10,2 (- 0,7)	9,7 (+0,1)	6,8 (- 0,6)	4,9 (- 0,3)
Herbrum/Heede ¹⁾	11,9 (-1,1)	10,6 (-2,5)	10,3 (- 2,4)	11,4 (-0,4)	9,7 (- 0,6)	7,8 (- 0,5)

¹⁾ oberhalb des Tidewehrs, kein Tideeinfluss

4.4.4 Zusammenfassung zur Ausgangssituation der Gewässergüte

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass im größten Abschnitt der Unterems die Salz- und Schwebstoffgehalte seit 2010/15 wieder abnehmen und gleichzeitig die Sauerstoffwerte wieder ansteigen. Bezeichnend ist, dass der allgemeine Trend bzw. dessen Wechsel nicht in jedem Fall auf den oberen und unteren Bereich der Unterems zu übertragen ist. So nimmt an der Knock der Salzgehalt weiterhin leicht zu und der Sauerstoff leicht ab. Bei Papenburg ist nach wie vor eine Zunahme der Schwebstoffwerte und ebenfalls eine Abnahme der Sauerstoffgehalte zu beobachten.

Tabelle 12: Trendbetrachtung der Gewässergüte von Knock bis Papenburg – eine Übersicht

Parameter	Abschnitt	Zeitbereich	Trend	
Salz	Knock bis Gandersum	seit längerem	indifferent bis leichte Zunahme	
	Terborg bis Papenburg	insbes. Sommerhalbjahr nach 2004	starke Zunahme	
		etwa 2008 und 2010	stärkster Anstieg	
		seit 2014 (Ausnahme Trockenjahre 2018 und 2019)	Abnahme	
Schwebstoff	Knock	Winterhalbjahr bis 2010/15	Zunahme	
		Winterhalbjahr seit 2010/15	Abnahme	
		Sommerhalbjahr seit längerem	Abnahme	
	Emden bis Weener	bis 2010/15	Zunahme	
		ab 2010/15	Abnahme	
	Papenburg	seit längerem	Zunahme	
Sauerstoff	Knock	seit längerem	Abnahme	
	Pogum/Gandersum	bis etwa 2010	Abnahme	
		ab etwa 2010	Zunahme	
	Terborg bis Leerort/Weener	Winterhalbjahr seit längerem	Abnahme	
		Sommerhalbjahr bis 2010/15	Abnahme	
		Sommerhalbjahr ab 2010/15	Zunahme	
		Weener bis Papenburg	seit längerem	Abnahme

Unmittelbar vor Beginn des Technischen Tests waren in Bezug auf den Referenzzustand relativ hohe Wassertemperaturen und zumeist rel. niedrige Salzgehalte, rel. niedrige Schwebstoffwerte und rel. hohe Sauerstoffkonzentrationen vorhanden.

In der nachfolgenden Abbildung 18 werden die Verhältnisse des Monats Juni 2020 (Testbeginn) im Vergleich mit den Juni-Monaten der Vorjahre nochmals zusammengefasst (Messstation Leer/Leda). Im Unterschied zu den Angaben in Tabelle 6 bis Tabelle 11 (Mittelwerte des jeweiligen Parameters) sind hier die Absolutwerte des Salz- und Sauerstoffgehaltes des Monats Juni 1985 bis 2020 aus folgendem Grund dargestellt: An der Station Leer/Leda wird bereits seit besonders langer Zeit die Gewässergüte kontinuierlich aufgezeichnet. Allerdings traten mehrfach durch verschiedene Umstände Datenlücken in den Zeitreihen der Sauerstoff- und Leitfähigkeitsmessung auf (Eisgang, technischer Defekt etc.), die z.T. die Bildung von Monatsmittelwerten verhinderten. Vorausgesetzt, dass die Ausfälle nicht zu lange dauerten und die Absolutwerte (Monatsmaximum bzw. -minimum) die jeweiligen Verhältnisse ausreichend repräsentierten, geben diese somit einen guten Überblick über die Entwicklung des langen Zeitraums von 35 Jahren.

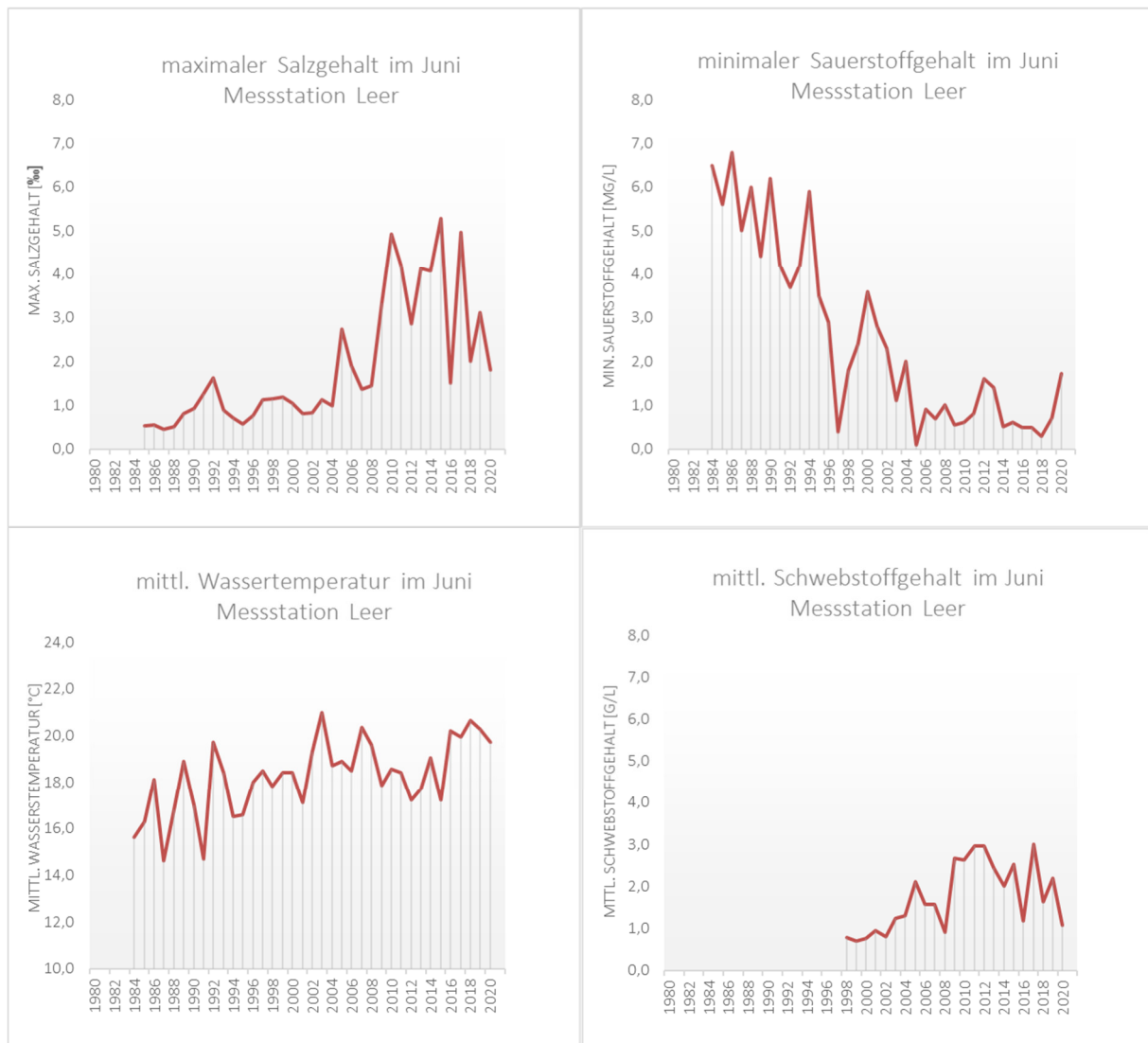


Abbildung 18: Messstation Leer/Leda: Salz-, Sauerstoff-, Schwebstoffgehalt und Wassertemperatur des Juni 2020 im Vergleich mit den Verhältnissen der Vorjahre ab 1985. Bei den Salz- und Sauerstoffwerten handelt es sich um Einzelwerte innerhalb des jeweiligen Juni (maximaler Salzgehalt bzw. minimaler Sauerstoffgehalt), Wassertemperatur und Schwebstoffgehalt sind als Monatsmittelwert angegeben. Die Station Leer/Leda befindet sich 3,9 km oberhalb der Ledamündung und 240 m oberhalb des Ledasperrwerks, die Messung erfolgt an der Wasseroberfläche.

4.5 Bewertung der Randbedingungen vor und nach der mehrtägigen Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.2020)

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN Aurich)

In Rücksichtnahme auf die Hafenwirtschaft Emden musste die Tideniedrigwasseranhebung zwischen dem 19. und 29.07. für 17 direkt aufeinander folgende Tiden ausgesetzt werden. Der gesamte Testzeitraum lässt sich auch mehreren Gesichtspunkten in einen Abschnitt vor und einen weiteren Abschnitt nach der mehrtägigen Unterbrechung einteilen. In diesen beiden Zeitbereichen erfolgte nicht nur eine unterschiedliche Intensität der Tidesteuerung, sondern es herrschten jeweils auch andere hydro-meteorologische Randbedingungen und zudem wechselte die Intensität und räumliche Ausweitung der Baggermaßnahme.

Im ersten Abschnitt des Testzeitraums lagen die Tagesmittelwerte der Wassertemperaturen zwischen 23,0 und 17,5°C (Mittelwert 19,5°C). Im Zeitraum nach der Unterbrechung waren Werte zwischen 19,5 und 25,0°C (Mittelwert 22,2°C) vorhanden, womit diese deutlich höher lagen als im ersten Abschnitt. Hinsichtlich des Sauerstoffhaushalts bot die höhere Wassertemperatur des zweiten Abschnitts eine ungünstigere Randbedingung als im ersten Abschnitt (zur weiteren Charakterisierung Temperaturverhältnisse (siehe 4.1). Das Oberwasser schwankte im ersten Abschnitt zwischen 19 und 30 m³/s (Mittelwert 24 m³/s) und im zweiten Abschnitt zwischen 16 und 31 m³/s (Mittelwert 21 m³/s), womit sich die beiden Zeitbereiche allerdings nur vordergründig ähnelten, denn die zeitliche Verteilung des Oberwassers war durchaus unterschiedlich. Während im ersten Abschnitt die Abflüsse relativ gleichmäßig um ihren Mittelwert schwankten, wurde der Mittelwert des zweiten Abschnitts nur zu Beginn deutlich überschritten und anschließend über längere Zeit unterschritten (niedrige Werte vom 02. bis 14.08.). Hinsichtlich des Feststofftransports boten die Oberwasserverhältnisse des zweiten Abschnitts eine ungünstigere Randbedingung, da diese die flutseitige Transportrichtung von Feststoffen in stärkerem Maße förderten als im ersten Abschnitt.

Die Überschneidung von Windeinfluss und astronomischer Tide führte im Zeitabschnitt bis zur Unterbrechung des Tests häufig zu höheren Tideniedrigwasserständen. Hier ist auch die Phase zu Beginn des Tests zu nennen, in der ein mehrtägiger Südwest-Wind zu einem Windstau, insbesondere zu höheren Tideniedrigwasserständen und auch geringeren Tidehüben führte. Im Abschnitt nach der Unterbrechung traten keine vergleichbaren Verhältnisse ein, so dass hier höhere Tidehübe überwogen. Erst zum Ende des zweiten Abschnitts kamen auch Tiden mit geringem Tidehub vor. Hinsichtlich des Feststofftransports boten die Tideverhältnisse des zweiten Abschnitts eine ungünstigere Randbedingung, da diese aufgrund der höheren Tideintensität zu einer höheren Schwebstoffkonzentration beitrugen.

Der Beginn der Steuerungspause fiel zufällig zusammen mit der Steigerung der Baggerintensität und der räumlichen Ausweitung der Arbeiten auf die ganze Unterems, die bis zum Ende des Technischen Tests in dieser Form aufrecht gehalten wurde.

5 Monitoringprogramm zum Testbetrieb im Sommer 2020

Zusammenstellung von Andreas Engels (NLWKN Aurich) unter Verwendung von Materialien der beteiligten Institutionen

5.1 Veranlassung des Monitorings

Nach Artikel 9 (Grundsätze) Absatz 3 des Masterplans Ems 2050 soll zur Nachverfolgung und Überwachung der Entwicklung des Ems-Ästuars ein begleitendes Monitoring zu allen in Artikel 1 Abs. 5 des Masterplans präzisierten Zielen durchgeführt werden:

1. die vorrangige Lösung des Schlickproblems in der Unterems,
2. die Verbesserung des Gewässerzustandes in der Tideems mit dem Ziel, günstige Erhaltungszustände im Sinne der entsprechenden Richtlinien zu erreichen:
 - a. Reduzierung des stromaufwärts gerichteten Feststofftransportes
 - b. Verbesserung der Gewässerökologie (Gewässergüte, bessere Lebensbedingungen für die Gewässerfauna und -flora),
3. die Schaffung und/oder Aufwertung der ästuartypischen Lebensräume und Arten mit dem Ziel, günstige Erhaltungszustände im Sinne der entsprechenden Richtlinien zu erreichen,
4. den Schutz der Vögel und ihrer Lebensräume,
5. die Erhaltung eines leistungsfähigen Verkehrsweges Bundeswasserstraße Ems für die Emshäfen sowie für die hafenauffine und wasserstraßenauffine Wirtschaft.

Als wasserbauliche Maßnahme zur Lösung des Schlickproblems und zur Verbesserung des Gewässerzustands in der Unterems (nach Artikel 10 MP-Ems 2050) wurden verschiedene Varianten der Tidesteuerung erarbeitet und letztlich in Form der getesteten Varianten konkretisiert. Die Auswirkungen der Tidesteuerungen im Zeitraum vom 29.06. bis 17.08.2020 wurden über ein Monitoring dokumentiert. Da über die begrenzte Dauer noch keine Tendenzen der sich nur über längere Zeiträume entwickelnden Parameter zu erwarten war, wurde das begleitende Monitoring auf eine Auswahl physikalisch-chemischer Parameter ausgerichtet. Zudem wurde über eine laufende Gewässervermessung die morphologische Entwicklung beobachten. Damit wurden im Wesentlichen die o.g. Punkte 1 und 2 berücksichtigt.

5.2 Übersicht des Messprogramms

Der technische Test wurde durch eine umfangreiche Messkampagne begleitet. Die beteiligten Institutionen waren das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ems-Nordsee (WSA), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Niedersachsen Ports Niederlassung Emden (NPorts) und der NLWKN (Forschungsstelle Küste und Betriebsstelle Aurich). Die verschiedenen Messungen erfolgten von Knock bis Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet, zum einen stationär in hoher zeitlicher Auflösung und zum anderen mobil mit höherer räumlicher Information. Die stationären Messungen finden z.T. bereits seit mehreren Jahrzehnten statt und zeigen die Dynamik der jeweiligen Parameter in Abhängigkeit der Tide, des Mondzyklus und der Jahreszeit. Zudem lassen sich an den Langzeitmessungen Veränderungen ablesen, die durch den Ausbau der Ems hervorgerufen wurden. Die mobilen Messungen ermöglichten eine Datenerfassung an einer Vielzahl von Positionen und waren damit eine Ergänzung zu den stationären Messungen.

Nachfolgend wird das Messsystem beschrieben, mit dem die durch die Tidesteuerung bewirkten großräumigen physikalisch-chemischen Änderungen erfasst wurden.

Tabelle 13: Umfang des Monitorings zum Technischen Test 2020 - Übersicht

	Was	Wie	Wo	Wozu
1	Wasserstand	Pegel / Dauermessung auf unbestimmte Zeit	Ems von Borkum bis Herbrum, Leda-Jümme-Gebiet	Wasserstandscharakteristik; Vergleich Testzeitraum mit Langzeitmessung; Auswirkung u.a. auf Entwässerung oberhalb des Emssperrwerks
2	Wellenmessung	Pegel / Dauermessung im Testzeitraum mit Vor- und Nachlaufzeit	Pogum und Terborg	Auswirkung Tideniedrigwasseranhebung auf Schifffahrt und Häfen (Sunk und Schwall)
3	Grundwasserstand	Pegel / Dauermessung auf unbestimmte Zeit	Entlang der Ems und im Leda-Jümme-Gebiet	Wasserstandscharakteristik; Vergleich Testzeitraum mit Langzeitmessung
4	Strömungsgeschwindigkeit und -richtung im Vertikalprofil, Turbulenz, Temperatur, Leitfähigkeit und Trübung	ADCP, Vektor, CTD und Trübungssonde; im Sohlbereich installierter Geräteträger / Dauermessung im Testzeitraum mit Nachlaufzeit	Nahbereich Emssperrwerk; Ober- und unterhalb der Nebenöffnung 2	Einblick in sperrwerksnahe Hydrodynamik, Daten zur Verifizierung der Bauwerksmodellierung ; Daten zur Bemessung der Sohlsicherung; Vergleich beeinflusster und unbeeinflusster Tiden
5	Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, Druck, Temperatur, Leitfähigkeit, Sauerstoff und Trübung	Dauerströmungsmessgeräte (DSM) mit Zusatzsensoren (Seaguard), zumeist in einer Tiefenstufe, an einigen Positionen auch in mehreren Tiefenstufen / Langzeit-Dauermessung	Ems von Borkum bis Herbrum	Strömungscharakteristik bzw. Transportvermögen, Charakteristik der Gewässergüteparameter; Vergleich Testzeitraum mit Ergebnissen der Langzeitmessung
6	Schwebstoffgehalt im Vertikalprofil, in Kombination mit DSM (s. Pkt. 5)	Feststoffsonden (MSSolitax) in mehreren Tiefen/ Messung im Testzeitraum mit Vor- und Nachlaufzeit	Soltborg (Unterems-Km 18,45)	Vertikale Schwebstoffverteilung und Auswirkung der Sperrwerkssteuerung
7	Schwebstoffgehalt im Vertikalprofil, in Kombination mit Messung von: Turbulenz, Flüssigschlickdicke an Sohle,	gravimetrischer Bestimmung der schwebstoffgehalte, Dichtemessung (Rheotune); Turbulenz (ADV-Sonde); Mehrfrequenzecholot/	Weener (Unterems-Km 7,2) und Soltborg (18,38)	Verhalten der Flüssigschlickschicht und der Schwebstoffkonzentration während der Tide an jeweiligem Ort, Rückschluss auf

	Gewässergüte und Nähr- und Schadstoffe	Messung zu mehreren Terminen jeweils über eine Ebbephase, Probenahme und labortechn. Analyse		Transportverhalten; Auswirkung der Sperrwerksteuerung
8	Gewässergüte (Sauerstoff, Temperatur und Leitfähigkeit) im Vertikalprofil, in Kombination mit DSM (s. Pkt. 5)	Datenlogger in mehreren Tiefen/ Messung im Testzeitraum mit Vor- und Nachlaufzeit	Weekeborg (Unterems-Km 11,775), Soltborg (18,45), Terborg (24,53) und Ditzum (33,57)	Vertikale Verteilung und Auswirkung der Sperrwerkssteuerung
9	Gewässergüte (Sauerstoff, Temperatur und Leitfähigkeit), Nähr- und Schadstoffe	Längsmessung, kontinuierliche oberflächennahe Messung während der Fahrt sowie Probenahme/ Messung an zwei Terminen, eine vor und eine während des Testzeitraums	Borkum bis Herbrum	Bezug zwischen Untersuchungsgebiet (Knock bis Herbrum) und Großraum (Ems bis nach Borkum); Vergleich der aktuellen Messungen zu vorhergehende Messungen im Zeitraum 2010 bis 2019
10	Gewässergüte (Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit, Trübung), Druck, Dichte	Im Abstand von rd. 2 Km Tiefenprofile von der Wasseroberfläche über die Flüssigschlickschicht bis zur festen Sohle; Sea&Sun-Sonden/ zahlreiche Messungen während des Testzeitraums	Knock bis Herbrum	Vertikale Verteilung; Vergleich zu den über mehrere Jahre turnusmäßig durchgeführten Längsmessungen
11	Gewässergüte (Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit, Trübung, teilw. pH)	kontinuierlich zumeist im Sohlbereich messende Stationen/ Dauermessung auf unbestimmte Zeit	Knock bis Halte (Abstände von 1 bis 10 km), Herbrum (1,5 Km oberhalb Tidewehr), in der Leda (4 Km oberhalb Leda-Mündung)	Vergleich Testzeitraum mit Ergebnissen der Langzeitmessung
12	Bathymetrie Längsfahrt	Linienpeilung, Knock bis Papenburg Multibeam (15, 38 und 200 kHz) in Kombination mit Sedimentecholot (Topas); Papenburg bis Herbrum Singlebeam (33 und 210 kHz)/ zahlreiche Messungen während des Testzeitraums	Knock bis Herbrum	Vergleich zu den über mehrere Jahre turnusmäßig durchgeführten Längsmessungen, zudem während des Tests Verkehrssicherungspeilung
13	Bathymetrie Querprofile	Linienpeilung, Singlebeam 33 und 210 kHz/ zahlreiche Messungen während des Testzeitraums	in den Abschnitten Jemgum-Terborg und Weener-Papenburg	Vergleich Testzeitraum mit Ergebnisse der Vormessungen mehrerer Jahre

14	Bathymetrie Referenzprofil	Linienpeilung, Singlebeam (33 und 210 kHz)/ zahlreiche Messungen vor, während und nach dem Testzeitraum	Emder Außenhafen und Emders Fahrwasser	Vergleich der Ergebnisse des Testzeitraums mit denen des längeren Betrachtungszeitraums
15	Bathymetrie Außenhafen und Liegewannen in Kombination mit: Dichtemessung und Sedimentproben	Flächenpeilung, Multibeam (15, 38 und 200 kHz); Dichtesonde; Sedimentgreifer/ Dauermessung auf unbestimmte Zeit	Emder Außenhafen und Liegewannen entlang des Emders Fahrwassers (Emspier)	Vergleich Testzeitraum mit Langzeitmessung; Veränderung der Tiefenverhältnisse und der Sohlzusammensetzung ; Sicherungspeilung
16	Bathymetrie Emssperrwerk	Flächenpeilung, Fächerecholot / parametrisches Echolot/ zahlreiche Messungen während des Testzeitraums	In den befestigten Sohlbereichen der Toröffnungen und den unmittelbar am Bauwerk befindlichen Flächen sowie den unbefestigten Bereichen ober- und unterhalb des Sperrwerks	Entwicklung der Sohle in Abhängigkeit der Torsteuerung; Sicherungspeilung
17	Bathymetrie Außenmuhden	Flächenpeilung, Fächerecholot / parametrisches Echolot/ eine Messung vor und eine Messung nach dem Testzeitraum	Außenmuhden zwischen Stapelmoor (Unterems-Km 3) bis Knock (51)	Mögliche Zunahme der Sedimentation in den Außenmuhden durch Tidesteuerung
18	Sedimentproben	Gemäß der jährlichen HABAG/ vor, während und zum Ende des Testzeitraums	Borkum bis Herbrum	Erfassung der Sohlsedimente und Vergleich des Testzeitraums mit turnusmäßiger Langzeitmessung
19	Schwingungsmessung Emssperrwerk	Schwingungssensoren an der Nebenöffnung 2/ vor-, während des Testzeitraums mit Vor- und Nachlaufzeit	Nebenöffnung 2 (NÖ2) des Emssperrwerks	Ermittlung repräsentativer Bewegungsmuster des Verschlusskörpers und Beurteilung hinsichtlich einer möglichen Belastung

5.3 Wasserstandsmessungen zwischen Borkum und Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet

Bearbeitet vom WSA Ems-Nordsee und Andreas Engels (NLWKN)

Zwischen Borkum und der Tidegrenze Herbrum sind in Abständen von 2 bis 11 km insgesamt 16 kontinuierlich messende Pegel angeordnet. Die Zeitreihe des Wasserstands liegt zumeist in einer zeitlichen Auflösung von 1 Minute vor. Digitale Altdaten der Wasserstandszeitreihen (Auflösung 1 Minute) sind zumeist ab dem Jahr 2000 vorhanden. An den Standorten Pogum und Terborg erfolgte neben der o.g. Wasserstandsmessung auch eine hochfrequente Abtastung der Wasseroberfläche.

Tabelle 14: Auflistung der Tidepegel an der Ems zwischen Borkum und Herbrum

Pegelname	Position [Unterems-Km]	Betreiber
Borkum Südstrand	89,2	WSA
Borkum Fischerbalje	83,5	
Emshörn	74,3	WSA
Eemshaven	ca. 72	RWS NL
Dukegat	65,7	WSA
Delfzijl	ca. 55	RWS NL
Knock	50,9	WSA
Emden Neue Seeschleuse	40,9	WSA
Pogum	35,3	WSA
Gandersum	31,7	NLWKN
Terborg	24,6	WSA
Leerort	14,7	WSA
Weener	6,9	WSA
Papenburg	0,4	WSA
Rhede	-8,0	WSA
Herbrum Hafendamm	-12,7	WSA

Erläuterung: Rijkswaterstaat Niederlande (RWS NL), Wasserstraßen- und Schifffahrtamt Ems-Nordsee, Standorte Emden bzw. Meppen (WSA), NLWKN Bst. Aurich (NLWKN); Position nach Unterems-Kilometrierung (Pegel Rhede DEK-Km 217,9, Herbrum Hafendamm DEK-Km 213,1)

Oberhalb der Ledamündung befinden sich 13 ständig messende Pegel in Leda, Jümme und den tidebeeinflussten Abschnitten einiger zufließender Gewässer. Der Wasserstand steht zumeist in einer zeitlichen Auflösung von 1 bzw. 5 Minuten zur Verfügung. Die im Jahre 2012 außer Betrieb genommenen Pegel Wiltshausen und Potshausen (beide an der Leda) wurden vor Beginn des Technischen Tests vom WSA wieder in Betrieb genommen.

Tabelle 15: Auflistung der Tidepegel im Leda-Jümme-Gebiet

Pegelname	Gewässer / Position [Km oberhalb Ledasperrwerk]	Betreiber
Ledasperrwerk Unterpegel	Leda / 0 *)	WSA
Gewässergütemessstation Leer	Leda / 0,3	NLWKN
Wiltshausen	Leda / 5,0	WSA
Westringaburg	Leda / 11,3	NLWKN
Potshausen	Leda / 15,9	WSA
Dreyschloot	Leda-Dreyschloot / 20,4	WSA
Ostrhauderfehn Unterpegel	Hauptfehnkanal / 18,5	NLWKN
Nortmoor	Jümme / 10,1	NLWKN
Holtland	Jümme / 12,1	NLWKN
Stickhausen	Jümme / 15,6	NLWKN
Barge	Jümme / 22,5	NLWKN
Augustfehn	Aper Tief / 28,6	NLWKN
Südgeorgsfehn	Südgeorgsfehnkanal / 24,6	NLWKN

*) rd. 3,9 Km oberhalb der Ledamündung; die Ledamündung befindet sich rd. 18 Km oberhalb des Emssperrwerks

Es stehen längere Zeitreihen der Wasserstände in der Ems von Borkum bis zum Tidewehr Herbrum und in der Leda von der Mündung bis in die Gefällestrrecken einiger Zuflüsse zur Verfügung, so dass ein Referenzzustand definiert werden kann. Damit sind die durch die Tidesteuerung verursachten

Wasserstandsänderungen zu beschreiben. Ergänzend dazu wurden für den Technischen Test Wellenmesspegel in Terborg und Pogum installiert, um die durch die Sperrwerkssteuerung verursachten Sunk- und Schwallwellen zu erfassen. Damit ist zu klären, ob davon eine Gefahr für die Hafenvirtschaft, die Berufsschifffahrt und den Sportbootbetrieb ausgeht.

Insbesondere sind die Wasserstandsverhältnisse im Bereich von Emden zu beschreiben, denn die Torsteuerung der Tideniedrigwasseranhebung führte einerseits zu einer Erhöhung der Sinkgeschwindigkeiten während der Ebbe und zum anderen zu einer Absenkung der Tideniedrigwasserstände. Daraus ging eine Beeinflussung der Hafenvirtschaft des Emdener Hafens und der dazugehörigen Schiffs Liegeplätze entlang des Emdener Fahrwassers hervor.

Neben der Veränderung der Wasserstandscharakteristik ist von Interesse, welche mögliche Beeinflussung die Tideniedrigwasseranhebung auf die Entwässerung entlang der Ems und im Leda-Jümme ausüben kann und wie sich diese Variante auf die Stützung des Tideniedrigwassers in den oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer des Leda-Jümme-Gebietes auswirkt.

5.4 Messung der Grundwasserstände

Bearbeitet von Tanja Eden und Dieter de Vries (NLWKN)

Um mögliche Auswirkungen der Tidesteuerung auf die Grundwasserstände zu erfassen, wurden entlang der Ems und im Leda-Jümme-Gebiet acht Grundwassermessstellen verschiedener Filtertiefen für den Zeitraum des Technischen Tests beobachtet. Da diese Messstellen dem Tideeinfluss unterliegen und in der Vergangenheit bereits Reaktionen des Grundwasserstands auf den Aufstau der Ems bei Schiffsüberführungen zeigten, waren diese besonders geeignet auch im Rahmen des Technischen Tests die Beeinflussung auf die Grundwasserstände wiederzugeben. Der Tideeinfluss in den Grundwassermessstellen nimmt mit zunehmender Tiefe sowie entsprechend der Entfernung zu den tidebeeinflussten Gewässern ab. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen des Technischen Tests auf die Grundwasserstände im Bereich der Deponie Breinermoor an drei weiteren, auf dem Deponiegelände befindlichen, Grundwassermessstellen beobachtet (Abbildung 19).

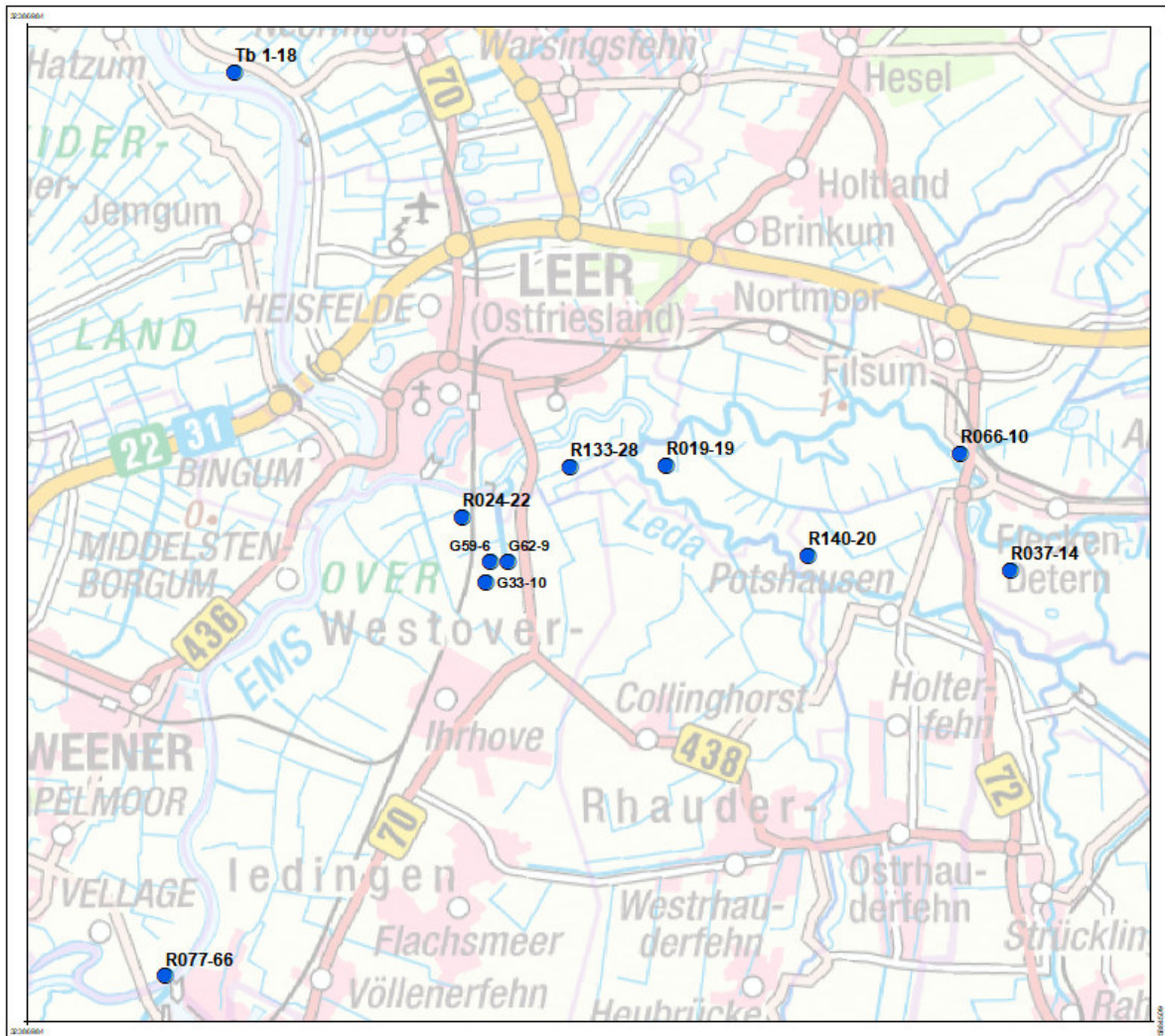


Abbildung 19 Übersichtskarte der beobachteten Grundwassermessstellen an der Ems und im Leda-Jümme-Gebiet sowie an der Deponie Breinermoor

Vergleichbar mit den Wasserstandsmessungen der Oberflächengewässer, existieren auch für die Grundwasserstandsmessungen meist mehrjährige Zeitreihen, anhand derer eine mögliche Einflussnahme der Tidesteuerung ermittelt werden kann. Um auch minimale Einflüsse der Tidesteuerung auf das Grundwasser abbilden zu können, wurden die Grundwasserstände für den Zeitraum des Technischen Tests, anstatt als Tageswerte oder zweistündige Messwerte, als 30-Minuten-Werte erfasst.

Tabelle 16 Auflistung der beobachteten Grundwassermessstellen entlang der Ems (blau), im Leda-Jümme-Gebiet (grün) und der Deponie Breinermoor (gelb)

Kurzbezeichnung	Langbezeichnung	Betreiber	Filteroberkante [m u. GOK]	Filterunterkante [m u. GOK]	Entfernung zum nächsten Gewässer	Entfernung zum ESW (Luftlinie)
Tb 1-18	Terborg1-18	NLWKN	13	18	ca. 87 m (Ems)	5,3 km
R077-66	Halte I	NLWKN	63	65	ca. 250 m (Ems)	24,1 km
R024-22	Esklum II	NLWKN	20	22	ca. 480 m (Leda)	16,5 km
R133-28	Nettelburg	NLWKN	24	28	ca. 483 m (Leda)	17,3 km
R019-19	Amdorf II	NLWKN	17	19	ca. 411 m (Jümme)	19,0 km
R140-20	Neu Leysse I	NLWKN	18	21	ca. 367 m (Leda)	22,9 km
R066-10	Stickhausen	NLWKN	8	10	ca. 6 m (Jümme)	24,6 km
R037-14	Barge I	NLWKN	12	14	ca. 523 m (Jümme)	27,0 km
G59-6	Deponie Breinermoor 59-6	NLWKN	4	6	ca. 1.538 m (Leda)	17,7 km
G62-9	Deponie Breinermoor 62-9	NLWKN	7	9	ca. 1.637 m (Leda)	17,9 km
G33-10	Deponie Breinermoor G33 Tief	NLWKN	6	10	ca. 2.015 m (Leda)	18,0 km

Die Daten der Messstelle R140-20 wurden in den Auswertungen nicht berücksichtigt, da das Gerät während des Untersuchungszeitraumes einen Defekt aufwies und die Daten fehlerhaft waren.

5.5 Begleitende Modelluntersuchung zur Auswirkung der Tidesteuerung auf Wasserstände, Strömungen und Salzgehalte

Bearbeitet von Anton Rosenhagen (BAW)

Um die Wirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände, Strömungen und Salzgehalte beschreiben zu können, wird von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ein Hydrodynamisch-Numerisches (HN-) Modell eingesetzt. Der Vorteil der modellgestützten Begleitung der Messungen besteht im Vergleich von Modellläufen unter realen (mit Tidesteuerung) und unbeeinflussten Randbedingungen (ohne Tidesteuerung). Änderungen in den Modellergebnissen können direkt der Wirkung der Tidesteuerung zugeordnet und mit den Erkenntnissen aus den Naturmessungen verglichen werden.

Um das Modell an der seeseitigen Grenze mit konsistenten, aktuellen Randwerten zu steuern, wird auf das operationelle BAW-Modell GBOM (= German Bight Operational Model) zurückgegriffen. Dieses Modell umfasst die gesamte Deutsche Bucht und liefert unter anderem auch die Randwerte für das Monitoring der Fahrrinnenanpassung der Elbe. Diese Randwerte (Wasserstand und Salzgehalt) werden für den Zeitraum des Testbetriebs im aktuellen BAW-Emsästuarmodell mit Topographie, Stand 2015, eingesetzt. Zudem werden die Randwerte des Windes (Quelle: DWD) und des Abflusses (Quelle: BSH) aus dem Testzeitraum berücksichtigt.

Mit dem auf Untrim² basierenden Modell werden 125 Tiden im Zeitraum 25.06. bis 30.08.2020 simuliert und analysiert, jeweils in einem Szenario mit den tatsächlich durchgeführten Sperrwerkssteuerungen und einem Szenario ohne Steuerungen. Die Steuerungsvarianten Tideniedrigwasseranhebung und Flutstromsteuerung werden getrennt analysiert.

5.6 Strömungsmessung am Emssperrwerk

Bearbeitet von Christian Maushake (BAW)

Hinweis: Zu den Messungen der BAW liegt auch ein gesonderter Technischer Bericht vor, hier sind die wesentlichen Auszüge dokumentiert (siehe MAUSHAKE 2021 im Anhang).

Die BAW hat sich an dem „technischen Test“ mit einem Beitrag zur Erfassung der sperrwerksnahen Strömungsgeschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentrationen (sowie zur Turbulenz, nicht in diesem Bericht) beteiligt. Hierzu wurden in unmittelbarer Nähe des Sperrwerks 3 Messgeräte - Verankerungen ausgebracht.

Die Daten werden benötigt, um die derzeit bei der BAW laufenden Entwicklungen zur Koppelung von Bauwerksmodellen (hier: Ems-Sperrwerk) und Ästuarmodellen (hier: Ems-Modell) zu unterstützen. Der geplante Test bietet die Möglichkeit, die numerischen Modellsysteme unter verschiedenen Randbedingungen zu validieren (Flutstromsteuerung, Ebbstromsteuerung und Normalbetrieb). Darüber hinaus liefern die Daten Informationen zu den Strömungsverhältnissen während des Testbetriebs und können allen Beteiligten im Rahmen des vereinbarten Datenaustausches für weitere Zwecke zur Verfügung gestellt werden.

Das sperrwerksnahe Monitoring der BAW wurde nicht über den gesamten Zeitraum des Technischen Tests durchgeführt. Es begann am 04. August 2020 in der 2. Phase der Tideniedrigwasseranhebung (TnwA II) und endete am 07. September.

Damit konnten alle relevanten Betriebsformen abgedeckt werden:

- Tidenniedrigwasser – Anhebung (TnwA Phase II, in den Plots tlw. Na)
- Flutstromsteuerung (FsTs oder auch Fs)
- „Normal“-Betrieb
- Werftschiffüberführung am 30. / 31. August 2020 (nicht in diesem Bericht)

Die drei Messgeräte-Verankerungen sind entsprechend dem Lageplan in Abbildung 20 an den in Tabelle 17 genannten Positionen ausgelegt worden (A1, B1, B2). Die Messgeräte liegen in etwa entlang der -6m NHN – Tiefenlinie in einem Längsprofil mit der NÖ2.

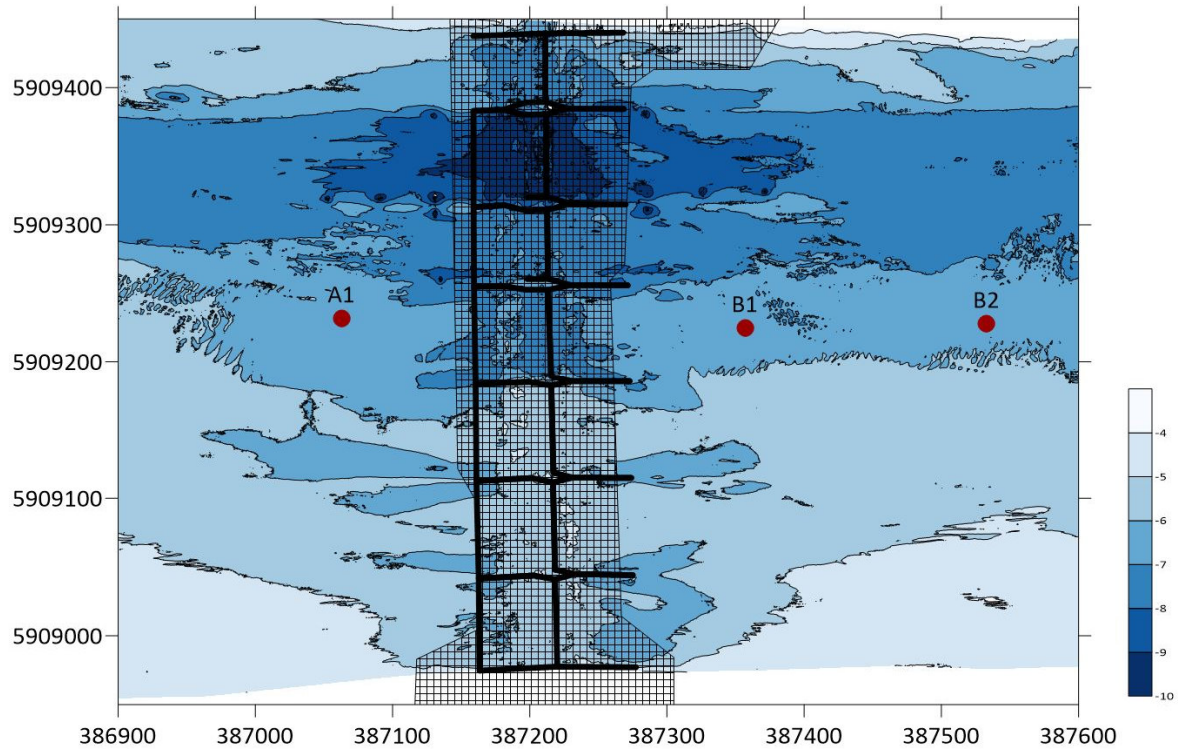


Abbildung 20: Messgeräte-Positionen und vorliegende Bathymetrie aus NLWKN Nullmessung

Tabelle 17: Ist-Positionen der Verankerungen und NHN – Tiefen (aus Peildaten NLWKN)

Pos.	UTM 32		NHN-Tiefe (Peilung) [m]	NHN-Tiefe (Planung) [m]	ca. Distanz Sperrwerk [m]
	East	North			
A1	387063	5909232	-6.36	-6.32	150
B1	387357	5909225	-6.57	-6.26	140
B2	387533	5909228	-6.52	-6.14	320

Die eingesetzten Messgeräte und deren Anordnung auf den Ankersteinen sind in Tabelle 18 genannt und Abbildung 21 gezeigt.

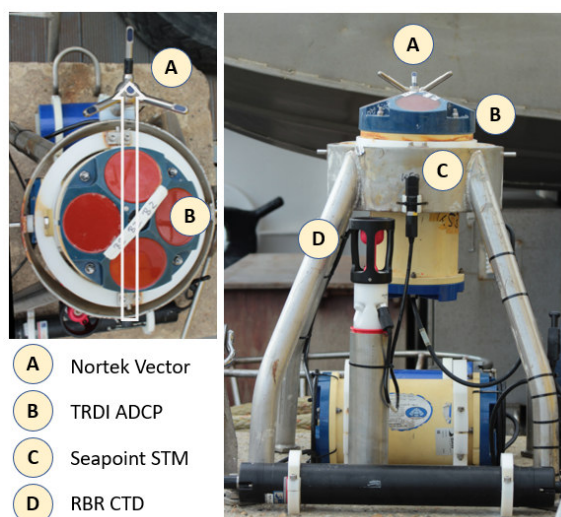


Abbildung 21: Anordnung der Messgeräte auf dem Ankerstein

Tabelle 18: Höhe der Messgeräte über Sohle und Messintervall

Instrument	Höhe über Sohle	Intervall / Messrate	Einsatzzweck
Vector	105 cm Messzelle: 120 cm	32 Hz cont. 1 cm ³ Zelle	Turbulenz
ADCP	100 cm 1. bin: 155 cm	1.5 s (5 pings á 0.3 s) 35 cm Zellenhöhe	Strömungsprofil
STM	85 cm	15 s	SSC [mg/l]
CTD	75 cm	15 s	Salzgehalt / Temperatur

5.7 Strömungsmessungen zwischen Knock und Herbrum

Bearbeitet von Christine Borgsmüller (BfG) und Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)

Eine Vielzahl mobiler Strömungsmessgeräte sind im Rahmen von bestehenden Beweissicherungsmessungen kontinuierlich in der Ems zwischen Knock und Herbrum ausgelegt. Für den Technischen Test wurde das Messnetz durch einige zusätzliche Positionen verdichtet.

Im Rahmen des Monitorings zum Ausbau und zur Bewirtschaftung der Bundeswasserstraße Ems führt das WSA (als regionaler Vertreter der WSV) zwischen Knock und Herbrum an insgesamt 13 Positionen kontinuierliche Messungen mit diesen Strömungssonden inkl. der Multiparametersonden durch. Die Messung wird parallel zur Erfassung des Wasserstandes langfristig durchgeführt. Die Geräte sind an den jeweiligen Positionen an der Sohle verankert und messen zumeist schwimmend im Bereich der Wasseroberfläche, in Einzelfällen ist an derselben Position auch ein Gerät im Sohlbereich oder auch in einer Zwischentiefe installiert. Aufgrund von Sicherheitserfordernissen für die Schifffahrt befinden sich die Geräte außerhalb der Fahrrinne im Bereich des Tonnenstrichs.

Für den Technischen Test wurden vier Positionen mit zusätzlichen Sonden zur Messung von Gewässergüteparametern ausgestattet (Weekeborg, Soltborg, Terborg und Ditzum) und von der BfG betreut. An diesen Positionen werden in drei bis sechs Tiefenpositionen Gewässergüteparameter aufgenommen und ergänzend dazu in mehreren Tiefen die Strömungsverhältnisse erfasst.

Außerdem wurden auf den beiden zum Emssperrwerk nächsten Liegeplätze exemplarisch die Strömungsverhältnisse gemessen.

Die zum Einsatz kommenden Messgeräte arbeiten autark an festgelegten Positionen sowie Messtiefen. Zumeist kommt der Typ „Seaguard“ des Herstellers „Aanderaa“ zum Einsatz, deren Daten nach Auslesen der Speicher in 5-Minuten Zeitschritten zur Verfügung stehen. Die Strömungsgeschwindigkeit und Richtung werden akustisch im Abstand von 1,6 bis 2,5 m Entfernung vom Gerät bestimmt. Hierdurch werden mögliche Fehler durch das exponierte Strömungsmessgerät weitgehend ausgeschaltet. Die Salinität sowie der Sauerstoffgehalt werden direkt am Gerät gemessen, da hier die Beeinträchtigung durch das Messgerät selbst als skalare Größe vernachlässigbar erscheint. Die Wassertemperatur wird mehrfach gemessen, da Temperatursensoren z.B. in der Leitfähigkeits- als auch in der Sauerstoffsonde implementiert sind. An den zusätzlich durch die BfG ausgebrachten Messsträngen wurden ebenfalls die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung erfasst. Zudem waren die Stränge mit gesonderten Sensoren zur Messung der Leitfähigkeit, der Wassertemperatur und des Sauerstoffgehalts ausgestattet, die in bis zu sechs Tiefenpositionen angeordnet waren und damit ein detailliertes Vertikalprofil liefern. Einer der Messstränge (Soltborg) erfasst schwerpunktmäßig die vertikale Schwebstoffverteilung. Zum Einsatz kamen Sensoren des Typs MSSolitax des Herstellers HachLange.

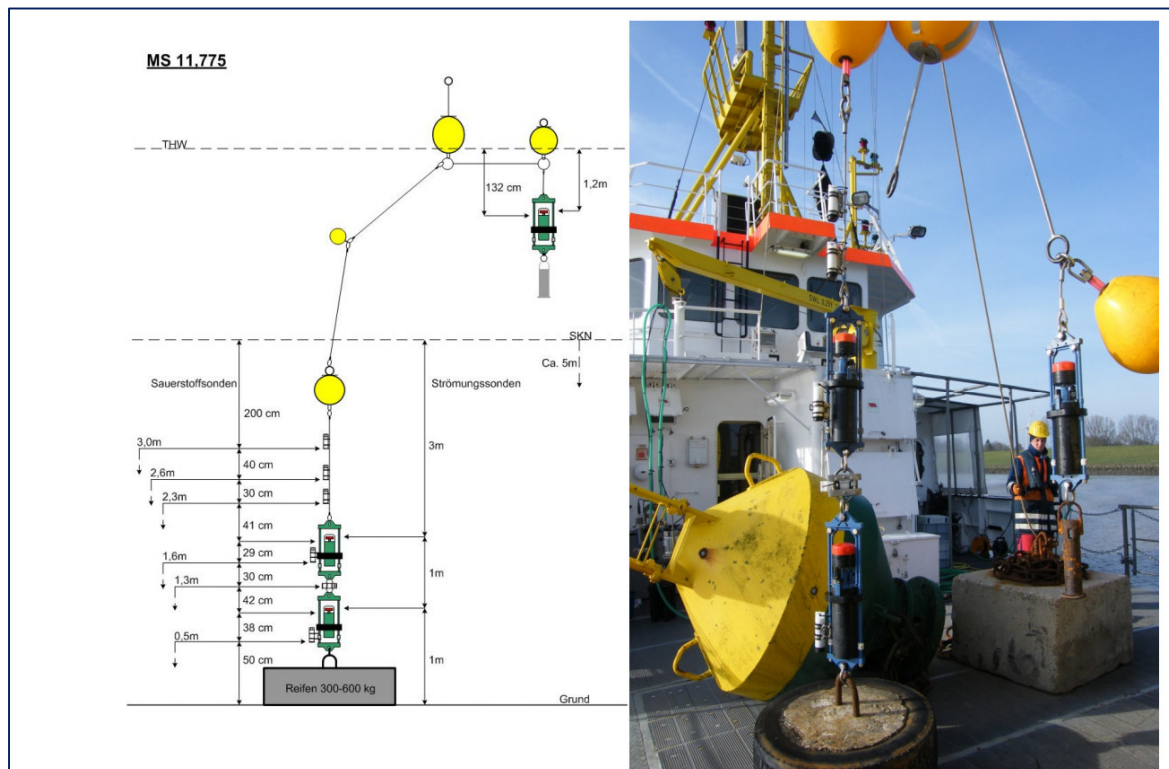


Abbildung 22: Beispiel eines Messstrangaufbaues zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten sowie weiterer gewässerkundlicher Parameter; ergänzt durch zusätzliche Sauerstoffsonden der BfG; exemplarische Darstellung des Messstranges Weekeborg (Unterems-Km 11,775) als Systemskizze und der Situation beim Ausbringen vor Ort mit dem gewässerkundlichen Messschiff FRIESLAND (WSA); Quelle: WSA Ems-Nordsee

Tabelle 19: Positionen, Bezeichnung, vertikale Lage sowie Messzeitraum von Dauerströmungsmessgeräten des WSA Ems-Nordsee (Quelle: WSA Ems Nordsee)

Kurzbez	RW UTM	HW UTM	RW GK2	HW GK2	Breite WGS84	Laenge WGS84	ZW mNN	ExpoStart	ExpoEnd
Herbrum	387023.38	5878647.46	2588212.000	5880040.000	53° 02,724' N	007° 18,882' E	-4.000	05/05/2011	31/12/2025
Rhede	385236.66	5881696.91	2586298.570	5883012.980	53° 04,345' N	007° 17,219' E	-4.500	09/01/2008	31/12/2025
Papenburg	390593.00	5885555.53	2591490.410	5887093.900	53° 06,493' N	007° 21,935' E	-3.600	09/01/2008	31/12/2025
Mark	391012.360	5889151.508	2591758.858	5890705.569	53° 08,436' N	007° 22,237' E	-3.800	09/01/2008	31/12/2025
Weener A	391177.30	5891294.76	2591833.861	5892854.615	53° 09,594' N	007° 22,341' E	-4.100	17/03/2011	31/12/2025
Weener B	391275.43	5891338.03	2591930.134	5892901.975	53° 09,618' N	007° 22,429' E	-4.100	17/03/2011	31/12/2025
Grotegaste	392238.36	5893497.80	2592802.000	5895101.000	53° 10,799' N	007° 23,235' E	-4.600	09/01/2008	31/12/2025
Leerort A	394758.66	5897455.10	2595155.000	5899162.000	53° 12,958' N	007° 25,432' E	-5.600	09/01/2008	31/12/2025
Leerort B	394901.87	5897353.52	2595302.407	5899066.485	53° 12,905' N	007° 25,563' E	-5.600	20/03/2008	31/12/2025
Terborg	393165.21	5905849.40	2593209.998	5907485.104	53° 17,465' N	007° 23,832' E	-6.700	09/01/2008	31/12/2025
Ditzum	385899.66	5909452.41	2585797.000	5910781.000	53° 19,317' N	007° 17,217' E	-5.400	09/01/2008	31/12/2025
Emden	379690.22	5910811.09	2579534.000	5911878.000	53° 19,966' N	007° 11,595' E	-7.600	09/01/2008	31/12/2025
Knock	369038.52	5910414.52	2568905.499	5911034.229	53° 19,601' N	007° 02,014' E	-5.600	24/03/2011	31/12/2025
Messpfahl 1	372375.66	5910284.08	2572246.000	5911044.000	53° 19,580' N	007° 05,022' E	-8.50	06/06/2014	auf Widerruf
Borkum Südstrand	345118.59	5938997.05	2543799.512	5938590.199	53° 34,616' N	006° 39,638' E	-12.40	26/04/2010	auf Widerruf
Weekeborg	393599.80	5894874.40	2594105.000	5896534.000	53° 11,553' N	007° 24,443' E	-5.30	02/04/2019	30/11/2019
Soltborg	393000.87	5899793.06	2593300.000	5901425.000	53° 14,198' N	007° 23,806' E	-6.00	01/04/2019	30/11/2019

Die aufgenommenen Strömungsparameter sollen einen Vergleich mit den modelltechnisch ermittelten Werten ermöglichen. Das Augenmerk liegt dabei auf einer möglichen Abnahme oder sogar einer Umkehr der Flutstromdominanz infolge der Tidesteuerung. Die Messung der Gewässergüte verdichtet das Netz der Messstationen auf sinnvolle Weise. Die Dauerströmungsmessgeräte befinden sich in den meisten Fällen im näheren Umfeld einer Messstation, an denen die Gewässergüte im Sohlbereich erfasst wird. Die Dauerströmungsmessgeräte befinden sich zumeist an der Wasseroberfläche und in Einzelfällen auch über mehrere Tiefen, so dass die gemeinsame Betrachtung ein vollständigeres Bild der longitudinalen und vertikalen Dynamik ermöglicht.

Die Strömungsmessungen an den Liegeplätzen im Bereich des Emssperrwerks ermöglichen eine Beurteilung der Bedingungen, die ein wartendes Schiff während der Tidesteuerung zu erwarten hat.

Tabelle 20: Vertikale Position in der Wassersäule sowie Parameterumfang der permanent durchgeführten Dauerströmungsmessungen des WSA Ems-Nordsee (Quelle: WSA Ems Nordsee)

Kurzbez	Beschreibung	Parameter
Herbrum	0,70m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -4,0m NHN, DEK Km 213,5,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Rhede	0,70m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -4,5m NHN, DEK Km 217,86,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Papenburg	0,90m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -3,6m NHN, Ems Km 0,4,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Mark	0,90m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -3,8m NHN, Ems Km 4,5,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Weener A	0,90m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -4,1m NHN, Ems Km 6,75,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Weener B	0,90m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -4,1m NHN, Ems Km 6,75,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Grotegaste	0,90m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -4,6m NHN, Ems Km 9,5,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Leerort A	1,60m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -5,6m NHN, Ems Km 14,55,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Leerort B	1,60m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -5,6m NHN, Ems Km 14,55,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Terborg	0,90m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -6,7m NHN, Ems Km 24,5,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Ditzum	0,90m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -5,4m NHN, Ems Km 33,57,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Emden	1,60m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -7,6m NHN, Ems Km 39,97,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Knock	1,60m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -5,6m NHN, Ems Km 50,85,	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Messpfahl 1	2,0m/3,0m/4,0m über Sohle, Sohle: -8,5m NHN, Ems Km 47,33	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Borkum Südstrand	9,0m über Sohle, Sohle: -12,4m NHN, Ems Km 90,6	Tw (° C), Lf (mS/cm), S (ppt)
Weekeborg	1,0m/2,0m über Sohle, 1,2m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -5,30m NHN, Ems Km 11.775	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)
Soltborg	1,0m/2,0m über Sohle, 1,2m unterhalb des Wasserspiegels, Sohle: -5,30m NHN, Ems Km 18.425	V (cm/s), R (° MGN), Tw (° C), Lf (mS/cm), P (kPa), TB (NTU), S (ppt), O2 (mg/l)

Erläuterung: gemessene Parameter: Strömungsgeschwindigkeit v, Strömungsrichtung R, Wassertemperatur Tw, Leitfähigkeit Lf, Wasserdruck P, Trübung TB, Sauerstoff O₂ und Salzgehalt S; Messtakt 5 Minuten; Quelle: WSA Ems Nordsee

5.8 Schwebstoffkonzentration und Strömungsparameter - Dauermessung im Vertikalprofil Soltborg

Bearbeitet von Christine Borgsmüller (BfG)

Im Frühjahr 2020 wurde bei Unterems-Km 18,45 (Soltborg) der autarke Schwebstoffmessstrang (Gerätetyp „MSSolitax“ des Herstellers „HACHLange“) ausgebracht. Der Messstrang befand sich am steilen Hang eines Kolkes im Außenkurvenbereich, etwa 50 m entfernt vom Ufer. Nach bisherigen Beobachtungen ist in diesem Bereich in den Sommermonaten eine Flüssigschlickschicht zu erwarten, so auch während des Testzeitraums im Sommer 2020. Die Sohllage der Position betrug etwa NHN -8,4 m.

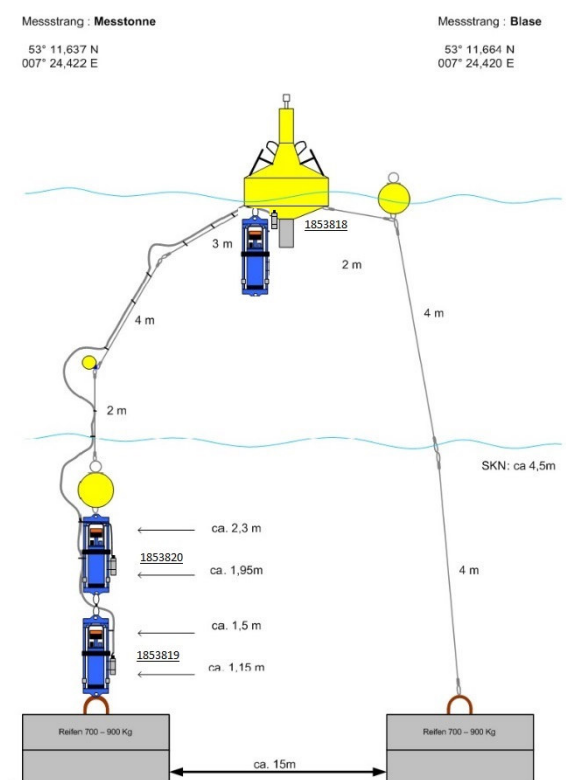


Abbildung 23: Systemskizze des Messstranges zur Erfassung der Schwebstoffgehalte mittels drei Trübungssonden bei Soltborg (Messhorizont ca. 1,15 m ü. Sohle, ca. 1,95 m ü. Sohle sowie 1 m u WSP) sowie drei Strömungsmesssonden (Seaguard/Aanderaa; Messhorizont ca. 1,5 m ü. Sohle, 2,3 m ü. Sohle und 1 m unter WSP); Quelle: BfG

Um die dynamischen Vorgänge des Feststofftransports umfassend darstellen zu können, wurden zusätzlich zu den Schwebstoffsonden Strömungsmessgeräte installiert. Am Messstrang wurden alle Parameter mit einer Frequenz von 5 Minuten erfasst, die Schwebstoffgehalte wurden per DFÜ direkt an die BfG übermittelt.

Am nahe gelegenen Dalben (Entfernung 70 m / RW_UTM 392985.658; HW_UTM5899814.791) wurden zu mehreren Terminen vom Messschiff aus Vertikalprofile über jeweils eine Ebbphase aufgenommen.

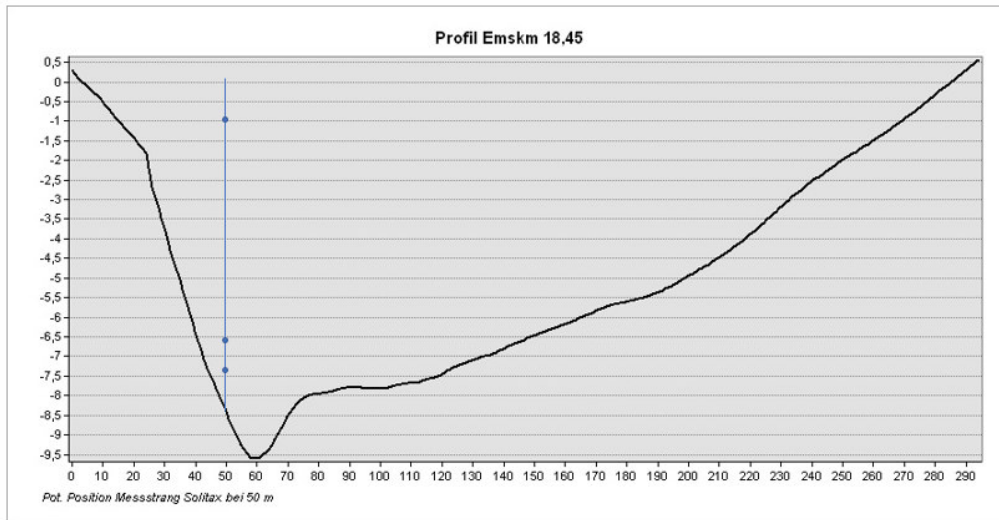


Abbildung 24: Querprofil bei Unterems-Km 18,45 mit Position des autarken Messstranges (Quelle: BfG)

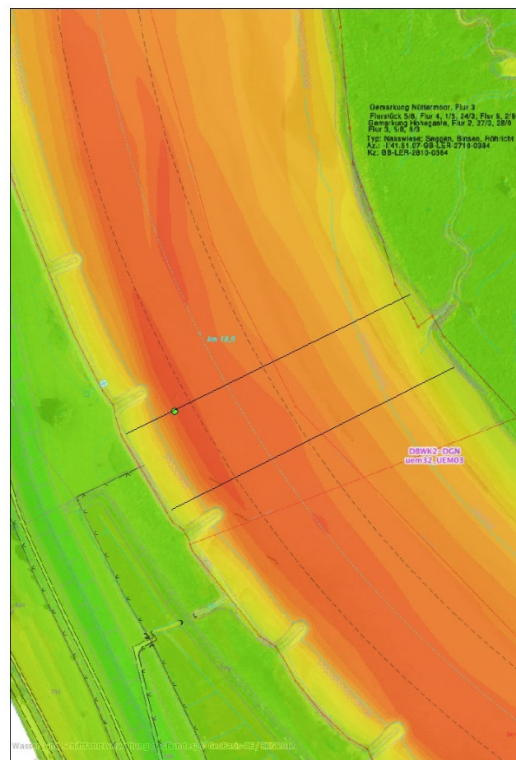


Abbildung 25: Position des autarken Messstranges markiert (grüner Punkt). An dem Dalben (blauer Punkt) wurden zu mehreren Terminen vom Messschiff aus Vertikalprofile über eine Tide markiert durchgeführt (Quelle: BfG).

Das Tiefenprofil an der Position Soltborg stellt eine wichtige Grundlage dar, um die durch den Testbetrieb hervorgerufene Charakteristik von der natürlichen Variabilität (Spring/Nipp Zyklus, Oberwasserabfluss) abgrenzen zu können.

Bei Soltborg lässt die gemeinsame Interpretation mit den Vertikalmessungen am nahegelegenen Dalben einen tieferen Einblick in das zeitabhängige Transportgeschehen des Feststoffs und des Verhaltens des Flüssigschlucks im Sohlbereich zu. Auch hier lässt ein Vergleich der natürlichen Variabilität mit dem Verhalten während des Testbetriebs einen Einblick in die Wirkungsweise der Tidesteuerung zu.

5.9 Gewässergüte - Dauermessung im Vertikalprofil Weekeborg, Soltborg, Terborg und Ditzum

Bearbeitet von Christine Borgsmüller und Andreas Schöl (BfG)

Im Frühjahr 2020 wurden bei Unterems-Km 11,775 (Weekeborg), 18,45 (Soltborg), 24,53 (Terborg) und 33,57 (Ditzum) autarke Messstränge zur Erfassung von Gewässergüteparametern ausgebracht. Die kontinuierliche Messung erfolgte mit Datenloggern (Typ 1: Sauerstoff/Temperatur und Typ 2: Leitfähigkeit) in sechs Wassertiefen (0,5 bis 3,0 m über Sohle). Zusätzlich waren in drei Wassertiefen Strömungsmessgeräte (Typ Seaguard / Aanderaa) installiert.

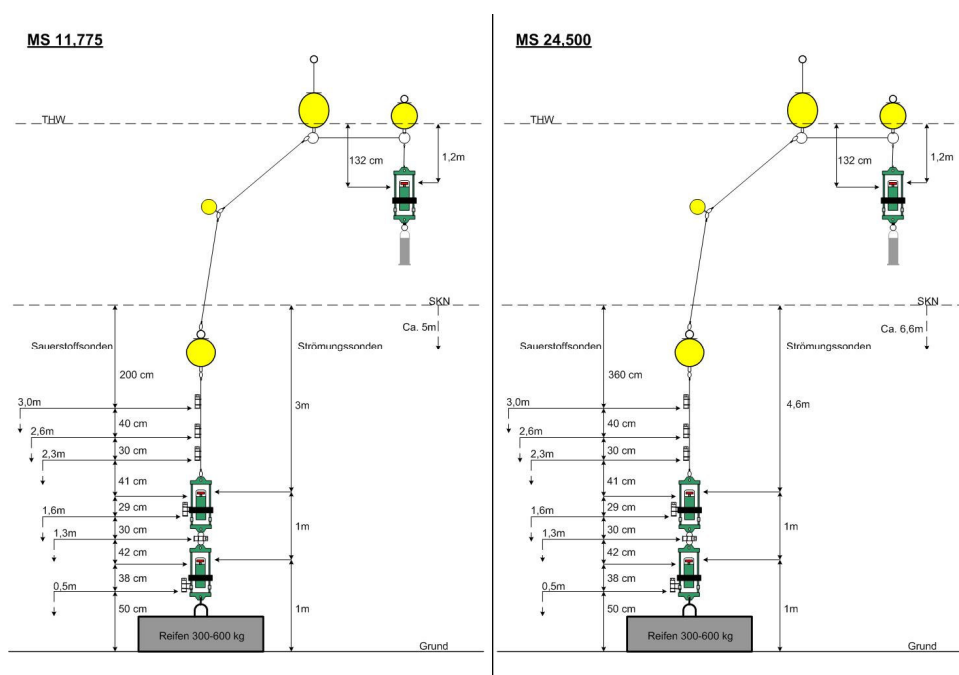


Abbildung 26: Systemskizze der Messstränge Weekeborg (links) und Terborg (rechts) zur Erfassung der Gewässergüteparameter Leitfähigkeit, Wassertemperatur und Sauerstoff mittels sechs übereinander angeordneter Sonden (Messhorizonte etwa 0,5 bis 3,0 m ü. Sohle, sowie 1 m u. WSP) sowie drei Strömungsmesssonden (Seaguard/Aanderaa; Messhorizont ca. 1,5 m ü. Sohle, 2,3 m ü. Sohle und 1 m unter WSP); Quelle: BfG

Anhand der Tiefenprofile lassen sich die durch die Tidesteuerung hervorgerufenen Änderungen von der natürlichen Variabilität (Spring/Nipp Zyklus, Oberwasserabfluss) abgrenzen (siehe auch Erläuterung zur Dauermessung der Schwebstoffkonzentration und der Strömungsparameter im Vertikalprofil Soltborg).

5.10 Multiparameter - Vertikalprofile über einzelne Ebbephasen bei Weener und Soltborg

Bearbeitet von Christine Borgsmüller und Andreas Schöl (BfG)

An den Positionen Unterems-Km 7,2 (Weener) und 18,38 (Soltborg) wurden an verschiedenen Terminen jeweils über eine gesamte Ebbephase hochaufgelöste Vertikalprofile der Schwebstoffgehalte sowie verschiedener Gewässergüteparameter erfasst. Je nach Parameter erfolgten die Messungen in situ oder es wurden über eine Pumpe aus unterschiedlichen Wassertiefen

Proben gezogen, in denen dann die Messungen erfolgten. Die Ermittlung u.a. der Nähr- und Schadstoffe erfolgte im Nachgang in einem Labor.

Tabelle 21: Vertikalprofile über jeweils eine Ebbephase (Quelle: BfG)

Parameter	Position (Koordinaten/ Unterems-Km)	Vertikalprofil-Messung	Datum 2020	Ebbephase bis Tnw an Messpunkt von ... bis ...
Schwebstoffgehalte, Turbulenz	RW_UTM 393027.789; HW_UTM 5899746.432 Ems km 18,38	Dalben bei km 18,38 (Messschiff); Schwebstoffkonzentration (g/l) und Schubspannung (Pa) mit Dichtesonde Rheotune über Kran, Vertikalprofile bis zur Sohle alle 10 Min., zusätzlich stündlich Profile mit ADV Sonde zur Erfassung der Turbulenz und kontinuierliche Aufzeichnung mit Mehrfrequenzecholot, Entnahme von Wasserproben zur gravimetrischen Bestimmung der Schwebstoffgehalte	Mi., 17.06.	Nipp 09:30 bis 18:30 Uhr
			Di., 30.06.	7:30 bis 16:30 Uhr
			Mi., 15.07.	7:00 bis 16:00 Uhr
			Di., 11.08	6:00 bis 14:00 Uhr
Gewässergüte	RW_UTM 393027.789; HW_UTM 5899746.432 Emskm 18,38	Kontinuierliche Sondenmessungen: Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit, pH, Trübung Probennahme, folgende Parameter: Nährstoffe (Ammonium, Nitrit, Nitrat, Gesamt-N, ortho-P, Gesamt- P, Silikat) TOC, DOC, Schwebstoff optional: Mangan, Eisen	dito	dito
Schwebstoffgehalte, Turbulenz	RW_UTM 391056.846; HW_UTM 5891860.399 Ems km 7,2	Dalben bei km 7,2 (Messschiff); Schwebstoffkonzentration (g/l) und Schubspannung (Pa) mit Dichtesonde Rheotune über Kran, Vertikalprofile bis zur Sohle alle 10 Min., zusätzlich stündlich Profile mit ADV Sonde zur Erfassung der Turbulenz und kontinuierliche Aufzeichnung mit Mehrfrequenzecholot, Entnahme von Wasserproben zur gravimetrischen Bestimmung der Schwebstoffgehalte	Do., 18.06.	Nipp 10:30 bis 19:30 Uhr
			Mi., 01.07.	9:00 bis 18:00 Uhr
			Do., 16.07.	8:00 bis 17:00 Uhr
Gewässergüte	RW_UTM 391056.846; HW_UTM 5891860.399 Ems km 7,2	Kontinuierliche Sondenmessungen: Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit, pH, Trübung Probennahme, folgende Parameter: Nährstoffe (Ammonium, Nitrit, Nitrat, Gesamt-N, ortho-P, Gesamt- P, Silikat) TOC, DOC, Schwebstoff optional: Mangan, Eisen	dito zusätzl. Mi., 12.08	dito zusätzl. 7:00 bis 15:00 Uhr

Die Messungen zeigen u.a. die Bewegungs- und Transportvorgänge der Feststoffe im Wasserkörper und in der Flüssigschlickschicht. Zudem lässt sich das Verhalten der Gewässergüte, insbesondere des Sauerstoffgehalts, in Abhängigkeit der o.g. Transportvorgänge darstellen. Die Messungen fanden an mehreren Terminen während der Versuchsphase statt, so dass auch Rückschlüsse auf die Wirkungsweise der Sperrwerkssteuerung möglich sind.

5.11 Gewässergüte - Längsprofilmessungen Borkum - Herbrum

Bearbeitet von Andreas Schöl (BfG)

Zu zwei Terminen fanden während der Ebbephase Längsmessungen der Gewässergüte (Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit, pH, Chlorophyll, Trübung) von Borkum bis Herbrum statt. Die Messung erfolgte im kontinuierlichen Durchfluss einer Pumpe, die aus einer Tiefe von ca. 1,5 - 2 m Wasser an Bord des Messschiffes förderte. Zudem erfolgten alle 5 km (=20 min) Probenahmen für eingehendere Laboranalysen (Ammonium, Nitrit, Nitrat, Gesamt-N, ortho-P, Gesamt-P, Silikat, TOC, DOC, Schwebstoff, Chlorophyll (HPLC-Methode), Phytoplankton (Auszählung) und Zooplankton (Auszählung)). Die erste Messung fand bereits vor dem Versuch statt. Die zweite Längsfahrt erfolgte, nachdem bereits einige Tiden gesteuert worden waren.

Der Vergleich der beiden Messfahrten soll einen Hinweis auf eine Veränderung durch den Testbetrieb geben. Zudem soll diese großräumige Messung das eigentliche Untersuchungsgebiet (Knock bis Herbrum) in die gesamte Ems bis nach Borkum einbinden. Darüber hinaus sind die Daten in die Messreihen des Zeitraums 2010 bis 2019 einzuordnen.

5.12 Flüssigschlickverteilung und Gewässergüte, Tiefen- und Längsprofile zwischen Knock und Herbrum

Bearbeitet von Dennis Oberrecht, Patrick Bruckert, Rens van der Wel (NLWKN)

Die Forschungsstelle Küste (FSK) im NLWKN hat kontinuierlich schiffsgestützte Messdaten entlang der tiefen Rinne zwischen der Knock und der Halter Brücke bei Papenburg erhoben. Aufgrund der begrenzten Durchfahrtshöhe der Halter Brücke ist von Papenburg bis Herbrum das Vermessungsschiff MS Aschendorf des WSA Ems-Nordsee mit abweichender Messtechnik eingesetzt worden.

Das Messkonzept sah eine möglichst hochauflösende Vermessung der Flüssigschlickverteilung entlang der tiefen Rinne beginnend bei der Knock bis zum Tidewehr in Herbrum vor. Hier wurden entlang eines festen Transektes Längsprofile mit verschiedenen Sensoren aufgenommen. Zur Validierung der Schwebstoffkonzentrationen in der Flüssigschlickverteilung wurden neben den Echolotprofilen zusätzlich 25 Vertikalprofile beginnend am Emssperrwerk bis Herbrum aufgezeichnet. Neben der Schwebstoffkonzentration wurden dabei auch die Parameter Leitfähigkeit, Wassertemperatur und Sauerstoffsättigungsindex erfasst. Die Vertikalprofile wurden im Abstand von ca. 2 km durchgeführt. Insgesamt wird durch die Messungen somit eine Strecke von ca. 65 km abgedeckt.

Die Ergebnisse der Tiefenvermessungen wurden bereits begleitend zum Test als Verkehrssicherungspeilung verwendet, um das etwaige Entstehen von Mindertiefen bzw. die mögliche Verlagerung von Schwerpunkten der Unterhaltungsbaggerung rechtzeitig erkennen zu können. Die Peildaten ermöglichen die Identifikation der an der Sohle befindlichen Flüssigschlickschicht. Deren Auswertung soll die Veränderung der Flüssigschlickverteilung sowie die Änderung der Schichtdicke zeigen.

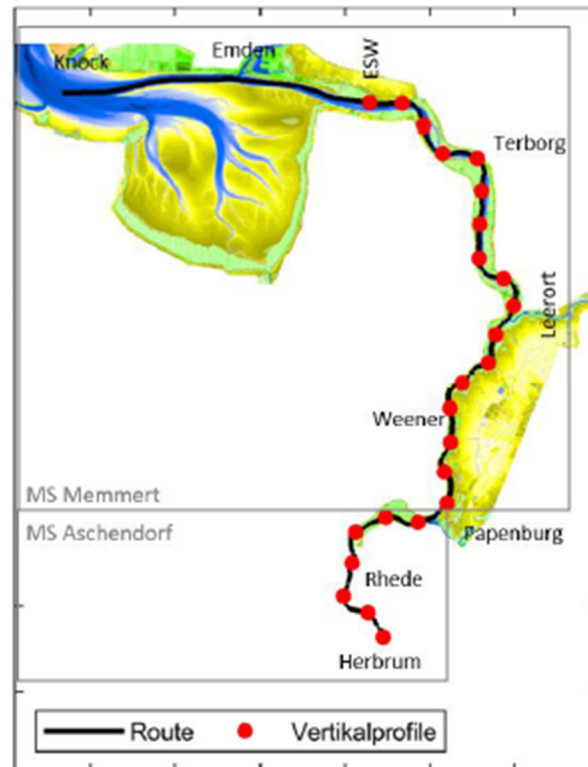


Abbildung 27: Darstellung der Vermessungsrouten (schwarz) der MS Memmert (bis Papenburg) und der MS Aschendorf (ab Papenburg). Die roten Punkte zeigen die Positionen an denen Vertikalprofile aufgezeichnet wurden.

Die Messschiffe befuhren ihre Strecken immer im selben Zeitfenster der Tide. Die Messfahrten fanden sowohl in Tiden statt, denen unmittelbar eine Steuerung vorausging sowie auch in ungesteuerten Tiden. Die „Aschendorf“ begann ihre Messfahrt etwa zwei Stunden vor Tidehochwasser in Papenburg. In den Fällen, in denen unmittelbar vorher eine Tidesteuerung stattgefunden hatte, lag deren Beginn bei Abfahrt in Herbrum bereits etwa sechs bis sieben Stunden zurück. Die Position Halte/Papenburg wurde durch die „Aschendorf“ jeweils etwa zu Tidehochwasser erreicht. Die „Memmert“ begann ihre Messfahrt an der Knock (Tonne 52) rd. zwei Stunden vor dem örtlichen Tidehochwasser. Etwa zu diesem Zeitpunkt trat bei Papenburg das Tideniedrigwasser ein. In den Fällen, in denen unmittelbar vorher eine Tidesteuerung stattgefunden hatte, lag deren Beginn etwa zwei bis drei Stunden vor dem Start der Messfahrt. Auf dem Weg nach Halte passierte die „Memmert“ das inzwischen wieder geöffnete Emssperrwerk und erreichte Halte in etwa zum dortigen Eintrittszeitpunkt des Tidehochwassers und damit zeitgleich mit der von Herbrum kommenden „Aschendorf“. Die Messfahrten fanden während der Flutphase statt, bei vorausgehender Tidesteuerung im Zeitraum der wiedereinsetzenden Tide.

Tabelle 22: Termine der Längsmessungen zwischen Herbrum und Knock (TnwA = Tideniedrigwasseranhebung und FsTs = Flutstromtidesteuerung)

Messfahrt von Herbrum nach Halte		Von Knock nach Halte		Art der Tidesteuerung	Bemerkung
Datum / Zeitdifferenz (h) zwischen Beginn Messfahrt und Beginn der vorhergehenden Tidesteuerung		Datum / Zeitdifferenz (h) zwischen Beginn Messfahrt und Beginn der vorhergehenden Tidesteuerung			
24.06.2020				Vor Testphase	Null-Messung
		25.06.2020		Vor Testphase	Null-Messung
29.06.2020	6			TnwA	
30.06.2020	6			TnwA	
01.07.2020	7	01.07.2020	4	TnwA	
02.07.2020	7	02.07.2020	4	TnwA	
03.07.2020	7	03.07.2020	4	TnwA	
04.07.2020	7	04.07.2020	3	TnwA	
05.07.2020	7			TnwA	
06.07.2020	18				Unterbrechung der Steuerung
07.07.2020	43	07.07.2020	39		Unterbrechung der Steuerung
08.07.2020	7	08.07.2020	3	TnwA	
09.07.2020	7	09.07.2020	3	TnwA	
10.07.2020	19	10.07.2020	15		Unterbrechung der Steuerung
14.07.2020	7	14.07.2020	4	TnwA	
16.07.2020	7	16.07.2020	3	TnwA	
18.07.2020	7	18.07.2020	4	TnwA	
20.07.2020	19	20.07.2020	15		Unterbrechung der Steuerung
22.07.2020	69	22.07.2020	65		Unterbrechung der Steuerung
24.07.2020	118	24.07.2020	114		Unterbrechung der Steuerung
		26.07.2020	164		Unterbrechung der Steuerung
27.07.2020	192	27.07.2020	189		Unterbrechung der Steuerung
30.07.2020	7	30.07.2020	3	TnwA	
02.08.2020	6	02.08.2020	3	TnwA	
05.08.2020	19	05.08.2020	15		Unterbrechung der Steuerung
14.08.2020	6	14.08.2020	3	TnwA	
15.08.2020	5	15.08.2020	1	FsTs	
16.08.2020	17	16.08.2020	14		Unterbrechung der Steuerung
17.08.2020	5	17.08.2020	1	FsTs	
18.08.2020	30	18.08.2020	26	Nach Testphase	Nachlauf-Messung
21.08.2020	104	21.08.2020	100	Nach Testphase	Nachlauf-Messung

Eine Zusammenstellung der eingesetzten Messgeräte, sowohl für die Vertikalprofile als auch für die Echolot-Sensorik zur Vermessung der Flüssigschlickschichten und der Gewässergüte findet sich in der nachfolgenden Tabelle:

Tabelle 23: Auflistung der verwendeten Messgeräte und deren Parameter

Gerät	Messstrecke	Profile/Messrate	Parameter
CTD 90 Sea& Sun (Memmert & Aschendorf)	Vertikalprofil /Längs-Oberfläche	18 Profile /1Hz	Leitfähigkeit, Temperatur, Sauerstoffsättigung, Absolutdruck, Trübung
USP – Dichtesonde (Memmert)	Vertikalprofil	18 Profile / 50Hz	Absolute Wasserdichte, Temperatur, Absorption, Lage
Hach Lange Sonde (Aschendorf)	Vertikalprofile	7/8 Profile/10Hz	Schwebstoffkonzentration
Echolot	Längsprofil	Memmert: 15, 38, 200 kHz /1 Hz Aschendorf: 15, 200 kHz/1Hz	Wassertiefe
Parametrisches Echolot (Memmert)	Längsprofil	Memmert: 8/100 kHz Ricker-Pulse	Rückstreuintensitäten Wassersäule und Gewässersohle
Trimble GPS-RTK (Memmert, Aschendorf)	Längsprofil	-/10 Hz	Korrigierte horizontale und vertikale Lage des Messschiff
Hemisphere GPS Kompass (Memmert)	Längsprofil	-/10 Hz	Pitch/Roll/Heave

Eine vollständige Beschreibung der Funktionsweise der verwendeten Messgeräte, der Messmethodik und Datenaufbereitung ist im Untersuchungsbericht der Forschungsstelle Küste enthalten⁸.

5.13 Gewässergüte – Langzeitmessungen der Stationen von Knock bis Herbrum

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN)

Im Rahmen des Betriebs des Emssperrwerks wurden eine Reihe von Gütemessstationen an der Ems zwischen Knock und Herbrum/Heede eingerichtet. Einige dieser Stationen wurde bereits in früheren Jahren als Teil des Gewässerüberwachungsnetzes Niedersachsen (GÜN) errichtet, die anderen wurden aus einem früheren Monitoringprogramm der WSV zur Beweissicherung des Emsausbaus übernommen. Die Stationen haben einen Abstand von 4 bis 10 Kilometer und befinden sich überwiegend an den Pegeln des WSA Ems Nordsee. Mit Ausnahme der Stationen Knock und Terborg erfolgt der Betrieb und die Unterhaltung der Gütemessung durch den NLWKN. Diese Messstationen liefern kontinuierliche Zeitreihen (Messtakt 1 bis 5 Minuten) relevanter Gewässergüteparameter, insbesondere Wassertemperatur, Salzgehalt und Sauerstoff. Zudem sind Sensoren zur Messung der Trübung installiert. Damit kann jederzeit und witterungsunabhängig die Gütesituation und die Güteentwicklungen in der Tideems erfasst werden. Die Station Herbrum/Heede befindet sich oberhalb des Tidewehrs und misst daher die Gewässergüte im Zulauf. Die Station Leer in der unteren Leda liegt

⁸ Oberrecht, D., P. Bruckert & R. van der Wel (2021): Technischer Testbetrieb zur flexiblen Tidesteuerung des Emssperrwerk - Begleitendes Längsprofil-Monitoring; NLWKN-Forschungsstelle Küste; unveröffentlicht; Norden, Juli 2021

oberhalb des Ledasperrwerks und wird daher durch dessen Betrieb beeinflusst. Ergänzend ist unterhalb der Halter Brücke eine Messeinrichtung zur Erfassung des Salzgehaltes und der Temperatur angeordnet. Die in den Messstationen gespeicherten Daten werden regelmäßig per Datenfernübertragung abgerufen. Die Lage aller festen Messstationen sind in Abbildung 28 veranschaulicht.

Die an den Messstationen zu erfassenden Parameter werden mit Sonden gemessen, deren Installationshöhe so gewählt wurde, dass möglichst auch bei niedrigen Tidewasserständen eine Wasserüberdeckung gegeben ist und so ein Trockenfallen vermieden wird. Der Abstand der auf dieser Höhe festinstallierten Sonden zur Gewässersohle beträgt zumeist etwa 2 m. An den Stationen Leerort und Weener wird zusätzlich in einer zweiten, höheren Messebene gemessen, wodurch die mögliche Beeinträchtigung durch den Flüssigschlick minimiert wird.

Tabelle 24: Positionen, Sensoren und vertikale Messtiefe von Gewässergütemessstationen des NLWKN sowie der WSV/BfG im Untersuchungsgebiet

Messstation	Position (UEms-Km)	O ₂	Lf	Tw	Cs	pH	Zusätzliche Messparameter	Bemerkung
Halte	-0,70	nein	mS/cm	°C	nein	nein	Druck/Wasserstand	NHN -2,2m
Papenburg	0,39	%	mS/cm	°C	g/l	nein	Wasserstand	ab 2014 rd. NHN -2,2m (vorher in versch. Tiefen und an Wasseroberfl.)
Weener	6,85	%	mS/cm	°C	g/l	nein	Wasserstand	NHN -2,0 und -3,0m
Leerort	14,79	%	mS/cm	°C	g/l	nein	Wasserstand	NHN -2,0 und -3,0m
Terborg	24,67	%	mS/cm	°C	g/l	nein	Wasserstand	NHN -3,5m
Gandersum	31,73	mg/l	mS/cm	°C	g/l	ja	rel. Luftfeuchte Luftdruck, Wind Lufttemperatur Globalstrahlung Wasserstand	ab 2011 NHN -2,6m (vorher an Wasseroberfl.)
Pogum	35,30	%	mS/cm	°C	g/l	nein	Wasserstand	NHN -2,7m
Westmole	41,2	%	mS/cm	°C	g/l	nein		bis 2006, danach Verlegung nach Emspierz (s.u.) 2,00 m über Sohle
Emspierz Emden	42,0	%	mS/cm	°C	g/l	nein	Wasserstand	ab 2008, NHN -4,4m
Knock	50,86	%	mS/cm	°C	g/l	nein		NHN -3,50m
Herbrum	DEK-km 211,70	mg/l	mS/cm	°C	nein	ja	rel. Luftfeuchte Wind Globalstrahlung Lufttemperatur Niederschlag	bis 2019, danach Verlegung nach Heede (s.u.)
Heede	DEK-km 210,765	mg/l	mS/cm	°C	nein	ja	Lufttemperatur, Wasserstand, Durchfluss	ab 2019
Leda	Leda-km 20,87	mg/l	mS/cm	°C	g/l	ja	Lufttemperatur Durchfluss Wasserstand	an Wasseroberfl.

Es stehen längere Zeitreihen der o.g. Parameter zur Verfügung, die in den meisten Fällen über 20 Jahre und an einigen Orten sogar über 30 Jahre zurückreichen, so dass deren Variabilität innerhalb des Jahres, im Mondzyklus und innerhalb der Tide beschrieben werden können sowie auch Änderungen deutlich werden, die größtenteils auf den Ausbau der Ems zurückzuführen sind. Die Abhängigkeit von den bestimmenden Einflüssen, vor allem vom Oberwasser, von der Tideintensität und von der Wassertemperatur kann dargestellt werden. Damit lassen sich die durch die Tidesteuerung verursachten Änderungen der Schwebstoffgehalte, der Sauerstoffkonzentrationen und der Salzgehalte anhand eines Referenzfalles beschreiben. Im Fokus steht die mögliche Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen und die Zunahme der Sauerstoffgehalte durch die Tidesteuerung.

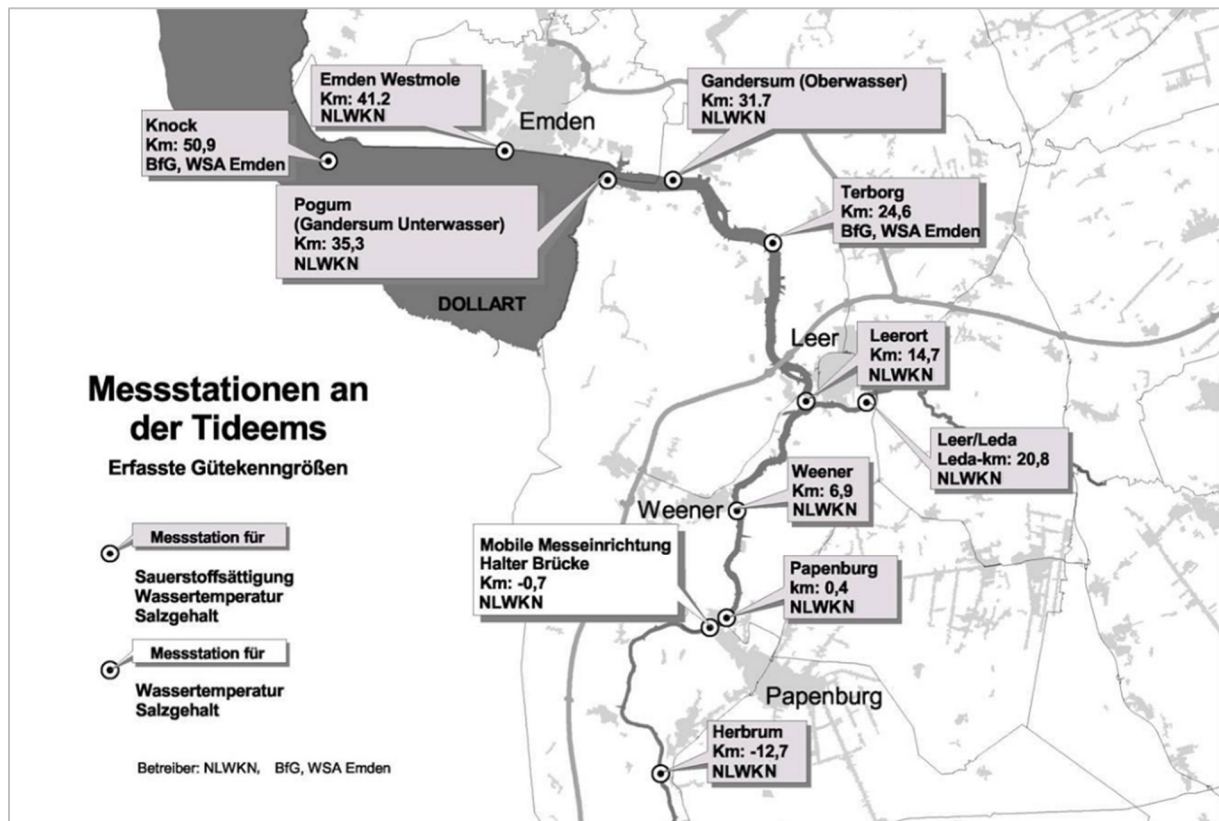


Abbildung 28: Lage der kontinuierlich messenden Gewässergütestationen zwischen Knock und Herbrum

Erläuterungen: Messstation Herbrum bzw. Heede befindet sich oberhalb des Tidewehres und somit nicht in der Tideems. Sie befand sich bis Mai 2019 im Wehrram, direkt oberhalb des Tidewehrs Herbrum und wurde danach um rd. 1 km nach Oberstrom (Heede) verlagert. Die Messstation Leer/Leda liegt oberhalb des Ledasperrwerks und wird durch dessen Sperrbetrieb beeinflusst.

5.14 Bathymetrie - Längsprofile der Gewässersohle

Bearbeitet von Patrick Bruckert (NLWKN) und WSA Ems-Nordsee

Die Längspeilung fand parallel zur Aufnahme der Tiefenprofile der Gewässergüte von Knock bis Herbrum statt. Die Strecke zwischen Knock und Halte wurde vom Messschiff des NLWKN befahren, welches mit einem mehrfrequenten Echolot (15, 38 und 200 kHz) sowie einem ADCP ausgestattet war. Im Abschnitt Herbrum – Halte fuhr ein Messschiff des WSA, das die Vermessung mit 15 und 200 kHz durchführte. Da die Messungen

Zur Erfassung der Gewässersohle und zur Beurteilung der Entwicklung der Flüssigschlickschicht werden seit Anfang 2013 möglichst einmal im Monat Längsprofilfahrten auf der Ems durchgeführt. Die

Längsprofilfahrten erstrecken sich vom Emssperrwerk (Unterems-Km 32,2) bis Papenburg (Unterems-Km 0), teilweise auch ca. 700 m weiter bis zur Halter Brücke. Bislang wurde ein monatlicher, mit der Tide synchronisierter Messturnus angestrebt (Nipptide). Des Weiteren wurden ereignisgesteuerte Messungen durchgeführt (Stau zur Überführung eines Werftschiffes, extreme Abflussänderungen).

Die Tiefenangaben der jeweiligen Frequenzen geben einen Eindruck über die Gestalt der Flüssigschlickschicht. Neben der Variabilität der Tideverhältnisse führte auch die intermittierende Ausführung der Tidesteuerung zu einem breiten Spektrum unterschiedlicher Randbedingungen. Aufgrund der häufigen Ausführung der Längsmessungen ergibt sich ein guter Einblick auf die Wirkungsweise der Randbedingungen auf die Gestalt der Flüssigschlickschicht. Da Längsmessungen zwischen Knock und Papenburg bereits seit 2013 turnusmäßig stattfinden, können die Ergebnisse der aktuellen Messungen in die Messreihen des längeren Betrachtungszeitraums eingeordnet werden sind.

5.15 Bathymetrie - Querprofilmessungen in mehreren Abschnitten der Unterems

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)

Im Bereich Emden, in den Abschnitten Jemgum-Terborg und Weener-Papenburg fanden turnusmäßig Vermessungen der dortigen Querprofile statt. Zusammen mit den Daten der regelmäßigen Längsmessungen sollen diese die Veränderung des gesamten Gewässerbetts zeigen.

5.16 Bathymetrie - Referenzprofil Emders Fahrwasser/ Emders Außenhafen

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)

Im Emders Außenhafen und an den dazugehörigen Liegestellen entlang der Ems wurde die Gewässersohle regelmäßig vermessen. Die Messungen sollen hinsichtlich der Sedimentationsvorgänge im betreffenden Bereich ausgewertet werden.

5.17 Bathymetrie - Flächenpeilungen im Emders Außenhafen und sedimentologische Untersuchungen

Bearbeitet von Bärbel Amman (NPorts)

Im Außenhafen und dem dazu gehörenden Liegestellen an der Ems wurden Flächenpeilungen durchgeführt, die Dichte und Zusammensetzung der Sohl-sedimente erfasst. Bereits während des Tests war darüber zu gewährleisten, dass keine Mindertiefen die Bewirtschaftung behindert oder gefährdet. Die Messungen sollen hinsichtlich der Sedimentationsvorgänge im betreffenden Bereich ausgewertet werden.

5.18 Bathymetrie - Flächenpeilung im Bereich des Emssperrwerks

Messung, Aufarbeitung und Darstellung der Daten: Holger Dirks und Rabea Tants; Text: Andreas Engels (alle NLWKN)

Die Gestalt des Durchflussquerschnittes ober- und unterhalb des Emssperrwerks ist das Resultat der Strömungsverhältnisse und der dadurch veranlassten Erosions- und Akkumulationsvorgänge. Sie unterliegt der tide- und witterungsbedingten Variabilität. Der Betrieb des Sperrwerks übt Einfluss auf die Bewegungsvorgänge aus, insbesondere im Nahbereich des Bauwerks. Dieses geschieht in Abhängigkeit der Betriebsweise und Einsatzhäufigkeit. Da sich mit der Tidesteuerung die Strömungscharakteristik dauerhaft verändert, ist die Reaktion der Gewässersohle zu beobachten. Im Fall einer dauerhaft geänderten Strömung sind nachteilige Auflandungsvorhänge möglich und das häufige Auftreten erhöhter Strömungsintensitäten kann eine Kolkentwicklung verursachen. Mögliche Auflandungen sind hinsichtlich der Schiffbarkeit der Wasserstraße und der Betriebssicherheit des Bauwerks zu beurteilen. Etwaige Auskolkungen sind in ihrer Position, Ausdehnung und Lagestabilität hinsichtlich der Bauwerksicherheit zu beobachten, darüber hinaus werden wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung der bestehenden Sohlsicherung erwartet.



Abbildung 29: Streckenführung der Peilfahrten am Emssperrwerk

Mit dem Peilschiff NYNORDEROOG des NLWKN wurden Ober- und unterhalb des Emssperrwerk bis zu einem Abstand von rd. 300 m zur Bauwerksachse Flächenpeilungen durchgeführt und damit die Tiefenverhältnisse des gesamten Areals, inklusive der Sperrwerksöffnungen, lückenlos aufgenommen. Vor Beginn des Tests wurde eine Nullmessung durchgeführt (24.06.2020) und während der Testphase der Tideniedrigwasseranhebung 16 weitere Flächenpeilungen. Während der Phase der Flutstromtidesteuerungen wurde in jeder Tide und damit sechs Mal gemessen, womit eine engmaschigere Kontrolle des Bereichs ober- und unterhalb des Sperrwerks erfolgte. Zum Abschluss wurde eine weitere Messung 10 Tage nach Testende aufgenommen, um den Nachlauf zu betrachten. Die Peilung erfolgte mit einem Fächerecholot der Firma Kongsberg, EM2040C Dualhead (zwei

Sonarköpfe) und einer Peilfrequenz von 300 KHz. Die Messfahrten fanden um Tidehochwasser statt und folgten immer einem festen Streckenverlauf. Zuerst wurden die Tiefenverhältnisse in der Haupt- und Binnenschifffahrtsöffnung aufgenommen, dann folgte die Vermessung der Oldersumer Seite und danach die der Emdener Seite. Zur präzisen Vermessung des Bauwerkes wurden bauwerksparelle Linien gefahren. Die Verwendung verschiedener Bodenerkennungsfiler in der Lotsoftware (Seabed Information System) ermöglichte bei den hohen Schwebstoffkonzentrationen eine Optimierung der Messgenauigkeit.

5.19 Bathymetrie - Außenmuhen

Bearbeitet von Patrick Bruckert und Andreas Engels (NLWKN)

Die Außenmuhen vom Siel und Schöpfwerk Knock bis zum Schöpfwerk Stapelmoor wurden vor und nach dem Versuch flächenhaft gepeilt. Hierdurch soll untersucht werden, ob eine durch die Tidesteuerung hervorgerufene erhöhte Sedimentation die Unterhaltungssituation der Ausläufe beeinträchtigt.

5.20 Sedimentproben zwischen Borkum und Herbrum

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)

Die Erfassung der Sohlsedimente ist darüber hinaus Teil des Monitorings da sich durch die prognostizierte Verlagerung des Fluid Mud Körpers auch das Sedimentinventar verändern kann. Hierzu soll eine Erfassung der Sohlsedimente im Stil der jährlichen HABAG Untersuchungen kurz vor Versuchsbeginn, nach Abschluss des ersten Blockes sowie nach Abschluss des zweiten Blockes durchgeführt werden. Die Entnahme von zusätzlichen Proben im Bereich der Emspier wird durch NPorts realisiert. Da die Veränderungen an der Sohle als moderat eingeschätzt werden ist eine Beprobung zu drei Zeitpunkten ausreichend: Vor Versuchsbeginn, nach Abschluss von Test 1 sowie nach Test 2.

5.21 Schwingungsmessung am Emssperrwerk und computergestützte Belastungsanalysen

Bearbeitung im Auftrag des NLWKN durch TÜV Nord⁹

Die Teilöffnung der Tore und deren Unterströmung bei der Steuerungsvariante Flutstromtidesteuerung stellen eine Belastung dar, deren mögliche Anregungsmechanismen bisher noch nicht betrachtet wurden. Bislang lag der Schwerpunkt der Untersuchungen zu den Toren in der Betrachtung der maximalen, statischen Belastung aus Wasserdruck bei vollständiger Schließung der Tore. Wie weit die Lasten und Anregungen der Teilöffnung der Hubtore Auswirkungen auf die Beanspruchung und Tragfähigkeit der Struktur haben, war durch Messungen zu erfassen und durch darauf aufbauende Berechnungen zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurde im Juli 2020 ein Messsystem, bestehend aus Druck- und Beschleunigungssensoren, am Hubtor 2 installiert. Dabei wurde das Hubtor 2 als das am stärksten

⁹ Siehe gesonderten Bericht im Anhang: TÜV NORD (2021): Ermüdungsnachweis eines Hubtores des Sperrwerkes Gandersum für die Betriebsweise Tidesteuerung; TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Auftrag des NLWKN; Hamburg 20.04.2021

belastete Hubtor stellvertretend für alle Nebenöffnungen ausgewählt. Nach der Installation wurden die Daten durchgehend aufgezeichnet. Die Zeitreihen beinhalten die Schiffsüberführung am 30.08.2020 sowie 5 Tidesteuerungen im Zeitraum vom 12.08.2020 bis zum 17.08.2020. Somit wurden insgesamt 6 Messungen betrachtet. Die Messdaten wurden durch Sensoren an 32 Positionen des Hubtors erfasst, 15 Sensoren auf der Seeseite und 17 Sensoren auf der Binnenseite. Während auf der Außenseite nur der Druck gemessen wurde, handelte es sich bei den auf der Binnenseite installierten Geräten z.T. um eine Kombination aus Druck- und Beschleunigungssensoren.

Auf der o.g. Grundlage wurden computergestützte Belastungsanalysen der Festigkeit des Hubtors 2 durchgeführt, die Erkenntnisse auf die anderen Hubtore übertragen sowie die Belastung durch eine dauerhafte Tidesteuerung bei einer theoretischen Nutzungsdauer des Sperrwerks von 60 Jahren beurteilt.

6 Ergebnisdarstellung der jeweiligen Messungen

Die nachfolgenden Texte wurden von den jeweiligen Bearbeitern verfasst und werden zum größten Teil in Originalfassung wiedergegeben. Die Zusammenstellung erfolgte durch Andreas Engels (NLWKN).

6.1 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände der Ems

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)¹⁰

6.1.1 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung

Der sogenannte Technische Test der vom 29.06.2020 bis zum 17.08.2020 stattfand, gliederte sich in die Teilversuche „Tideniedrigwasseranhebung“ (TnWA) und „Flutstromtidesteuerung“ (FsTs). Der überwiegende Teil (42 Schließungen) wurde dem 1. Teilversuch gewidmet, 5 Tiden konnten zur Flutstromsteuerung genutzt werden. Nachfolgende Grafik zeigt die prinzipiellen Auswirkung der beiden Varianten während des Technischen Tests in der Form von Reaktionen des Wasserspiegels an unterschiedlichen Stellen.

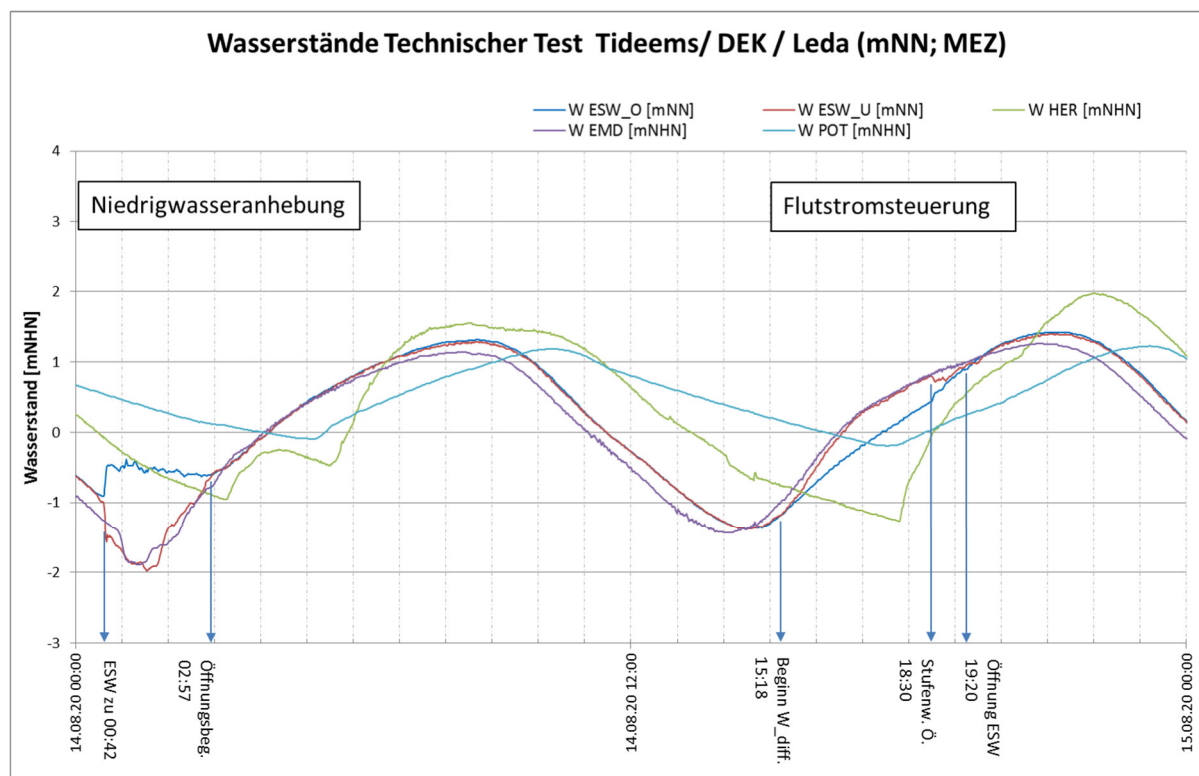


Abbildung 30: Wirkung der Tideniedrigwasseranhebung sowie Flutstromsteuerung bei Emden, Emssperrwerk, Potshausen (Leda) sowie Herbrum

Zur Einordnung der während des Versuches eingetretenen Wasserstände ist unter anderem die statistische Darstellung sowie der Vergleich mit den (Haupt-) Werten der Vorjahre von Interesse. Die nachfolgende Tabelle zeigt die bekannte Darstellung gewässerkundlicher Hauptwerte (Auswahl) für relevante Pegel. In der langjährigen Darstellung ausgewählter Hauptwerte ist die Veränderung z. B. der Tideniedrigwasserstände in der Unterems gut zu erkennen. Je nach Pegelposition können sich weitere Einflüsse wie beispielsweise Oberwasser, Wind, Veränderungen der Gerinnegeometrie udgl. mehr oder weniger stark auf die Wasserstände auswirken.

¹⁰ Siehe auch gesonderten Bericht des WSA Ems-Nordsee im Anhang: KREBS 2021; Technischer Test 2020 – Ergebnisbericht des WSA Ems-Nordsee zum durchgeführten Monitoring; Emden Dezember 2021

Tabelle 25: Hydrologische Hauptwerte einiger ausgewählter Pegel im Versuchsgebiet

	MThw 2020	MTnw 2020	MThw 11/20	MThw 16/20	MTnw 11/20	MTnw 16/20	MTH 11/20	SKN cm u. NHN	MSpHW 2021**	MSpNW 2021**	MSpTH 2021**	MNpHW 2021**	MNpNW 2021**	MNpTH 2021**
Borku m Süd.	614	384	609	611	378	379	231	177	623	357	266	591	396	195
Borku m Fb.	624	386	620	622	381	383	239	181	634	361	273	604	402	202
Ems- hörn	634	378	629	631	371	374	258	192	644	351	293	612	393	219
Duke- gat	638	368	634	635	362	365	272	202	648	343	305	617	383	234
Knock	657	349	650	654	346	348	304	220	666	326	340	634	371	263
Emden Neue S.	653	326	650	651	320	323	330	238	666	297	369	632	345	287
Pogum	664	331	660	662	323	327	337	240	676	301	375	642	346	296
Terbor- g	677	334	674	676	326	330	348	232	693	308	385	655	344	311
Leerort	687	335	682	685	325	329	357	225	702	309	393	661	339	322
Weene- r	691	331	686	689	321	326	365	225	706	307	399	664	335	329
Papen- burg	697	332	692	695	325	328	367	225	711	311	400	670	338	332
Rhede	700	371	697	699	362	367	335	210	716	351	365	676	373	303
Herbr. Hafend .	708	408	704	706	403	403	301	210	723	383	340	682	399	283
Drey- schloot	622	525	621	621	521	521	100	-	632	518	114	616	523	93

Der Schließvorgang am Emssperrwerk (ESW) bei Ebbe führt einerseits zu einer Sunkwelle im Unterwasser, die sich nach See hin ausbreitet und gleichzeitig mit zunehmender Entfernung abschwächt. Im Oberwasser breitet sich eine Schwallwelle nach Oberstrom aus. Die Namensgebung des Versuches trifft daher nur für die Orte oberhalb des Emssperrwerkes zu.

Der teilweise Schließvorgang wie im Fall der Flutstromtidesteuerung wirkt sich abhängig vom Verschlussgrad mehr oder weniger auf die Differenzwasserstände unter- bzw. oberhalb des ESW aus. Die umgesetzte Variante wirkte sich lokal auf die Wasserstände in der Nähe des ESW aus. Die Tidescheitel sind von dieser Steuerungsvariante nicht merklich betroffen.

Zur Berechnung des ungestörten Tideniedrigwassers werden die Beziehungen zwischen dem Pegel Emden Neue Seeschleuse und den unbeeinflussten Pegeln nach See hin genutzt. Ungestörte Verhältnisse zeigen sich im Laufe der Untersuchung zumindest hinsichtlich der Wasserstände seewärts ab Dukegat. Für die Eintrittszeiten gilt dies nicht, da diese hier bereits leicht verändert sind.

Werden mit dem statistischen Modell die Tideniedrigwasserhöhen von November 2017 bis November 2020 ohne den Zeitraum des Technischen Tests berechnet, so liegt die mittlere Abweichung in der Wasserstandshöhe bei 0,61 cm, der Standardfehler 3,9 cm. Die zeitliche Abweichung der Tnw liegt bei 0,34 min, der Standardfehler bei 8 Min. Für die Vorhersage des durch den Technischen Test unbeeinflussten Tnw Emden wird die gute Korrelation (Datengrundlage 11/2017 – 11/2020) zu den unbeeinflussten Scheitelwerten nach See hin genutzt.

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 31) zeigt, dass die jährliche Differenz der Mittelwerte im Tnw zwischen ausgewählten Pegeln und dem Pegel Borkum Südstrand bereits für Emden (also Tnw Emden – minus Tnw Borkum Südstrand) nur wenig variiert. Ebenfalls leicht erkennbar ist der Einfluss des Oberwassers (Q Versen) für stromaufgelegene Tidepegel wie Herbrum oder Papenburg.

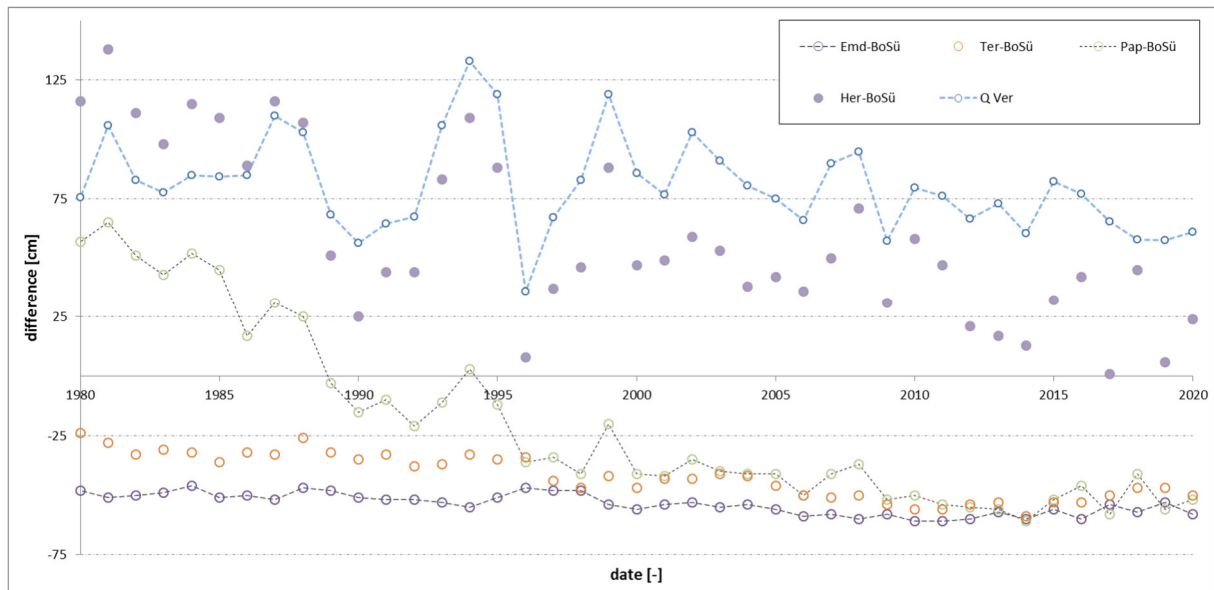


Abbildung 31: Tnw Differenz ausgewählter Pegel relativ zum Pegel Borkum Südstrand

Der Einfluss des Oberwassers ist bei Emden saisonal von Bedeutung, spielt jedoch im Jahresmittel, vor allem für den Zeitraum des Technischen Tests (Sommermonate) eher eine untergeordnete Rolle. Erkennbar ist in Abbildung 31, dass die jährlichen Oberwassermengen in den letzten Jahren tendenziell abnehmen und damit die Wirkung des Oberwassers insgesamt über Jahre hinweg geringer wird. Eine ähnliche Abfolge trockener Jahre wie während des Technischen Tests und die zwei Jahre davor hat es zuletzt von 1989 bis 1992 gegeben. Zu dieser Zeit war jedoch weder der 7,3 m Ausbau noch die Anpassungen an das XXL Schiff umgesetzt. Während des Technischen Tests lag der mittlere Oberwasserabfluss bei $25,5 \text{ m}^3/\text{s}$ und damit deutlich unter dem mittleren Abfluss der letzten 7 Jahre ($\sim 66 \text{ m}^3/\text{s}$). Der gleiche Zeitabschnitt in den Jahren zuvor (2018, 2019) lag mit 19 bzw. $22 \text{ m}^3/\text{s}$ noch geringer.

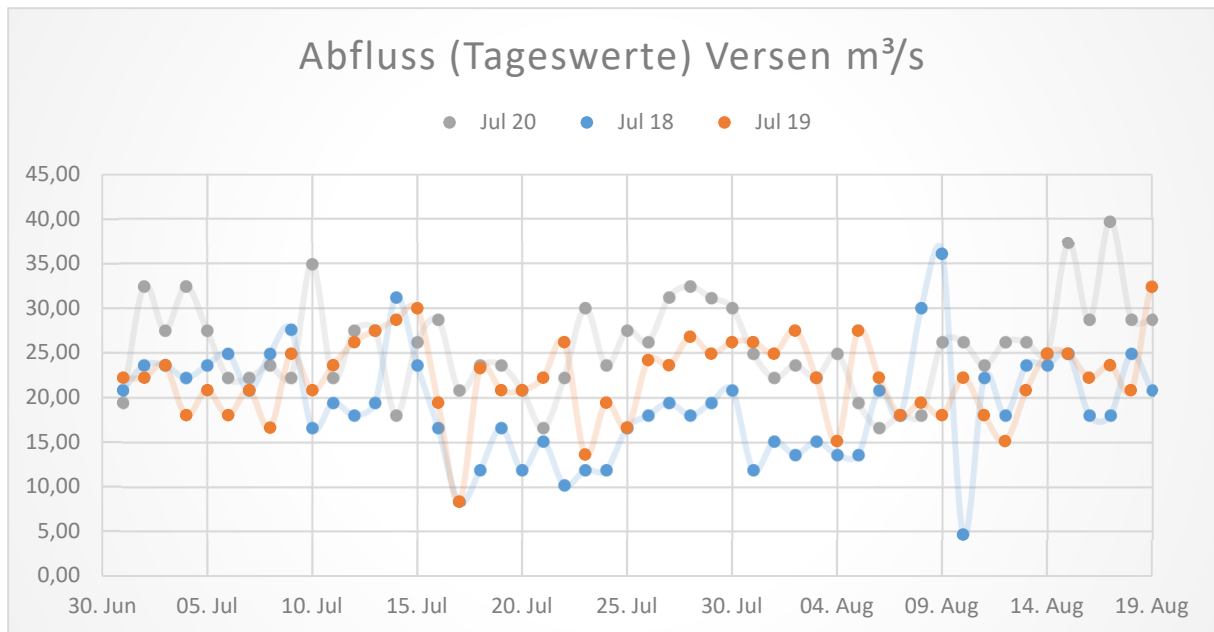


Abbildung 32: Tageswerte des Abflusses Versen [m^3/s] für den Technischen Test 2020 (grau) und Vergleichzeiträume 2018 und 2019

Die Gerinnegeometrie stellt für die einlaufende Tide eine wichtige Randbedingung dar. Die Lage der Tnw in diesen beiden vom Oberwasser ähnlichen Perioden ist daher trotzdem sehr unterschiedlich. In Abbildung 31 ist anhand der Kurven für die Tnw Differenz:

1. Emden - Borkum Südstrand,
2. Terborg – Borkum Südstrand,
3. Papenburg – Borkum Südstrand

eine Annäherung (vor allem für Papenburg) zu erkennen. Die Annäherung der genannten Kurven erklärt sich im Wesentlichen durch die Folgen der Unteremsanpassungen und dem sich daraus ergebenden abfallenden Tnw in der Unterems. Herbrum zeigt infolge abnehmender Niederschläge und zunehmendem Tideeinfluss ähnliche Tendenzen.

6.1.1.1 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Stationen Borkum Südstrand, Emshörn und Dukegat

Für die Pegel Borkum Südstrand, Emshörn sowie Dukegat wurden Eintrittszeitunterschiede und mittlere Tnw Höhen ermittelt. Der Monat Juli 2020 enthält sowohl unbeeinflusste als auch durch die TnwA beeinflusste Tiden bzw. Tnw. Die Größe der Beeinflussung durch die TnwA bzw. allgemein den Technischen Versuch ist am einfachsten anhand der Julitiden zu erkennen. Zugrundeliegende Daten sind Pegeldaten deren Fehler gemäß Vorgabe nicht größer als 1 cm sein soll. Nachfolgende Tabelle 27 zeigt anhand der ersten beiden Zeilen nahezu identische mittlere Tnw für die o.g. Pegel. Erst der Pegel Knock zeigt Abweichungen von 10 cm. Hinsichtlich der Eintrittszeit des Tnw Dukegat ist eine Wirkung der TnwA darstellbar. Da die Tnw Zeitpunkte händisch bestimmt werden, ist hinsichtlich des Zeitpunktes praktisch betrachtet immer eine gewisse Unschärfe vorhanden.

Laufzeiten [min]	Sued- Emsh	Emsh- Duke	Duke- Kno	Kno- Emd	Emd- Pog	Ter- Ler	Ler- LSW	LSW- Drey	Ler- Wee	Wee- Pap	Pap- Her
o. TnwA	31,9	13,9	19,4	17,1	17,5	37,4	18	122,6	24,3	29,6	64,6
TnwA	34,2	15,3	24,4	-4,9	7,3	30,5	13,8	220	22,5	23,8	60,5

Tabella 26: Eintrittszeitdifferenz Tnw im Juli 2020 von See nach Binnen ausgewählter Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	Emsh	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
o. TnwA (07/20)	383	378	367	349	325	330	336	335	351	522	327	323	369
TnwA (07/20)	383	377	367	339	290	281	406	405	414	533	394	390	410
07/19	377	376	364	346	325	331	335	328	340	512	326	324	356
07/18	363	358	347	331	307	314	321	314	329	507	312	311	355

Tabella 27: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juli 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	Emsh	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
(06/20)	373	365	354	335	311	317	324	320	339	522	316	314	357
(06/19)	363	361	349	330	308	315	316	310	327	512	308	307	343
(06/18)	369	365	354	338	314	320	323	317	335	518	316	318	360

Tabella 28: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juni 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen

6.1.1.2 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung an der Station Knock

Der Pegel an der Knock bei Ems-km 50,85 befindet sich außerhalb des Emders Fahrwassers und damit in einem Gerinnequerschnitt (ca. 2,5 km vom Knockster Siel bis Einfahrt Hafenskanal Delfzijl) der ab dem Ende des Emders Fahrwassers bzw. dem Geisesteert (ca. 1,0 km) deutlich breiter als der des Emders Fahrwassers ist. Die Auswirkungen am Querschnitt sind von Bedeutung, da auf der niederländischen Seite die Einfahrt zum Hafenskanal, dem Zubringer zum Hafen Delfzijl liegt.

Die Absenkung durch den Technischen Test wurde anhand der Tnw Ereignisse für Juli bestimmt. Im Juli liegen 34 unbeeinflusste und 26 beeinflusste Tiden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die über echte und modellierte Tnw gemittelten Werte. Als Absenkung durch die Versuche zur TnwA im Juli 2020 ergeben sich im Mittel 9,2 cm. Die größte ermittelte Differenz (vergleiche Abbildung 33) aus den modellierten Tnw liegt bei 12,7 cm, die kleinste bei 4 cm. Der Vergleich mit den Junimonaten aus den vorangegangenen Jahren zeigt, dass die eingetretenen Werte im Juli durch die natürlicherweise eingetretenen im Juni unterschritten wurden.

Tnw Knock Juli 2020 [cm ü PN]	Tnw Knock gemessen	Tnw Knock modelliert	Tnw Emden gemessen	Tnw Emden modelliert
o. TnwA	348,5	348,7	324,6	323,8
TnwA	339,3	348,4	290,3	323,6
Differenz	9,2	0,3	34,3	0,2

Tabelle 29: Tnw Knock und Emden Juli 2020

Laufzeiten [min]	Sued- Emsh	Emsh- Duke	Duke- Kno	Kno- Emd	Emd- Pog	Ter- Ler	Ler- LSW	LSW- Drey	Ler- Wee	Wee- Pap	Pap- Her
o. TnwA	31,9	13,9	19,4	17,1	17,5	37,4	18	122,6	24,3	29,6	64,6
TnwA	34,2	15,3	24,4	-4,9	7,3	30,5	13,8	220	22,5	23,8	60,5

Tabelle 30: Eintrittszeitdifferenz Tnw im Juli 2020 von See nach Binnen ausgewählter Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	Emsh	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
o. TnwA (07/20)	383	378	367	349	325	330	336	335	351	522	327	323	369
TnwA (07/20)	383	377	367	339	290	281	406	405	414	533	394	390	410
07/19	377	376	364	346	325	331	335	328	340	512	326	324	356
07/18	363	358	347	331	307	314	321	314	329	507	312	311	355

Tabelle 31: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juli 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	Emsh	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
(06/20)	373	365	354	335	311	317	324	320	339	522	316	314	357
(06/19)	363	361	349	330	308	315	316	310	327	512	308	307	343
(06/18)	369	365	354	338	314	320	323	317	335	518	316	318	360

Tabelle 32: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juni 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen

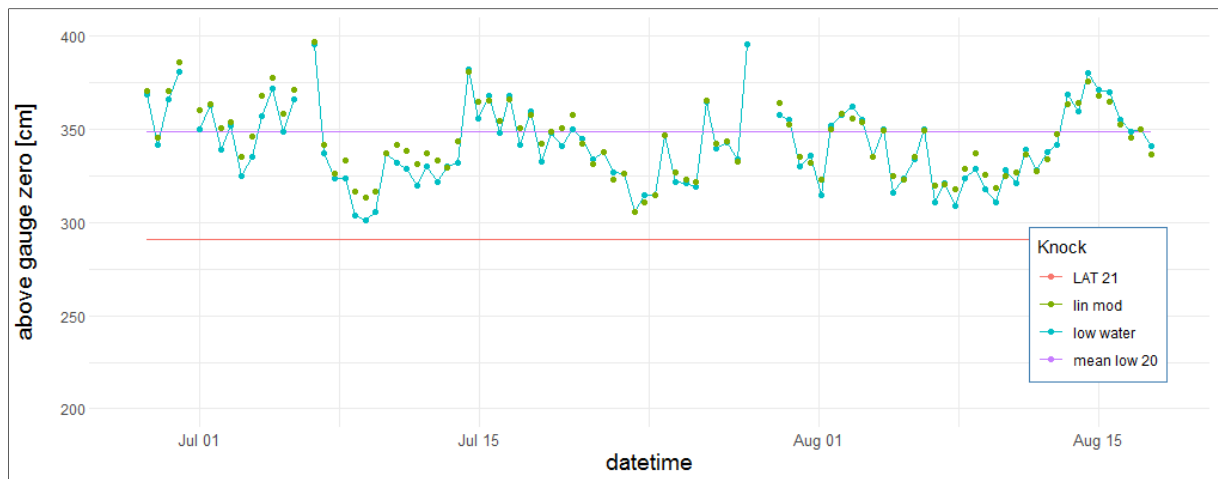


Abbildung 33: Rekonstruierte (grün) sowie reale Tideniedrigwasserereignisse (cyan) für den Pegel Knock

6.1.1.3 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung bei Emden und Pogum

Die folgende Abbildung 34 zeigt die eingetretenen und aus dem statistischen Modell ermittelten Tnw für den Pegel Emden (Ems-km 40,45). Die maximale ermittelte Tnw Absenkung von 45,9 cm ereignete sich bei Spring am 05.07. in der Sperrung der morgendlichen Tide. Am gleichen Tag und am Tag zuvor liegen die jeweils nachfolgenden höchsten Werte. Die geringsten Veränderungen wurden zur Mitt-Tide (22,4 cm) und Nipp-Tide (24,3 cm) beobachtet. Das LAT (Lowest Astronomical Tide) wurde einmal unterschritten und 7 Mal fast erreicht.

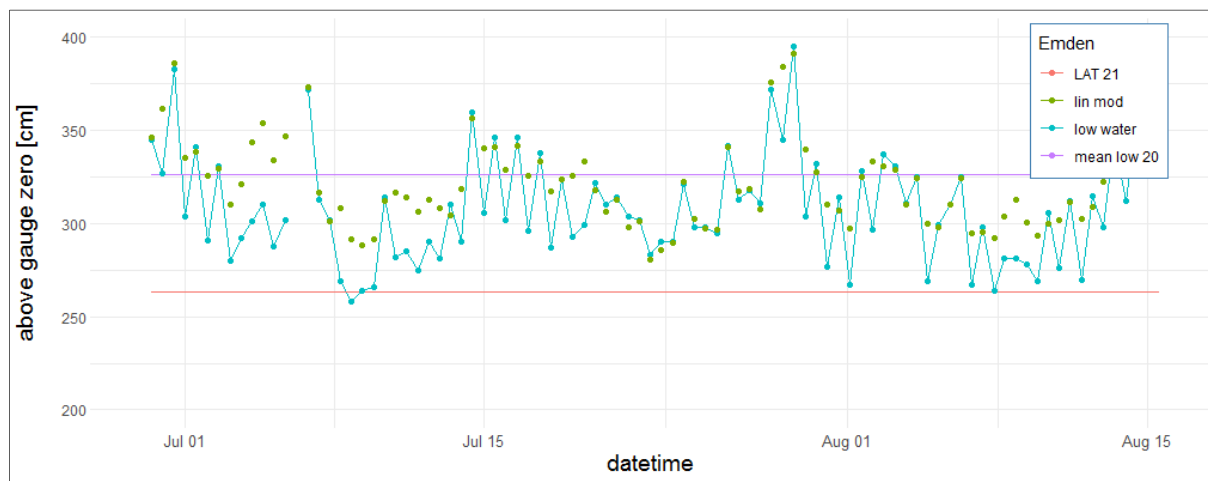


Abbildung 34: Rekonstruierte (grün) sowie reale Tideniedrigwasserereignisse (cyan)

Hinsichtlich der Eintrittszeitdifferenz bzw. dem zeitlichen Eintreffen der Tideniedrigwasser ist in Tabelle 33 zu sehen, dass das Tnw bei Knock zeitlich nicht mehr vor dem Tnw Emden eintritt sondern danach. Der Eintrittszeitpunkt verschiebt sich um 22 Minuten nach vorn. In Tabelle 34 ist zudem die mittlere Absenkung der Tnw, hier dargestellt an den Ergebnissen des Monats Juli, von 35 cm abzulesen. Dieser Wert ist gut in Übereinstimmung mit der aus dem statistischen Modell ermittelten mittleren Differenz für die Juli Versuche von 33,3 cm.

Laufzeiten [min]	Sued- Emsh	Emsh- Duke	Duke- Kno	Kno- Emd	Emd- Pog	Ter- Ler	Ler- LSW	LSW- Drey	Ler- Wee	Wee- Pap	Pap- Her
o. TnwA	31,9	13,9	19,4	17,1	17,5	37,4	18	122,6	24,3	29,6	64,6
TnwA	34,2	15,3	24,4	-4,9	7,3	30,5	13,8	220	22,5	23,8	60,5

Tabelle 33: Eintrittszeitdifferenz Tnw im Juli 2020 von See nach Binnen ausgewählter Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	Emsh	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
o. TnwA (07/20)	383	378	367	349	325	330	336	335	351	522	327	323	369
TnwA (07/20)	383	377	367	339	290	281	406	405	414	533	394	390	410
07/19	377	376	364	346	325	331	335	328	340	512	326	324	356
07/18	363	358	347	331	307	314	321	314	329	507	312	311	355

Tabelle 34: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juli 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	EmsH	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
(06/20)	373	365	354	335	311	317	324	320	339	522	316	314	357
(06/19)	363	361	349	330	308	315	316	310	327	512	308	307	343
(06/18)	369	365	354	338	314	320	323	317	335	518	316	318	360

Tabelle 35: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juni 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen

Für die Station Pogum (Ems-km 35,3) gilt sinngemäß das gleiche wie für Emden nur, dass sich hier die Sunkerscheinung noch deutlicher zeigt. Für den Monat Juli liegen die durch den TnwA Versuch eingetretenen Tnw im Mittel um 49 cm niedriger. Infolgedessen liegen hier 4 Tnw Ereignisse auf bzw. unter LAT.

6.1.1.4 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung an den Pegeln Terborg, Leerort, Ledasperrwerk, Weener, Papenburg und Herbrum

Für die Pegel oberhalb des ESW zeigt sich die Wirkung der TnwA als Auswirkung der Schwallwelle bzw. als Folge eines Stauereignisses. In Tabelle 37 sind die Auswirkungen auf die Wasserstände wie in der Auswertung für den Monat Juli dargestellt. Es ergibt sich im Mittel eine Anhebung des Tnw für die Pegel Terborg und Leerort um 70 cm. Für den Pegel am Ledasperrwerk (unterer Pegel bei Leda-km 21,125) ergibt sich noch eine Anhebung um 63 cm.

Laufzeiten [min]	Sued- EmsH	EmsH- Duke	Duke- Kno	Kno- Emd	Emd- Pog	Ter- Ler	Ler- LSW	LSW- Drey	Ler- Wee	Wee- Pap	Pap- Her
o. TnwA	31,9	13,9	19,4	17,1	17,5	37,4	18	122,6	24,3	29,6	64,6
TnwA	34,2	15,3	24,4	-4,9	7,3	30,5	13,8	220	22,5	23,8	60,5

Tabelle 36: Eintrittszeitdifferenz Tnw im Juli 2020 von See nach Binnen ausgewählter Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	EmsH	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
o. TnwA (07/20)	383	378	367	349	325	330	336	335	351	522	327	323	369
TnwA (07/20)	383	377	367	339	290	281	406	405	414	533	394	390	410
07/19	377	376	364	346	325	331	335	328	340	512	326	324	356
07/18	363	358	347	331	307	314	321	314	329	507	312	311	355

Tabelle 37: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juli 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Sued	EmsH	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Drey	Wee	Pap	Her
(06/20)	373	365	354	335	311	317	324	320	339	522	316	314	357
(06/19)	363	361	349	330	308	315	316	310	327	512	308	307	343
(06/18)	369	365	354	338	314	320	323	317	335	518	316	318	360

Tabelle 38: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juni 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen

Für die Stationen Weener (Ems-km 6,89) und Papenburg betragen die Anhebungen des Tideniedrigwassers im Mittel 67 cm.

6.1.1.5 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung (TnwA) am Pegel Dreyschloot, Potshausen und Wiltshausen (Ledapegel)

Die Auswirkungen der TnwA am Pegel Dreyschloot sind anhand der Wasserstandskurven visuell nicht erkennbar. Zur Einschätzung der Veränderung durch den Technischen Test wurden daher die Tideniedrigwasserstände des Monats Juli unter der Wirkung der TnwA sowie zu Zeiten ohne TnwA herangezogen bzw. verglichen. Weiterhin wurde ein Vergleich zu den Julimonaten der Vorjahre durchgeführt.

Tabelle 39: Kennwerte des Pegels Dreyschloot

Pegel Dreyschloot (Leda)	Tnw [cm]	Zeitunterschied Ledasperrwerk -Dreyschloot [min]	MTnw 2020 [cm]	MTnw_Juli 2018/19 [cm]	MTnw 2016-20 [cm]	MTnw 2011-20 [cm]
TnwA Juli 2020	533	220	525	509	520	520
Ohne TnwA Juli 2020	522	123				

Das mittlere Tideniedrigwasser Dreyschloot für das gewässerkundliche Jahr 2020 beträgt 525 cm ü. Pegelnul. In der länger gemittelten Zeitreihe von 2011 – 2020 sowie im Zeitraum von 2016 – 2020 liegt das MTnw bei 520 cm ü PN. Für die Einordnung der Auswirkungen des Technischen Tests für alle hier betrachteten Stationen sowie auch für Dreyschloot wird der Zeitraum 01.11.2017 – 31.10.2020 angesetzt. In diesem Zeitraum lag das MTnw bei 520 cm ü PN. Das MTnw Juli 2018/19 liegt bei 509 cm ü PN also deutlich unter den länger gemittelten Zeiträumen. Das Mittel über die TnwA Versuche im Juli 2020 liegt bei 533 cm ü PN, ohne die Wirkung der TnwA bei 522 cm ü PN. Insgesamt liegen die Wasserstände im Juli 2020 etwas über den Wasserständen in den Vorjahren. Die Differenz mit und ohne TnwA im Juli 2020 beträgt 11 cm. Hinsichtlich eines Beitrages durch Niederschläge und der daraus resultierenden Erhöhung des Abflusses Q ist davon auszugehen, dass durch Retention und Verdunstung im Einzugsgebiet zu dieser Jahreszeit für das Leda-Jümme-Gebiet wenig bis kein Beitrag entsteht. Der mittlere Oberwasserabfluss Versen liegt für Juni 2020 bei knapp 34 m³/s, im Juli bei knapp 26 m³/s. Übertragen auf die Verhältnisse des deutlich kleineren Leda-Jümme Einzugsgebietes ist der Unterschied zwischen beiden Monaten vernachlässigbar. Sowohl der Juni als auch der Juli besitzen identische (gemittelte) Wasserstände.

Laufzeiten [min]	Duke-Kno	Kno-Emd	Emd-Pog	Ter-Ler	Ler-LSW	LSW-Wilt	LSW-Pots	LSW-Drey	Ler-Wee	Wee-Pap	Pap-Her
o. TnwA	19,4	17,1	17,5	37,4	18	26	86,3	122,6	24,3	29,6	64,6
TnwA	24,4	-4,9	7,3	30,5	13,8	18,1	193,7	220	22,5	23,8	60,5

Tabelle 40: Eintrittszeitdifferenz Tnw im Juli 2020 von See nach Binnen ausgewählter Pegelstationen ohne/mit TnwA

MTnw [cm]	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Wilt	Pots	Drey	Wee	Pap	Her
o. TnwA (07/20)	367	349	325	330	336	335	351	404	497	522	327	323	369
TnwA (07/20)	367	339	290	281	406	405	414	455	514	533	394	390	410
07/19	364	346	325	331	335	328	340	-	-	512	326	324	356
07/18	347	331	307	314	321	314	329	-	-	507	312	311	355

Tabelle 41: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juli 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen ohne/mit TnwA

Am 20,4 km entfernten Pegel Dreyschloot (Leda-km 0,73) beträgt die mittlere Anhebung 11 cm. Die Pegel Potshausen (Leda-km 5,23) und Wiltshausen (Leda-km 16,13) wurden auf Veranlassung der WSV im Jahre 2013 aufgelassen. Pegeldata sind aber dennoch im Rahmen des Technischen Test durch mobile Sensoren aufgenommen worden. Die Qualität wird als etwas geringer im Vergleich zu den tatsächlichen Pegeln eingeschätzt, da hier augenblicklich keine langjährige Plausibilisierung bzw. Querabgleich mit benachbarten Pegeln durchgeführt werden kann.

6.1.2 Zusammenfassung zur Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung an den untersuchten Pegeln

Die Auswirkungen der TnWA sind von Dukegat bis Herbrum und im Leda-Jümme Gebiet bis über den Pegel Dreyschloot hinaus nachweisbar. Die TnWA führte in den durchgeführten Versuchen im Mittel oberhalb des ESW zu einer gemittelten Niedrigwasseranhebung von bis zu 70 cm (Terborg & Leerort), bis zu 39 cm bei Herbrum und bis zu 11 cm für den Pegel Dreyschloot an der Leda. Seewärts des ESW führt die TnWA zu einer Tideniedrigwasserabsenkung, die sich bis zum Pegel Knock nachweisen lässt. Die entsprechenden Werte ergeben sich aus Tabelle 37 bzw. Tabelle 41.

	S: max. versuchsbed. Absunk [dm]	max. Anstieg [cm]	Laufzeit [min]	Steig-/Fallraten versuchsbedingt [cm/min]	Steig-/Fallraten normal [cm/min]
Emden	~ 4	-	22	4,6	1,1
Leer	-	41	53	13,5	4
Papenburg	-	27	100	9	12
Potshausen	-	-	-	-	-
Herbrum	-	40	162	3,2	-

Tabelle 42: Anhand des Eintrittszeitpunktes „maximaler Absunk“ bestimmte Werte

Die tatsächlich durchgeführten Versuche zur TnWA wurden entgegen den ursprünglichen Planungen in reduzierter Anzahl ausgeführt. Die geringere Anzahl der beeinflussten Tiden hat auf die Untersuchung der Wasserstandsveränderungen nur eine geringe Auswirkung. Einige Erscheinungen wie bspw. der Beginn des Absunks und damit auch Laufzeiten bei Emden wurden grafisch ausgewertet. Hierdurch ergeben sich leichte Unschärfen die jedoch in der Gesamtbetrachtung wenig Bedeutung besitzen. Verglichen mit den berechneten mittleren Eintrittszeitunterschieden (vergleiche Tabelle 36 & Tabelle 40, Abbildung 35) aus denen sich ebenfalls eine Laufzeit ergibt, sind die grafisch ermittelten Werte genügend genau. Ebenfalls grafisch ermittelt wurden die maximalen Steig- bzw. Fallgeschwindigkeiten (s. a. Tabelle 42). Die durch den Versuch veränderten und ermittelten Werte der Steig-/Fallgeschwindigkeit werden an der Ems zwischen Papenburg und Herbrum regelmäßig auch ohne TnWA erreicht. Die schnellen Wasserstandsveränderungen stellen für den Hafen Emden speziell bei der Be- und Entladung eine Einschränkung dar.

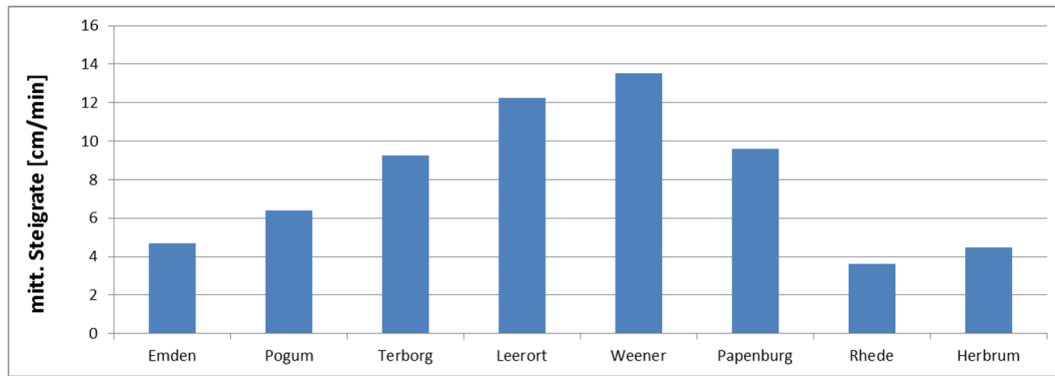


Abbildung 35: versuchsbedingte Steig- / Fallgeschwindigkeiten durch die TnwA

6.1.3 Der Absunk des Wasserstands bei Emden

Die Höhe des auf den vollständigen Sperrvorgang folgenden Tideniedrigwassers (Tnw) ist im Fall der TnwA vom Schließzeitpunkt bzw. der Art und Weise wie der Schließvorgang praktisch durchgeführt wird abhängig. In jedem Fall fällt der Wasserstand durch die TnwA im Laufe des Schließvorganges bedeutend schneller ab d.h. anstatt 1-2 cm/min dann 4-5 cm/min (vergleiche Abbildung 30).

Der Schließvorgang am ESW sollte nach numerischen Vorbetrachtungen der BAW derart gesteuert sein, dass der maximale Sunk zeitlich nicht identisch mit dem Niedrigwasser zusammenfällt um die Absenkung so verträglich wie möglich zu gestalten. Da das nächste Tnw Emden von der Höhe und dem Zeitpunkt nicht bekannt ist, stellt dies eine gewisse Unwägbarkeit dar. Die Abbildung 36 und Abbildung 37 machen dies deutlich. Sie zeigen für die 2. und 4. TnwA den Wasserstand im Bereich der Steuerung sowie die theoretischen Tnw Scheitel. In den Abbildungen gelb markiert ist der Bereich großer Wasserstandsveränderungen durch den Sunk infolge Schließen des ESW. Eingezeichnet ist ebenfalls das berechnete, unbeeinflusste Tnw (blauer Punkt) das zeitlich in Abbildung 36 vor dem Absunk liegt. Während der TnwA ist das unbeeinflusste Tnw nicht mehr erkennbar. Abbildung 36 (2. Steuerung am 30.06.20, Nippzeitraum) unterscheidet sich von der darauffolgenden Abbildung (4. Steuerung am 02.07.20, Mittzeitraum) als das direkt nach dem maximalen Absunk (gelbe Markierung) die Wasserstände am Pegel wieder ansteigen. In Abbildung 37 liegt das berechnete Tnw zeitlich gesehen hinter dem maximalen Absunk. In dieser Abbildung fällt der Wasserstand nach dem Ende des maximalen Absunks weiter. Während der 4. Steuerung beträgt er 47 cm und damit 20 cm mehr als durch die 2. Steuerung. Die Differenz zwischen dem beeinflussten Tnw und dem berechneten Tnw ist mit 34,9 cm dagegen identisch.

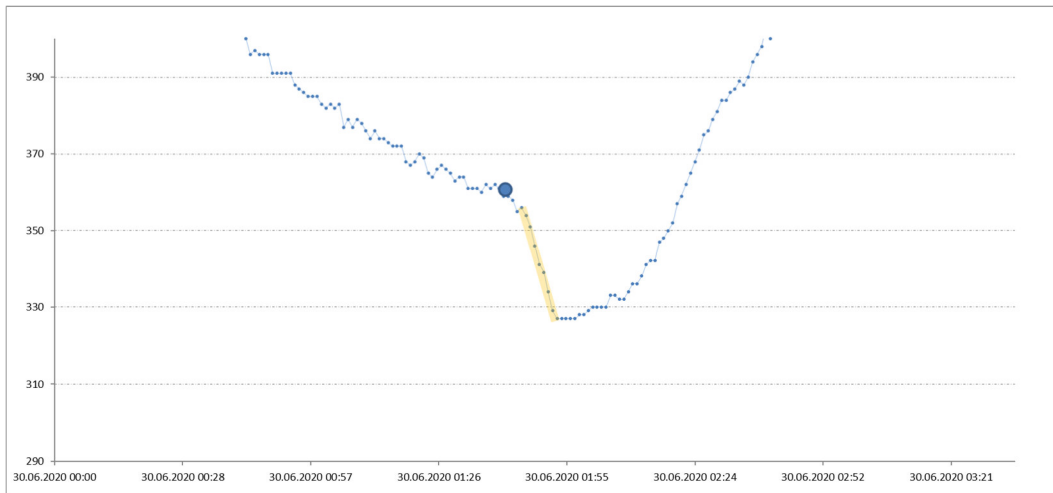


Abbildung 36: Wasserstand am Pegel Emden Neue Seeschleuse während der 2. TnWA

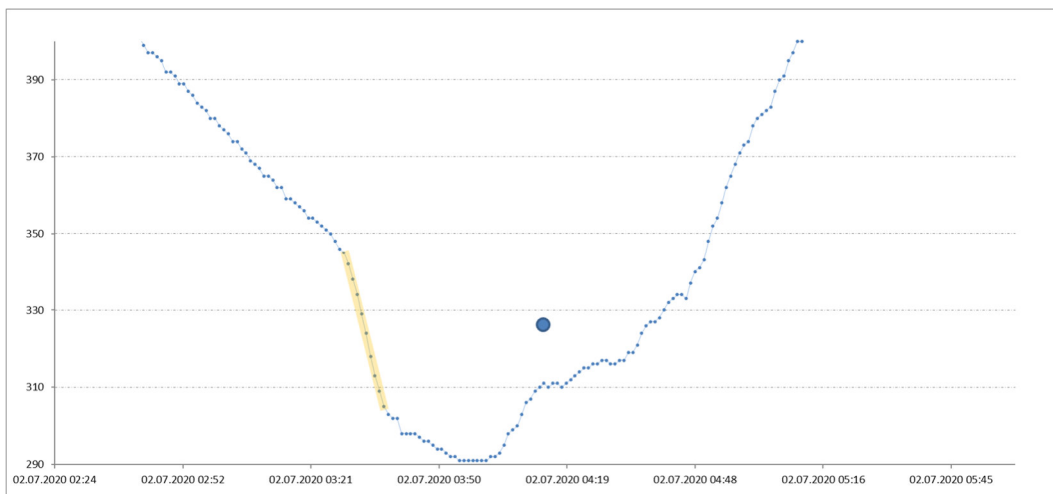


Abbildung 37: Wasserstand am Pegel Emden Neue Seeschleuse während der 4. TnWA

Da die Wasserstandsschwankungen für die Schifffahrt eine große Bedeutung haben kann und die beiden Situationen nur zwei Tage auseinanderliegen, stellt sich die Frage nach der Ursache. Die folgende Grafik zeigt die Dauer des Sperrvorganges (Schließvorgang der Sperrwerkstore) am ESW in Minuten aufgetragen über der Differenz des berechneten und tatsächlich eingetretenen Tnw. Die Dauer der jeweiligen Sperrvorgänge variierte dabei von 18 bis 32 Minuten mit einem Mittelwert von 22 Minuten. Die Differenzen im Tnw variieren von 22,4 bis 45,9 cm mit einem Mittelwert von 31,7 cm. Im Ergebnis lässt sich kein Zusammenhang erkennen.

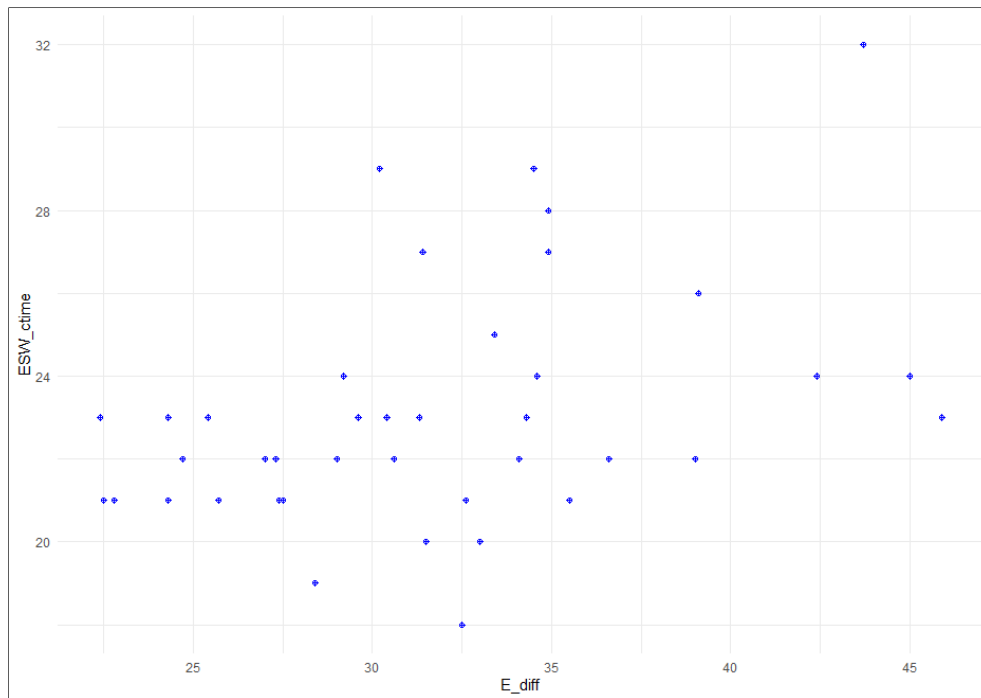


Abbildung 38: Dauer des Schließvorgangs ESW [min] über der Höhendifferenz [cm] T_{nw} unbeeinflusst - T_{nw} real

Trägt man die Zeitdifferenz aus dem berechneten sowie gemessenen T_{nw} auf (Abbildung 39) so ergibt sich ein Zusammenhang der mit den Vorüberlegungen der BAW hinsichtlich des geeignetsten Schließzeitpunktes in Verbindung gebracht werden kann. Je weiter das beeinflusste T_{nw} zeitlich vor dem berechneten, unbeeinflussten liegt, umso geringer ist die Absenkung bezogen auf die Lage des unbeeinflussten T_{nw} .

Abbildung 40 zeigt analog zu Abbildung 38 die Schließzeit des ESW diesmal über dem sich einstellenden maximalen Sunk. Dieser Wert ist händisch anhand großer, zeitlich zusammenhängender Wasserstandsdifferenzen bestimmt. Abbildung 37 macht die Schwierigkeit in der Bestimmung dabei ansatzweise deutlich, da nach dem starken Abfall des Wasserspiegels ebendieser noch etwas schwächer weiter fällt, verharrt und dann erneut zu fallen beginnt. Gedanke bei der Beschreibung des maximalen Sunks war es ein Maß zu finden, das problematisch für die Schifffahrt bzw. den Hafenbetrieb sein kann. Im Ergebnis (Abbildung 40) ist festzustellen, dass die Dauer wie das ESW schließt auf den Sunk keine erkennbare Wirkung besitzt.

Es lässt sich weiterhin (Abbildung 41) kein besonders augenfälliger Zusammenhang zwischen maximalem Sunk und der Differenz der Eintrittszeit T_{nw} berechnet / real finden. Man kann erkennen, dass die meisten Ereignisse im Bereich zwischen 40 und 45 cm liegen. Die überwiegende Zahl der Sperrungen fand zudem während der Mitt-Tide statt.

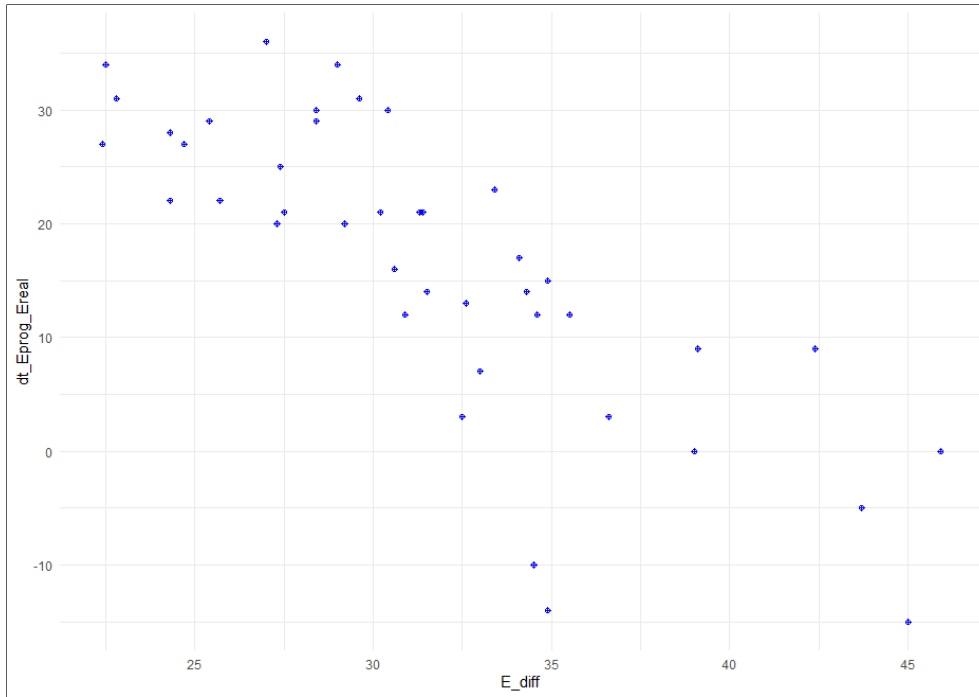


Abbildung 39: Zeitdifferenz [min] T_{nw} unbeeinflusst - T_{nw} real über Höhendifferenz [cm] T_{nw} unbeeinflusst - T_{nw} real

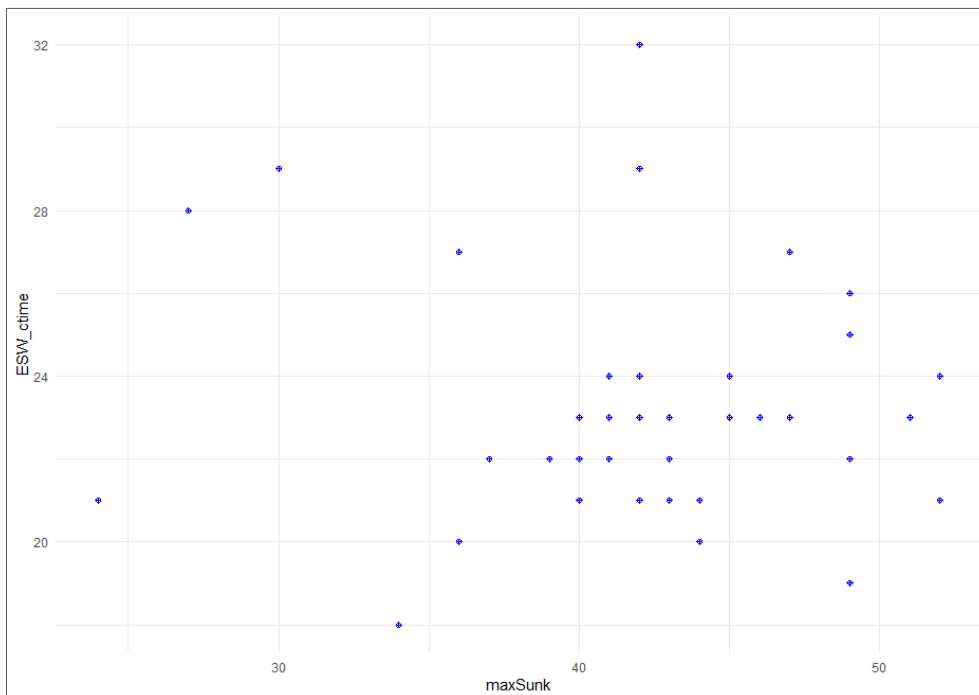


Abbildung 40: Dauer des Schließvorganges ESW [min] über dem maximalen Sunk [cm]

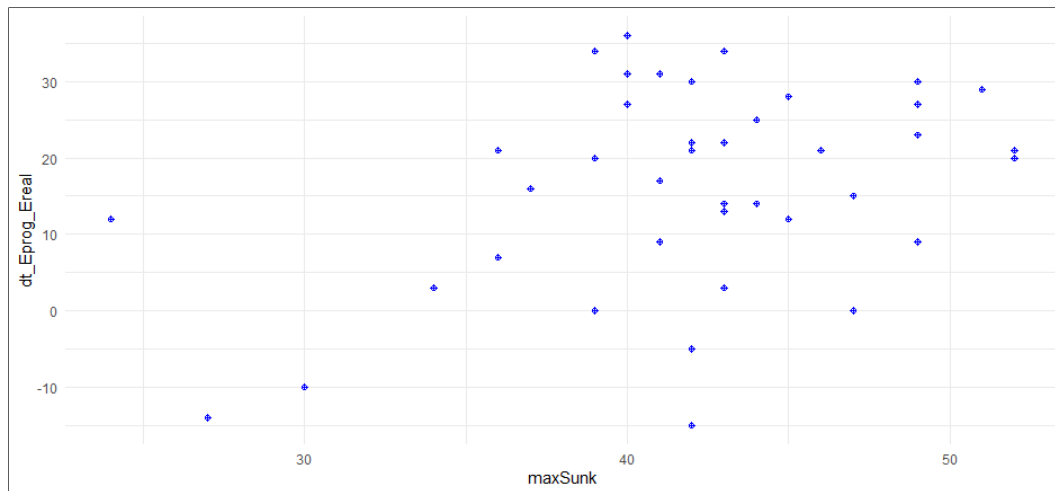


Abbildung 41: Zeitdifferenz [min] Tnw unbeeinflusst - Tnw real über dem maximalen Sunk [cm]

6.1.3.1 Verringerung des Absunks vor Emden

Für das Be- und Entladen von Schiffen im Hafen Emden (NPorts) stellen die absunkbedingten Wasserstandsveränderungen ein Problem dar. Im Umkehrschluss wurden viele geplante TnwA Versuche abgesagt, da die Höhe des Absunks nicht einschätzbar war und damit eine zu große Gefahr für Mensch und Technik darstellte. Um die Einschränkungen zu minimieren wären nach bisherigen Erkenntnissen zusätzliche Eingangsdaten zur verbesserten Steuerung des ESW hilfreich und möglich. Abbildung 39 zeigt die Abhängigkeit zwischen dem Zeitpunkt des Schließvorganges ESW und der Höhe des Absunks. Die folgende Abbildung 42 zeigt den Zusammenhang noch besser anhand der Strömungsgeschwindigkeiten unmittelbar vor dem Absunk und der Höhe desselben. Anhand dieses Zusammenhanges ist eine Optimierung des Schließvorganges im Hinblick auf geringere Absunkhöhen durch das dahingehend angepasste Schließen des ESW denkbar. Hierfür kommen Strömungsgeschwindigkeiten in Frage, die zeitlich gesehen noch weiter zurückliegen. Die analoge Betrachtung für den Zeitpunkt $t-30$ liefert noch brauchbare Korrelationen. Durch Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Fahrrinne ist praktisch Potential zur Verbesserung der Prognose bzw. zur Reduktion des Absunks zu erwarten. Möchte man einen Absunk größer als 40 cm vermeiden, so ist darauf zu achten, dass die Strömungsgeschwindigkeit kleiner oder gleich 85 cm/s (Emden) ist. Dieser Punkt befindet sich in einem Zeitfenster von etwa 30 – 90 Minuten vor dem Tnw.

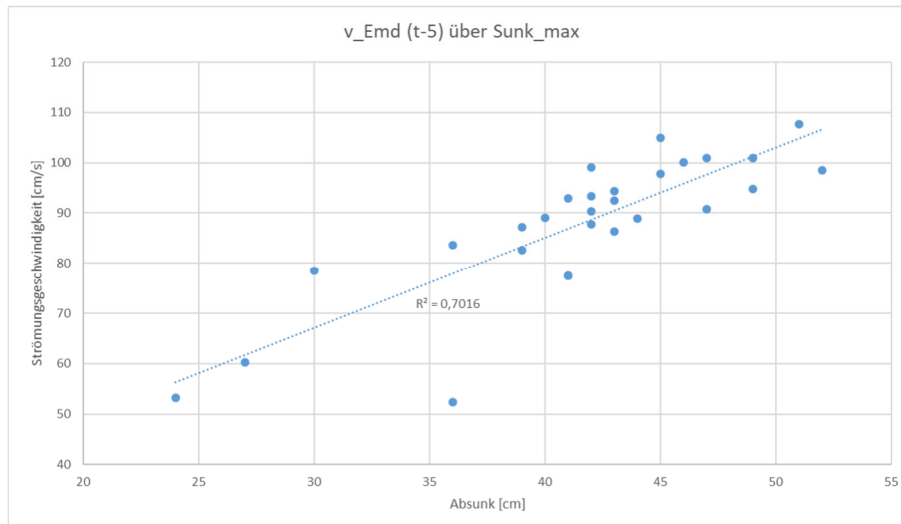


Abbildung 42: Strömungsgeschwindigkeit über Absunkhöhe 5 Minuten vor Beginn des deutlichen Wasserandrückganges an der Station Emden

6.1.4 Untersuchung der Wellenbildung und Strömungsspitzen infolge der Tideniedrigwasseranhebung

Im Vorfeld der Versuche wurde im Hinblick auf die Schifffahrt die mögliche Gefährdung durch Wellen thematisiert. Aus diesem Grund wurden in der Nähe des ESW zusätzliche Radarsensoren montiert, die den Wasserspiegel mit höherer Frequenz abtasten als die üblichen zur Wasserstandserfassung gebräuchlichen Radarsensoren. Die „Wellenpegel“ wurden bei Pogum sowie bei Terborg an den Pegeldalben bzw. den für Radarsensoren vorhandenen Auslegern montiert. Im Ergebnis (Abbildung 43) kann festgehalten werden, dass der Sperrbetrieb zu keinen negativen Auswirkungen im Sinne der Erzeugung von Wellen führt. Die Schifffahrt selbst erzeugt wie in der Abbildung zu erkennen ist (z. B. 03.07.20; 05:00) nennenswerte Wasserspiegelauslenkungen. Im Ergebnis finden sich keine negativen Auswirkungen durch Wellen.

Für Schiffe, die sich in Wartepositionen befinden wurden ebenfalls zusätzliche Strömungsmessgeräte ausgebracht um potentielle Wirkungen zu erfassen. Die Messungen wurden sinngemäß im Nahbereich der Wartepplätze Ditzum und Gandersum ausgelegt. Damit möglicherweise kurzzeitige Erhöhungen der Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden können, wurde der Messtakt auf 1 Minute eingestellt (üblicherweise 5 Minuten). Der Wasserspiegel wurde durch die Wellenpegel ergänzend dazu pro Minute etwa 200 Mal registriert. Aus den Messungen ergeben sich keinerlei Hinweise auf kurzfristige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten. In Abbildung 44 ist erkennbar, dass mit dem Eintreten des Absunks die Strömungsgeschwindigkeiten deutlich zurückgehen. Die Strömungsrichtung ändert sich durch den Absunk entweder nicht oder nur geringfügig und kurzzeitig um etwa 10-20°. Dies stellt weder für liegende als auch in Fahrt befindliche Schiffe eine Beeinträchtigung dar.

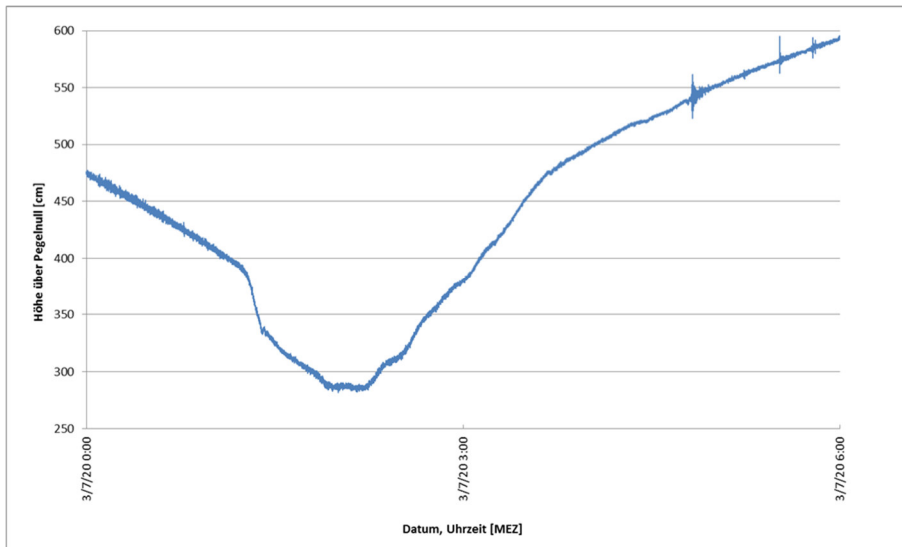


Abbildung 43: Wasserstand erfasst mit 3-4 Hz durch den Wellenpegel Pogum während der 5. Tnwa

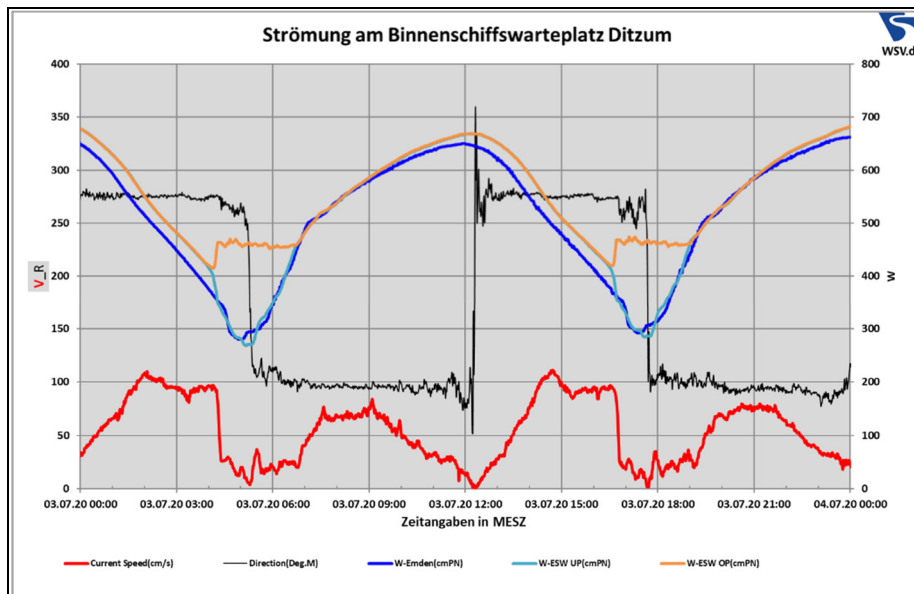


Abbildung 44: Strömungsmessung am Binnenschiffswarteplatz Ditzum

6.1.5 Auswirkung der Flutstromtidesteuerung

Die Flutstromsteuerung fand vom 14. – 18.08.2020 statt wobei 5 Tiden (Flutstrom) gesteuert wurden. Die erste Steuerung wurde im Nippzeitraum durchgeführt, die übrigen bei Mitt. Durch die geringe Anzahl von gesteuerten Tiden erhöht sich die Unschärfe im Sinne der statistischen Betrachtung. In Tabelle 43 steht der gelb markierte Bereich für die gemittelten Tnwa im Bereich der FsTs sowie außerhalb. Die Ergebnisse der Tnwa sind ebenfalls (nicht markiert) abgebildet.

MTnw [cm]	Sued	Emsh											
o. TnwA (07/20)	383	378											
TnwA (07/20)	383	377											
o. FS (08/20)	392	385											
FS (08/20)	388	382											
MTnw [cm]	Duke	Kno	Emd	Pog	Ter	Ler	LSW	Wilt	Pots	Drey	Wee	Pap	Her
o. TnwA (07/20)	367	349	325	330	336	335	351	404	497	522	327	323	369
TnwA (07/20)	367	339	290	281	406	405	414	455	514	533	394	390	410
o. FS (08/20)	371	353	329	335	354	354	367	413	502	527	346	343	385
FS (08/20)	374	359	336	341	341	339	351	398	481	504	331	327	369

Tabelle 43: gemittelte Tideniedrigwasserstände im Juli 2018/19/20 für ausgewählte Pegelstationen ohne/mit TnwA

Ähnlich wie bei der TnwA ist der Unterschied zwischen den am weitesten entfernten Pegeln Borkum Südstrand und Emshörn für den untersuchten Zeitraum 14.-31.08.20 mit 4 bzw. 3 cm nicht groß aber bereits deutlich über dem MTnw 2020. Für die Stationen Dukegat – Pogum wurden für den Versuchszeitraum der FsTs vergleichsweise höhere gemittelte Tnw ermittelt. Die Zunahmen liegen im einstelligen Bereich.

Für die Stationen oberhalb des ESW dreht sich die Situation um. Alle Pegelstationen liegen von den gemittelten Tnw unter den unbeeinflussten gemittelten Tnw. Die größte hier dargestellte Unterschreitung findet sich bei Dreyschloot mit 23 cm. Dieser Wert wird, gemessen an den unbeeinflussten Vergleichsmonaten Juli 2018 & 2019 mit 508 bzw. 512 cm ü PN, kritisch und als eher zu hoch angesehen. Geht man von den genannten Vergleichsmonaten in 2018 & 2019 aus ergibt sich eine Abweichung kleiner 10 cm. Für Potshausen und Wiltshausen fehlen Vergleichswerte aus den Vorjahren.

6.2 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Sielentwässerung entlang der Ems

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN)

Zur Tideniedrigwasseranhebung wurde das Emssperrwerk während der Ebbe unter Berücksichtigung der Fahrtgeschwindigkeiten der Tore ab einem Wasserstand von NHN -0,8 m zeitlich gestaffelt geschlossen. Damit konnte erreicht werden, dass alle Tore des Sperrwerks bei Eintritt des Zielwasserstands NHN -1,0 m auf dem Drempe aufsetzten. Durch den Schließvorgang wurde oberhalb des Sperrwerks eine Schwallwelle erzeugt, die sich bis zum Tidewehr Herbrum fortsetzte und auch in die Leda hineinlief. Nach der Schwallwelle stellte sich oberhalb des Emssperrwerks in der Stauphase ein Wasserstand ein, der in Gandersum im Mittel bei NHN -0,5 m lag.

Die Tideniedrigwasseranhebung wirkte sich sehr deutlich auf die Wasserstandscharakteristik bis zur festen Tidegrenze der Ems in Herbrum aus, in der Leda nahm der Einfluss bis zur freien Tidegrenze ab. In der Ems bis Herbrum und in der Leda bis Wiltshausen bildete sich ein Tideniedrigwasser aus, dessen Höhe und Eintrittszeitpunkt direkt vom Schließzeitpunkt bzw. Schließwasserstand des ESW abhing. Nach diesem nur kurzzeitig vorhandenen Niveau stieg der Wasserstand durch die Schwallwirkung des

Schließvorgangs zunächst zeitlich begrenzt zügig an. Die Steiggeschwindigkeit und die Höhe des auf den Schwall zurückzuführenden Anstiegs nahm mit zunehmender Entfernung zum Emssperrwerk ab.

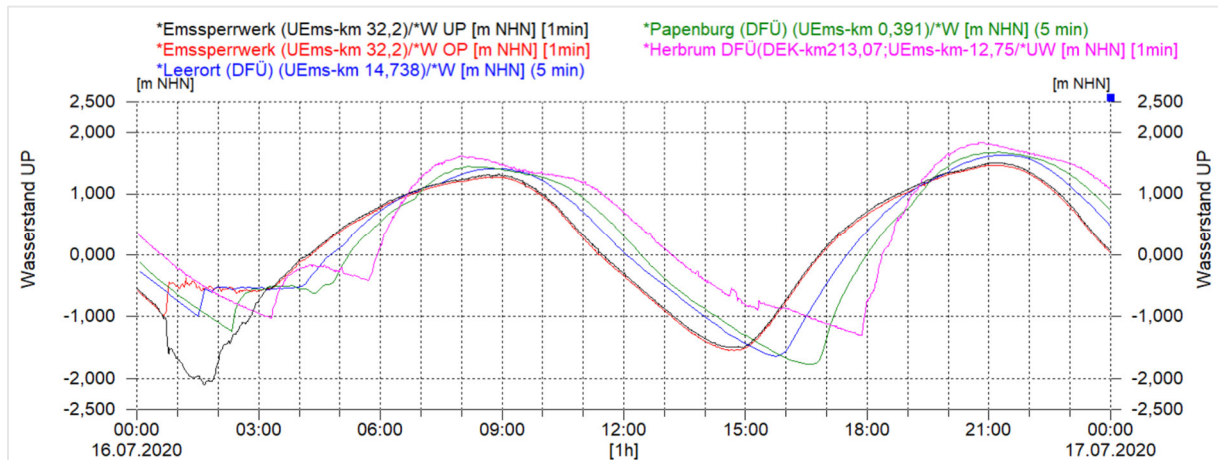


Abbildung 45: Pegel Emssperrwerk Unter- und Oberpegel, Leerort, Papenburg und Herbrum Unterpegel; Wasserstandsverlauf während einer Tideniedrigwasseranhebung (links) und einer unbeeinflussten Tide (hier: 16.07.2020)

6.2.1 Schwallwelle und „Stauphase“

In der Ems zwischen Emssperrwerk und Herbrum sowie in der Leda bis etwa Wiltshausen existierte im Zeitraum zwischen dem Durchgang der Schwallwelle und dem eindeutigen Eintritt der Flut kein stetiges Steigen oder Fallen des Wasserstands, so dass die Charakteristik dieser Phase weder der Flut- noch der Ebbephase zuzuordnen war. Der mittlere Wasserstand dieser Phase lag am Emssperrwerk (Oberpegel) NHN -0,5 m (s.o.). In der Ems zwischen Emssperrwerk und Ledamündung variierte während dieser Phase der Wasserstand relativ wenig, in der Ems oberhalb der Ledamündung änderte sich die Art dieser Phase zunehmend, so dass bei Herbrum ein langsames Heben und Senken des Wasserstands zu beobachten war.

Der Zeitbereich, über die der Wasserstand gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht war, begann mit dem beeinflussten Tideniedrigwasser, danach folgte der zügige Anstieg des Wasserstands (Schwall) und dann die „Stauphase“. Die Dauer dieses Zeitbereichs betrug zwischen Emssperrwerk und Leerort im Mittel 2 Stunden 20 Minuten, wobei die „Stauphase“ etwa 2 Stunden dauerte. Oberhalb von Leerort nahm die Dauer bis nach Herbrum ab. Bei Herbrum war der Wasserstand im Mittel über eine Dauer von 2 Stunden und 5 Minuten gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht, wobei der Wasserstand über etwa 1 Stunde und 40 Minuten relativ wenig schwankte.

Oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks, wo der Schwall und die sogenannte „Stauphase“ auftreten, werden die Wasserstandsverhältnisse im Niedrigwasserbereich nur unvollständig durch das beeinflusste Tideniedrigwasser charakterisiert, da dieses hauptsächlich den Schließwasserstand repräsentiert und nur für sehr kurze Zeit vorhanden ist. Insbesondere zur Beurteilung der Entwässerung im Freigefälle (Sielzug) ist in diesen Abschnitten das sich nach dem beeinflussten Tideniedrigwasser einstellende Wasserstandsniveau sowie die Dauer, über die der Wasserstand über dem einer unbeeinflussten Tide liegt, relevant.

6.2.2 Bestimmung der Wasserstandsanhhebung und Betrachtung der natürlichen Streuung

Die Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Wasserstände wird im Folgenden als Wasserstandsanhhebung bezeichnet. Als Angabe wird die Differenz zwischen dem mittleren Wasserstand der „dritten Tidephase“ und dem ohne Tidesteuerung zu erwartenden

Tideniedrigwasserscheitel (natürliche Tide / Referenzfall) gewählt. Zu diesem Zweck wurden unter Berücksichtigung der jeweils vorhandenen hydrologischen Randbedingungen die einzelnen Scheitel berechnet, die ohne Tidesteuerung eingetreten wären.

Die Tiden, die ohne Tidesteuerung zu erwarten waren, hätten eine natürliche witterungsabhängige und astronomisch bedingte Schwankungsbreite gehabt. Durch die Tideniedrigwasseranhebung wurde oberhalb des Emssperrwerks der Wasserstand sowohl angehoben als auch die Schwankungsbreite vermindert, so dass sich als Antwort auf den Schließwasserstand (Schließvorgang zumeist zwischen NHN -0,8 und -1,0 m, s.o.) überwiegend ein Wasserstand von NHN -0,5 m einstellte. Zusätzlich zu den o.g. natürlichen Einflussfaktoren wirkte sich u.a. auch die Schwankung des Oberwassers oberhalb von Papenburg zunehmend stärker auf den Wasserstand aus.

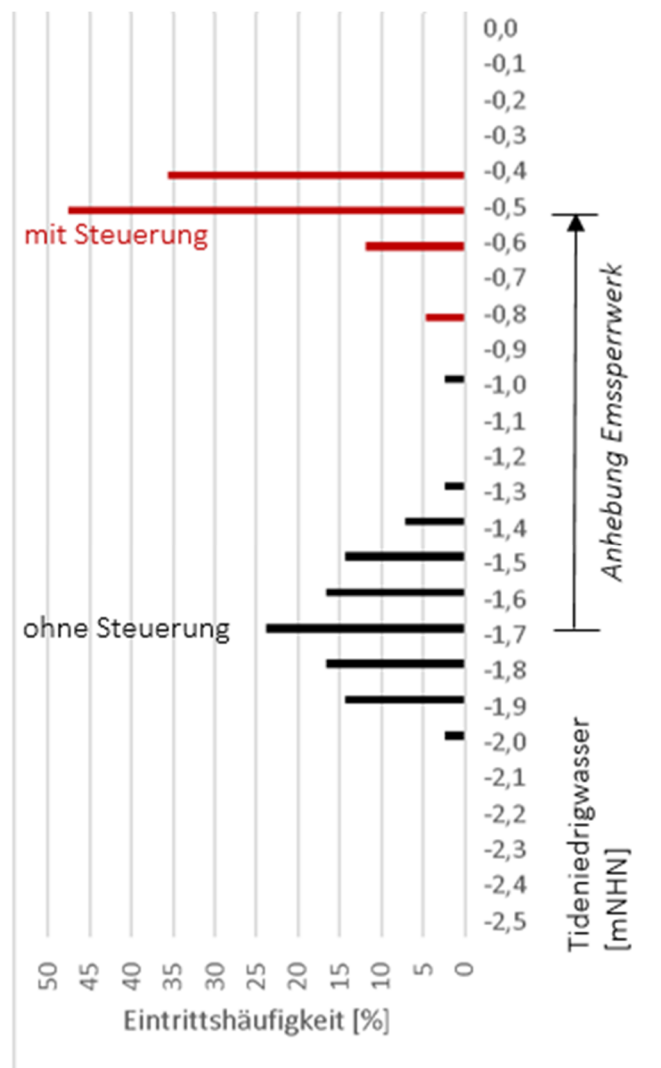


Abbildung 46: Eintrittshäufigkeiten der Tideniedrigwasserscheitel des Referenzfalles und der Wasserstände, die durch die Tidesteuerung hervorgerufen wurden. Am Emssperrwerk (Oberpegel) wären während der Testphase ohne Tidesteuerung am häufigsten Scheitel um NHN -1,7 m eingetreten. Durch die natürlichen Einflussfaktoren (Wind und Astronomie) wäre eine Streuung der Wasserstände zu erwarten gewesen, bei der 90% zwischen NHN -1,4 und -1,9 m eingetreten wären. Nach dem Schließen des Emssperrwerks (Schließvorgang begann während der Ebbephase zumeist bei einem Wasserstand von NHN -0,8 m und endete bei NHN -1,0 m) stellte sich oberhalb des Bauwerks überwiegend das gleiche Wasserstandsniveau ein, welches bei NHN -0,5 m lag. Die Differenz zum Referenzfall (=Wasserstandsanhebung) betrug am Oberpegel Emssperrwerk im Mittel rd. 1,2 m.

6.2.3 Interesse an niedrigerem Tideniedrigwasser – Sielentwässerung

Hinsichtlich der Sielentwässerung ist ein niedriger Außenwasserstand vorteilhaft. Mit der Höhe des Wasserstandes und der Dauer, über die das Gefälle besteht, steigt auch die Effizienz des

Sielzugs. An keinem Ort oberhalb des Emssperrwerks erfolgt die Entwässerung ausschließlich über ein Sielbauwerk. Entweder existiert eine Kombination aus Schöpfwerk und Siel oder es erfolgt ausschließlich ein Schöpfwerksbetrieb, so dass in jedem Fall auch bei höheren Außenwasserständen eine Entwässerung erfolgen kann. Die Effizienz eines Mündungsbauwerks ist jedoch größer, wenn sowohl Siel- als auch Schöpfwerkstätigkeit gewährleistet sind. Darüber hinaus kann durch Verwendung des Siels die Anzahl der Pumpenstunden reduziert und darüber die Kosten der Entwässerung minimiert werden. In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser in der Unterems abgenommen, woraus sich günstigere Umstände für die Sielentwässerung ergaben. In den letzten 50 Jahren waren folgende Abnahmen zu verzeichnen:

Tabelle 44: Veränderung des Tideniedrigwassers in der Unterems in den letzten 50 Jahren (gerundete Werte, Grundlage: gleitender Mittelwert über 5 Jahre)

Pegel	Position [Unterems-Km]	Veränderung des mittleren Tideniedrigwassers in den letzten 50 Jahren [m]
Borkum Südstrand	89,2	+0,04
Knock	50,9	+0,1
Emden Neue Seeschleuse	40,5	-0,1
Pogum	35,3	-0,3
Terborg	24,6	-0,4
Leerort	14,7	-0,8
Weener	6,9	-0,8
Papenburg	0,4	-1,4
Herbrum Hafendamm	-12,8	-1,3

Anmerkung: In den meisten Fällen stieg das Tideniedrigwasser seit Mitte der 2010er Jahre bis heute wieder um rd. 0,1 m an. Diese aktuelle Entwicklung ist in der Tabelle nicht berücksichtigt.

6.2.4 Untersuchung des Extremfalls und mögliche Defizite der bestehenden Mündungsbauwerke

Vor der Entwicklung der Flexiblen Tidesteuerung mit dem Emssperrwerk wurde von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes die Möglichkeit untersucht, über eine feste Sohlschwelle am Emssperrwerk den Sedimenttransport der Ems günstig zu beeinflussen. Dieser feste Einbau, durch den das Tideniedrigwasser dauerhaft um etwa einen Meter angehoben worden wäre, hätte die Vorflut über das ganze Jahr vermindert und in den Zeiten des Jahres, in denen mit einem deutlich erhöhten Abfluss zu rechnen ist, den Hochwasserschutz negativ beeinflusst. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Untersuchung der konkreten Auswirkungen einer Tideniedrigwasseranhebung von 1,0 m – als Folge der Einschnürung des Fließquerschnitts – beim Emssperrwerk auf die Wasserwirtschaft, um mögliche Beeinträchtigungen bei der Entwässerung in den tidebeeinflussten Anschlussbereichen zu quantifizieren und zu bewerten¹¹. In dieser Studie wurde zunächst das Abflussvolumen aus Niederschlagsereignissen unterschiedlicher Jährlichkeit, bis hin zum Extremniederschlag, bestimmt und dieses mit der Wassermenge verglichen, welches das jeweilige Mündungsbauwerk abführen kann. Hinsichtlich der Tide- und Abflussverhältnisse im Gewässersystem wurden unterschiedliche Szenarien betrachtet. Darauf aufbauend wurde abschließend die Belastung der Mündungsbauwerke im derzeitigen Zustand mit dem des Planzustandes (Wasserstandsanhebung) verglichen. Auf Grundlage dieser Untersuchung konnten zahlreiche Siele und Schöpfwerke im

¹¹ IMS 2013: Aktionsprogramm Ems - Studie zu den Auswirkungen einer Tnw-Anhebung beim Emssperrwerk auf die Wasserwirtschaft; IMS Ingenieurgesellschaft im Auftrag der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes; Hamburg 2013

betroffenen Gebiet genannt werden, an denen unter den angenommenen Randbedingungen in mindestens einem der untersuchten Szenarien der Niederschlagsabfluss nicht verlässlich abgeführt werden kann.

Das Ergebnis der o.g. Untersuchung ist nicht auf die Flexible Tidesteuerung übertragbar, da diese bei erhöhtem Abfluss unterbrochen werden kann, so dass dann eine ungehinderte Entwässerung möglich ist. Die Studie ermittelt bereits für den Zustand ohne Tideniedrigwasseranhebung eine unzureichende Leistungsfähigkeit des Außensieles Oldersum (Einzugsgebiet 235 km²). Für alle anderen Bauwerke zwischen Emssperrwerk und Herbrum wurde allerdings eine ausreichende Leistungsfähigkeit unter heutigen Bedingungen und für den berücksichtigten Planzustand (feste Sohlschwelle) ermittelt.

6.2.5 Mögliche Beeinträchtigung der Entwässerung während des Technischen Tests

Am wenigsten ist die Schöpfwerkstätigkeit von der intermittierenden Tideniedrigwasseranhebung betroffen. Zur Beurteilung einer potenziellen Beeinträchtigung der Sielentwässerung während des Technischen Tests, wurden an jeweiligem Sielbauwerk die Höhendifferenz zwischen Binnenwasserstand (Sommerpeil) und Außenwasserstand bestimmt und mit der Differenz verglichen, die sich maximal bei mittlerem Tideniedrigwasser ergibt. In den Fällen, in denen durch die Tideniedrigwasseranhebung nur noch eine geringe Differenz zwischen Binnen- und Außenwasserstand vorhanden war oder sich das Gefälle sogar umkehrte, bestand demnach eine potenzielle Beeinträchtigung, da in diesen Fällen abweichend von der bisherigen Praxis keine kostengünstige Sielentwässerung möglich gewesen wäre. Dabei ist zu beachten, dass eine reale Beeinträchtigung der Entwässerung während des Tests in keinem Fall existierte, da kein akuter Bedarf der Sielentwässerung bestand (geringe Abflussspende) und die Tideniedrigwasseranhebung häufig unterbrochen wurde, so dass stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich war. Darüber hinaus wäre in einer Gefahrensituation die Tidesteuerung außerplanmäßig frühzeitig zu beenden und auch ein Schöpfwerkseinsatz möglich gewesen. Zudem handelt es sich um eine pessimale Sichtweise, da ein Entwässerungsbedarf erst vorliegt, wenn ein höherer Binnenwasserstand als der Sommerpeil eintritt und sich daraus auch höhere Differenzen zum Außenwasserstand als hier berücksichtigt ergäben. Ebenfalls ist zu beachten, dass in den jeweiligen Einzugsgebieten ein unterschiedlich großer Toleranzbereich hinsichtlich eines kritischen Binnenwasserstandes besteht und zeitlich begrenzt auch höhere Wasserstände als der angeführte Sommerpeil zugelassen werden. Nur auf Grundlage dieser pessimalen Betrachtung bestand eine potenzielle Beeinträchtigung an rd. 65% der Entwässerungsbauwerke zwischen Gandersum und Herbrum. Nicht zu verwechseln ist diese Angabe mit einer Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes in den jeweiligen Einzugsgebieten, die auch in einem Extremfall nicht zu erwarten wäre (siehe IMS 2013).

Da die Tidesteuerung (Variante Tideniedrigwasseranhebung) unterhalb des Emssperrwerks zu einer Absenkung der Wasserstände im Niedrigwasserbereich führte, trat hier hinsichtlich der Wasserstandsverhältnisse keine Beeinflussung der Binnenentwässerung ein.

Tabelle 45: Positionen an der Ems an denen eine Entwässerung im freien Gefälle möglich ist und Einstufung der potenziellen Beeinträchtigung während des Technischen Tests. Es ist zu beachten, dass eine reale Beeinträchtigung der Entwässerung während des Tests in keinem Fall vorlag, da kein akuter Bedarf der Sielentwässerung bestand (geringe Abflusspende) und die Tideniedrigwasseranhebung häufig unterbrochen wurde, so dass stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich war. Zudem ist oberhalb des Emssperrwerks überall ein Schöpfwerkseinsatz möglich, durch den eine unverzügliche Binnenentwässerung hätte stattfinden können. Das einzige Mündungsbauwerk, das nur eine Sielentwässerung ermöglicht ist Petkum. Allerdings befindet sich dieses unterhalb des Emssperrwerks, wo durch die Tidesteuerung (Variante Tideniedrigwasseranhebung) sogar ein niedrigerer Wasserstand eintritt.

Position	Einzugsgebiet	Sommerpeil ¹⁾	MTnw	Wasserstands- anhebung	Wasserstand TnwA	Höhendifferenz Sommerpeil zu MTnw	Höhendifferenz Sommerpeil zu W_ TnwA	Dauer erhöhter Wasserstand	potenzielle Beeinträchtigung	
[UEems-km]	[km ²]	[mNHN]	[mNHN]	[m]	[mNHN]	[m]	[m]	[hh:mm]		
Siel (S) bzw. Siel und Schöpfwerk (S+SW)										
<u>Knock</u> (S+SW)	51	350	-1,2	-1,6	-0,1	-1,7	0,4	0,5	--	nein
<u>Borßum</u> (S+SW)	36	128	-1,2	-1,8	-0,5	-2,2	0,6	1,0	--	nein
<u>Pogum</u> (S+SW)	35	58	-1,5	-1,8	-0,5	-2,3	0,3	0,8		nein
<u>Petkum</u> (S)	35	50 / nur Sielbetrieb	-1,1	-1,8	-0,5	-2,3	0,7	1,2	--	nein
<u>Ditzum</u> (SW)	33	50 / nur Schöpfungsbetrieb	-1,5	-1,8	-0,5	-2,3	0,3	0,8	--	nein
<u>Oldersum</u> (Schleuse)	30		-1,2	-1,8	1,2	-0,6	0,6	-0,6	2:20	Nein
<u>Oldersum</u> (S+SW)	30	235	-1,05	-1,8	1,2	-0,6	0,7	-0,5	2:20	Ja
<u>Coldeborg</u> (S+SW)	28	40	-1,45	-1,8	1,2	-0,6	0,3	-0,9	2:20	Ja 2)
<u>Terborg</u> (SW)	25	23 / nur Schöpfungsbetrieb	-1,1	-1,8	1,2	-0,6	0,7	-0,6	2:20	Nein
<u>Sautelersiel</u> (S+SW)	23	189	-0,2	-1,8	1,2	-0,6	1,6	0,4	2:20	Ja
<u>Jemgum</u>	20	Keine Binnen- entwässerung		-1,8	1,2	-0,6			2:20	Nein
<u>Nüttermoor</u> (S+SW)	19	50	-0,6 bis -0,9	-1,8	1,2	-0,6	1,2	0,0	2:20	Ja
<u>Soltborg</u> (S+SW)	18	46	-1,3	-1,8	1,2	-0,6	0,5	-0,8	2:20	Ja
<u>Leer</u> (Schleuse)			+1,36	-1,7	1,1	-0,6	3,1	2,0	2:15	Nein
<u>Kloster Muhde</u> (SW)	13	18 / nur Schöpfungsbetrieb	-1,2	-1,8	1,2	-0,6	0,6	-0,6	2:20	Nein
<u>Coldemüntje</u> (SW)	10	30 / nur Schöpfungsbetrieb	-1,4	-1,8	1,3	-0,5	0,4	-0,9	2:20	Nein
<u>Buschfeld</u> (SW)	8	25 / nur Schöpfungsbetrieb	-1,55	-1,8	1,3	-0,5	0,2	-1,1	2:15	Nein
<u>Weener</u> (Schleuse)	7		-1,4	-1,8	1,3	-0,5	0,4	-0,9	2:15	Nein

<u>Mark</u> (SW)	4	36 / nur Schöpfungsbetrieb	-1,4	-1,8	1,3	-0,5	0,4	-0,9	2:15	Nein
<u>Stapelmoor</u> (S+SW)	3	21	-0,5	-1,8	1,3	-0,5	1,3	0,0	2:15	Ja
<u>Papenburg</u> (Schleuse Seehafen)	0		+0,8	-1,7	1,3	-0,4	2,5	1,2	2:15	Nein
<u>Papenburg</u> (Schleuse Werfthafen)	0		+1,6 bis +1,8	-1,7	1,3	-0,4	3,5	2,2	2:15	Nein
<u>Papenburg</u> (S+SW)	-1	80	+/-0 bis +0,7	-1,7	1,3	-0,4	2,4	1,1	2:15	Nein 3)
<u>Tunxdorf</u> (S+SW)	-3	16	-0,2 bis -0,6	-1,6	1,3	-0,3	1,4	0,1	2:10	Ja
<u>Bruul</u> (S+SW)	-4	28	-0,1 bis -0,5	-1,6	1,3	-0,3	1,5	0,2	2:10	Ja
<u>Brahe</u> (S+SW)	-6	6	-0,2 bis -0,6	-1,5	1,3	-0,2	1,3	0,0	2:10	Ja
<u>Rhede</u> (S+SW)	-8	22	-0,4 bis -0,95	-1,4	1,3	-0,1	1,0	-0,3	2:05	Ja
<u>Borsum</u> (S+SW)	-13	39	+/-0 bis +0,1	-1,0	1,1	0,0	1,1	0,1	2:05	Ja

- 1) Ein Entwässerungsbedarf liegt erst vor, wenn ein höherer Wasserstand als der Sommerpeil vorhanden ist. Damit lägen höhere Differenzen zum Außenwasserstand und ein größeres Wasserstandsgefälle vor, als in der Tabelle genannt. Darüber hinaus existiert in den jeweiligen Sielgebieten ein unterschiedlich großer Toleranzbereich. Daher sind die darauf bezogenen Aussagen als pessimistisch zu verstehen.
- 2) Bereits ohne Tideniedrigwasseranhebung ist aufgrund der Wasserstandsverhältnisse ein Sielzug nur sehr eingeschränkt bis gar nicht möglich.
- 3) Beim Siel und Schöpfwerk Papenburg existierte ein Wasserstandsgefälle > 1 m zwischen Sommerpeil und Außenwasserstand, so dass trotz Tideniedrigwasseranhebung ein Sielzug möglich gewesen wäre.

6.2.6 Zusammenfassung und Ausblick

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser in der Unterems oberhalb von Emden abgenommen, woraus sich günstigere Umstände für die Sielentwässerung ergaben. Die Wasserstandsanhhebung in Herbrum und Papenburg entspricht in etwa dem Maß, um das sich der Tideniedrigwasserstand in dem betreffenden Abschnitt in den letzten 50 Jahren abgesenkt hatte. Unterhalb von Papenburg ist die Wasserstandsanhhebung größer als die zurückliegende Absenkung. Bei Leerort und Weener ist die Wasserstandsanhhebung rd. 0,5 m größer und bei Oldersum und Terborg ist diese um rd. 0,8 m größer als die zurückliegende Absenkung des Tideniedrigwassers. An der Knock stieg in der Vergangenheit das Tideniedrigwasser auf natürlichem Wege um 0,1 m an. Die Steuerungsvariante „Tideniedrigwasseranhebung“ verursacht dagegen eine Absenkung des Niedrigwasserstandes um etwa 0,1 m, womit der natürliche Trend kompensiert wird.

Während des Technischen Tests war oberhalb des Emssperrwerks stets ein zeitnahe Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich, da die Tideniedrigwasseranhebung in intermittierender Form ausgeführt wurde. Eine reale Beeinträchtigung des Siebetriebs bestand daher nicht. Selbst bei extremen Randbedingungen (hoher Außenwasserstand hohe Abflussspende in den Einzugsgebieten der Mündungsbauwerke) wäre keine Gefahrensituation zu befürchten gewesen. Die detaillierten Untersuchungen zur Auswirkung der festen Sohlschwelle auf die Wasserwirtschaft haben mit Ausnahme des Außensiels Oldersum keine Vulnerabilität der Siel- und Schöpfwerksgebiete oberhalb des Emssperrwerks ermittelt (siehe IMS 2013). Ergänzend ist hinzuzufügen, dass ein extremes Niederschlagsereignis im Sommer lediglich regional begrenzt auftritt und nicht die Abflussspende des gesamten jeweiligen Einzugsgebietes extrem ansteigen ließe.

Eine größere Aufmerksamkeit ist im Abschnitt oberhalb des Emssperrwerks in Phasen direkt aufeinander folgender Niedrigwasseranhebungen in den Übergangszeiten (Oktober / November und März / April) geboten, in denen noch eine Tidesteuerung sinnvoll ist aber bereits höhere Abflussspenden in den Einzugsgebieten vorhanden sein können, deren Mündungsbauwerk auch ein Siel enthalten. Zwar wäre die Hochwassersicherheit in jedem Fall durch die ebenfalls vorhandene Ausstattung mit Schöpfwerken gegeben, allerdings wird in bisheriger Praxis die Sielentwässerung solange wie möglich aufrecht gehalten, da diese eine kostengünstige Form der Entwässerung darstellt.

6.3 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände im Leda-Jümme-Gebiet

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN)

6.3.1 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Wasserstände im Leda-Jümme-Gebiet

Während des Testzeitraums waren 42 Tideniedrigwasser durch die Steuerung beeinflusst und in 54 Tiden erfolgte keine Tidesteuerung. Das Aussetzen bzw. die Terminierung der Tideniedrigwasseranhebungen erfolgte hauptsächlich in Rücksichtnahme der Hafenwirtschaft Emden und fand stets in Rücksprache mit NPorts und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung statt. Nur in einer Ausnahme erfolgte ein Aussetzen der Steuerung aufgrund besonderer hydrologischer Randbedingungen, denn am 06.07.2020 war das Tideniedrigwasser aufgrund einer leichten Sturmflut um 1,15 m gegenüber dem mittleren Tideniedrigwasser erhöht.

Von der Tideniedrigwasseranhebung ist das Tidehochwasser kaum betroffen. Die Modellrechnungen haben einen Anstieg des Tidehochwassers von im Mittel 1 cm prognostiziert (Leda bis Wiltshausen)¹². Diese Abweichung liegt im Bereich der Nachweisgrenze. Die nachfolgende Betrachtung beschränkt sich daher auf die Auswirkung des Tideniedrigwasserbereichs.

Zur Tideniedrigwasseranhebung wurde das Emssperrwerk während der Ebbe unter Berücksichtigung der Fahrtgeschwindigkeiten der Tore ab einem Wasserstand von NHN -0,8 m zeitlich gestaffelt verschlossen. Damit konnte erreicht werden, dass das gesamte Sperrwerk bei Eintritt des Zielwasserstands NHN -1,0 m geschlossen war. Durch den Schließvorgang wurde oberhalb des Sperrwerks eine Schwallwelle erzeugt, die sich bis zum Tidewehr Herbrum bewegte und auch in die Leda hineinlief. Nach der Schwallwelle stellte sich oberhalb des Emssperrwerks in der Stauphase ein Wasserstand ein, der in Gandersum im Mittel bei NHN -0,5 m lag.

Die Tideniedrigwasseranhebung wirkte sich sehr deutlich auf die Wasserstandscharakteristik bis zur festen Tidegrenze der Ems in Herbrum aus, in der Leda nahm der Einfluss bis zur freien Tidegrenze ab. In der Ems bis Herbrum und in der Leda bis Wiltshausen bildete sich ein Tideniedrigwasser aus, dessen Höhe und Eintrittszeitpunkt direkt vom Schließzeitpunkt bzw. Schließwasserstand des ESW abhing. Nach diesem nur kurzzeitig vorhandenen Niveau stieg der Wasserstand durch die Schwallwirkung des Schließvorgangs zeitlich begrenzt zügig an. Die Steiggeschwindigkeit und die Höhe des auf den Schwall zurückzuführenden Anstiegs nahm mit zunehmender Entfernung zum Emssperrwerk ab.

¹² Oberrecht (2020): Abschätzung des Wirkraums der flexiblen Tidesteuerung auf Basis bereits durchgeführter numerischer Berechnungen; Vermerk NLWKN FSK, Norderney 30.03.2020

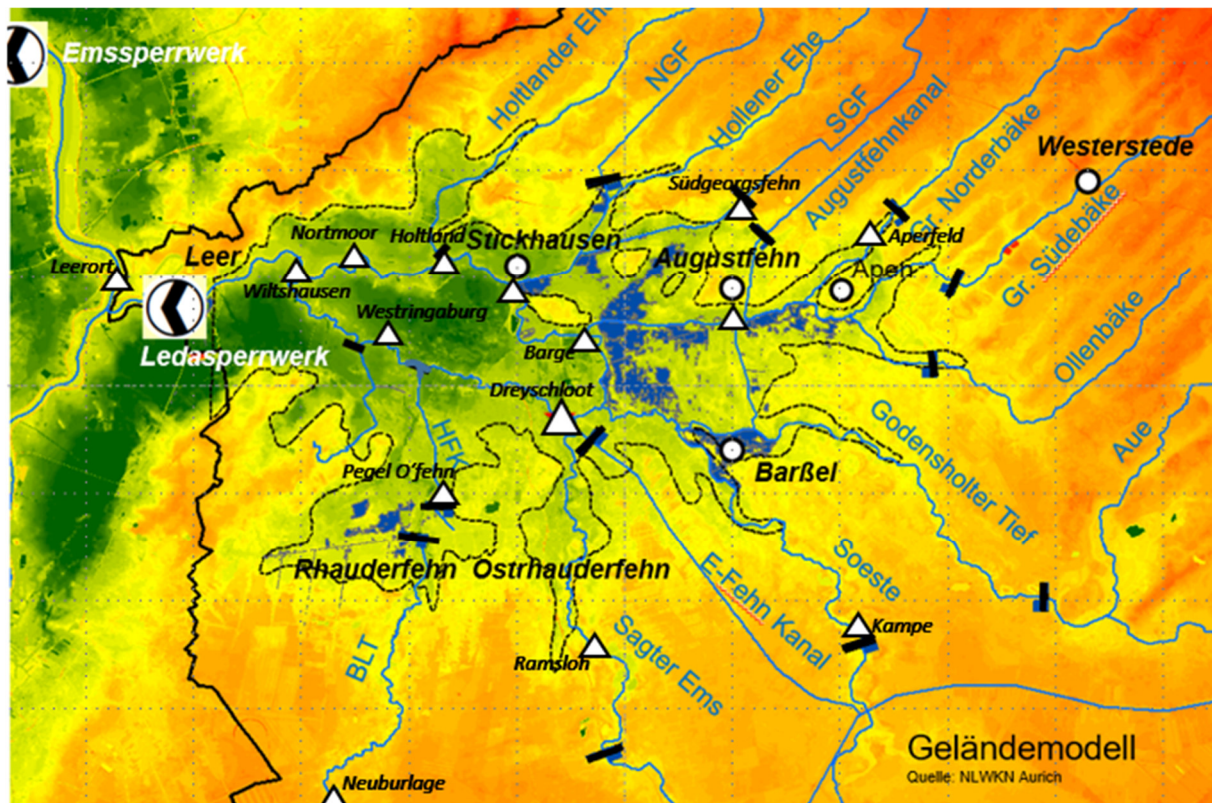


Abbildung 47: Ausschnitt aus dem Geländemodell des Einzugsgebietes von Leda und Jümme und Verlauf der Hauptgewässer. Rot: hohe Flächen, grün: niedrige Flächen, gestrichelte Umrandung: Niederungsgebiet / Siel- und Schöpfgebiet, schwarze Balken: Lage der Tidegrenzen – dabei handelt es sich um eine pauschale Festlegung der Position (aus NLWKN 2008¹³). Die Tidegrenze ist an Schleusen und Wehre ortsfest und in den freien Gerinnen in Abhängigkeit von Tideintensität und Oberwasser variabel. Dreiecke: Pegel des NLWKN/WSA Ems-Nordsee, blaue Flächen: mögliche Überflutungen eines hundertjährigen Hochwasserereignisses beim Hochwasserschutzstatus 2004 (NLWKN 2008). In der hier vorliegenden Betrachtung wird die Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung anhand einer Pegelkette von der Nordsee bis in den Bereich der freien Tidegrenze im Leda-Jümme-Gebiet erläutert: Borkum/Nordsee (in Abbildung nicht dargestellt), Emssperrwerk und Leerort (Ems), Leer (Leda), Wiltshausen (Leda, Mündung der Jümme), Nortmoor und Suckhausen und Barge (Jümme), Augustfehn (Aper Tief) und Aperfeld (Große Norderbäke). Die Wasserstände an den ebenfalls dargestellten Pegeln Westringaburg und Dreyschloot (beide Leda) entsprechen in etwa den Verhältnissen der Pegel Nortmoor bzw. Barge (beide Jümme). Für die zugrunde gelegten Pegel bis Augustfehn werden standardmäßig die Tidescheitel festgelegt und liegen in längeren Zeitreihen vor, so dass damit eine Bewertungsgrundlage vorliegt. Für den Pegel Aperfeld, der im Bereich der freien Tidegrenze liegt, werden standardmäßig keine Tidescheitel ermittelt.

6.3.1.1 Schwallwelle und „Stauphase“

In der Ems zwischen Emssperrwerk und Ledamündung sowie in der Leda bis etwa Wiltshausen existierte im Zeitraum zwischen dem Durchgang der Schwallwelle und dem eindeutigen Eintritt der Flut kein stetiges Steigen oder Fallen des Wasserstands, so dass die Charakteristik dieser Phase weder der Flut- noch der Ebbephase zuzuordnen war. In der Ems unterhalb der Ledamündung variierte während dieser Phase der Wasserstand relativ wenig, in der Ems oberhalb der Ledamündung änderte sich die Art dieser Phase zunehmend, so dass bei Herbrum ein langsames Heben und Senken des Wasserstands zu beobachten war. Dieser Zeitabschnitt, dessen Länge entsprechend der Schließdauer des Emssperrwerks im Mittel rund 2 ½ Stunden betrug, könnte somit als „Stauphase“ bezeichnet werden.

In der Leda und Jümme oberhalb von Wiltshausen nahm die Tidekurve einen zunehmend harmonischen Verlauf an, bei der keine sogenannte „Stauphase“ existierte. Dort sank der Wasserstand bis zum Eintritt des Tideniedrigwassers kontinuierlich weiter und danach setzte der stetige Wasserstandsanstieg der Flutphase ein. Gegenüber einer unbeeinflussten Tide war dort jedoch die Sinkgeschwindigkeit zum Ende der Ebbephase vermindert und das Tideniedrigwasser erhöht. Während

¹³ NLWKN 2008: Hochwasserschutzplan Leda-Jümme; NLWKN; Norden 2008

des Technischen Tests betrug die Dauer, über die zum Ende der Ebbe Phase eine verminderte Sinkgeschwindigkeit vorhanden war, entsprechend der Schließdauer des Emssperrwerks im Mittel $2\frac{1}{2}$ Stunden. Zur freien Tidegrenze nahm diese Erscheinung jedoch ab, so dass sie letztlich nicht mehr erkennbar war.

In den Abschnitten oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks, in denen die sogenannte „Stauphase“ auftritt, werden die Wasserstandsverhältnisse im Niedrigwasserbereich nur sehr unvollständig durch das beeinflusste Tideniedrigwasser charakterisiert, da dieses hauptsächlich den Schließwasserstand repräsentiert und nur für sehr kurze Zeit erscheint. Daher ist in diesen Abschnitten das sich nach Durchgang der Schwallwelle einstellende Wasserstandsniveau relevant. In den Abschnitten ohne „Stauphase“, die in der Leda und Jümme oberhalb von Wiltshausen vorhanden sind, werden die Verhältnisse im Niedrigwasserbereich weiterhin durch das Tideniedrigwasser repräsentiert.

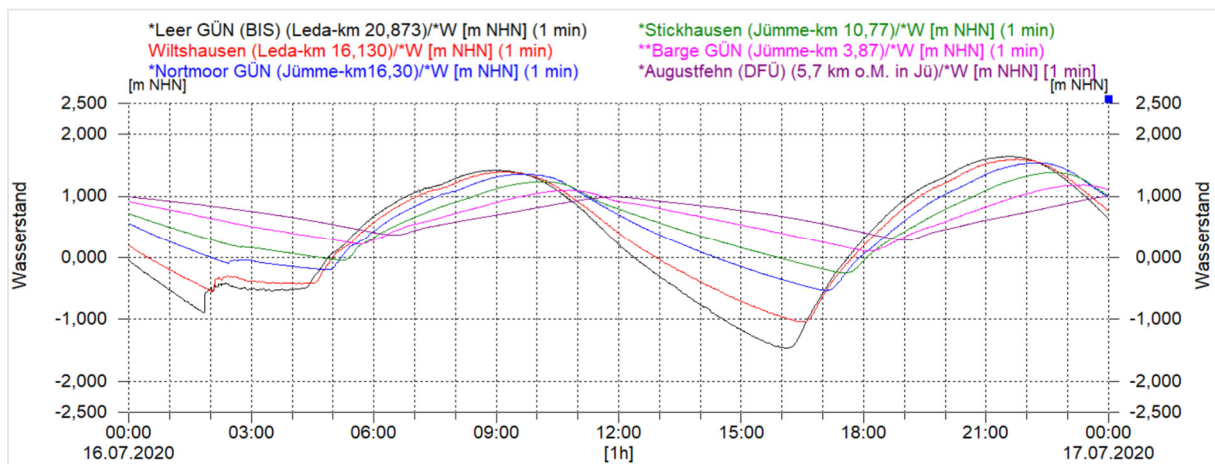


Abbildung 48: Pegel Leer (Leda) bis Augustfehn (Aper Tief); Wasserstandsverlauf während einer Tideniedrigwasseranhebung (links) und einer unbeeinflussten Tide (hier: 16.07.2020)

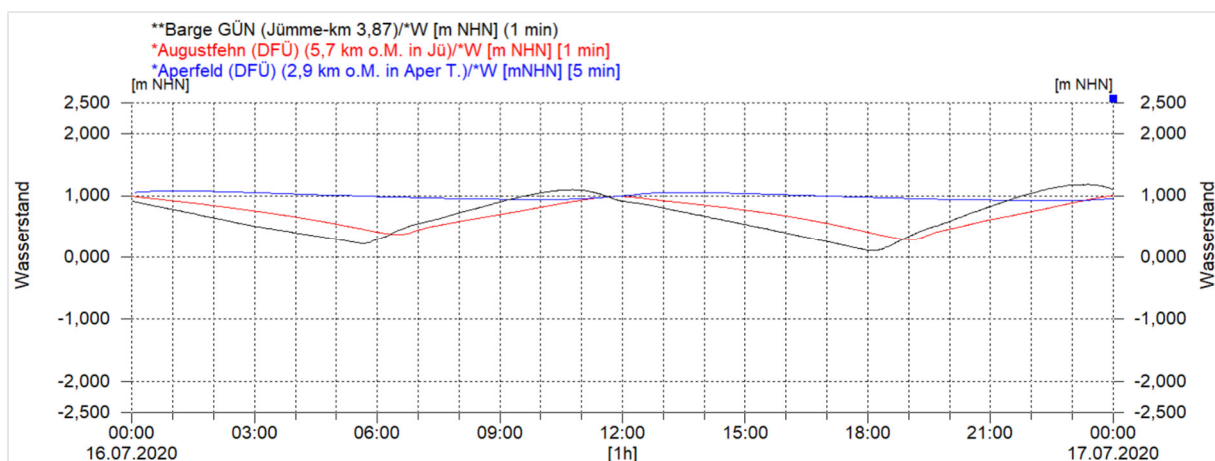


Abbildung 49: Pegel Barge (Jümme), Augustfehn (Aper Tief) und Aperfeld (Große Norderbäke); Wasserstandsverlauf während einer Tideniedrigwasseranhebung (links) und einer unbeeinflussten Tide (hier: 16.07.2020)

6.3.1.2 Bestimmung der Wasserstandsanhhebung und Betrachtung der natürlichen Streuung

Die Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Wasserstände wird im Folgenden als Wasserstandsanhhebung bezeichnet. Diese ergibt sich aus der Differenz der eingetretenen Wasserstände zu den Tideniedrigwasserscheiteln, die zur jeweiligen Zeit ohne Steuerung zu erwarten

waren (natürliche Tide / Referenzfall). Zu diesem Zweck wurden unter Berücksichtigung der jeweils vorhandenen hydrologischen Randbedingungen die einzelnen Scheitel berechnet, die ohne Tidesteuerung eingetreten wären. Die Differenz wird unterhalb von Wiltshausen sinnvollerweise zwischen dem mittleren Wasserstand der „dritten Tidephase“ und dem entsprechenden Scheitel des Referenzfalls gebildet. Oberhalb von Wiltshausen, wo sich der Wasserstandsverlauf in Leda und Jümme zunehmend der einer harmonischen Tidekurve angleicht, wird die Differenz zwischen dem eingetretenen Scheitel und dem Scheitel des Referenzfalles bestimmt.

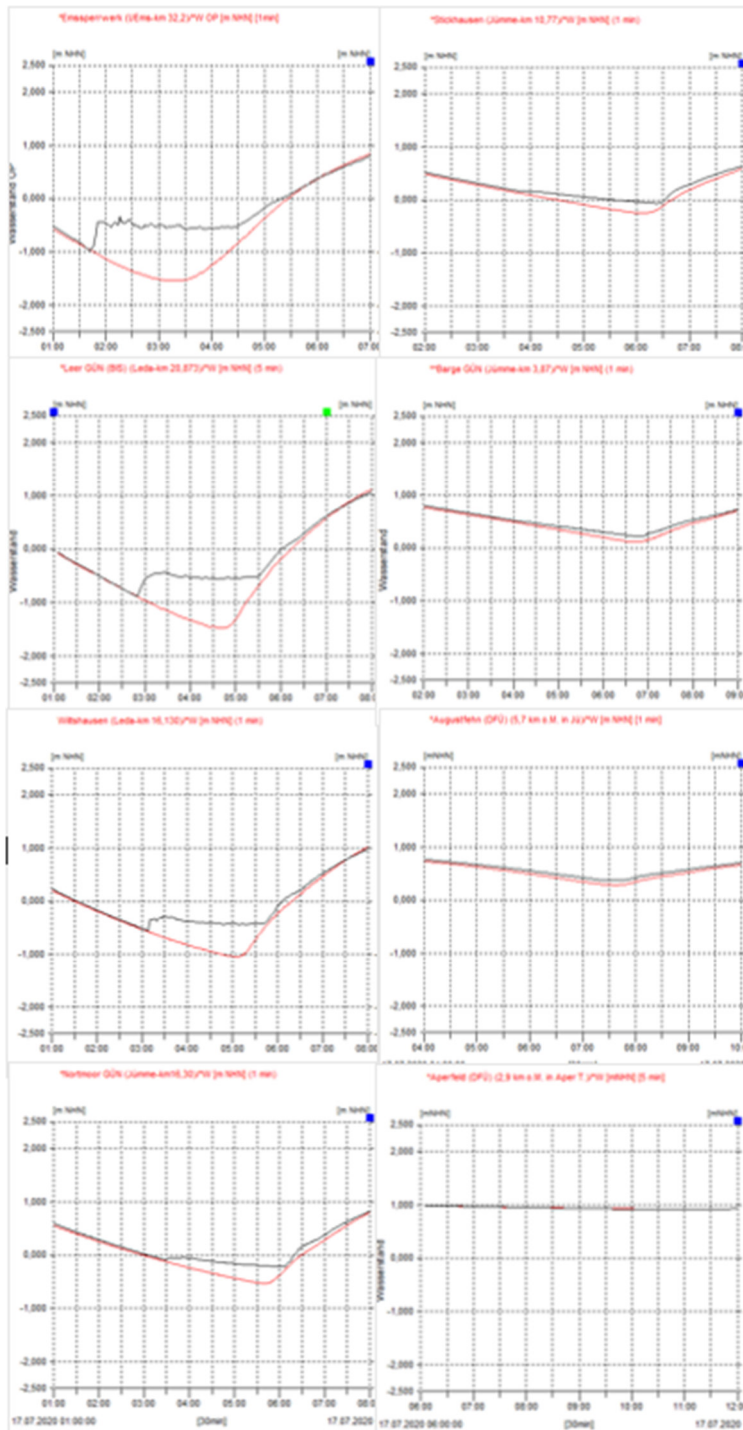


Abbildung 50: Durch die Tideniedrigwasseranhebung beeinflusster Wasserstandsverlauf (schwarz) und unbeeinflusster Verlauf (natürliche Tide, rot). Linke Spalte von oben nach unten: Emssperrwerk, Leer (Leda), Wiltshausen (Leda, Mündung der Jümme) und Nortmoor (Jümme). Rechte Spalte von oben nach unten: Stickhausen (Jümme), Barge (Jümme), Augustfehn (Aper Tief) und Aperfeld (Große Norderbäke).

Die Tiden, die ohne Tidesteuerung zu erwarten waren, hätten eine natürliche witterungsabhängige und astronomisch bedingte Schwankungsbreite gehabt. Durch die Tideniedrigwasseranhebung wurde oberhalb des Emssperrwerks der Wasserstand sowohl angehoben als auch die Schwankungsbreite vermindert, so dass sich als Antwort auf den Schließwasserstand (Schließvorgang zumeist zwischen NHN -0,8 und -1,0 m, s.o.) überwiegend ein Wasserstand von NHN -0,5 m einstellte. Im Leda-Jümme-Gebiet lief der Einfluss der Tidesteuerung in Richtung der Tidegrenze aus, so dass auf dieser Strecke der eingetretene Wasserstand immer weniger von dem des Referenzfalles abwich. Zusätzlich zu den o.g. natürlichen Einflussfaktoren wirkte sich u.a. auch die Schwankung des Oberwassers in Richtung der Tidegrenze zunehmend stärker auf den Wasserstand aus. Dieses führte dazu, dass die Schwankungsbreite der durch die Tidesteuerung beeinflussten Wasserstände mit dem des Referenzfalles vergleichbar waren.

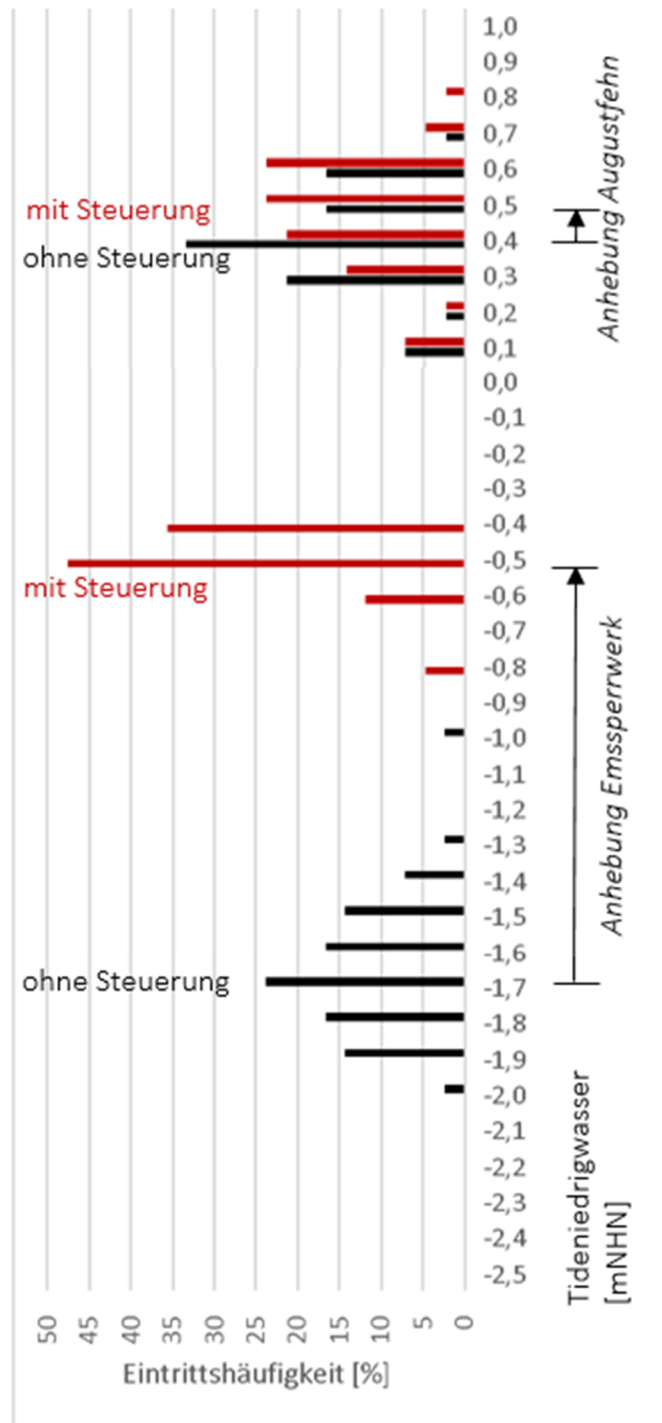


Abbildung 51: Eintrittshäufigkeiten der Tideniedrigwasserscheitel des Referenzfalles und der Wasserstände, die durch die Tidesteuerung hervorgerufen wurden. Am Emssperwerk (Oberpegel) wären während der Testphase ohne Tidesteuerung am häufigsten Scheitel um NHN -1,7 m eingetreten. Durch die natürlichen Einflussfaktoren (Wind und Astronomie) wäre eine Streuung der Wasserstände zu erwarten gewesen, bei der 90% zwischen NHN -1,4 und -1,9 m eingetreten wären. Nach dem Schließen des Emssperwerks (Schließvorgang begann während der Ebbephase zumeist bei einem Wasserstand von NHN -0,8 m und endete bei NHN -1,0 m) stellte sich oberhalb des Bauwerks überwiegend das gleiche Wasserstands-niveau ein, welches bei NHN -0,5 m lag. Die Differenz zum Referenzfall (=Wasserstands-anhebung) betrug am Oberpegel Emssperwerk im Mittel rd. 1,2 m. Am Pegel Augustfehn (Aper Tief) wären ohne Steuerung am häufigsten Tideniedrigwasserscheitel um NHN +0,4 m eingetreten. Zusätzlich zu den o.g. Einflussfaktoren wirkt sich in Richtung der Tidegrenze u.a. die Schwankung des Oberwassers zunehmend stärker aus. Insgesamt hätte sich in Augustfehn eine Streuung ergeben, bei der 90% der Scheitel zwischen NHN +0,2 und +0,7 m eingetreten wären. Nach dem Schließen des Emssperwerks stellte sich bei Augustfehn am häufigsten ein Wasserstands-niveau von etwa NHN +0,5 m ein, wobei nach wie vor die natürliche Schwankungsbreite existierte. Die Differenz zum Referenzfall betrug bei Augustfehn im Mittel < 0,1 m.

6.3.1.3 Betrachtung bis zur Tidegrenze

Nach DIN 4049¹⁴ ist die Tidegrenze die Lage im Gewässer, bis zu der eine tidebedingte Wasserstandsänderung messbar ist. Im Leda-Jümme-Gebiet ist die Tidegrenze an Schleusen und Wehren ortsfest und in den freien Gerinnen in Abhängigkeit von Tideintensität und Oberwasser variabel. Bei zunehmendem Oberwasser wandert die Tidegrenze stromab. Damit nimmt die Strecke zu, in der die Wasserstände hauptsächlich durch den Abfluss des Binnenlandes bestimmt werden („Binnendominanz“)¹⁵ und sich eine Tideniedrigwasseranhebung durch das Emssperrwerk nicht mehr bemerkbar machen würde. Im umgekehrten Fall, d.h. bei Abnahme des Oberwassers, wandert die Tidegrenze stromauf („Küstendominanz“) und die Länge, über die sich die Tideniedrigwasseranhebung auswirkt, nimmt zu. Die Tideintensität hat ebenfalls einen Einfluss auf die Lage der Tidegrenze. Bei zunehmender Intensität wandert die Grenze stromauf und bei abnehmender Stärke stromab. Durch die Sturmflutsperrungen nimmt das Ledasperrwerk einen Einfluss auf die Tideintensität. Während des Winters werden zu hohe Tiden vollständig ausgesperrt und während des Sommers werden lediglich die Scheitel der zu hohen Tidehochwasser gekappt. Die Grenze, ab der ein Tidehochwasser als zu hoch bezeichnet wird, ist im Winter und Sommer unterschiedlich. So werden im Winter Tiden vollständig ausgesperrt, deren Tidehochwasserscheitel bei $> \text{NHN}+2,0$ m liegen und im Sommer laufen Tiden mit einer Scheitelhöhe von maximal $\text{NHN} +2,3$ m frei in die Leda ein¹⁶. Aufgrund der o.g. Einflussfaktoren gibt es eine deutliche saisonale Schwankung der Tidegrenze im Leda-Jümme-Gebiet, bei der sich diese im Sommer weiter flussaufwärts befindet als im Winter.

Die Wasserstandsanhhebung wurde exemplarisch in einem Längsschnitt von der Nordsee bis in den Bereich der freien Tidegrenze des Leda-Jümme-Gebietes ermittelt. Verwendung fanden die Pegel Borkum (Nordsee), Gandersum (Emssperrwerk Oberpegel), Leerort (Ems), Leer (Leda), Wiltshausen (Leda, Mündung der Jümme), Nortmoor bis Barge (Jümme), Augustfehn (Aper Tief) und Aperfeld (Große Norderbäke). Die Verhältnisse bei Barge (obere Jümme) sind mit denen bei Dreyschloot (obere Leda) vergleichbar. Der Pegel Augustfehn, der sich 32 Kilometer oberhalb der Ledamündung bei Leerort befindet, unterliegt im Sommer noch eindeutig der Küstendominanz. Weiter flussaufwärts, im Bereich der Ortschaft Apen, splittet sich das Aper Tief in die Große Norderbäke, Große Süderbäke und Ollenbäke auf. In der Großen Norderbäke, rd. sechs Kilometer oberhalb des Pegels Augustfehn, befindet sich der Pegel Aperfeld. Die Wasserstandsverhältnisse an dieser Stelle sind im Sommer zwar noch tidebeeinflusst, weisen allerdings bereits eine deutliche Binnendominanz auf, bei der die durch die Variabilität des Oberwassers hervorgerufene Wasserstandsschwankung größer ist als der Tidehub. Hinsichtlich der Wirkung der Tideniedrigwasseranhebung, die theoretisch bis zur Tidegrenze reicht, kann die pauschale Festlegung der Tidegrenze nach DIN 4049 (s.o.) konkretisiert werden, denn in den eindeutig binnendominanten Abschnitten des Tidegebietes wird der Einfluss der Tidesteuerung unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Für die Pegel bis einschließlich Augustfehn werden standardmäßig die Tidescheitel festgelegt und liegen in längeren Zeitreihen vor, so dass damit eine Bewertungsgrundlage vorliegt. Für den Pegel Aperfeld werden aufgrund der dort vorhandenen Binnendominanz standardmäßig keine Tidescheitel ermittelt.

Zur Charakterisierung der Tideverhältnisse während des Technischen Tests, insbesondere der natürlichen Tiden, die ohne Beeinflussung durch die Tideniedrigwasseranhebung eingetreten wären (Referenzfall), wurden verschiedene Randbedingungen miteinander verglichen:

- Die natürlichen Tideniedrigwasser der Tiden, in denen eine Tideniedrigwasseranhebung stattfand (unter Berücksichtigung der hydrologischen Randbedingungen berechnete Scheitel, die ohne Tidesteuerung zu erwarten waren = Referenzfall; Anzahl: 42),

¹⁴ NAW 1993; DIN 4049 – Hydrologie; Normenausschuss Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung; Beuth Verlag Berlin und Köln; 1994

¹⁵ LAWA 2018: Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch; 5. Auflage; Herausgegeben von der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Stuttgart 2018

¹⁶ WSA Emden 1997: Betriebsordnung für das Leda-Sperrwerk; Emden März 1997

- Die Tideniedrigwasser der Tiden, in denen keine Tideniedrigwasseranhebung stattfand (tatsächlich eingetretene Scheitel; Anzahl: 54)
- Die Tideniedrigwasser repräsentativer Vergleichszeiträume (Gesamtjahr und hydrologisches Sommerhalbjahr).

Die mittleren Tideniedrigwasser des Referenzfalles lagen zwischen Borkum und Leer (Leda) bis zu 9 cm über dem langjährigen Mittelwert des Sommers. Die Tideniedrigwasser der Tiden, in denen eine Steuerung ausgesetzt wurde, lagen in diesem Abschnitt bis zu 15 cm über dem Sommer-Mittelwert. Zwischen Leer (Leda) und Augustfehn (Aper Tief) waren die Scheitel ebenfalls höher als unter mittleren Sommergehäufigkeiten (mit Ausnahme Wiltshausen), wichen jedoch weniger davon ab. Die Tideverhältnisse des Referenzzustands wichen von den Verhältnissen ab, in denen die Steuerung ausgesetzt wurde. So wurden zufällig diejenigen Tiden zur Steuerung freigegeben, deren Tideniedrigwasser bis zu 5 cm niedriger (im unteren Abschnitt der Pegelkette) bis 6 cm höher waren.

Am Ledasperrwerk betrug die Differenz der eingetretenen Wasserstände zum Referenzfall (=Wasserstandsanhhebung) im Mittel 1,0 m und bei Wiltshausen (Mündung der Jümme) rd. 0,7 m. In der oberen Jümme (Barge) betrug die mittlere Anhebung 10 cm und im Aper Tief (Augustfehn) lag diese im Mittel bei 5 cm. In Aperfeld war keine Wasserstandsanhhebung mehr messbar.

Da die Mittelwerte die Tideverhältnisse nur eingeschränkt charakterisieren, wurden zusätzlich die Unterschreitungshäufigkeiten der Tideniedrigwasser des Referenzfalls mit denen der ungesteuerten Tiden der Testphase sowie mit repräsentativen Vergleichszeiträumen (hydrologisches Sommerhalbjahr und Jahr) verglichen. Dabei wurde der Pegel Augustfehn stellvertretend für die oberen Abschnitte des tidebeeinflussten und noch küstendominanten Gewässersystems im Leda-Jümme-Gebiet ausgewählt und näher betrachtet.

Zur Bestimmung der Unterschreitungshäufigkeiten des Gesamtjahres wurden alle Werte eines fünf Jahre umfassenden Vergleichszeitraums verwendet. Zur Bestimmung der Häufigkeiten des hydrologischen Sommerhalbjahres wurden nur die Werte der Monate Mai bis Oktober berücksichtigt. Der Vergleich der relativen Häufigkeiten verdeutlicht, dass niedrige Tideniedrigwasser häufiger außerhalb des Sommerhalbjahres zu erwarten sind. Als Ursache ist die Betriebsweise des Ledasperrwerks zu nennen. Zwischen dem 01.11. und dem 31.03. wird dieses bei Sturmfluten bereits zur Ebbekenterung geschlossen. Bei niedrigem Oberwasser kann die Reduzierung des Tidevolumens zur starken Absenkung der Tideniedrigwasserstände in den oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer des Leda-Jümme-Gebietes führen. In der Zeit vom 01.04. bis zum 31.10. findet die Sperrwerksschließung erst zu einem späteren Zeitpunkt der Flutphase statt, so dass das Tidevolumen weniger stark reduziert wird und die Tideniedrigwasser betriebsbedingt weniger stark abgesenkt werden. Hinzu kommt, dass die Anzahl der Sturmflutsperrungen im Winter etwa drei Mal so hoch ist wie im Sommer. Insgesamt ist somit der Einfluss des Ledasperrwerks auf die Tideniedrigwasserstände im Zeitraum November bis März größer als im übrigen Zeitraum des Jahres. Allerdings können auch ohne Einsatz des Ledasperrwerks sehr niedrige Tideniedrigwasserstände im Leda-Jümme-Gebiet eintreten. Diese sind in Phasen sehr niedriger Wasserstände in der Ems und gleichzeitigem Auftreten niedriger Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten von Leda und Jümme zu erwarten. Als Resultat der natürlichen Randbedingungen und des Einsatzes des Ledasperrwerks treten die niedrigsten Wasserstände in den oberen Abschnitten der Tidegewässer am häufigsten in den Monaten Oktober und November ein.

Tabelle 46: Wasserstandskennwerte (Mittelwerte) einer Pegelkette von Borkum/Nordsee über Leerort/Ems und Wiltshausen/Leda bis nach Augustfehn/Aper Tief und Aperfeld/Große Norderbäke. Aufgeführt sind die Werte der Systemzustände „Sommer“ sowie ungesteuerte und gesteuerte Tiden während des Technischen Tests. Um die Beeinflussung der Wasserstandsverhältnisse durch die Tideniedrigwasseranhebung darzustellen, wurden die Tidenniedrigwasserstände ermittelt, die ohne Tidesteuerung zu erwarten waren. Das Maß der Beeinflussung ergibt sich aus der Differenz der eingetretenen zu den erwarteten Wasserständen (=Wasserstands-anhebung). Die Positionierung ist auf die Lage des Emssperrwerks (ESW) bezogen.

	Position	MTnw (und MThb) Sommer (2013/17)	MTnw ungesteuerte Tiden der Testphase (gemessen)	MTnw (Referenz)	Differenz MTnw (Referenz) zu MTnw Sommer	Differenz MTnw (Referenz) zu MTnw ungesteuert	Eingetretener Wasserstand während Steuerung (gemessen)	Wasserstands-anhebung	
	[km]	[mNHN] [cm]	[mNHN]	[mNHN]	[cm]	[cm]	[mNHN]	[cm]	
Borkum	-55	-1,24 (241)	-1,16	-1,21*	+3	-5*	-1,21*	0*	
ESW OP	0	-1,77 (336)	-1,66	-1,71	+6	-5	-0,53	+117	
Leerort	18	-1,85 (363)	-1,70	-1,74	+9	-4	-0,54	+121	
Leer/Leda	22	-1,62 (330)	-1,52	-1,55	+7	-3	-0,52	+103	
Wiltshausen	27	-1,03 (267)	-1,04	-1,05	-2	-1	-0,38	+67	
Nortmoor	32	-0,51 (210)	-0,48	-0,49	+2	-1	-0,09	+40	
Stickhausen	37	-0,20 (161)	-0,17	-0,17	+3	0	+0,11	+28	
Barge	44	0,18 (99)	+0,20	+0,23	+5	+3	+0,32	+10	
Augustfehn	50	0,43 (61)	+0,40	+0,46	+3	+6	+0,52	+5	
Aperfeld	56	Keine Tideauswertung des Pegels							~ 0

Anmerkung: MTnw = mittleres Tideniedrigwasser, MThb = mittlerer Tidehub; Wasserstands-anhebung = Differenz des tatsächlich eingetretenen Wasserstandes zu dem Tideniedrigwasser, welches ohne Tidesteuerung zu erwarten war (=Referenzfall). Dem langjährigen Mittel liegen die Daten des Zeitraums 2013 bis 2017 (5 Jahre) zugrunde. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da in diesem mit Ausnahme von Wiltshausen für alle Pegel Tidescheitel vorliegen. Die kontinuierliche Messung am Pegel Wiltshausen wurde im Juni 2012 eingestellt und für den Technischen Betrieb Ende Juni 2020 wiederaufgenommen. Zur Ermittlung des langjährigen Mittelwertes wurde hier das Intervall 2007/11 gewählt.

*) Es wird davon ausgegangen, dass die Wasserstände am Pegel Borkum von der Tideniedrigwasseranhebung unbeeinflusst blieben. Bei den gekennzeichneten Werten handelt es sich um gemessene und nicht um berechnete Daten des Referenzfalls.

Die Wasserstandsverhältnisse, die während des Technischen Tests ohne Steuerung zu erwarten waren, unterschieden sich wie folgt von denen der repräsentativen Vergleichszeiträume: Scheitelhöhen höher als NHN rd. +0,8 m traten anders als in den Vergleichszeiträumen nicht ein, Scheitelhöhen oberhalb des Medians (NHN +0,45m) wurden geringfügig häufiger unterschritten (bzw. etwas seltener überschritten) als in den Vergleichszeiträumen, Scheitelhöhen unterhalb des Medians wurden seltener unterschritten (bzw. öfter überschritten) als in den Vergleichszeiträumen und Scheitelhöhen niedriger als NHN +0,1 m traten anders als in den Vergleichszeiträumen nicht ein. Die Wasserstandsverhältnisse während des Technischen Tests repräsentierten also nur sehr eingeschränkt die typischen Bedingungen des Sommers bzw. die des gesamten Jahres.

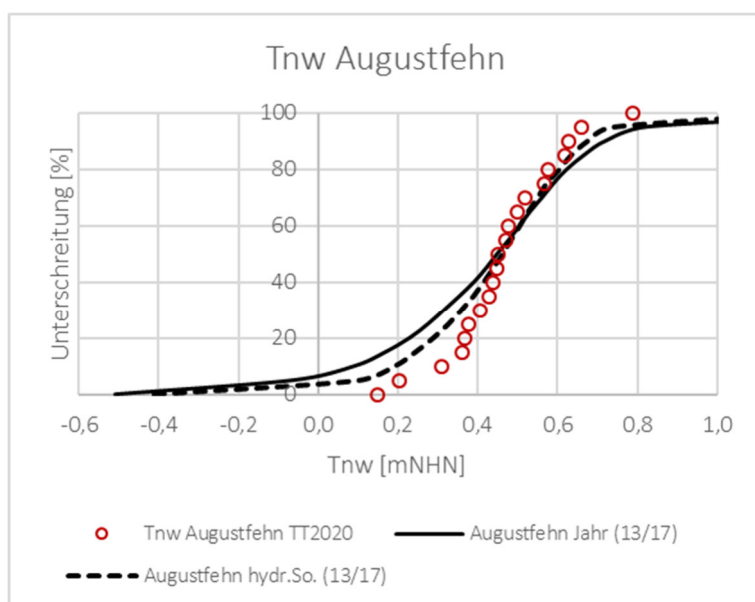


Abbildung 52: relative Unterschreitungshäufigkeiten des Tideniedrigwassers Augustfehn, die im Zeitraum des Technischen Tests ohne Tideniedrigwasseranhebung zu erwarten gewesen wären und in repräsentativen Vergleichszeiträumen (Dauer 5 Jahre, Gesamtzeitraum und hydrologisches Sommerhalbjahr). $MTnw$ Augustfehn (13/17) = $NHN +0,43$ m (Jahr) und $+0,44$ m (Sommer)

Um einen Eindruck über die Abnahme des Einflusses der Tideniedrigwasseranhebung zur Tidegrenze hin zu gewinnen, wurde der Verlauf des rd. sechs Kilometer langen Abschnittes zwischen dem noch küstendominanten Pegel Augustfehn und dem bereits eindeutig binnendominanten Pegel Aperfeld näher betrachtet. Dazu wurden die 5%-, 50%- und 95%-Perzentile der Wasserstandsanhhebung, die für die Pegel bis einschließlich Augustfehn ermittelt wurden, räumlich auf diese Strecke extrapoliert.

Tabelle 47: Differenz zwischen dem beeinflussten Wasserstandsniveau oberhalb des Emssperrwerks und dem Tideniedrigwasser, welches ohne Tideniedrigwasseranhebung eingetreten wäre (= Wasserstandsanhhebung).

Ort	Wasserstandsanhhebung [cm]			
	Pos. [km]	P5	P50	P95
ESW OP	0	81	120	147
Leerort	18	85	123	148
LeerLeda	22	70	105	125
Wiltshausen	27	41	64	80
Nortmoor	31	22	39	52
Stickhausen	37	11	23	33
Barge	44	0	12	19
Augustfehn	50	0	7	11
Hengstforde	51	0	6	10
Apen	53	0	5	9
Aperfeld	56	unterhalb der Nachweisgrenze		

Aufgrund der o.g. hydrologischen Randbedingungen während des Technischen Tests wurden die Wasserstände bei Augustfehn 7 cm (Median) bzw. zu 5% über 11 cm gegenüber den ohne Steuerung zu erwartenden Scheitelhöhen angehoben. Es ist davon auszugehen, dass bei der Ortschaft Apen die Wasserstandsanhhebung noch 5 cm (Median) betrug bzw. 5% der Werte über 9 cm lagen. Unter mittleren Sommerbedingungen liegt die Tidegrenze oberhalb der Ortschaft. Auch während des

Technischen Tests war am Pegel Aperfeld (Große Norderbäke, rd. 3 km oberhalb der Ortschaft Apen und rd. 6 km oberhalb des Pegels Augustfehn) ein mittlerer Tidehub von 16 cm vorhanden. Es kann jedoch angenommen werden, dass der Tideeinfluss oberhalb der Ortschaft Apen durch die Aufspaltung des Aper Tiefs in Große Norderbäke, Große Süderbäke und Ollenbäke stark abnimmt und die durch das Oberwasser hervorgerufenen Wasserstandsschwankungen zunehmend größer werden als der Tidehub. Verdeutlicht wird dieses durch die Reaktion des Wasserstands am Pegel Aperfeld auf die Oberwasserwelle ab dem 09.07.2020, wodurch sich der Tagesmittelwert des Wasserstandes um rd. 20 cm hob und nach Durchgang der Welle wieder um > 30 cm sank. Vor dem Hintergrund der Binnendominanz war am Pegel Aperfeld eine Auswirkung durch die Tideniedrigwasseranhebung nicht mehr messbar. Unter mittleren sommerlichen Bedingungen hätte sich die Tideniedrigwasseranhebung zwar auch am Pegel Aperfeld stärker ausgewirkt, da seitens der Nordsee und Ems häufiger niedrigere Wasserstände eingetreten wären, allerdings ist anzunehmen, dass der Einfluss aufgrund der Binnendominanz ebenfalls unterhalb der Nachweisgrenze läge.

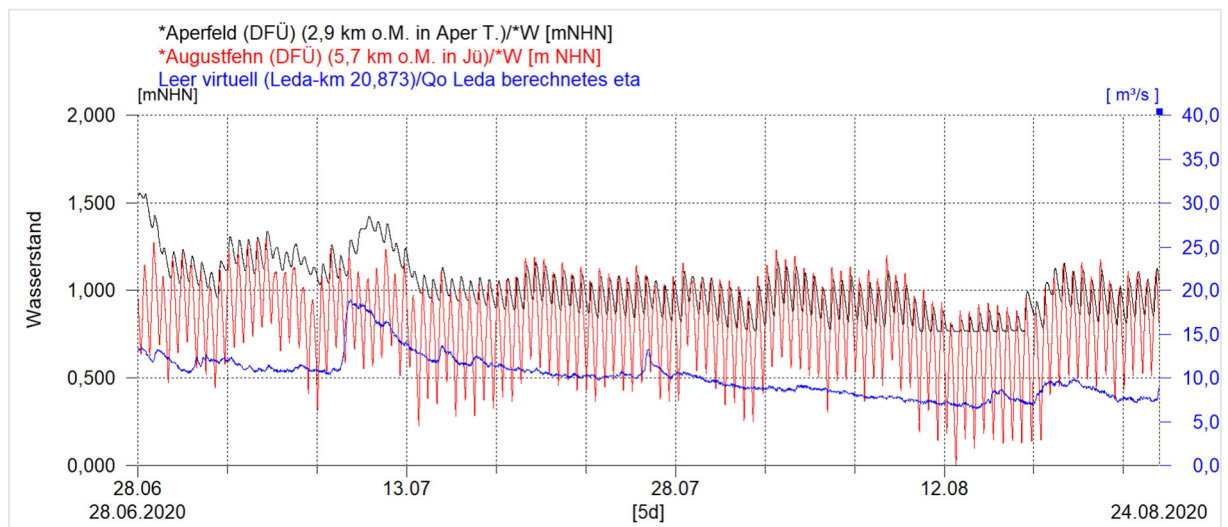


Abbildung 53: Wasserstandsverlauf am Pegel Augustfehn (Aper Tief, rote Zeitreihe) und dem rd. 6 Kilometer oberhalb davon in der Großen Norderbäke befindlichen Pegel Aperfeld (schwarze Zeitreihe) sowie dem Verlauf des Oberwassers des Leda-Jümme-Gebietes (berechnet für die Position des Ledasperrwerkes nahe Pegel Leer/Leda)

Die Tideniedrigwasserstände unterliegen einer natürlichen Streuung, so dass sich auch die Tideniedrigwasseranhebung unterschiedlich stark auswirkt. Während des Technischen Tests wirkte sich die Tidesteuerung oberhalb von Stickhausen bei bis zu 5% der Fälle gar nicht aus, da bereits die natürlichen Wasserstände erhöht waren. Andererseits wurde zwischen Augustfehn und Apen in 5% der Fälle der Wasserstand um mehr als 10 cm angehoben, da die natürlichen Wasserstände relativ niedrig eintraten. Unter typischen Sommerbedingungen wären häufiger niedrigere Tideniedrigwasserstände zu erwarten gewesen. Unter dieser Voraussetzung hätte es während des Tests daher häufiger größere Differenzen zum Referenzfall gegeben, d.h. unter typischen Sommerbedingungen hätte sich die Tidesteuerung stärker ausgewirkt. Dabei wären statt der sehr niedrigen Tideniedrigwasser, die oftmals im oberen Abschnitt der Tidebeeinflussten Gerinne eintreten und aus Sicht der Sportschifffahrt und Ökologie problematisch sind, moderate Wasserstände eingetreten. Insbesondere würde dieses auch auf die Monate Oktober und November zutreffen, in denen bei geringem Oberwasser die niedrigsten Scheitelhöhen des Jahres zu erwarten sind. Dieses trifft auch auf den tidebeeinflussten Abschnitt oberhalb von Augustfehn zu, wo die Wasserstandsanhhebung bis zur Tidegrenze ausläuft. Andererseits wirkt sich bei Zunahme des Oberwassers die Tideniedrigwasseranhebung in den oberen Abschnitten weniger oder gar nicht mehr aus, da die Wasserstände zunehmend durch den Abfluss aus dem Binnenland bestimmt werden (Binnendominanz).

6.3.1.4 Übertragung des Längsschnitts Ems bis Große Norderbäke auf das gesamte tidebeeinflusste Niederungsgebiet

Die im Rahmen des Hochwasserschutzplans Leda-Jümme¹⁷ beschriebenen Tidegrenzen sind von langjährige Beobachtungen der nächstgelegenen Pegel und Beobachtungen vor Ort abgeleitet. Dabei handelt es sich um eine pauschale Angabe der Positionen, bis zu denen noch zumeist eine Wasserstandsauslenkung durch die Tide feststellbar ist. Die Position, an der das Gewässer bereits eine eindeutige Binnendominanz aufweist, müsste daher weiter abwärts liegen. Schätzungsweise beginnt die eindeutige Binnendominanz unter mittleren sommerlichen Bedingungen bereits drei Kilometer unterhalb der im Hochwasserschutzplan angegeben Positionen. Diese Schätzung basiert auf einer Ermittlung der mittleren Tidehöhe des hydrologischen Sommerhalbjahres an den Pegeln des Niederungsgebietes und deren räumlichen Extrapolation auf die oberhalb davon liegenden Gewässerstrecken. Da die Pegel nicht gleichmäßig im Niederungsgebiet verteilt sind, gelten die Angaben unter Vorbehalt. Dieses trifft insbesondere für die Soeste und das Godensholter Tief zu, wo keine langjährigen Wasserstandsdaten zur Verifizierung zur Verfügung standen. Die zur Ausführung gekommene Tideniedrigwasseranhebung, bei der das Emssperrwerk zumeist bei NHN -0,8 m geschlossen wurde, könnte sich zumindest unter mittleren sommerlichen Bedingungen über 50 Kilometer oberhalb des Emssperrwerks bemerkbar machen. Am weitesten wäre der Einfluss im Godensholter Tief feststellbar.

Tabelle 48: Orte der festen Tidegrenzen und mögliche Positionen, an denen unter mittleren sommerlichen Bedingungen bereits eine eindeutige Binnendominanz des Gewässers angenommen werden kann. Die Tideniedrigwasseranhebung hat nur unterhalb der festen Tidengrenzen Einfluss, in den binnendominanten Bereichen ist ein Einfluss unterhalb der Nachweisgrenze anzunehmen.

Gewässer	Art der Tidegrenze	Position* [km]	Lagebeschreibung
Holtlander Ehe	Fest	12	Siel und Schöpfwerk
Nordgeorgsfehnkanal	Fest	21	unterste Schleuse
Hollener Ehe		Frei 20	Siel Brückenfehn
Südgeorgsfehnkanal	Fest	25	Wehr / Pegel Südgeorgsfehn
Augustfehnkanal		Frei 31	3 km oberhalb Pegel Augustfehn
Große Norderbäke		Frei 34	6 km oberhalb Pegel Augustfehn
Große Süderbäke		Frei 34	6 km oberhalb Pegel Augustfehn
Ollenbäke		Frei 34	6 km oberhalb Pegel Augustfehn
Godensholter Tief		Frei 45	oberhalb Ortschaft Godensholt
Soeste		Frei 37	unterhalb Ortschaft Harkebrügge
Elisabethfehnkanal	Fest	22	unterste Schleuse
Sagter Ems		Frei 37	6 km o. Pegel Ramsloh
Hauptfehnkanal	Fest	19	Schleuse / Pegel Ostrhauderfehn
Burlager-Langh. Tief		Frei 20	Siel Westrhauderfehn

**) Positionsangabe oberhalb der Ledamündung. Die Ledamündung befindet sich bei Unterems-Km 14,1 und damit rd. 18 Km oberhalb des Emssperrwerks/Gandersum. Die Positionen der freien Tidegrenzen sind geschätzt*

¹⁷ NLWKN (2008): Hochwasserschutzplan Leda-Jümme, Norden 2008

6.3.2 Beurteilung der Wasserstandsanhhebung unter Berücksichtigung einiger Interessenskonflikte im Leda-Jümme-Gebiet

6.3.2.1 Interesse an höherem Tideniedrigwasser – Gewährleistung eines Mindestwasserstands

Die Beeinflussung des Tideniedrigwasserstandes berührt im Leda-Jümme-Gebiet viele verschiedene Interessen. Einerseits besteht ein Interesse, in oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer das Tideniedrigwasser zu stützen, hier ist insbesondere das Aper Tief zu nennen: Die Änderung der hydrologischen Randbedingungen und der Absink des Tideniedrigwassers in der Ems, bedingt durch den Fahrwasserausbau, führte in den letzten Jahrzehnten in den betreffenden Abschnitten zu einem deutlich abnehmenden Trend der Tideniedrigwasserstände, sowie zum häufigeren Eintritt außergewöhnlich niedriger Pegelstände. Dieses trifft für das abflussärmere Sommerhalbjahr und, im Zusammenhang mit der Betriebsweise des Ledasperrwerks, auch auf die Monate Oktober und November zu¹⁸. In den betreffenden Gewässerabschnitten ist eine Vermeidung außergewöhnlich niedriger Wasserstände gewünscht und daher die Anhebung bzw. Stützung des Tideniedrigwassers willkommen. Hier ist besonders das Aper Tief zu nennen, in dem die außergewöhnlich niedrigen Wasserstände u.a. aus Sicht der Ökologie kritisch zu bewerten sind. Die betroffenen Abschnitte haben von der Tideniedrigwasseranhebung profitiert, da ohne diese häufiger niedrigere Wasserstände eingetreten wären. Wären während des Testzeitraums ohne Tidesteuerung extrem niedrige Wasserstände vorgekommen, hätte die Tideniedrigwasseranhebung deren Eintritt verhindert und stattdessen ein moderates Wasserstandsniveau gehalten. Die Tidesteuerung wurde intermittierend ausgeführt, wodurch auch weiterhin ungesteuerte Niedrigwasser eintraten. Bei einer längeren Betriebsdauer der Tidesteuerung würde die Anzahl der nicht gesteuerten extremen Tideniedrigwasser vermindert und zudem auch deren Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert.

6.3.2.2 Besorgnis über erhöhte Wasserstände – Beobachtung in der Sagter Ems

Während des Technischen Tests wurden in den oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer erhöhte Wasserstände wahrgenommen. So meldete die Friesoyther Wasseracht, der für die Sagter Ems zuständige Unterhaltungsverband, deutliche Abweichungen von dem für gewöhnlich vorhandenen Wasserstandsniveau und berief sich auf eigene Beobachtungen sowie auf Hinweise von Anwohnern des Gewässers.

In der Sagter Ems wird der Pegel Ramsloh betrieben. Anhand der dortigen Wasserstandsaufzeichnung wird versucht, die Beobachtung zu quantifizieren. Der Pegel befindet sich rd. 10 km oberhalb der Mündung der Sagter Ems in die Leda, rd. 11 km oberhalb des Pegels Dreyschloot und hat eine Einzugsgebietsgröße von 390 km². Im Sommerhalbjahr liegt das mittlere Tideniedrigwasser bei NHN +0,7 m und das mittlere Tidehochwasser NHN +1,3 m, so dass der mittlere Tidehub 0,6 m beträgt. Im Vergleich mit den Wasserstandsverhältnissen entlang der intensiver betrachteten Pegelkette entlang der Leda und Jümme bis zum Aper Tief und der Großen Norderbäke (s.o.) ist der Tidehub bei Ramsloh mit dem am Pegel Augustfehn vergleichbar, allerdings liegt das Niveau des Tideniedrigwassers 30 cm über dem bei Augustfehn. Aufgrund der Tideintensität können die Tideverhältnisse in Ramsloh als noch küstendominant eingestuft werden. Es ist möglich, dass der Einfluss der Tidesteuerung ähnlich groß ist wie in Augustfehn (7 cm), obwohl das durch die natürlichen Randbedingungen höhere Tideniedrigwasserniveau dem Einfluss durch die Steuerung entgegensteht. Bei Barge wurde eine Wasserstandsanhhebung von 12 cm (Median) für die gesteuerten Tiden ermittelt. Aufgrund der Vergleichbarkeit der Wasserstandsverhältnisse zum Pegel Dreyschloot kann für den Mündungsbereich der Sagter Ems eine Anhebung von 10 bis 15 cm für die von der Steuerung betroffenen Tiden angenommen werden. Am rd. 11 km oberhalb davon befindlichen Pegel Ramsloh muss die Wasserstandsanhhebung damit deutlich unter 10 cm betragen haben und zudem kann diese nur in den

¹⁸ ENGELS, A. (2019 a): Ledasperrwerk Leer - Entwurf zur Anpassung der Sturmflutsperrungen an die Oberwasserverhältnisse des Leda-Jümme-Gebietes (unveröffentlicht); NLWKN Aurich, März 2019

gesteuerten Tiden aufgetreten sein. Als grobe Schätzung kann eine Wasserstandsanhhebung der von der Steuerung betroffenen Niedrigwasser von 5 cm (Median) angegeben werden.

Es ist davon auszugehen, dass die Beobachtung des signifikant erhöhten Wasserstandslevels nicht auf die Tideniedrigwasseranhebung zurückzuführen ist, sondern auf das außergewöhnlich hohe Niederschlagsereignis am 13.06.2020 (siehe auch Beschreibung hydro-meteorologische Randbedingungen des Technischen Tests / Oberwasser der Leda), dem ein starker Anstieg des Oberwassers folgte. Die gemeinsame Betrachtung der tagesgemittelten Wasserstandsverläufe der Pegel Neuburlage (Burlager-Langholter-Tief, staugeregelt) und Ramsloh zeigt einen synchronen Verlauf, mit einem starken Anstieg zeitgleich mit der Zunahme des Oberwassers. Bei Ramsloh wurde der Tagesmittelwert um rd. 50 cm angehoben und der Tidehub verringerte sich von etwa 60 cm auf 30 cm. Die Wasserstände beider Pegel sanken anschließend annähernd kontinuierlich jedoch nur sehr langsam und erreichten erst im August das vorherige Niveau. Noch einen Monat nach dem Niederschlagsereignis waren die Tagesmittelwerte bei Ramsloh noch um etwa 10 cm erhöht. Die Ursache des ungewöhnlich langsamen Rückgangs kann derzeit nicht erklärt werden. Ein Zusammenhang mit der Steuerung des Emssperrwerks ist aber weitestgehend auszuschließen, da die Charakteristik auch am vollkommen davon unabhängigen Pegel Neuburlage auftritt und dieses Phänomen selbst die Tagesmittelwerte beeinflusst, obwohl sich die Tidesteuerung nur in den betreffenden Tiden mit deutlich weniger als 10 cm auswirken müsste. Darüber hinaus zeichnen sich in dem Verlauf der Tagesmittelwerte nicht die Steuerungspausen ab, insbesondere nicht die zwischen dem 19. und 29.07.2020.

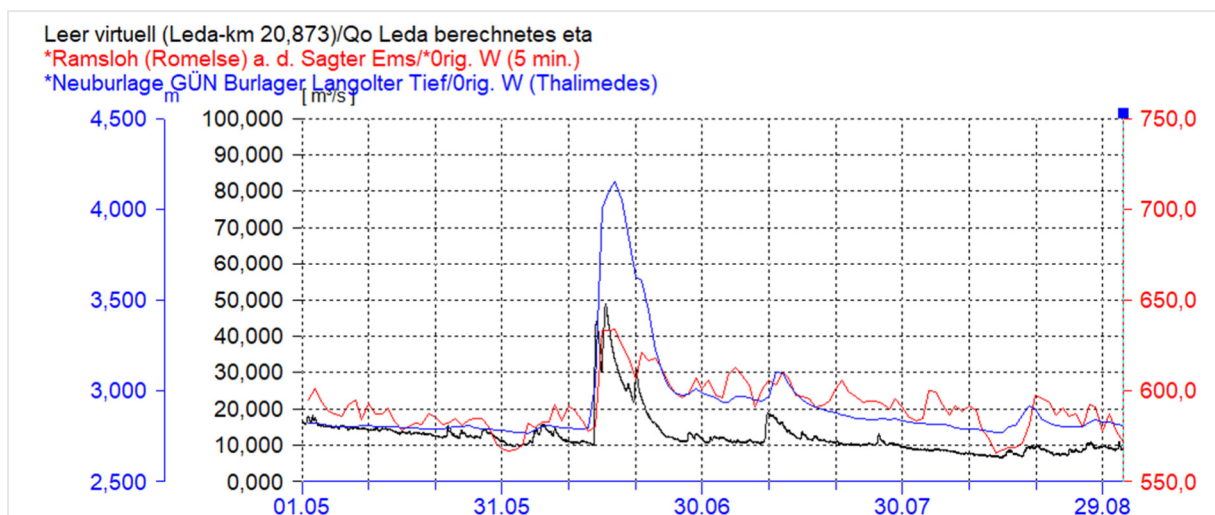


Abbildung 54: Oberwasser der Leda (schwarz, berechnet für Position des Ledasperrwerks) und Wasserstände am Pegel Neuburlage (blau, Burlager-Langholter-Tief) und Ramsloh (rot, Sagter Ems)

6.3.2.3 Interesse an niedrigerem Tideniedrigwasser – Flusstauraum und Hochwasserschutz

Im unteren Niederungsgebiet ist eine Anhebung des Tideniedrigwassers nicht willkommen: In diesem Bereich des Leda-Jümme-Gebietes ist ein möglichst niedriges Tideniedrigwasser vorteilhaft, denn dadurch kann ein größerer Anteil einer Hochwasserwelle im Gewässersystem verbleiben, ohne einen Schaden zu verursachen oder Einrichtungen des technischen Hochwasserschutzes in Anspruch zu nehmen. Der natürliche Stauraum des Gewässersystems ist ein wesentlicher Bestandteil des Hochwasserschutzes, zu dem u.a. auch die technischen Einrichtungen Ledasperrwerk, Ledaschöpfwerk, geregelte und ungeregelte Polder und Rückhaltebecken zählen. Bevor die technischen Komponenten des Hochwasserschutzes in Anspruch genommen werden, erfolgt bereits die Füllung des Flusstauraums. Je größer dieser ist, desto später werden die technischen Einrichtungen aktiviert und desto stärker werden diese entlastet. Die schadhafte Abkehr eines Hochwasserereignisses hängt damit von der Verfügbarkeit des Flusstauraums ab.

Der Ausbau der Ems führte bis zum aktuellen Zustand zu einer deutlichen Änderung der Wasserstandsverhältnisse der Ems und den Hauptgewässern des Leda-Jümme-Gebietes. Dieses äußerte sich in einer starken Absenkung der Tideniedrigwasserstände. In den vergangenen 50 Jahren senkte sich an der Ledamündung (Leerort) der Jahresmittelwert des Tideniedrigwassers bis Mitte der 2010er Jahre zunächst von NHN -1,0 m auf NHN -1,8 m ab und stieg danach bis heute wieder auf NHN -1,7 m an. Die niedrigsten Tideniedrigwasser des Jahres fielen in den zurückliegenden Jahrzehnten sogar von NHN -1,8 m auf NHN -2,6 m. Die Absenkung des Tideniedrigwassers macht sich bis über die Pegel Dreyschloot und Barge (obere Leda bzw. Jümme) bemerkbar. An diesen Orten sank das mittlere Tideniedrigwasser in den vergangenen 50 Jahren um rd. 10 cm. Insgesamt führte dieses zu einer deutlichen Zunahme der Tidehübe und Tidevolumen, aber auch die potenzielle Größe des Flusstauraums nahm dadurch zu. Andererseits ist in den letzten Jahrzehnten eine zunehmende Verschlickung aus Richtung der Ems zu beklagen, wovon die Unterläufe von Leda und Jümme betroffen sind. Zudem ist eine Verschlammung in den oberen tidebeeinflussten Abschnitten des verzweigten Gewässersystems festzustellen. Die Verschlickung bzw. Verschlammung führte zu einer bisher nicht quantifizierten Volumenabnahme des Flusstauraums.

Hochwasserereignisse treten zumeist als Kombination erhöhter Tideniedrigwasser und erhöhten Oberwassers auf. Dabei ist das vom Flusstauraum zu speichernde Volumen das Resultat der Kombination der beiden bedingt abhängigen Ereignisse Binnenzufluss und eingeschränkter bzw. unterbundener Vorflut aufgrund aufeinander folgender erhöhter Tideniedrigwasser¹⁹. Die Möglichkeit des Zusammentreffens eines sehr hohen Abflusses und eines stark erhöhten Tideniedrigwasserstandes ist zwar gegeben, dennoch werden die Ereignisse jeweils von unterschiedlichen Randbedingungen bestimmt, deren Überschneidung einer bedingten Wahrscheinlichkeit unterliegt. Durch Windstau können über viele Tiden in Folge erhöhte Tideniedrigwasserstände eintreten. Signifikante Erhöhungen kommen nur über kürzere Zeiträume vor und sehr stark erhöhte Niedrigwasser sind oftmals Einzelereignisse.

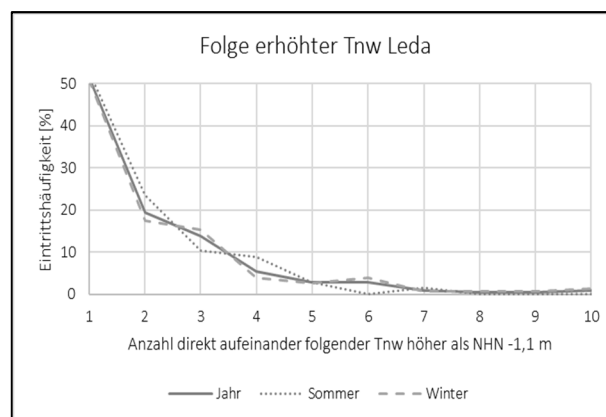


Abbildung 55: Folgehäufigkeit signifikant erhöhter Tideniedrigwasserstände in der Leda am Unterpegel Ledasperrwerk (Daten ohne Einfluss des Aufstaus der Ems und ohne Sperrungen von Ems und Leda); Anmerkung: das mittlere Tideniedrigwasser liegt am Ledasperrwerk, rd. 4 Km oberhalb der Ledamündung, bei NHN - 1,6 m (Abb. aus ENGELS 2019 b).

In der Praxis erfolgt bei hoher Abflusspende vorkehrend eine Vorentlastung des Gewässersystems durch Einsatz des Ledasperrwerks im Sielbetrieb. Dabei wird während der Ebephase durch das dann geöffnete Ledasperrwerk Binnenwasser aus dem Leda-Jümme-Gebiet in Richtung Ems abgeschlagen, das Zurückfließen während der Flutphase jedoch durch Schließen des Bauwerks unterbunden. Dieses erfolgt bereits in einer Phase, in der die Tidewasserstände durch den Windstau noch nicht signifikant erhöht sind und somit noch eine Vorflut vorhanden ist. Bei Aussetzen der Vorflut, d.h. hoher Wasserstände auch zu Tideniedrigwasser und damit einhergehender Behinderung des freien Abflusses

¹⁹ FRANK, T. (2007): Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals; Dissertation an der TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik; Dresden 2007

in Richtung Ems, sowie Vorhersage eines Hochwasserereignisses, erfolgt der Einsatz des Ledaschöpfwerks bei gleichzeitig geschlossenem Ledasperrwerk.

Im Zeitfenster Dezember bis Februar existiert die größte Sturmhäufigkeit des Jahres und es kommen auch die höchsten Abflüsse vor. Damit ist die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens eines durch Windstau erhöhten Tideniedrigwassers, durch das das Gewässersystem vorgefüllt wird, und einem erhöhten Abfluss in diesem Zeitraum größer, als im restlichen Jahr (Ausnahmen: Oktober 1998 und März 1979). Daraus ergibt sich eine entsprechende Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses im Leda-Jümme-Gebiet.

Nach bisheriger Erfahrung ist im Zeitraum April bis zur ersten Oktoberhälfte die Inanspruchnahme der Einrichtungen des technischen Hochwasserschutzes nahezu auszuschließen. Im März, in der zweiten Oktoberhälfte und im November besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, diese Einrichtungen verwenden zu müssen. Eine hohe Wahrscheinlichkeit ist jedoch im Zeitraum Dezember bis Februar vorhanden^{20 21}. Die bisherigen Fälle unterlagen keiner potenziellen Begrenzung des Flusstauraums, wie es durch eine Tideniedrigwasseranhebung geschehen würde. Wäre die Tideniedrigwasseranhebung bereits in der Vergangenheit ausgeführt worden, hätte es in Ausnahmen vielleicht bereits im April und der ersten Oktoberhälfte Fälle gegeben, in denen die Einrichtungen des technischen Hochwasserschutzes benötigt worden wären.

Da die Tideniedrigwasseranhebung bei einer windbedingten signifikanten Anhebung des Tideniedrigwassers oder bei höheren Oberwasserabflüssen ohnehin ausgesetzt wird, da sich die angestrebte Wirkung der Tidesteuerung bereits auf natürliche Weise ergibt, gibt es grundsätzlich nur eine geringe Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes. Darüber hinaus wird es in einer verkehrsverträglichen Tidesteuerung auch unbeeinflusste Tideniedrigwasser mit natürlicher Höhe geben, die eine ungehinderte Vorflut gewähren. Vorsicht ist lediglich in Phasen direkt aufeinander folgender Niedrigwasseranhebungen in den Übergangszeiten (Oktober / November und März / April) geboten, in denen noch eine Tidesteuerung sinnvoll sein kann aber eine Hochwassergefahr nicht immer offensichtlich ist.

6.3.2.3.1 Zusammenfassung zum Thema Flusstauraum und Hochwasserschutz

Es ist festzustellen, dass die Größe des Flusstauraums durch die Absenkung des Tideniedrigwassers größer geworden ist. Dem steht zwar eine Abnahme des Flusstauraums durch eine Verschlickung und Verschlammung gegenüber, diese dürfte jedoch geringer sein als die Volumenänderung durch das sehr deutliche Absinken der Tideniedrigwasserstände. Im heutigen Zustand steht während eines Hochwasserfalls ein tendenziell größerer Stauraum im Gewässersystem zur Verfügung, als in der Vergangenheit.

Von Mai bis September ist keine Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes durch die Tideniedrigwasseranhebung zu erwarten. Im Zeitraum von Anfang Oktober bis einschließlich April ist jedoch eine höhere Vorsicht geboten und die Tideniedrigwasseranhebung stets durch eine Prognose der Windverhältnisse (Windstau) sowie der Niederschlags- und Abflusssituation im Leda-Jümme-Gebiet zu begleiten. Dabei sind Vorhersagen des Wetterdienstes über verschiedene Zeiträume zu verwenden, indem eine Entwicklungstendenz über mehr als eine Woche betrachtet wird (Langfristprognose) und eine Kurzfristvorhersage den detaillierteren Witterungsverlauf über die bevorstehenden 3 Tage angibt. Unter Berücksichtigung, dass sich die Prognosegüte mit Verlängerung des Vorhersagezeitraums verringert und Prognosefehler besonders in Abschnitten mit sehr unbeständigem Wetter auftreten, kann die Grenze der Brauchbarkeit einer Vorhersage mit 6 bis 7

20 ENGELS, A. (2019 b): Hydrologie zur Machbarkeitsstudie Polder Leer – Masterplan Ems 2050; NLWKN Aurich, Dezember 2019

21 ENGELS, A. (2014): Ermittlung der hundertjährigen Wasserstände im tidebeeinflussten Niederungsgebiet von Leda und Jümme (unveröffentlicht); NLWKN Aurich; Juli 2014

Tagen angegeben werden²². Die Vorhersage des Luftdrucks und damit des Windes ist weniger komplex als die Prognose des Niederschlags. Aus diesem Grunde kann ein etwaiger Windstau und damit eine Erhöhung des Tideniedrigwassers früher vorhergesagt werden als die Höhe der zu erwartenden Regenmengen. Zur Sicherheit sollte daher die Tidesteuerung in den Übergangszeiten auf ein Minimum zurückgefahren werden, sobald sich eine Phase erhöhter Tideniedrigwasserstände ankündigt, insbesondere, wenn zusätzlich zu den erhöhten Wasserständen ergebige Niederschläge vorhergesagt werden.

Die Phase des Technischen Tests, von Ende Juni bis Mitte August, befand sich in einem Zeitraum, in dem der Eintritt eines Hochwasserereignisses unwahrscheinlich ist. Diesbezüglich hätte die Testphase ohne einen Konflikt mit dem Hochwasserschutz von Mai bis September stattfinden können.

6.3.2.4 Interesse an niedrigerem Tideniedrigwasser – Sielentwässerung

Aus Sicht des Hochwasserschutzes besteht ein generelles Interesse an einem niedrigen Tideniedrigwasser (s.o.). Zudem ist ein niedriger Wasserstand auch hinsichtlich der Sielentwässerung vorteilhaft, denn die Höhe des Tidewasserstandes bestimmt die Möglichkeit und auch die Zeitdauer der Entwässerung im freien Gefälle. An nur wenigen Orten im Leda-Jümme-Gebiet erfolgt die Entwässerung ausschließlich über ein Sielbauwerk. Überwiegend existiert eine Kombination mit einem Schöpfwerk, so dass auch bei höheren Außenwasserständen eine Entwässerung erfolgen kann. Die Effizienz eines Mündungsbauwerks ist jedoch größer, wenn sowohl Siel- als auch Schöpfwerkstätigkeit gewährleistet sind. An vielen ursprünglich als Kombination aus Siel und Schöpfwerk konstruierten Mündungsbauwerken kann aufgrund der niedrigen Binnenpeile keine Entwässerung mehr im freien Gefälle erfolgen. An diesen Orten existiert daher nur noch ein Schöpfungsbetrieb, der von der Beeinflussung durch die Tideniedrigwasseranhebung unberührt bleibt. Wie auch bei den Belangen des Hochwasserschutzes angeführt, gilt auch für die Interessen der Sielentwässerung: Da die Tideniedrigwasseranhebung bei einer windbedingten signifikanten Anhebung des Tideniedrigwassers oder bei höheren Oberwasserabflüssen ohnehin ausgesetzt wird, da sich die angestrebte Wirkung der Tidesteuerung bereits auf natürliche Weise ergibt, besteht grundsätzlich nur eine geringe Beeinträchtigung der Sielentwässerung.

Darüber hinaus wird es in einer verkehrsverträglichen, d.h. intermittierenden Tidesteuerung auch unbeeinflusste Tideniedrigwasser mit natürlicher Höhe geben, die eine ungehinderte Vorflut gewähren. Zudem ist diese bei Bedarf außerplanmäßig für nur eine oder auch mehrere Tiden auszusetzen oder sogar eine bereits eingeleitete Steuerung frühzeitig zu beenden, so dass keine Beeinflussung mehr besteht. Eine größere Aufmerksamkeit ist lediglich in Phasen direkt aufeinander folgender Niedrigwasseranhebungen in den Übergangszeiten (Oktober / November und März / April) geboten, in denen noch eine Tidesteuerung sinnvoll ist aber bereits höhere Abflussspenden in den Siel-Einzugsgebieten vorhanden sein können. In diesen Zeiten ist bei Bedarf in Rücksichtnahme auf die Gebiete, die ausschließlich mit einem Siel entwässert werden und über kein Schöpfwerk verfügen, ein rasches Ändern des Betriebsplans mit Anpassung an die aktuellen hydrologischen Randbedingungen erforderlich.

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser in Leda und Jümme abgenommen, woraus sich günstigere Umstände für die Sielentwässerung ergaben. In den letzten 50 Jahren waren folgende Abnahmen zu verzeichnen:

²² HUPFER, H. und KUTTLER, W. (2006): Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie; Teubner-Verlag

Tabelle 49: Veränderung des Tideniedrigwassers in Leda und Jümme in den letzten 50 Jahren (gerundete Werte, Grundlage: gleitender Mittelwert über 5 Jahre)

Pegel	Position [Km oberhalb der Ledamündung]	Veränderung des mittleren Tideniedrigwassers in den letzten 50 Jahren [m]	Wasserstandsanhhebung durch Tidesteuerung
Leerort/Ems	0	-0,8	+1,2
Leer/Ledasperrwerk	4	Etwa -0,8	+1,1
Nortmoor/Jümme bzw. Westringaburg/Leda	14 bzw. 15	-0,3	+0,3
Stickhausen/Jümme bzw. Potshausen/Leda	20	-0,2 bis -0,3	+0,2
Barge/Jümme bzw. Dreyschloot/Leda	27 bzw. 24	-0,1	+0,1

Anmerkung: In den meisten Fällen stieg das Tideniedrigwasser seit Mitte der 2010er Jahre bis heute wieder geringfügig an. Diese aktuelle Entwicklung ist in der Tabelle nicht berücksichtigt.

6.3.2.4.1 Untersuchung des Extremfalls und mögliche Defizite der bestehenden Mündungsbauwerke

Vor der Entwicklung der Flexiblen Tidesteuerung mit dem Emssperrwerk wurde von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes die Möglichkeit untersucht, über eine feste Sohlschwelle am Emssperrwerk den Sedimenttransport der Ems günstig zu beeinflussen. Dieser feste Einbau, durch den das Tideniedrigwasser dauerhaft um etwa einen Meter angehoben worden wäre, hätte die Vorflut über das ganze Jahr vermindert und in den Zeiten des Jahres, in denen mit einem deutlich erhöhten Abfluss zu rechnen ist, den Hochwasserschutz negativ beeinflusst. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Untersuchung der konkreten Auswirkungen einer Tideniedrigwasseranhebung von 1,0 m – als Folge der Einschnürung des Fließquerschnitts – beim Emssperrwerk auf die Wasserwirtschaft, um mögliche Beeinträchtigungen bei der Entwässerung in den tidebeeinflussten Anschlussbereichen zu quantifizieren und zu bewerten²³. In dieser Studie wurde zunächst das Abflussvolumen aus Niederschlagsereignissen unterschiedlicher Jährlichkeit, bis hin zum Extremniederschlag, bestimmt und dieses mit der Wassermenge verglichen, welches das jeweilige Mündungsbauwerk abführen kann. Hinsichtlich der Tide- und Abflussverhältnisse im Gewässersystem wurden unterschiedliche Szenarien betrachtet. Darauf aufbauend wurde abschließend die Belastung der Mündungsbauwerke im derzeitigen Zustand mit dem des Planzustandes (Wasserstandsanhhebung) verglichen. Auf Grundlage dieser Untersuchung konnten zahlreiche Siele und Schöpfwerke im Leda-Jümme-Gebiet genannt werden, an denen unter den angenommenen Randbedingungen in mindestens einem der untersuchten Szenarien der Niederschlagsabfluss nicht verlässlich abgeführt werden kann. An einigen Bauwerken gilt dieses bereits im Zustand ohne Tideniedrigwasseranhebung.

Das Ergebnis der o.g. Untersuchung ist nicht auf die Flexible Tidesteuerung übertragbar, da diese bei erhöhtem Abfluss unterbrochen werden kann, so dass dann eine ungehinderte Entwässerung möglich ist. Die Studie ermittelt bereits für den Zustand ohne Tideniedrigwasseranhebung eine unzureichende Leistungsfähigkeit der Siele „Westsiel“ (Einzugsgebiet 96 km², Entwässerung in Burlager-Langholter-Tief) und „Brückenfehn“ (45 km², in Nordgeorgsfehnkanal). Darüber hinaus wird für zahlreiche Schöpfwerke eine nicht ausreichende Leistungsfähigkeit unter heutigen Bedingungen ermittelt.

²³ IMS 2013: Aktionsprogramm Ems - Studie zu den Auswirkungen einer Tnw-Anhebung beim Emssperrwerk auf die Wasserwirtschaft; IMS Ingenieurgesellschaft im Auftrag der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes; Hamburg 2013

6.3.2.4.2 Mögliche Beeinträchtigung der Entwässerung während des Technischen Tests

Am wenigsten ist die Schöpfwerkstätigkeit von der intermittierenden Tideniedrigwasseranhebung betroffen, so dass der Fokus auf die Vulnerabilität der Einzugsgebiete liegt, die entweder über eine Kombination aus Siel und Schöpfwerk oder nur über ein Siel entwässert werden. Zur Beurteilung einer potenziellen Beeinträchtigung der Sielentwässerung während des Technischen Tests, wurden an jeweiligem Sielbauwerk die Höhendifferenz zwischen Binnenwasserstand (Sommerpeil) und Außenwasserstand bestimmt und mit der Differenz verglichen, die sich maximal bei mittlerem Tideniedrigwasser ergäbe. In den Fällen, in denen durch die Tideniedrigwasseranhebung des Technischen Tests nur noch eine geringe Differenz zwischen Binnen- und Außenwasserstand vorhanden war oder sich das Gefälle sogar umkehrte, bestand demnach eine potenzielle Beeinträchtigung. Dabei ist zu beachten, dass eine reale Beeinträchtigung der Entwässerung während des Tests in keinem Fall existierte, da kein akuter Bedarf der Sielentwässerung bestand (geringe Abflusspende) und die Tideniedrigwasseranhebung häufig unterbrochen wurde, so dass stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich war. Darüber hinaus wäre in einer Gefahrensituation eine Tidesteuerung außerplanmäßig frühzeitig zu beenden gewesen. Zudem handelt es sich um eine pessimale Sichtweise, da ein Entwässerungsbedarf erst vorliegt, wenn ein höherer Binnenwasserstand als der Sommerpeil eintritt und sich daraus auch höhere Differenzen zum Außenwasserstand als hier berücksichtigt ergäben. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass in den jeweiligen Sielgebieten ein unterschiedlich großer Toleranzbereich hinsichtlich eines kritischen Binnenwasserstandes besteht und zeitlich begrenzt auch höhere Wasserstände als der angeführte Sommerpeil zugelassen werden. Nur auf Grundlage dieser pessimalen Betrachtung bestand eine potenzielle Beeinträchtigung an den Sielen „Sägemühlenstraße“ und „Logaer Hammrich“. Dieses gilt auch für das Siel „Ostermeedland“, allerdings ist dieses mit einem Schöpfwerk kombiniert, wodurch im Notfall auch bei höherem Außenwasserstand zu entwässern gewesen wäre. Eine geringfügige potenzielle Beeinträchtigung ist für die Siel „Ammersum“, „Ostsiel“ und „Westsiel“ zu nennen.

Tabelle 50: Positionen an denen im Niederungsgebiet von Leda und Jümme eine Entwässerung im freien Gefälle möglich ist und Einstufung der potenziellen Beeinträchtigung während des Technischen Tests. Es ist zu beachten, dass eine reale Beeinträchtigung der Entwässerung während des Tests in keinem Fall vorlag, da kein akuter Bedarf der Sielentwässerung bestand (geringe Abflusspende) und die Tideniedrigwasseranhebung häufig unterbrochen wurde, so dass stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich war.

	1)			2)				
	Position	Entwässerung in Gewässer	Einzugsgebiet	Sommerpeil	MT _{nw}	Höhendifferenz Sommerpeil zu MT _{nw}	Wasserstands-anhebung	potenzielle Beeinträchtigung
Siel (S) bzw. Siel und Schöpfwerk (S+SW)	[km]		[km ²]	[mNHN]	[mNHN]	[m]	[m]	
<u>Sägemühlenstraße</u> (S)	2	Leda		(-0,5)	-1,7	1,2	1,1	Ja
<u>Ostermeedland</u> (S+SW)	3	Leda	2	-0,5	-1,7	1,2	1,1	(Ja)
<u>Entlastungspolder</u> (S+SW)	4	Leda	1	-0,7	-1,6	0,9	1,0	(Ja) 3
<u>Breinermoor</u> (S+SW)	5	Leda	17	(-1,5)	-1,5	0,0	0,9	Nein 4
<u>Logaer Hammrich</u> (S)	6	Leda	2	(-0,5)	-1,3	1,3	0,8	Ja

<u>Loga</u> (S+SW)	8	Leda	9	-1,2	-1,1	-0,1	0,7	Nein 4)
<u>Holtland</u> (S+SW)	16	Jümme	55	+1,4	-0,4	1,8	0,3	Nein
<u>Holter Hammrich</u> (S)	17	Leda /HFK	2	+0,4	-0,3	0,7	0,3	gering 5)
<u>Ammersum</u> (S)	22	NGFK	3	(+0,4)	0,0	0,4	0,2	gering
<u>Brückenfehn</u> (S+SW)	22	NGFK	45	(+0,3)	0,0	0,3	0,2	(gering) 6)
<u>Schleuse Ulferts</u> (S)	22	I. Südwieke	22	+1,0	0,0	1,0	0,2	Nein
<u>Ostsiel</u> (S)	22	BLT	3	+0,3	0,0	0,3	0,2	gering 6)
<u>Westsiel</u> (S)	22	BLT	96	+0,5	0,0	0,5	0,2	gering 6)
<u>Westrhauderfehn</u> (S+SW)	22	BLT	41	+0,9	0,0	0,9	0,2	Nein

Mit: HFK = Hauptfehnkanal, NGFK = Nordgeorgsfehnkanal, BLT = Burlager-Langholter-Tief

- 1) Positionsangabe: Abstand zur Ledamündung, die Ledamündung befindet sich bei Unterems-Km 14,1 und damit rd. 18 Km oberhalb des Emssperwerks.
- 2) Der Sommerpeil ist z.T. geschätzt; Ein Entwässerungsbedarf liegt erst vor, wenn ein höherer Wasserstand als der Sommerpeil vorhanden ist. Damit lägen höhere Differenzen zum Außenwasserstand und ein größeres Wasserstandsgefälle vor, als in der Tabelle genannt. Darüber hinaus existiert in den jeweiligen Sielgebieten ein unterschiedlich großer Toleranzbereich. Daher sind die darauf bezogenen Aussagen als pessimal zu verstehen.
- 3) Entlastungspolder Leer: Es wird keine ständige Sielentwässerung durchgeführt. Ein Abschlag von Binnenwasser im Freigefälle ist nur durch Öffnen des Entlastungsbauwerks möglich und erfolgt nur nach einer Hochwasserflutung (einmal in zwei bis drei Jahren vorkommend) oder im Rahmen einer Funktionskontrolle (zweimal im Jahr). Eine Restentleerung des Polders bis zum Erreichen des Binnenpeils erfolgt durch ein Schöpfwerk.
- 4) Bereits ohne Tideniedrigwasseranhebung ist aufgrund der Wasserstandsverhältnisse ein Sielzug nur sehr eingeschränkt bis gar nicht möglich.
- 5) Kleines Einzugsgebiet mit geringem Schadenspotenzial
- 6) Bereits ohne Tideniedrigwasseranhebung kurze Sielzugdauer

6.3.2.4.3 Zusammenfassung zur Problematik der Sielentwässerung

Während des Technischen Tests war stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich, da die Tideniedrigwasseranhebung in intermittierender Form ausgeführt wurde. Eine reale Beeinträchtigung des Siebetriebs bestand daher nicht und wäre lediglich vorhanden gewesen, wenn ein außergewöhnlich hohes Niederschlagsereignis einen unmittelbaren Sielzug erforderlich gemacht hätte oder auch, wenn bei erhöhter Abflussspende keine Unterbrechung der Tidesteuerung vorgenommen worden wäre. Relativierend ist jedoch anzuführen, dass ein extremes Niederschlagsereignis im Sommer lediglich regional begrenzt auftritt und nicht die Abflussspende des gesamten jeweiligen Sieleinzugsgebietes extrem ansteigen lässt.

6.3.2.4.4 Ausblick zur Sielentwässerung

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser im Leda-Jümme-Gebiet abgenommen, woraus sich günstigere Umstände für die Sielentwässerung ergaben. Die Wasserstandsanhhebung entspricht in etwa dem Maß, um das sich die Tideniedrigwasserstände in den letzten 50 Jahren absenkte. In der unteren Leda ist die Wasserstandsanhhebung größer als die zurückliegende Absenkung. An der Ledamündung (Leerort) ist die Wasserstandsanhhebung rd. 0,5 m

größer und am Ledasperrwerk um etwa 0,3 m größer als die zurückliegende Absenkung des Tideniedrigwassers.

Hinsichtlich eines möglichen Dauerbetriebs einer Flexiblen Tidesteuerung ist die Vulnerabilität zahlreicher Siel- und Schöpfwerksgebiete zu berücksichtigen, die unter Berücksichtigung der detaillierten Untersuchungen zur Auswirkung der festen Sohlschwelle auf die Wasserwirtschaft (IMS 2013) ermittelt wurde. Eine größere Aufmerksamkeit ist in Phasen direkt aufeinander folgender Niedrigwasseranhebungen in den Übergangszeiten (Oktober / November und März / April) geboten, in denen noch eine Tidesteuerung sinnvoll ist aber bereits höhere Abflussspenden in den Siel-Einzugsgebieten vorhanden sein können. In diesen Zeiten ist bei Bedarf in Rücksichtnahme auf die Gebiete, die ausschließlich mit einem Siel entwässert werden und über kein Schöpfwerk verfügen, ein rasches Ändern des Betriebsplans mit Anpassung an die aktuellen hydrologischen Randbedingungen erforderlich.

6.3.2.5 *Interesse sowohl an niedrigerem als auch höherem Tideniedrigwasser*

Ein weiterer Konflikt betrifft die Sportschifffahrt: Eine Anhebung des Tideniedrigwasserstandes kann die Durchfahrt unter den festen Brücken im Leda-Jümme-Gebiet begrenzen, wie z.B. in der Ortschaft Stickhausen, wo die feste Straßenbrücke (Burgstraße) und die Eisenbahnbrücke (Linie Leer-Oldenburg) den Nordgeorgsfehnkanal queren. Beim mittleren Tideniedrigwasser ist dort jeweils eine Durchfahrtshöhe von bis zu 2,7 m vorhanden und beim mittleren Tidehochwasser beträgt die Durchfahrtshöhe maximal 1,1 m. Entsprechend der Bootsgröße muss dort der passende Wassersand abgewartet werden. Gleichfalls wird von der Sportschifffahrt in den oberen Gebieten des Tideeinflusses ein höherer Tideniedrigwasserstand begrüßt, woraus sich höhere Wassertiefen und damit eine ungehindertere Fahrt ergibt.

Entsprechend der astronomischen und witterungsbedingten Einflussfaktoren unterliegen die Tidewasserstände einer natürlichen Schwankung. Hinzu kommt die Beeinflussung durch den Betrieb des Ledasperrwerks. Je nach Ausprägung der Randbedingungen können die mittleren Tideniedrigwasser zeitweise beträchtlich über- und unterschritten werden. Sofern der Eintritt dieser Umstände vorher bekannt ist, können auch Sportschiffe mit höherem Aufbau diese Tiden zur Unterquerung von festen Brücken nutzen oder meiden. Eine Tidesteuerung würde bei hohen Wasserständen im Leda-Jümme-Gebiet, verursacht durch hohes Oberwasser und/oder Windstau, pausieren. Die geringen Durchfahrtshöhen unter den festen Brücken würden daher nur durch die natürlichen Umstände hervorgerufen. Unter den Umständen, die zu sehr niedrigen Wasserständen führen, würde allerdings häufig eine Steuerung erfolgen, so dass in diesen Fällen niedrigere Durchfahrtshöhen vorhanden wären, als unter natürlichen Umständen zu erwarten.

Aufgrund der hydrologischen Randbedingungen während des Technischen Tests wurden die Wasserstände bei Stickhausen um 23 cm (Median) gegenüber den ohne Steuerung zu erwartenden Scheitelhöhen angehoben. In 5% der Tiden lag der eingetretene Wasserstand allerdings nur weniger als 11 cm über der Höhe, die in den betreffenden Tiden ohne Tidesteuerung zu erwarten gewesen war. Die Ursache dafür waren die speziellen hydrologischen Randbedingungen zur Zeit dieser Tiden. Dagegen ergab sich in 5% der Tiden gegenüber der Referenz eine Anhebung von über 33 cm, da die jeweiligen Tiden aufgrund spezieller Randbedingungen ohne Steuerung sehr niedrig ausgefallen wären. Die Differenz zwischen dem tatsächlich eingetretenen Wasserstand und der Referenz war insgesamt größer, als ohne Steuerung durch die astronomischen und meteorologischen Einflussfaktoren verursacht worden wäre. Die Durchfahrtshöhen unter den festen Brücken waren geringer als unter natürlichen Umständen zu erwarten.

Hinsichtlich der Zunahme der Wassertiefen hat die Sportschifffahrt durch den Technischen Test profitiert, denn diese waren größer als unter natürlichen Umständen zu erwarten.

6.3.3 Auswirkung der Flutstromtidesteuerung auf die Wasserstände im Leda-Jümme-Gebiet

Vom 14. bis zum 17.08.2020 wurde die Flutstromtidesteuerung getestet. In insgesamt fünf Tiden wurde der Flutdurchfluss durch das zum Teil verschlossene Emssperrwerk gedrosselt. Entsprechend des Versperrgrades in Höhe von etwa 75 % ergab sich währenddessen am Emssperrwerk eine Wasserstands-differenz zwischen Ober- und Unterpegel von bis zu 1 m. Zum Ende der Sperrzeit erfolgte jeweils eine stufenweise Öffnung des Bauwerks, um Außen- und Binnenwasserstand behutsam aneinander anzugleichen und um damit die Ausbildung eines Schwalls in Richtung Herbrum und auch in die Leda zu vermeiden. Die Sperrwerkssteuerung führte ober- und unterhalb des Sperrwerks zu einer Verformung der Tidekurve. Von Gandersum bis Herbrum und auch in Leda und Jümme waren während der Drosselung des Durchflusses geringere Steiggeschwindigkeiten und deshalb niedrigere Wasserstände als in einer unbeeinflussten Tide zu beobachten. In den gleichen Abschnitten nahmen nach Öffnung der Sperrwerkstore die Steiggeschwindigkeiten bis zum Eintritt des Tidehochwassers zu. Die Höhe der Tidescheitel wurde durch die Flutstromtidesteuerung erheblich weniger beeinflusst als durch die Tideniedrigwasseranhebung. Die Modelluntersuchungen im Vorfeld des Technischen Tests haben in der Leda bis Wiltshausen eine mögliche Zunahme des Tidehochwassers vom im Mittel 8 cm und eine Abnahme des Tideniedrigwassers von im Mittel 3 cm bestimmt²⁴. Der in der Modellrechnung berücksichtigte Öffnungsvorgang des Emssperrwerks führte zu einer stärkeren Schwallbildung und damit zu einer stärkeren Zunahme des Tidehochwassers, als durch die im Test zur Ausführung gekommene Steuerung. Die tatsächlich eingetretenen Tidehochwasserscheitel wichen daher weniger von den Höhen ab, die ohne Tidesteuerung eingetreten wären. Aufgrund der Tendenz zum Eintritt niedrigerer Tideniedrigwasserstände, sind die Wasserstandsänderungen für die Entwässerung nicht belangvoll. Hinsichtlich des Trockenfallens der oberen Abschnitte der tidebeeinflussten Gewässer sind niedrigere Tideniedrigwasser allerdings relevant. Die Auswertung des WSA Ems-Nordsee (siehe 6.1) hat eine Absenkung des Tideniedrigwassers von 23 cm ergeben.

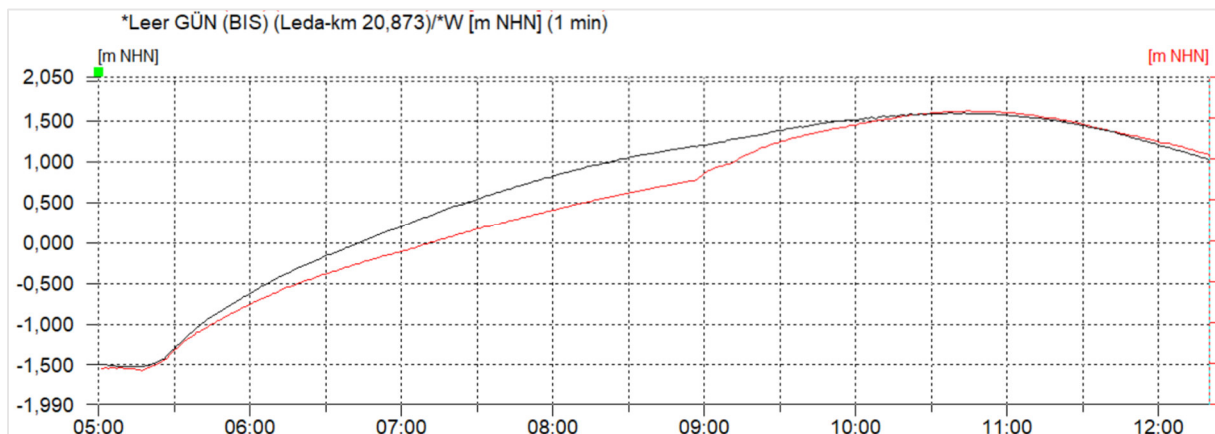


Abbildung 56: Exemplarische Darstellung des Tideverlaufs am Pegel Leer/Leda ohne (schwarz) und mit (rot) Beeinflussung durch die Flutstromtidesteuerung. Die Drosselung der Tide durch das zum Teil verschlossene Emssperrwerk verursacht eine gegenüber der Referenzzeit verminderte Steiggeschwindigkeit. Bei Leer beträgt die maximale Wasserstands-differenz zum Referenzzustand etwa 50 cm. Nach Öffnung des Emssperrwerks ist eine gegenüber der Referenzzeit erhöhte Steiggeschwindigkeit vorhanden. Die Scheitelhöhen werden durch die Flutstromtidesteuerung nur geringfügig verändert.

Am Oberpegel des Emssperrwerks betrug die Differenz zu einem unbeeinflussten Tideverlauf während der Flutphase bis zu etwa fünf 50 cm. An den Pegeln Leerort und Leer/Leda lag die maximale Differenz ebenfalls in dieser Größenordnung. Im Leda-Jümme-Gebiet nahm der Einfluss der Tidesteuerung auf die Wasserstände mit zunehmender Distanz zur Ledamündung ab. Im weiteren Verlauf waren folgende maximalen Differenzen zum unbeeinflussten Tideverlauf zu beobachten: Wiltshausen (Leda) etwa 40 cm, Nortmoor (Jümme) und Westringaburg (Leda) etwa 30 cm, Stickhausen (Jümme) etwa 20 cm,

²⁴ Oberrecht (2020): Abschätzung des Wirkraums der flexiblen Tidesteuerung auf Basis bereits durchgeführter numerischer Berechnungen; Vermerk NLWKN FSK, Norderney 30.03.2020

Barge (Jümme) und Dreyschloot (Leda) 10 cm und in Augustfehn (Aper Tief) war keine Differenz zum unbeeinflussten Tideverlauf mehr feststellbar.

6.4 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Grundwasserstände

Bearbeitet von Tanja Eden und Dieter de Vries (NLWKN)

Durch die Tidesteuerung sind entsprechend der Steuerungsintensität sowohl kurzfristige langfristige als auch Auswirkungen denkbar. Bei einer Flutstromtidesteuerung wird dagegen keine Veränderung der Grundwasserstände erwartet, da das Tidevolumen nur unwesentlich reduziert wird (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3).

Um mögliche, langfristige Folgen der Tidesteuerung auf die Grundwasserstände ermitteln zu können, wurden an den Grundwassermessstellen, entlang Ems und im Leda-Jümme-Gebiet, die Grundwasserstandsganglinien des Jahres 2020 mit der Spanne der Grundwasserstände der Jahre 2009 bis 2019 verglichen. Die Spanne ergibt sich aus den monatlichen Minima und Maxima und wird durch die Monatsmittelwerte ergänzt. Zudem wurden die Niederschlagsmengen der jeweils nächstgelegenen Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie die Temperaturdaten der DWD-Messstation Emden (ID: 5839) berücksichtigt, da diese beiden Parameter die Grundwasserstände durch Grundwasserneubildung und Verdunstung maßgeblich beeinflussen. Die Niederschlagsmessungen der DWD-Stationen 2181 und 296 wurden bei den Auswertungen gemeinsam betrachtet, da die Grundwassermessstellen R066-10 und R037-14 sich räumlich zwischen diesen beiden Messstationen befinden (siehe Übersichtskarte und Tabelle der Grundwassermessstellen in Kapitel 5.4). Die Daten der Messstellen im Bereich der Deponie Breinermoor sowie die der Messstellen R066-10 und R140-20 wurden für diese Auswertungen nicht herangezogen, da hier für den Zeitraum 2009 bis 2019 keine durchgehenden Messungen des Grundwasserstands erfolgt sind bzw. die Werte der Messstelle R140-20 im Untersuchungszeitraum zudem fehlerhaft waren.

6.4.1 Betrachtung der Monatsmittelwerte der Grundwasserstände

Ein direkter Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge, Temperatur und mittlerem Grundwasserstand ist mit Hilfe dieser Auswertungen nicht zu erkennen. So führten die hohen Niederschlagsmengen im Februar 2020 zu einem deutlichen Anstieg der Grundwasserstände. Die zum Teil hohen Niederschlagsmengen in den Sommermonaten wirkten sich dagegen nicht eindeutig erkennbar aus. Möglicherweise führten die höheren Temperaturen in diesem Zeitraum zu einer höheren Verdunstung und somit zu einer entsprechenden Absenkung der Grundwasserstände. Dennoch sind die überdurchschnittlich hohen Grundwasserstände im Juli 2020 auffällig und möglicherweise ein Hinweis auf einen Einfluss durch die Tidesteuerung (siehe Abbildung 57).

Die Auswertungen in Abbildung 57 zeigen, dass im Juni 2020, und damit im Wesentlichen vor Beginn der Tidesteuerung, die Grundwasserstände durchschnittlich um rund 7 % unter den langjährigen Mittelwerten lagen. Eine Ausnahme bilden die Messstellen R037-14 und Tb 1-18, hier lagen die Grundwasserstände im Mittel um rund 15 % darüber. Überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen wurden an den DWD-Messstationen 3867 mit 172,9 mm und sowie im Mittel der Stationen 2181 und 296 mit 95 mm gemessen. Diese Messstationen befinden sich nahe der Grundwassermessstellen R077-66 und R037-14. Die Temperatur lag in diesem Monat bei 16,7 °C und damit über dem langjährigen Mittel von 15,5 °C.

Im Juli, während der Phase I und einer längeren Unterbrechung der Tidesteuerung, ist an allen Messstellen einen Anstieg der Grundwasserstände durchschnittlich rund 17 % gegenüber den

langjährigen Monatsmittelwerten der Jahre 2009 bis 2019 festzustellen. Die gemessenen Niederschläge lagen im Juli dagegen an allen Messstationen unter dem Durchschnitt und auch die Temperatur lag mit 16,2 °C darunter.

Auch im August, indem die Tideniedrigwasseranhebung in geringerer Intensität und danach die Flutstromtidesteuerung durchgeführt wurden, lagen die Grundwasserstände, mit Ausnahme der Grundwassermessstelle R133-28, im Schnitt rund 6 % über den langjährigen Mittelwerten. Die gemessenen Niederschlagsmengen lagen im August 2020 rund ein Drittel über den langjährigen Mittelwerten und auch die Temperatur lag mit deutlich über dem Durchschnitt.

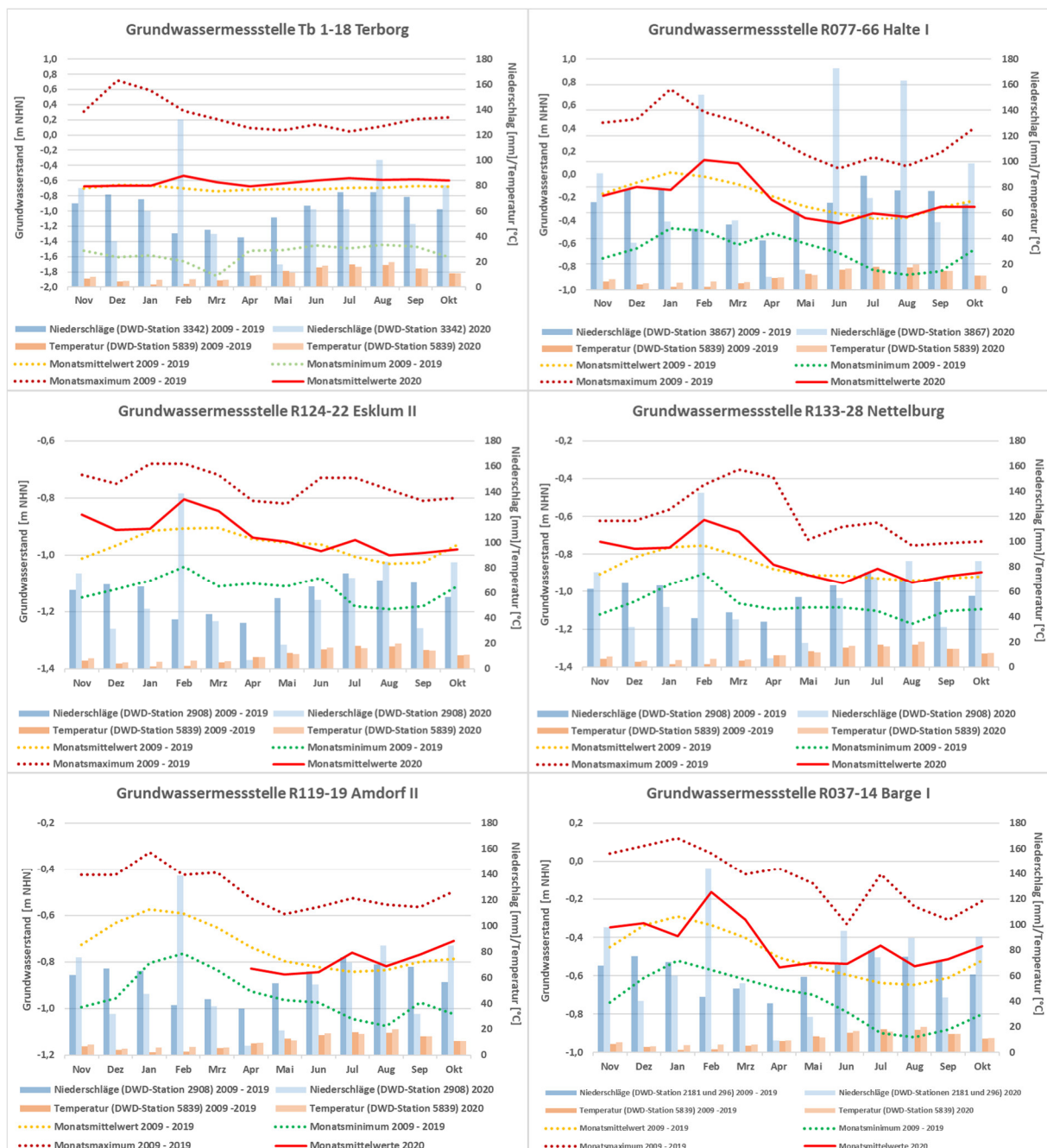


Abbildung 57: Auswertung der mittleren, monatlichen Grundwasserstandsganglinien im Bereich der Ems und im Leda-Jümme-Gebiet zusammen mit der Auswertung der Niederschlagsmengen sowie den Temperaturmessungen des DWD der Jahre 2009 bis 2019 und 2020 (Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), <https://cdc.dwd.de/>)

6.4.2 Betrachtung der Tagesmittelwerte der Grundwasserstände

Um festzustellen, ob die jeweiligen Phasen der Tidesteuerung die Grundwasserstände kurzfristig beeinflussen, wurden die Grundwasserstandentwicklungen anhand der Tagesmittelwerte für den Zeitraum vom 01.06. - 31.08.2020 ausgewertet, so dass auch das Geschehen vor Beginn und nach Beendigung der Tidesteuerung Berücksichtigung fand. Neben den Grundwasserganglinien sind die Tagessummen der Niederschläge der jeweils nächstgelegenen DWD-Messstationen dargestellt, um eine mögliche Beeinflussung durch die einzelnen und zum Teil starken Niederschlagsereignisse zu erkennen (vgl. Kapitel 4.1.1.1). Darüber hinaus wurde die kumulierte Anzahl der Steuerungen in den Auswertungen betrachtet (siehe Abbildung 58 bis Abbildung 60). Anhand dieser Auswertungen lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Tidesteuerung und der kurzfristigen Entwicklung der Grundwasserstände erkennen. Zwar scheinen einige Grundwasserstände, zumindest zeitweise den zu erwarteten Verläufen durch die Tidesteuerung zu entsprechen, jedoch ist dies nicht durchgängig der Fall. Einige Ganglinien zeigen teilweise eine unmittelbare Reaktion auf Niederschläge, jedoch ist der Ganglinienverlauf im Ganzen diesbezüglich nicht eindeutig. Es ist durchaus denkbar, dass ein Teil der lokal, sehr unterschiedlich verteilten Niederschlagsereignisse im Nahbereich der Grundwassermessstellen nicht durch die Messstationen aufgezeichnet wurde. Auch ein Einfluss durch weitere Faktoren ist wahrscheinlich.

6.4.2.1 Entwicklung der Grundwasserstände entlang der Ems

Der Grundwasserstand der Messstelle Tb 1-18 steigt zu Beginn der Phase I am 30.06 kurzzeitig, zunächst um rund 54 %. Im weiteren Verlauf sinkt der Grundwasserspiegel mit schwächer werdenden Schwankungen bis zum 23.07. (Unterbrechung der TnWA) um rund 61 %. Bis zu Beginn der Phase II steigt der Grundwasserstand erneut um ein Drittel an. Im Verlauf der Phasen II und III sinkt der Grundwasserstand bis zum 17.08. weiter um rund 39 %. Nach Beendigung der Phase III steigt der Grundwasserstand wieder deutlich an (siehe Abbildung 58).

Der Grundwasserstand der Messstelle R077-66 steigt während der Phase I zunächst langsam an und beginnt ab dem 15.07. wieder leicht zu sinken. Insgesamt stieg der Grundwasserstand, im Verlauf der Phase I, um rund ein Drittel. Während der Unterbrechung der TnWA sank der Grundwasserspiegel um rund 14 %. Im Verlauf der Phase II sank der Grundwasserstand weiter, um 27 %. In Phase III steigt der Grundwasserspiegel wieder leicht, um 6% an (siehe Abbildung 58).

Die Grundwassermessstellen an der Ems zeigen während der Tidesteuerung unterschiedliche Verläufe. Ein Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Grundwasserstände entlang der Ems und den gesteuerten Tiden ist nicht zu erkennen, da der Verlauf der Ganglinien sich nicht analog zur kumulierten Anzahl der Tideniedrigwasseranhebungen verhält. Niederschläge spielten hier vermutlich nur vereinzelt eine Rolle. So könnten die starken Anstiege der Grundwasserstände an der Messstelle Tb 1-18 zu Beginn der Phasen I und II jeweils mit starken, lokalen Niederschlagsereignissen in Zusammenhang stehen, welche nicht von der DWD-Station Moormerland-Neermoor erfasst wurden.

6.4.2.2 Entwicklung der Grundwasserstände im Leda-Jümme-Gebiet

Die Ganglinien der Grundwassermessstellen R024-22, R133-28 und R019-19 verhalten sich ähnlich zum Verlauf der Ganglinie der Grundwassermessstelle R077-66. Unterschiede gibt es bei den Niederschlägen. An der Messstation Leer wurden deutlich mehr Niederschlagstage, mit höheren Niederschlagsmengen, aufgezeichnet als an den übrigen Messstationen. In der Phase I gab es insgesamt 16 Niederschlagstage mit zum Teil hohen Niederschlagsmengen von bis zu 16,9 mm/d. Mit den häufigeren und zum Teil starken Niederschlägen, die insbesondere in der ersten Hälfte der Phase

I fielen, stiegen die Grundwasserstände leicht an. In der zweiten Hälfte der Phase I ließen Häufigkeit und Menge der Niederschläge nach und die Grundwasserstände sanken wieder. Zwischen Beginn und Ende der Phase I beträgt die Absenkung der Grundwasserstände durchschnittlich rund 6 %. Während der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung gab es zwei Niederschlagstage, mit 7,9 mm und 0,3 mm Niederschlag. In diesem Zeitraum sanken die Grundwasserstände leicht zwischen 3 und 8 %. In der Phase II gab es insgesamt drei Niederschlagstage mit 5,7 mm, 3 mm und 1 mm Niederschlag. In diesem Zeitraum sanken die Grundwasserstände weiter um durchschnittlich 3 % und erreichten mit Beginn der Phase III ihr Minimum. Während der Phase III fiel täglich Niederschlag mit einer Menge von insgesamt 26 mm. Die Grundwasserstände begannen wieder zu steigen. Nach Beendigung der Tidesteuerung nahmen Niederschlagshäufigkeit und Menge wieder zu und auch die Grundwasserstände stiegen weiter (siehe Abbildung 59).

Die Ganglinien der beiden Grundwassermessstellen R066-10 und R037-14 verlaufen sehr unterschiedlich. So ist der Grundwasserstand an der Messstelle R066-10 im Verlauf der Phase I um 15 % gestiegen und an der Messstelle R037-14 um 8 % gesunken. Während der Unterbrechung der TnWA ist der Grundwasserstand an der Messstelle R066-10 um 8% gesunken und an der Grundwassermessstelle R037-14 um 8 % gestiegen. Während der Phase II sind die Grundwasserstände an beiden Grundwassermessstellen deutlich im Mittel um rund 44 % gesunken. Im Verlauf und nach Beendigung der Phase III ist der Grundwasserstand an der Messstelle R037-14 und R066-10 mit 53 % und 75 % wieder deutlich gestiegen. Bei beiden Messstellen setzt sich der Anstieg nach Beendigung der Phase III fort (siehe Abbildung 59).

Ein Einfluss der Tidesteuerung auf die Grundwasserstände im Leda-Jümme Gebiet ist nicht zu erkennen. Eher scheinen die Niederschläge den Verlauf der Grundwasserstände zu beeinflussen. Eine Beurteilung in welchem Maße die Tidesteuerung, die Niederschläge oder auch andere Faktoren den Verlauf der Ganglinien beeinflussen ist nicht möglich. Die unterschiedlichen Verläufe der beiden Grundwassermessstellen R066-10 und R037-10 könnten zudem in Zusammenhang mit der Entfernung zu den Tidegewässern sowie der Entfernung zum Emssperrwerk (ESW) stehen.

6.4.2.3 Entwicklung der Grundwasserstände an der Deponie Breinermoor:

Der Verlauf der Ganglinien G62-9, G59-9 und G33-10 ähnelt ebenfalls denen der Messstellen R077-66, R024-22, R133-28 und R019-19. Die nächstliegende DWD-Station ist die Station Leer an der, wie oben beschrieben, deutlich mehr Niederschlagstage, mit höheren Niederschlagsmengen, aufgezeichnet wurden als an den übrigen Messstationen. So steigen die Grundwasserstände auch hier im Verlauf der Phase I zunächst an und begannen ab dem 15.07. wieder zu sinken. Der Anstieg im Verlauf der Phase I beträgt in diesem Zeitraum insgesamt durchschnittlich rund 8 %. Während der Unterbrechung der TnWA sanken die Grundwasserstände im Schnitt um rund 2%. Im weiteren Verlauf sanken die Grundwasserstände weiter bis zu Beginn der Phase III um durchschnittlich rund 5%. Während der Phase III steigen die Grundwasserstände um im Mittel um rund 2 % (siehe Abbildung 60).

Auch hier ist aufgrund der hohen Niederschlagstage und -mengen kein Einfluss der Tidesteuerung auf die Grundwasserstände zu erkennen, da die Ganglinien keinen eindeutigen Verlauf zeigen und nicht beurteilt werden kann in welchem Maße die Niederschläge oder auch andere Faktoren deren Verlauf beeinflussen.

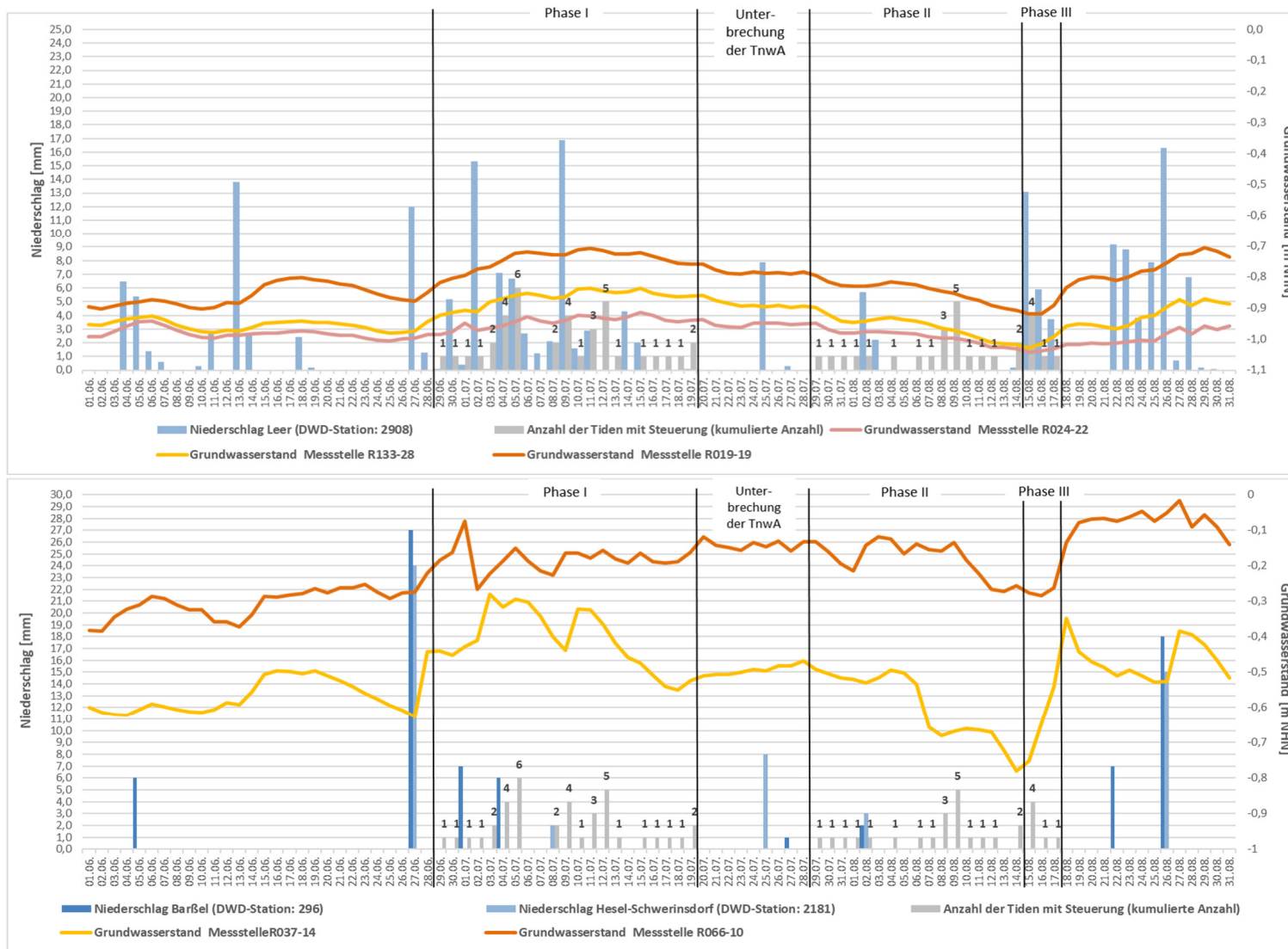


Abbildung 59: Tagesmittelwerte des Grundwasserstands im Leda-Jümme-Gebiet an den Messstellen R024-22, R133-28 und R019-19, in Zusammenhang mit den Tagessummen der Niederschlagsmenge der Messstation Leer (DWD-Station: 2908) und der Messstellen R037-14 und R066-10, in Zusammenhang mit den Tagessummen der Niederschlagsmenge der Messstationen Hesel-Schwerinsdorf (DWD-Station: 2181) und Barßel-Loher Ostmark (DWD-Station: 296) sowie jeweils die kumulierte Anzahl der Tiden mit Steuerung vom 01.06.- 31.08.2020 (Quelle Niederschlagsdaten: Deutscher Wetterdienst (DWD), <https://cdc.dwd.de/>)

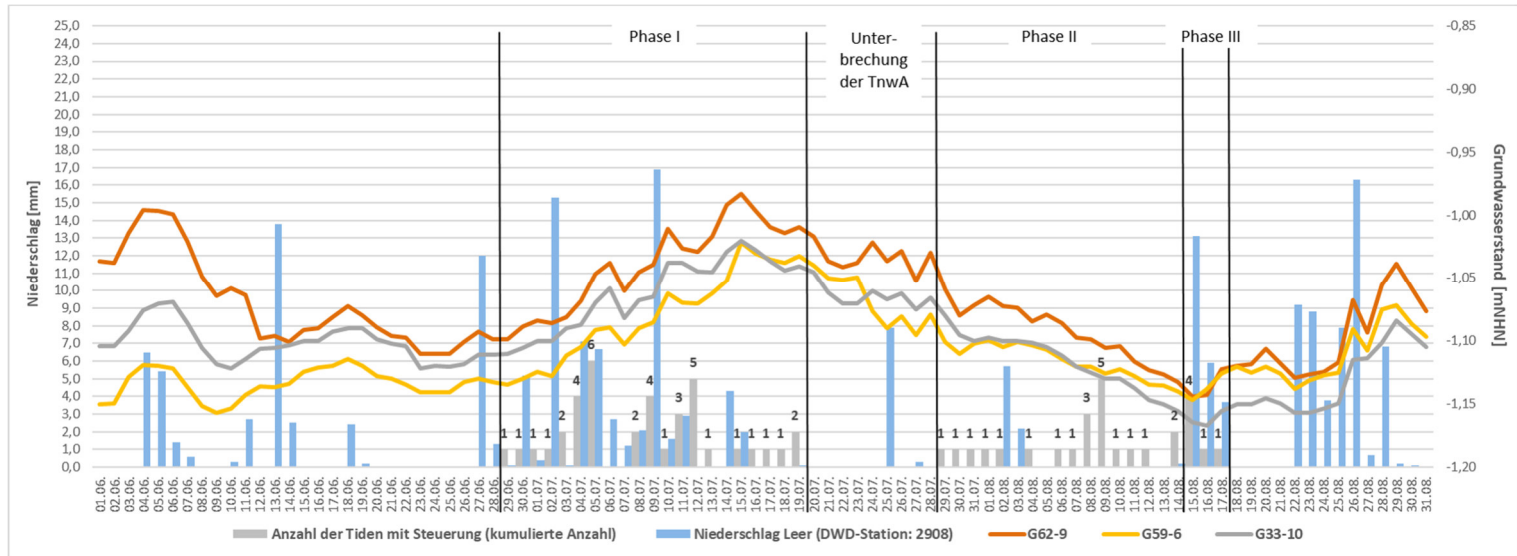


Abbildung 60: Tagesmittelwerte des Grundwasserstands an der Deponie Breinermoor an den Messstellen G62-9, G59-6 und G33-10, in Zusammenhang mit den Tagessummen der Niederschlagsmenge der Messstation Leer (DWD-Station: 2908) sowie die kumulierte Anzahl der Tiden mit Steuerung vom 01.06.- 31.08.2020 (Quelle Niederschlagsdaten: Deutscher Wetterdienst (DWD), <https://cdc.dwd.de/>)

6.4.3 Betrachtung der zeitlich höher aufgelösten Messwerte der Grundwasserstände

Um zu erkennen, ob es grundsätzlich eine Beeinflussung der Grundwasserstände durch die Tidesteuerung gibt, wurden die Grundwasserstandsganglinien mit den Messwerten des jeweils nächstgelegenen Oberflächengewässerpegels anhand von 30-Minutenwerten für den Zeitraum vom 03.08. bis 13.08.2020 verglichen. Dieser Zeitraum ist von Niederschlägen unbeeinflusst und umfasst elf freie sowie zehn gesteuerte Tiden (Tideniedrigwasseranhebung, Phase II), von denen fünf zwischen dem 07.08. und 09.08.2020 aufeinanderfolgend gesteuert wurden.

6.4.3.1 Verhalten der Grundwasserstände an der Ems

Diese Auswertung zeigt, dass die Grundwasserstände in der Nähe von Tidebeeinflussten Gewässern auf die Tideniedrigwasseranhebung reagieren. Was mit der direkten Kommunikation der Oberflächengewässer mit dem Grundwasser zusammenhängt. Diese Reaktionen werden mit zunehmender Entfernung vom Emssperrwerk, Tidebeeinflusstem Gewässer und Filtertiefe der Grundwassermessstelle geringer. Die Messstelle R037-14 sowie die Messstellen an der Deponie Breiner Moor zeigen stark verzögerte, bis hin zu keiner erkennbaren Reaktion auf die Tideniedrigwasseranhebung.

In Abbildung 61 ist zu erkennen, dass der Tideeinfluss auf das Grundwasser mit größer werdender Entfernung zum Emssperrwerk und zunehmender Filtertiefe der Grundwassermessstelle abnimmt. So haben die Amplituden an der Grundwassermessstelle Tb 1-18 in der Nähe des Emssperrwerks bei freien Tiden in diesem Zeitraum im Mittel eine Höhe von 108 cm. Bei gesteuerten Tiden mit Tideniedrigwasseranhebung zeigt die Amplitude eine Veränderung um rund 35 %. Dabei beträgt die Veränderung im oberen Scheitel rund 47 % und im unteren Scheitel 21 %. An der Grundwassermessstelle R077-66 beträgt die Amplitude bei freien Tiden im Mittel 32 cm und damit rund Dreiviertel weniger als an der Messstelle Tb1-18. Während einer gesteuerten Tide beträgt die Veränderung der Amplitude im Mittel 26 %. Am oberen Scheitel beträgt die Veränderung an der Messstelle R077-66 12%, am unteren Scheitel 7 %.

Bei beiden Messstellen ist zudem die in Kapitel 6.2.1 beschriebene Schwallwelle, während der Tideniedrigwasseranhebung zu erkennen.

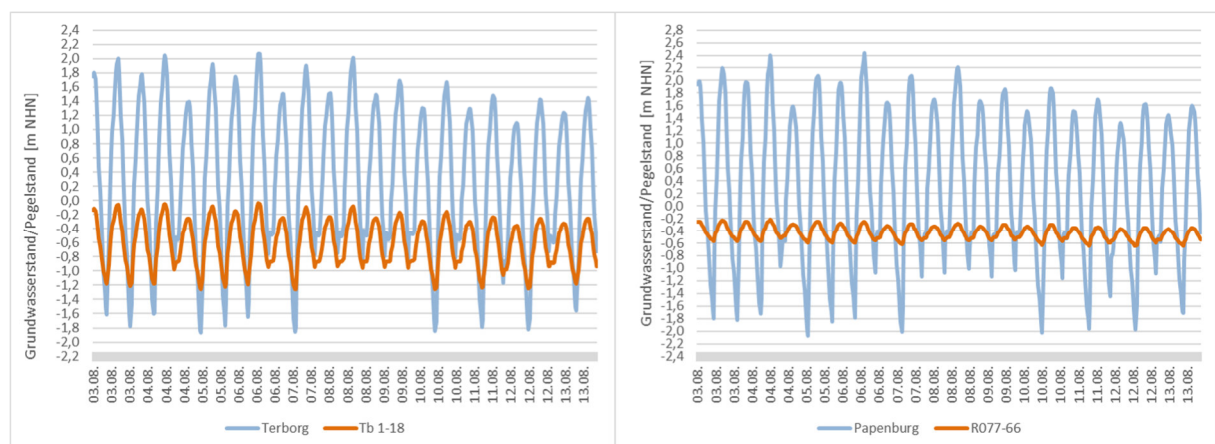


Abbildung 61: Vergleich der Grundwasserstandsganglinien der Messstelle Tb 1-18 mit den Messwerten des Oberflächengewässerpegels Terborg sowie der Grundwasserstandsganglinien der Messstelle R077-66 mit den Messwerten des Oberflächengewässerpegels Papenburg anhand von 30-Minutenwerten für den Zeitraum vom 03.08. bis 13.08.2020.

6.4.3.2 Verhalten der Grundwasserstände im Leda-Jümme-Gebiet:

An Leda und Jümme erreichen die Amplituden der Grundwasserstände durchschnittlich Höhen zwischen 5 und 10 cm. Die Hübe nehmen auch hier mit zunehmender Entfernung zum Emssperrwerk ab. Anders verhalten sich die beiden Grundwasserstände an den Messstellen R066-10 und R037-14. So ist die Amplitude der Messstelle R066-10 mit durchschnittlich 54 cm deutlich größer, als die der Messstellen R024-22, R133-28 und R019-19. Dies ist durch die flachere Verfilterung von 8 - 10 m sowie durch die unmittelbare Nähe zur Jümme mit nur 6 m Entfernung zu erklären. Die Amplitude der Grundwassermessstelle R037-14 ist mit einer mittleren Höhe von 7 cm etwas höher, als die der näher zum Emssperrwerk gelegenen Messstelle R019-19 mit 5 cm. Möglicherweise ist auch hier die geringere Filtertiefe ursächlich. Darüber hinaus reagiert die Grundwassermessstelle R037-14 deutlich verzögert auf die Tiden. Dies ist vermutlich auf die große Entfernung von 27 km zum Emssperrwerk sowie zur Jümme mit 523 m zurückzuführen. Die verzögerte Reaktion der Messstelle R037-14 auf die Tide führt dazu, dass die gemessenen Grundwasserstände zeitlich nicht mehr eindeutig dem Tidegeschehen zugeordnet werden können, weshalb detailliertere Auswertungen für diese Messstelle nicht vorgenommen wurden (siehe Abbildung 62).

Des Weiteren zeigen die Grundwasserstände in diesem Zeitraum an allen Messstellen sinkende Tendenzen, die insbesondere an der Messstelle R037-14 deutlich zu erkennen sind. Dies hängt vermutlich mit den zunehmend steigenden Temperaturen von etwa 15°C zu Beginn des Betrachtungszeitraumes bis hin zu rund 25 °C zum Ende des Zeitraumes zusammen.

Während einer Tideniedrigwasseranhebung zeigen die Amplituden im Schnitt eine Veränderung von rund 30 %. Die größten Veränderungen wurden an der Grundwassermessstelle R024-22 mit 35 % gemessen und die geringsten Änderungen an Messstelle R066-10 mit 19,5 %. Die Änderungen bei den oberen Scheiteln lag im Mittel bei 21,6 % und bei den unteren Scheiteln bei 7,1 %. Die größte Änderung bei den oberen Scheiteln gab es an der Messstelle R066-22 mit 64,8 %, die geringste an der Messstelle R024-22 mit 1,7 %. Bei den unteren Scheiteln lagen die Veränderungen zwischen 21,2 % an der Messstelle Tb 1-18 und 0,3 % an der Messstelle R019-19 (siehe Abbildung 62).



Abbildung 62: Vergleich der Grundwasserstandsganglinien der Messstellen R024-22 und R133-28 mit den Messwerten des Oberflächengewässerpegels Leer-Leda, der Grundwasserstandsganglinien der Messstelle R019-19 mit den Messwerten des Oberflächengewässerpegels Wiltshausen, der Grundwasserstandsganglinien der Messstelle R066-10 mit den Messwerten des Oberflächengewässerpegels Stickhausen sowie der Grundwasserstandsganglinien der Messstelle R037-14 mit den Messwerten des Oberflächengewässerpegels Barge anhand von 30-Minutenwerten für den Zeitraum vom 03.08. bis 13.08.2020.

6.4.3.3 Verhalten der Grundwasserstände an der Deponie Breinermoor

An der Deponie Breinermoor sind an den Grundwassermessstellen G33-10, G59-6 und G62-9 keine unmittelbaren Reaktionen der Tideniedrigwasseranhebung auf die Grundwasserstände zu erkennen (siehe Abbildung 63). Daher ist eine Auswertung, wie sie für die Grundwassermessstellen an der Ems oder im Leda-Jümme Gebiet durchgeführt worden sind nicht sinnvoll, weshalb an dieser Stelle darauf verzichtet wird.

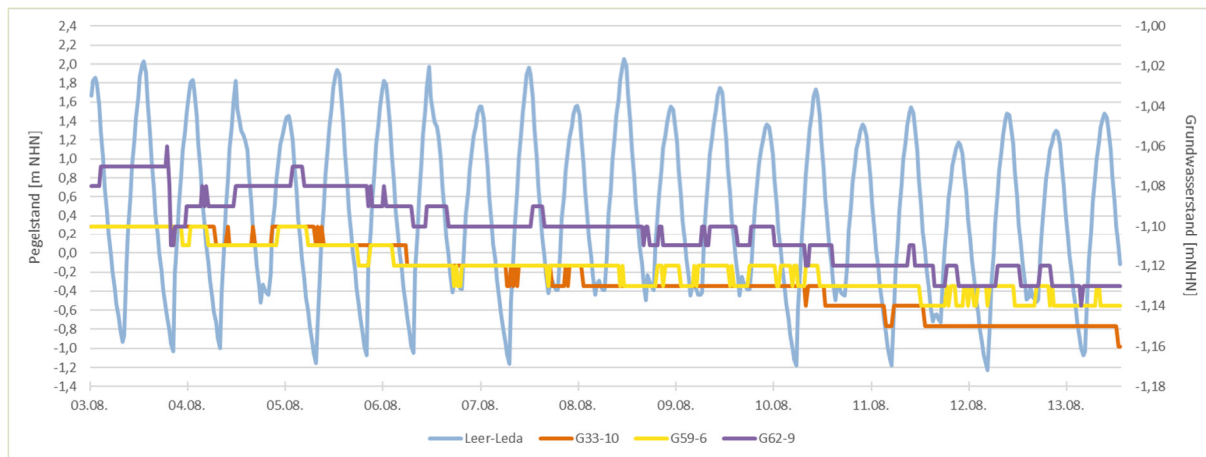


Abbildung 63: Vergleich der Grundwasserstandsganglinien der Messstellen G33-10, G59-6 und G62-9 mit den Messwerten des Oberflächengewässerpegels Leer-Leda anhand von 30-Minutenwerten für den Zeitraum vom 03.08. bis 13.08.2020.

Diese Auswertung zeigt, dass die Grundwasserstände in der Nähe von Tidebeeinflussten Gewässern auf die TnWA reagieren. Was mit der direkten Kommunikation der Oberflächengewässer mit dem Grundwasser zusammenhängt. Diese Reaktionen werden mit zunehmender Entfernung vom Emssperrwerk, Tidebeeinflusstem Gewässer und Filtertiefe der Grundwassermessstelle geringer. Die Messstelle R037-14 sowie die Messstellen an der Deponie Breinermoor zeigen stark verzögerte, bis hin zu keiner erkennbaren Reaktion auf die TnWA.

6.5 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Strömungsverhältnisse der Ems

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)²⁵

Strömungsdaten werden laufend und ergänzend zu den Wasserstandsdaten erhoben und gewähren differenziertere Einblick in das Ästuargeschehen. Analog zu den Wasserstandsdaten liefern längere Zeitreihen einer oder mehrerer Messstationen umfassendere Informationen als begrenzte Einzelmessungen. Sinngemäß wird dort intensiver ausgewertet, wo ein Sachverhalt zusätzlicher Klärung bedarf. Eine Einschränkung ist, dass Strömungsgeschwindigkeiten mit den zur Verfügung stehenden Geräten nicht in der Fahrrinne, sondern bei laufender Schifffahrt nur außerhalb des Tonnenstriches gemessen werden können. Ergebnisse zu Strömungsrichtung, -betrag sowie weiterer Parameter (Temperatur, Druck, Salinität, Trübung und Sauerstoff) werden standardmäßig alle 5 Minuten geschrieben, Wasserstände liegen jede Minute vor.

6.5.1 Veränderung der maximalen Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Tideniedrigwasseranhebung

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Auswertung exemplarisch für vier Stationen ober- bzw. unterhalb des ESW für den Monat Juli mit 26 beeinflussten und 34 unbeeinflussten Tiden. Die Wirkung der TnWA betrifft gleichermaßen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten. Die Auswirkungen auf die Flut sind jedoch bedeutsamer. Die Abnahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten bei Emden NS von ca. 8 % im beeinflussten Zustand steht neben unauffälligen Veränderungen nahe 0 %

²⁵ Siehe auch gesonderten Bericht des WSA Ems-Nordsee im Anhang: KREBS 2021; Technischer Test 2020 – Ergebnisbericht des WSA Ems-Nordsee zum durchgeführten Monitoring; Emden Dezember 2021

der übrigen Stationen. Die Ursache für diese größere Variabilität liegt in der für diese Station größeren Variabilität der Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt. Die Unstetigkeiten in der Sohle im Bereich des Borßumer Sieltiefs sowie der Ablagerungsdynamik im dort vorhandene Kolk werden hier als mögliche Ursache für die Inhomogenität der Strömung gesehen. Die stärksten Reduktionen der Flutstromgeschwindigkeit, ausgedrückt in % der unbeeinflussten Strömungsgeschwindigkeit finden sich bei Terborg.

		Messpfahl EFW [cm/s]	Emden [cm/s]	Terborg [cm/s]	Papenburg [cm/s]
Ebbe	v_{emax} unbeeinflusst	107,50	154,14	105,93	83,60
	v_{emax} beeinflusst	107,05 (<1%)	142,38 (-8%)	106,03 (+/- 0%)	85,64 (+2%)
Flut	v_{fmax} unbeeinflusst	117,95	154,84	135,30	86,92
	v_{fmax} beeinflusst	91,24 (-23%)	104,73 (-32%)	83,87 (-38 %)	71,47 (-17%)

Tabelle 51: gemittelte maximale Ebb- und Flutstromgeschwindigkeiten im Juli 2020 an ausgewählten Stationen

Die nachfolgende Abbildung 64 zeigt je gelaufener Ebbe die maximale Strömungsgeschwindigkeit für den Monat Juli für die Station Messpfahl Emden Fahrwasser bei Ems-km 47,33 sowie die Station Emden Neue Seeschleuse. Die durch die TnWA beeinflussten mittleren Ebbstromgeschwindigkeiten sind farblich (orange) von den unbeeinflussten getrennt. Der höchste Wert (kurz vor dem 06.07.20) ist unbeeinflusst und liegt im Springzeitraum. Die Station Messpfahl zeigt im Vergleich zu den unbeeinflussten Werten weiterhin keine nennenswerten Auffälligkeiten.

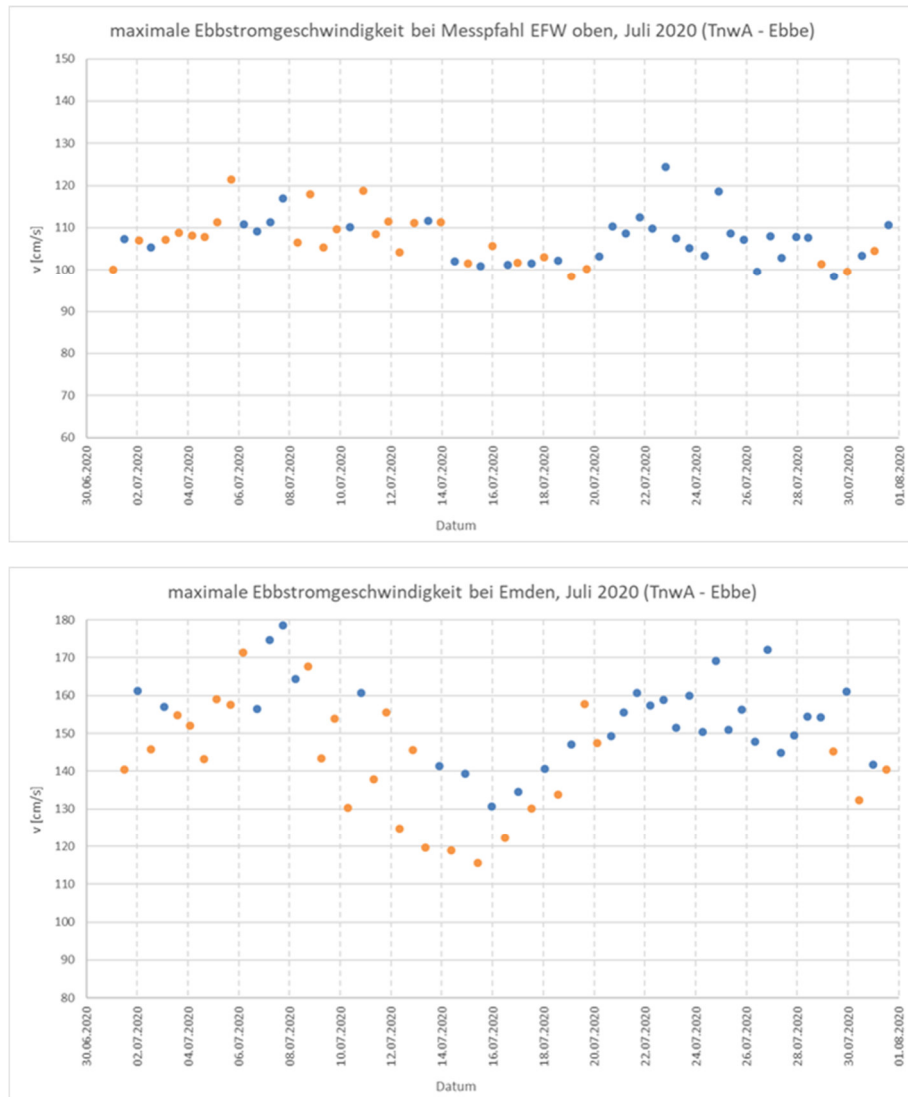


Abbildung 64: maximale Ebbstromgeschwindigkeiten für die Station Messpfahl Emders Fahrwasser (oben) sowie Emden Neue Seeschleuse (unteres Bild)

Etwas deutlicher gestaltet sich die Situation sich im Hinblick auf beeinflusste/unbeeinflusste maximale Flutstromgeschwindigkeiten. Die TnWA verhindert vor allem am Anfang der Flutphase die typischerweise hohen Flutstromgeschwindigkeiten. Dies wirkt sich je nach Steuerung des ESW sehr deutlich auf die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten, d.h. die nachfolgend aufgetragenen Werte auf. Erkennbar ist weiterhin, dass die mittleren Ebbstromgeschwindigkeiten geringeren Schwankungen unterliegen als die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten.

In den nachfolgenden beiden Abbildungen wird neben den Auswirkungen der TnWA auch der individuelle Charakter von Strömungsmessungen an unterschiedlichen Stellen deutlich. Die Stationen

Messpfahl (Ems-km 47,33, grün) und Emden NS (Ems-km 39,97, rot) liegen ca. 7,4 km voneinander entfernt und auf unterschiedlichen Fahrwasserseiten.

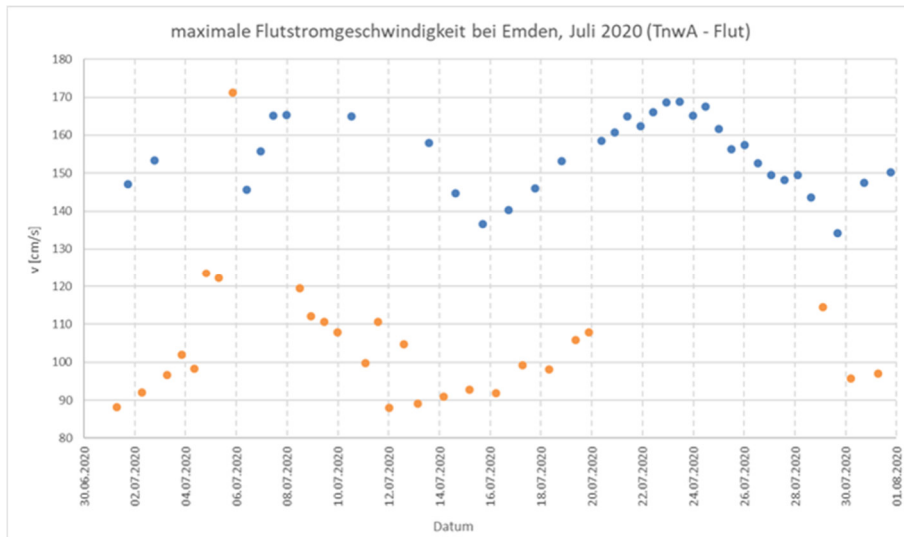
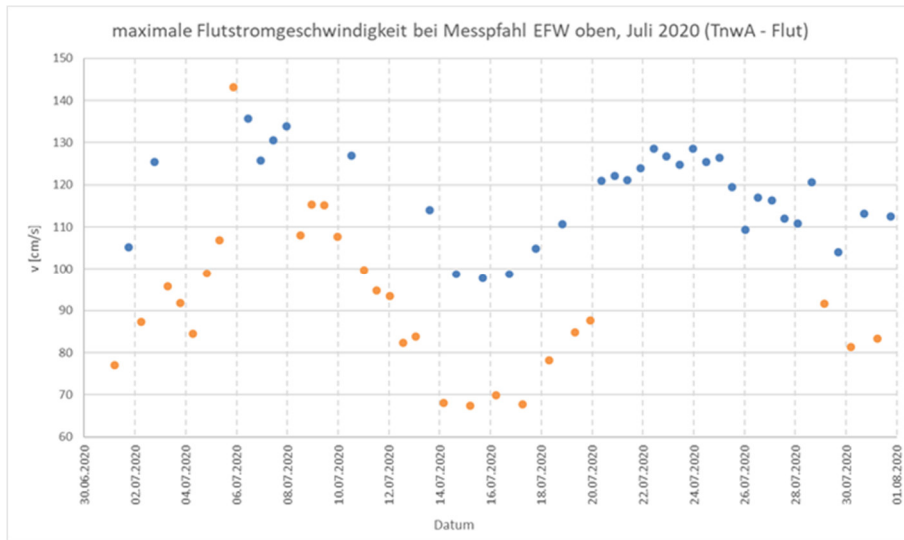


Abbildung 65: maximale Flutstromgeschwindigkeiten für die Station Messpfahl Emders Fahrwasser (oben) sowie Emden Neue Seeschleuse (unteres Bild)

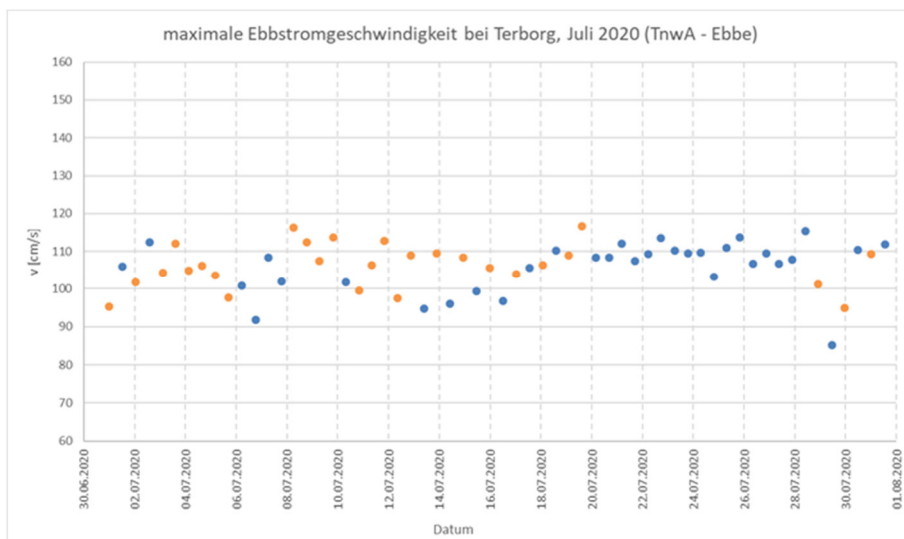


Abbildung 66: maximale Ebbestromgeschwindigkeiten für die Station Terborg

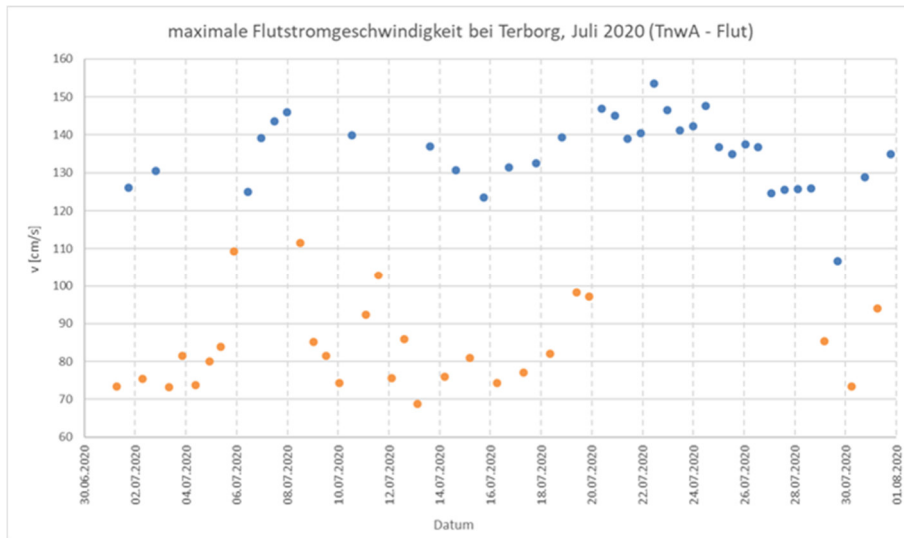


Abbildung 67: maximale Flutstromgeschwindigkeiten für die Station Terborg

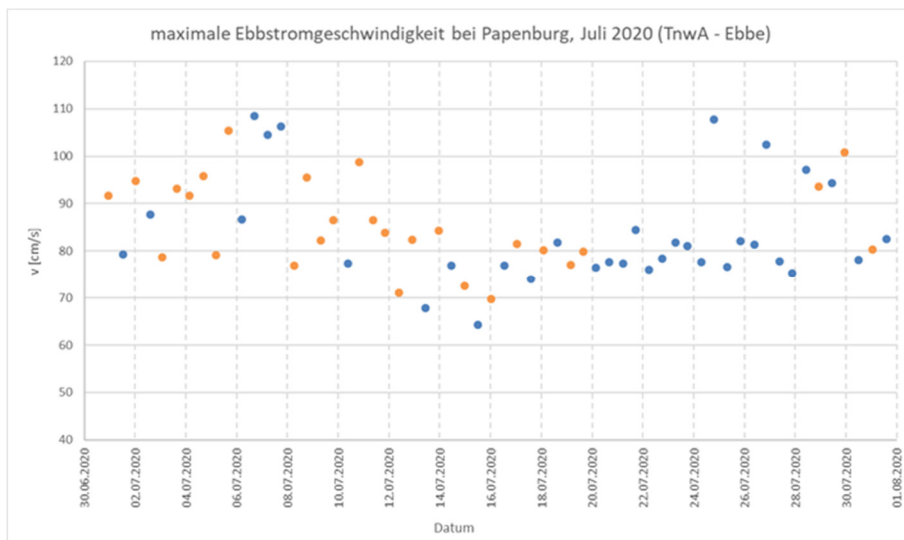


Abbildung 68: maximale Ebbstromgeschwindigkeiten für die Station Papenburg

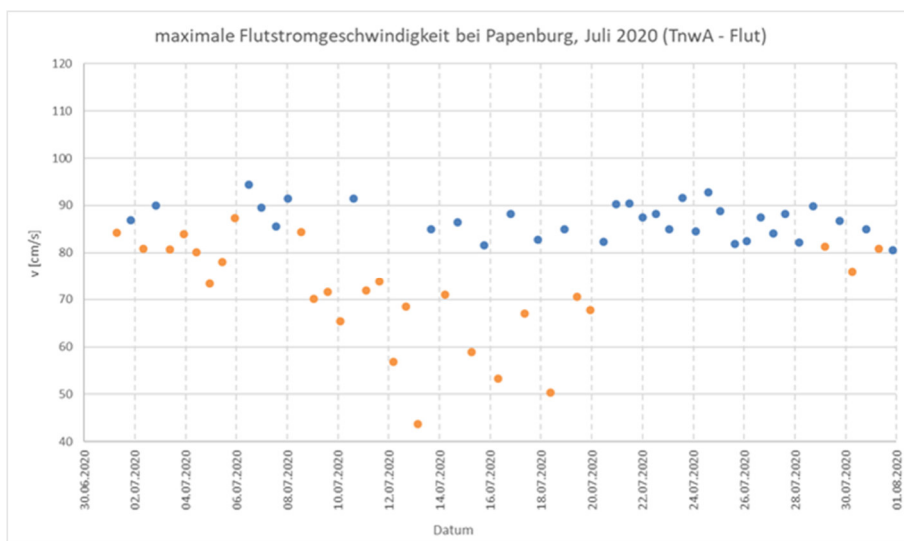


Abbildung 69: maximale Flutstromgeschwindigkeiten für die Station Papenburg

6.5.2 Veränderung der gemittelten Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Flutstromtidesteuerung

Die Reduktion der transportwirksamen großen Flutstromgeschwindigkeiten ist Hauptwirkung der FsTs. Die Reduktion stellt sich in Abhängigkeit des gewählten Verschlussgrades am ESW ein und ist damit regelbar. Durch die geringe Anzahl der gesteuerten Tiden bietet sich die qualitative Aufarbeitung eher als eine statistische Untersuchung an. Die eingetretene Wirkung war im Nahfeld des ESW am größten und nahm in Richtung Papenburg deutlich ab. Größenordnungsmäßig werden die stärksten Flutstromgeschwindigkeiten bei Terborg um 20 – 30 % reduziert, bei Leer etwa 20 – 40 % und bei Papenburg etwa bis 10 %. Die Reduktion der TnWA ist im Vergleich dazu bedeutend größer.

6.6 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände und Strömungen der Ems und Leda (begleitende Modelluntersuchung)

Bearbeitet von Anton Rosenhagen (BAW) mit Ergänzungen von Andreas Engels (NLWKN)

Um die Wirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände und Strömungen beschreiben zu können, wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau ein Hydrodynamisch-Numerisches (HN-) Modell eingesetzt. Unter Berücksichtigung der realen Tide- und Abflussbedingungen an den Modellrändern sowie der realen Windverhältnisse erfolgten Rechenläufe mit und ohne Tidesteuerung. Anhand der Berechnungen können die Unterschiede der gesteuerten Tiden zum Referenzfall (ohne Steuerung) nachvollzogen werden.

Die Tideniedrigwasseranhebung verformte die Tidewelle und bildete eine Sunkwelle in Richtung Knock aus, die aus Messungen und Modell in ähnlicher Größe abzulesen ist. In der Ems bis Herbrum trat ein Tideniedrigwasser ein, dessen Höhe und Eintrittszeitpunkt direkt vom Schließzeitpunkt bzw. Schließwasserstand des ESW abhing. Auch diese Höhe wurde durch das Modell in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten berechnet. Das Wasserstandsniveau, das sich oberhalb des Emssperrwerks nach Durchgang der Schwallwelle für rund 2 Stunden bis zum Einsetzen der Flut einstellte, wurde nicht explizit bewertet.

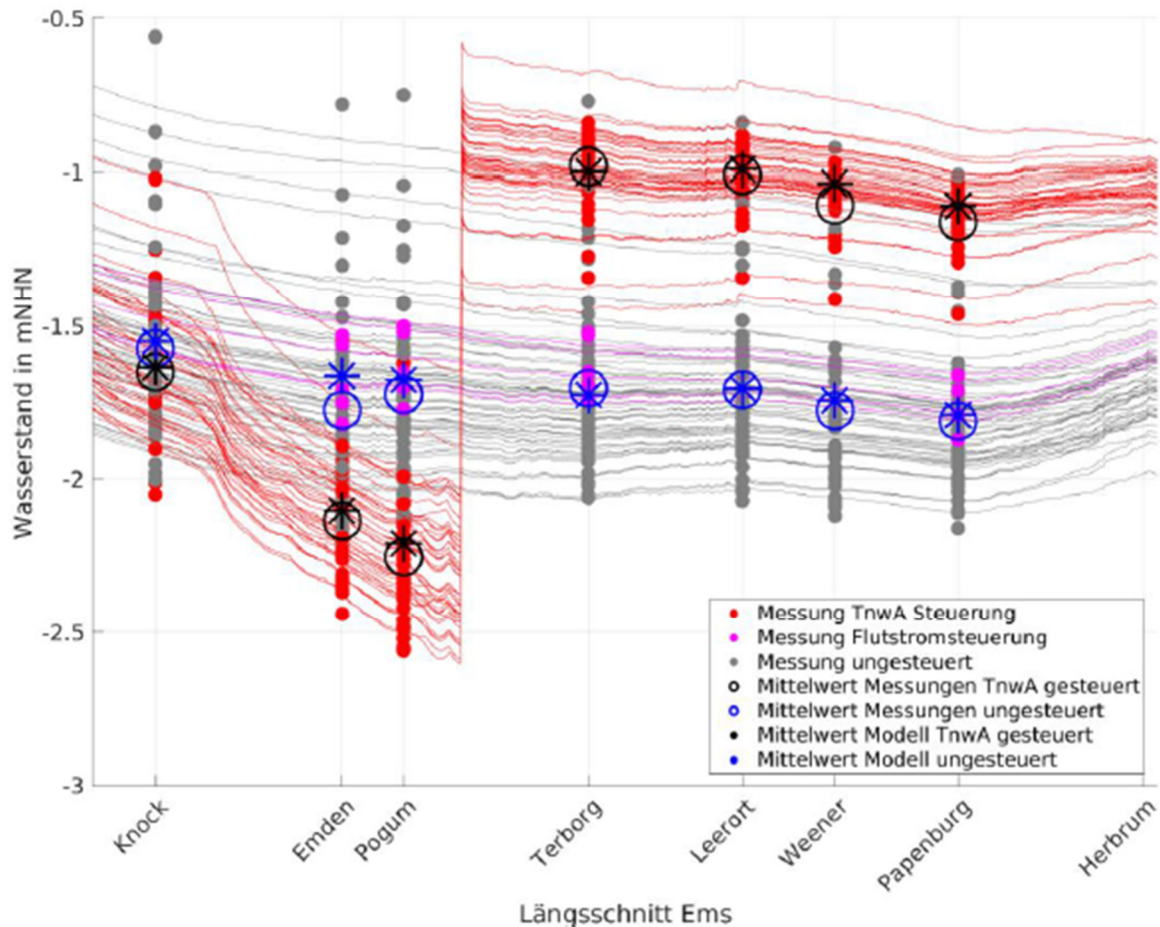


Abbildung 70: Längsprofil der Tideniedrigwassershöhen in der Fahrrinnenmitte der Ems von etwa Knock bis zum Tidewehr Herbrum. Die rot gefärbten Linien zeigen den berechneten Verlauf des Tideniedrigwassers der Tiden, in denen eine Tideniedrigwasseranhebung stattfand. Zur Darstellung der Berechnungsgüte sind ebenfalls die an den jeweiligen Pegeln gemessenen Tideniedrigwasser eingezeichnet (rote Punkte). Die magenta gefärbten Linien zeigen den berechneten Verlauf des Tideniedrigwassers der Tiden, in denen eine Flutstromtidesteuerung stattfand und die magenta Punkte die entsprechenden Messwerte. Die grau gefärbten Linien und Punkte betreffen die ungesteuerten Tiden während des betrachteten Zeitraums. Darüber hinaus sind die Tideniedrigwasserstände an den Positionen der Pegel zu Mittelwerten zusammengefasst (Sterne = Modell, Kreis = Messwert).

Der Schließvorgang des Emssperrwerks führte bei der Variante Tideniedrigwasseranhebung entlang der Ems zu unterschiedlichen Abweichungen des Tideniedrigwassers gegenüber der Referenz. Unterhalb des Emssperrwerks betrugen die mittleren Differenzen bei Pogum rd. -0,5 m, bei Emden rd. -0,4 m und bei Knock rd. -0,1 m. Oberhalb des Emssperrwerks betrugen die Differenzen rd. +0,8 m bei Terborg bis rd. +0,7 m bei Papenburg. Das Wasserstandsniveau nach Durchlaufen der Schwallwelle war höher als das genannte Tideniedrigwasser, so dass sich dadurch größere Differenzen zum Referenzzustand ergaben.

Die Wirkung der Tideniedrigwasseranhebung in der Leda nahm mit zunehmender Distanz zur Ledamündung ab. Am Pegel Dreyschloot trat das Tnw 5 bis 15 cm höher ein als in den ungesteuerten Fällen. Die Flutstromtidesteuerung bewirkte kaum eine Veränderung der Tideniedrigwasserstände in der Leda.

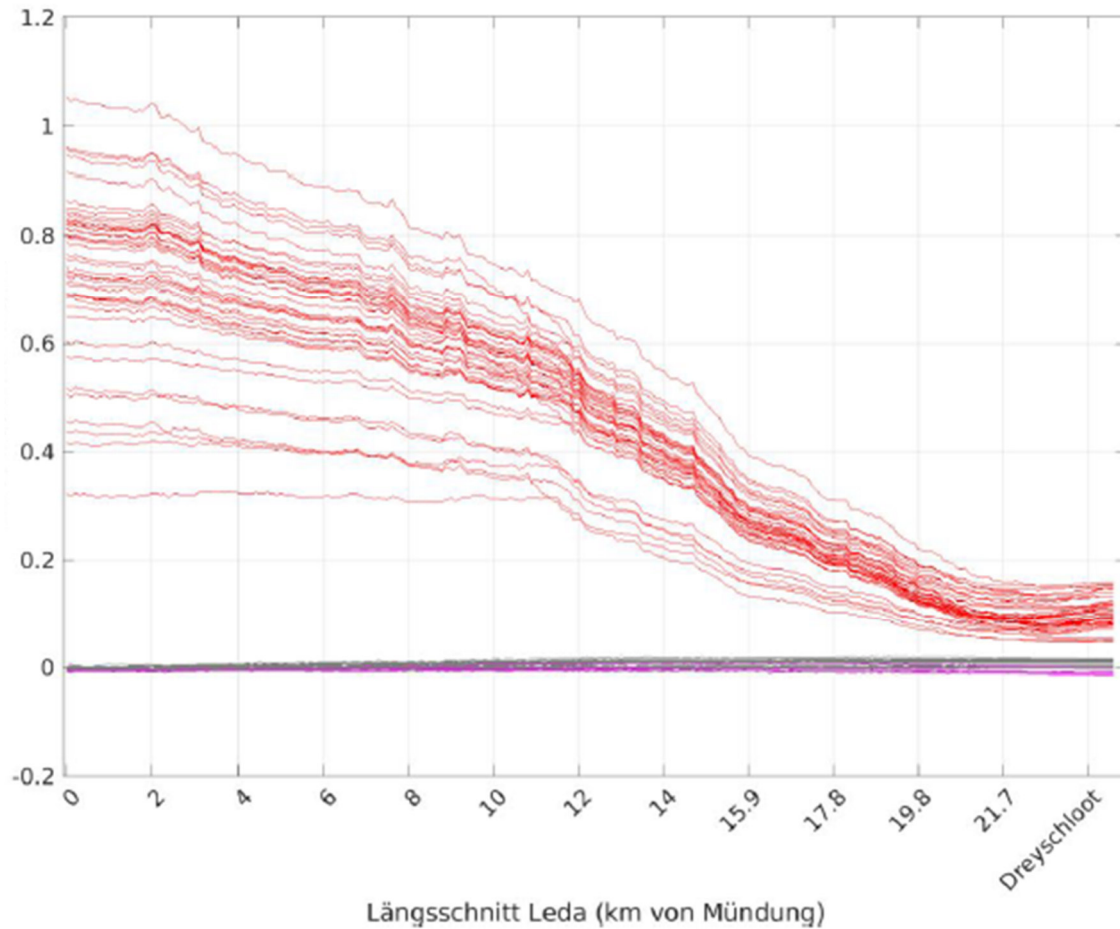


Abbildung 71: Differenz (m) der eingetretenen Tideniedrigwasser zur jeweiligen Referenztide von der Ledamündung bis zum Pegel Dreyschloot (rot = Tideniedrigwasseranhebung, magenta = Flutstromtidesteuerung). Anmerkung: Unweit der Ledamündung befindet sich in der Ems der Pegel Leerort (Unterems-Km 14,7; rd. 17,5 km oberhalb des Emssperrwerks). In der Leda liegen oberhalb der Mündung die Pegel Ledasperrwerk und Leer (rd. 4 km), Wiltshausen (rd. 9 km), Westringaburg (rd. 15 km), Potshausen (rd. 20 km) und Dreyschloot (rd. Km 24).

Die Auswirkung der Tidesteuerungsvarianten auf die Strömungsverhältnisse erfolgte, wie auch bei der Untersuchung der Wasserstandsänderungen, durch Gegenüberstellung der Modellläufe. Allerdings erfolgte kein Abgleich der Modellergebnisse mit gemessenen Strömungswerten.

Die Tideniedrigwasseranhebung führte zu einer leichten Zunahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Knock. Von Knock in Richtung Emden fielen diese gegenüber der Referenz zunehmend geringer aus und zwischen Emden und etwa Rhede waren die maximalen Geschwindigkeiten im Mittel 0,4 bis 0,6 m/s niedriger als in den ungesteuerten Vergleichstiden. Oberhalb von Rhede glichen sich die maximalen Geschwindigkeiten wieder denen der Referenzfälle an.

Die Flutstromtidesteuerung führte im Bereich der Knock zu keiner Änderung der maximalen Flutströmungsgeschwindigkeit, für die Strecke zwischen Emden und etwa Rhede wurde jedoch eine Abnahme um etwa 0,1 m/s ermittelt. Im Nahfeld des Sperrwerks wichen die Geschwindigkeiten stärker von der Referenz ab. Unterhalb des Bauwerks wurde über eine kurze Distanz eine deutliche Abnahme und oberhalb über eine kurze Strecke eine Zunahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeit berechnet.

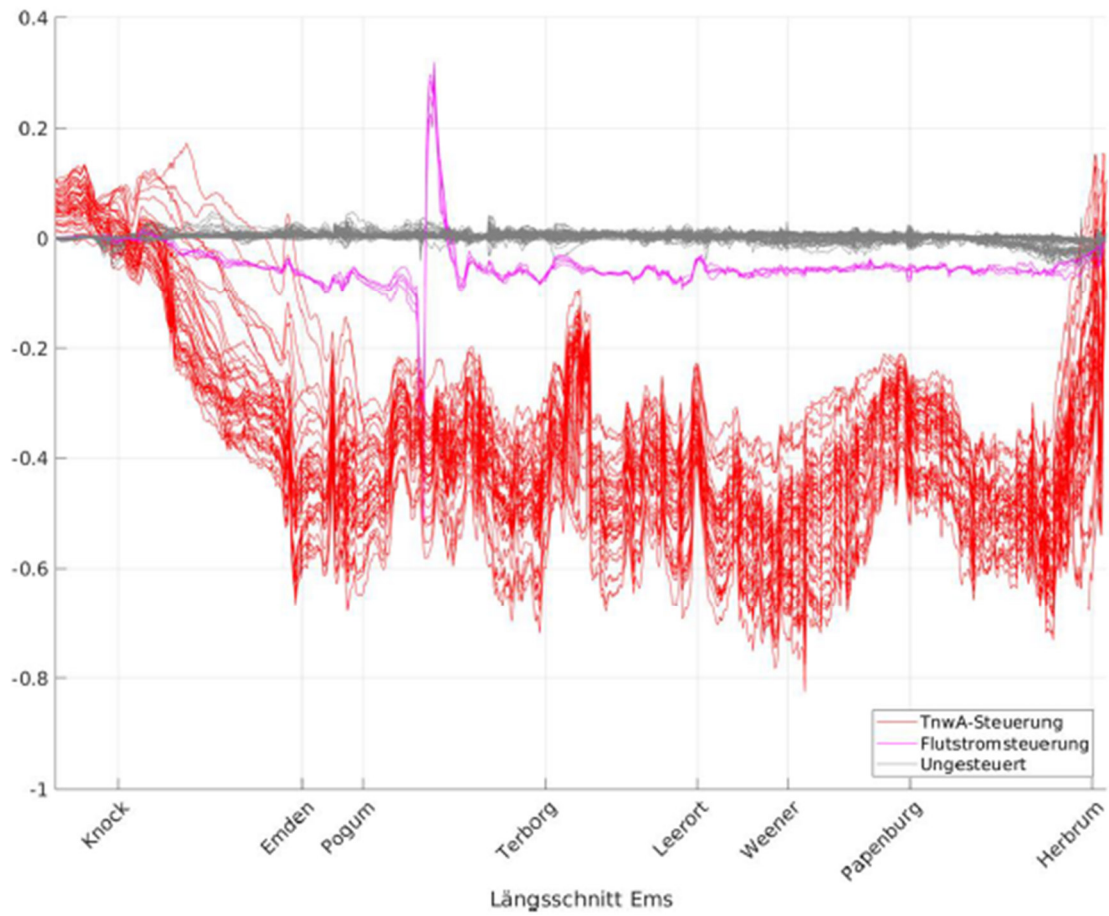


Abbildung 72: Differenz (m/s) der eingetretenen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Flut zur jeweiligen Referenztide in Fahrrinnenmitte der Ems von etwa Knock bis zum Tidewehr Herbrum (rot = Tideniedrigwasseranhebung, magenta = Flutstromtidesteuerung).

6.7.1 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Strömungs-verhältnisse am Emssperrwerk

Insgesamt wurden durch die BAW-Messungen 10 Tiden in der Betriebsform TnwA, Phase II aufgezeichnet (in den Plots aus Platzgründen auch „Na“ bezeichnet).

Abbildung 74 zeigt den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit (sohlnah, siehe Tabelle 52) und der Schwebstoffkonzentrationen (punktuell ca. 85 cm über Sohle) über den Zeitraum der Tideniedrigwasseranhebung. Die Steuerungszeiträume (TnwA = Na) sind hinterlegt.

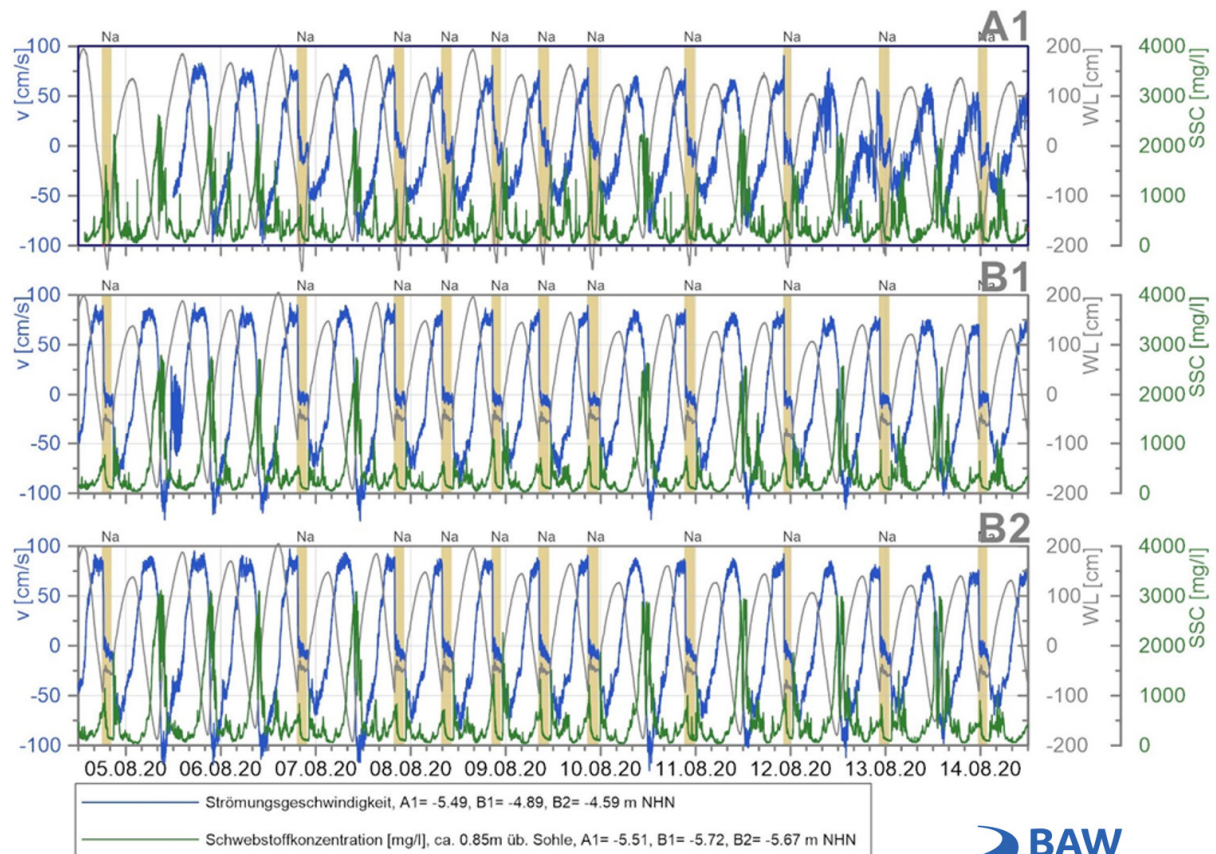


Abbildung 74: Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration(sohlnah) für den Steuerungszeitraum TnwA, Phase II (=Na), Steuerungszeiträume hinterlegt

Folgendes Verhalten bezüglich der Schwebstoffkonzentration (SSC) und der Strömungsgeschwindigkeit lässt sich erkennen:

- Die TnwA hat keinen sichtbaren Einfluss auf die Ebbstromgeschwindigkeit, mit Ausnahme der Zeitspanne vom Beginn der Steuerung bis Tnw in den gesteuerten Tiden
- Die maximale auftretende Schwebstoffkonzentration nimmt in gesteuerten Tiden signifikant ab.
- Die maximale Flutstromgeschwindigkeit ist in den gesteuerten Tiden auf allen Positionen signifikant niedriger als in ungesteuerten Tiden.

Die Zoom-Darstellung in Abbildung 75 verdeutlicht dies. Es sind drei gesteuerte und drei ungesteuerte Tiden zu sehen. Zusätzlich sind die Maximalwerte der Strömungsgeschwindigkeit und der Schwebstoffkonzentration für die jeweilige Tide markiert (rot: TnwA, schwarz: ungesteuert).

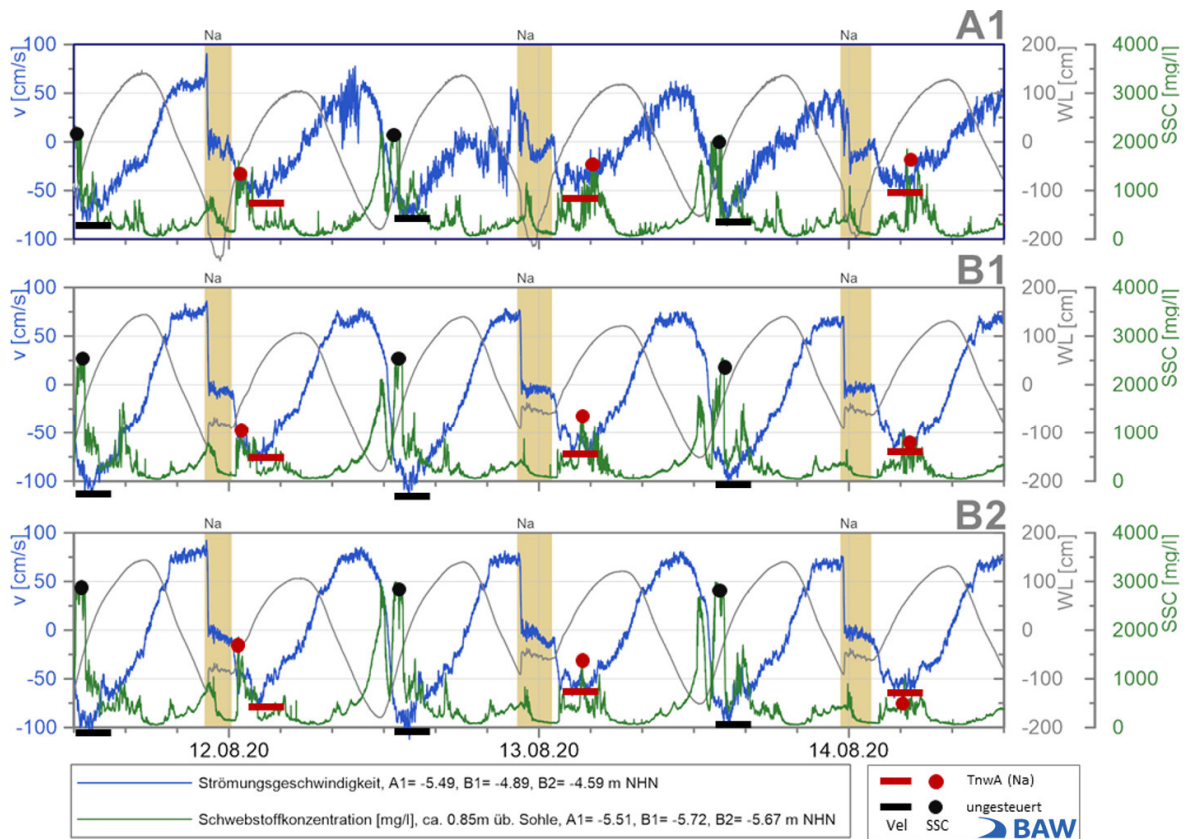


Abbildung 75: Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration(sohlnah) vom 11.08 bis 14.08.2020, markiert: Maximalwerte (Flutstrom), ungesteuert und TnWA,, Steuerungszeiträume hinterlegt

6.7.2 Auswirkung der Flutstromtidesteuerung auf die Strömungsverhältnisse am Emssperrwerk

Insgesamt wurden durch die BAW-Messungen über alle 5 Tiden der Betriebsform FsTs aufgezeichnet. Abbildung 76 zeigt den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit (sohlnah, entsprechend Tabelle 52) und der Schwebstoffkonzentrationen (punktuell ca. 85 cm über Sohle) über den Zeitraum der Flutstromsteuerung. Die Steuerungszeiträume der Flutstromtidesteuerung (FsTs) sind hinterlegt.

Für den Flutstrom zeigt sich eine deutliche Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten für die Betriebsform „TnWA“. Sie reduzieren sich auf allen drei Messpositionen um über 30% gegenüber den ungesteuerten Tiden (siehe Tabelle 55).

Für die FsTs gibt es eine Reduktion der maximalen Flutstromgeschwindigkeit nur auf Position A1, die seewärts von dem (dann teil-geschlossenen) Sperrwerk liegt. Hier können auch Stau- und/oder Reflexionseffekte eine Rolle spielen.

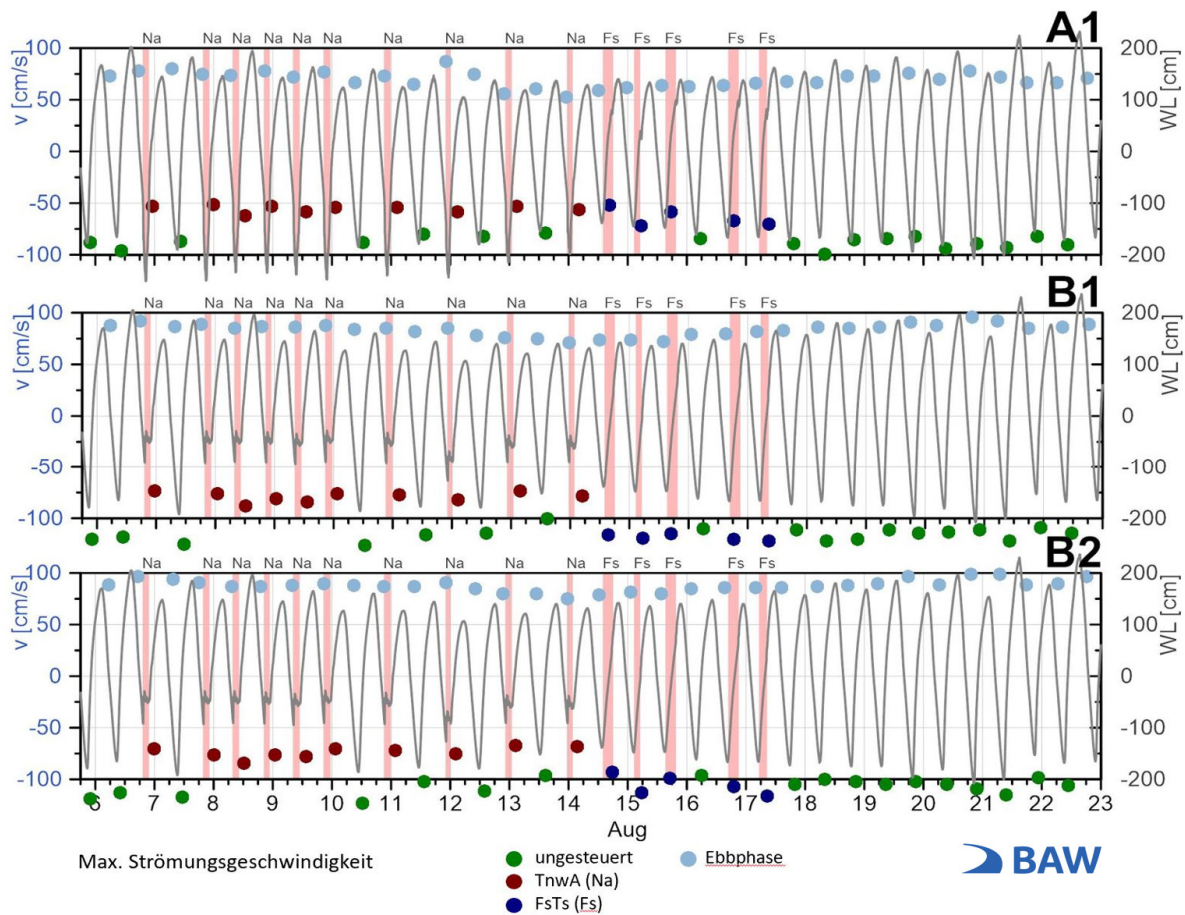


Abbildung 77: maximale Strömungsgeschwindigkeit, farblich dargestellt nach ungesteuertem Betrieb, TnWA und FsTs, sowie Ebbstrom. Hinterlegt: Schließzeiten

Tabelle 53: mittlere, maximale Strömungsgeschwindigkeit, sowie Minima und Maxima für die Betriebsform „ungesteuert“, TnwA und FsTs, sowie Ebbstrom

Position		A1			B1			B2		
		avg	Min	max	avg	min	max	avg	min	max
Ebbstrom (33 Tiden)		70	53	87	84	71	96	88	75	99
Flutstrom	ungesteuert (18 Tiden)	87	79	99	115	100	126	107	96	123
	TnwA (10 Tiden)	55	51	62	79	73	88	74	67	84
	FsTs (5 Tiden)	64	52	72	118	115	122	106	93	116

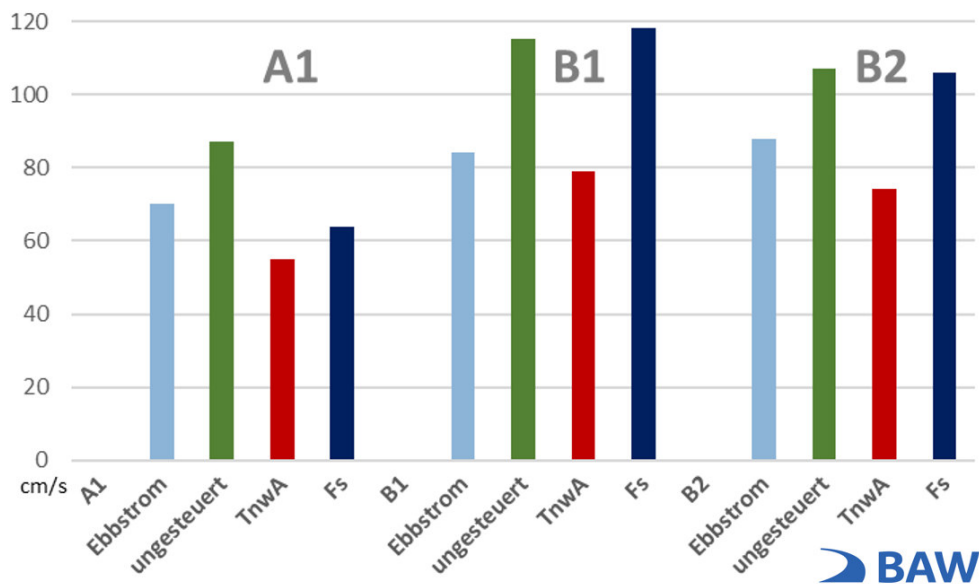


Abbildung 78: mittlere, maximale Strömungsgeschwindigkeit: Ebbstrom, sowie Flutstrom ungesteuert und TnwA, Fs

Auch für die Schwebstoffkonzentration lässt sich eine Reduktion insbesondere in der Betriebsform „TnwA“ feststellen.

In Abbildung 79 sind die maximalen Schwebstoffkonzentrationen für insgesamt 33 Tiden im Beobachtungszeitraum dargestellt, unterschieden nach den Betriebsformen „ungesteuert“, „TnwA“ und „FsTs“. Die mittleren Werte sind in Tabelle 54 zusammengefasst und in Abbildung 80 graphisch dargestellt.

Für den Flutstrom zeigt sich eine deutliche Reduzierung der maximalen Schwebstoffkonzentration für die Betriebsform „TnwA“. Sie reduzieren sich auf den beiden binnenseitigen Messpositionen (B1 und B2) um über 50 % und seeseitig (A1) um fast 30% gegenüber den ungesteuerten Tiden (siehe Tabelle 55).

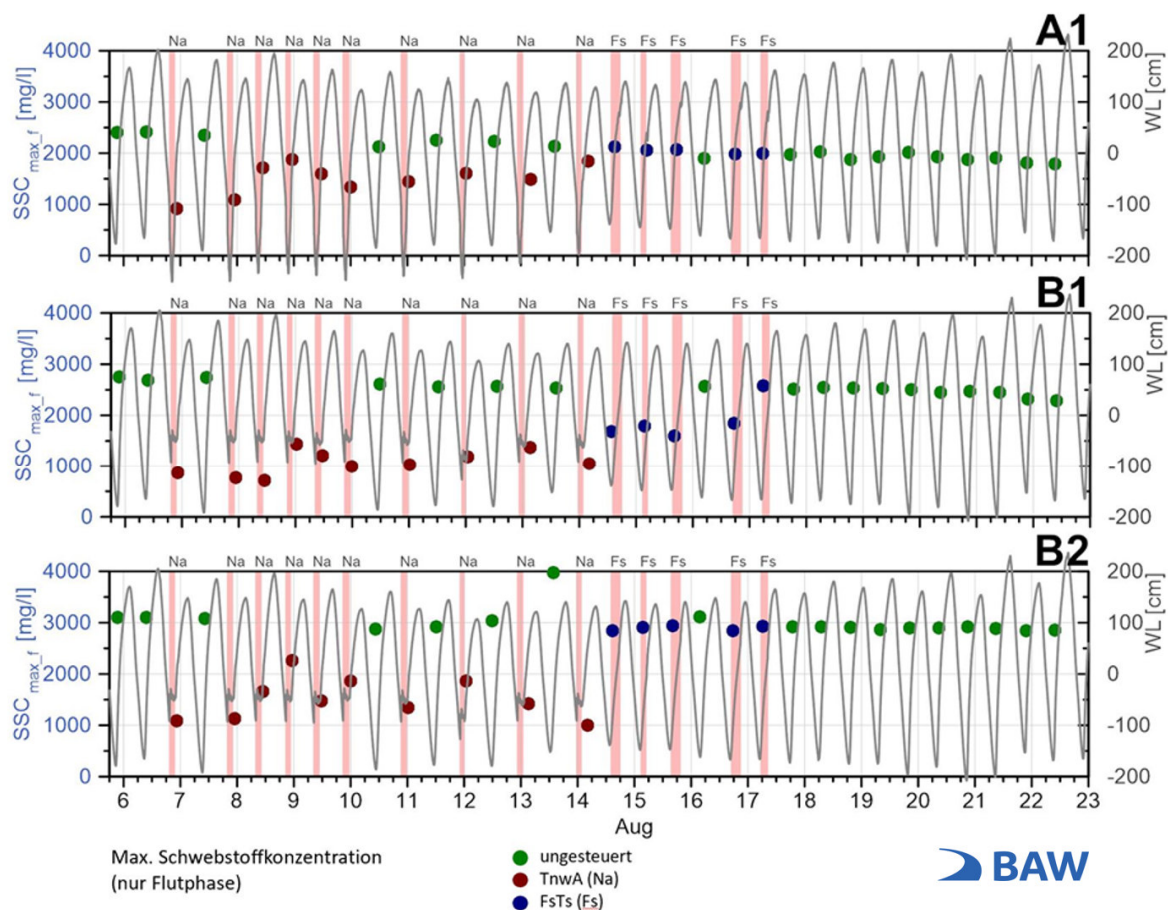


Abbildung 79: maximale Schwebstoffkonzentration (Flutstrom), farblich dargestellt nach ungesteuertem Betrieb, TnWA und FsTs. Hinterlegt: Schließzeiten

Tabelle 54: mittlere, maximale Schwebstoffkonzentration (nur Flutstrom), sowie Minima und Maxima für die Betriebsform „ungesteuert“, sowie TnWA und FsTs.

Schwebstoffkonzentration [mg/l] (Flutstrom)

Position		A1			B1			B2		
		avg	Min	max	avg	min	max	avg	min	max
Flutstrom	ungesteuert 18 Tiden	2056	1791	2419	2539	2288	2760	3011	2851	3984
	TnWA 10 Tiden	1497	926	1879	1066	714	1436	1513	1002	2265
	FsTs 5 Tiden	2051	1986	2127	1906	1605	2585	2899	2851	2948

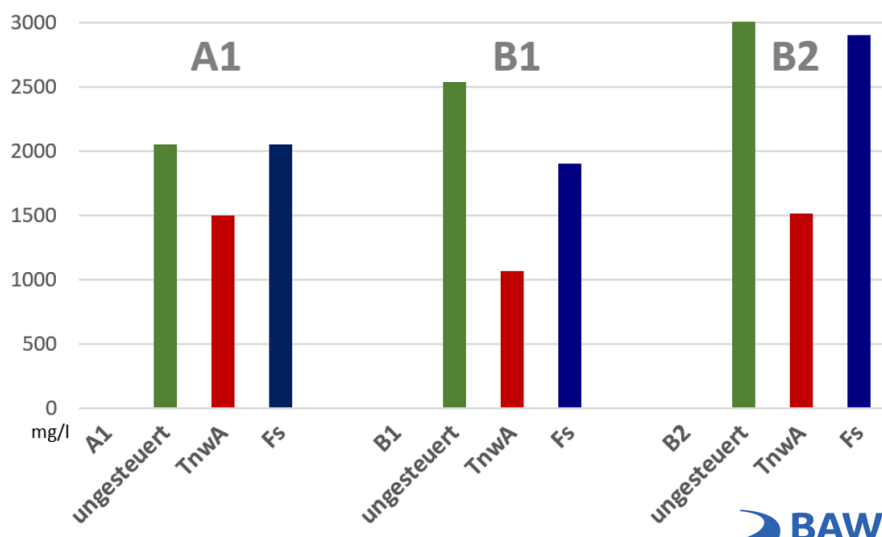


Abbildung 80: mittlere maximale Schwebstoffkonzentration, Flutstrom ungesteuert, TnwA und FsTs

Tabelle 55: prozentuale Abnahme der maximalen Strömungsgeschwindigkeit und der Schwebstoffkonzentration im Vergleich zu ungesteuerten Tiden

Parameter	Position	A1		B1		B2	
		Steuerung	Δ%	Steuerung	Δ%	Steuerung	Δ%
Velocity [mg/l]	TnwA	↓	-37	↓	-31	↓	-31
	FsTs	↓	-26	↔	-3	↔	-1
SSC [mg/l]	TnwA	↓	-27	↓↓	-58	↓↓	-50
	FsTs	↔	0	↓	-25	↔	-4

6.7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Sperrwerksnähe (ca. 150m, bzw. 300m Distanz) zeigen die Ergebnisse der durch die BAW durchgeführten Messungen eine unmittelbare Wirkung der Betriebsform Tideniedrigwasseranhebung (TnwA). Die maximalen Werte für die Flutstromgeschwindigkeit und die Schwebstoffkonzentration reduzieren sich deutlich.

Die Betriebsform Flutstromtidesteuerung (FsTs) hingegen zeigt deutlich geringere bis keine Abnahmen der Geschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentrationen gegenüber unbeeinflussten Tideverhältnissen. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die Stellung der Sperrwerkstore sein. Bei der FsTs werden die Tore nicht vollständig geschlossen, ca. 1/3 des Sperrwerk-Querschnitts bleibt weiterhin durchströmt, während bei der TnwA das Sperrwerk vollständig geschlossen wird.

Die Ergebnisse gelten für den Nahbereich des Sperrwerks und es müssen auch lokale Effekte, z.B. durch die kleinräumige Topographie oder auch das Bauwerk selbst in Betracht gezogen werden.

Im unmittelbaren Bauwerksbereich, d.h. in weniger als 150 m Distanz, ist von erhöhten Flutstromgeschwindigkeiten auszugehen. Hierzu lassen sich aus den durchgeführten Messungen jedoch keine Aussagen ableiten.

Für die Beurteilung der weiträumigen Wirkung der Sperrwerkssteuerung sind auch die weiteren im Rahmen des technischen Tests durchgeführten Untersuchungen heranzuziehen. Es wird auf den gesonderten Untersuchungsbericht der BAW im Anhang hingewiesen (MAUSHAKE 2021).

6.8 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Schwebstoffverhältnisse der Unterems (stationäre Betrachtung)

Bearbeitet von Christine Borgsmüller (BfG)

Durch den Einsatz der Tidesteuerung sollen die Schwebstoffgehalte in der Unterems reduziert werden. Ziel der Maßnahme ist es, das Sedimenttransportregime so zu verändern, dass zum einen weniger Material in die Unterems eingetragen wird und gleichzeitig die insbesondere bei niedrigen Oberwasserabflüssen aus dem Binnenland herrschende Flutstromdominanz (in Bezug auf max. und min. Strömungsgeschwindigkeiten und die daraus resultierenden Sedimenttransporte) verringert wird.

Die umfangreiche simultane, zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen und der Schwebstoffkonzentrationen an zahlreichen Messstationen entlang der Unterems sowie ergänzende Messkampagnen vor und während des Technischen Test ermöglichen die Analyse der versuchsbedingten Veränderungen dieser Parameter.

6.8.1 Beschreibung der aufsummierten instantanen Schwebstofftransporte in der Unterems zwischen Papenburg und Pogum

An allen betrachteten Messstationen wurde die Veränderung des Parameters „Instantaner Schwebstofftransport“ berechnet, analysiert und graphisch dargestellt. Der instantane Schwebstofftransport (IS) stellt den Schwebstofftransport an einem Punkt des Gewässerquerschnittes zu einem Zeitpunkt i dar und wird nach folgender Formel ermittelt:

$$IS_i \left[\frac{g}{cm^2 * s} \right] = C_{S_i} \left[\frac{g}{l} \right] * v_i \left[\frac{cm}{s} \right]$$

Hierbei ist C_{S_i} der Schwebstoffgehalt an der Messposition der jeweiligen Dauermessstelle zum Zeitpunkt i in g/l , v_i die Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt i an dem korrespondierenden mobilen Strömungssensor.

Bei der durchgeführten Untersuchung betrug das Erfassungsintervall für alle Parameter 5 Minuten. Die folgende Analyse soll einen Beitrag dazu liefern, die Auswirkungen des Technischen Tests auf den Schwebstoffhaushalt der Unterems zu untersuchen. Besonderes Interesse gilt hierbei der Frage, ob die Tidesteuerung die Flut- und Ebbstromtransporte sowie den Quotienten aus diesen beiden Summenparametern verändert. Dazu wird in der vorliegenden Untersuchung ein weiterer Parameter betrachtet, der im Folgenden als Summe des instantanen Schwebstofftransportes (SIS) jeweils über eine Ebb- bzw. Flutphase bezeichnet wird. Die Summe des instantanen Schwebstofftransportes wird berechnet, indem die instantanen Schwebstofftransporte (IS) über die Zeitschritte in einer Tidephase aufsummiert werden:

$$SIS_{Ebbe/Flut} = \sum_i^{n_{Ebbe/Flut}} IS_i$$

Er repräsentiert die gesamten Schwebstofftransporte während einer Tidephase, allerdings nur an einem einzigen Punkt im Gewässerquerschnitt. Im Allgemeinen findet die Erfassung der Schwebstoffgehalte nahe der Wasseroberfläche statt. Im besonderen Falle der Tideems, die eine deutliche vertikale Schichtung aufweist repräsentieren die im folgenden beschriebenen Datensätze meistens die Transportverhältnisse in der oberen, frei fließenden Wassersäule. Somit sind auf Basis

dieser Analyse keine Aussagen über das Transportverhalten der mobilen und stationären Flüssigschlickschichten möglich.

Der SIS hat gegenüber den Mittelwerten der Strömung den Vorteil, dass auch die veränderte Dauer der Tidephasen bei Steuerung mit einfließt und es somit nicht zu einer Verfälschung der Werte kommt wie bei den Mittelwerten, wo unterschiedliche Mittelungszeiträume zu Grunde liegen („Stauphase“, siehe Kapitel 6.2.1). Eine Ungenauigkeit der Daten entsteht daraus, dass die Strömungsgeschwindigkeit nur an einer Station exakt an der gleichen Stelle erfasst wurde wie die Schwebstoffkonzentration, in allen anderen Fällen liegen die Dauermessstationen des NLWKN, die die Schwebstoffgehalte erfassen und die mobilen Messstränge des WSA Ems-Nordsee, an denen die Strömungsparameter registriert werden an verschiedenen Positionen. Da jedoch meist mehrere Sonden in der vertikalen und manchmal auch innerhalb des Querschnitts zur Verfügung standen wurden die Transportparameter mit möglichst gut vergleichbaren Datensätzen ermittelt, die möglichst geringe Entfernungen zueinander aufweisen und damit als hinreichend repräsentativ angenommen wurden. Die in der Auswertung berücksichtigten Stationspaare sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 56: Kombination von Strömungs- und Schwebstoffmessungen (Stationspaare) zur Bestimmung des instantanen Schwebstofftransports

Messstationen Schwebstoffgehalt Cs (NLWKN, BfG)		Mobile Messstränge Strömungsgeschwindigkeit V (WSV, BfG)		Pos. Cs / Pos. V
Name	[m NHN]	Name	Messebene	[Unterems-Km]
Pogum	-2,7	Ditzum	Oben	35,30 / 33,57
Terborg	-3,5	Terborg	Oben	24,67 / 24,5
Soltborg	-7,0 und 1 m u. WSP	Soltborg	Oben / unten	18,4
Leerort	-2 (oben)	Leerort B	Oben	14,79 / 14,55
Weener	-2 (oben)	Weener A	Oben	6,85 / 6,75
Papenburg	-2,2	Papenburg	Oben	0,39 / 0,4

Anmerkung: Ortsbezeichnungen ‚oben‘ und ‚unten‘ werden zur Unterscheidung von Messebenen verwendet.

Aus den oben genannten Gründen kann der Wert des instantanen Schwebstofftransports nicht verwendet werden, um grundlegende Aussagen zu transportierten Schwebstofffrachten zu machen oder gar um Transportbilanzen zu erstellen. Im Rahmen dieser Untersuchung wird der Wert ausschließlich dazu verwendet, an einem meist oberflächennahen Punkt im Gewässerquerschnitt Aussagen zu relativen Änderungen des Schwebstofftransportes zu machen, die durch den Technischen Test verursacht wurden. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass die Schwebstoffganglinien jeder Dauermessstation auch im ungesteuerten Zustand eine individuelle Charakteristik aufweist, die von der Position der Sonde im Gewässerquerschnitt abhängig ist und insbesondere davon, ob sich die Sonde temporär in einer Flüssigschlickschicht befindet.

Um auch Aussagen zu der vertikalen Verteilung der Schwebstoffe und deren versuchsbedingten Veränderung treffen zu können, wurden die Dauermessungen ergänzt durch vier zusätzliche Messkampagnen vor und während des Testbetriebes, bei denen jeweils während einer Ebephase zahlreiche Vertikalprofile mit einer Dichtesonde ermittelt wurden. Diese zusätzlichen Messkampagnen fanden jeweils viermal bei Weener (km 7,2) und dreimal bei Soltborg (km 18,4) statt.

In Soltborg befindet sich auch eine Dauermessstation. Diese unterscheidet sich von den durch den NLWKN betriebenen Messstationen, denn hier handelt es sich um einen BfG-eigenen mobilen Messstrang, an dem punktgleiche Messungen der Strömungsgeschwindigkeit und der Schwebstoffgehalte sowohl oberflächennah als auch sohnah zur Verfügung stehen.

Im Folgenden werden die Auswertungen der Dauermessungen stationsweise von Papenburg bis Pogum seewärts des Sperrwerkes beschrieben. Ergänzende Messkampagnen werden hierbei in Unterkapiteln für die jeweiligen Stationen dargestellt. Für die Beschreibung der Schwebstoffcharakteristik wird dabei auch auf Kapitel 6.14 Bezug genommen.

6.8.1.1 Papenburg

Die Schwebstoffgehalte in Papenburg werden bei -2,2 m NHN erfasst, die Strömungsgeschwindigkeit wird 0,9 m unter der Wasseroberfläche ermittelt.



Abbildung 81: Hochaufgelöste (5 min - Werte) Ganglinie des Wasserstandes am Pegel Papenburg, Strömungsgeschwindigkeit am mobilen WSV Messstrang Papenburg sowie Schwebstoffkonzentration an der Gewässergütemessstelle des NLWKN

Im ungesteuerten Zustand kommt es mit dem sprunghaften Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten mit Einsetzen der Flut zu einem Anstieg der Schwebstoffgehalte durch ein Anwachsen der mobilen Flüssigschlickschicht, sodass dann während der gesamten Flutphase sowie auch während Stauwasser zur Flutstromkenterung und in der ersten Hälfte der darauffolgenden Ebbphase sich die Schwebstoffsonde knapp in dieser höher konzentrierten Schicht befindet. Erst gegen Ende des Ebbstromes, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten wieder abnehmen, sinkt die Lutokline der mobilen Schicht unterhalb des Messhorizontes. Die Ganglinie weist sowohl in Spring- als auch in Nipp-Phasen das gleiche Verhalten auf. Das wird auch durch die Längsfahrten des Messschiffes MEMMERT bestätigt, die bei Tidehochwasser die Lutokline der mobilen Flüssigschlickschicht vor Beginn des Technischen Tests bei etwa - 2,5 m NHN identifizierten.

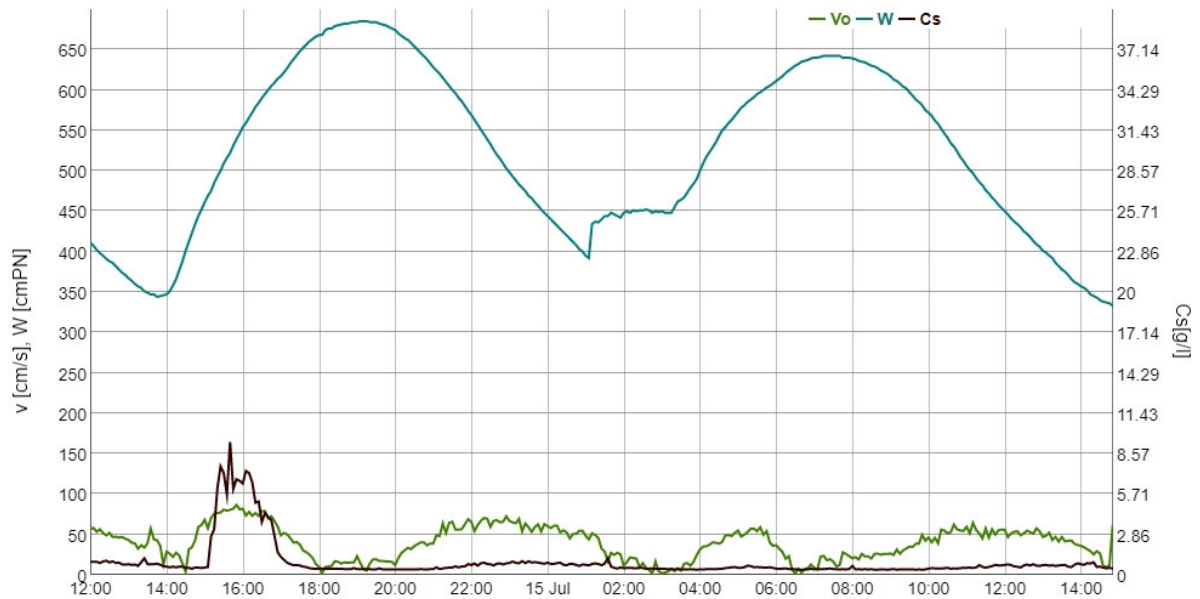


Abbildung 82: Hochaufgelöste (5 min - Werte) Ganglinie des Wasserstandes am Pegel Papenburg, Strömungsgeschwindigkeit am mobilen WSV Messstrang Papenburg sowie Schwebstoffkonzentration an der Gewässergütemessstelle des NLWKN

Mitte Juli, als die Tidesteuerung schon seit zwei Wochen getestet wird, ergibt sich ein anderes Bild. Trotz nahezu vergleichbarer Strömungsgeschwindigkeiten im ungesteuerten Zustand, kommt es während der Flutphase erst später zu einer auch deutlich geringeren Zunahme der Schwebstoffgehalte. Mit wieder abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten sinkt das Material wieder unter die Sonde. Während Stauwasser und auch in der gesamten darauffolgenden Ebbphase wird praktisch kein Material mehr bis auf Höhe der Sonde in den Wasserkörper eingemischt. Durch das Schließen des Sperrwerks tritt in Papenburg eine Phase von etwa 2 h auf, in der sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschen. Auch in der Flutphase, die auf das Öffnen der Tore folgt und die etwa 30 % geringere maximale Flutstromgeschwindigkeiten aufweist als im ungesteuerten Zustand, kommt es nicht zu einer Resuspension von Material aus der darunter gelegenen mobilen Schicht.

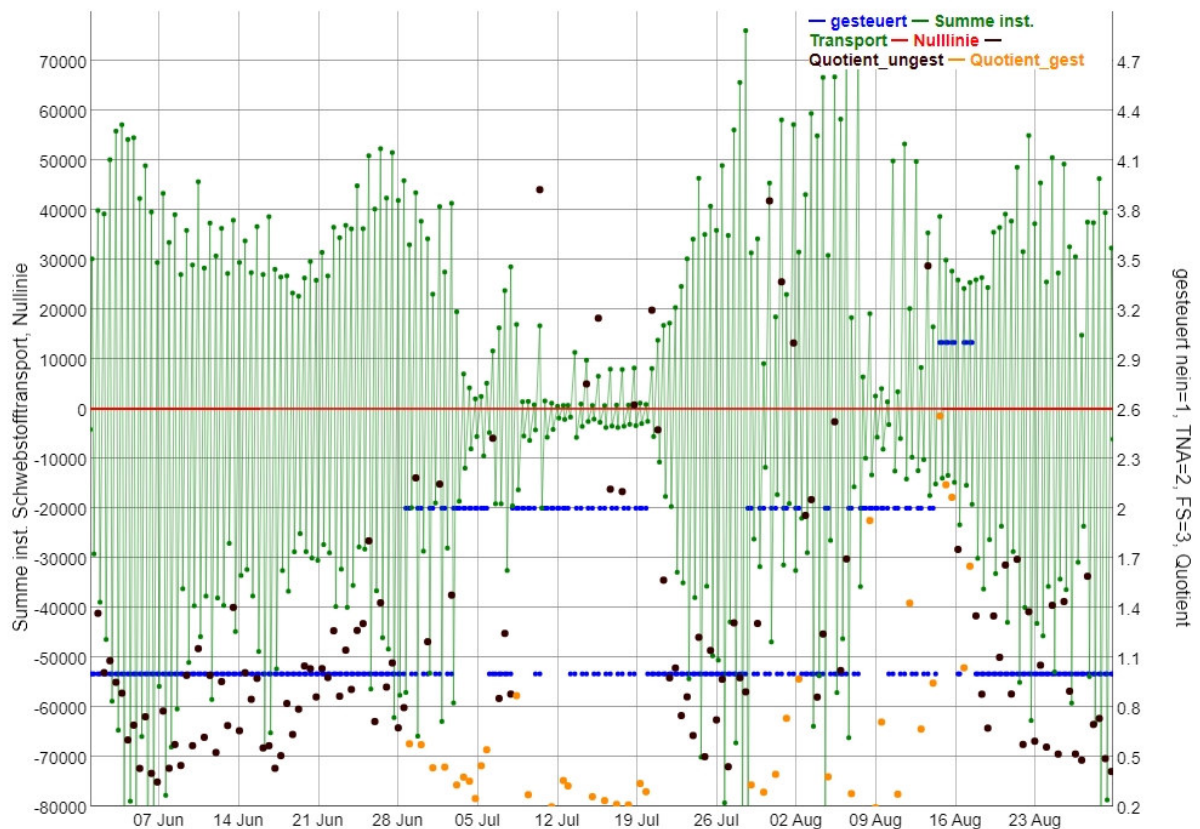


Abbildung 83: Papenburg; grüne Linie: Summe der instantanen Schwebstofftransporte getrennt für Ebbe (negative Werte) und Flut (positive Werte) (Daten der Gewässergütemessstelle des NLWKN); braune Punkte (ungesteuert), gelbe Punkte (gesteuert): Quotient aus der Summe der inst. Schwebst. während einer Flutphase und der Summe der inst. Schwebst. während der vorhergehenden Ebbphase; blaue Punkte: ungesteuerte Tide=1, TnWA =2, FS = 3

Vor Beginn des Technischen Tests werden an der Dauermessstation wegen ihrer temporären Lage in der oberen mobilen Flüssigschlickschicht sehr hohe instantane Schwebstofftransporte während des Flutstromes und zum Teil noch höhere während des Ebbstromes erfasst. Die Summe der instantanen Schwebstofftransporte (SIS) Werte sowie der Quotienten aus der Summe des instantanen Schwebstofftransportes während einer Flutphase und der Summe des instantanen Schwebstofftransportes während der vorausgehenden Ebbphase darstellt, schwanken in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren, wobei an diesem Punkt überwiegend eine leichte Ebbstromdominanz zu beobachten ist. Mit Beginn der TnWA, die ab dem 28.6.20 zu Beginn nur in jeder zweiten Tide angewendet wurde, nehmen die instantanen Schwebstofftransporte langsam ab. In dieser Phase sind keine deutlichen Veränderungen in den Geschwindigkeitganglinien gegenüber dem ungesteuerten Zustand zu beobachten. In jeder Ebb- und vor allem Flutphase werden noch Schwebstoffe resuspendiert. Erst ab dem 3. Juli, wo mehrere Tiden in Folge gesteuert werden, kommt es zu einer signifikanten Abnahme der Transporte. Insbesondere durch die Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten im ersten Drittel der Flut wird die Resuspension von Material aus der mobilen Schicht verhindert. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten sind von der TnWA kaum betroffen, doch auch hier wird nur noch wenig Material resuspendiert, allerdings mehr als während der Flutphase, was zu der deutlichen Ebbstromdominanz in den gesteuerten Phasen führt. Die verminderte Resuspension geht möglicherweise auf eine Verfestigung der mobilen Schicht, verursacht durch die längeren Phasen mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten, zurück. In diesem Zeitraum liegt auch die mit dem Echolot erfasste Lutokline etwa einen Meter tiefer, was ein Hinweis auf die Verfestigung der Schicht sein kann. Wenn die TnWA unterbrochen wird, kommt es innerhalb weniger Tiden zu einer Zunahme der Schwebstoffgehalte, nach etwa fünf Tiden taucht die Sonde auch während Stauwasser bei Tidehochwasser wieder in die Flüssigschlickschicht. Die Auswirkung der TnWA macht

sich, wenn jede zweite Tide gesteuert wird, nur direkt in der gesteuerten Tide bemerkbar, in den darauffolgenden ungesteuerten Tiden kommt es schon wieder zu Resuspension von Schwebstoffen aus der Flüssigschlickschicht.

Auswirkungen der Flutstromsteuerung können in den vorliegenden Datensätzen nicht identifiziert werden.

6.8.1.1.1 Einfluss der Tideniedrigwasseranhebung auf den Schwebstofftransport bei Papenburg - Fazit:

In Papenburg kommt es durch wiederholte TnWA zu einer Beruhigung des Strömungsregimes. Insbesondere wenn jede Tide gesteuert wird, sind deutliche Reduktionen der Schwebstofftransporte in der frei fließenden Wassersäule insbesondere während des Flutstromes zu beobachten, die darauf zurückzuführen sind, dass die Strömungsenergie nicht ausreicht, um Schwebstoffe aus der mobilen Schicht bis auf Höhe der Schwebstoffsonde zu transportieren bzw. dass die Sonde nicht in die mobile Schicht eintaucht. Eine Ebbstromdominanz wird an diesem Punkt des Gewässerquerschnittes durch die TnWA begünstigt. Ein Aussetzen der TnWA führt schnell zur Wiederherstellung der ungesteuerten Verhältnisse.

6.8.1.2 Weener

An der Dauermessstation Weener sind zwei Schwebstoffsonden in Betrieb, die auf NHN – 2 m und – 3 m installiert sind. In der folgenden Auswertung werden die Daten der oberen Sonde betrachtet, da diese besser mit der Installationshöhe des nahen gelegenen Strömungssensors korrespondiert. Im Kapitel 6.14.1 der Auswertung der Gewässergütemessstationen wird deutlich, dass in Weener neben Papenburg vor Beginn des technischen Tests die höchsten Schwebstoffgehalte auftraten und an diesen beiden Stationen auch die größten versuchsbedingten Änderungen bei den mittleren Schwebstoffkonzentrationen beobachtet werden können.

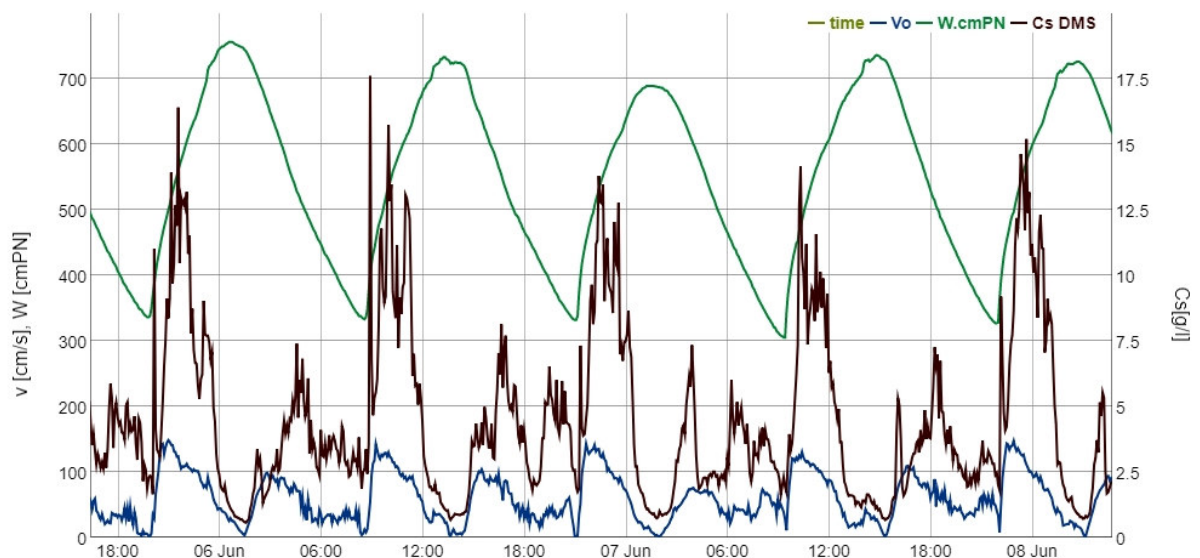


Abbildung 84: Hochaufgelöste (5 min- Werte) Ganglinie des Wasserstandes am Pegel Weener, Strömungsgeschwindigkeit V_o am mobilen WSV Messstrang Weener sowie Schwebstoffkonzentration C_s an der Gewässergütemessstelle Weener (obere Messebene) des NLWKN

In der Abbildung 84 (s. oben) sieht man typische Schwebstoff- bzw. Geschwindigkeitsganglinien an der Station Weener (Installationshöhe der Schwebstoffsonde bei - 2 m NHN) während einer Springphase (Vergleich Darstellung der 2. Testwoche in Kapitel 6.14.1.2.2) im ungesteuerten Zustand. Die max.

Strömungsgeschwindigkeiten bei Flutstrom übersteigen mit 1,5 m/s die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten von 1 m/s deutlich. Zudem sind die maximalen Schwebstoffgehalte bei Flutstrom mit bis zu 15 g/l etwa dreimal so hoch wie die Schwebstoffgehalte bei Ebbstrom (max. 5 g/l). Anhand der Schwebstoffganglinie wird auch deutlich, dass sich die Schwebstoffsonde hier über eine eventuell auftretende Flüssigschlickschicht befindet, denn zu Tidehochwasser, wenn sich stabile Schichtungen ausbilden, werden immer die niedrigsten Schwebstoffgehalte registriert. Mit einsetzender Flut wird ein Maximum erreicht, welches darauf hindeutet, dass dann Material von der Sohle (aus der Flüssigschlickschicht) resuspendiert wird bzw. klareres Wasser aus der darüber liegenden Wassersäule in die Schlickschicht eingemischt wird. Dieses Verhalten konnte auch durch die Nullmessung der Dichteprofile am 17.6.2020 bestätigt werden. Die deutlich ausgeprägte Lutokline L2 lag hier während der gesamten Ebbphase auf NHN -3 m, erst mit einsetzender Flut werden an der oberen Schwebstoffsonde (NHN -2m) Konzentrationen bis zu 10 g/l registriert.

Ein ganz anderes Bild ergibt sich in Phasen, wo mehrere aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden:

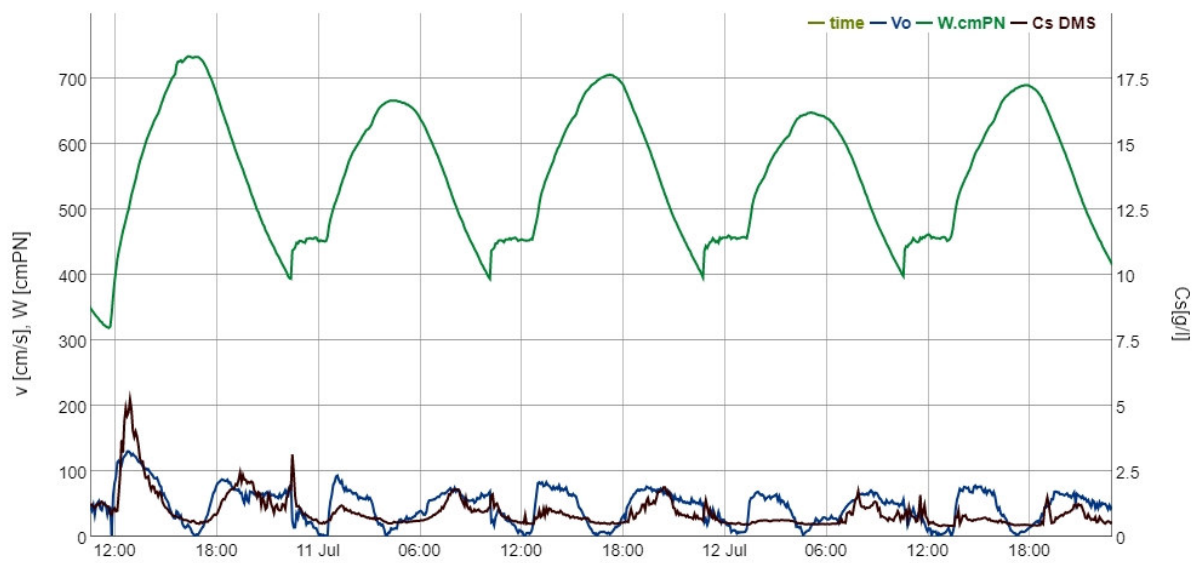


Abbildung 85: Hochaufgelöste (5 min- Werte) Ganglinie des Wasserstandes am Pegel Weener, Strömungsgeschwindigkeit V_o am mobilen WSV Messstrang Weener sowie Schwebstoffkonzentration C_s an der Gewässergütemessstelle Weener (obere Messebene) des NLWKN

Hier kommt es auf Grund der deutlichen Reduzierung der Flutstromgeschwindigkeiten durch die TnWA zu einer deutlichen Reduzierung der Schwebstoffgehalte.

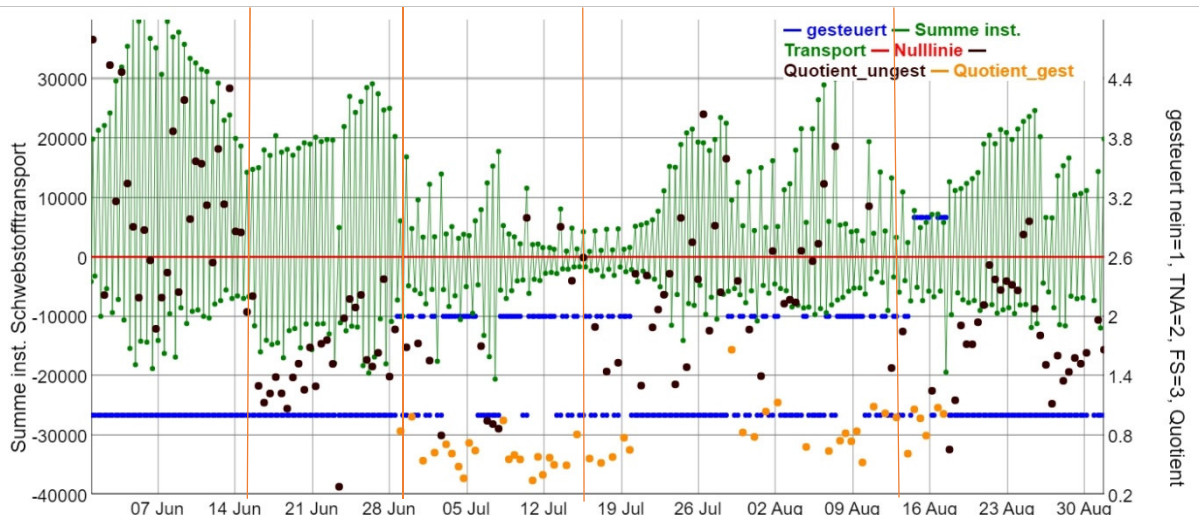


Abbildung 86: Weener, obere Messebene; grüne Linie: Summe der instantanen Schwebstofftransporte getrennt für Ebbe (negative Werte) und Flut (positive Werte) (Daten der Gewässergütemessstelle des NLWKN); braune Punkte (ungesteuert), gelbe Punkte (gesteuert): Quotient aus der Summe der inst. Schwebst. während einer Flutphase und der Summe der inst. Schwebst. während der vorhergehenden Ebbphase; blaue Punkte: ungesteuerte Tide=1, TnWA=2, FS=3

In diesem Sinne lässt sich auch die Auswertung der Summe der instantanen Schwebstofftransporte (SIS) interpretieren. Im ungesteuerten Zustand weist der Schwebstofftransport an dieser Messstelle eine deutliche Flutstromdominanz auf, da insbesondere beim Einsetzen der Flut viel Schwebstoff aus der mobilen Flüssigschicht resuspendiert wird und am Transportgeschehen teilnimmt. Mit Beginn der TnWA kommt es unmittelbar zu einer Abnahme der Flutstromgeschwindigkeiten und dadurch zu einer Abnahme der Transporte, besonders deutlich nimmt der instantane Schwebstofftransport während des Flutstroms ab, aber auch während Ebbe sind Abnahmen des instantanen Schwebstofftransportes zu beobachten, auch in Zeiträumen, in welchen nur jede zweite Tide gesteuert wurde. Der Quotient aus den instantanen Flut- zu Ebbtransporten zeigt an der Dauermessstation Weener während der TnWA eine Ebbstromdominanz in Bezug auf den Schwebstofftransport auf. Das Aussetzen der TnWA zwischen dem 20.7. und dem 29.7. führt relativ schnell wieder zu einer Zunahme der Schwebstoffgehalte in der Wassersäule über der mobilen und stationären Schicht. In der sich daran anschließenden zweiten Phase der TnWA sind die versuchsbedingten Effekte deutlich geringer, da hier in den ungesteuerten Tiden recht hohe Flutstromgeschwindigkeiten auftreten, die zu Resuspension der Schwebstoffe führen.

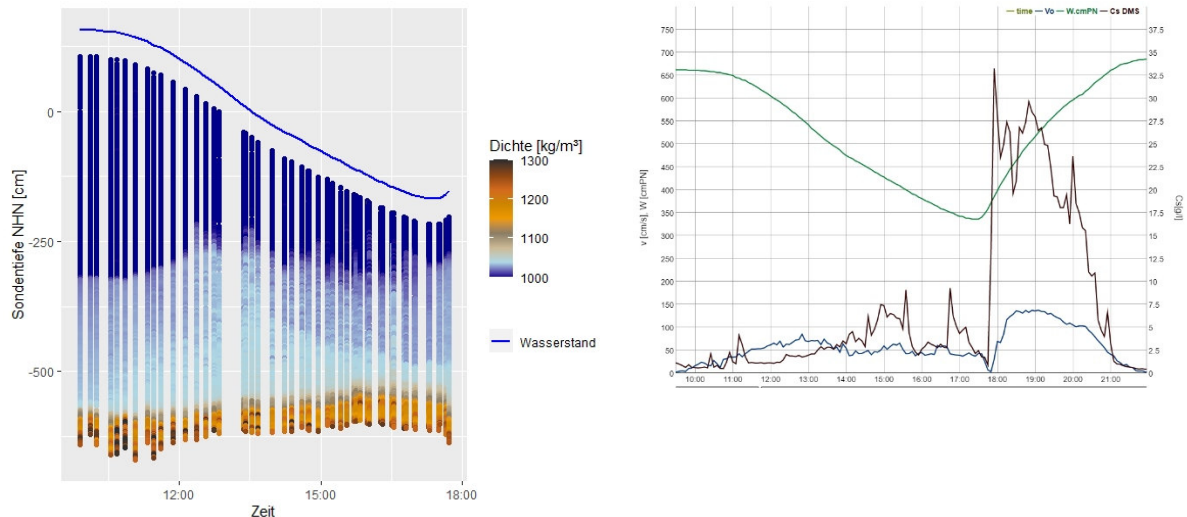
6.8.1.2.1 Erfassung der vertikalen Schwebstoffverteilung bei Weener (Unterems-km 7,2)

Um die zuvor beschriebene Sedimentdynamik auch vertikal aufgelöst betrachten zu können, wurden nahe der Station Weener vor und während des Technischen Tests zahlreiche Vertikalprofile der Schwebstoffkonzentration sowie des Yield Stress mit Hilfe einer Dichtesonde erfasst. Die Messungen fanden bei Ebbe und zu Beginn der darauffolgenden Flut an vier unterschiedlichen Tagen statt, die Zeitpunkte der einzelnen Messkampagnen W1 bis W4 wurden in der Abbildung 87 (s.u.) markiert. Die Durchführung der Messkampagnen wird in Kapitel 5.10 ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse werden im folgenden Unterkapitel detailliert dargestellt und mit den Ergebnissen der Dauermessungen verknüpft.

6.8.1.2.2 Messkampagne W1 am 17.6.2020

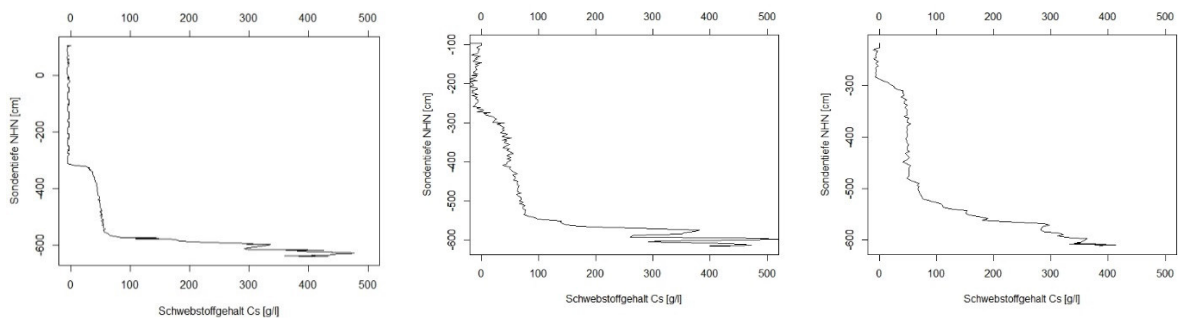
Bei der Nullmessung (W1) vor Beginn der Tidesteuerung konnte während der Ebbe über der festen Sohle eine hochkonzentrierte Flüssigschlickschicht (stationary mud) mit einer Mächtigkeit von etwa einem Meter detektiert werden.

Abbildung 87: Vertikalprofile der Messkampagne W1



Messkampagne W1 am 17.6.2020 bei km 7,2

Wasserstand (grün), Schwebstoffgehalte an Messstation Weener auf -3 m NHH (schwarz) und Strömungsgeschwindigkeit (blau) am 17.6.2020



W1: Profil 1 um 9:54 Uhr

W1: Profil 24 um 14:23 Uhr

W1: Profil 51 um 17:23 Uhr

Dieser stationary mud weist in den Messungen eine deutliche Fließgrenze bei Schwebstoffkonzentrationen von 300 g/l bis 400 g/l auf. Deutlich abgegrenzt durch eine Lutokline (L1) befindet sich darüber eine Flüssigschlickschicht (mobiler Schlick) mit einer Mächtigkeit von etwa 2,5 Metern und Schwebstoffgehalten von 50 bis 60 g/l, der sich durch eine weitere Lutokline (L2) zu Beginn der Ebbe deutlich vom klareren Wasser darüber abgrenzt. Im Verlauf der Ebbe wird dieser obere Dichtegradient schwächer und hebt sich bei zunehmenden Strömungsgeschwindigkeiten auch über NHH -3 m an. Dies erklärt den Anstieg der Schwebstoffgehalte in der Mitte der Ebbphase (Profil 24) an der unteren Sonde der Dauermessstation Weener, die sich auf NHH -3 m befindet.

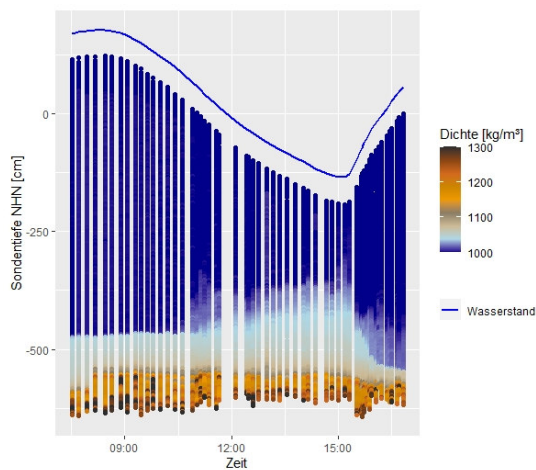
Anhand dieser Auswertung wird allerdings auch deutlich, dass die Sonden der Dauermessstellen, die für die Ermittlung der instantanen Schwebstofftransporte zu Grunde gelegt wurden, sich beim Auftreten von Flüssigschlick an der Sohle zumeist oberhalb der mobilen Schlickschicht befinden, zu manchen Zeitpunkten allerdings auch in diesen eintauchen können. Dies muss bei der Interpretation der instantanen Schwebstofftransporte immer berücksichtigt werden.

Die mobile Schicht weist Schwebstoffgehalte von 50 g/l bis 60 g/l auf, besitzt noch keine Fließgrenze und nimmt wahrscheinlich intensiv am Transportgeschehen teil.

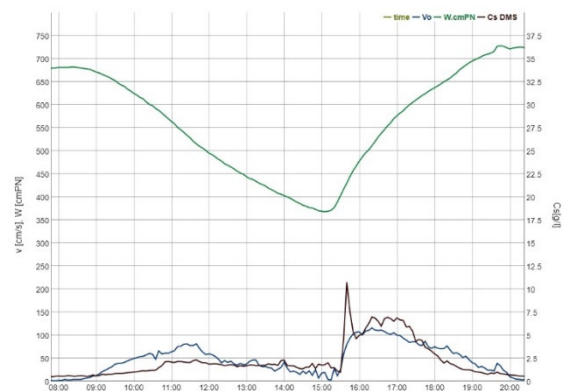
6.8.1.2.3 Messkampagne W2 am 30.6.2020

Die zweite Messkampagne fand zwei Tage nach Beginn des Technischen Tests während einer ungesteuerten Tagtide statt. In der ihr vorausgegangenen Tide erfolgte die insgesamt zweite TnWA. Im Vergleich zur Nullmessung W1 vor Beginn des Versuchs, weist die mobile Schicht zu Beginn der Ebbe eine geringere Mächtigkeit bei höheren Schwebstoffgehalten von 80 g/l bis 100 g/l auf.

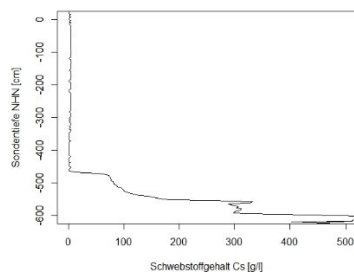
Abbildung 88: Vertikalprofile der Messkampagne W2



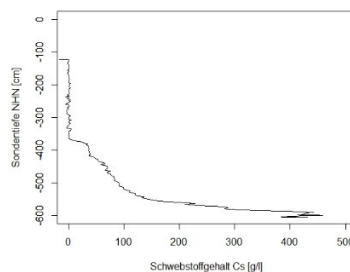
Messkampagne W2 am 30.6.2020 bei km 7,2



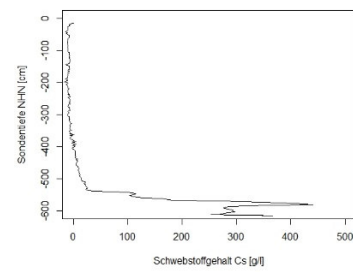
Wasserstand (grün), Schwebstoffgehalte an Messstation Weener auf -3 m NHN (schwarz) und Strömungsgeschwindigkeit (blau) am 30.6.2020



W2: Profil 9 um 9:04 Uhr



W2: Profil 31 um 13:11 Uhr



W2: Profil 56 um 16:40 Uhr

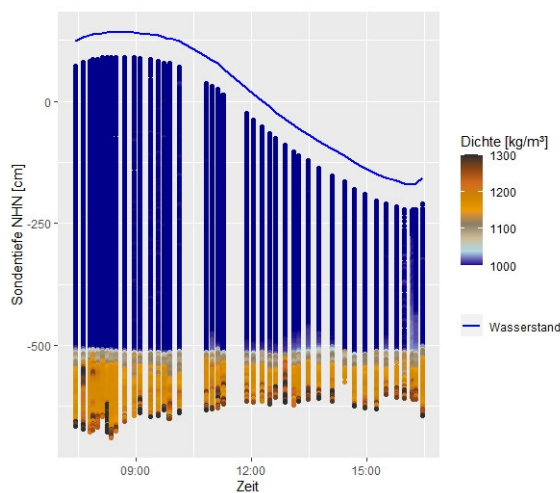
Die Lutokline L2 befindet sich bei NHN - 4,5 m. Die stationäre Flüssigschlickschicht, die sich ab einer Tiefe von NHN - 5,5 m durch die Lutokline L1 deutlich von der mobilen Schicht abgrenzt, weist vergleichbare Schwebstoffgehalte bzw. Dichten auf wie bei der Nullmessung. In der zweiten Hälfte der Ebbphase (Profil 31) hebt sich die obere Lutokline L2, der Dichtegradient wird schwächer,

Schwabstoffe werden etwas höher in die darüber liegende Wassersäule eingemischt, jedoch nicht bis auf Höhe der Sonde der Dauermessstation (NHN -3 m). Dies findet erst mit einsetzender Flut kurzzeitig statt (Profil 56).

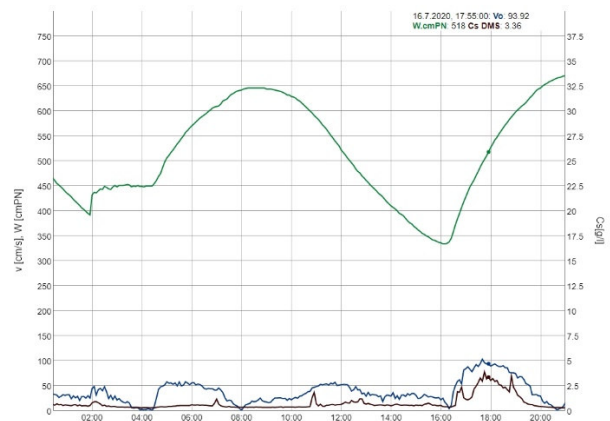
6.8.1.2.4 Messkampagne W3 am 16.7.2020

Die dritte Messkampagne fand in der dritten Woche des technischen Tests statt, wie alle anderen Messkampagnen auch während einer Nipp-Phase. Die dritte Messkampagne fällt in die Zeit der intensivsten Steuerungsaktivitäten, denn seit dem 8.7. wurde mindestens jede zweite Tide mit Hilfe der TnWA gesteuert, wenn möglich sogar jede Tide. Die Messung erfasst allerdings eine Tagtide, die nicht gesteuert wurde.

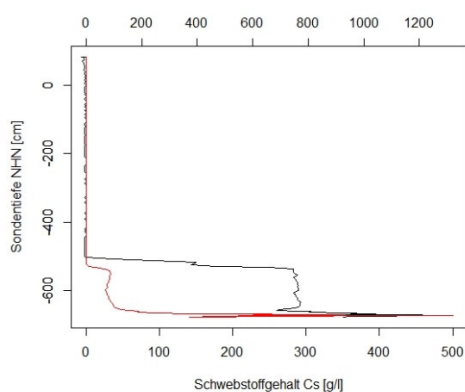
Abbildung 89: Vertikalprofile der Messkampagne W3



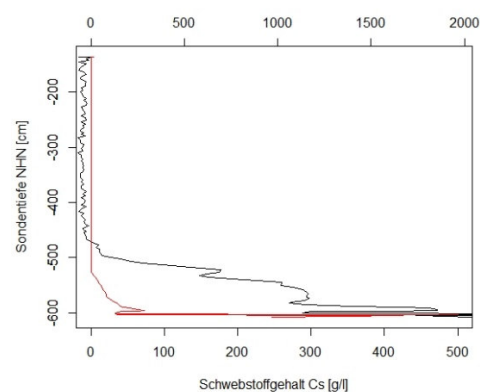
Messkampagne W3 am 16.7.2020 bei km 7,2



Wasserstand (grün), Schwabstoffgehalte an Messtation Weener auf -3 m NHN (schwarz) und Strömungsgeschwindigkeit (blau) am 16.7.2020



W3: Profil 3 um 7:49 Uhr, zusätzlich Yield Stress [Pa] in Rot auf oberer x-Achse



W3: Profil 37 um 13:45 Uhr, zusätzlich Yield Stress [Pa] in Rot auf oberer x-Achse

Die vertikale Schwabstoffverteilung unterscheidet sich deutlich von den beiden vorhergehenden Messungen. Die mobile Flüssigsschlickschicht mit Schwabstoffgehalten zwischen 50 g/l und 100 g/l ist während der gesamten Tide nicht zu beobachten. Dafür tritt zu Beginn der Ebbphase bei etwa NHN -5 m ein deutlicher Dichtesprung (Lutokline) auf. Die darunterliegende Schicht weist Schwabstoffgehalte

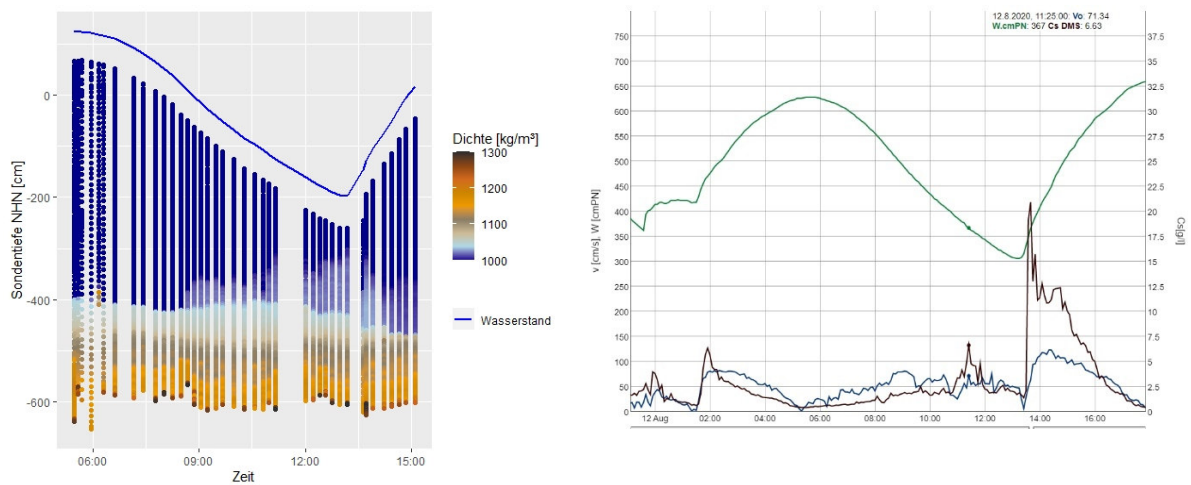
von knapp 300 g/l bei einer Mächtigkeit von über einem Meter auf. In dieser Schicht wurde auch ein konstanter Yieldstress von etwa 100 Pa registriert, weswegen davon ausgegangen werden kann, dass es sich um eine stationäre Schicht handelt. Im Verlauf der Ebbe kommt es in sehr geringem Maße zu Einmischung von Schwebstoffen in die darüber liegende Wassersäule, was mit einer Abnahme des Dichtegradienten einhergeht. Die Sonden der Dauermessstation Weener erfassen diese Prozesse nicht, da sie sich deutlich über der Lutokline befinden. Mit Einsetzen der Flut kommt es in dieser ungesteuerten Tide zu einem geringen Eintrag von Schwebstoffen bis auf Höhe der unteren Schwebstoffsonde, die registrierten Schwebstoffgehalte sind mit 2,5 g/l allerdings viel geringer als bei den vorherigen Messkampagnen.

6.8.1.2.5 Messkampagne W4_2 am 12.8.2020

Zu diesem Zeitpunkt gegen Ende des Technischen Tests wurde in den vorausgegangenen Tagen zum Teil jede Tide, immer aber mindestens jede zweite Tide, mit Hilfe der TnWA gesteuert. Auch hier wurde bei der Messkampagne eine ungesteuerte Tagtide erfasst. Die vertikale Schwebstoffverteilung ist in dieser Phase deutlich heterogener. Im Gegensatz zur Messkampagne W 3 ist zu Beginn der Ebbe wieder eine dünne mobile Schicht mit vergleichbaren Schwebstoffkonzentrationen von unter 100 g/l zu beobachten, der sich bei NHN – 4 m über die Lutokline L2 deutlich von der darüber liegenden Wassersäule abgrenzt. Nach einem weiteren Dichtesprung schließt sich unterhalb ein höher konzentrierten Schicht mit Schwebstoffgehalten bis zu 200 g/l an. Nach einem erneuten Dichtesprung (L1) tritt auch hier eine stationäre Flüssigschlickschicht mit sichtbarer Fließgrenze und Schwebstoffgehalten von ca. 300 g/l auf. Im Verlauf der Ebbe nimmt die mobile Schicht intensiv am Transportgeschehen teil, Material wird in den darüber liegenden Wasserkörper eingetragen und die deutliche obere Lutokline (L2) löst sich auf. Dies macht sich auch an den höheren Schwebstoffgehalten an der Dauermessstation bemerkbar, die auch höher sind als während der vorhergehenden Messkampagne W3. Mit einsetzender Flut wird die gesamte mobile Schicht bis auf NHN – 3 m eingemischt, was auch im sprunghaften Anstieg der Schwebstoffgehalte an der Dauermessstation nach Einsetzen des Flutstromes zu erkennen ist.

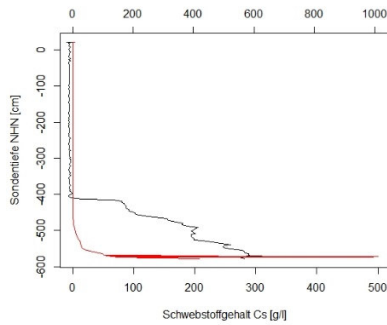
Im Vergleich zur Nullmessung (W1) weist die stationäre Schicht eine größere Mächtigkeit auf, das Material aus der mobilen Schicht wird während des Ebbstromes nicht so hoch in die darüber liegende Wassersäule eingemischt, möglicherweise wird es schwerer eingemischt als bei der Nullmessung.

Abbildung 90: Vertikalprofile der Messkampagne W4

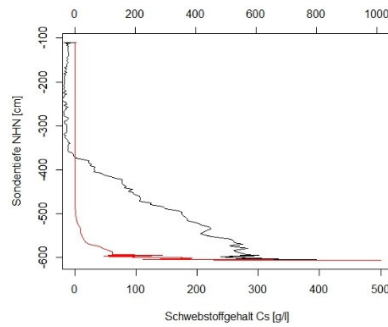


Messkampagne W4_2 am 12.8.2020 bei km 7,2

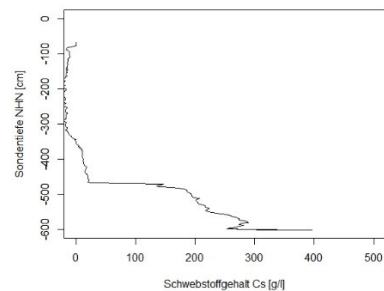
Wasserstand (grün), Schwebstoffgehalte an Messstation Weener auf -3 m NHN (schwarz) und Strömungsgeschwindigkeit (blau) am 12.8.2020



W4_2: Profil 10 um 7:25 Uhr,
zusätzlich Yield Stress [Pa] in Rot auf
oberer x-Achse



W4_2: Profil 20 um 9:40 Uhr,
zusätzlich Yield Stress [Pa] in Rot auf
oberer x-Achse



W4_2: Profil 41 um 14:51 Uhr

6.8.1.2.6 Einfluss der Tideniedrigwasseranhebung auf den Schwebstofftransport bei Weener - Fazit

In der oberen Tideems wurden im Bereich von Weener Flüssigschlickschichten identifiziert. Insbesondere während Tidehochwasser und in der ersten Hälfte der Ebbphase lassen sich diese deutlich voneinander abgrenzen. Über einer festen Sohle auf etwa NHN - 6,5 m befindet sich eine stationäre Schicht, welche Schwebstoffkonzentrationen von 300 – 400 g/l aufweist. Diese Schicht besitzt eine Fließgrenze und grenzt sich durch einen Dichtesprung, hier als Lutokline L1 bezeichnet, vom darüber liegenden mobilen mud ab. Die mobile Schicht weist Schwebstoffgehalte zwischen 50 g/l und 100 g/l und keine Fließgrenze auf. Er ist deutlich von dem darüber liegenden Wasserkörper durch einen Dichtesprung, hier als Lutokline L2 bezeichnet, abgegrenzt. In der frei fließenden Wassersäule treten während Tidehochwasser und zu Beginn der Ebbe nur sehr geringe Schwebstoffgehalte von wenigen g/l auf.

Wenn die Strömungsgeschwindigkeiten zunehmen, können Schwebstoffe aus der mobilen Schicht resuspendieren oder es kann Wasser in die mobile Schicht eingemischt werden. In Abhängigkeit der Steuerhistorie unterscheiden sich die Mächtigkeiten der verschiedenen Schichten voneinander. Die intensive Steuerung durch TnWA im Juli 2020 hat praktisch zum Verschwinden der mobilen Flüssigschlickschicht bei gleichzeitigem Aufwachsen der stationären Flüssigschlickschicht geführt. Somit stand in dieser Phase viel weniger Material zur Verfügung, welches am Sedimenttransport teilnehmen konnte. Trotz vergleichbarer Steuerhistorie konnte eine so deutliche Reduzierung der mobilen Schicht bei erneuter TnWA im August nach einer mehrtägigen Pause nicht beobachtet werden. Gegenüber der Nullmessung im Juni 2020 steht allerdings auch bei der Messung am 12.8. weniger mobiles Material für Transportprozesse zu Verfügung. Die Auswertung der Dauermessstellen deutet allerdings darauf hin, dass es nach Beendigung der Steuerung innerhalb weniger Tiden wieder große Menge an mobilem Material für Transportprozesse zur Verfügung stehen.

6.8.1.3 Leerort

In Leerort treten an der oberen Sonde der Dauermessstation (NHN -2 m) maximale Schwebstoffgehalte von etwa 5 g/l während der maximalen Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten auf. Zur Flutstromkenterung werden die geringsten Schwebstoffgehalte registriert. Dieses deutet zusammen mit den geringen absoluten Schwebstoffgehalten darauf hin, dass sich diese Sonde in der frei fließenden Wassersäule befindet und zu keiner Zeit in eine hochkonzentrierte Flüssigschlickschicht eintaucht. Sowohl die Strömungsgeschwindigkeiten als auch die Schwebstoffkonzentrationen sind während der Flut- und Ebbphasen ähnlich, sodass sich ein im ungesteuerten Zustand durch die längere Ebbstromphase eine leichte Ebbstromdominanz bezüglich der Summe der instantanen

Schwebstofftransporte ergibt. Durch die Tidesteuerung nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten während des Flutstromes signifikant ab, wodurch während des Flutstromes viel weniger Material transportiert wird als während Ebbe. Dieses führt bei den gesteuerten Tiden zu einer deutlichen Ebbstromdominanz. Bei den ungesteuerten Tiden ist das Verhältnis von Ebb- zu Flutstromtransporten relativ ausgeglichen, die absoluten Mengen sind allerdings viel geringer als in dem Zeitraum vor Beginn des Technischen Tests. Auch während der FsTs wird vergleichsweise wenig Material während Ebbe und Flut transportiert.

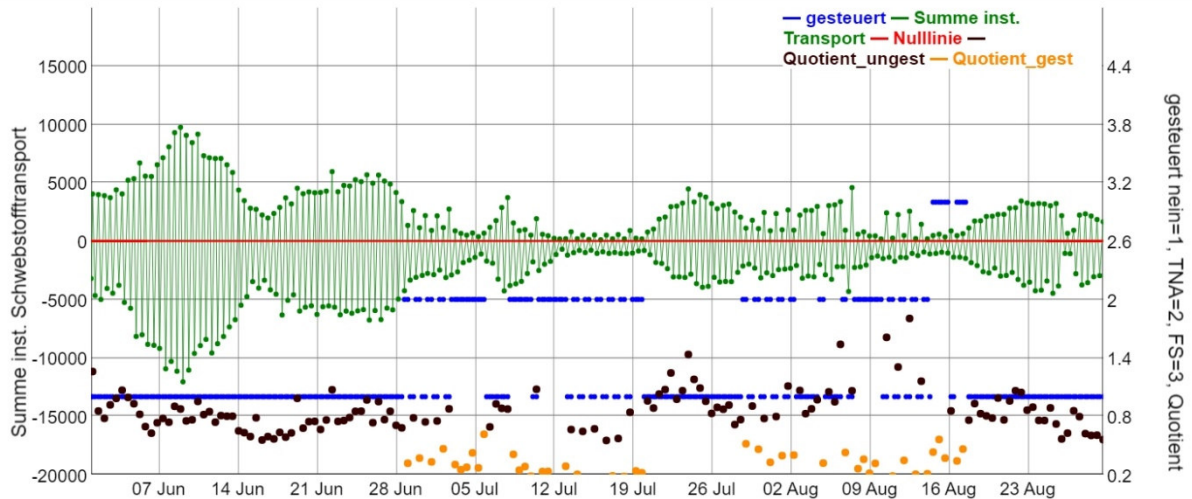


Abbildung 91: Leerort (obere Messebene); grüne Linie: Summe der instantanen Schwebstofftransporte getrennt für Ebbe (negative Werte) und Flut (positive Werte) (Daten der Gewässergütemessstelle des NLWKN); braune Punkte (ungesteuert), gelbe Punkte (gesteuert): Quotient aus der Summe der inst. Schwebst. während einer Flutphase und der Summe der inst. Schwebst. während der vorhergehenden Ebbphase; blaue Punkte: ungesteuerte Tide=1, TNA=2, FS=3

6.8.1.4 Soltborg

In Soltborg wurden Dauermessungen der Schwebstoffgehalte und verschiedener Strömungsparameter an einem mobilen Messstrang der BfG in drei verschiedenen Wassertiefen durchgeführt (Beschreibung des Messaufbaus siehe Kapitel 5.9). Aus diesem Grund war es möglich, das Schwebstofftransportregime dort sowohl sohl- (ggf. temporäres Auftreten von Flüssigschlick) als auch oberflächennah (frei fließende Wassersäule) zu beschreiben und zu vergleichen. Um detaillierten Aufschluss über die vertikale Verteilung der Schwebstoffe zu erhalten, wurden auch hier drei ergänzende Messkampagnen mit einer Dichtesonde durchgeführt. Diese Datensätze werden im folgenden Unterkapitel synoptisch ausgewertet.

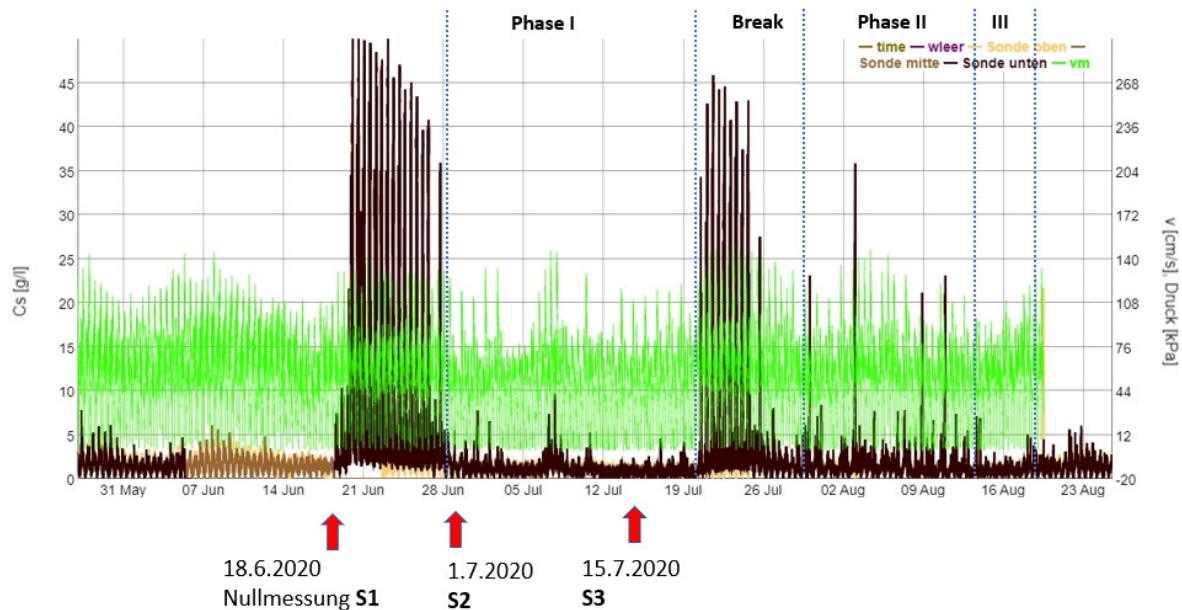


Abbildung 92: 5-Minuten Ganglinie der Schwebstoffgehalte (Sonde ‚oben‘, Sonde ‚Mitte‘, Sonde ‚unten‘) und Strömungsgeschwindigkeiten v_m (Mitte) am mobilen Dauermessstrang der BfG bei km 18,4 (Soltborg)

Im Folgenden werden exemplarisch die Schwebstoffkonzentrationen an der sohnnahen Sonde vor und während des technischen Tests beschrieben:

Situation vor Beginn des Testbetriebes

- Ungefähr eine Woche vor Versuchsbeginn (21.-28.6, Spring-Phase) traten an der sohnnahen Sonde (NHN -7 m, 1 m über Sohle) hohe Schwebstoffgehalte bis 40 g/l auf, was auf hochkonzentrierte Flüssigschlickschichten an der Sohle hindeutet. In den drei vorausgegangenen Wochen traten an allen drei Sonden (1 m über Sohle, 2 m über Sohle und 1 m unter WSP) Schwebstoffgehalte von max. 5 g/l auf (untere Sonde hat jedoch Datenausfall zwischen 5.6 und 18.6). Im Zeitraum vor Beginn der Tidesteuerung weisen Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstoffkonzentration eine deutliche Spring-/Nipp-Abhängigkeit auf. Flüssigschlickschichten bis auf Höhe der unteren Sonde treten nur während der Spring-Phase auf.

Phase I (Beginn der Tidesteuerung am 28.06. bis zum Beginn der längeren Unterbrechung des Betriebs ab dem 19.07.):

- Mit Beginn der Tidesteuerung nehmen die Schwebstoffgehalte deutlich auf max. 5g/l ab. In den Zeiträumen, in denen jede Tide gesperrt werden konnte, wurden keine Schwebstoffkonzentrationen über 3 g/l mehr registriert. In diesen Zeiträumen gab es auch keinen vertikalen Gradienten mehr, alle drei Sonden wiesen die gleichen Werte auf.
- In Phase I haben „nicht-Sperrungen“ und die kurze Unterbrechung vom 6.7.-8.7. sofort zu Reaktionen in den Schwebstoffgehalten geführt. Dieser Anstieg kann auf eine moderate Zunahme der Schwebstoffgehalte während des Ebbstromes an der sohnnahen Schwebstoffsonde zurückgeführt werden.
- Nach dem 8.7. bis Ende der Phase I am 19.7. kann dieses Verhalten der Schwebstoffganglinie immer wieder dann beobachtet werden, wenn einzelne Tiden nicht gesteuert wurden. Die gesteuerten Tiden weisen keine vertikalen Gradienten und sehr niedrige Schwebstoffgehalte auf.

- In Phase I treten keine hochkonzentrierten Flüssigschlickschichten an der Sohle auf.

Break (längere Unterbrechung des Betriebs über 17 aufeinanderfolgende Tiden zwischen dem 19. und 29.07.):

- In der Unterbrechung, die in eine Spring-Phase fällt, sind die Schwebstoffganglinien der drei Sonden vergleichbar mit jenen aus dem Spring-Zeitraum vor Beginn der Steuerung. Kennzeichnend ist, dass sich während der Flutstromkenterung wieder eine Flüssigschlickschicht ausbildet.

Phase II (ab dem 29.07., Zeitraum nach der längeren Unterbrechung bis zum Beginn der FsTs am 14.08.) und Phase III (Zeitraum der FsTs vom 14. bis 17.08.):

- Hier weist die Ganglinie der sohnahen Sonde insbesondere bei einzelnen, nicht gesteuerten Tiden während des Ebbstromes deutliche Schwankungen mit höheren Konzentrationen als in Phase I auf.

Auf Grund von Datenlücken konnten die instantanen Schwebstofftransporte nur für die untere Sonde (1 m über Sohle bzw. NHN -7 m) und obere Sonde (1 m u. WSP) ermittelt werden.

Soltborg (obere Sonde, 1 m u. WSP):

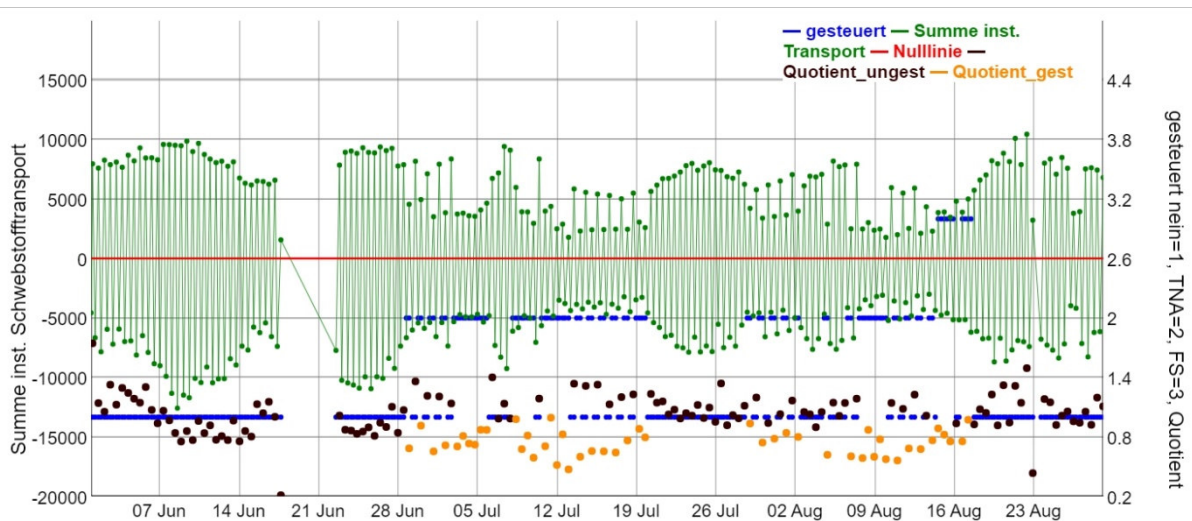


Abbildung 93: Soltborg obere Sonde; grüne Linie: Summe der instantanen Schwebstofftransporte getrennt für Ebbe (negative Werte) und Flut (positive Werte) (Daten der Gewässergütemessstelle des NLWKN); braune Punkte (ungesteuert), gelbe Punkte (gesteuert): Quotient aus der Summe der inst. Schwebst. während einer Flutphase und der Summe der inst. Schwebst. während der vorhergehenden Ebbphase; blaue Punkte: ungesteuerte Tide=1, Tnwa =2, FS = 3

Soltborg (untere Sonde, 1 m über Sohle bzw. NHN –7 m):

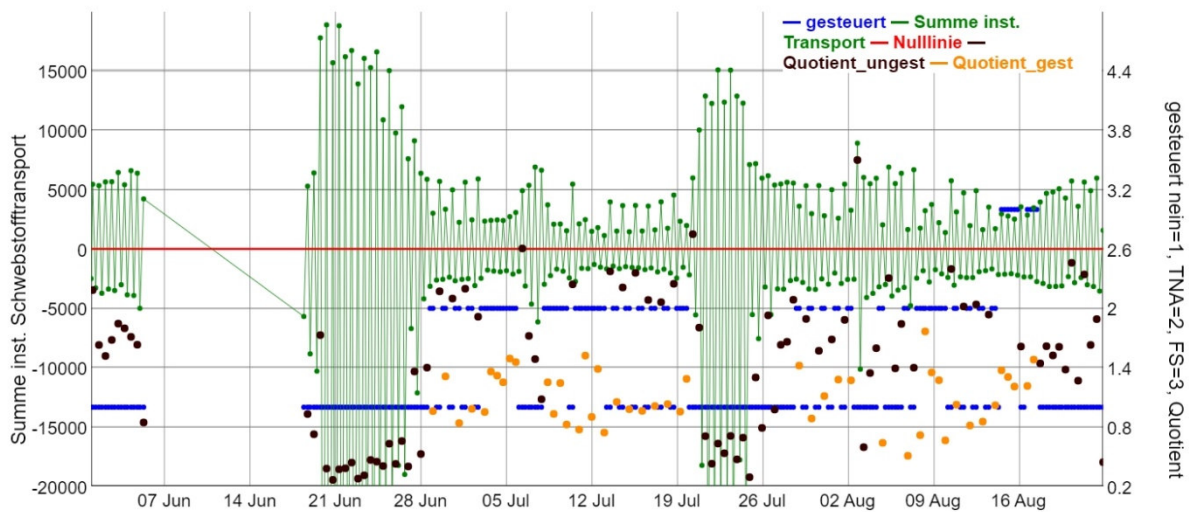


Abbildung 94: Soltborg untere Sonde; grüne Linie: Summe der instantanen Schwebstofftransporte getrennt für Ebbe (negative Werte) und Flut (positive Werte) (Daten der Gewässergütemessstelle des NLWKN); braune Punkte (ungesteuert), gelbe Punkte (gesteuert): Quotient aus der Summe der inst. Schwebst. während einer Flutphase und der Summe der inst. Schwebst. während der vorhergehenden Ebbsphase; blaue Punkte: ungesteuerte Tide=1, TnWA=2, FS=3

Die deutliche Flutstromdominanz in Bezug auf die Summe des instantanen Schwebstofftransports, die an den unteren Sonden des mobilen Messstranges im ungesteuerten Zustand beobachtet werden kann, ist auf das temporäre Einsinken dieser Sonde in Flüssigschlickschichten zurückzuführen. Während der Spring-Phasen kommt es an der sohnahen Sonde am Ende der Flutphasen zu einem sprunghaften Anstieg der Schwebstoffgehalte von unter 5 g/l auf mehr als 50 g/l. Dieser sprunghafte Anstieg wird wahrscheinlich durch das Aufwachsen einer Flüssigschlickschicht bis auf Höhe der Sonde hervorgerufen. Ab diesem Zeitpunkt fallen die Strömungsgeschwindigkeiten an der sohnahen Sonde auf unter 10 cm/s. Mit einsetzendem Ebbstrom steigen die Strömungsgeschwindigkeiten auch an der Sohle an, aber die Flüssigschlickschicht kann erst etwa 2 h nach Einsetzen des Ebbstromes aufgelöst werden, sodass sich sehr hohe Transporte während Ebbe sohnah ergeben. Diese unterscheiden sich grundlegend von den Transportcharakteristika in der darüber liegenden Wassersäule, mit der schwach konzentrierten Suspension.

Mit Beginn der TnWA wurden in Soltborg an der sohnahen Schwebstoffsonde um ein vielfaches geringere Summen des instantanen Schwebstofftransports sowohl während Ebbe als auch während Flut erfasst. Hochkonzentrierte Flüssigschlickschichten traten während der Steuerung nicht auf, aber hierbei ist zu bedenken, dass dies auch zu Beginn der Messung Anfang Juni während einer Nipp-Phase nicht der Fall war.

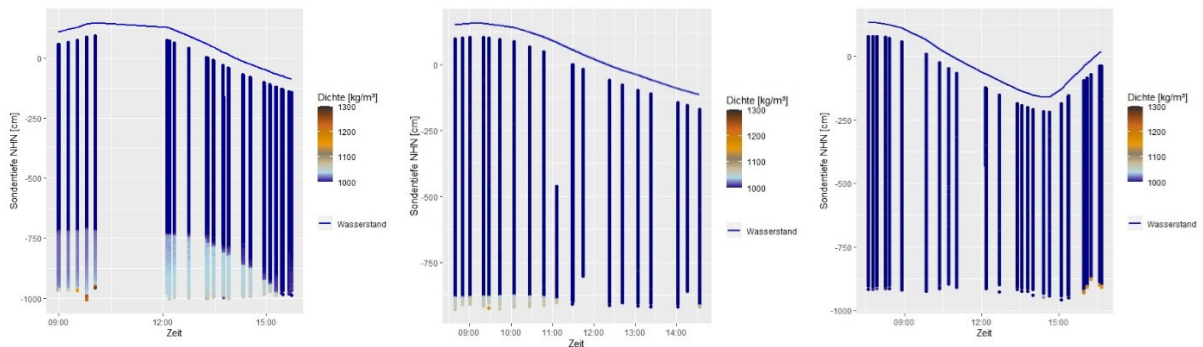
Auch an der oberflächennahen Sonde ist die Summe des instantanen Schwebstofftransports bei gesteuerten Tiden geringer. Da hier kein Flüssigschlick auftritt ist das auf den veränderten Schwebstofftransport vor allem durch die geringeren Flutstromgeschwindigkeiten zurückzuführen. Zwar werden auch die Schwebstofftransporte während des Ebbstromes reduziert, jedoch in geringerem Maße, sodass bei gesteuerten Tiden eine leichte Ebbstromdominanz zu beobachten ist.

6.8.1.4.1 Erfassung der vertikalen Schwebstoffverteilung bei Soltborg (Unterems-km 18,4)

Um die zuvor beschriebene Sedimentdynamik auch vertikal aufgelöst betrachten zu können, wurden nahe des mobilen Dauermessstranges in Soltborg vor und während des Technischen Tests zahlreiche Vertikalprofile der Schwebstoffkonzentration mit Hilfe einer Dichtesonde erfasst. Die Messungen

fanden bei Ebbe und zu Beginn der darauffolgenden Flut an drei unterschiedlichen Tagen statt, die Zeitpunkte der einzelnen Messkampagnen S1 bis S3 wurden in der folgenden Abbildung 95 (s. unten) markiert. Die Durchführung der Messkampagnen wird in Kapitel 5.10 ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse werden im folgenden Unterkapitel detailliert dargestellt und mit den Ergebnissen der Dauermessungen verknüpft.

Abbildung 95: Vertikalprofile der Messkampagnen S1, S2 und S3



Messkampagne S1 am 18.6.2020 bei km 18,4 (Soltborg)

Messkampagne S2 am 1.7.2020 bei km 18,4 (Soltborg)

Messkampagne S3 am 15.7.2020 bei km 18,4 (Soltborg)

Alle drei Messkampagnen fanden während einer Nipp-Phase statt. In Soltborg ist vor Beginn des technischen Tests über die gesamte Ebbphase ein vertikaler Schwebstoffgradient zu erkennen, der in den beiden darauffolgenden Messungen nicht mehr auftritt. Die drei Messkampagnen fanden zu Zeitpunkten statt, an denen auch am mobilen Dauermessstrang sehr niedrige Schwebstoffgehalte registriert wurden. Ein Hinweis auf mobile Flüssigschlickschichten ist in den Messergebnissen nicht zu finden.

6.8.1.5 Terborg

In Terborg treten im gesamten Betrachtungszeitraum nie Schwebstoffgehalte über 5 g/l auf. Das deutet darauf hin, dass mobile Flüssigschlickschichten nie bis auf Höhe der Schwebstoffsonde anwachsen konnten.

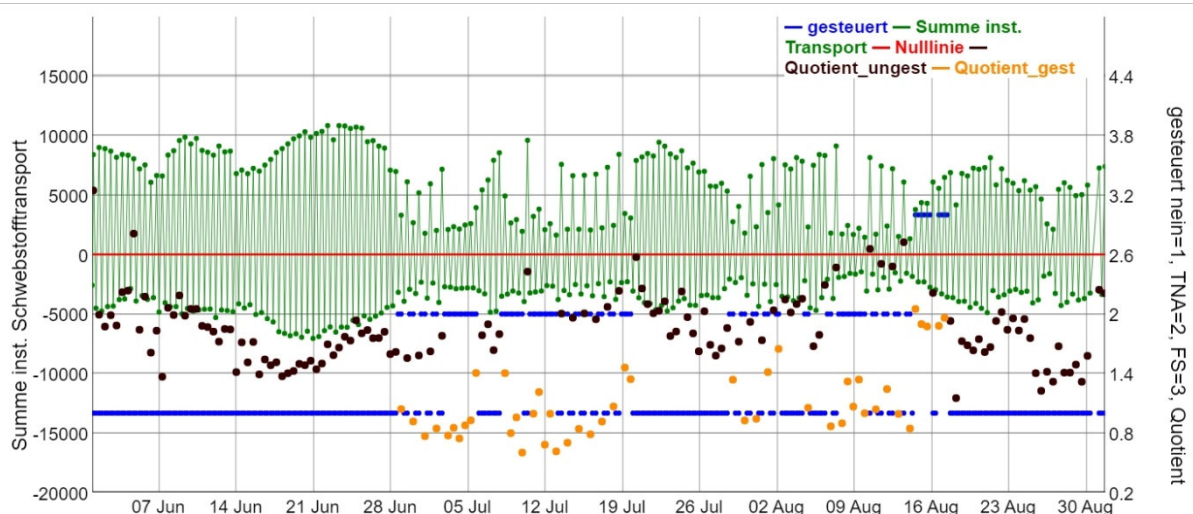


Abbildung 96: Terborg; grüne Linie: Summe der instantanen Schwebstofftransporte getrennt für Ebbe (negative Werte) und Flut (positive Werte) (Daten der Gewässergütemessstelle des NLWKN); braune Punkte: Quotient aus der Summe der inst.

Schwebst. während einer Flutphase und der Summe der inst. Schwebst. während der vorhergehenden Ebbphase; blaue Punkte: ungesteuerte Tide=1, TnWA =2, FS = 3

In den ungesteuerten Zeiträumen ist an der Station eine deutliche Flutstromdominanz zu beobachten, die während des Flutstroms transportierten Schwebstoffmengen überschreiten die während des Ebbstroms aufsummierten Mengen deutlich. Mit Beginn der TnWA Anfang Juli kommt es zu einer deutlichen Abnahme der Transporte sowohl bei Ebb- als auch bei Flutstrom. Der Quotient deutet auf einen relativ ausgeglichenen Transport hin, allerdings nur in den Tiden, in denen das Sperrwerk geschlossen wurde. Die wenigen mit Hilfe der FsTs gesteuerten Tiden unterscheiden sich nicht vom ungesteuerten Zustand.

6.8.1.6 Ditzum/Pogum

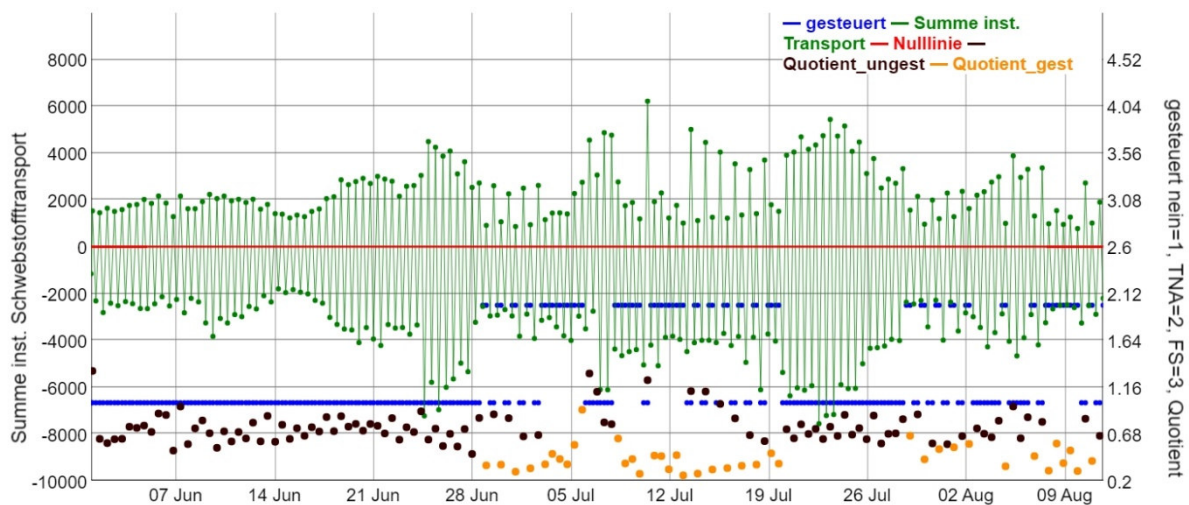


Abbildung 97: Ditzum (Strömung), Pogum (Schwebstoffgehalte); grüne Linie: Summe der instantanen Schwebstofftransporte getrennt für Ebbe (negative Werte) und Flut (positive Werte) (Daten der Gewässergütemessstelle des NLWKN); braune Punkte (ungesteuert), gelbe Punkte (gesteuert): Quotient aus der Summe der inst. Schwebst. während einer Flutphase und der Summe der inst. Schwebst. während der vorhergehenden Ebbphase; blaue Punkte: ungesteuerte Tide=1, TnWA =2, FS = 3

Die Dauermessstation Pogum befindet sich seewärts des Emssperrwerkes in Gandersum. An dieser Station kann eine leichte Ebbstromdominanz beobachtet werden, die durch die Tidesteuerung insbesondere zu Beginn des Technischen Tests verstärkt wird. Die transportierten Mengen werden hier durch die Steuerung nicht so stark beeinflusst wie an den weiter stromauf gelegenen Stationen.

6.8.2 Fazit und Zusammenfassung der Analyse der stationären Messung und ergänzenden Messkampagnen:

- Die Transportbetrachtungen (instantaner Schwebstofftransport) repräsentieren je Station nur einen Punkt im Gewässerquerschnitt - zumeist im oberen, frei fließenden Wasserkörper, in dem maximale Schwebstoffgehalte von einigen g/l auftreten. Die dort transportierten Schwebstoffmengen können von denen in den darunter häufig auftretenden hochkonzentrierten Flüssigschlussschichten (mobiler mud und stationärer mud) deutlich in Betrag und Richtung abweichen.
- Die Summe des instantanen Schwebstofftransportes unterliegt im ungesteuerten Zustand einer hohen natürlichen Variabilität, die maßgeblich durch den Spring-Nipp-Zyklus verursacht wird. Besonders deutlich fällt die Spring-Nipp-Variabilität an den Stationen auf, an denen

ausschließlich während Spring-Phasen sohnah hochkonzentrierte Flüssigschlicksuspensionen registriert werden.

Die Tideniedrigwasseranhebung verändert die Schwebstoffmengen, die während einer Ebbe- und Flutphase in der obersten Schicht (frei fließender Wasserkörper) transportiert werden, und zwar folgendermaßen:

- Die transportierten Mengen werden durch die Steuerung an allen Stationen sowohl während Ebbstrom als auch während Flutstrom reduziert, da die Zeiträume mit transportrelevanten Strömungsgeschwindigkeiten kürzer sind.
- Diese Reduzierung der Transporte fällt bei Flutstrom stärker aus, da hier die besonders hohen Flutstromgeschwindigkeiten zu Beginn der Flutphase durch die Steuerung nicht mehr auftreten.
- Dadurch wird der Ebbstromtransport gegenüber dem Flutstromtransport tendenziell gestärkt, der Quotient Q nimmt ab und erreicht bei gesteuerten Tiden an den meisten Stationen häufig Werte unter 1 (Ebbstromdominanz).

Tabelle 57: Mittelwerte des Quotient aus der Summe des instantanen Schwebstofftransports während der Flutphase und der Summe des instantanen Schwebstofftransports während der vorhergehenden Ebbphase an den Dauermessstationen der Unterems

Mittelwerte	Papenburg	Weener	Leerort	Soltborg_o	Terborg	Pogum/Ditzum
Q ungest.	1,53	2,24	0,86	1,05	1,85	0,75
Q TnwA	0,44	0,72	0,29	0,73	1,01	0,43
Q FsTs	1,89	0,98	0,43	0,84	1,93	-

- An Stationen, an denen temporär Flüssigschlickschichten an der Gewässersohle auftreten (Papenburg, Weener) und die Schwebstoffsonden zeitweise in diese eintauchen, repräsentiert die Transportberechnung nicht mehr durchgehend den Schwebstofftransport in der freien Wassersäule. Hier sind die Unterschiede zwischen gesteuerten und ungesteuerten Zeiträumen besonders groß.
- Die durch die Steuerung veränderten Strömungsgeschwindigkeiten verändern die Mächtigkeit und die Schwebstoffkonzentration von Flüssigschlickschichten sowie das Verhältnis von mobilem zu stationärem mud und somit das für Transportprozesse zur Verfügung stehende Material.
- Mit Hilfe der ergänzenden Messkampagnen kann gezeigt werden, dass eine intensive TnwA dazu führen kann, dass die mobilen Flüssigschlickschichten in ihrer Mächtigkeit abnehmen und somit weniger mobiles Material für Transportprozesse zur Verfügung steht.
- Die Auswirkung der TnwA auf den Schwebstoffhaushalt unterscheidet sich trotz vergleichbarer Randbedingungen in den verschiedenen Phasen des Technischen Tests.
- Eine Unterbrechung der Steuerung führt wahrscheinlich innerhalb weniger Tiden wieder zur Herstellung unbeeinflusster Zustände.
- Die Aussagen beziehen sich auf die TnwA, auf Grund der kurzen Dauer des Tests der FS kann deren Auswirkung auf den Schwebstoffhaushalt nicht abgeschätzt werden.

6.9 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Gewässergüte (Längsprofilmessungen von Borkum bis Herbrum)

Bearbeitet von Andreas Schöl (BfG)

Der Vergleich der Ergebnisse von Messfahrten aus den Jahren 2009 bis Juni 2020 mit den Ergebnissen der Messfahrt am 14. Juli 2020 soll einen Hinweis auf eine Veränderung durch den Testbetrieb geben. Dazu werden die insgesamt 22 Messfahrten der Jahre 2009 bis Juni 2020 abschnittsweise für die Tideems zusammengefasst und als Boxplots dargestellt. Diese Darstellung zeigt die typische Verteilung der einzelnen Parameter für die Sommersituation der Tideems. Diese großräumige Messung bindet das eigentliche Untersuchungsgebiet (Knock bis Herbrum) in die gesamte Ems bis nach Borkum ein. Durch den Vergleich der Messung während des Testbetriebs mit den Daten der Messreihe des Zeitraums 2009 bis Juni 2020 soll eine Einordnung der Auswirkungen der Sperrwerkssteuerung ermöglicht werden. Alle Messfahrten wurden während einer Tidephase gegen den Ebbstrom von Borkum bis zum Wehr Herbrum durchgeführt. Die Messungen fanden oberflächennah in ca. 1-2 m Wassertiefe statt. Ausführliche Darstellungen aller Längsprofilmessfahrten in der Tideems finden sich in den BfG-Berichten 1959 (2019) und 2061 (2021)²⁷.

6.9.1 Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Schwebstoffgehalte – vor und während des Technischen Tests

Die oberflächennahe Schwebstoffverteilung entlang der Tideems war während der ungesteuerten Ebbphase des Technischen Tests am 14.7.2020 gegenüber der typischen Sommersituation deutlich verändert. Während die Schwebstoffgehalte stromab des Sperrwerks (> km 35) nur eine geringe Veränderung aufwiesen (bis auf eine Anomalie im Bereich km 45-55), traten im Bereich der Tideems von km 0-20 deutlich geringere Schwebstoffwerte auf. In diesem Abschnitt lagen die Schwebstoffgehalte mit < 500 mg/l unter den minimalen Gehalten des Bezugszeitraums. Im Abschnitt stromauf von Papenburg bis zum Wehr Herbrum lagen mit Bezug zur typischen Sommersituation annähernd mittlere Verhältnisse vor.

²⁷ BfG-Bericht 1959 (2019): Plankton und Wasserbeschaffenheit in der Tideems 2009 - 2016

BfG-Bericht 2061 (2021): Plankton und Wasserbeschaffenheit in der Tideems 2017 - 2020 (Update zu BfG-Bericht 1959)

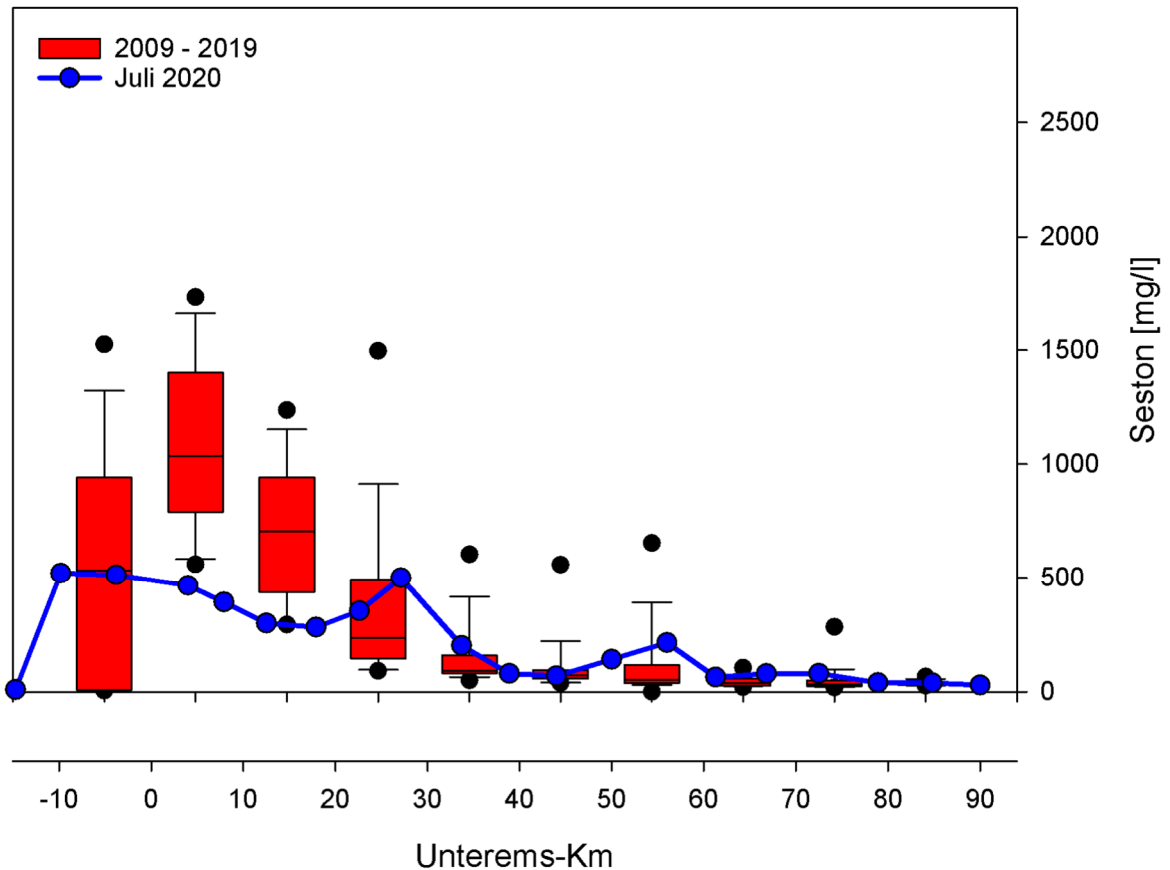


Abbildung 98: Längsverteilung der oberflächennahen Schwebstoffgehalte während der Messfahrt am 14.7.2020 im Vergleich zur Verteilung während der Messfahrten der Jahre 2009 bis Juni 2020.

6.9.2 Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Salzgehalte – vor und während des Technischen Tests

Auch die oberflächennahe Salzgehaltsverteilung entlang der Tideems war während der ungesteuerten Ebbphase des Technischen Tests am 14.7.2020 gegenüber der typischen Sommersituation deutlich verändert. Der Salzgradient war stromab verschoben und es waren limnische Bedingungen (PSU < 1) im oberen Tideemsabschnitt von Km 18 bis zum Wehr Herbrum zu beobachten. Insbesondere im Abschnitt vom km 20 bis km 50 lagen die Salzgehalte unter den minimalen Salzgehalten der typischen Sommersituation der Jahre 2009 bis Juni 2020. Strom ab km 60 traten dann im Juli 2020 Salzgehalt auf,

die bezogen auf den typischen Salzgehaltszustand im oberen 75-Quantil der Verteilungen und darüber lagen.

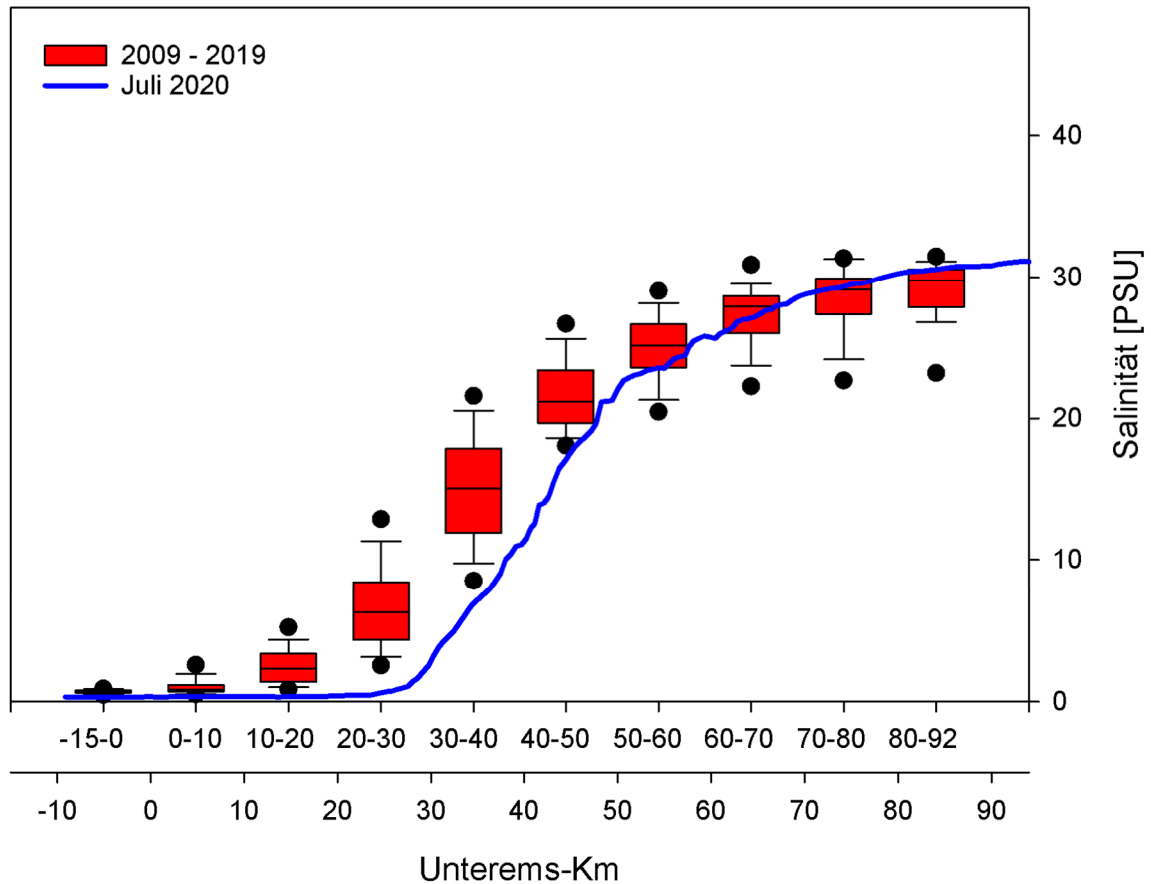


Abbildung 99: Längsverteilung der oberflächennahen Salzgehalte während der Messfahrt am 14.7.2020 im Vergleich zur Verteilung während der Messfahrten der Jahre 2009- Juni 2020

6.9.3 Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Sauerstoffgehalte – vor und während des Technischen Tests

Beim Vergleich der Längsverteilung der Sauerstoffsättigung zu der typischen Sommersituation der Jahre 2009 bis Juni 2020 fällt auf, dass die Sauerstoffsättigungen am 14.7.2020 im oberen Abschnitt der Tideems von km 20 bis zum Wehr Herbrum immer oberhalb des 75-Quantils der typischen Verteilung lagen. Die Messwerte von über 60%-Sättigung lagen somit im Bereich der Maximalwerte des Vergleichszeitraums. Für den Abschnitt km 20-30 traten bezogen auf die typische Sommersituation mittlere Bedingungen auf, während im Bereich des Sperrwerks (km 30-40) eher unterdurchschnittliche Sauerstoffsättigungen vorlagen. Auch stromab Richtung Nordsee waren im Vergleich zur typischen Sommersituation geringere Sauerstoffsättigungen um den 90%-Wert also leichte Untersättigungen zu messen.

Die während des Versuchs oberflächennah verbesserten Sauerstoffsättigungen im Bereich km 0 -20 sind sicherlich durch die in diesem Abschnitt verminderten Schwebstoffgehalte zu erklären. Inwieweit die beim Versuch beobachteten geringeren Sauerstoffsättigungen im Abschnitt um das Sperrwerk durch höhere Schwebstoffgehalte bedingt war, lässt sich aus den Daten nicht klar ableiten. Die stromab geringen Sauerstoffsättigungen können möglicherweise auf geringe Phytoplanktonbiomassen und einen damit geringeren biogenen Sauerstoffeintrag zurück zu führen sein (siehe Abschnitt Phytoplankton in 6.9.56.9.56.9.5).

O₂-Sättigung
Boxplott-Sommerbereisungen 2009-2020
vs
LP 2020_07

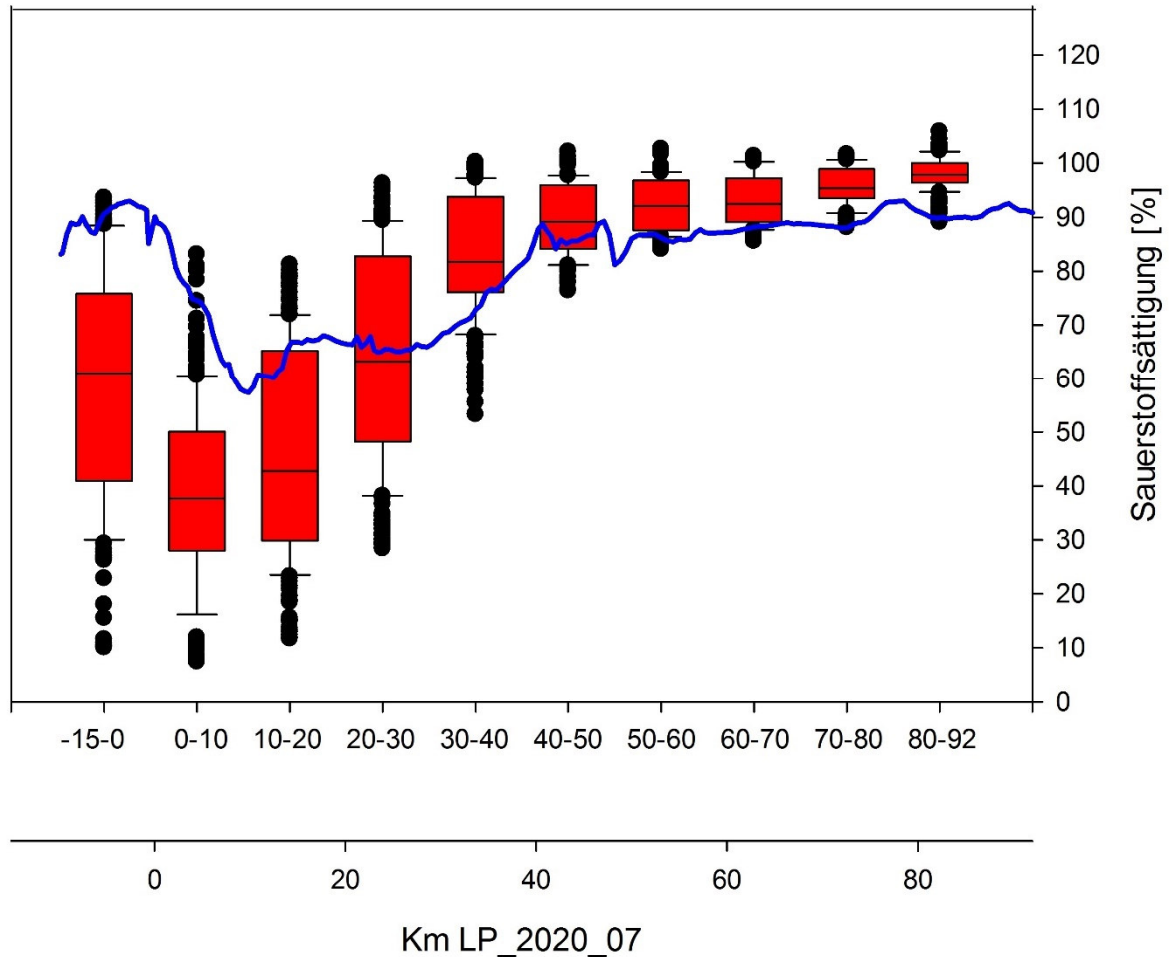


Abbildung 100: Längsverteilung der oberflächennahen Sauerstoffsättigung während der Messfahrt am 14.7.2020 im Vergleich zur Verteilung während der Messfahrten der Jahre 2009 - Juni 2020.

6.9.4 Vergleich der Längsverteilung oberflächennaher Nährstoffgehalte – vor und während des technischen Tests

Sowohl geänderte Schwebstoffgehalte als auch geänderte Salzgehalte wirken sich auf die Nährstoffgehalte und deren Verteilung entlang der Tideems aus.

In den nachfolgenden Abbildungen wird für die Parameter ortho-Phosphat und Nitrat die während der Tidesperrwerkssteuerung am 14.7.2020 durchgeführte Messfahrt mit Ergebnissen von Messfahrten der Jahre 2009 bis Juni 2020 verglichen. Dadurch ist eine erste orientierende Einordnung der während des Technischen Tests aufgetretenen Änderungen der Nährstoffverteilungen gegenüber den in vorhergehenden Jahren beobachteten Verteilungen möglich.

Während des Versuchs also bei der Messfahrt im Juli 2020 traten im oberen Abschnitt der Tideems bis ca. km 50 geringere ortho-Phosphatgehalte als im Bezugsdatensatz auf. Insbesondere im Bereich der deutlich verminderten Schwebstoffgehalte (km 0-20) und sogar noch weiter stromab bis km 40 wurden die minimalsten Werte der Jahre 2009-2020 unterschritten. Hierfür dürfte die geringere P-Freisetzung aus den verminderten Schwebstoffen ursächlich sein. Stromab km 50 lagen im Juli 2020 mittlere ortho-P-Gehalte bezogen auf den Zeitraum 2009-2020 vor.

Bei der Messfahrt im Juli 2020 waren im oberen Abschnitt der Tideems bis ca. km 60 meist deutlich höhere Nitratgehalte zu messen als die Mediane bzw. 75-Quantile des Bezugsdatensatzes. Ein Zusammenhang zu geänderter mikrobieller Aktivität durch verminderte Schwebstoffgehalte und insbesondere eine geringere Denitrifikation auf Grund verbesserter Sauerstoffbedingungen könnten für den verminderten Rückgang der Nitrate im Längsverlauf der Tideems verantwortlich sein. Auch geringere Nitritgehalte (nicht dargestellt) der Messfahrt im Juli 2020 während des Versuches weisen auf mögliche Änderungen im Stickstoffkreislauf als Folge der Sperrwerkssteuerung hin.

ortho-Phosphat-Gehalt
Boxplot - Sommerbereisungen 2009-2016
 vs
 LP_2020_07

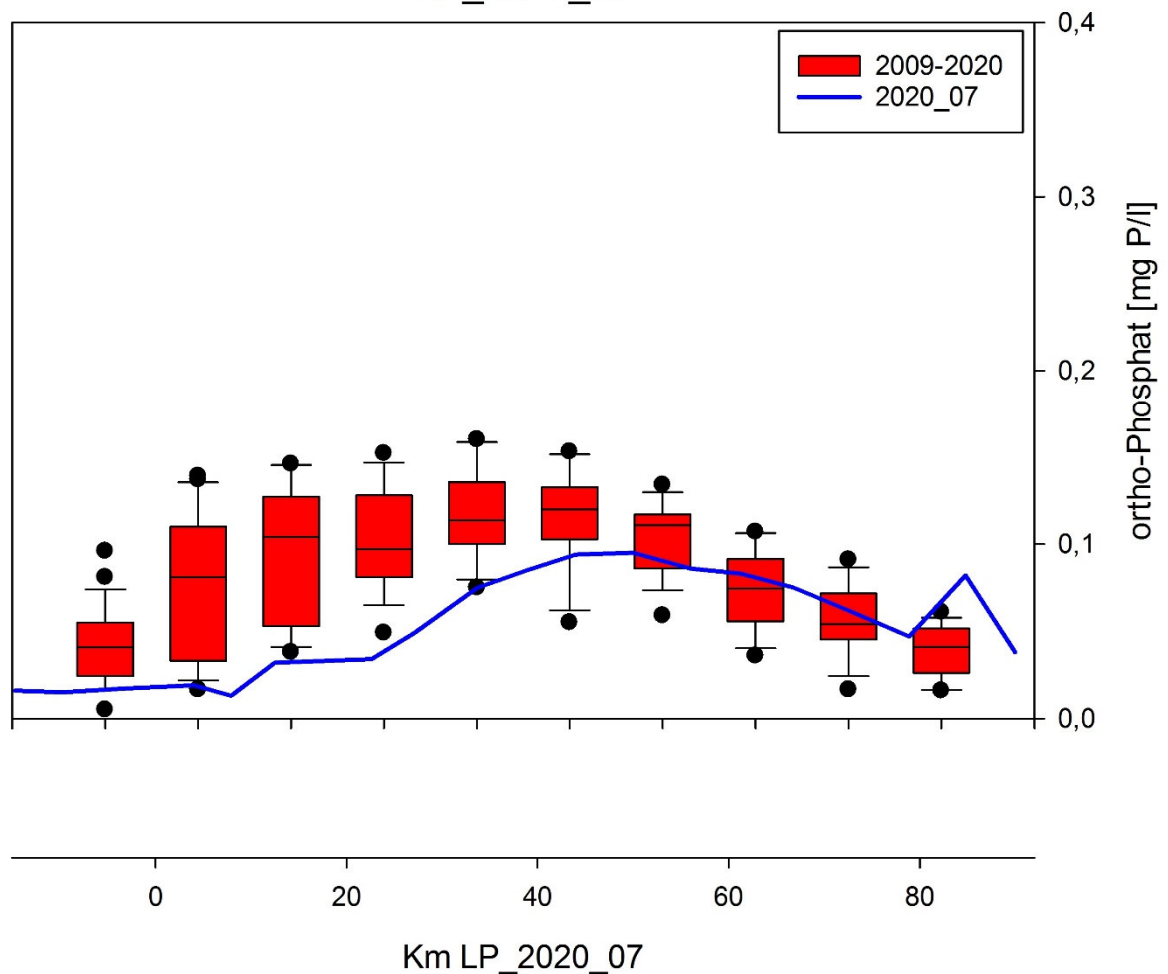


Abbildung 101: Längsverteilung des oberflächennahen ortho-Phosphatgehaltes während der Messfahrt am 14.7.2020 im Vergleich zur Verteilung während der Messfahrten der Jahre 2009 - Juni 2020

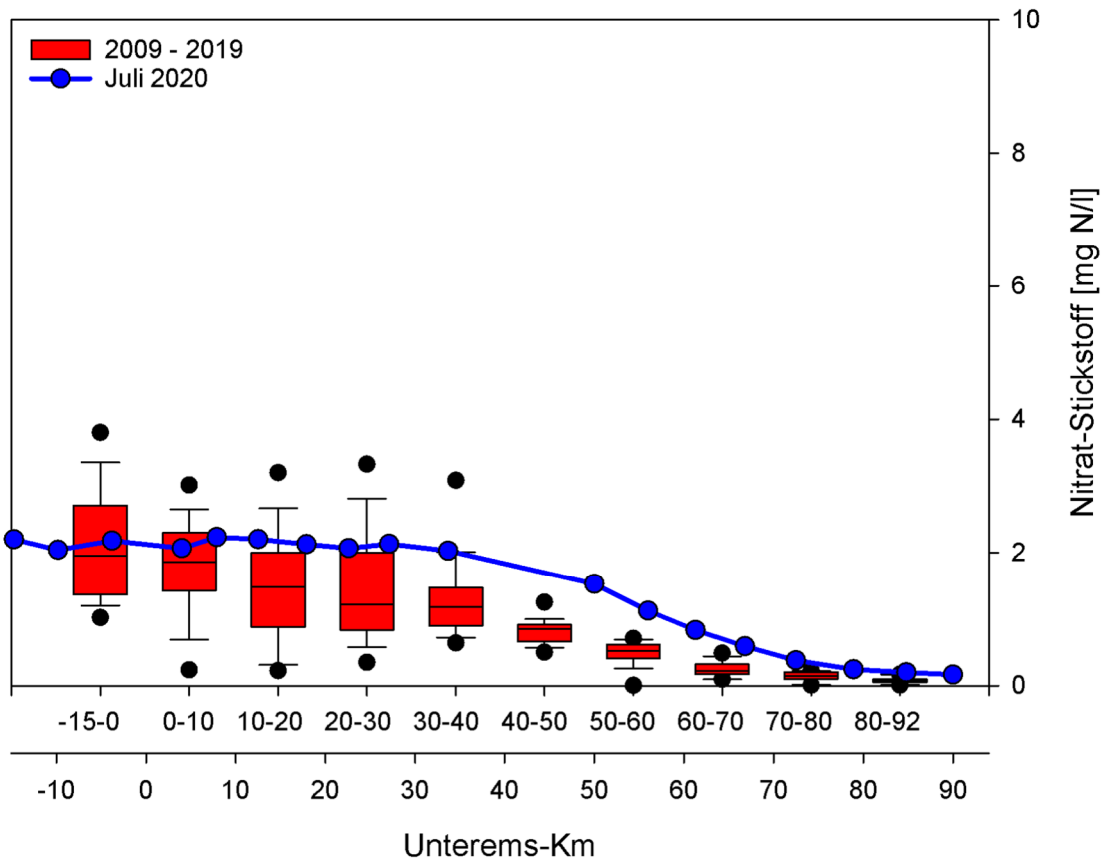


Abbildung 102: Längsverteilung des oberflächennahen Nitratgehaltes während der Messfahrt am 14.7.2020 im Vergleich zur Verteilung während der Messfahrten der Jahre 2009 - Juni 2020

6.9.5 Einfluss der Tideniedrigwasseranhebung bzw. der geänderten Trübung auf das Phytoplankton

Mit verminderten Schwebstoffgehalten wird die Trübung in der Wassersäule verringert. Dies trifft insbesondere für den oberen Teil der Wassersäule zu. Dadurch wird die Lichtversorgung des Phytoplanktons verbessert und es kann zu einer Zunahme der Algenbiomasse kommen. Erste Hinweise, dass während des Technischen Tests eine Reaktion des Phytoplanktons zu beobachten war, ist aus dem Vergleich der Phytoplanktonbiovolumina der Längsmessfahrten vor (am 16.6.2020) und während der Sperrwerkssteuerung (am 14.7.2021) abzuleiten (Abbildung 103, aus AEV-Bericht zum Plankton, AquaEcology 2021²⁸). Bei der Beprobung während der Steuerung traten deutlich höhere Phytoplanktonbiovolumina im Emsabschnitt km 4- 22 auf als bei der Längsmessfahrt vor Beginn des Versuchs. Weiterhin minimale Biovolumina traten im oberen Abschnitt der Tideems zwischen Papenburg und dem Wehr Herbrum (km 0 bis -12) auf. Die Abnahme der Biovolumina stromab des Sperrwerks kann durch saisonale Effekte, d.h. auf im Sommer abnehmende Phytoplanktongehalte in den Küstengewässern bedingt sein.

Dauermessungen des Chlorophyllgehaltes bei km 18 mittels einer Sonde zeigten keine Änderung der Chlorophyllgehalte während des Technischen Tests.

²⁸ AquaEcology (2021): Aktualisierung der Antragsunterlagen zur Vertiefung der Außenems - Ergebnisbericht Phyto- und Zooplankton, im Auftrag des WSA Ems/Nordsee.

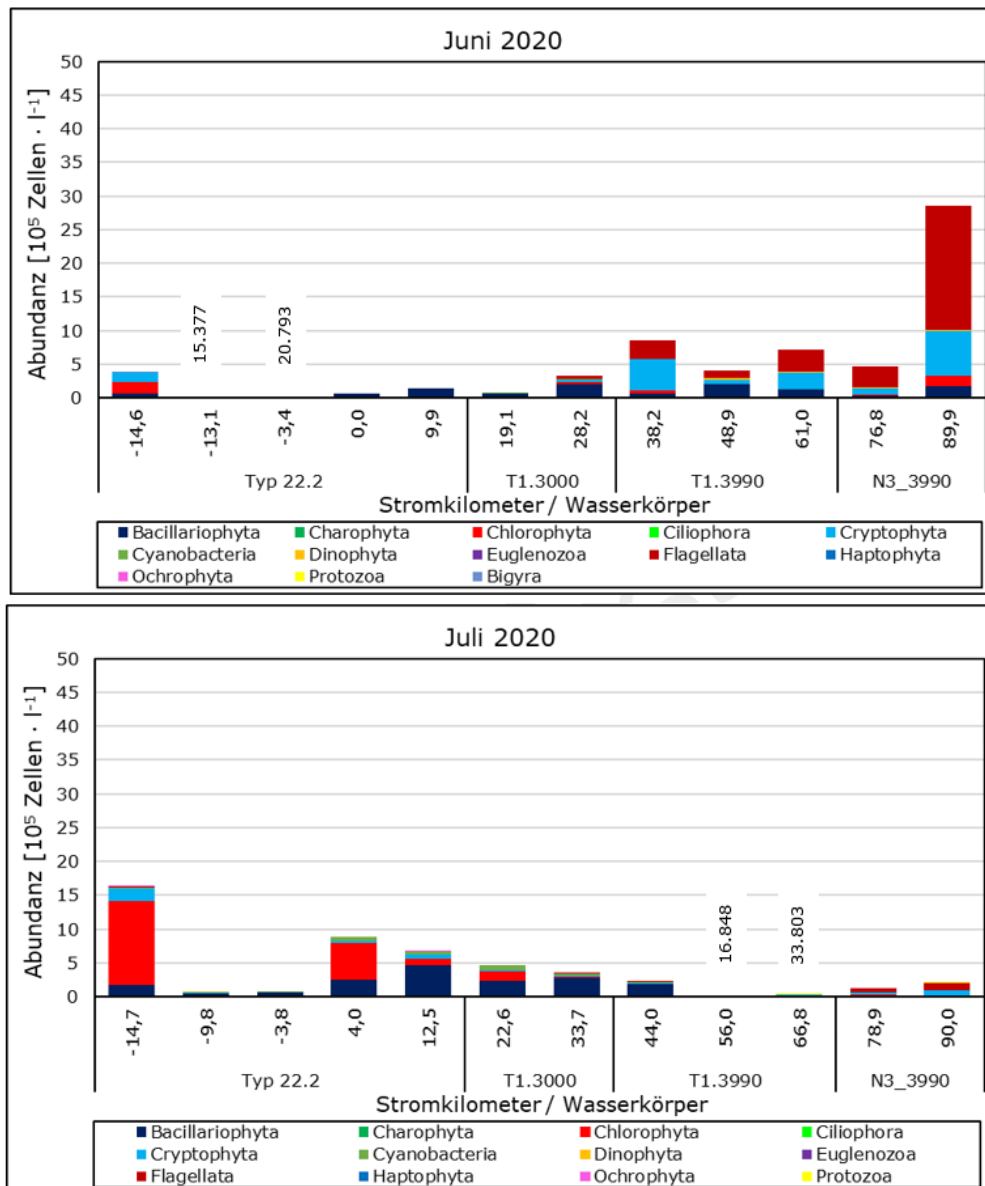


Abbildung 103: Längsverteilung der oberflächennahen Phytoplanktonbiovolumina während der Messfahrt am 14.7.2020 (untere Abbildung) im Vergleich zur Messfahrt am 16.6.2020 (obere Abbildung) vor Beginn der Sperrwerkssteuerung.

Die oberflächennahe Verteilung der Phytoplanktonbiomasse gemessen als Chlorophyll a-Gehalt entlang der Tideems war während der ungesteuerten Ebbphase des Technischen Tests am 14.7.2020 gegenüber der typischen Sommersituation verändert. Stromauf des Sperrwerks traten generell höhere Biomassen auf als im Bezugszeitraum 2009-2020. Im Bereich des Sperrwerks sowie stromab km 60 wurden im Juli 2020 eher geringere Chlorophyllwerte gemessen als im Bezugszeitraum. Die Interpretation muss aber unter dem Vorbehalt methodischer Probleme bei der Erfassung des Chlorophyllgehaltes auf Grund störender, hoher Schwebstoffgehalte in der Tideems gesehen werden.

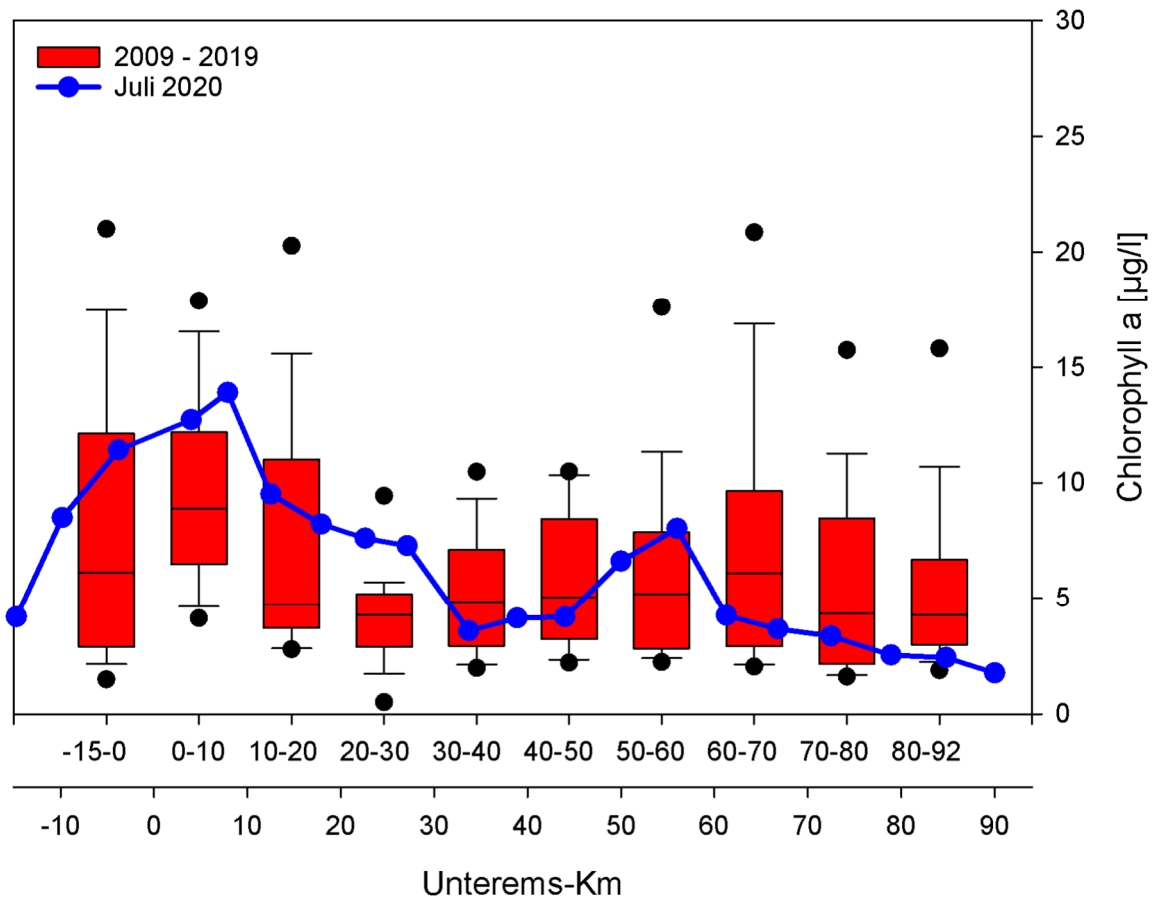


Abbildung 104: Längsverteilung des oberflächennahen Chlorophyll a Gehaltes während der Messfahrt am 14.7.2020 im Vergleich zur Verteilung während der Messfahrten der Jahre 2009 - Juni 2020.

6.10 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sauerstoff- und Schwebstoffverhältnisse sowie auf gelöste Stickstoffverbindungen (Vertikalprofile einzelner Ebbephassen bei Weener und Soltborg)

Bearbeitet von Andreas Schöl (BfG)

Die Messungen zeigen die vertikale Verteilung des Sauerstoffs und Schwebstoffs vor und während des Technischen Tests. Daran lässt sich die durch vertikale Vermischungsprozesse stark beeinflusste Gewässergüte und insbesondere die Abhängigkeit des Sauerstoffgehalts vom Schwebstoffgehalt darstellen. Die Messungen im Jahr 2020 fanden an mehreren Terminen vor und während des Versuchs statt. Eine Einordnung dieser Messungen gegenüber Messungen der Jahre 2014 bis 2020 soll die bewirkten Änderungen verdeutlichen (BfG-Bericht Entwurf, 2021). Eingeschränkt sind auch Rückschlüsse auf die Wirkungsweise der Sperrwerkssteuerung möglich.

Tabelle 58: Schema der Vertikalprofilmessungen des Jahres 2020

Datum	Startzeit / Endzeit Messungen	Anzahl Vertikalprofile	Startzeit / Endzeit vorherige Steuerung	Anteil gesteuerter Tiden bis zum aktuellen Zeitpunkt	Position	nächst-gelegener Pegel
	[MESZ]	[n]	[MESZ]	[%]	[Unterems- Km]	
17.06.2020	11:01 / 18:33	5	---	---	7,2	Weener
18.06.2020	10:05 / 16:32	5	---	---	18,2	Leerort
30.06.2020	09:14 / 16:57	6	01:02 / 03:35	67	7,2	Weener
01.07.2020	10:47 / 15:33	4	01:32 / 05:00	60	18,2	Leerort
15.07.2020	10:00 / 17:37	6	00:33 / 03:47	66	18,2	Leerort
16.07.2020	10:00 / 17:55	6	01:25 / 04:48	65	7,2	Weener
11.08.2020	08:30 / 16:10	6	22:07 / 01:42	50	7,2	Weener
12.08.2020	08:30 / 16:19	6	23:07 / 01:59	50	7,2	Weener

Anmerkung: zwischen dem 19. und 29.07. wurde der Technische Test für 17 Tiden unterbrochen. Der in der Tabelle angegebene Anteil der gesteuerten Tiden ist bis zum 16.07. auf die Testphase vor der Unterbrechung bezogen (Phase I) und für den 11. und 12.08 für den Zeitraum nach der Unterbrechung (Phase II).

Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Ergebnisse der Vertikalprofilmessungen an den Positionen Unterems-Km 7,2 und km 18 (Abbildung 105 bis Abbildung 110) sowie zusammenfassende Box Plots dieser Messungen gezeigt. Anschließend sind zum Vergleich zusammenfassende Box Plots von Vertikalprofilmessungen der Jahre 2014 bis Juni 2020 zu sehen.

Aus dem Vergleich der Messungen vor Beginn des Technischen Tests (17. und 18.6.2020) mit den Messungen direkt nach Beginn der Sperrwerkssteuerung am 30.06.2020 bei km 7,2 (Abbildung 105) und am 01.07. bei km 18,2 (Abbildung 109/Abbildung 108) ist ersichtlich, dass die Sauerstoffgehalte in den oberen und mittleren Wasserschichten unmittelbar angestiegen waren und die Schwebstoffgehalte stark abgenommen hatten. Bei km 18,2 traten diese Änderungen auch sohnah ein. Bei den weiteren Messungen am 15./16.7. wurden über die ganze Wassersäule einheitliche Sauerstoff- und Schwebstoffgehalte beobachtet, d.h. es traten in der beprobten Wassersäule keine vertikalen Gradienten mehr auf. Am 12.8. hatten sich dann an km 7,2 wieder starke vertikale Unterschiede bis in den oberen Teil der Wassersäule ausgebildet.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Langzeitreihe 2014 – Juni 2020 ist zu sehen, dass bei km 7,2 generell über die ganze Wassersäule Gradienten auftreten, während bei km 18,2 diese im Mittel nur sohnah zu beobachten sind. Damit kann die unterschiedlich schnelle Reaktion der beiden Positionen auf die Steuerung miterklärt werden. Das schnellere Wiederauftreten vertikaler Gradienten an km 7,2 deutet darauf hin, dass in diesem Bereich ein „Schwebstoff“-Pool bestehen geblieben war, der wieder aktiviert wurde.

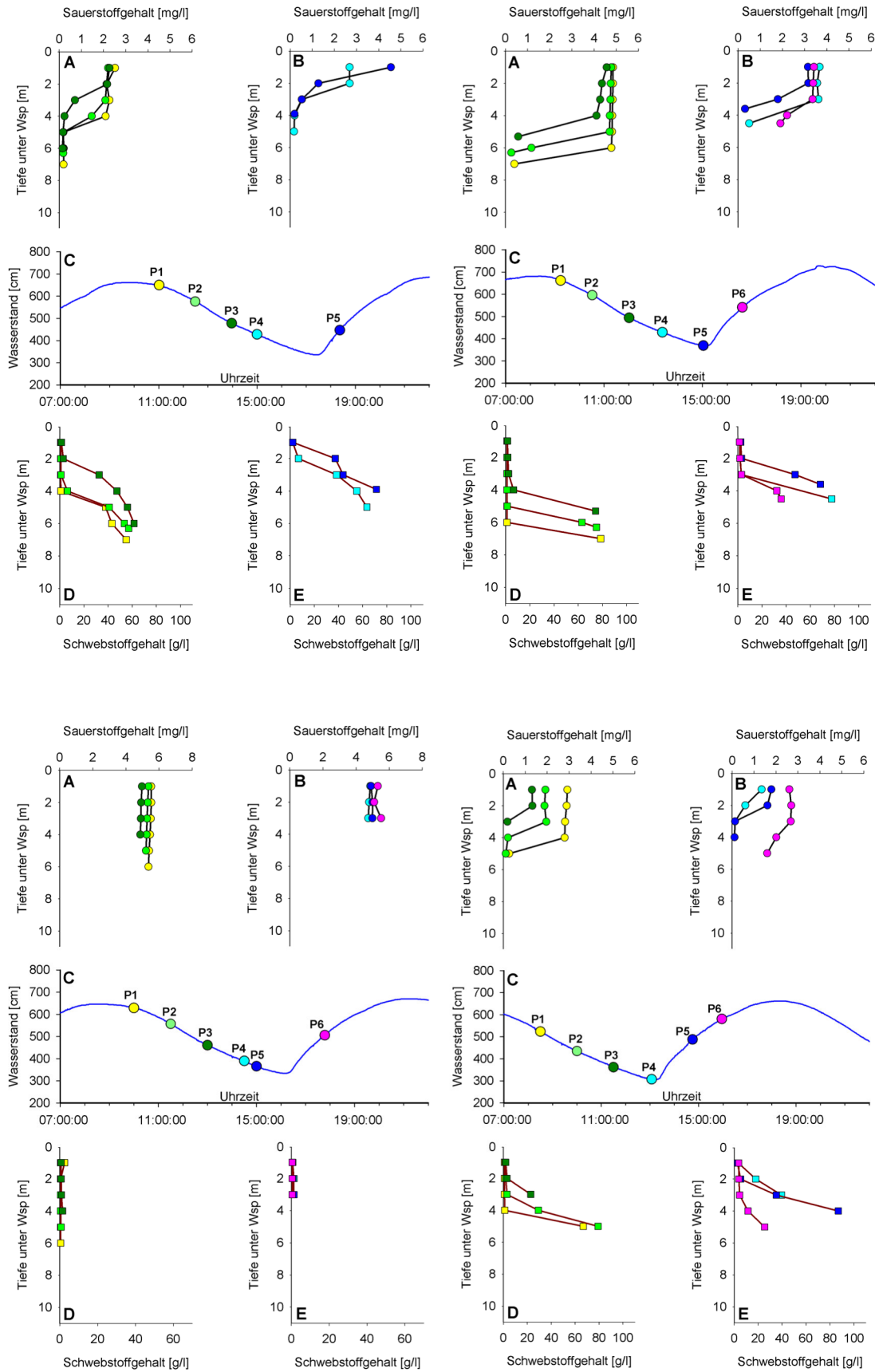


Abbildung 105: Vertikalverteilung des Sauerstoffs (A+B) und der Schwebstoffe (D+E) an Ems-km 7,2 während der Ebbphasen vor Beginn der Steuerung am 17.6 (oben links) sowie während der Steuerung am 30.6.2020 (oben rechts) am 16.7. (unten links) und am 12.8.2020 (unten rechts).

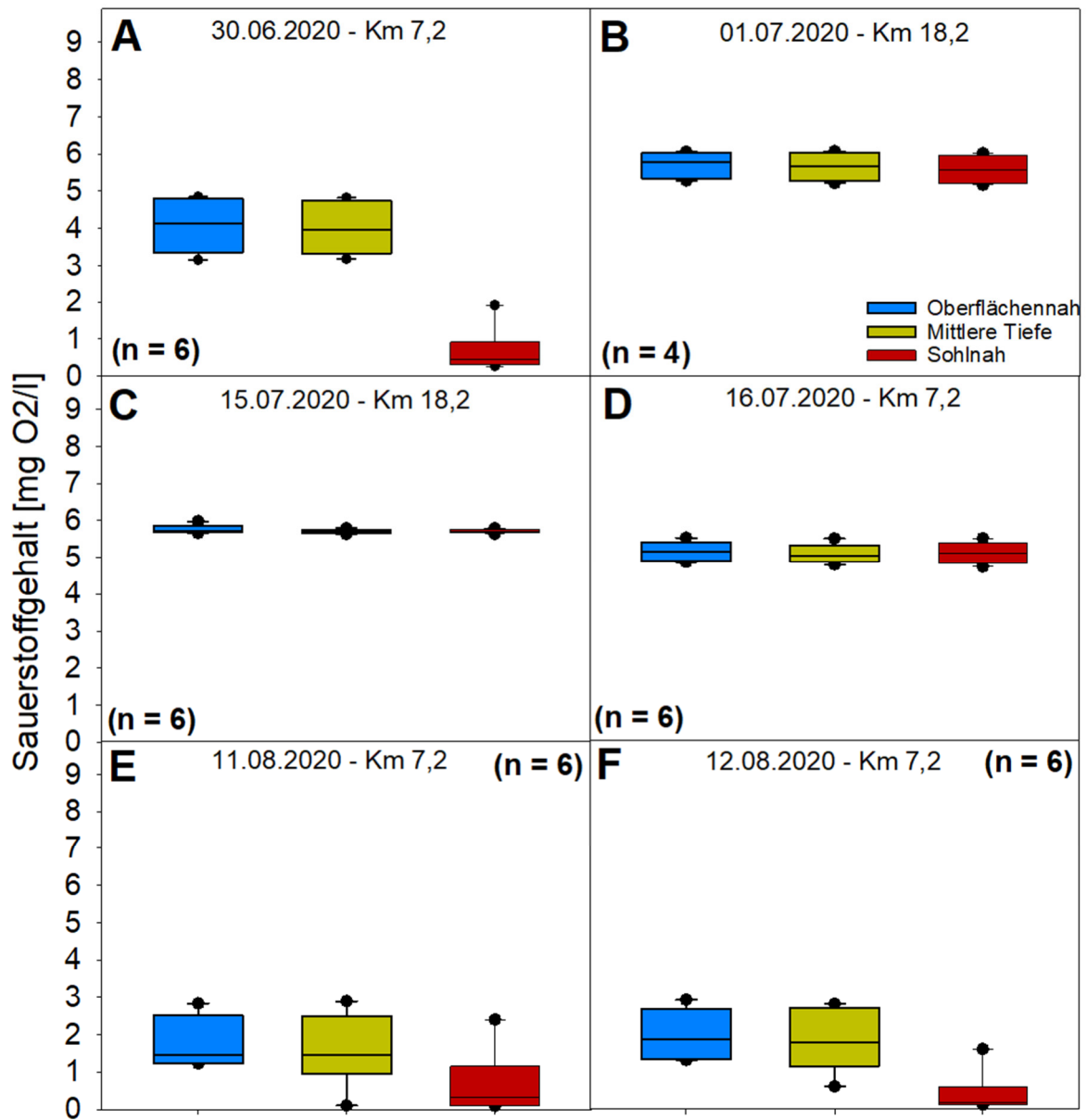


Abbildung 106: Box Plots der Vertikalverteilung des Sauerstoffs während des Versuchs an der Station km 7,2 am 30.6., am 16.7. sowie am 11. und 12.8.2020 und an Station km 18,2 am 01.7. und am 15.07.2020 (immer Ebbphase).

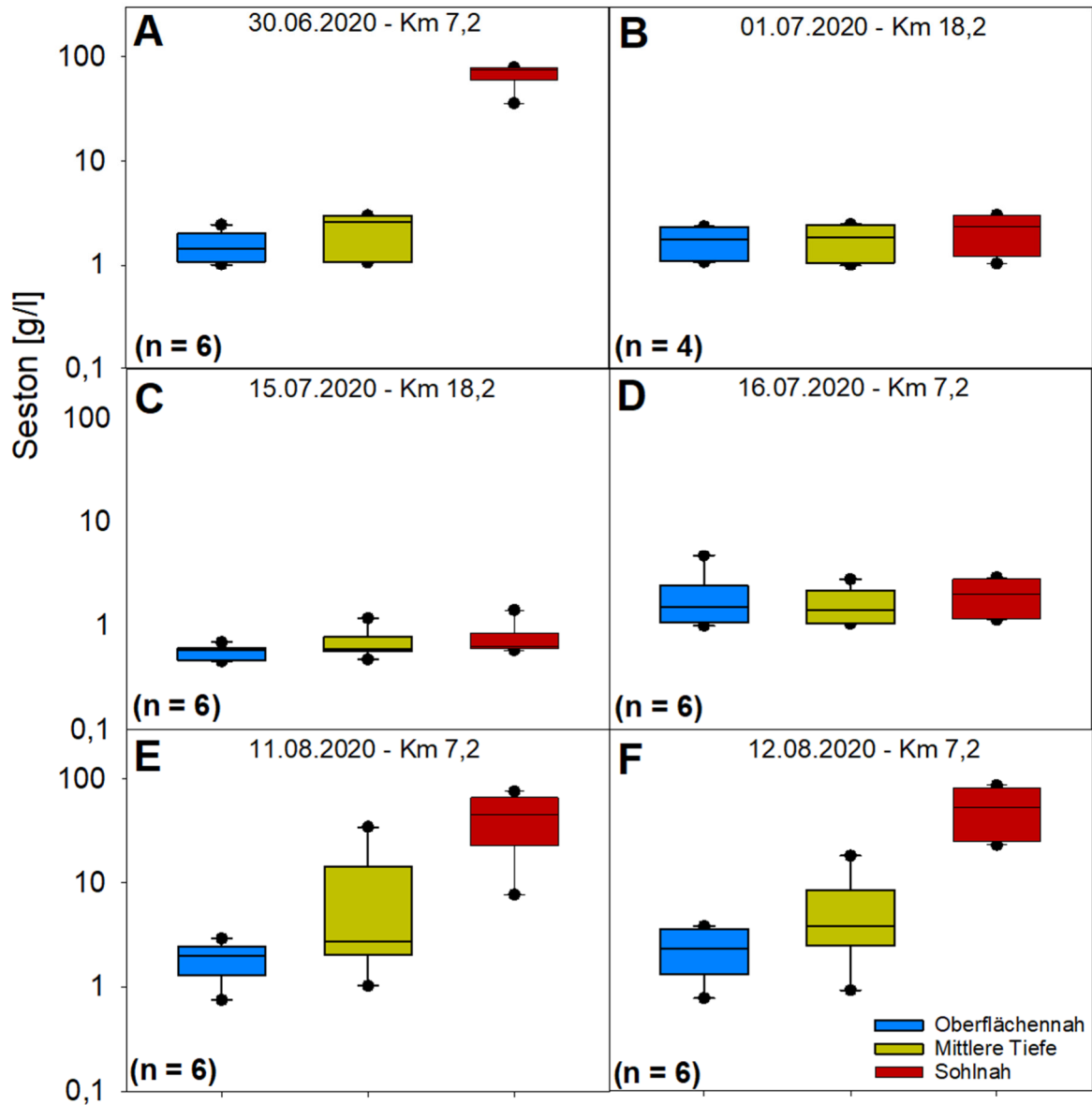


Abbildung 107: Box Plots der Vertikalverteilung des Schwebstoffs (Log-Skala) während des Versuchs an der Station km 7,2, am 30.6., am 16.7. sowie am 11. und 12.8.2020 und an Station km 18,2 am 01.7. und am 15.07.2020 (immer Ebbphase).

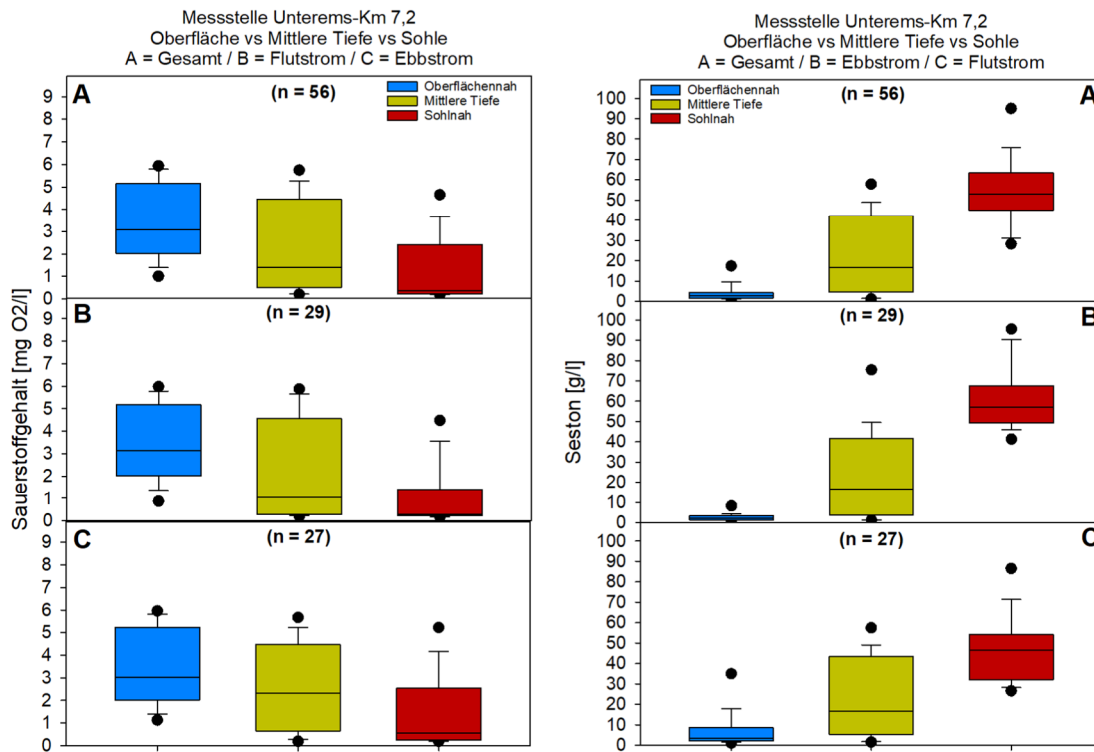


Abbildung 108: Box Plots der Vertikalverteilung des Sauerstoffgehaltes (links) und des Schwebstoffs (rechts) an km 7,2 basierend auf den Messungen der Jahre 2014 bis Juni 2020 (A) sowie aufgeteilt nach Ebbphasen (B) und Flutphasen (C).

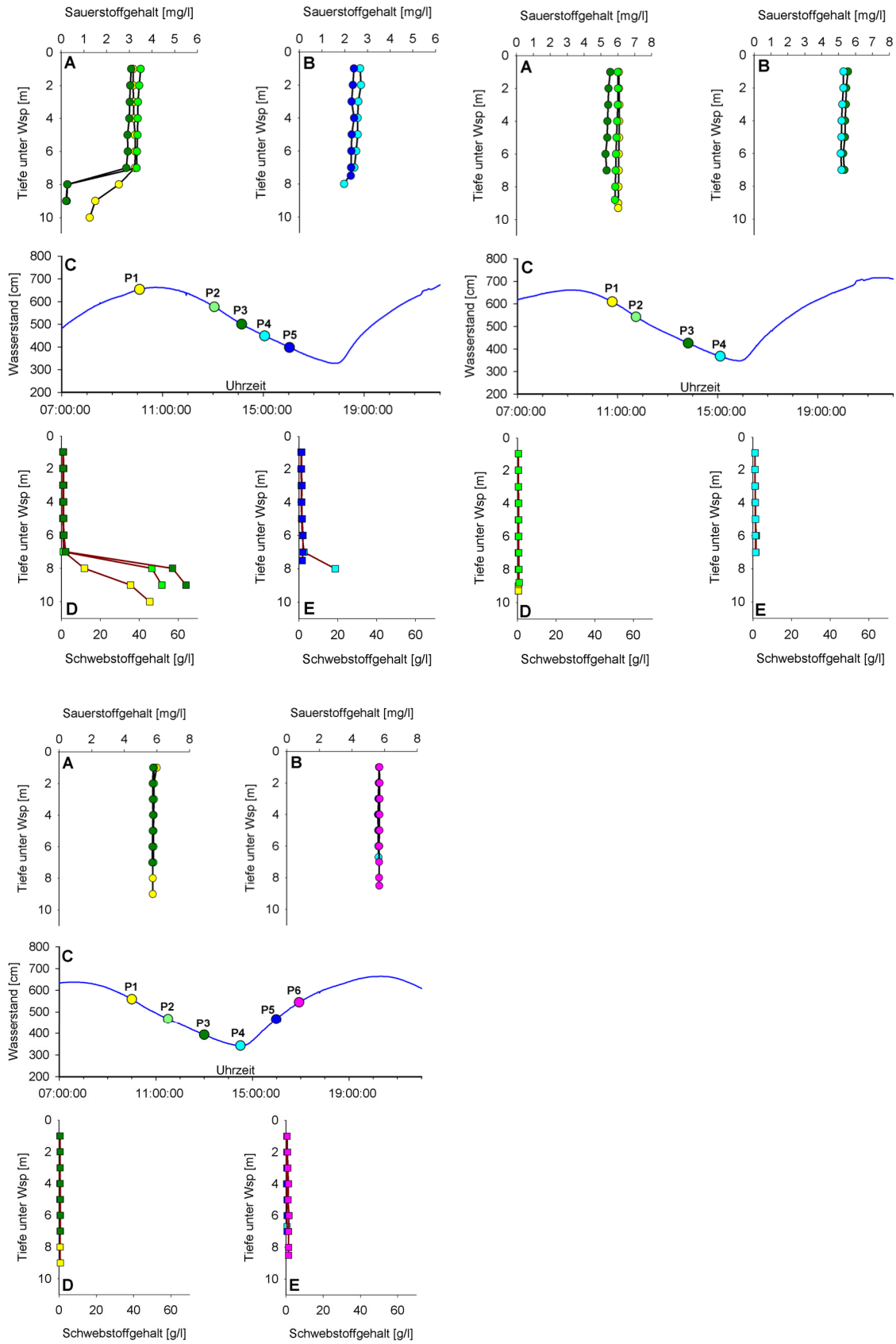


Abbildung 109: Vertikalverteilung des Sauerstoffs an km 18 während der Ebbphasen vor Beginn der Steuerung am 18.6 (A) sowie während der Steuerung am 01.07.2020 (B) am 16.7.2020 (C)

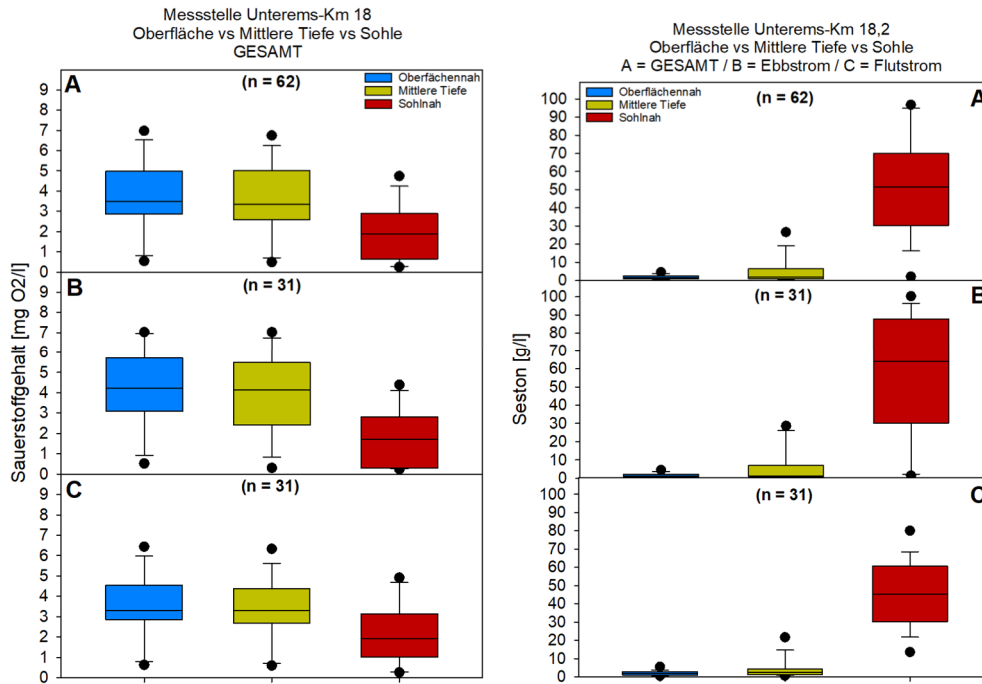


Abbildung 110: Box Plots der Vertikalverteilung des Sauerstoffgehaltes (links) und des Schwebstoffs (rechts) an km 18,2 basierend auf den Messungen der Jahre 2014 bis Juni 2020 (A) sowie aufgeteilt nach Ebbphasen (B) und Flutphasen (C).

6.11 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Gewässergüte (Vertikalprofil-Dauermessung Weekeborg, Soltborg, Terborg und Ditzum)

Bearbeitet von Andreas Schöl (BfG)

Anhand der tiefenaufgelösten Dauermessungen des Sauerstoffgehaltes und des Schwebstoffs an Position km 18 lassen sich die durch die Tidesteuerung hervorgerufenen Änderungen von der natürlichen Variabilität (Spring/Nipp Zyklus, Oberwasserabfluss) abgrenzen (siehe auch Erläuterung zur Dauermessung der Schwebstoffkonzentration und der Strömungsparameter im Vertikalprofil Soltborg).

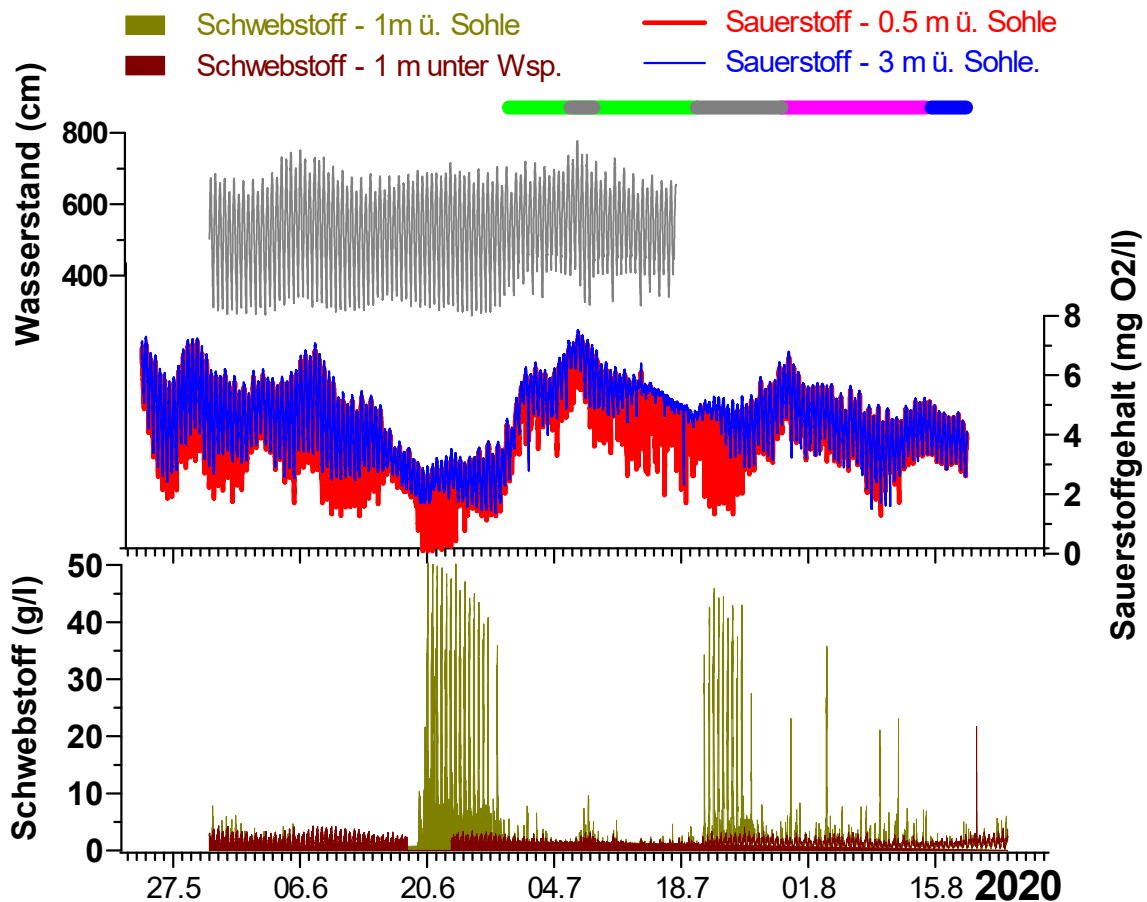


Abbildung 111: Oberflächen und sohlennahe Dauermessungen des Sauerstoffs und des Schwebstoffs an Ems-km 18 im Zeitraum 01.06. – 17.08.2020.

Die sohlennahen Dauermessungen des Sauerstoffs an der Station km 18 zeigen, dass ca. 5-6 Tage vor Versuchsbeginn (24.-29.6.2020) die Sauerstoffwerte bei 2-3 mg/l lagen ohne dabei starke vertikale Unterschiede aufzuweisen. Davor gab es eine Phase (19.-23.6.2020) mit sohlennahen Sauerstoffgehalten von 0 mg/l und deutlichen Unterschieden zwischen den Messwerten in 0,5m bzw. 3m über der Sohle.

Mit Beginn der Tideniedrigwasseranhebungen (Phase I) stiegen die Sauerstoffgehalte deutlich an (grob geschätzt um ca. 2-3 mg/l) auf Werte von 5-6 mg/l. In dieser Phase haben „Nicht-Sperrungen“ und die kurze Unterbrechung wie vom 5.-8.7. sofort zu Reaktionen im Sauerstoff (und Schwebstoff) geführt. Nach dem 8.7. bis Ende Phase I am 19.7. gingen die Sauerstoffgehalte sohl nah wieder zurück, und zwar deutlich stärker als dies in 3m über Sohle zu beobachten war, so dass der Sauerstoffgehalt wieder starke sohl nahe Gradienten aufwies.

In der Unterbrechungsphase der Sperrwerkssteuerung (=Break über 17 direkt aufeinander folgender Tiden zwischen dem 19. und 29.07.) gingen die Sauerstoffgehalte sohl nah weiter zurück (bis auf 2 mg/l) und es bestand weiter ein starker Gradient hin zur Sohle. Ab ca. 25.7.2020 glichen sich dann der 0,5 m und der 3m-Sauerstoffwert an und die Gehalte stiegen zu Ende der Unterbrechung auf Werte um 5 mg/l an.

Am 29.07. wurde die Steuerung über die Tideniedrigwasseranhebung fortgesetzt (Phase II). Die Sauerstoffgehalte sanken bis zum 10.8.2020 auf Gehalte von 2 mg/l ohne das ein starker Gradient zwischen den Werten an der 0,5 m und 3m-Sonden auftrat. Bis 14.8.2020 stiegen die Sauerstoffgehalte wieder auf ca. 4 mg/l an.

Ab dem 14.08. wurde die Flutstromtidesteuerung ausgeführt (Phase III) und es konnten gleichbleibende Sauerstoffgehalte um 4 mg/l ohne Gradienten beobachtet werden.

Abbildung 112 zeigt die vertikale Sauerstoffverteilung auf Basis von über eine Ebbphase gemittelten Messwerten für das Profil an km 18. Bei alleiniger Darstellung der Mittelwerte der einzelnen Ebbphasen (insgesamt 139 Ebbphasen) wird eher das maximale Ausmaß der vertikalen Sauerstoffsichtung abgebildet, da in der Ebbphase die stärksten Gradienten auftreten. Ersichtlich ist, dass während der Phase I die geringsten vertikalen Sauerstoffgradienten auftraten. Ab der Unterbrechung am 20.7. traten wieder deutliche Gradienten mit sohnnahen Sauerstoffgehalten unter 3 mg/l auf. Ausnahme davon war der Beginn der Tidesteuerung in Phase II.

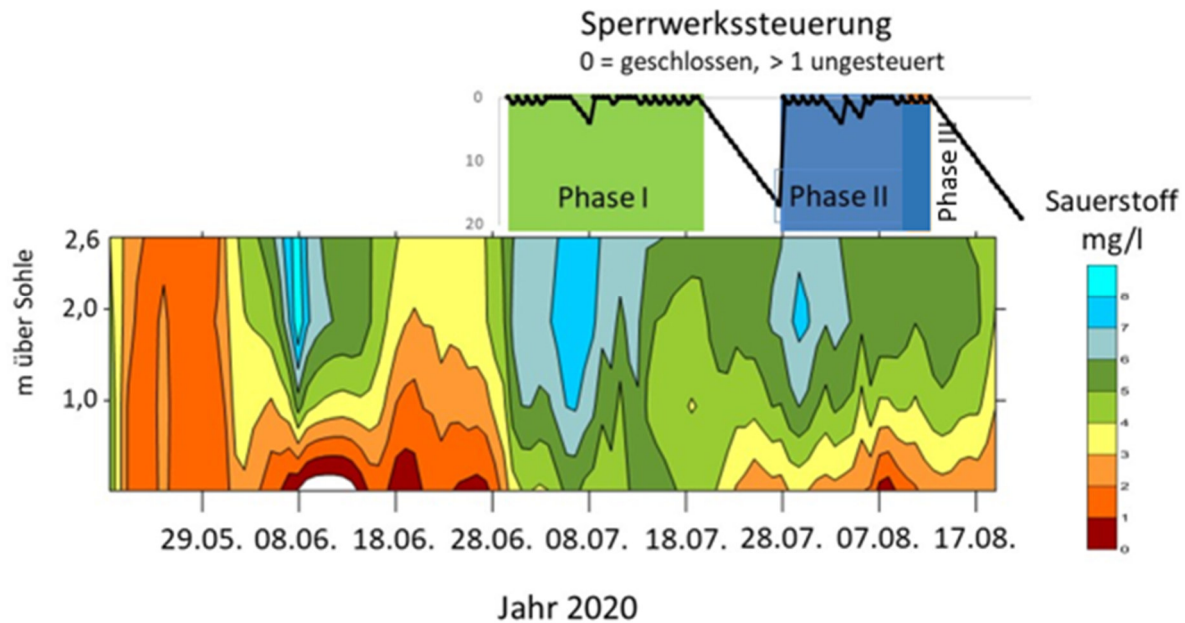


Abbildung 112: Über einzelne Ebbphasen gemittelte, vertikal aufgelöste Sauerstoffgehalte an der Position km 18 im Zeitraum 19.05. bis 19.08.2020. Plot basiert auf 3 Messsonden mit 30-minütiger Auflösung in 0,5m; 1,3m; 2,3m über der Sohle.

Anmerkung: Im oberen Teil der Grafik ist die „kumulierte Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (TnWA)“ und damit die Intensität der Tidesteuerung dieser Variante dargestellt: Zwischen dem 19. und 29.07. erfolgte eine Unterbrechung der TnWA über 17 direkt aufeinander folgende Tiden. Die Phasen I und II bezeichnen die Zeitabschnitte vor und nach der Unterbrechung. In diesen Phasen wurde die TnWA in jeder Tide oder auch mit Unterbrechungen von bis zu 4 Tiden ausgeführt. In Phase III (14. bis 17.08.) erfolgte abschließend die Flutstromtidesteuerung über insgesamt 5 Tiden.

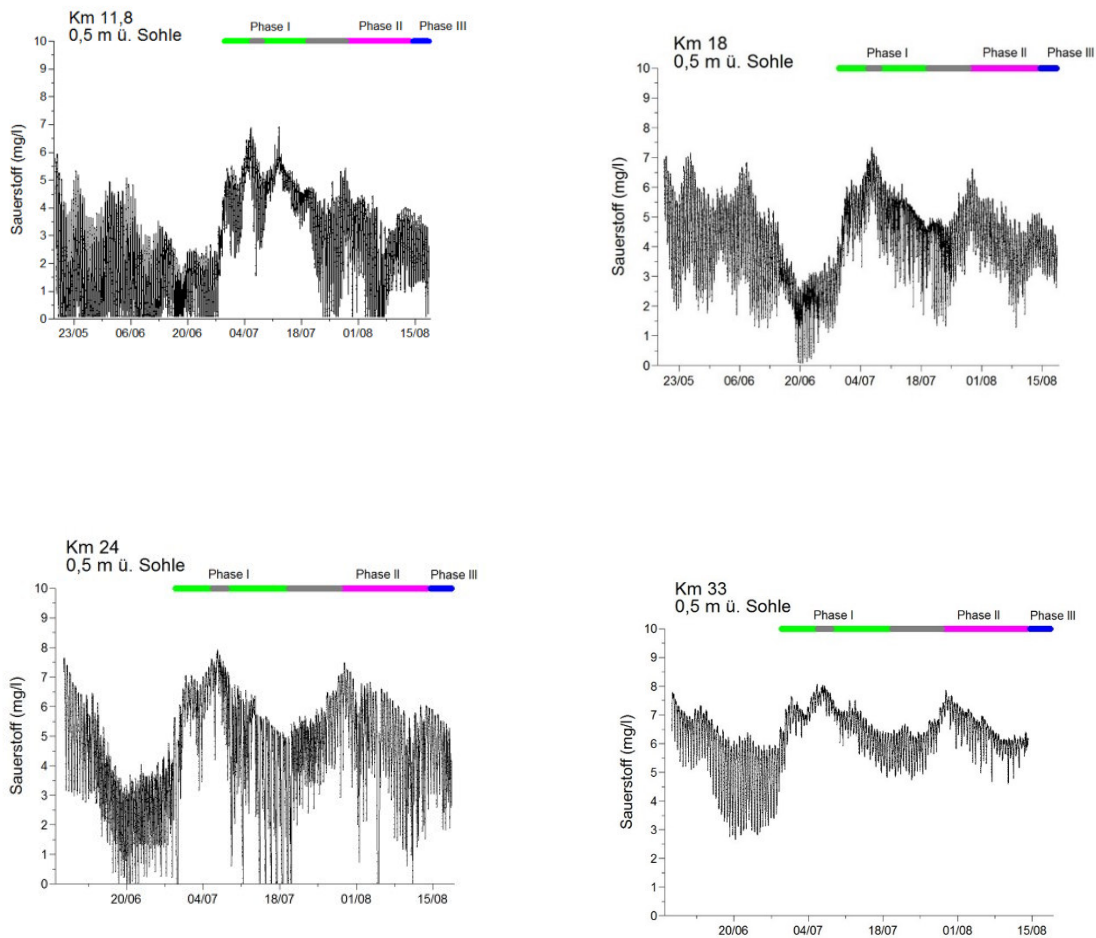


Abbildung 113: Sohl nahe Dauermessungen des Sauerstoffgehaltes an Km 11,8; km 18; km 24; km 33 im Zeitraum 1. Juni bis 15. August 2020

Um Unterschiede der vertikalen Sauerstoffverteilung im Längsverlauf der Tideems zu erfassen, wurden gleiche Messeinrichtungen an 4 Positionen installiert. Vergleichend wird im Folgenden die Auswertung der sohl nahen Sauerstoffgehalte (0,5 m über Sohle) betrachtet (Abb. 15).

Bei **Ems-km 11,8** war das gleiche Muster wie oben bei km 18 beschrieben zu beobachten, allerdings bei deutlich geringen Sauerstoffgehalten. Bis zum Versuchsbeginn war sohlennah zu bestimmten Tidephasen kein Sauerstoff vorhanden. Die Zunahme der Sauerstoffgehalte mit Beginn der Steuerung bis zum 5.7. war sehr stark und es wurden sohlennah O_2 -Werte von 6 mg/l gemessen. Mit der Unterbrechung nach dem 19.07.2020 gingen die Sauerstoffgehalte innerhalb einer Woche sohlennah auf 0 mg/l zurück. Phase II bewirkte wieder einen Anstieg der Gehalte jedoch nur bis zum 2.8.2020, danach wurden zu einzelnen Tidephasen wieder Sauerstoffwerte von 0 mg/l gemessen. Ab dem 8.8. und auch in Phase III traten dann wieder leicht höhere Werte vom 1-3 mg/l auf.

Insgesamt zeigte die Station 11,8 starke Reaktionen der sohl nahen Sauerstoffgehalte auf die Steuerung.

Bei **Ems-km 24** war ein etwas anderes Muster als bei den beiden oberstrom liegenden Stationen zu beobachten. Vor Beginn waren sohlennah Sauerstoffgehalte von 1-3 mg/l zu messen und bei einzelnen Tiden wurden auch geringe Werte von 0 bis < 1mg/l erreicht. Dann mit Beginn der Steuerung trat ein deutlicher Anstieg der Sauerstoffgehalte auf 6-7 mg/l auf. Bereits gegen Ende der Phase I und bis zum

Beginn der Unterbrechung am 20.07.2020 ging der Sauerstoffgehalt stark zurück. Einzelwerte lagen wieder bei 0 mg/l. Im Laufe der Unterbrechung stieg der Sauerstoffgehalt wieder an und ging dann in Phase II wieder zurück. Es traten aber nur wenige Werte < 1 mg/l auf. Phase III wies wieder höhere Sauerstoffgehalte von 2-6 mg/l auf.

Ems-Km 33 wies generell höhere Sauerstoffgehalte auf. Vor Beginn lagen die sohnahen Minima bei ca. 3 mg O₂/l. Mit Beginn der Steuerung stiegen die Gehalte sofort auf Werte von 7-8 mg/l an. Bereits in Phase I nach dem 8.7.2020 und auch während der Unterbrechung fielen die Sauerstoffgehalte wieder bis auf 5 mg/l ab. Zu Beginn der Phase II stiegen die Werte zunächst wieder an um dann wieder bis Ende Phase III langsam abzusinken. In dieser Zeit des Rückgangs traten einzelne Tiden mit deutlich geringeren Sauerstoffgehalten (4-5 mg/l) auf.

Als Gemeinsamkeiten bezogen auf alle Messpositionen trat nach Versuchsbeginn ein sofortiger Anstieg der Sauerstoffgehalte auf. Zu Ende der Phase I gab es einen Rückgang der Sauerstoffgehalte, der sich während der Unterbrechung weiterer fortsetzte. Mit Beginn der Phase II kam es wieder zu einem Anstieg der Sauerstoffgehalte, der aber ab Mitte der Phase II sich wieder umkehrte und ein anschließender Rückgang der Gehalte war zu beobachten. In Phase III blieben die Sauerstoffgehalte relativ konstant.

Als Unterschiede waren zu Ende Phase I an km 24 (und auch km 18) geringere Gehalte als an den beiden anderen Positionen zu messen. Diese Station scheint relativ am wenigsten von Steuerung „profitiert“ zu haben. Bei Km 11,8 traten ab der Unterbrechung und in Phase II geringere Werte ein.

Die nachfolgenden Abbildungen fassen die Einzelmesswerte der sohnahen Messsonde 0,5 m und der in 3,0 m über der Sohle angebrachten Sonde als Mittelwerte über die Tidephasen Ebbe und Flut zusammen. Zudem wird während der Sperrwerkssteuerung für die Sonden bei Weekeborg km 11,8, bei Soltborg km 18,5 und bei Terborg km 24,5 eine dritte Phase, die als Stagnationsphase bezeichnet wird, abgetrennt (siehe hierzu Erläuterung der Methodik in Anlage²⁹).

Dabei zeigt sich, dass im oberen Abschnitt der Tideems bei km 11,8 (Abbildung 114) nach Beginn der Steuerung bis zum 20.07.20 die Sauerstoffgehalte sowohl in 0,5 m als auch in 3 m ü. Sohle anstiegen. Mit dem Aussetzen der Steuerung ab dem 20.07. sanken die Sauerstoffgehalte an der 0,5 m Sonde etwas stärker ab als an der 3,0 m Sonde. Die deutlichsten vertikalen Differenzen traten bei Ebbe auf. Auch bei erneuter Steuerung des Sperrwerks ab 29.7.20 blieb dies Muster bestehen. Die Sauerstoffdifferenzen waren aber viel schwächer ausgeprägt als vor Beginn der Steuerung im Juni 2020.

An Station Soltborg, km 18,5 (Abbildung 115) nahm nach Beginn der Steuerung der Sauerstoffgehalt zu, wobei die gemittelten Sauerstoffgehalte der 0,5 m-Sonde in der Flutphase und der kurzen Stagnationsphase meist geringer waren als die gemittelten Werte der Ebbphase (siehe auch Abbildung 118). Ab dem 29.7.20 sanken die Sauerstoffgehalte wieder ab, ohne aber deutliche Differenzen zwischen der 3,0 m und der 0,5 m Sonde aufzuweisen.

Ein sehr ähnliches Muster zeigte die Station Terborg km 24,5 (Abbildung 116). Auch hier traten im Zeitraum 09.07 bis 22.07.20 bei Flut geringere Sauerstoffgehalte an der sohnahen 0,5 m Sonde auf.

An der Station Ditzum km 33,6 (Abbildung 117) stromab des Sperrwerks war nach Beginn der Steuerungen eine deutliche Zunahme der Sauerstoffgehalte bis zum 09.07.20 zu verzeichnen und danach – wie an allen Stationen – ein Rückgang bis zum 29.7.20. Dann mit dem Wiedereinsetzen der Steuerungen stieg der Sauerstoffgehalt erneut kurzfristig an, um dann wieder auf ein mittleres Niveau

²⁹ SCHOEL 2021_Erlaeuterung_Algorithmus_Kategorisierung_Tidephasen

von 5-6 mg/l zu sinken. Deutliche vertikale Sauerstoffdifferenzen traten nicht auf, aber die über die Ebbphase gemittelten Sauerstoffgehalte waren während der Steuerungszeit vom 29.6 bis 14.8 an der 0,5 m Messsonde geringfügig niedriger als während der Flutphasen (möglicherweise ein Salzgehaltseffekt).

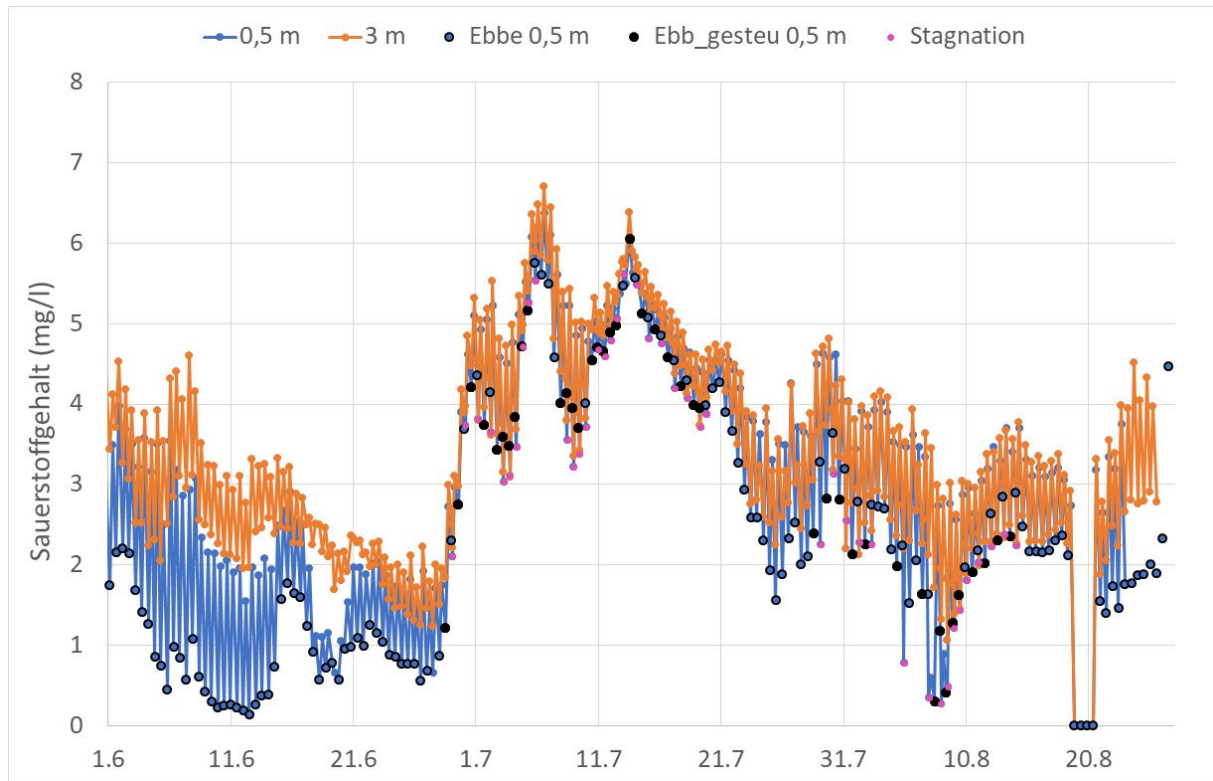


Abbildung 114: Über Tidephasen und Stagnationsphase gemittelte Sauerstoffgehalte in 0,5 m und 3,0 m über der Sohle bei Weekeborg, km 11,8

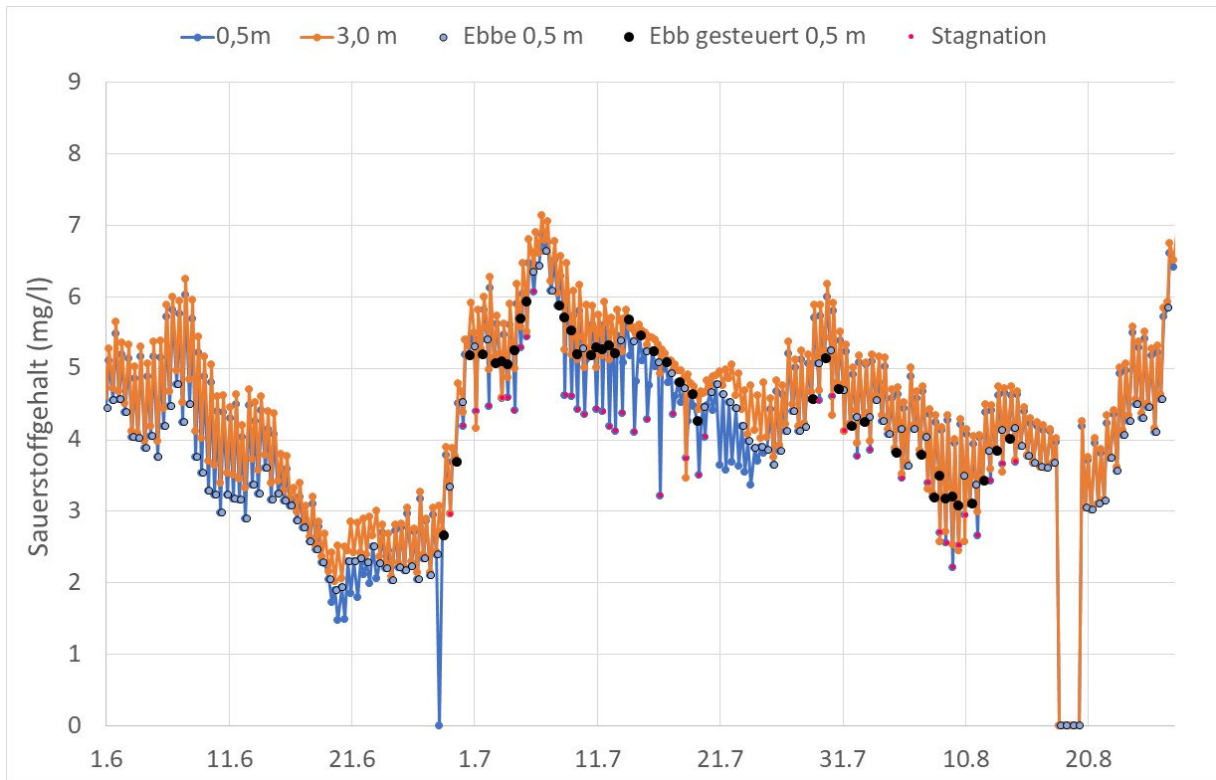


Abbildung 115: Über Tidephasen und Stagnationsphase gemittelte Sauerstoffgehalte in 0,5 m und 3,0 m über der Sohle bei Soltborg, km 18,4

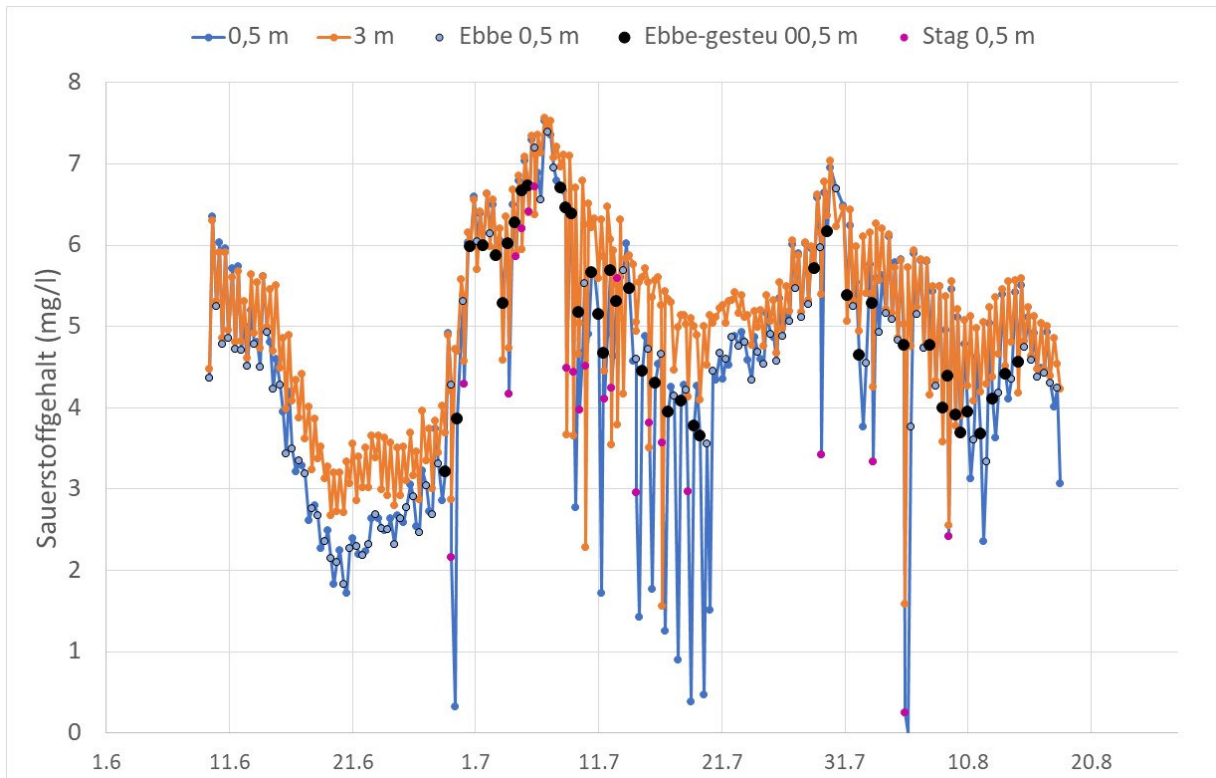


Abbildung 116: Über Tidephasen und Stagnationsphase gemittelte Sauerstoffgehalte in 0,5 m und 3,0 m über der Sohle bei Terborg, km 24,5

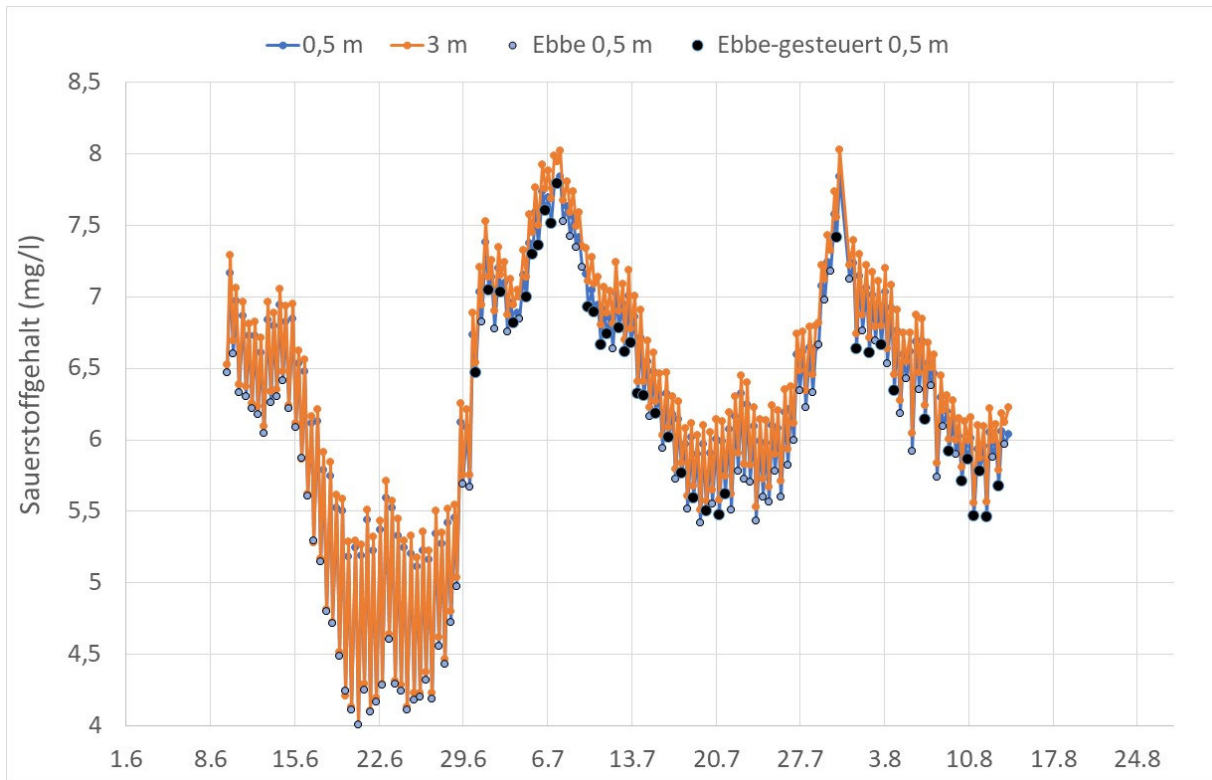


Abbildung 117: Über Tidephasen gemittelte Sauerstoffgehalte in 0,5 m und 3,0 m über der Sohle bei Ditzum, km 33,6. Ohne Stagnationsphase und die Sauerstoffskala endet bei 4 mg/l.

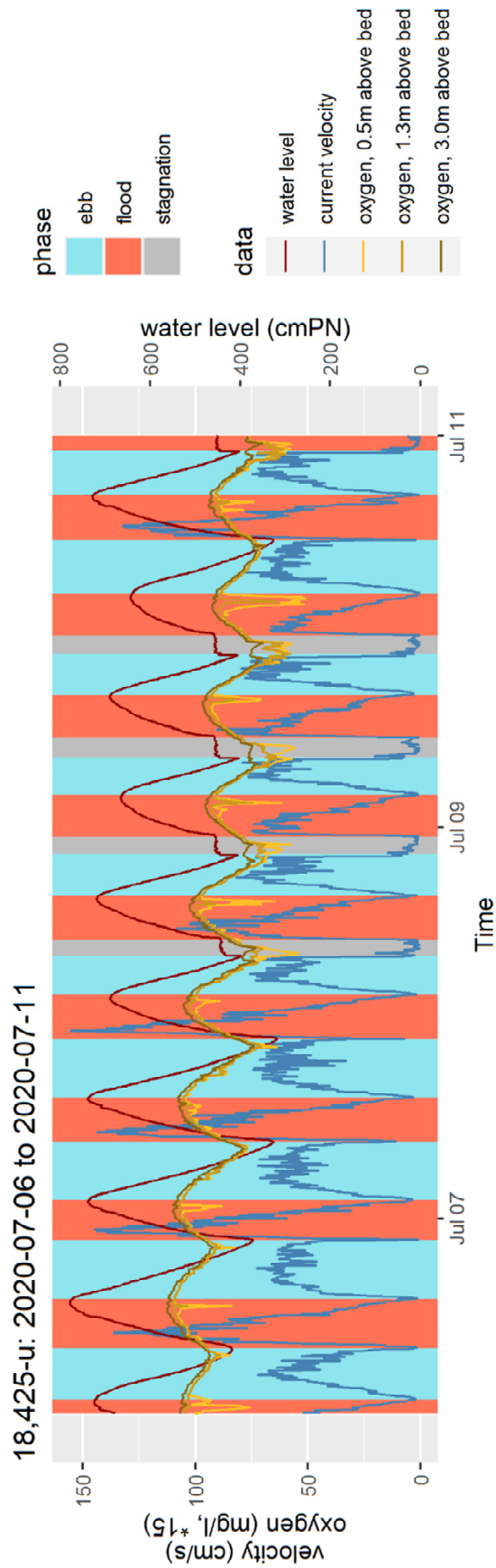


Abbildung 118: Zeitreihe 6.-11.07.2020 an Km 18,4

6.12 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salz- und Sauerstoffgehalte im Längsprofil zwischen Knock und Herbrum

Bearbeitet von Dennis Oberrecht, Patrick Bruckert und Rens van der Wel (NLWKN)³⁰

Zur Beurteilung der Wirkung des technischen Testbetriebs auf die Gewässergüte werden die mittleren Salzgehalte und Sauerstoffkonzentrationen separat für die obere Wassersäule und die Flüssigschlickschicht betrachtet (Abbildung 119). Der Vergleich beider Phasen/Schichten der Wassersäule soll dabei einen Aufschluss über den Einfluss der Flüssigschlickschicht und die Durchmischung in der Wassersäule während des Testbetriebs geben. Durch die räumliche Mittelung lässt sich ebenfalls die großräumige Wirkung des technischen Testbetriebs beschreiben. Etwaige Temperatur oder meteorologische Veränderungen mit Einfluss auf den z.B. Sauerstoffgehalt sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

6.12.1 Auswirkung auf die räumlich gemittelten Sauerstoffwerte

Die Sauerstoffkonzentrationen in der oberen Wassersäule zeigen eine deutliche Reaktion in der ersten Hälfte der Phase I der Tideniedrigwasseranhebung (Abbildung 119 a). Es kommt zu einem deutlichen Anstieg der Konzentrationen bis zum 07.07. Der Sauerstoffgehalt beträgt hier maximal 6,5 mg/l im Mittel über die gesamte Unterems. Im weiteren Verlauf nimmt die mittlere Sauerstoffkonzentration wieder ab, bleibt aber bis zum Ende des Testbetriebs auf einem höheren Niveau als bei der Nullmessung am 25.07. Zwischen dem 24.07 und 30.07 nimmt die Sauerstoffkonzentration kurzfristig wieder zu, anschließend nimmt diese jedoch wieder ab. Während der FsTs-Phase kommt es zu einem leichten Anstieg des Sauerstoffgehaltes in der oberen Wassersäule, der nach Beendigung des technischen Testbetriebs wieder leicht abfällt.

³⁰ Siehe auch den ungekürzten Untersuchungsbericht im Anhang: Oberrecht, D., P. Bruckert & R. van der Wel (2021): Technischer Testbetrieb zur flexiblen Tidesteuerung des Ems-sperrwerk - Begleitendes Längsprofil-Monitoring; NLWKN-Forschungsstelle Küste; unveröffentlicht; Norden, Juli 2021

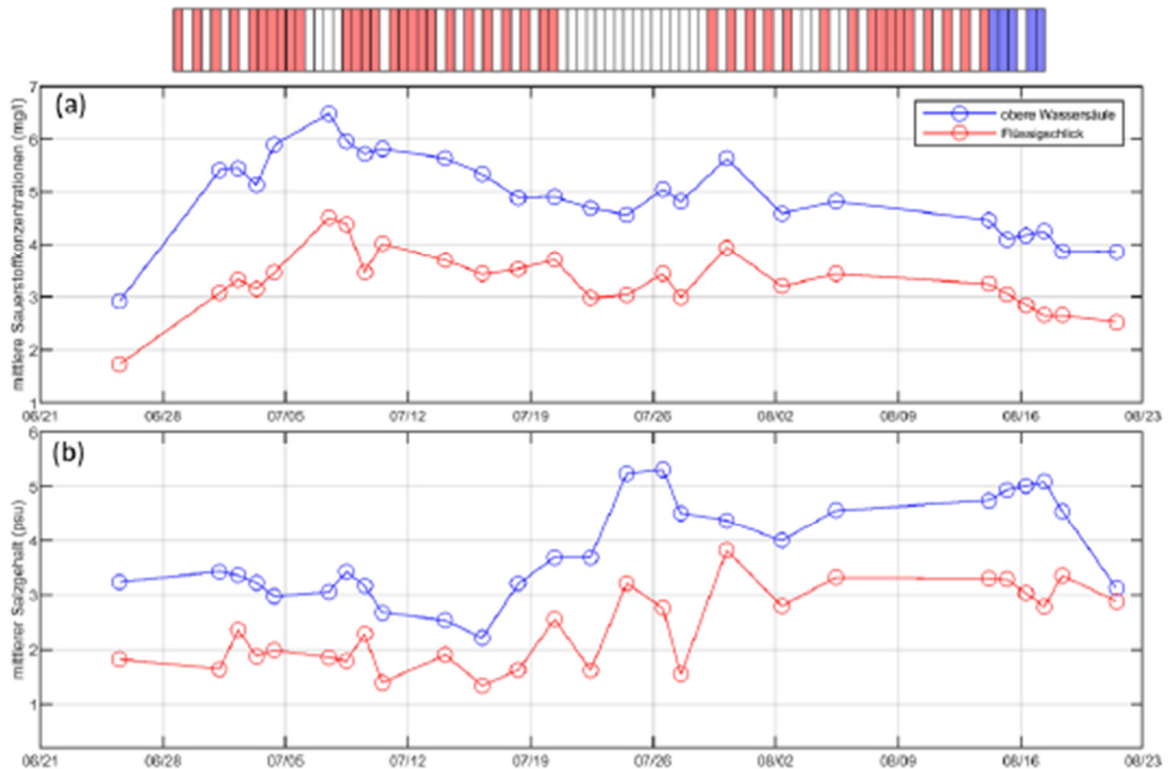


Abbildung 119: Zeitliche Darstellung der in der Unterems (Emssperrwerk bis Papenburg) räumlich-gemittelten Sauerstoffkonzentrationen (a) und des Salzgehaltes (b) für die obere Wassersäule und die Flüssigschlickschicht. Zur Übersicht sind ebenfalls oben die Tiden dargestellt in denen eine Tideniedrigwasseranhebung TnWA (rote Balken) oder die Flutstromtidesteuerung FsTs (blaue Balken) gesteuert wurde. Weiße Bereiche bedeuten, dass in der Tide keine Steuerung stattgefunden hat. In den Zeiträumen vor und nach der langen Unterbrechung der Tidesteuerung (zwischen 19. und 29.07.) fand die Tideniedrigwasseranhebung statt (Phase I und II), am Ende des Technischen Tests erfolgte die Flutstromtidesteuerung (Phase III).

Die Sauerstoffkonzentrationen innerhalb der Flüssigschlickschicht verhalten sich nahezu analog zu den gemessenen Werten aus der oberen Wassersäule, sind jedoch immer grundsätzlich niedriger. Dies liegt hauptsächlich an der höheren Sauerstoffzehrungsrate der hochkonzentrierten Suspension im Vergleich zur oberen Wassersäule (BEHREND, 2017³¹). Es kommt ebenfalls anfänglich zu einem Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen bis zum 07.07. Dieser fällt aber wesentlich schwächer aus, als in der oberen Wassersäule. Das könnte auf die abgeschwächte Durchmischung in der Wassersäule aufgrund der gesteuerten Tiden zurückzuführen sein. Im weiteren Verlauf kommt es auch hier zu einer Abnahme des Sauerstoffgehaltes mit einer kurzen Zunahme im Zeitraum um den 30.07. Dies könnte auf Änderungen im Oberwasserzufluss oder auch der meteorologischen Randbedingungen zurückzuführen sein. Bis zum Ende der TnWA-Phase II bleiben die Sauerstoffkonzentrationen im Mittel bei ca. 3.5 mg/l. Während der FsTs-Phase nehmen die Sauerstoffkonzentrationen in der Flüssigschlickschicht ab.

Anhand der Messungen zeigt sich, dass die Sauerstoffkonzentrationen während der FsTs-Phase, im Gegensatz zu den TnWA-Phasen, gegensätzlich verhalten. In der oberen Wassersäule kommt es zu einem Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen, während es in der Flüssigschlickschicht zu einer weiteren Abnahme der Werte kommt.

Im Unterschied zur räumlich und zeitlich differenzierten Betrachtung der Sauerstoffwerte eignen sich die über die gesamte Unterems gemittelten Messwerte nicht, einen direkten Unterschied zwischen gesteuerten und ungesteuerten Tiden zu zeigen. Wie bei der differenzierten Betrachtung lässt sich

³¹ BEHREND, T. (2017): Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Schwebstoff- und Sauerstoffgehalt auf Basis der kontinuierlichen Sondenmessungen, Bachelorarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

aber auch an den Mittelwerten der große Einfluss des Oberwassers und der meteorologischen Verhältnisse auf den Sauerstoffhaushalt erkennen.

6.12.2 Auswirkung auf die räumlich gemittelten Salzgehalte

Die mittleren Salzgehalte in der Unterems (Abbildung 119 b) zeigen eine nicht so deutliche Reaktion auf die Steuerungsvarianten im Vergleich zu den Sauerstoffkonzentrationen. Hierbei ist zu bedenken, dass die Salzgehalte in der Unterems generell sehr stark vom Oberwasserzufluss über das Tidewehr und dem Leda-Jümme-Gebiet abhängig sind. Des Weiteren kommt es aufgrund der sediment-induzierten Schichtungen in der Unterems zu einem inversen Salzgehaltsprofil (siehe auch BECKER et al., 2018³²). Diese Form der vertikalen Salzgehaltverteilung bei Tidehochwasser ist typisch für hochkonzentrierte Ästuar und eine Folge aus der Bildung der Flüssigschlickschichten. Indirekt kann daraus abgeleitet werden, dass solange sich bei Tidehochwasser ein deutliches vertikales, inverses Salzprofil ausbildet, kommt es auch zur ausgeprägten Flüssigschlickbildung.

Innerhalb der TnWA-Phase I kommt es in der oberen Wassersäule zu einer deutlichen Abnahme des mittleren Salzgehaltes von ca. 3,5 PSU (01.07.) auf 2,2 PSU (16.07.). In der hochkonzentrierten Flüssigschlickschicht kommt es ebenfalls zu einer Abnahme der Salzgehalte, die aber im Vergleich zur oberen Wassersäule wesentlich schwächer ausfällt. Es reduziert sich der Salzgehalt von 1,9 PSU (25.06.) auf 1,3 PSU (16.07.). Parallel zur Abnahme des Salzgehaltes steigt im gleichen Zeitraum der Oberwasserzufluss am Tidewehr von ca. 15 m³/s auf maximal 38 m³/s.

Am Ende der TnWA-Phase I kommt es zu einem deutlichen Anstieg des mittleren Salzgehaltes (von 2,2 auf 5,4 PSU), mit dem Maximum am 27.07. Das Maximum liegt bereits in der ungesteuerten Phase. Zu Beginn der ansteigenden Salzgehalte (16.07.) kommt es wieder zur langsamen Abnahme der Oberwassermengen auf bis zu 13 m³/s (09.08.) bei Heede. Um den 01.08 herum kommt es zu einem kurzfristigen Anstieg des Oberwassers, was auch eine kurzfristige Abnahme der Salzgehalte in der oberen Wassersäule zur Folge hat. In der TnWA-Phase II kommt es zu einem leichten Anstieg des Salzgehaltes in der oberen Wassersäule, während in der Flüssigschlickschicht keine deutliche Veränderung gemessen wird.

In der FsTs-Phase am Ende des Technischen Tests kommt zu einem gegensätzlichen Verhalten der Salzgehalte zwischen der oberen Wassersäule und der Flüssigschlickschicht. In der oberen Schicht steigt der Salzgehalt mit der Zeit und in der unteren hochkonzentrierten Schicht sinkt der Salzgehalt. Nach Beendigung des Testbetriebs kommt es zu einem starken Abfall des Salzgehaltes in der oberen Wassersäule. Bei der Nachmessung sind die Salzgehalte beider Schichten nahezu identisch bei 3 PSU.

6.12.3 Zusammenfassung

Die Sauerstoffkonzentrationen in der oberen Wassersäule in der TnWA-Phase I haben sich zeitweise verbesserten, nahmen jedoch vor der Unterbrechung der Tidesteuerung auch wieder ab. In der TnWA-Phase II konnte die deutliche Zunahme des Sauerstoffgehaltes nicht reproduziert werden, was neben der deutlich geringeren Steuerungshäufigkeit auch an der sich veränderten Hydrodynamik (erhöhte Salzgehalte) liegen kann. Bei der Flutstromsteuerung konnte ein langsamer, aber stetiger Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen beobachtet werden. Die hydro-meteorologischen Randbedingungen wurden bei dieser Darstellung nicht umfassend berücksichtigt. In diesem Zusammenhang wird auf die Auswertung der Tiefenprofile und der Messstationen verwiesen (siehe u.a. 6.13 und 6.14).

³² BECKER, M., MAUSHAKE, C., & WINTER, C. (2018). Observations of mud-induced periodic stratification in a hyperturbid estuary. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1029/2018GL077966>

6.13 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Schwebstoff- und Sauerstoffgehalte in Tiefenprofilen zwischen Knock und Herbrum

*Messung: Dennis Oberrecht, Patrick Bruckert und Rens van der Wel, Datenaufarbeitung und grafische Darstellung: Gregor Alrutz, Text: Andreas Engels (alle NLWKN)*³³

6.13.1 Übersicht der Messergebnisse

Neben der Variabilität der Tide- und Oberwasserverhältnisse hatte auch die intermittierende Ausführung der Tidesteuerung einen Einfluss auf die Höhe und Verteilung der Schwebstoff- und Sauerstoffkonzentrationen. Die Sauerstoffgehalte wurden zudem von den unterschiedlichen Temperaturverhältnissen beeinflusst. Die in Abständen von zumeist zwei Kilometern aufgenommenen Tiefenprofile der Gewässergüte geben einen Eindruck über die Einflussnahme der Tidesteuerung auf die Verteilung der Parameter. Im Focus stehen hier die Schwebstoff- und die Sauerstoffkonzentrationen. Auch die Salzgehaltsverhältnisse wurden durch die Tidesteuerung beeinflusst. Deren Entwicklung wird jedoch im folgenden Kapitel (Gewässergüte - Messstationen zwischen Knock und Herbrum) detailliert beschrieben. Auf Grundlage der in Abständen von zumeist zwei Kilometern aufgenommenen Tiefenprofile wurde die Verteilung der Schwebstoff- und Sauerstoffkonzentrationen im Abschnitt zwischen Herbrum und Gandersum dargestellt. Der Abschnitt unterhalb von Gandersum wird nicht in die Darstellung der Längsschnitte aufgenommen, da die dortigen Veränderungen relativ gering waren und sich diese in der gewählten Skalierung kaum abbilden ließen. Auf die Entwicklung in diesem Abschnitt wird im folgenden Kapitel (Gewässergüte - Messstationen zwischen Knock und Herbrum) detailliert eingegangen.

In den zwischen den Messpositionen befindlichen Segmenten wurden die Daten über eine lineare Interpolation ermittelt, wobei eine räumliche Auflösung in der Vertikalen von 0,05 m und in der Horizontalen 200 m gewählt wurde. Um ein räumlich lückenloses Bild zeichnen zu können, werden hier nur die Längsmessungen beschrieben, in denen beide Messschiffe gleichzeitig zum Einsatz gekommen waren. Dieses war in 23 von insgesamt 31 Längsfahrten der Fall (74%). Die Längsmessungen fanden jeweils während der Flutphase statt, bei vorausgehender Tidesteuerung im Zeitraum der wiedereinsetzenden Tide. In 13 der hier beschriebenen Fälle (57%) folgte die Messung unmittelbar nach einer Tidesteuerung, in vier Fällen (17%) wurde die Tidesteuerung zum unmittelbar vorhergehenden Tideniedrigwasser ausgesetzt und in den verbleibenden sechs Fällen (26%) lag die letzte Steuerung längere Zeit zurück. Vom 20.07. bis einschl. dem 28.07. wurde die Tidesteuerung ausgesetzt (17 Tiden). Zum Ende dieser langen Unterbrechung hatten sich wieder Verhältnisse der Gewässergüte eingestellt, wie sie in etwa vor Beginn des Technischen Tests vorhanden gewesen waren. Die Entwicklung der Gewässergüte wurde durch 11 Längsmessungen vor und durch vier Messungen während dieser Unterbrechung dokumentiert. Nach dieser Unterbrechung folgten insgesamt noch acht Längsmessungen, von denen drei noch in der Testphase der Tideniedrigwasseranhebung fielen, drei Messungen in die Phase der Flutstromtidesteuerungen stattfanden und anschließend nochmal zwei Messungen nach Beendigung der Tidesteuerungen den Nachlauf dokumentierten. Damit kann anhand der zur Verfügung stehenden Längsmessungen die räumliche und zeitliche Entwicklung der Parameter in Abhängigkeit der Steuerungsintensität beschrieben werden.

³³ Siehe auch die übersichtliche Darstellung aller Tiefenprofile im Anhang: ALRUTZ (2021a) bis ALRUTZ (2021c): Darstellung Tiefenprofile Schwebstoffgehalt, Sauerstoffgehalt und Salzgehalt

Tabelle 59: Ergebnisübersicht der Längsmessungen von Knock nach Herbrum (zur Auswertung kamen die Fälle, in denen die gesamte Strecke durch Messungen abgedeckt wurde)

Datum / Anzahl der unmittelbar vor der Messung ausgesetzten Tidensteuerungen 1)	Art und Intensität der Tidensteuerung im Vorfeld der Messung	Tidensteuerung vor/nach Unterbrechung vom 20.-28.07. 2)	Anteil gesteuerter Tiden an Gesamtzahl bis zum Zeitpunkt der Messung [%] 3)	Qualitative Beschreibung Schwebstoff Cs	Qualitative Beschreibung Sauerstoff O2	
01.07.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Vor	60	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km-2 / zwischen Km-10 und +15 O2 < 5 mg/l
02.07.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Vor	57	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km-2 / zwischen Km-10 und +15 O2 < 5 mg/l
03.07.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Vor	56	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km-3 / zwischen Km-10 und +15 O2 < 5 mg/l
04.07.2020	0	TnwA / jedes Tnw	Vor	64	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km 0 / zwischen Km-4 und +10 O2 < 5 mg/l
07.07.2020	3	Unterbrechung	Vor	59	Zunahme zwischen Km-4 und km +20	Minimum bei Km-6 / oberhalb Km+3 O2 < 5 mg/l
08.07.2020	0	TnwA / jedes Tnw	Vor	58	Abnahme zwischen Km-4 und km +20	Minimum bei Km-2 / zwischen Km-7 und +7 O2 < 5 mg/l
09.07.2020	0	TnwA / jedes Tnw	Vor	62	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km 0 / zwischen Km-7 und +7 O2 < 5 mg/l
10.07.2020	1	Unterbrechung	Vor	61	Zunahme zwischen Km-4 und km +25	Gesamte Unterems O2 ≥ 5 mg/l
14.07.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Vor	65	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km-2 / zwischen Km-4 und -1 O2 ≤ 5 mg/l
16.07.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Vor	65	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km 0 / zwischen Km-2 und +1 O2 ≤ 5 mg/l
18.07.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Vor	63	Niedriges Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Minimum bei Km 0 / zwischen Km-4 und +10 O2 ≤ 5 mg/l
20.07.2020	1	Unterbrechung			Zunahme oberhalb km+15 / insgesamt niedriges Niveau	Minimum bei Km 0 / zwischen Km-4 und +15 O2 ≤ 5 mg/l
22.07.2020	5	Unterbrechung			Starke Zunahme oberhalb Km -10 und unterhalb Km-4	Starke Abnahme oberhalb Km 0 / oberhalb Km +15 O2 < 5 mg/l
24.07.2020	9	Unterbrechung			Erhöhtes Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Starke Abnahme oberhalb Km 3 / oberhalb Km +15 O2 < 5 mg/l
27.07.2020	15	Unterbrechung			Stark erhöhtes Niveau / Gefälle	Starke Abnahme oberhalb Km 7 / oberhalb Km +15

					Herbrum – Gandersum	O ₂ < 5 mg/l
30.07.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Nach	67	Niedriges Niveau / zwischen Km-4 und km +20 noch leicht erhöht	Zunahme oberhalb Km 7 / oberhalb Km +10 O ₂ < 5 mg/l
02.08.2020	0	TnwA / jedes 2. Tnw	Nach	56	Leicht erhöht oberhalb km+10 / Gefälle Herbrum – Gandersum	Zunahme oberhalb Km 7 / oberhalb Km +15 O ₂ < 5 mg/l
05.08.2020	1	TnwA / vereinzelt	Nach	40	Erhöht oberhalb km+10 / stark erhöht oberhalb Km-4 / Gefälle Herbrum – Gandersum	Niedrige Werte oberhalb Km 7 / oberhalb Km +15 O ₂ < 5 mg/l
15.08.2020	0	FsTs / jede Tide	Nach	53	Erhöht zwischen Km-4 und km +10 und direkt unterhalb Tidewehr Herbrum	Niedrige Werte oberhalb Km 15 / oberhalb Km +25 O ₂ < 5 mg/l
16.08.2020	1	Unterbrechung	Nach	54	Starke Zunahme unterhalb Km-4	Niedrige Werte oberhalb Km 15 / oberhalb Km +25 O ₂ < 5 mg/l
17.08.2020	0	FsTs / jede Tide	Nach	55	Erhöht zwischen Km-4 und km +15 und direkt unterhalb Tidewehr Herbrum	Niedrige Werte oberhalb Km 15 / oberhalb Km +25 O ₂ < 5 mg/l
18.08.2020	2	Nach Test-Ende			Stark erhöht unterhalb Km-4	Niedrige Werte oberhalb Km 15 / oberhalb Km +25 O ₂ < 5 mg/l
21.08.2020	8	Nach Test-Ende			Stark erhöhtes Niveau / Gefälle Herbrum – Gandersum	Starke Abnahme oberhalb Km 7 / oberhalb Km +25 O ₂ < 5 mg/l

Anmerkungen:

- 1) Bei „0“ erfolgte in derselben Tide, also unmittelbar vor der Längsmessung, eine Tidesteuerung.
- 2) Vom 20.07. bis einschl. dem 28.07. wurde die Tidesteuerung unterbrochen (17 Tiden). „Vor“ bezieht sich auf den Zeitraum vor der Unterbrechung und „nach“ auf die Zeit danach. Zum Ende dieser langen Unterbrechung hatten sich wieder Verhältnisse der Gewässergüte eingestellt, wie sie in etwa vor Beginn des Technischen Tests vorhanden gewesen waren.
- 3) Anteil gesteuerter Tiden bis zum Zeitpunkt der Messung in der der jeweiligen Phase vor oder nach der längeren Unterbrechung.

6.13.2 Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung der Messergebnisse

In der **ersten Testwoche (bis 04.07.)** wurden über 60% der Tiden gesteuert. Die über die Tidesteuerung ausgeübte Einflussnahme auf die Schwebstoff- und Sauerstoffgehalte wurde durch das Auffrischen des Windes (bis 6 Bft.) und einem daraus resultierenden Windstau der Tidewasserstände überlagert. Insgesamt stellte sich eine drastische Abnahme der Schwebstoffwerte von Herbrum bis Gandersum ein. Zwischen Herbrum und Papenburg waren die Schwebstoffgehalte etwas höher als im unterhalb davon befindlichen Abschnitt in Richtung Gandersum.

Insgesamt war ein signifikanter Anstieg der Sauerstoffgehalte festzustellen, wobei sich die Strecke mit niedrigen Sauerstoffwerten im Laufe der Woche verkürzte. So war zu Beginn der Woche ein Sauerstoffgehalt < 5 mg/l von Unterems-Km -10 bis +15 festzustellen. Zum Ende der Woche reichte dieser Abschnitt von Unterems-Km -4 bis +10 und war damit 11 Kilometer kürzer. Die geringsten

Sauerstoffgehalte traten zu Beginn der Woche im Bereich Unterems-Km -3 bis -2 auf und lagen zur Zeit der ersten Messung bei < 3 mg/l. Zum Ende der Woche waren auch die Minimalkonzentrationen auf Werte zwischen 4 und 5 mg/l angestiegen und die Position des Sauerstoffminimums war in Richtung Papenburg verschoben. In Richtung Herbrum sorgte der Zufluss sauerstoffreichen Oberwassers zur Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen, im Abschnitt unterhalb von Leerort nahm der Einfluss der Außenems zu, von wo durch die Tide sauerstoffreiches Wasser in die Unterems vordrang. Davon ausgenommen war die Flüssigschlickschicht, in der niedrige Konzentrationen bzw. kein Sauerstoff vorhanden war.

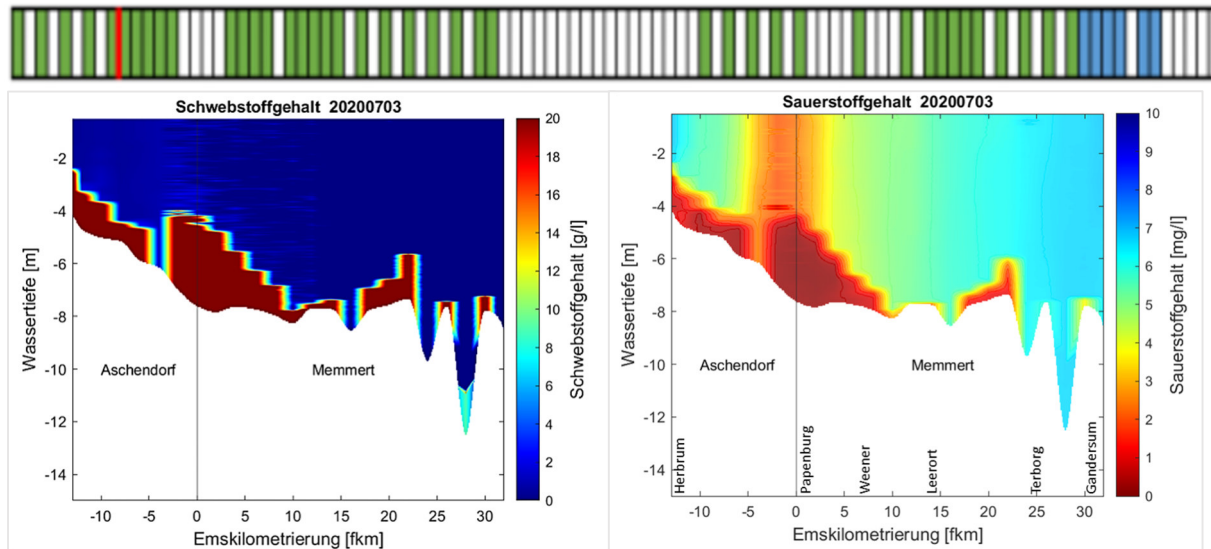


Abbildung 120: Schwebstoff- und Sauerstoffverteilung in der Ems von Herbrum bis Gandersum in der Morgentide des 03.07.2020: Der Messung ging ein Zeitraum voraus, in dem in etwa jeder zweiten Tide die Tideniedrigwasseranhebungen durchgeführt worden waren und damit bereits eine deutliche Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen in der Wasserphase sowie eine eindeutige Zunahme der Sauerstoffgehalte erzielt werden konnte. Die Längsmessung des 03.07.2020 zeigte ein insgesamt niedriges Niveau der Schwebstoffgehalte sowie ein Gefälle mit etwas höheren Konzentrationen im Abschnitt oberhalb von Papenburg und einer deutlichen Abnahme bis Leerort. Die im Sohlbereich oberhalb der Flüssigschlickschicht installierten Sonden der Messstationen registrierten während der Längsmessung bei Papenburg (Unterems-Km 0,4) rd. 1 g/l, bei Weener (Km 6,9) 0,5 bis 1 g/l, bei Leerort und Terborg (Km 14,7 bzw. 25,6) $\leq 0,5$ g/l und bei Gandersum (km 31,7) $\ll 0,5$ g/l. Im Abschnitt von etwa Unterems-Km -10 bis +15 waren Sauerstoffwerte von < 5 mg/l vorhanden und das Minimum befand sich etwa bei Unterems-Km -3. Im Abschnitt in Richtung Herbrum sorgte der Zufluss sauerstoffreichen Oberwassers zur Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen, im Abschnitt unterhalb von Leerort nahm der Einfluss der Außenems zu, von wo durch die Tide sauerstoffreiches Wasser in die Unterems vordrang. Davon ausgenommen war die Flüssigschlickschicht, in der niedrige Konzentrationen bzw. kein Sauerstoff vorhanden war.

Zu Beginn der **zweiten Testwoche (05.- 11.07.)** hatten sich in Folge der Tidesteuerung niedrige Schwebstoffkonzentration eingestellt. Die Sauerstoffgehalte hatten bis dahin in den Zeiträumen der Längsmessungen ein relativ hohes Niveau in der gesamten Unterems erreicht. Die Steuerung musste dann allerdings für mehrere Tiden ausgesetzt werden, u.a. während einer leichten Sturmflut. Während der Unterbrechung nahmen die Schwebstoffkonzentrationen im Abschnitt von Unterems-Km -4 und Km +20 wieder zu. Auch die Flüssigschlickschicht erstreckte sich stärker in Richtung Herbrum. Die Sauerstoffwerte oberhalb von Papenburg nahmen während dieser Zeit deutlich ab.

In der zweiten Wochenhälfte setzten wieder direkt aufeinander folgende Tidesteuerungen ein, wodurch wieder ein positiver Einfluss auf die Schwebstoff- und Sauerstoffverhältnisse ausgeübt wurde. Die Gestalt der Flüssigschlickschicht änderte sich, indem deren Mächtigkeit oberhalb Papenburg abnahm und sich im Bereich um Papenburg eine größere Schichtdicke einstellte. Damit verlagerte sich auch das Sauerstoffminimum in Richtung Papenburg. In dieser Zeit trat ein stärkeres Tidesignal von der Nordsee her auf, das vermutlich ohne Tidesteuerung zu einer Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen geführt hätte. Dass die Schwebstoffwerte trotzdem abnahmen, spricht für eine gute Wirkungsweise der Tideniedrigwasseranhebung. Der astronomisch und

witterungsbedingt erhöhte Tideeinfluss führte in der ungesteuerten Tide des 10.07. allerdings wieder erneut zu einer Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen im Abschnitt Unterems-Km -4 bis +25. Die Sauerstoffkonzentrationen blieben trotz dieser Unterbrechung hoch; während der Messfahrt lagen diese in der gesamten Ems bei ≥ 5 mg/l.

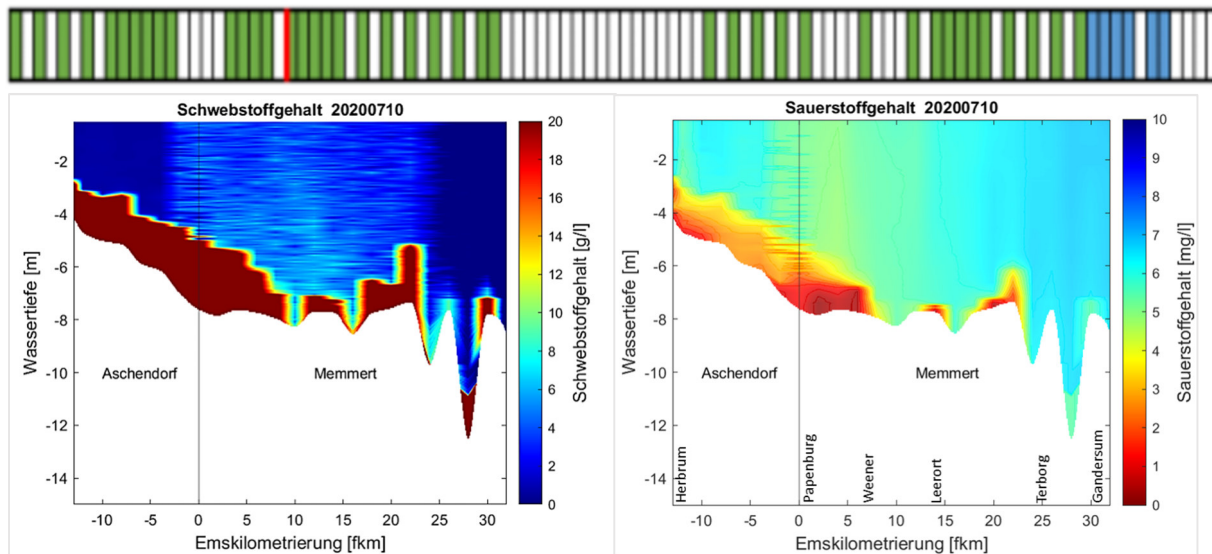


Abbildung 121: Schwebstoff- und Sauerstoffverteilung in der Ems von Herbrum bis Gandersum in der Mittagstide des 10.07.2020: Unmittelbar vor der Messung wurde eine Tideniedrigwasseranhebung ausgesetzt, gleichzeitig lag ein astronomisch und witterungsbedingt erhöhter Tideeinfluss vor. Dieses führte in der ungesteuerten Tide zu einer Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen in der Wasserphase im Abschnitt Unterems-Km -4 bis +25. Bis zur Messung wurde in rd. 60% der Tiden eine Tideniedrigwasseranhebung durchgeführt. Die Längsmessung des 10.07.2020 zeigte trotz der vorausgehenden Steuerungspause geringere Schwebstoffgehalte als in einem Zustand, in dem gar keine Tidesteuerungen vorausgegangen wären. Das Sauerstoffniveau war recht hoch, in der gesamten Ems lagen die Werte im betrachteten Zeitraum der Tide bei ≥ 5 mg/l. Lediglich in der Flüssigschlickschicht waren niedrige Konzentrationen bzw. abschnittsweise kein Sauerstoff vorhanden.

In der **dritten Testwoche (12. bis 18.07.)** erfolgte zumeist in jeder zweiten Tide eine Tideniedrigwasseranhebung. Insgesamt lag der Anteil der bisher gesteuerten Tiden bei etwa 65%. Die Längsmessungen denen jeweils eine Tidesteuerung unmittelbar vorausging, zeigten niedrige Schwebstoffkonzentrationen im gesamten Abschnitt zwischen Herbrum und Gandersum. Zwischen Herbrum und Papenburg waren die Schwebstoffgehalte etwas höher als im unterhalb davon befindlichen Abschnitt in Richtung Gandersum. Die Sauerstoffwerte lagen auf einem relativ hohen Niveau, nahmen jedoch leicht ab. Dabei weitete sich der Abschnitt mit Konzentrationen ≤ 5 mg/l wieder aus. Das Sauerstoffminimum befand sich im Bereich Papenburg, wo zum Ende der Woche während der Längsmessung Werte ≤ 4 mg/l oberhalb der Flüssigschlickschicht registriert wurden. Die leichte Abnahme der Sauerstoffwerte war vermutlich einerseits auf die Steuerung nur jeder zweiten Tide und andererseits auf die Zunahme der Wassertemperatur im gleichen Zeitraum zurückzuführen.

In der **vierten Testwoche (19. bis 25.07.)** begann eine längere Steuerungspause. Die letzte Tideniedrigwasseranhebung fand in der Abendtide des 19.07. statt. In der darauffolgenden ersten ungesteuerten Tide war eine leichte Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen oberhalb von Leerort festzustellen, wobei insgesamt jedoch noch ein geringes Konzentrationsniveau vorhanden war. Lediglich die Flüssigschlickschicht oberhalb von Papenburg hatte bereits deutlich an Mächtigkeit zugenommen.

Die folgenden Messungen zeigten zunächst eine starke Zunahme oberhalb Km -10 und unterhalb Km-4 bis etwa km+30 und dann eine starke Zunahme oberhalb von Papenburg. Damit stellte sich ein zunehmend stärkeres Gefälle der Schwebstoffkonzentrationen von Herbrum in Richtung Gandersum ein.

Nach Ausbleiben der Tidesteuerung nahmen die Sauerstoffkonzentrationen zunächst oberhalb von Papenburg ab. Dieser Vorgang weitete sich dann in Richtung Leerort aus. Zum Zeitpunkt der Längsmessungen traten oberhalb von Leerort Sauerstoffwerte $< 5 \text{ mg/l}$ und oberhalb von Papenburg $< 2 \text{ mg/l}$ auf. Lediglich in einem kurzen Abschnitt direkt unterhalb des Tidewehrs Herbrum waren aufgrund des Oberwasserzuflusses Sauerstoffwerte um 5 mg/l vorhanden. Auch unterhalb von Leerort nahmen die Sauerstoffwerte nicht weiter ab. Hier waren zum Ende der langen Steuerungspause sogar leicht höhere Werte festzustellen. In der Flüssigschlickschicht waren nur sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen bzw. bereichsweise kein Sauerstoff feststellbar. Durch die Zunahme der Flüssigschlickschicht in Mächtigkeit und Ausdehnung war dadurch auch der Anteil des sauerstoffarmen Milieus am Gesamtvolumen gestiegen. Im Laufe der langen Steuerungspause hatten sich damit die Bedingungen der Gewässergüte wieder denen der typischen sommerlichen Umstände angenähert.

Im Zusammenhang mit der Mächtigkeit und Ausdehnung der Flüssigschlickschicht und der Verteilung der Schwebstoffkonzentrationen ist die Steigerung der Baggerintensität zu nennen, die in der betreffenden Woche oberhalb von Leerort deutlich gesteigert wurde. Bis zum 21.07. betrug auf diesem Abschnitt die feste Laderaummenge je Tag im Mittel rd. 6.000 m^3 , danach erfolgte eine Steigerung auf etwa 12.000 m^3 pro Tag.

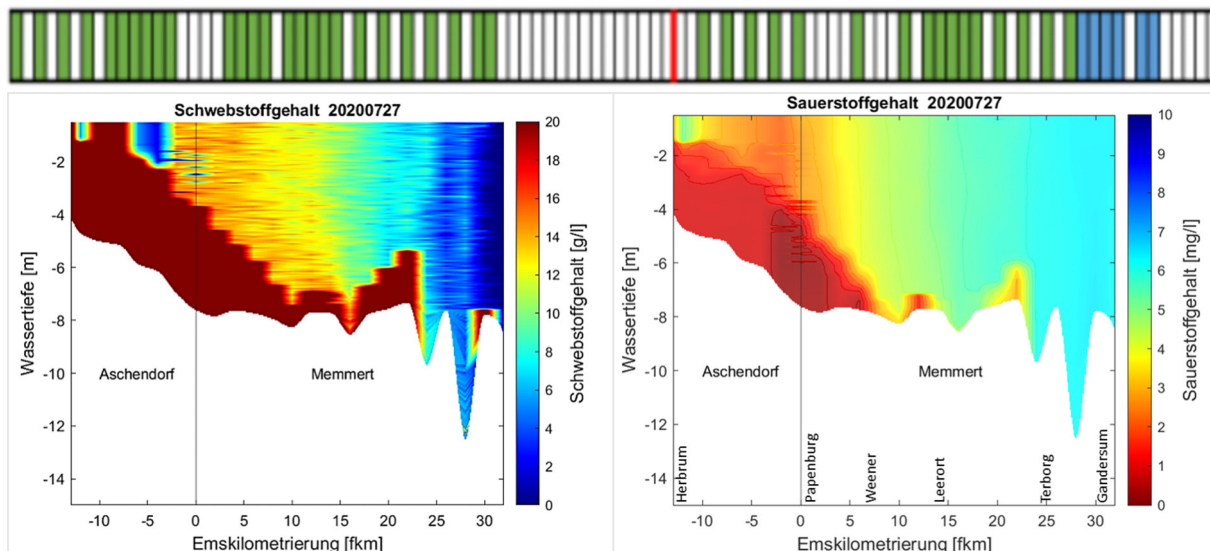


Abbildung 122: Schwebstoff- und Sauerstoffverteilung in der Ems von Herbrum bis Gandersum in der Nachmittagstide des 27.07.2020: Der Messung ging eine Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebungen über 15 Tiden voraus. Dieses hatte zu einer starken Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen in der Wasserphase in der Unterems, insbesondere im Abschnitt zwischen Unterems-Km -12 (Herbrum) und +30 (Oldersum) geführt. Dabei bildete sich auch ein starkes Gefälle der Schwebstoffkonzentrationen aus, mit sehr hohen Werten oberhalb von Papenburg, wo die Konzentrationen bis zur Wasseroberfläche stark erhöht waren. Auch die Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht an der Sohle hatte durch die Unterbrechung der Tidesteuerung zugenommen. Mit der Entwicklung der Schwebstoffverteilung ging auch eine Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen einher, insbesondere eine Abnahme im gesamten Abschnitt oberhalb von Unterems-Km +15 (Leerort) auf Werte $\text{O}_2 < 5 \text{ mg/l}$. Eine besonders starke Abnahme ereignete sich oberhalb Km +7 (Weener). In der Flüssigschlickschicht waren nur sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen bzw. bereichsweise kein Sauerstoff vorhanden. Durch die Zunahme der Flüssigschlickschicht in Mächtigkeit und Ausdehnung war dadurch auch der Anteil des sauerstoffarmen Milieus am Gesamtvolumen gestiegen. Im Laufe der langen Steuerungspause hatten sich damit die Bedingungen der Gewässergüte wieder denen der typischen sommerlichen Umstände angenähert.

Zu Beginn der **fünften Testwoche (25.07. bis 01.08.)** hatten sich aufgrund der langen Steuerungspause wieder Schwebstoffkonzentrationen in Höhe und Verteilung eingestellt, die in etwa den typischen sommerlichen Bedingungen entsprachen. Neben den hohen Schwebstoffgehalten existierte ein starkes Gefälle der Schwebstoffkonzentrationen im Abschnitt zwischen Herbrum und Leerort, mit sehr hohen Werten oberhalb von Papenburg, wo die Konzentrationen bis zur Wasseroberfläche stark erhöht waren. Auch die Mächtigkeit und Ausdehnung der Flüssigschlickschicht an der Sohle hatte während der Unterbrechung der Tidesteuerung zugenommen und oberhalb von Papenburg wieder

eine größere Mächtigkeit erreicht. Bis dahin hatten sich in etwa auch wieder die vor dem Test vorhandenen Sauerstoffverhältnisse eingestellt, mit sehr niedrigen Konzentrationen oberhalb von Leerort.

Nach einer Pause von 17 Tiden wurde die Tideniedrigwasseranhebung in der Morgentide des 29.07. wieder fortgesetzt, allerdings nur in jeder zweiten Tide. Daraufhin stellte sich wieder eine Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen ein, am deutlichsten oberhalb Unterems-Km -4 und unterhalb km +20 und die Flüssigschlickschicht verlagerte sich in Richtung Papenburg/Weener. Zeitgleich nahmen auch die Sauerstoffwerte oberhalb von Papenburg und unterhalb von Leerort wieder zu. Der Wind- und Tideeinfluss hatte am 29. und 30.07. vermutlich einen großen Einfluss auf den Anstieg der Sauerstoffwerte.

In der zweiten Wochenhälfte nahmen die Sauerstoffwerte insgesamt wieder ab, insbesondere oberhalb von Papenburg. Dabei unterschied sich die Verteilung nur unwesentlich von der zu Wochenbeginn. Vermutlich reichte die Steuerung jeder zweiten Tide bei zunehmender Tideintensität (windbedingt und beginnender Springeinfluss) nicht aus, die Schwebstoffkonzentration nachhaltig zu senken bzw. die Sauerstoffgehalte anzuheben.

Die Sauerstoff-, Schwebstoff- und Flüssigschlickverhältnisse waren womöglich nicht nur Resultat der geringeren Steuerungsintensität und des astronomischen sowie witterungsbedingten Einflusses, sondern standen auch im Zusammenhang mit dem Einsatz von zwei Laderaumsaugbaggern oberhalb von Leerort und eines weiteren Baggers unterhalb von Unterems-Km 20 (Jemgum). In Vorbereitung der für Ende August geplanten Schiffsüberführung erreichte die Baggerintensität ab dieser Woche ihren Höhepunkt, wobei täglich eine feste Laderaummengende von insgesamt rd. 18.000 m³ bewegt wurde.

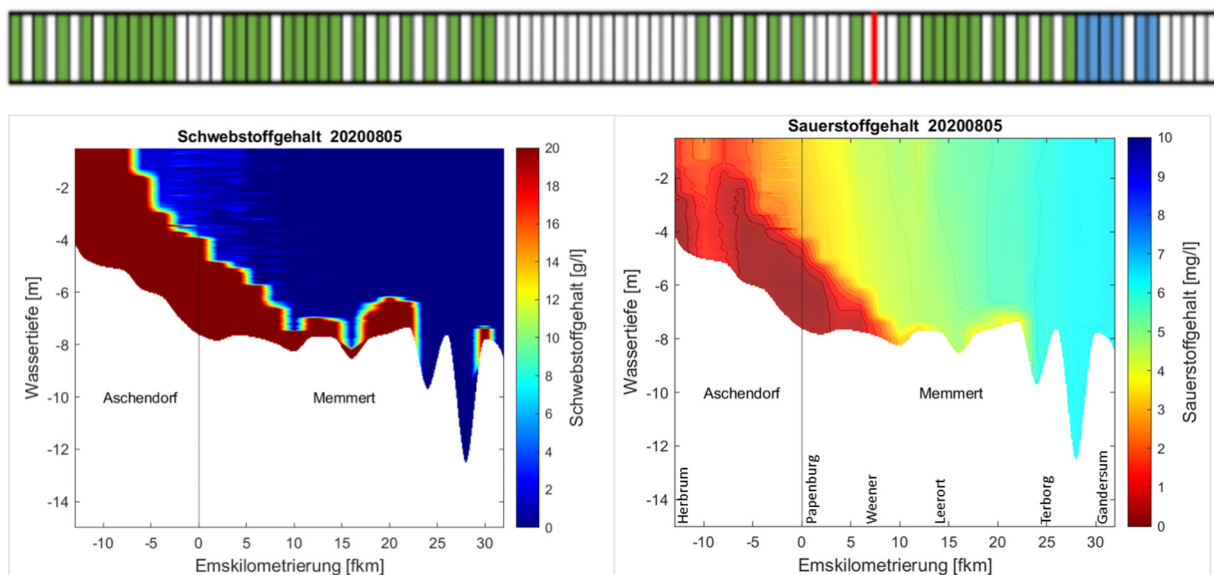


Abbildung 123: Schwebstoff- und Sauerstoffverteilung in der Ems von Herbrum bis Gandersum in der Mittagstide des 05.08.2020: Unmittelbar vor der Messung fand keine Tideniedrigwasseranhebung statt. Zudem ging der Messung ein Zeitraum voraus, in dem nur vereinzelt bzw. unregelmäßig Tideniedrigwasseranhebungen stattgefunden hatten. Der Anteil der gesteuerten Tiden lag bis zum Zeitpunkt der Messung bei 40%. Die geringe Steuerungsintensität hatte zu einer Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen oberhalb Unterems-km+10 (Weekeborg) bzw. zu deren starken Anstieg oberhalb Unterems-Km-4 (nahe Brual) geführt. Damit hatte sich auch ein deutliches Gefälle ausgebildet. Auch die Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht an der Sohle hatte durch die niedrige Intensität der Tidesteuerung zugenommen. Trotz der negativen Entwicklung waren unterhalb von Unterems-Km -4 immer noch niedrigere Schwebstoffgehalte vorhanden als in einem Zustand, dem gar keine Tidesteuerungen vorausgegangen wären. Im Zusammenhang mit der Schwebstoffverteilung und der hohen Wassertemperatur (> 20°C) traten im betrachteten Zeitabschnitt der im gesamten Abschnitt oberhalb Unterems-Km+15 (Leerort) Sauerstoffgehalte von $O_2 < 5 \text{ mg/l}$ auf. Besonders deutlich war die Abnahme oberhalb Unterems-Km+7 (Weener). Durch die Zunahme der Flüssigschlickschicht in Mächtigkeit und Ausdehnung war dadurch auch der Anteil des sauerstoffarmen Milieus am Gesamtvolumen gestiegen.

In der **sechsten Testwoche (02.08. bis 08.08.)** wurde die Tideniedrigwasseranhebung nur unregelmäßig ausgeführt. Vom 02.08. bis zum 07.08. fanden nur in drei von 11 Tiden eine Steuerung statt. Dabei lagen zwischen den gesteuerten Tiden Unterbrechungen von drei bis vier Tiden. Die Steuerung war somit geringer Intensität und zudem unregelmäßig. Dieses führte zu einer Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen oberhalb Unterems-km+10 (Weekeborg), insbesondere oberhalb Unterems-Km-4 (nahe Brual), womit sich ein deutliches Konzentrationsgefälle ausbildete. Die Flüssigschlickschicht an der Sohle verlagerte sich so, dass sich oberhalb von Weener größere Mächtigkeiten einstellten. Neben der geringen und unregelmäßigen Intensität der Tidesteuerung trugen in dieser Woche auch die Zunahme der Tideintensität seitens der Nordsee und das niedrige Oberwasser dazu bei, dass die Schwebstoffkonzentrationen auf erhöhtem Niveau blieben. Trotzdem waren zum Zeitpunkt der Längsmessung unterhalb von Unterems-Km -4 immer noch niedrigere Schwebstoffgehalte vorhanden als in einem Zustand, dem gar keine Tidesteuerungen vorausgegangen wären. Eine nachhaltige Senkung der Schwebstoffkonzentrationen war unter diesen Umständen aber nicht zu erzielen.

Die in der Zeit der unregelmäßigen und geringen Tidesteuerung entstandene Schwebstoff- bzw. Feststoffverteilung führte zu einer signifikanten Abnahme der Sauerstoffwerte oberhalb von Leerort, insbesondere oberhalb von Weener. Unterhalb von Leerort verschlechterten sich die Sauerstoffverhältnisse kaum. Die Ursache dafür ist vermutlich einerseits die Verlagerung der Schwebstoffe und der Flüssigschlickschicht in Richtung Herbrum und andererseits der Eintrag sauerstoffreichen Wassers aus Richtung Außenems, der durch den intensiven Tideeinfluss forciert wurde. Die unregelmäßige Tidesteuerung reichte bei den geschilderten Randbedingungen nicht aus, um die Schwebstoffkonzentration nachhaltig zu senken und die Sauerstoffwerte anzuheben.

Die Schwebstoff- und Flüssigschlickverhältnisse oberhalb von Weener resultierten womöglich nicht nur aus der geringeren Steuerungsintensität, sondern standen auch im Zusammenhang mit dem Einsatz der zwei Laderaumsaugbagger oberhalb von Weener. In Vorbereitung der für Ende August geplanten Schiffsüberführung war auch in dieser Woche eine hohe Baggerintensität vorhanden, bei der auf der Strecke Km 0 bis Km 4 täglich eine feste Laderaummenge von 10.000 bis 15.000 m³ bewegt wurde. Auch unterhalb von Km 20 erfolgte ein Baggereinsatz mit etwa 6.000 m³ Laderaummenge pro Tag, der sich aber anscheinend nicht in den relativ niedrigen Schwebstoff- und verhältnismäßig hohen Sauerstoffwerten widerspiegelte.

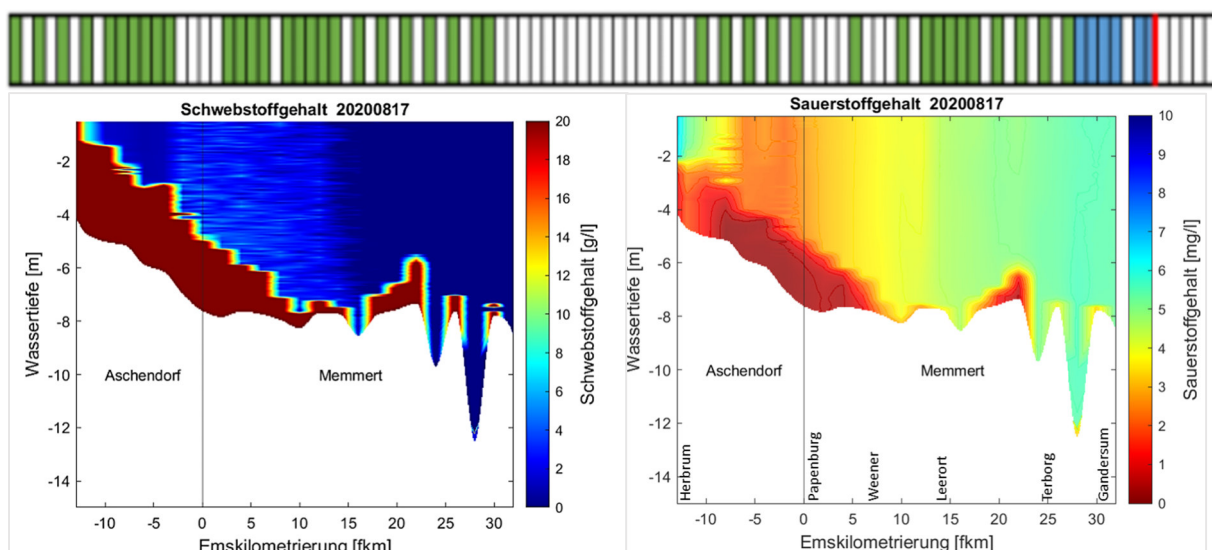


Abbildung 124: Schwebstoff- und Sauerstoffverteilung in der Ems von Herbrum bis Gandersum in der Morgentide des 17.08.2020: In der Morgentide des 14.08.2020 war die letzte Tideniedrigwasseranhebung durchgeführt worden. Mit Ausnahme der Morgentide des 16.08. wurde von der Nachmittagstide des 14.08. bis zur Morgentide des 17.08. die Flutstromtidesteuerung getestet. Der Längsmessung gingen daher insgesamt fünf Flutstromtidesteuerungen voraus, wobei zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Steuerungen direkt vorher ausgeführt worden waren. Die Längsmessung des

17.08.2020 zeigte erhöhte Schwebstoffwerte zwischen Unterems-Km -4 (nahe Brual) und +15 (Leerort). Auch direkt unterhalb des Tidewehrs Herbrum waren die Schwebstoffkonzentrationen stark angestiegen. Unterhalb von Leerort waren geringe Werte festzustellen. Die Längsmessung in der Morgentide des 15.08. hatte ein vergleichbares Bild ergeben; auch dieser Messung waren zwei direkt aufeinanderfolgende Flutstromtidesteuerungen vorausgegangen. Nahezu im gesamten Abschnitt oberhalb Unterems-Km +25 (Terborg) waren zum Zeitpunkt der Messung Sauerstoffgehalte < 5 mg/l vorhanden. Oberhalb von km +15 (Leerort) nahmen diese deutlich weiter ab und im Abschnitt von Km -7 (Rhede) bis etwa +3 (Stapelmoor) waren Werte von ≤ 3 mg/l vorhanden. Aufgrund des Oberwasserzuflusses war in einem kurzen Abschnitt unterhalb des Tidewehrs trotz hoher Schwebstoffwerte Sauerstoffgehalte von rd. 5 mg/l zu messen.

Zu Beginn der **siebten Testwoche (09. bis 15.08.)** endete eine Phase, in der fünf direkt aufeinander folgende Tideniedrigwasser angehoben wurden. Anschließend wurde bis zum 14.08. nur jede zweite Tide gesteuert. Am 14.08. endete dann auch die Testphase der Tideniedrigwasseranhebungen und es begann der Test der Flutstromtidesteuerungen. Die letzte Längsmessung hatte in der Vorwoche am 05.08. stattgefunden und bis zum 15.08. wurden auch keine weiteren Längsmessungen ausgeführt, so dass die Auswirkungen der Tidesteuerung zusammen mit den natürlichen Randbedingungen auf die Verteilung der Schwebstoffe und der Sauerstoffgehalte im Wasser sowie der Flüssigschlickschicht im Sohlbereich nicht dokumentiert wurde. Die Intensität der Tide nahm in dieser Woche aufgrund des astronomischen Einflusses und durch die vorherrschenden Windverhältnisse ab, zudem stellte sich mit rd. 25°C eine hohe Wassertemperatur ein.

Der Baggereinsatz konzentrierte sich in dieser Woche mit wenigen Ausnahmen auf die Strecken Unterems-Km 0 bis 4 (tägliche Laderaummenge etwa 11.000 m³) und unterhalb Km 31.

Die Flutstromtidesteuerungen wurden bis in die **achte Testwoche** hinein über insgesamt fünf Tiden ausgeführt. Am 16.08. musste allerdings die Steuerung der Morgentide ausgesetzt werden, da zunächst die inzwischen eingetretene Erosion im Nahbereich des Emssperrwerks zu bewerten war. Gegenüber unbeeinflussten Verhältnissen waren die Schwebstoffkonzentrationen in den durch die Flutstromsteuerungen beeinflussten Tiden niedriger, im Vergleich zu den Tideniedrigwasseranhebungen waren diese allerdings höher, und zwar während der Flut- und Ebbephase. Dieses traf insbesondere für den Abschnitt zwischen Unterems-Km -4 (nahe Brual) und +15 (Leerort) zu. Auch direkt unterhalb des Tidewehrs Herbrum stiegen die Schwebstoffkonzentrationen stark an. Unterhalb von Leerort waren relativ geringe Werte festzustellen. Die Flüssigschlickschicht erstreckte sich auf die Strecke zwischen Terborg und Herbrum und hatte damit eine größere Länge als zu Beginn der Flutstromtidesteuerung. Auch nahm mit dieser Steuerung wieder die Dicke oberhalb Weener zu.

Die Sauerstoffverhältnisse änderten sich während der Phase der Flutstromtidesteuerung nur wenig, so dass das Niveau, welches zum Ende der Versuchsphase der Tideniedrigwasseranhebung vorhanden war, gehalten wurde. Von Unterems-Km +25 (Terborg) bis nach Herbrum waren zur Zeit der Längsfahrten Sauerstoffgehalte < 5 mg/l vorhanden. Lediglich unmittelbar unterhalb des Tidewehrs Herbrum traten aufgrund des Oberwasserzuflusses etwas höhere Konzentrationen auf. Zwischen Unterems-Km -7 (Rhede) und +7 (Weener) formierte sich ein Abschnitt mit Konzentrationen von < 3 mg/l, in dessen Kernbereich (etwa bei Km -3) auch Konzentrationen von < 2 mg/l zu messen waren. Die niedrige Tideintensität, die bereits zum Ende der Vorwoche vorhanden war, wird sich vermutlich günstig auf die Sauerstoffverhältnisse ausgewirkt haben, so dass bei höherer Tideintensität niedrigere Werte zu erwarten gewesen wären.

Der Baggereinsatz fand auch in dieser Woche hauptsächlich auf die Strecke Unterems-Km 0 bis 4 statt, wo die tägliche Laderaummenge im Mittel bei 11.000 m³ lag.

Die Anzahl von fünf Flutstromsteuerungen reichte nicht aus, um die Wirkung dieser Variante unter Beweis zu stellen.

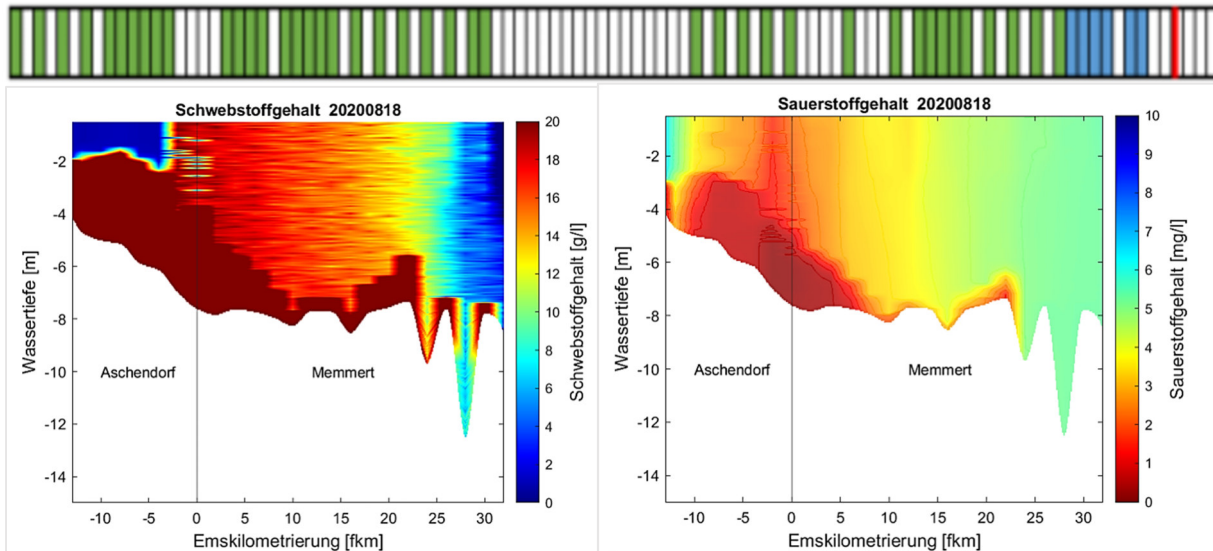


Abbildung 125: Schwebstoff- und Sauerstoffverteilung in der Ems von Herbrum bis Gandersum in der Morgentide des 18.08.2020: Die letzte Flutstromtidesteuerung hatte in der Morgentide des 17.08.2020 stattgefunden, so dass der Messung zwei ungesteuerte Flutphasen vorausgingen. Die Längsmessung zeigte stark erhöhte Schwebstoffwerte unterhalb Unterems-Km -4 (nahe Brual). Die Längsmessung am Morgen des 16.08. hatte ein vergleichbares Bild ergeben; vor dieser Messung war eine Flutstromtidesteuerung ausgelassen worden. Auch die Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht an der Sohle hatte nach Beendigung der Tidesteuerung zugenommen. Nahezu im gesamten Abschnitt oberhalb Unterems-Km +25 (Terborg) waren zum Zeitpunkt der Messung Sauerstoffgehalte < 5 mg/l vorhanden. Oberhalb von km +15 (Leerort) nahmen diese deutlich weiter ab und im Abschnitt von Km -7 (Rhede) bis etwa +7 (Weener) waren Werte von ≤ 3 mg/l vorhanden. Zudem bildete sich darin eine Strecke mit sehr niedrigen Konzentrationen aus. Gegenüber dem Zustand des 17.08. war damit der Abschnitt niedriger Sauerstoffwerte größer geworden, bei gleichzeitiger Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen. Aufgrund des Oberwasserzuflusses war in einem kurzen Abschnitt unterhalb des Tidewehrs trotz hoher Schwebstoffwerte Sauerstoffgehalte von rd. 5 mg/l zu messen. Durch die Zunahme der Flüssigschlickschicht in Mächtigkeit und Ausdehnung war dadurch auch der Anteil des sauerstoffarmen Milieus am Gesamtvolumen gestiegen. Aufgrund des Oberwasserzuflusses war in einem kurzen Abschnitt unterhalb des Tidewehrs trotz hoher Schwebstoffwerte Sauerstoffgehalte von rd. 5 mg/l zu messen.

Die letzte Flutstromtidesteuerung fand in der Morgentide des 17.08.2020 statt. Bereits nach zwei ungesteuerte Flutphasen zeigten sich stark erhöhte Schwebstoffwerte unterhalb Unterems-Km -4 (nahe Brual) bis nach Km +30 (Oldersum) und auch die Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht an der Sohle hatte nach Beendigung der Tidesteuerung zwischen Herbrum und Gandersum zugenommen, insbesondere oberhalb Km +10 (Weekeborg). Die letzte Längsmessung erfolgte am 21.08., nach acht ungesteuerten Tiden. Zu diesem Zeitpunkt waren die Schwebstoffkonzentrationen in der ganzen Ems zwischen Herbrum und Unterems-Km+27 (Hatzum) stark angestiegen, besonders oberhalb von Papenburg. Zudem war eine mächtige Flüssigschlickschicht an der Sohle oberhalb von Unterems-Km+15 (Leerort) entstanden. Der Schwerpunkt der Verteilung von Schwebstoff (im Wasser) sowie Feststoff (Sohlbereich) hatte sich in Richtung Herbrum verlagert.

In den Folgetagen nach Beendigung der Tidesteuerung nahmen die Sauerstoffgehalte oberhalb von Leerort ab. Dabei verschlechterten sich diese zunächst oberhalb Papenburg, wobei sich das Sauerstoffminimum vertiefte, räumlich vergrößerte und in Richtung Herbrum verschob. Vermutlich forcierte die astronomisch bedingte Zunahme der Tideintensität (Neumond am 19.08.) die Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen. Die Windverhältnisse führten vermutlich dazu, dass die Sauerstoffwerte im unteren Abschnitt der Unterems bis zur letzten Längsmessung am 21.08. nicht deutlich abnahmen.

Nach Beendigung der Flutstromtidesteuerung wurde erfolgte der Baggereinsatz schwerpunktmäßig oberhalb von Unterems-Km 11 (Weekeborg), wobei im Mittel tägliche Laderaummengen von 12.000 m³ bewegt wurden.

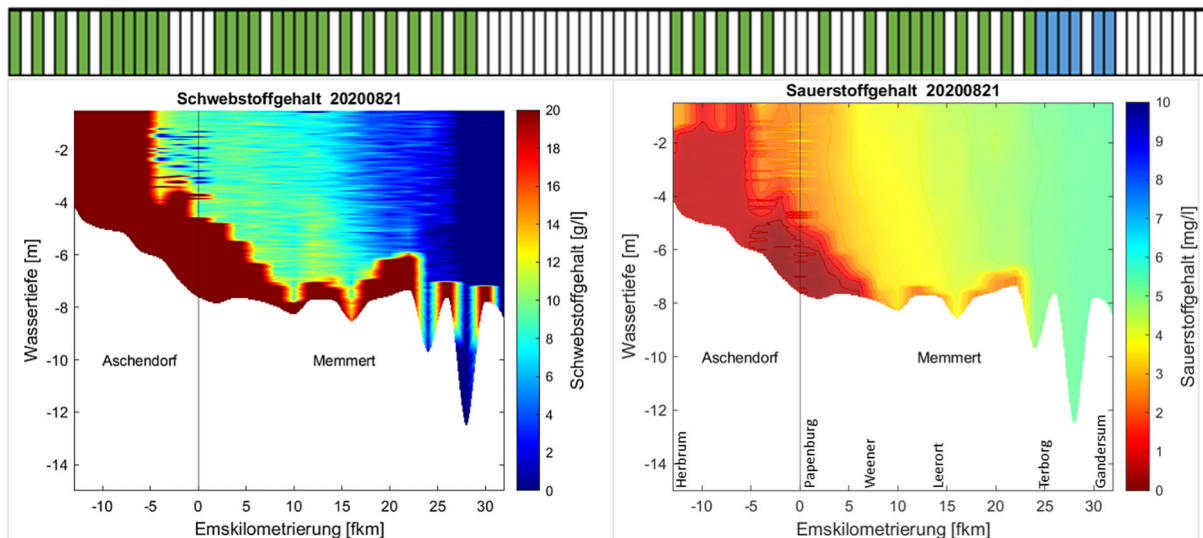


Abbildung 126: Schwebstoff- und Sauerstoffverteilung in der Ems von Herbrum bis Gandersum in der Mittagstide des 21.08.2020: Die letzte Flutstromtidesteuerung hatte in der Morgentide des 17.08.2020 stattgefunden, so dass der Messung acht ungesteuerte Flutphasen vorausgingen. Die Längsmessung zeigte stark erhöhte Schwebstoffwerte im gesamten Abschnitt oberhalb von Unterems-Km+27 (Hatzum). Gegenüber der Vormessung am 18.08. (s.o.) hatten die Konzentrationen oberhalb von Papenburg stark zugenommen und im unterhalb davon befindlichen Abschnitt abgenommen. Damit hatte sich der Schwerpunkt der Schwebstoffverteilung in Richtung Herbrum verlagert. Im gesamten Abschnitt oberhalb Unterems-Km +25 (Terborg) waren zum Zeitpunkt der Messung Sauerstoffgehalte < 5 mg/l vorhanden. Oberhalb von km +15 (Leerort) nahmen diese deutlich weiter ab und im Abschnitt oberhalb von Km+7 (Weener) waren Werte von ≤ 3 mg/l und oberhalb von Km-5 (Brual) sogar von ≤ 1 mg/l vorhanden. Die Streckenlänge sehr niedriger Sauerstoffwerte hatte damit zugenommen. Selbst unterhalb des Tidewehrs, wo aufgrund des Oberwasserzuflusses bei den vorherigen Messungen noch höhere Sauerstoffwerte auftraten, waren nur niedrige Sauerstoffwerte ≤ 3 mg/l festzustellen. Durch die Zunahme der Flüssigschlickschicht in Mächtigkeit und Ausdehnung war insbesondere oberhalb von Papenburg auch der Anteil des sauerstoffarmen Milieus am Gesamtvolumen gestiegen. Damit näherten sich die Bedingungen der Gewässergüte wieder dem typischen sommerlichen Erscheinungsbild.

6.13.3 Zusammenfassung

Im Zeitraum vom 29.06. bis zum 17.08.2020 wurden 42 Tideniedrigwasseranhebungen und 5 Flutstromtidesteuerungen durchgeführt und zum Teil durch Längsmessungen begleitet. Es konnten 23 Fahrten ausgewertet werden, die die Verteilung der Schwebstoffe im Wasserkörper, der Feststoffe im Sohlbereich und der Sauerstoffgehalte im Abschnitt von Herbrum bis Gandersum zeigen. Die Längsmessungen fanden jeweils während der Flutphase statt, bei vorausgehender Tidesteuerung im Zeitraum der wiedereinsetzenden Tide. In den überwiegenden Fällen folgte die Messung unmittelbar nach einer Tidesteuerung. Den anderen Messungen ging keine Tidesteuerung unmittelbar voraus oder die letzte Steuerung lag bereits längere Zeit zurück. Damit kann anhand der zur Verfügung stehenden Längsmessungen die räumliche und zeitliche Entwicklung der Parameter in Abhängigkeit der Steuerungsintensität beschrieben werden.

Je mehr Tideniedrigwasseranhebungen in direkter Folge ausgeführt wurden, desto geringer war das Volumen der mobilen Flüssigschlickschicht, insbesondere oberhalb von Weener und desto niedriger waren die Schwebstoffkonzentrationen zwischen Herbrum und Gandersum. Da im Flüssigschlick nur sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen oder gar kein gelöster Sauerstoff vorhanden ist, führte dessen Volumenabnahme auch zur Ausdehnung des sauerstoffreicheren Milieus. Darüber hinaus nahmen die Sauerstoffkonzentrationen im Wasserkörper insbesondere oberhalb von Leerort zu. War vorher oberhalb von Weener ein Bereich mit sehr niedrigen Sauerstoffwerten festzustellen, nahm das Sauerstoffgefälle entlang der Unterems über die Folge der Tideniedrigwasseranhebungen ab. Dabei verkürzte sich die Strecke mit niedrigen Sauerstoffgehalten, bis dass überall Werte von > 5 mg/l vorhanden waren. Bei Aussetzen einer Tidesteuerung traten nicht sofort hohe Schwebstoffkonzentrationen bzw. niedrige Schwebstoffwerte auf. Wurde jedes zweite

Tideniedrigwasser angehoben, setzte zwar eine Verschlechterung ein, in Form einer Zunahme der Flüssigschlickschicht, der Zunahme der Schwebstoffwerte und Abnahme der Sauerstoffgehalte, jedoch hielt sich die Verschlechterung in Grenzen. Im Technischen Test wurde zeitweise ein Anteil von > 60% der Tiden gesteuert, womit gegenüber dem Referenzzustand eine wesentliche Verbesserung der Verhältnisse erreicht werden konnte. Erst bei Steuerung eines geringeren Anteils der Tiden, insbesondere bei einem Aussetzen der Tidesteuerung über mehrere Tiden in Folge, setzte eine signifikante Verschlechterung der Gewässergüte ein. Dabei nahm mit Zunahme der Unterbrechung auch wieder die Flüssigschlickschicht zu, insbesondere oberhalb von Weener, und die Höhe der Schwebstoff- und Sauerstoffwerte sowie deren Verteilung tendierten wieder in Richtung des Zustandes, so wie er vor Beginn des Technischen Tests existierte.

Bereits eine einzelne Tideniedrigwasseranhebung schien direkt einen positiven Effekt auf die Gewässergüte auszuüben, allerdings reichte die Wirkung nicht über die gesteuerte Tide hinaus. Wurden mehrere direkt aufeinander folgende Tideniedrigwasser angehoben, so zeichnete sich eine rasche und signifikante Verbesserung ab, die sich auch über den Zeitraum der gesteuerten Tide hinaushielt. Bei Übergang zu einer Steuerung jeder zweiten Tide war zwar eine Verschlechterung der Güte festzustellen, aber der gegenüber dem Referenzzustand immer noch wesentlich bessere Zustand war durch die geringere Steuerungsintensität zu halten.

Bei der Flutstromtidesteuerung setzte im Abschnitt zwischen Herbrum und Leerort wieder eine höhere Schwebstoffkonzentration mit einer Zunahme der Flüssigschlickschicht ein sowie zwischen Herbrum und Terborg eine Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen. Aus der geringen Anzahl der im Technischen Test ausgeführten Flutstromtidesteuerung lässt sich nicht ableiten, welche Wirkung ein längerer Einsatz dieser Variante in jeder bzw. jeder zweiten Tide hätte.

Der Zeitraum des Technischen Tests überschneidet sich mit einer Baggerkampagne zur Vorbereitung einer Schiffsüberführung Ende August (SPIRIT of ADVENTURE, Überführungstermin 30.08.2020). Die Baggerintensität wurde zum Ende des Tests deutlich gesteigert und die räumliche Ausdehnung der Baggerstrecken vergrößert. Vor der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung über 17 Tiden (vom 20. bis 28.07.) war lediglich ein Laderaumsaugbagger tätig und förderte eine tägliche Laderaummenge von im Mittel 6.000 m³. Während der Steuerungspause wurde die Baggerintensität gesteigert und dessen räumliche Ausdehnung vergrößert. Nachdem die Tidesteuerung fortgesetzt wurde, existierte einerseits eine geringe Steuerungsintensität (häufiges Aussetzen der Steuerung) und andererseits eine weiterhin hohe Baggerintensität. Möglicherweise hatten die Baggerungen Einfluss auf das Volumen und die Verteilung des Flüssigschlicks sowie der Schwebstoffkonzentrationen und darüber auch auf die Sauerstoffgehalte. In der Phase nach der langen Steuerungspause war die Gewässergüte offensichtlich aufgrund der geringeren Steuerungsintensität schlechter als vor der Pause. Allerdings war in der späteren Phase auch eine wesentlich höhere Baggerintensität vorhanden.

6.14 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Gewässergüte – Beurteilung anhand der Langzeitmessungen von Knock bis Herbrum

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN Aurich)

Die in diesem Kapitel dargestellten dauerhaften Messungen der Schwebstoff-, Salzgehalts- und Sauerstoffkonzentrationen erfolgen im Sohlbereich, an festen Positionen zumeist etwa 2 m oberhalb der festen Gewässersohle (siehe auch Beschreibung in Kapitel 5.13). Im Fokus stehen hier die im Tidebereich befindlichen stationären Messungen von Knock bis Papenburg.

Genau genommen repräsentieren die Messergebnisse nur die Verhältnisse an den Positionen, an denen die Sonden installiert sind und lassen sich nur bedingt auf einen größeren Anteil des Gewässerquerschnitts oder eines Gewässerabschnitts übertragen. Angesichts der großen räumlichen Konzentrationsunterschiede gilt dieses insbesondere für die Schwebstoffgehalte, auch in Hinblick auf das Vorkommen einer hochkonzentrierten Flüssigschlickschicht im Sohlbereich. Da die Installationshöhe über der Sohle konstant ist, führt die Variabilität der Schichtdicke des Flüssigschlicks dazu, dass der Abstand zwischen den Sonden und der Oberfläche der Schicht (Lutokline) variiert und damit deren Einfluss auf die Messwerte schwankt. An den Messorten Leerort, Weener und Papenburg können die Sonden sogar kurzzeitig unterhalb der Grenzschicht liegen, also in den Flüssigschlick eintauchen. Die im Sohlbereich gemessenen Schwebstoffkonzentrationen sind in jedem Fall höher als im überwiegenden Anteil des Durchflussquerschnitts. Die auf gleicher Höhe erfassten Leitfähigkeiten (Salzgehalte) können höher und die dort gemessenen Sauerstoffgehalte können niedriger als in einem Großteil des Querschnitts sein. Hinsichtlich der Gütebewertung der betrachteten Parameter existiert damit eine pessimale Betrachtung. Vergleichsmessungen im Gewässerquerschnitt mit den Messwerten der Sonden an den Dauermessstellen haben stets eine hohe Repräsentativität der Stationswerte gezeigt, es sei denn es lagen geschichtete Verhältnisse vor. Eine an den jeweiligen Positionen ermittelte Verbesserung der Situation, d.h. eine Abnahme der Schwebstoff- und Salzgehaltswerte und eine Zunahme der Sauerstoffgehalte, ist daher mindestens im Bereich oberhalb der Sonde, wenn nicht sogar oberhalb der Flüssigschlickschicht und damit im überwiegenden Anteil des Querschnitts zu erwarten. Dabei gibt die für jede Sondenposition quantifizierte Veränderung die Größenordnung an.

Die zeitlich hochaufgelösten Messreihen der Stationen, die in den meisten Fällen über 20 Jahre und an einigen Orten sogar über 30 Jahre zurückreichen und die Anforderungen an Kontinuität und Homogenität erfüllen, zeigen die Abhängigkeit der betrachteten Parameter von den beeinflussenden Größen im natürlichen Tidegeschehen. Von diesem Hintergrund hebt sich die Einflussnahme der Tidesteuerung auf die betreffenden Parameter ab, so dass die Veränderung der Charakteristik beschrieben und bewertet werden kann.

Die stationär gemessenen Schwebstoff-, Sauerstoff- und Salzgehalte zeigten eine deutliche Einflussnahme der Tidesteuerung, die sich eindeutig von der Reaktion abhob, die durch die natürlichen Bedingungen wie Tidegeschehen, Oberwasser und Wassertemperatur hervorgerufen wurden. Anhand der Aufzeichnungen ist eine positive Wirkung der Tidesteuerung zu bestätigen. Das zeigt die gemeinsame Betrachtung der jeweiligen Gewässergüte-Zeitreihe mit der Abfolge der 42 Tideniedrigwasseranhebungen (TnWA) und der fünf Flutstromsteuerungen (FsTs) im Testzeitraum. Die Daten zeigen, dass in Abhängigkeit der Steuerungsintensität eine Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen, eine Abnahme der Salzgehalte und eine Zunahme der Sauerstoffwerte erreicht wurde.

Bezeichnend für den Sommer 2020 war, dass der Flüssigschlick verstärkt im oberen Abschnitt der Unterems vorkam und dessen Schichtdicke unterhalb von Leerort gering war. Die an den kontinuierlich arbeitenden Gewässergüte-Messstationen aufgezeichneten Zeitreihen spiegelten diesen Umstand wider. Anhand der langjährigen Messungen können auch die Ausgangsbedingungen des Technischen Tests eingeordnet werden: zu Beginn des Tests waren über den größten Abschnitt der Unterems relativ niedrige Salzgehalte, relativ niedrige Schwebstoffkonzentrationen und relativ hohe Sauerstoffwerte vorhanden.

6.14.1 Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen durch die Tidesteuerung

6.14.1.1 Betrachtung der Monatsmittelwerte

Die Schwebstoffverhältnisse wurden anhand der an den Messstationen aufgezeichneten Zeitreihen beurteilt, sowie auch die nach Flut- und Ebephassen getrennten Werte jeweils für sich. Dabei fanden die für jede Tidephase bestimmten Mittel- und Maximalwerte Verwendung.

Zu Beginn des Tests waren an den meisten Messstationen der Unterems im Vergleich zu den Vorjahresverhältnissen niedrigere Schwebstoffgehalte vorhanden. Insbesondere traf dieses für die Stationen Leerort und Weener zu. Im Gegensatz dazu waren in Papenburg vor Beginn des Tests relativ hohes Schwebstoffkonzentrationen während der Ebbe zu messen, bei Flut waren diese ebenfalls relativ niedrig.

Tabelle 60: mittlere Schwebstoffgehalte [g/l] der Ems vor, während und nach dem Technischen Test und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der mittleren Ebbe-Konzentration). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **rot**, Unterschreitungen **blau** und die neutralen Monate **grau** gekennzeichnet.

Station	Jun 2020	Jul 2020	Aug 2020 ¹⁾	Sep 2020	Okt 2020
Knock	0,1 (+/-0)	0,2 (+/-0)	0,1 (+/-0)	0,1 (+/-0)	0,1 (+/-0)
Pogum	0,5 (- 0,3)	0,7 (+/-0)	0,4 (- 0,3) ²⁾	0,6 (- 0,3)	0,7 (- 0,4)
Terborg	0,9 (- 0,4)	0,7 (- 0,6)	0,6 (- 0,7)	0,7 (- 0,7)	1,0 (- 0,7)
Leerort	1,4 (- 2,3)	0,7 (- 3,1)	0,7 (- 3,0)	1,3 (- 2,4)	2,1 (- 2,0)
Weener	2,5 (- 6,3)	1,4 (- 8,0)	2,1 (- 7,7)	2,5 (- 4,2)	3,1 (- 3,4)
Papenburg	8,9 (+0,7)	4,5 (- 4,3)	6,8 (- 0,9)	9,2 (+2,3)	8,6 (+3,5)

¹⁾ gesamter Monat; ²⁾ nur 01. bis 17.08.2021, danach Fehlmessung

Tabelle 61: mittlere Schwebstoffgehalte [g/l] der Ems vor, während und nach dem Technischen Test und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der mittleren **Flut**-Konzentration). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **rot**, Unterschreitungen **blau** und die neutralen Monate **grau** gekennzeichnet.

Station	Jun 2020	Jul 2020	Aug 2020 ¹⁾	Sep 2020	Okt 2020
Knock	0,2 (- 0,1)	0,3 (+/- 0)	0,2 (+/- 0)	0,2 (+/- 0)	0,2 (+/- 0)
Pogum	0,4 (- 0,2)	0,5 (+/- 0)	0,5 (- 0,1)	0,4 (- 0,4)	0,5 (- 0,4)
Terborg	1,5 (- 1,2)	1,0 (- 1,6)	1,1 (- 1,5)	1,2 (- 1,6)	1,7 (- 1,7)
Leerort	2,4 (- 8,0)	0,7 (- 9,1)	0,9 (- 8,3)	1,9 (- 7,0)	3,5 (- 5,8)
Weener	12,6 (-14,0)	3,6 (-24,2)	6,3 (-19,7)	10,7 (-12,0)	13,3 (-7,1)
Papenburg	14,6 (- 1,4)	6,0 (-10,9)	10,5 (-5,6)	14,6 (+0,6)	12,9 (+1,5)

¹⁾ gesamter Monat; ²⁾ nur 01. bis 17.08.2021, danach Fehlmessung

Die an den Messstationen erfassten Schwebstoffkonzentrationen nahmen durch die Tideniedrigwasseranhebung stark ab. Trotz der intermittierenden Tidesteuerung, in denen nur phasenweise direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden und auch Unterbrechungen von bis zu 17 Tiden vorkamen, war der Effekt insgesamt so deutlich, dass sich dieser auch in einer auffälligen Abnahme der Monatsmittelwerte in Leerort, Weener und Papenburg äußerte (Tabelle 60 und Tabelle 61). Durch die Tideniedrigwasseranhebung sanken die Monatsmittelwerte, insbesondere im Abschnitt oberhalb von Leerort, so dass diese dann erheblich unter den langjährigen Mittelwerten lagen. Dieser Effekt setzte sich auch auf den Abschnitt oberhalb von Weener fort, wo vor Testbeginn zumindest während der Ebbe noch relativ hohe Werte zu messen waren. Die Verminderung der Schwebstoffkonzentrationen in der ersten Augushälfte, die auf die Tidesteuerungen in diesem Zeitraum zurückzuführen waren, führten rein rechnerisch dazu, dass auch der Mittelwert des gesamten Monats niedriger war als der des Referenzzustands. Im September stiegen die mittleren Konzentrationen zunächst wieder auf das ursprüngliche Niveau und nahmen dann zum Oktober hin weiter zu. In Papenburg wurden gleich im September wieder relativ hohe Werte erreicht.

6.14.1.1.1 Veränderung der Ebbe- und Flutphase durch die Tideniedrigwasseranhebung und Auswirkung auf die Mittelwertbildung der Schwebstoffkonzentrationen

Die vorgenannten Mittelwerte beziehen sich konsequent auf die jeweiligen Tidephasen, die durch die Scheitel begrenzt werden. Die Tideniedrigwasseranhebung führt allerdings zu einem weiteren Systemzustand, der weder der Ebbe- noch der Flutphase zuzuordnen ist: oberhalb des Sperrwerks ist der niedrigste Wasserstand der Tide dem Schließwasserstand des Sperrwerks zuzuordnen. Dieser tritt Prinzip bedingt erheblich früher als das astronomische Tideniedrigwasser ein. Diesem beeinflussten Tideniedrigwasser folgt ein zügiger Anstieg des Wasserstands (Schwallwelle) und daran anschließend die Ausspiegelung, in der der Wasserstand nicht zwangsläufig an allen Positionen der abgesperrten Ems stetig steigt oder fällt. Diese Phase der indifferenten Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse lässt sich nicht eindeutig der Ebbe- oder Flutphase zuordnen. Erst nach dem Öffnen des Sperrwerks und dem Einschwingen der Tide setzen eindeutige Verhältnisse der Flut ein, indem der Wasserstand bis zum Erreichen des Tidehochwassers stetig steigt. Bei der hier vorliegenden Betrachtung der mittleren Schwebstoffkonzentrationen wird jedoch die ursprüngliche und pauschale Einteilung in zwei Tidephasen fortgeführt, so dass die Mittelwertbildung der Schwebstoffkonzentrationen während der Tideniedrigwasseranhebung vom Tidehochwasser bis zum beeinflussten Tideniedrigwasser (pauschale

Bezeichnung Ebbephase) und vom beeinflussten Tideniedrigwasser bis zum Tidehochwasser (pauschale Bezeichnung Flutphase) gebildet wurden. Die Ebbephase war während der Tideniedrigwasseranhebung daher gegenüber dem Referenzfall verkürzt und die Flutphase demgegenüber verlängert, zudem enthielt dieser den Zeitraum indifferenter Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse. Der Vergleich der mittleren Schwebstoffkonzentrationen im Testzeitraum mit denen der Zeiträume davor, danach und mit dem Referenzfall ist somit mit entsprechender Unschärfe behaftet. Allerdings zeigen die Mittelwerte beider Tidephasen für sich eine eindeutige Abnahme durch die Tideniedrigwasseranhebung, wodurch die Wirksamkeit ausreichend belegt wird.

6.14.1.2 Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen – Betrachtung der Vorgänge innerhalb der Tide

Vor Testbeginn war ein starkes Gefälle der Schwebstoffkonzentrationen zu beobachten, mit sehr hohen Gehalten bei Papenburg und Weener sowie im Verhältnis dazu sehr niedrigeren Werten im abwärts davon befindlichen Abschnitt. In diesem Zusammenhang ist auch auf die Flüssigschlickschicht hinzuweisen, deren Mächtigkeit oberhalb von Leerort stark zunahm. Innerhalb der Tide zeigte sich ein deutliches Ungleichgewicht der Schwebstoffkonzentrationen, mit z.T. sehr hohen Werten während der Flutphase und deutlich niedrigeren Konzentrationen während der Ebbephase. Während der Flutphase wurden zu Beginn des Tests bei Papenburg und Weener maximale Konzentrationen zwischen 30 und 35 g/l zu messen. Im Abschnitt von Gandersum bis Leerort wurden maximale Werte von 5 g/l erreicht, im Abschnitt Emden bis Gandersum betrug diese bis zu 3 g/l und bei Knock waren Werte < 0,5 g/l festzustellen.

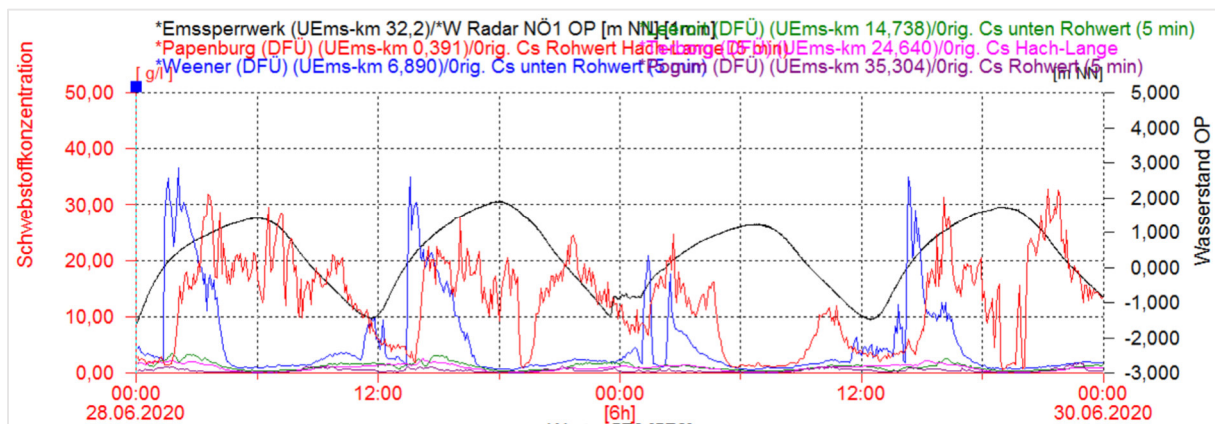


Abbildung 127: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum am 28. und 29.06.2020. Anmerkung: in der Nachttide 28./29.06. fand die erste Tideniedrigwasseranhebung statt. Deutlich sind die niedrigeren Schwebstoffkonzentrationen in Folge der Tidesteuerung zu erkennen sowie auch die erneute Zunahme nach Aussetzen der Steuerung. (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Schwebstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Die Schwebstoffverhältnisse der Unterems werden durch zahlreiche Randbedingungen beeinflusst, von denen der Oberwasserzufluss und die Tidebedingungen einen sehr großen Einfluss ausüben. Im Verhältnis dazu wirkte sich die Tidesteuerung sehr deutlich auf die Schwebstoffverhältnisse aus. Die Abnahme der Konzentrationen war auch vor dem Hintergrund der natürlichen Schwankungen eindeutig auf die Tidesteuerung zurückzuführen und werden nachfolgend anhand ausgewählter Beispiele dokumentiert.

6.14.1.2.1 Die erste Testwoche – Tideniedrigwasseranhebung in jeder zweiten Tide, Abnahme der Schwebstoffwerte

Bereits nach der ersten Tideniedrigwasseranhebung waren niedrigere Schwebstoffgehalte, insbesondere an den Stationen Papenburg und Weener, festzustellen. Auf jede ungesteuerte Tide folgten wieder erhöhte Konzentrationen. Zum Ende der Woche wurden mehrere aufeinanderfolgende Tiden gesteuert, so dass sich fortlaufend geringere Schwebstoffwerte einstellen.

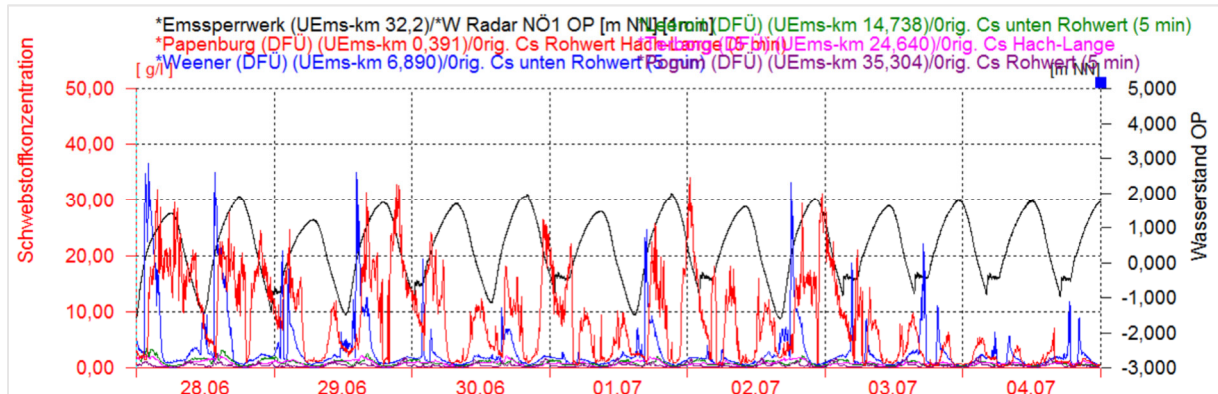


Abbildung 128: erste Testwoche: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Das Oberwasser ging zunächst von 25 auf 20 m³/s zurück und stieg dann wieder auf rd. 30 m³/s. Um den 30.06. war ein deutlicher Windstau vorhanden, der zu rel. niedrigen Tidenhuben führte (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Schwebstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

6.14.1.2.2 Die zweite Testwoche – Aussetzen der Tideniedrigwasseranhebung für mehrere Tiden, leichte Sturmflut

Am 05.07. endete eine Phase, in der sechs Tideniedrigwasser in Folge angehoben wurden. In dieser Zeit wurden die Schwebstoffwerte sehr stark abgesenkt. Selbst in Weener und Papenburg lagen die maximalen Konzentrationen zumeist unter 2 g/l, lediglich kurzzeitig wurden dort nur noch Werte von bis zu 5 g/l erreicht. Während der Sturmflut am 06.07. wurden die Schwebstoffwerte wieder etwas angehoben, da das vorhergehende Tideniedrigwasser nicht gesteuert worden war. In den nachfolgenden ungesteuerten Tiden nahmen die Konzentrationen wieder sukzessive zu. Die erneute Folge mehrerer gesteuerter Tiden senkte jedoch das Schwebstoffniveau wieder stark ab. Dabei wurde das Niveau der Schwebstoffkonzentrationen auch bei Papenburg drastisch abgesenkt, so dass auch hier die Maximalwerte auf < 5 g/l abnahmen. Im Abschnitt von Leerort bis Gandersum waren Werte von zumeist < 1 g/l zu messen. Dieses geschah trotz zunehmend erhöhter Tidehöhe seitens der Nordsee, was für eine gute Wirkung der Tidesteuerung spricht.

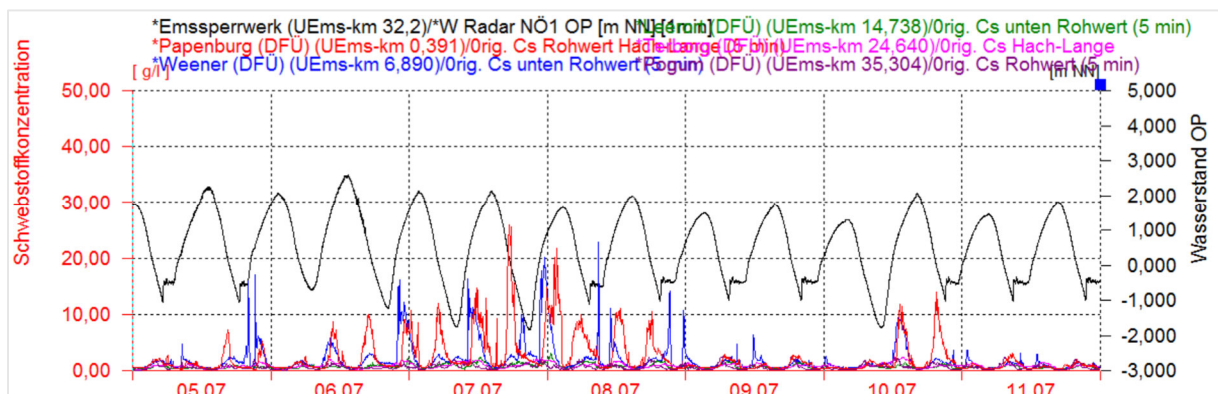


Abbildung 129: zweite Testwoche: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Das Oberwasser nahm zunächst von 30 auf 20 m³/s ab, um dann in der zweiten Wochenhälfte wieder auf rd. 30 m³/s anzusteigen; am 06.07. trat

eine leichte Sturmflut mit stark erhöhtem und nicht gesteuerten Tnw (8 Bft) bzw. rel. niedrigem Tidehub ein, im Anschluss nahmen die Tidehübe im Mündungsbereich der Ems deutlich zu (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Schwebstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

6.14.1.2.3 Die dritte Testwoche – intermittierende Tideniedrigwasseranhebung, niedrige Schwebstoffwerte

Nach dem 13.07. wurde nur noch jedes zweite Tideniedrigwasser angehoben. Die Schwebstoffkonzentrationen blieben trotzdem insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Lediglich in den ungesteuerten Tiden stiegen die Konzentrationen kurzzeitig an. Verglichen mit dem Zeitraum vor Beginn der Steuerung waren aber auch diese Werte sehr niedrig.

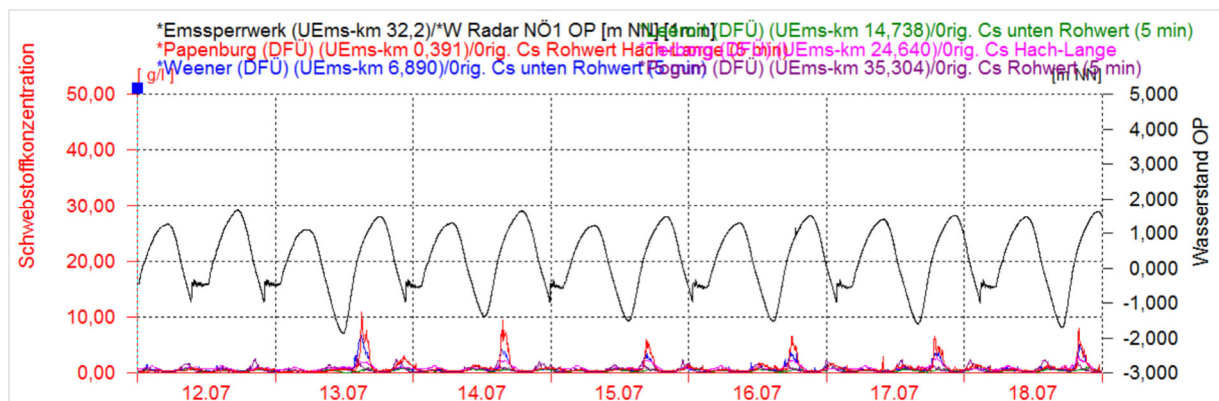


Abbildung 130: dritte Testwoche: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Das Oberwasser schwankte zwischen 15 und 30 m^3/s ; bei ruhigem Wetter (zumeist südliche bis östliche Winde mit 2 bis 4 Bft) war eine mittlere bis leicht erniedrigte Tideintensität vorhanden (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Schwebstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

6.14.1.2.4 Die vierte Testwoche – Beginn einer längeren Steuerungspause und Zunahme der Schwebstoffwerte

Ab 20.07. wurde die Tidesteuerung für 17 aufeinanderfolgende Tiden ausgesetzt. Mit jeder Tide stiegen die Schwebstoffkonzentrationen an, so dass sich ungefähr die ursprünglichen Verhältnisse, so wie sie vor Testbeginn vorhanden waren, wieder einstellen.

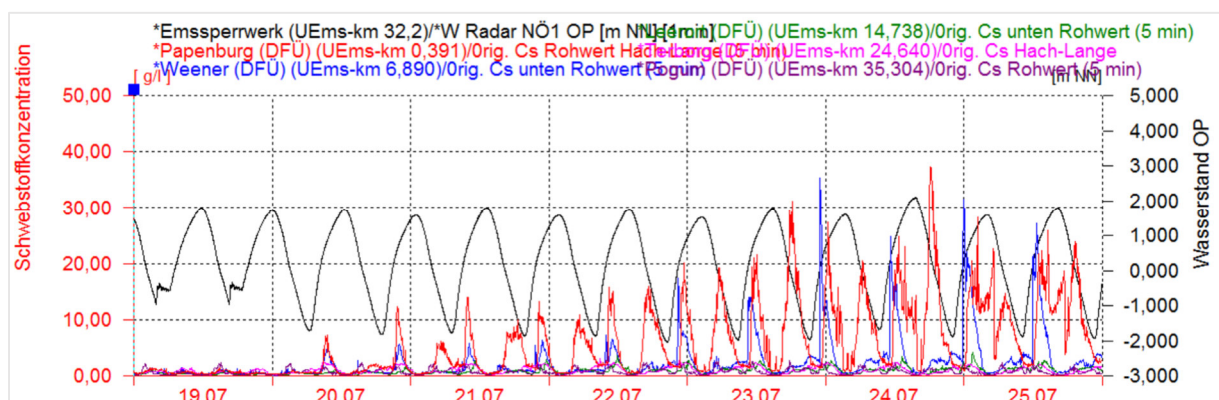


Abbildung 131: vierte Testwoche: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Das Oberwasser schwankte zwischen 20 und 30 m^3/s ; zu Beginn der Woche nahmen die Tidehübe bei recht ruhigem Wetter zu (Springeinfluss, Neumond am 19.07.) und in der zweiten Wochenhälfte führte ein Auffrischen des Windes (bis 6 Bft) zu erhöhten Tidehüben. (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Im Zusammenhang mit der Verteilung der Schwebstoffkonzentrationen ist die Steigerung der Baggerintensität zu nennen, die in der betreffenden Woche oberhalb von Leerort deutlich gesteigert wurde. Bis zum 21.07. betrug auf diesem Abschnitt die feste Laderaummenge je Tag im Mittel rd. 6.000 m³, danach erfolgte eine Steigerung auf etwa 12.000 m³ pro Tag.

6.14.1.2.5 Die sechste Testwoche – Unregelmäßige Tideniedrigwasseranhebung, Stagnation der Sauerstoffwerte auf niedrigem Niveau

Nachdem die Tidesteuerung in der fünften Testwoche fortgesetzt wurde, erfolgte diese zunächst für jede zweite Tide und dann in der sechsten Woche unregelmäßig, wobei auch mehrtägige Unterbrechungen eingelegt wurden. Erst am 07.08. wurde wieder ein regelmäßiger Steuerungsbetrieb aufgenommen. Die unregelmäßige Tidesteuerung reichte nicht aus, um die Schwebstoffkonzentration nachhaltig zu senken. Erst mit Einsetzen der regelmäßigen Steuerung am Ende der Woche, bei der direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden, konnte die Schwebstoffwerte deutlich vermindert werden. In dieser Woche trugen die Zunahme der Tideintensität (Borkum) und das niedrige Oberwasser dazu bei, dass die Schwebstoffkonzentrationen auf hohem Niveau blieben.

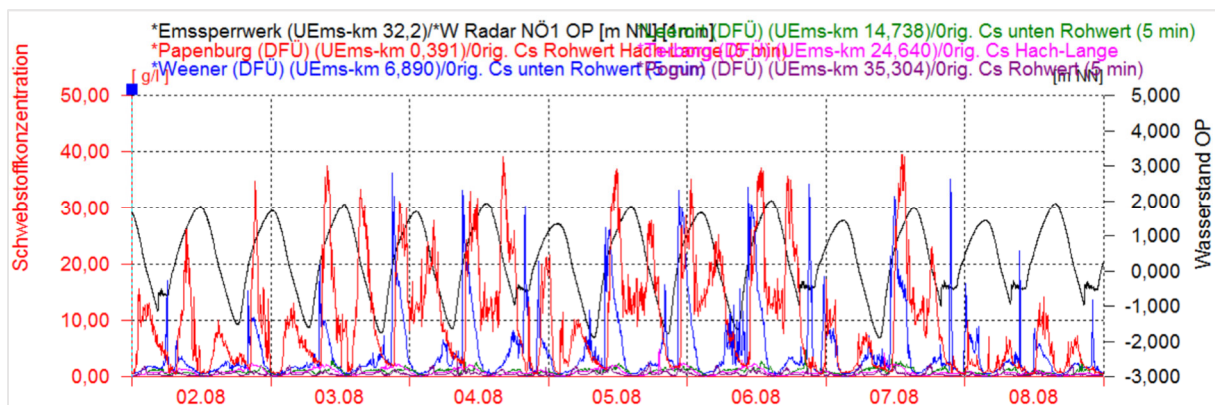


Abbildung 132: sechste Testwoche: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Das Oberwasser schwankte zwischen 18 und 22 m³/s; in der ersten Wochenhälfte waren Windstärken von 4 bis 6 Bft aus westlicher bis nordwestlicher Richtung vorhanden und in der zweiten Wochenhälfte kam der Wind aus östlicher Richtung und schwächte sich auf 2 bis 4 Bft ab. Die Tideintensität nahm, u.a. durch den astronomischen Einfluss (Vollmond am 02.08.), während der Woche deutlich zu (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Die Schwebstoff- und Flüssigschlickverhältnisse oberhalb von Weener resultierten womöglich nicht nur aus der geringeren Steuerungsintensität, sondern standen auch im Zusammenhang mit dem Einsatz der zwei Laderaumsaugbagger oberhalb von Weener. In Vorbereitung der für Ende August geplanten Schiffsüberführung war auch in dieser Woche eine hohe Baggerintensität vorhanden, bei der auf der Strecke Km 0 bis Km 4 täglich eine feste Laderaummenge von 10.000 bis 15.000 m³ bewegt wurde. Auch unterhalb von Km 20 erfolgte ein Baggereinsatz mit etwa 6.000 m³ Laderaummenge pro Tag, der sich aber anscheinend nicht in den relativ niedrigen Schwebstoff- und verhältnismäßig hohen Sauerstoffwerten widerspiegelte.

6.14.1.2.6 Die siebte Testwoche – Regelmäßige Tideniedrigwasseranhebung, starke Schwankung der Schwebstoffwerte, Beginn der Flutstromsteuerung

Bis zum 09.08. wurden über fünf direkt aufeinanderfolgende Tideniedrigwasseranhebungen die Schwebstoffwerte wieder auf ein niedriges Niveau gebracht. Zwischen dem 10. und 14.08. wurde dann jede zweite Tide gesteuert. In den ungesteuerten Tiden stiegen die Schwebstoffkonzentrationen jeweils sehr stark an. Die Anzahl von fünf aufeinanderfolgende Steuerungen hatte bei den vorherrschenden Randbedingungen offenbar nicht ausgereicht, um die Konzentrationen nachhaltig zu

senken. Somit wurde in den ungesteuerten Tiden sehr viel Feststoff mobilisiert, was insgesamt zu einer starken Schwankung der Schwebstoffwerte führte. Aber auch in den ungesteuerten Tiden wurden nicht die Verhältnisse erreicht, wie sie vor dem Technischen Test vorhanden waren.

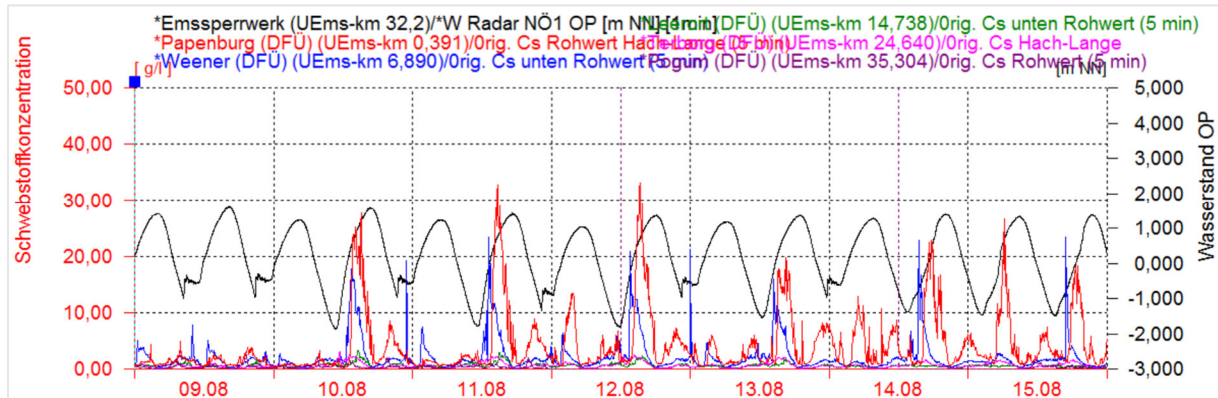


Abbildung 133: siebte Testwoche: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Das Oberwasser stieg von < 20 auf $25 \text{ m}^3/\text{s}$. In der ersten Wochenhälfte waren Windstärken von 4 bis 6 Bft aus östlicher Richtung vorhanden und in der zweiten Wochenhälfte schwächte sich dieser bei unsteter Richtung auf 2 bis 4 Bft ab. Die Tidehübe nahmen während der Woche durch die Windverhältnisse und durch den astronomischen Einfluss stark ab, so dass diese am 14. und 15.08. deutlich unterhalb des Mittelwertes lagen (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Der Baggereinsatz konzentrierte sich in dieser Woche mit wenigen Ausnahmen auf die Strecken Unterems-Km 0 bis 4 (tägliche Laderaummenge etwa 11.000 m^3) und unterhalb Km 31.

Mit der Abendtide des 14.08. begann die Phase der Flutstromsteuerungen. Diese wurden bis in die achte Testwoche hinein über insgesamt fünf Tiden ausgeführt. In der Morgentide des 16.08. wurde die Flutstromsteuerung ausgesetzt. Im Vergleich zu den Tideniedrigwasseranhebungen waren die Schwebstoffkonzentrationen bei den Flutstromsteuerungen während der Flut- und Ebbephase höher. Gegenüber unbeeinflussten Tiden waren die Konzentrationen allerdings niedriger. Die Anzahl von fünf Flutstromsteuerungen reichte nicht aus, um die Wirkung dieser Variante unter Beweis zu stellen. Es war jedoch zu beobachten, dass trotz Flutstromsteuerung die Schwebstoffkonzentrationen während der gesamten Tide relativ hoch waren.

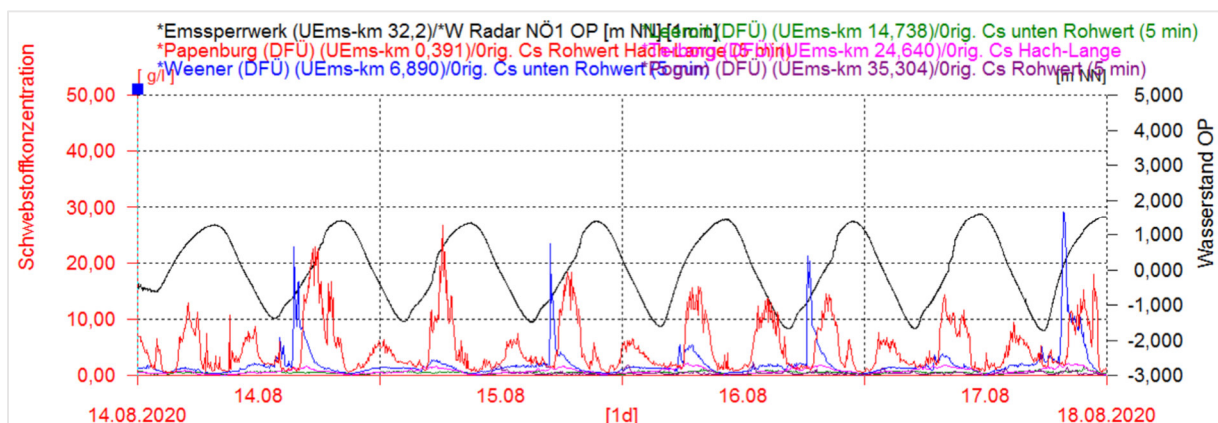


Abbildung 134: Ende der siebten und Anfang der achten Testwoche: Schwebstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum unter Einfluss der Flutstromsteuerung (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Nach der Flutstromsteuerung der Vormittagstide des 17.08. endete der Technische Test und es wurden keine weiteren Tidesteuerungen mehr ausgeführt. Über die nachfolgenden Tiden nahmen die Konzentrationen wieder sukzessive zu, so dass wieder die ursprünglichen Verhältnisse einkehrten.

Der Baggereinsatz fand auch in dieser Woche hauptsächlich auf die Strecke Unterems-Km 0 bis 4 statt, wo die tägliche Laderaummenge im Mittel bei 11.000 m³ lag.

Nach Beendigung der Flutstromtidesteuerung erfolgte der Baggereinsatz schwerpunktmäßig oberhalb von Unterems-Km 11 (Weekeborg), wobei im Mittel tägliche Laderaummenge von 12.000 m³ bewegt wurden.

6.14.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse (Messstationen Schwebstoff)

Die Schwebstoffverhältnisse wurden anhand der an den Messstationen aufgezeichneten Zeitreihen beurteilt, sowie auch die nach Flut- und Ebephassen getrennten Werte jeweils für sich. Dabei fanden die für jede Tidephase bestimmten Mittel- und Maximalwerte Verwendung.

Vom 29.06. bis zum 14.08. wurden 42 Tideniedrigwasseranhebungen durchgeführt. Anschließend folgten bis zum 17.08. fünf Flutstromsteuerungen. Während des mehrwöchigen Tests waren die beeinflussenden Faktoren in unterschiedlicher Ausprägung vertreten: Die Tidesteuerung wurde in verschiedener Intensität ausgeführt und sogar für unterschiedlich lange Zeiten ausgesetzt, zudem variierte die Tideintensität und das Oberwasser. Vom 20. bis zum 29.07. musste die Tidesteuerung für 17 Tiden unterbrochen werden, so dass die Schwebstoffkonzentrationen währenddessen wieder sukzessive anstiegen und nach dieser Pause in etwa wieder auf das hohe Niveau des Ausgangszustands zurückgekehrt waren.

Die Tideniedrigwasseranhebung führte in den Bereichen zur stärksten Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen, wo vor Testbeginn die höchsten Werte vorhanden waren. Die maximalen Schwebstoffkonzentrationen, die zumeist während der Flutphase auftraten, betrugen direkt vor Beginn des Tests bei Papenburg und Weener über 30 g/l, bei Leerort bis rd. 5 g/l, bei Terborg und Gandersum bis rd. 4 g/l, bei Pogum bis rd. 2 g/l, bei Emden bis rd. 1 g/l und bei Knock unter 0,5 g/l. Unter den gegebenen Randbedingungen fiel die absolute Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen oberhalb von Leerort am deutlichsten auf, so dass dort dem qualitativ beurteilenden Betrachter bereits nach wenigen Tidesteuerungen ungewohnt niedrige Schwebstoffkonzentration auffielen. Im Verhältnis zur Ausgangskonzentration wurden von Leerort bis Papenburg die maximalen Konzentrationen der Flut vor der mehrtägigen Unterbrechung insgesamt um mehr 80% und nach der Unterbrechung um insgesamt 60 bis 80% gesenkt. Aber auch in Pogum und Terborg nahmen die maximalen Werte um insgesamt 40 bis 60% ab. Der Einfluss der Tideniedrigwasseranhebung auf den Abschnitt zwischen Pogum und Knock ist anhand der Datenlage nicht sicher zu quantifizieren, denn die Wirkung nimmt zur Außenems hin ab und die Einflussnahme der natürlichen Randbedingungen, insbesondere des Windes, nimmt zu. Anhand der Zeitreihen ist aber ersichtlich, dass die Tideniedrigwasseranhebung auch dort zur Beruhigung der Transportprozesse führte, da in gesteuerten Tiden die Konzentrationen eher niedriger waren.

Die Tideniedrigwasseranhebung bewirkte neben der Abnahme der Schwebstoffwerte auch eine Änderung des Verhältnisses von Flut- zu Ebekonzentrationen. So führte diese oberhalb von Terborg, wo unter normalen Bedingungen die Flutkonzentrationen sehr viel höher sind als die Ebekonzentrationen, zur Verschiebung des Verhältnisses in Richtung eines Ausgleichs. Bei häufigerer Tideniedrigwasseranhebung kehrte sich das Verhältnis sogar um, so dass die Konzentrationen der Ebephase höher waren als die der Flutphase.

Im Vergleich zu den Tideniedrigwasseranhebungen waren die Schwebstoffkonzentrationen bei den Flutstromsteuerungen während der Flut- und Ebbephase höher. - Gegenüber unbeeinflussten Tiden waren die Konzentrationen allerdings niedriger. Die Anzahl von fünf Flutstromsteuerungen reichte nicht aus, um die Wirkung dieser Variante unter Beweis zu stellen. Es war jedoch zu beobachten, dass trotz Flutstromsteuerung die Schwebstoffkonzentrationen während der gesamten Tide relativ hoch waren.

Die Abbildung 135 zeigt die Abnahme der Schwebstoffgehalte in Folge der Tidesteuerung im Abschnitt von Gandersum bis Papenburg nochmal als Übersicht. Die Beobachtung der Schwebstoffkonzentrationen lässt die Schlussfolgerung zu, dass mit der Zunahme der Anzahl direkt aufeinander folgender Sperrungen auch die Schwebstoffkonzentrationen umso stärker abnahmen und damit auch eine nachhaltigere Wirkung einherging. Wenn nach einer Phase mit direkt aufeinander folgenden Sperrungen nur noch jede zweite Tide gesteuert wurde, dann stiegen die Schwebstoffwerte in den ungesteuerten Tiden zwar kurzzeitig wieder an, jedoch blieben diese deutlich unter den Werten, die gänzlich ohne Tidesteuerung zu erwarten wären. Insgesamt gingen daraus auch weiterhin relativ niedrig Schwebstoffwerte hervor. Deutlich wurde, dass jede Unterbrechung der Tidesteuerung wieder zur Zunahme der Schwebstoffgehalte führte. Je länger die Unterbrechung dauerte, desto höher stiegen auch wieder die Schwebstoffgehalte an.

Die Tideniedrigwasseranhebung wirkte vor und nach der mehrtägigen Unterbrechung unterschiedlich stark. Im Vergleich zur ersten Phase sanken die Schwebstoffgehalte nach der Unterbrechung nur zögerlich. Warum diese nicht so abnahmen wie zu Beginn des Tests, als auch bei hohem Schwebstoffniveau mit der Steuerung begonnen wurde, lag vermutlich daran, dass in der zweiten Phase ein niedrigeres Oberwasser und eine höhere Tideintensität herrschten und damit wesentlich ungünstigere Voraussetzungen boten. Gleichzeitig erfolgte nach der Unterbrechung nur eine unregelmäßige Steuerung, in der wiederum einige Tiden ausgelassen wurden. Hinzu kommt die deutliche Steigerung der Baggerintensität und die größere räumliche Ausdehnung der Baggermaßnahme zum Ende der Versuchsphase, womit möglicherweise ein Einfluss auf das Volumen der Flüssigschlickschicht und auf die Schwebstoffkonzentrationen genommen wurde. Die Entwicklung der Schwebstoffgehalte lässt sich durch die Intensität der Tidesteuerung und durch die astronomischen und witterungsbedingten Randbedingungen erklären. Die tatsächliche Einflussnahme der Baggerkampagne auf die Schwebstoffgehalte geht aus den Daten nicht hervor. Wäre nach der Steuerungspause zunächst jede Tide gesteuert worden, dann wäre auch unter den ungünstigeren Randbedingungen eine raschere Abnahme der Schwebstoffwerte eingetreten. - Bei anschließendem Übergang zu einer Steuerung jeder zweiten Tide, wäre anschließend voraussichtlich ein niedrigeres Niveau gehalten worden.

Im Leda-Jümme-Gebiet erfolgten, mit Ausnahme an der Messstation Leer/Leda am Ledasperrwerk, keine Schwebstoffmessungen. Die positive Entwicklung der Schwebstoffverhältnisse, d.h. die Abnahme der Konzentrationen, bei Leerort/Ems (s.o.) lassen sich auch auf die Station Leer/Leda übertragen. Im Weiteren sind die Randbedingungen wie folgt zu interpretieren: Die Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen ist an die Verringerung des Tidehubes gebunden. Aufgrund der frei auslaufenden Tide nimmt die Wirkung der Tidesteuerung mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung ab. Es ist anzunehmen, dass die Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen im Leda-Jümme-Gebiet zum einen auf den Rückgang des Eintrags aus Richtung Ems resultiert und zum anderen aus einer verstärkten Sedimentation. Da die Sedimentationsstärke von der Höhe der in Suspension befindlichen Feststoffmenge abhängt, ist davon auszugehen, dass diese im unteren Abschnitt der Leda am größten ist und mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung abnimmt. Vergleichbar mit den Vorgängen in der Ems, wird sich die Trübungszone der Leda und Jümme flussabwärts bewegt haben.

Ein vorrangiges Ziel der Tidesteuerung ist die Senkung der Schwebstoffgehalte der gesamten Tide. Diese Funktionalität konnte die Tideniedrigwasseranhebung in den zurückliegenden Testwochen unter Beweis stellen. Darüber hinaus wurde auch das Verhältnis der Flut- zu Ebbkonzentrationen günstig beeinflusst. Die Reaktionen waren trotz der Variation der natürlichen Randbedingungen eindeutig der Tideniedrigwasseranhebung zuzuordnen. Dagegen war die geringe Anzahl der Flutstromsteuerungen zum Ende des Technischen Tests nicht ausreichend, um vergleichbare Resultate zu liefern.

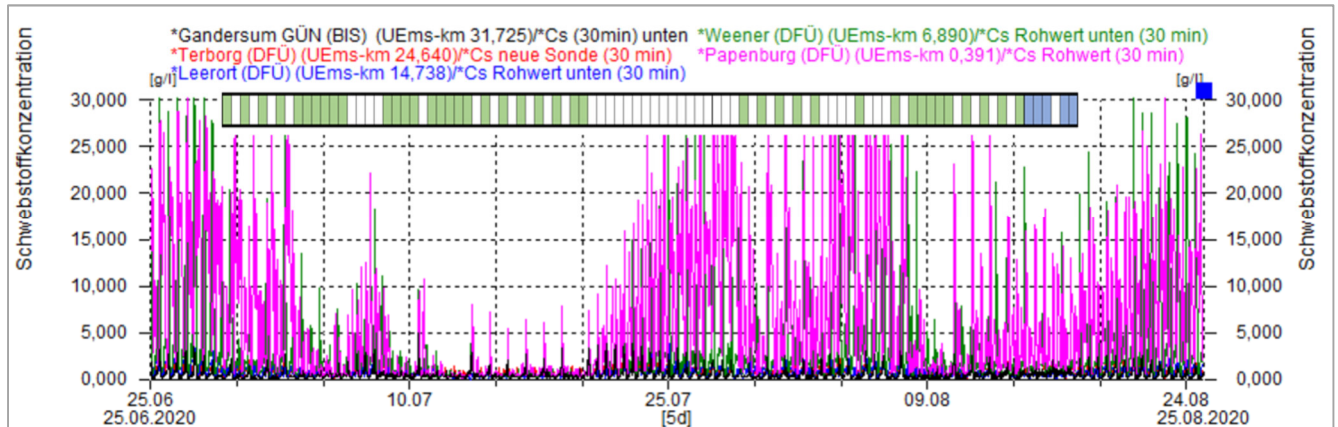


Abbildung 135: Schwebstoffkonzentrationen im Sohlbereich der Ems an den Messstationen Gandersum, Terborg, Leerort, Weener und Papenburg und Zeitschiene der Sperrwerkssteuerung. (Anmerkung zur Zeitschiene, grün: Tideniedrigwasseranhebung und blau: Flutsteuerung, weiß: keine Steuerung)

6.14.2 Zunahme der Sauerstoffgehalte durch die Tidesteuerung

6.14.2.1 Betrachtung der Monatsmittelwerte

Die Sauerstoffverhältnisse wurden anhand der an den Messstationen aufgezeichneten Zeitreihen beurteilt, sowie auch die nach Flut- und Ebbphasen getrennten Werte jeweils für sich. Dabei fanden die für jede Tidephase bestimmten Mittel- und Minimalwerte Verwendung.

Zu Beginn des Tests waren im Abschnitt Pogum bis Weener im Vergleich zu den Vorjahres-Verhältnissen höhere Sauerstoffgehalte vorhanden. Im Gegensatz dazu waren in Herbrum, Papenburg und Knock vor Beginn des Tests relativ niedrige Konzentrationen zu messen.

Tabelle 62: mittlere **Tiefstwerte** der Sauerstoffgehalte [mg/l] der Ems während und nach dem Technischen Test und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der minimalen Ebbe- Konzentration). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **blau**, Unterschreitungen **rot** und die neutralen Monate **grau** gekennzeichnet.

Station	Jun 2020	Jul 2020	Aug 2020 ¹⁾	Sep 2020	Okt 2020
Knock	6,1 (-0,2)	6,0 (+/-0)	5,6 (-0,5)	6,7 (+/-0)	7,8 (-0,1)
Pogum	5,6 (+0,9)	6,1 (+1,6)	5,9 (+1,4)	6,9 (+1,7)	8,2 (+1,5)
Terborg	4,3 (+1,7)	5,6 (+3,2)	4,6 (+1,9)	5,6 (+1,9)	7,3 (+1,7)
Leerort	2,7 (+1,0)	4,6 (+3,0)	3,3 (+1,5)	4,0 (+1,2)	5,7 (+0,8)
Weener	1,3 (+0,9)	2,9 (+2,3)	1,3 (+0,5)	2,0 (+0,1)	4,0 (-0,5)
Papenburg	0,2 (-0,3)	2,7 (+2,1)	0,7 (+/-0)	0,8 (-1,2)	3,2 (-1,4)
Herbrum/Heede ²⁾	7,8 (-0,5)	8,3 (+0,4)	7,8 (-0,1)	8,5 (-0,7)	9,8 (-0,9)

¹⁾ gesamter Monat; ²⁾ ohne Tideeinfluss

Die an den Messstationen erfassten Sauerstoffkonzentrationen nahmen durch die Tideniedrigwasseranhebung zu. Trotz der intermittierenden Tidesteuerung, in denen nur phasenweise direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden und auch Unterbrechungen von bis zu 17 Tiden vorkamen, war der Effekt insgesamt so deutlich, dass sich dieser im Juli in einer auffälligen Zunahme der Monatsmittelwerte im Abschnitt von Terborg bis Papenburg äußerte (Tabelle 62). Zum Teil war in diesem Abschnitt die Zunahme der Sauerstoffgehalte auch auf die Witterung zurückzuführen, doch stand die Wirkung der Tidesteuerung im Vordergrund. Die Zunahme unterhalb von Terborg ging zu einem größeren Teil auf die Witterungsverhältnisse zurück und der Anstieg in Herbrum/Heede hatte ihre Ursache allein in der Witterung. Die Anhebung der Sauerstoffkonzentrationen in der ersten Augushälfte, die auf die Tidesteuerungen in diesem Zeitraum zurückzuführen waren, führten rein rechnerisch dazu, dass auch die Mittelwerte des gesamten Monats von Pogum bis Weener gegenüber dem Referenzzustand leicht erhöht waren. Im September und Oktober nahmen die Konzentrationen aufgrund der sinkenden Wassertemperatur zu, gegenüber der Referenz waren diese zunächst im Abschnitt Pogum bis Weener und später von Pogum bis Leerort relativ hoch. Dieser Effekt ist vermutlich auf die besonderen Umstände zurückzuführen, die bereits vor dem Test zu relativ hohen Sauerstoffgehalten geführt hatten. Am oberen und unteren Rand der Unterems stellten sich nach dem Test zunehmend niedrigere Werte als im Referenzfall ein.

6.14.2.2 Zunahme der Sauerstoffgehalte – Betrachtung der Vorgänge innerhalb der Tide

Vor Testbeginn war ein eindeutiges Gefälle der Sauerstoffkonzentrationen zu beobachten, mit höheren Sauerstoffgehalten an der Knock und niedrigeren Werten bei Papenburg. Während der Flutphase bewegte sich sauerstoffreicherer Wasser Ems aufwärts und während der Ebbephase wieder Ems abwärts. Bis einschließlich der Station Weener wurden aus diesem Grund während der Flutphase steigende Sauerstoffkonzentrationen und in der Ebbephase wieder fallende Werte gemessen. Bei Papenburg verhielten sich die Sauerstoffkonzentrationen dazu gegenläufig. Dort nahmen die Konzentrationen während der Flutphase ab und während der Ebbephase wieder zu. Als Ursache dafür ist die oberhalb von Leerort zunehmende Flüssigschlickschicht und die hier höhere Schwebstoffkonzentration zu nennen. Die Zunahme der Sauerstoffkonzentration während der Ebbephase wurde durch das Vordringen sauerstoffreicheren Wassers aus Richtung Tidewehr Herbrum verursacht. Dieser Einfluss machte sich bis Weener bemerkbar, wo ebenfalls im Zeitraum um Ebbekenterung die Sauerstoffwerte kurzzeitig anstiegen. Aber auch bei Leerort war dieser Effekt

festzustellen, wobei hier jedoch hauptsächlich aus der Leda zufließendes sauerstoffreicheres Wasser dazu führte.

Zur Langzeitbetrachtung der Sauerstoffverhältnisse wurde u.a. der Sauerstofftiefstwert herangezogen (siehe Erläuterung der Gewässergüte-Randbedingungen). Da die Sonden im Sohlbereich installiert sind, ist eine zumindest zeitweise Beeinflussung durch die Flüssigschlickschicht an den Stationen Papenburg und Weener nicht ausgeschlossen, so dass bei starker Ausprägung, was hauptsächlich im Sommer der Fall ist, die Minimalwerte innerhalb der Tide 0 mg/l betragen können. In Papenburg tritt in den Sommermonaten in einer ungesteuerten Tide der Tiefstwert zumeist um Tidehochwasser ein, da dann die Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht am größten ist. Der Sauerstofftiefstwert entspricht dann sowohl dem Minimalwert der Flut als auch dem der Ebbe und damit dem der gesamten Tide. Die Tidesteuerung veränderte die Bewegungs- und Transportvorgänge des Wassers und der Feststoffe und führte letztlich dazu, dass sich an einer Station der zeitliche Verlauf der Sauerstoffwerte und auch dessen Niveau veränderte. Je nach Art und Intensität der Tidesteuerung und Ausprägung der hydrologischen Randbedingungen ergab sich ein charakteristischer Verlauf, so dass auch das Sauerstoffminimum zu unterschiedlichen Zeiten, z.T. auch zu Beginn der Flut eintreten konnte (siehe Abbildung 136 und Abbildung 137). Auch wenn die hydrologischen Randbedingungen (natürliche und Tidesteuerung) sich so verändern können, dass der Eintrittszeitpunkt der niedrigsten Konzentration verschoben wird, weichen die mittleren Minimalwerte der Tidephasen an jeder Position für sich betrachtet kaum voneinander ab.

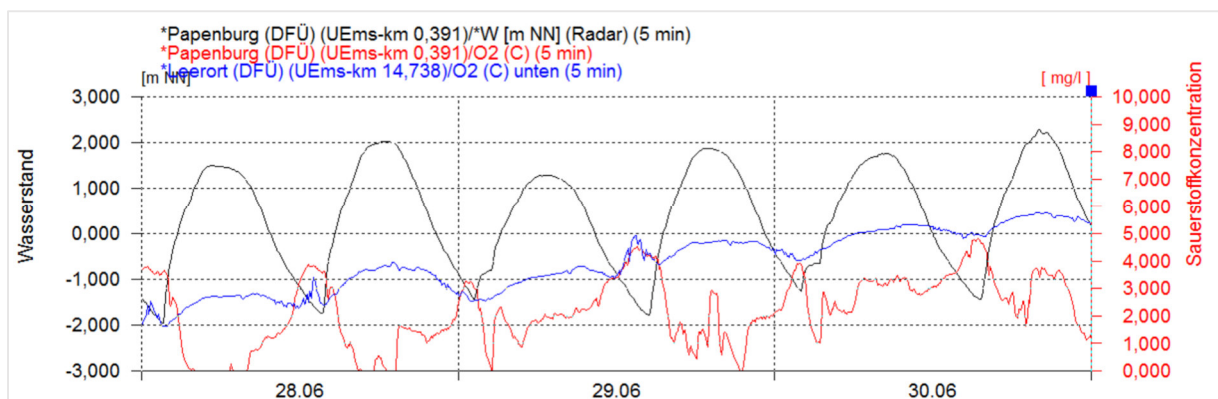


Abbildung 136: Ganglinie des Wasserstands und des Sauerstoffs während der Tide am Beispiel der Stationen Papenburg und Leerort vom 28. bis 30.06. Das Sauerstoffminimum kann um Tidehochwasser (ungesteuerte Tiden) und auch zu Beginn der Flut eintreten. Anmerkung: in den Nachttiden 28./29. und 29./30.06. wurde die Tideniedrigwasseranhebung ausgeführt.

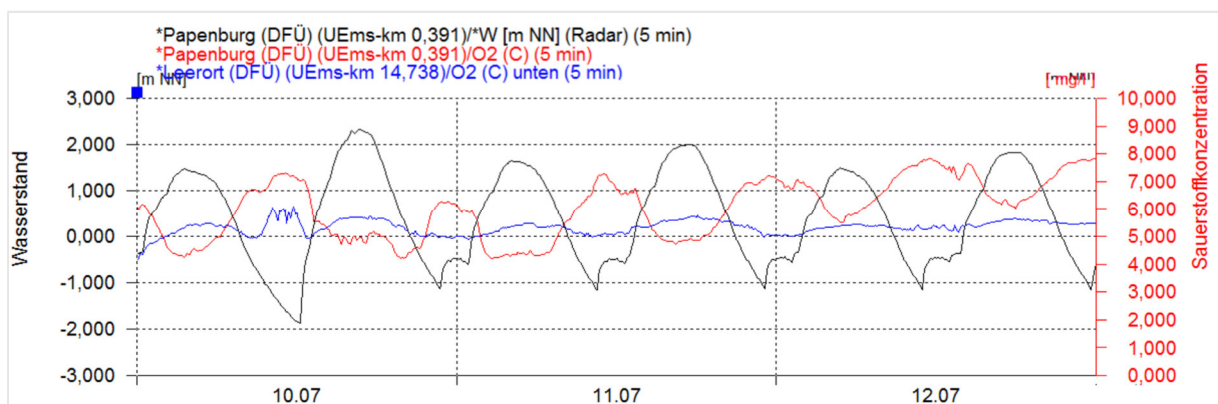


Abbildung 137: Ganglinie des Wasserstands und des Sauerstoffs während der Tide am Beispiel der Stationen Papenburg und Leerort vom 10. bis 12.07. Das Sauerstoffminimum trat zumeist um Tidehochwasser ein. Anmerkung: in der Tagtide des 10.07. fand keine Tideniedrigwasseranhebung statt, die nachfolgenden Tiden wurden durchgehend mit der Tideniedrigwasseranhebung gesteuert.

Die Sauerstoffverhältnisse der Unterems werden durch zahlreiche Randbedingungen beeinflusst, von denen in der nachfolgenden Beschreibung nur eine Auswahl den Sauerstoffwerten gegenübergestellt wird: die Höhe des Oberwasserzuflusses (stellvertretend für die Oberwasserhältnisse von Ems und Leda wird der Wert Versen genannt), die Wassertemperatur (genannt wird der an der Station Leer in der Leda an der Wasseroberfläche gemessene Wert), die Windverhältnisse (Messort Terborg), die Tidebedingungen und darüber auch die Schwebstoffverhältnisse. Zur Charakterisierung des von der Tidesteuerung unbeeinflussten Gezeitensignals wird der Tidehub bei Borkum betrachtet.

6.14.2.2.1 Eine Woche vor Testbeginn – niedrige Sauerstoffkonzentrationen

Die Schwankung der Sauerstoffkonzentrationen innerhalb der Tide war vor Testbeginn sehr stark. Dabei lagen z.B. bei Papenburg die Minimalwerte bei 0 mg/l (um Tidehochwasser) und die Maximalwerte zwischen 3 und 6 mg/l (um Tideniedrigwasser). In der Woche vor Testbeginn war an allen Stationen der Unterems ein abnehmender Trend der Sauerstoffwerte zu beobachten. Im Wesentlichen sind folgende Umstände als Ursache zu benennen: Durch die Abnahme des Oberwassers gelangte weniger sauerstoffreicherer Wasser in die Unterems. Gleichzeitig stieg die Wassertemperatur an und zusätzlich nahm auch die Intensität der Tide durch den Springeinfluss zu, wodurch mehr Feststoffe mobilisiert wurden und die Schwebstoffkonzentration größer wurde.

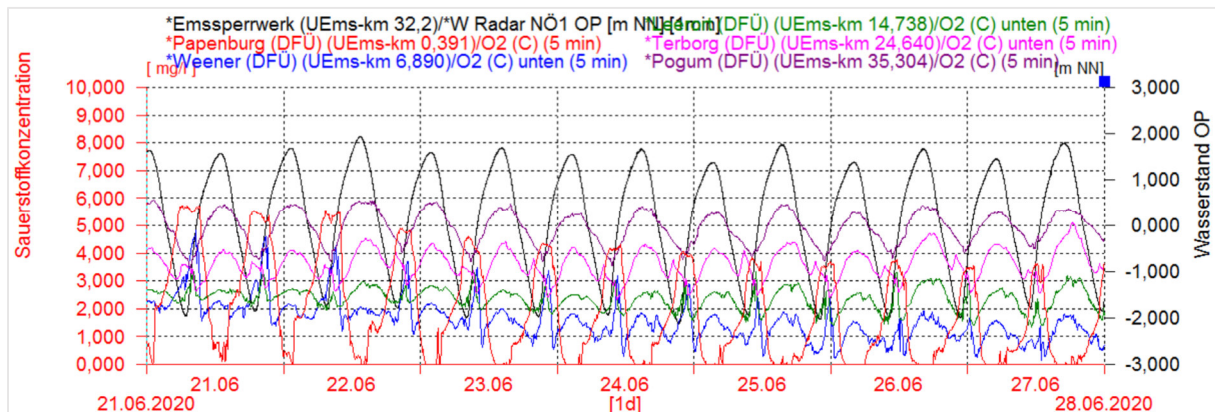


Abbildung 138: In der Woche vor Beginn des Technischen Test, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur stieg im Laufe dieser Woche von 21 auf 23 °C, das Oberwasser ging von 40 auf < 30 m³/s zurück und der Tidehub war aufgrund der Springphase (Neumond am 21.06.) erhöht. (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

6.14.2.2.2 Die erste Testwoche – Tideniedrigwasseranhebung in jeder zweiten Tide, Anstieg der Sauerstoffwerte und Überlagerung mehrerer Einflüsse

Vom 29.06. bis zum 02.07. wurde zunächst nur jede zweite Tide gesteuert. Die darüber ausgeübte Einflussnahme auf die Sauerstoffgehalte wurde durch das Auffrischen des Windes (bis 6 Bft) und einem daraus resultierenden Windstau der Tidewasserstände überlagert. Insgesamt ergab sich daraus ein Anstieg der Sauerstoffgehalte. Ab dem 03.07. wurde jede Tide gesteuert. Gleichzeitig sanken die Wassertemperatur und das Oberwasser nahm zu. Als Resultat dieser Kombination stiegen die Sauerstoffgehalte sehr deutlich an. In der zweiten Wochenhälfte nahm auch die Tideintensität deutlich zu (Bezug Borkum), woraus in vergleichbaren Situationen ohne Tidesteuerung eine Zunahme der Schwebstoffkonzentration und damit auch eine Abnahme der Sauerstoffgehalte, zumindest aber deren Stagnation zu beobachten gewesen wäre. In diesem Fall stiegen die Konzentrationen jedoch an, welches für eine positive Wirkung der Tidesteuerung spricht. Insbesondere bei Papenburg unterscheiden sich die Sauerstoffwerte gesteuerter und ungesteuerter Tiden um Tideniedrigwasser. Je länger die Ebbphase anhält, desto länger bzw. mehr gelangt sauerstoffreiches Wasser aus Richtung Herbrum in den oberen Abschnitt der Unterems. Somit sind in ungesteuerten Tiden die Sauerstoffgehalte um Tideniedrigwasser zunächst höher als in gesteuerten Fällen. Insgesamt wurde

jedoch das Sauerstoffniveau durch die Tidesteuerung angehoben, so dass sich nach einigen gesteuerten Tiden im betreffenden Abschnitt eine deutliche Verbesserung einstellte.

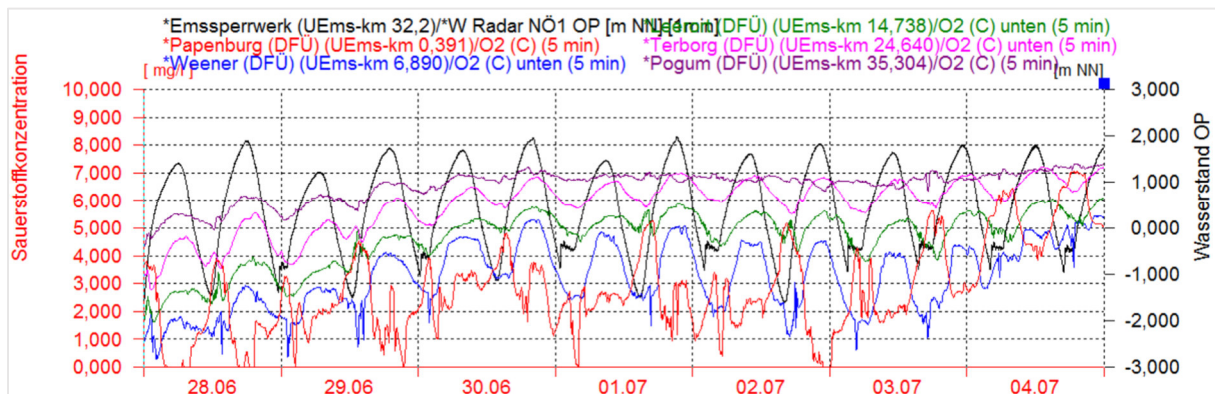


Abbildung 139: erste Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur sank im Laufe dieser Woche von 23 auf $< 20^{\circ}\text{C}$, das Oberwasser ging zunächst von 25 auf $20\text{ m}^3/\text{s}$ zurück und stieg dann wieder auf rd. $30\text{ m}^3/\text{s}$. Um den 30.06. war ein deutlicher Windstau vorhanden, der zu rel. niedrigen Tidehüben führte (Bezug Borkum). Insbesondere das ungesteuerte Tnw am 30.06. war durch Windeinfluss deutlich erhöht. (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

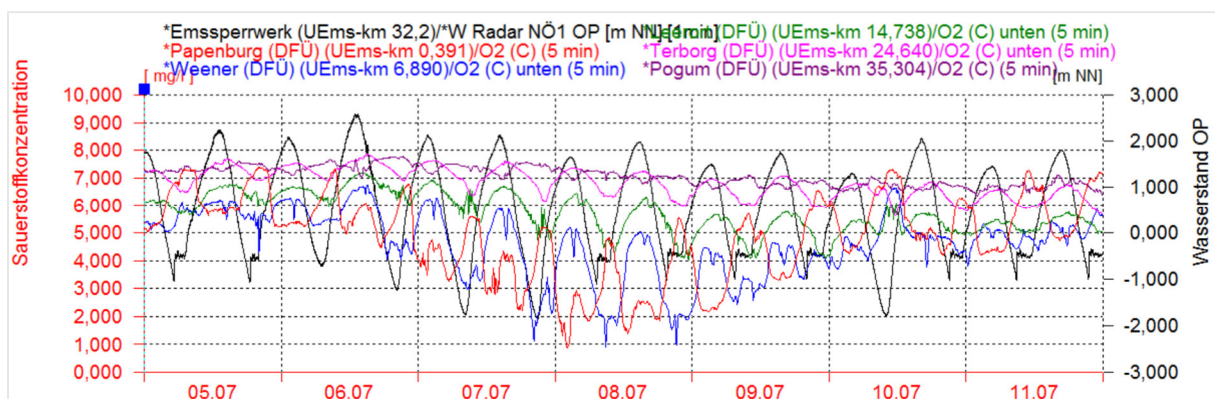


Abbildung 140: zweite Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur sank im Laufe dieser Woche von rd. 20 auf $< 18^{\circ}\text{C}$, das Oberwasser nahm zunächst von 30 auf $20\text{ m}^3/\text{s}$ ab, um dann in der zweiten Wochenhälfte wieder auf rd. $30\text{ m}^3/\text{s}$ anzusteigen; am 06.07. trat eine leichte Sturmflut mit stark erhöhtem Tnw (8 Bft) bzw. rel. niedrigem Tidehub ein, im Anschluss nahmen die Tidehübe im Mündungsbereich der Ems deutlich zu (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

6.14.2.2.3 Die dritte Testwoche – intermittierende Tideniedrigwasseranhebung, hohe Sauerstoffwerte

Bis zum 12.07. waren fünf direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert worden, so dass sich wieder außergewöhnlich hohe Sauerstoffkonzentrationen einstellten (siehe auch Anmerkungen zum Beginn der 2. Testwoche). Ab dem 13.07. wurde dann nur jedes zweite Tideniedrigwasser angehoben. Die Sauerstoffwerte aller Stationen zeigten während der restlichen Woche einen leicht abnehmenden Trend, wobei insgesamt eine rel. niedrige Schwankungsbreite vorhanden war. Es ist anzunehmen, dass die Tidesteuerung, trotz des geringen Oberwasserzuflusses, ein zügigeres Absinken der Sauerstoffwerte verhinderte. Dabei wirkte sich auch die moderate Tideintensität günstig aus, da dadurch entsprechend weniger Feststoffe mobilisiert wurden. Der leicht abnehmende Trend in der gesamten Unterems war vermutlich auf die Zunahme der Wassertemperatur zurückzuführen.

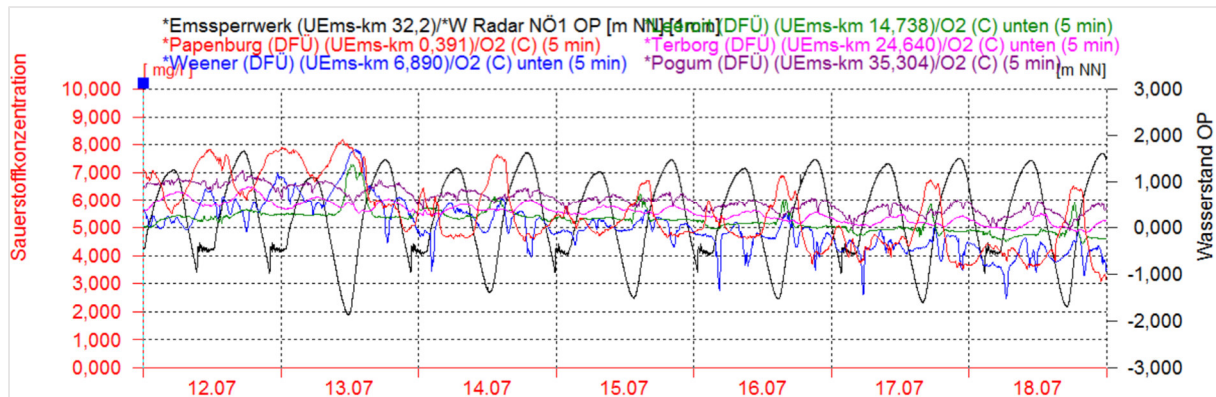


Abbildung 141: dritte Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur stieg im Laufe dieser Woche von rd. 18 auf rd. 20°C, das Oberwasser schwankte zwischen 15 und 30 m³/s; bei ruhigem Wetter (zumeist südliche bis östliche Winde mit 2 bis 4 Bft) war eine mittlere bis leicht erniedrigte Tideintensität vorhanden (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

6.14.2.2.4 Die vierte Testwoche – Beginn einer längeren Steuerungspause und Abnahme der Sauerstoffwerte

Nachdem am 19.07. noch zwei aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden, begann danach eine Unterbrechung der Tidesteuerung bis einschließlich dem 28.07. (17 Tiden). Das Ausbleiben der Tidesteuerung und die astronomisch und witterungsbedingte Zunahme der Tideintensität führten zu einer fortlaufenden Zunahme der Schwebstoffkonzentration, woraus im Gegenzug die Abnahme der Sauerstoffwerte folgte. Am stärksten und ehesten nahmen die Konzentrationen bei Papenburg ab, gefolgt von Weener, Leerort und Terborg. An der Station Pogum war die Unterbrechung der Steuerung kaum zu erkennen, hier stand die Einflussnahme der Witterung im Vordergrund.

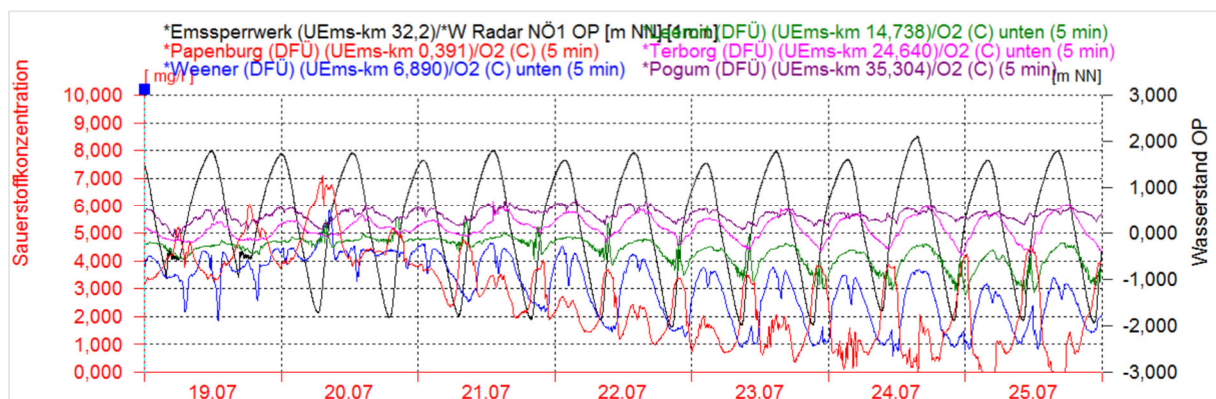


Abbildung 142: vierte Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur lag in dieser Woche zwischen 20 und 21°C, das Oberwasser schwankte zwischen 20 und 30 m³/s; zu Beginn der Woche nahmen die Tidehübe bei recht ruhigem Wetter zu (Springeinfluss, Neumond am 19.07.) und in der zweiten Wochenhälfte führte ein Auffrischen des Windes (bis 6 Bft) zu erhöhten Tidehüben. (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Im Zusammenhang mit der Verteilung der Sauerstoffkonzentrationen, die in Abhängigkeit der Mächtigkeit und Ausdehnung der Flüssigschlickschicht und der Verteilung der Schwebstoffkonzentrationen stehen, ist die Steigerung der Baggerintensität zu nennen, die in der betreffenden Woche oberhalb von Leerort deutlich gesteigert wurde. Bis zum 21.07. betrug auf diesem Abschnitt die feste Laderaummenge je Tag im Mittel rd. 6.000 m³, danach erfolgte eine Steigerung auf etwa 12.000 m³ pro Tag.

6.14.2.2.5 Die fünfte Testwoche – Fortsetzung der Tideniedrigwasseranhebung nach langer Unterbrechung, Stagnation der Sauerstoffwerte auf niedrigem Niveau

Die Unterbrechung der Tidesteuerung dauerte bis einschließlich dem 28.07. (17 Tiden). Bis dahin hatten sich in etwa wieder die vor dem Test vorhandenen Sauerstoffverhältnisse eingestellt, mit insgesamt einem starken Konzentrationsgefälle in Richtung Papenburg und hoher Schwankungsbreite innerhalb der Tide. Ab dem 29.07. wurde die Steuerung jeder zweiten Tide vorgenommen. Zeitgleich führten die Windbedingungen zu einer Phase erhöhter Tideniedrigwasser (niedrigere Tidehöhe bzw. geringerer Tideintensität, Bezug Borkum). Die Kombination aus Tidesteuerung, Wind- und Tideeinfluss führten am 29. und 30.07. zum Anstieg der Sauerstoffwerte. Allerdings wird die Tidesteuerung in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle gespielt haben, so dass die Zunahme hauptsächlich auf die natürlichen Randbedingungen zurückging. Ein vergleichbarer Fall war auch in der Woche nach Beendigung des Technischen Tests zu beobachten, denn am 26.08. führte eine leichte Sturmflut (NW 8 Bft, Windstau um Tideniedrigwasser > 1 m) ebenfalls zur deutlichen Zunahme der Sauerstoffgehalte, insbesondere in Papenburg und Weener.

In der zweiten Wochenhälfte nahmen die Sauerstoffwerte wieder ab und unterschieden sich nur unwesentlich von denen zu Wochenbeginn. Die Steuerung jeder zweiten Tide reichte bei zunehmender Tideintensität (windbedingt und beginnender Springeinfluss) nicht aus, die Schwebstoffkonzentration nachhaltig zu senken und damit die Sauerstoffgehalte ansteigen zu lassen.

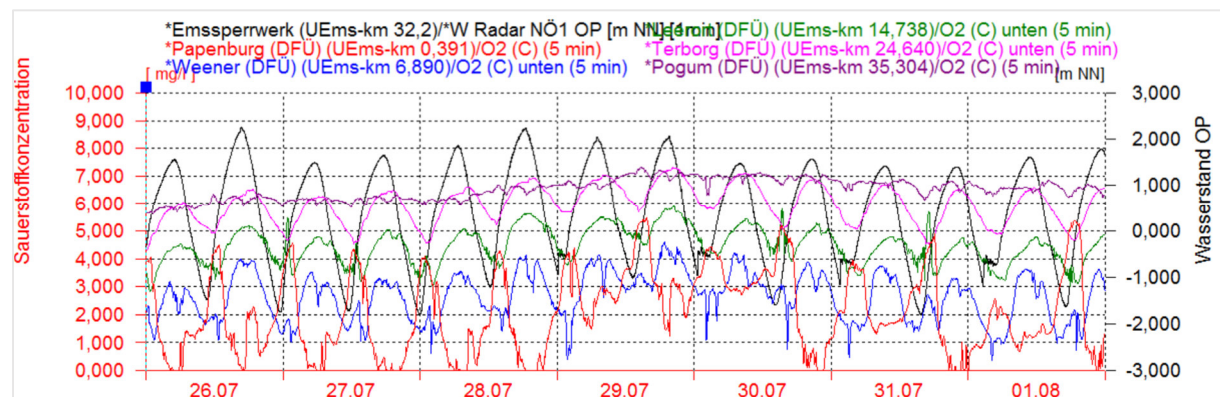


Abbildung 143: fünfte Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur lag in dieser Woche zwischen 20 und 21°C, das Oberwasser lag zumeist um 30 m³/s; zur Wochenmitte nahm die Windgeschwindigkeit zu (westliche Winde bis 6 Bft), woraus ein Windstau mit rel. niedrigen Tidehöhen hervorging, in der zweiten Wochenhälfte herrschte zunächst ruhiges Wetter (2 bis 4 Bft) und mittlere Tidehöhe und zum Ende der Woche frischte der Wind wieder auf (6 Bft) und führte zusammen mit dem Übergang zur Springphase (Vollmond 02.08.) zu einer erhöhten Tideintensität (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Die Sauerstoff-, Schwebstoff- und Flüssigschlickverhältnisse waren womöglich nicht nur Resultat der geringeren Steuerungsintensität und des astronomischen sowie witterungsbedingten Einflusses, sondern standen auch im Zusammenhang mit dem Einsatz von zwei Laderaumsaugbaggern oberhalb von Leerort und eines weiteren Baggers unterhalb von Unterems-Km 20 (Jemgum). In Vorbereitung der für Ende August geplanten Schiffsüberführung erreichte die Baggerintensität ab dieser Woche ihren Höhepunkt, wobei täglich eine feste Laderaummenge von insgesamt rd. 18.000 m³ bewegt wurde.

6.14.2.2.6 Die sechste Testwoche – Unregelmäßige Tideniedrigwasseranhebung, Stagnation der Sauerstoffwerte auf niedrigem Niveau

Vom 02. bis zum 04.08. wurden vier aufeinanderfolgende Tiden nicht gesteuert. Der Anstieg der Sauerstoffwerte während dieser Zeit ist hauptsächlich auf die natürlichen Randbedingungen

zurückzuführen. Auch im Abschnitt Knock bis Gandersum waren aus diesem Grunde recht hohe Sauerstoffgehalte zu verzeichnen. Diese machten sich bis weit in die Unterems hinein bemerkbar. Nachdem am 04.08. nur ein Tideniedrigwasser angehoben wurde blieben am 05. und 06.08. drei aufeinanderfolgende Tiden wieder ungesteuert. Erst am 07.08. wurde wieder ein regelmäßiger Steuerungsbetrieb aufgenommen. In dieser Woche zeigten die Sauerstoffgehalte von Knock bis Papenburg einen abnehmenden Trend, der auf die Zunahme der Tideintensität (Borkum), der damit einhergehenden höheren Schwebstoffkonzentration und dem Anstieg der Wassertemperatur im Zusammenhang steht. Zusätzlich war das Oberwasser auf niedrigem Niveau, so dass sich im Laufe der Woche niedrige Sauerstoffwerte einstellten. Die unregelmäßige Tidesteuerung reichte bei den geschilderten Randbedingungen nicht aus, um die Schwebstoffkonzentration nachhaltig zu senken und die Sauerstoffwerte anzuheben. Erst mit Einsetzen der regelmäßigen Steuerung am Ende der Woche, bei der direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden, konnte die Schwebstoffkonzentration deutlich gesenkt und damit auch die Sauerstoffwerte angehoben werden.

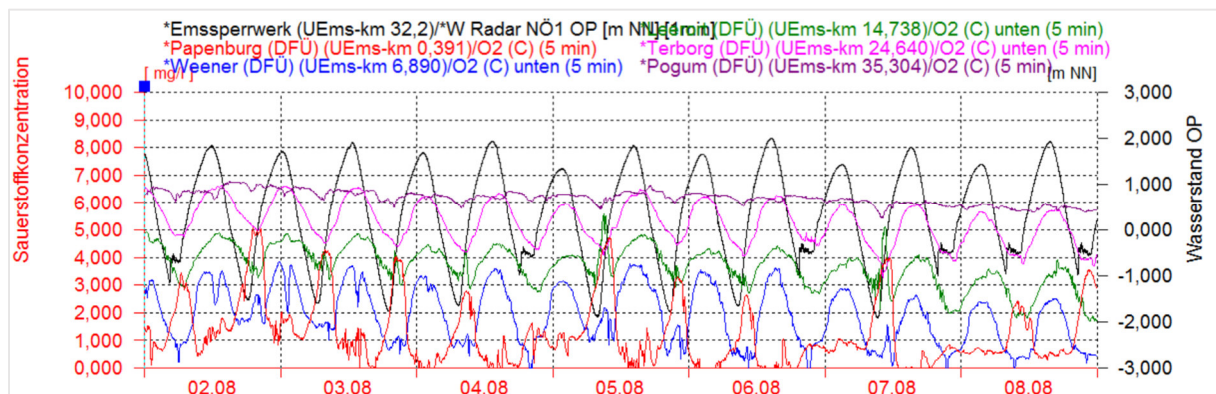


Abbildung 144: sechste Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur stieg im Laufe dieser Woche von 21 auf 22°C, das Oberwasser schwankte zwischen 18 und 22 m³/s; in der ersten Wochenhälfte waren Windstärken von 4 bis 6 Bft aus westlicher bis nordwestlicher Richtung vorhanden und in der zweiten Wochenhälfte kam der Wind aus östlicher Richtung und schwächte sich auf 2 bis 4 Bft ab. Die Tideintensität nahm, u. a. durch den astronomischen Einfluss (Vollmond am 02.08.), während der Woche deutlich zu (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Die Sauerstoffverhältnisse oberhalb von Weener, die im Zusammenhang mit der Verteilung der Schwebstoffkonzentrationen und des Flüssigschlicks standen, resultierten womöglich nicht nur aus der geringeren Steuerungsintensität, sondern waren möglicherweise auch beeinflusst durch den Einsatz der zwei Laderaumsaugbagger oberhalb von Weener. In Vorbereitung der für Ende August geplanten Schiffsüberführung war auch in dieser Woche eine hohe Baggerintensität vorhanden, bei der auf der Strecke Km 0 bis Km 4 täglich eine feste Laderaummenge von 10.000 bis 15.000 m³ bewegt wurde. Auch unterhalb von Km 20 erfolgte ein Baggereinsatz mit etwa 6.000 m³ Laderaummenge pro Tag, der sich aber anscheinend nicht in den relativ niedrigen Schwebstoff- und verhältnismäßig hohen Sauerstoffwerten widerspiegelt.

6.14.2.2.7 Die siebte Testwoche – Regelmäßige Tideniedrigwasseranhebung, Halten der Sauerstoffwerte auf erhöhtem Niveau, Beginn der Flutstromsteuerung

Die direkte Folge von fünf Tidesteuerungen hatte bis zum 09.08. zu einer deutlichen Reduzierung der Schwebstoffgehalte und darüber zu einer starken Zunahme der Sauerstoffwerte geführt. Die Tidesteuerung hatte trotz der bis dahin vorherrschenden erhöhten Tideintensität, des niedrigen Oberwassers und der hohen Wassertemperatur eine stetige Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen bewirkt. Vom 09. bis 14.08. wurde dann nur noch jedes zweite Tideniedrigwasser angehoben. Die reduzierte Steuerungsintensität äußerte sich in einer Zunahme der Schwebstoffgehalte und führte darüber zur Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen, die allerdings deutlich über dem tiefen Niveau

der Vorwoche blieben und durch die kontinuierliche Steuerung bis zum Ende der Woche auf dieser Höhe gehalten werden konnten. Die Intensität der Tide (Borkum) nahm in dieser Woche aufgrund des astronomischen Einflusses und durch die Windverhältnisse ab, was sicherlich dazu beitrug, dass weniger Feststoffe remobilisiert wurden. Andererseits hätte das niedrige Oberwasser ohne Tidesteuerung zu einer Erhöhung der Schwebstoffkonzentration geführt, die dann zusammen mit der sehr hohen Wassertemperatur (25°C) eine entsprechende Abnahme der Sauerstoffgehalte zur Folge gehabt hätte. Es ist also anzunehmen, dass die Anhebung jeden zweiten Tideniedrigwassers unter den vorherrschenden Randbedingungen ausreichte, das erhöhte Sauerstoffniveau bis zum Ende der Woche zu halten.

In der Nacht vom 13. auf den 14.08. endete der Test der Tideniedrigwasseranhebung und in den folgenden Tiden wurde bis in die nachfolgende Woche hinein die Flutstromsteuerung ausgeführt (siehe dazu die Beschreibung zur achten Testwoche).

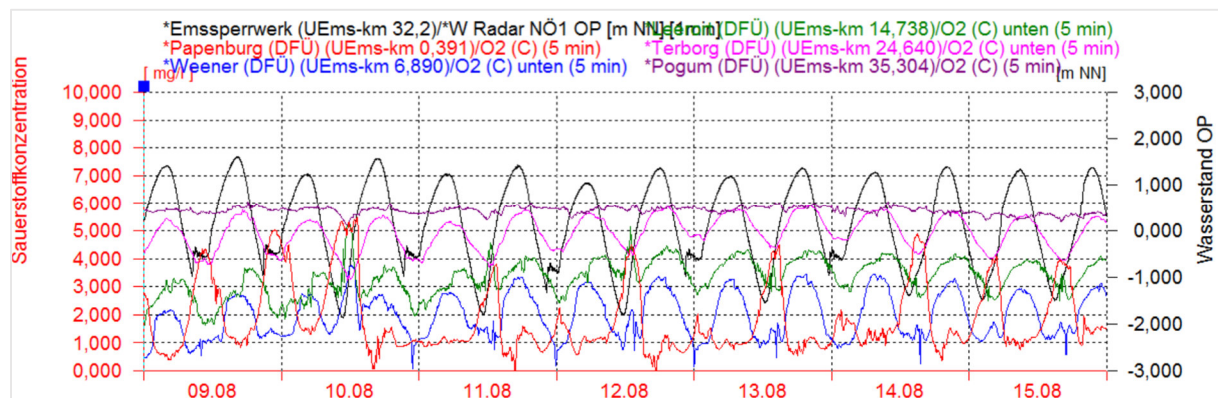


Abbildung 145: siebte Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur stieg im Laufe dieser Woche von 22 auf rd. 25°C, das Oberwasser stieg von < 20 auf 25 m³/s. In der ersten Wochenhälfte waren Windstärken von 4 bis 6 Bft aus östlicher Richtung vorhanden und in der zweiten Wochenhälfte schwächte sich dieser bei unsteter Richtung auf 2 bis 4 Bft ab. Die Tidehübe nahmen während der Woche durch die Windverhältnisse und durch den astronomischen Einfluss stark ab, so dass diese am 14. und 15.08. deutlich unterhalb des Mittelwertes lagen (Bezug Borkum). (Schwarz: Wasserstand Emssperwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Der Baggereinsatz konzentrierte sich in dieser Woche mit wenigen Ausnahmen auf die Strecken Unterems-Km 0 bis 4 (tägliche Laderaummenge etwa 11.000 m³) und unterhalb Km 31.

6.14.2.2.8 Die achte Testwoche – Flutstromsteuerung, Ende des Technischen Tests und Nachlauf

Die Flutstromsteuerung löste in der siebten Testwoche die Tideniedrigwasseranhebung ab. Beginnend mit der Abendtide des 14.08. wurde diese bis zur ersten Tide des 17.08. mit nur einer Unterbrechung (Morgentide des 16.08.) ausgeführt. Insgesamt wurden somit fünf Flutstromsteuerungen getestet. Während dieser Zeit änderten sich die Sauerstoffverhältnisse kaum, so dass das Niveau, welches zum Ende der Tideniedrigwasseranhebung vorhanden war, gehalten wurde. Dabei wird sich die niedrige Tideintensität, die bereits zum Ende der Vorwoche vorhanden war, günstig ausgewirkt haben.

Der Wechsel der Tidesteuerungsvarianten zum Ende der siebten und Anfang der achten Testwoche ermöglicht einen Vergleich der jeweiligen Auswirkungen auf die Sauerstoffverhältnisse. Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass lediglich fünf Flutstromsteuerungen ausgeführt wurden und es zudem eine Unterbrechung dieser Testphase gab. Die Anzahl der Steuerungen reichte nicht aus, um die Wirkung dieser Variante unter Beweis zu stellen. Es war jedoch zu beobachten, dass trotz Flutstromsteuerung die Schwebstoffkonzentrationen während der gesamten Tide relativ hoch waren.

Bei der Flutstromsteuerung blieben die Ebbedauer und die Höhe des Tideniedrigwassers nahezu unbeeinflusst. Dieses hatte zur Folge, dass bei Ebbe mehr sauerstoffreicher Wasser aus Richtung Herbrum in den oberen Abschnitt der Unterems gelangte und dort die Sauerstoffwerte um Tideniedrigwasser in etwa so anstiegen, wie es vorher auch bei ungesteuerten Tiden zu beobachten war. Im Unterschied dazu wiesen die Sauerstoffgehalte bei der Tideniedrigwasseranhebung im

gleichen Zeitfenster der Tide keinen vergleichbaren Anstieg. Maßgebend für die Wirksamkeit der Tidesteuerung ist die Anhebung der Sauerstoffgehalte der gesamten Tide, d.h. es sollte ein höherer Mittelwert erreicht sowie die bisherigen Tiefstwerte vermieden werden. Diese Funktionalität konnte die Tideniedrigwasseranhebung in den zurückliegenden Testwochen unter Beweis stellen. Dagegen war die geringe Anzahl der Flutstromsteuerungen nicht ausreichend, um vergleichbare Resultate zu liefern.

Nach Beendigung der Tidesteuerung nahmen die Sauerstoffgehalte ab. Dabei war eine abrupte Verschlechterung bei Papenburg nach der ersten ungesteuerten Tide zu beobachten und auch ein abnehmender Trend an allen Stationen der Unterems während der nachfolgenden Tage. Die Schwebstoffkonzentrationen stiegen Tide für Tide wieder an, forciert durch die astronomisch bedingte Zunahme der Tideintensität (Neumond am 19.08.). Die Windverhältnisse des 21. und 22.08. sorgten wieder für eine leichte Zunahme der Sauerstoffwerte, insbesondere im unteren Abschnitt der Unterems.

Ausblick in die Woche nach dem 22.08.: Am 26.08. ereignete sich eine leichte Sturmflut (8 Bft aus Nordwest, Windstau um Tideniedrigwasser > 1 m und stark erniedrigte Tidehübe). Die Sauerstoffkonzentrationen stiegen in Folge der Sturmflut besonders in Papenburg und Weener an, vergleichbar mit der Sturmflut am 29./30.07. (siehe Beschreibung zur fünften Testwoche).

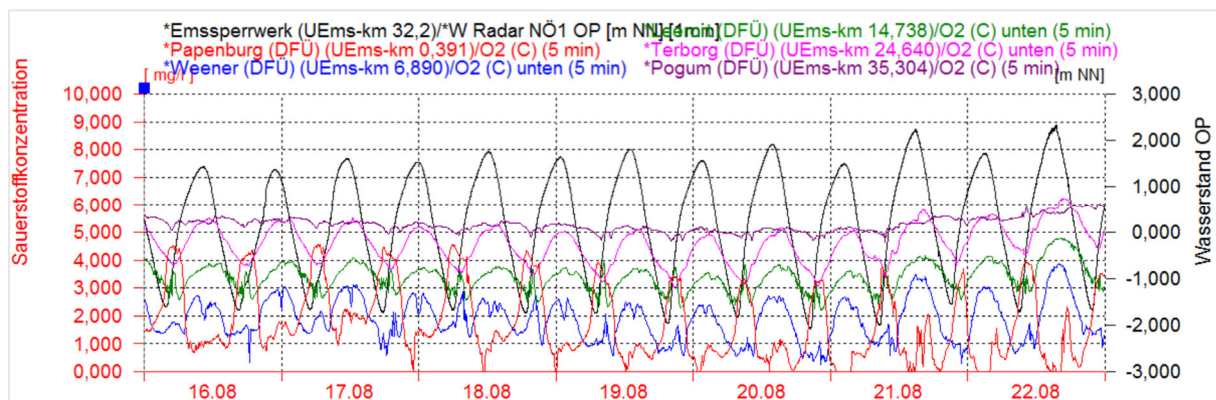


Abbildung 146: achte Woche des Technischen Tests, Sauerstoffverhältnisse in der Unterems von Papenburg bis Pogum. Die Wassertemperatur ging im Laufe dieser Woche von 25 auf 23°C zurück, das Oberwasser stieg von 25 m³/s bis zur Wochenmitte kurzzeitig auf 33 m³/s und nahm dann wieder zum Ende der Woche auf 21 m³/s ab. In der ersten Wochenhälfte waren Windstärken von 2 bis 4 Bft aus zunächst östlicher und dann südlicher Richtung vorhanden und in der zweiten Wochenhälfte frische dieser auf 4 bis 6 Bft aus südwestlicher bis westlicher Richtung auf. Die Tidehübe des 16.08. lagen noch deutlich unterhalb des Mittelwertes, am 17.08. waren schon mittlere Verhältnisse vorhanden und an den anschließenden Tagen waren diese zunehmend erhöht. Dazu trug einerseits der astronomische Einfluss (Neumond am 19.08.) sowie auch die Windverhältnisse bei. (Schwarz: Wasserstand Emssperrwerk-Oberpegel, Sauerstoffgehalte in Papenburg/Rot, Weener/Blau, Leerort/Grün, Terborg/Magenta und Pogum/Lila).

Der Baggereinsatz fand auch in dieser Woche hauptsächlich auf der Strecke Unterems-Km 0 bis 4 statt, wo die tägliche Laderaummenge im Mittel bei 11.000 m³ lag.

Nach Beendigung der Flutstromtidesteuerung erfolgte der Baggereinsatz schwerpunktmäßig oberhalb von Unterems-Km 11 (Weekeborg), wobei im Mittel tägliche Laderaummen von 12.000 m³ bewegt wurden.

6.14.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse (Messstationen Sauerstoff)

Die Sauerstoffverhältnisse wurden anhand der an den Messstationen aufgezeichneten Zeitreihen beurteilt, sowie auch die nach Flut- und Ebephase getrennten Werte jeweils für sich. Dabei fanden die für jede Tidephase bestimmten Mittel-, Maximal- und Minimalwerte Verwendung.

Vor Beginn des Tests schwankten die Sauerstoffgehalte während der Tide bei Papenburg zwischen 0 und 4 mg/l, bei Gandersum zwischen 3 und 5 mg/l und bei Knock zwischen 5 und > 6 mg/l. Mit Einsetzen der Tideniedrigwasseranhebung, die zunächst nur in jeder zweiten Tide stattfand, wurde das Sauerstoffniveau oberhalb von Gandersum insgesamt deutlich angehoben. Dabei äußerte sich die positive Wirkung am deutlichsten im oberen Abschnitt der Unterems, wo vor dem Test besonders niedrige Sauerstoffkonzentrationen vorhanden waren. Die Betrachtung der Monatsmittelwerte lässt aber auch auf eine Verbesserung der Sauerstoffsituation im Abschnitt Gandersum bis Knock schließen.

In der ersten Woche des Technischen Tests waren in dem gesamten Ems Sauerstoffgehalte zwischen 6 und 8 mg/l vorhanden. Da selbst die Sauerstoffminima in diesem Wertebereich lagen, stellte dieses gegenüber dem Ausgangszustand eine sehr deutliche Verbesserung dar. Die hohen Sauerstoffkonzentrationen waren sogar als untypisch für die sonst sehr niedrigen Werte des Sommers zu bezeichnen und traten in vergleichbarer Art bisher nur bei außergewöhnlichen Randbedingungen auf, wie z.B. unter Einfluss eines hohen Oberwasserzuflusses und niedrigen Wassertemperaturen.

Wie bereits für die Schwebstoffgehalte beschrieben, schienen auch die Sauerstoffverhältnisse von einer längeren Dauer direkt aufeinander folgender Tideniedrigwasseranhebungen zu profitieren. Wurde im Anschluss dieser Phase nur jede zweite Tide gesteuert, nahmen die Konzentrationen zwar wieder ab, jedoch erreichten sie nicht das Niveau unbeeinflusster Tiden. Erst mit längerem Aussetzen der Steuerung gingen die Sauerstoffwerte wieder auf das ursprüngliche Niveau zurück. Nachdem die Tideniedrigwasseranhebung für 17 Tiden unterbrochen worden war, stiegen die Sauerstoffgehalte mit der Wiederaufnahme des Steuerungsbetriebs nur zögerlich. Die Tideniedrigwasseranhebung bewirkte allerdings auch nach der Unterbrechung eine Zunahme des gesamten Sauerstoffniveaus, so auch der Sauerstoffminima, die gegenüber dem Ausgangszustand deutlich anstiegen: im Zeitraum vor der mehrtägigen Unterbrechung im Mittel um 2 bis 4 mg/l und im Testzeitraum nach der Unterbrechung im Mittel um bis zu 2 mg/l. Es ist darauf hinzuweisen, dass in einzelnen Tiden die Zunahmen weitaus größer waren als im Mittel. Dieses wird auch durch den o.g. Wertebereich der ersten Testwoche verdeutlicht, als bei Papenburg die Sauerstoffminima um fast 6 mg/l zunahmen. Warum nach der mehrtägigen Unterbrechung die Sauerstoffwerte nicht so deutlich anstiegen wie zu Beginn des Tests, als auch bei niedrigem Sauerstoffniveau mit der Steuerung begonnen wurde, lag vermutlich daran, dass im späteren Fall eine höhere Wassertemperatur, ein niedrigeres Oberwasser und eine höhere Tideintensität herrschten und damit wesentlich ungünstigere Voraussetzungen boten. Gleichzeitig erfolgte nach der Unterbrechung nur eine unregelmäßige Steuerung, in der wiederum einige Tiden ausgelassen wurden. Hinzu kommt die deutliche Steigerung der Baggerintensität und die größere räumliche Ausdehnung der Baggermaßnahme zum Ende der Versuchsphase, womit möglicherweise ein Einfluss auf das Volumen der Flüssigschlickschicht und auf die Schwebstoffkonzentrationen, und darüber auch auf die Sauerstoffgehalte genommen wurde. Die Entwicklung der Sauerstoffgehalte lässt sich durch die Intensität der Tidesteuerung und durch die astronomischen und witterungsbedingten Randbedingungen erklären. Die tatsächliche Einflussnahme der Baggerkampagne auf die Sauerstoffgehalte geht aus den Daten nicht hervor. Wäre nach der Unterbrechung zunächst jedes Tideniedrigwasser angehoben worden, dann wäre auch unter den ungünstigeren Randbedingungen eine raschere Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse eingetreten. Bei anschließendem Übergang zu einer Anhebung jedes zweiten Tideniedrigwassers wäre anschließend vermutlich das höhere Sauerstoffniveau zu halten gewesen.

Während des mehrwöchigen Tests waren die beeinflussenden Faktoren in unterschiedlicher Ausprägung vertreten: Die Tidesteuerung wurde in verschiedener Intensität ausgeführt und sogar für unterschiedlich lange Zeiten ausgesetzt, zudem variierte die Tideintensität und damit die Schwebstoffkonzentration, die Wassertemperatur und das Oberwasser. Unter den gegebenen Randbedingungen führte die Tidesteuerung am deutlichsten oberhalb von Terborg zu einer Anhebung

der Sauerstoffkonzentrationen. Die in Abbildung 147 dargestellte Übersicht zeigt die Schwankung der Sauerstoffgehalte im Bereich von Gandersum (oberer Rand), die im Wesentlichen auf die Variation der Tide- und Witterungsverhältnisse zurückzuführen ist sowie die Änderung der Sauerstoffwerte bei Papenburg (unterer Rand), welche im Wesentlichen der Tidesteuerung zugeordnet werden kann. Der Test hat auch verdeutlicht, dass die Sauerstoffgehalte in vergleichbarem Maß zunehmen, wenn das Tideniedrigwasser windbedingt erhöht und der Tidehub darüber verkleinert wird.

Im Leda-Jümme-Gebiet erfolgten, mit Ausnahme an der Messstation Leer/Leda am Ledasperwerk, keine Sauerstoffmessungen. Die positive Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse, d.h. die Zunahme der Konzentrationen, bei Leerort/Ems (s.o.) lassen sich auch auf die Station Leer/Leda übertragen. Im Weiteren sind die Randbedingungen wie folgt zu interpretieren: Die Sauerstoffkonzentrationen sind stark von den Schwebstoffgehalten abhängig. Da davon auszugehen ist, dass die Schwebstoffkonzentrationen in Leda und Jümme durch die Tidesteuerung abnahmen, wird dieses zu einer Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen geführt haben. Die Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen ist an die Verringerung des Tidehubes gebunden. Aufgrund der frei auslaufenden Tide nimmt die Wirkung der Tidesteuerung mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung ab. Es ist anzunehmen, dass die Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen im Leda-Jümme-Gebiet zum einen auf den Rückgang des Eintrags aus Richtung Ems resultiert und zum anderen aus einer verstärkten Sedimentation. Da die Sedimentationsstärke von der Höhe der in Suspension befindlichen Feststoffmenge abhängt, ist davon auszugehen, dass diese im unteren Abschnitt der Leda am größten war und mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung abnahm. Die Sauerstoffkonzentrationen werden daher in den Unterläufen von Leda und Jümme am deutlichsten durch die Tidesteuerung angestiegen sein.

Maßgebend für die Wirksamkeit der Tidesteuerung ist die Anhebung der Sauerstoffgehalte der gesamten Tide, d.h. es sollte ein höherer Mittelwert erreicht sowie die bisherigen Tiefstwerte vermieden werden. Diese Funktionalität konnte die Tideniedrigwasseranhebung in den zurückliegenden Testwochen unter Beweis stellen. Die Reaktionen waren trotz der Variation der natürlichen Randbedingungen der Tideniedrigwasseranhebung zuzuordnen. Dagegen war die geringe Anzahl der Flutstromsteuerungen zum Ende des Technischen Tests nicht ausreichend, um vergleichbare Resultate zu liefern.

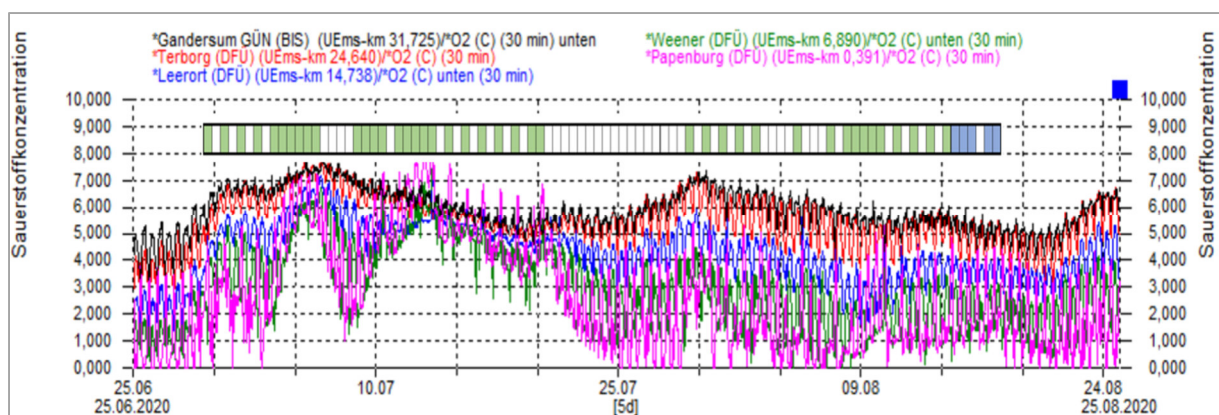


Abbildung 147: Sauerstoffkonzentrationen im Sohlbereich der Ems an den Messstationen Gandersum, Terborg, Leerort, Weener und Papenburg und Zeitachse der Sperrwerkssteuerung. (Anmerkung zur Zeitschiene, grün: Tideniedrigwasseranhebung und blau: Flutsteuerung, weiß: keine Steuerung)

6.14.3 Abnahme der Salzgehalte durch die Tidesteuerung

Zur Charakterisierung der Salzgehaltsverhältnisse standen die an den Messstationen aufgezeichneten Zeitreihen zur Verfügung. Zudem wurden die Werte nach Flut- und Ebbephasen getrennt betrachtet. Zur Beurteilung der Auswirkung der Tidesteuerung auf den Salzgehalt fanden die Maximalwerte der Tide, die zum Kenterpunkt der Flut eintreten, Verwendung.

Nach Abklingen der Oberwasserwelle im März 2020 blieben anschließend die Salzgehalte oberhalb von Terborg relativ niedrig. Im Vergleich zu den Verhältnissen der Vorjahre waren hier höhere Salzgehalte zu erwarten. Hingegen waren unterhalb von Terborg relativ hohe Salzgehalte zu beobachten.

Die an den Messstationen erfassten Salzgehaltswerte nahmen durch die Tideniedrigwasseranhebung ab. Trotz der intermittierenden Tidesteuerung, in denen nur phasenweise direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden und auch Unterbrechungen von bis zu 17 Tiden vorkamen, war der Effekt insgesamt so deutlich, dass sich dieser im Juli in einer auffälligen Abnahme der Monatsmittelwerte im Abschnitt von Terborg bis Leerort und auch in der unteren Leda (Messstation Leer) äußerte (Tabelle 62 und Tabelle 63). Da oberhalb von Leerort bereits vor Testbeginn relativ niedrige Salzgehalte vorhanden waren, trat dort die absolute Abnahme nicht ganz so deutlich in Erscheinung. Im Verhältnis zum langjährigen Mittelwert war aber auch die Abnahme in Weener signifikant. Auch das über das Tidewehr Herbrum kommende Wasser hatte bereits vor dem Technischen Test einen niedrigeren Salzgehalt als im langjährigen Mittel. Auffallend waren hier die relativ niedrigen Werte im Juli. Dieses war jedoch vollkommen unabhängig von der Tidesteuerung und ist wahrscheinlich auf den Stopp der Einleitung stark chloridhaltigen Grubenwassers (Ibbenbüren) Anfang Juni 2020 zurückzuführen. In Papenburg wirkten vermutlich beide Faktoren zusammen: die Reduzierung des Salzgehaltes im Oberwasser und die Abnahme des Salzgehaltes durch die Tidesteuerung. So wurden an dieser Stelle auch im Juli relativ niedrige Salzgehalte festgestellt. Die Monatsmittelwerte des Augusts entsprachen von Leerort bis Papenburg wieder in etwa dem Niveau vor dem Test, während die Werte von Terborg bis Knock deutlich erhöht waren. Diese Verhältnisse blieben bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (Oktober) bestehen.

Tabelle 63: mittlere **Höchstwerte** der Salzgehalte [%] der Ems und unteren Leda während und nach dem Technischen Test und deren Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 2010 bis 2019 (Monatsmittelwerte der maximalen Konzentration zum Ende der Flutphase). Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen des Mittelwertes **rot** Unterschreitungen **blau** und die neutralen Monate **grau** gegenzeichnet.

Station	Jun 2020	Jul 2020	Aug 2020 ¹⁾	Sep 2020	Okt 2020
Knock	26,3 (+1,0)	26,0 (-0,1)	27,2 (+0,7)	27,6 (+1,1)	27,1 (+1,6)
Pogum	20,6 (+1,6)	20,9 (+0,5)	22,6 (+2,2)	22,3 (+2,5)	20,5 (+3,1)
Terborg	8,6 (-0,2)	8,5 (-2,0)	11,1 (+0,8)	11,0 (+1,6)	8,4 (+1,6)
Leerort	1,5 (-1,7)	1,3 (-2,6)	2,2 (-1,6)	2,1 (-1,3)	1,2 (-1,0)
Leer/Leda	0,9 (-1,6)	0,8 (-2,7)	1,4 (-1,7)	1,3 (-1,1)	0,8 (-0,8)
Weener	0,7 (-0,6)	0,6 (-1,2)	0,9 (-0,8)	0,8 (-0,7)	0,6 (-0,3)
Papenburg	0,4 (-0,2)	0,3 (-0,5)	0,4 (-0,4)	0,4 (-0,4)	0,4 (-0,2)
Herbrum/Heede ²⁾	0,4 (-0,1)	0,3 (-0,3)	0,4 (-0,3)	0,3 (-0,3)	0,3 (-0,2)

¹⁾ gesamter Monat; ²⁾ ohne Tideinfluss

6.14.3.1 Abnahme der Salzgehalte – Betrachtung der Vorgänge innerhalb der Tide

Nachfolgend sind die Salzgehalte der Tiden im Zeitraum vom 28.06. bis zum 24.08.2020 dargestellt. Betrachtet werden die maximalen Salzgehalte der Tiden, die zum Ende der Flutphase (Flutkenterung)

eintreten. Um das Verhalten der Salzgehalte mit der Intensität der Tidesteuerung vergleichen zu können, wird auch die Anzahl der ungesteuerten Tiden (kumulierte Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung) mit dargestellt.

Zu Beginn des Tests waren in **Papenburg** im Vergleich zum Referenzzeitraum (2010 – 2019) niedrige Salzgehalte vorhanden. Auch die Schwankung der Salzgehalte während der Tide waren niedrig. Bis zur Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.) traten zur Flutkenterung Werte von 0,3 bis 0,4‰ ein, was in etwa dem Salzgehalt des über das Tidewehr zufließenden Oberwassers entsprach. Während der Unterbrechung stiegen die Salzgehalte leicht über der Grundversalzung an, so dass Werte von 0,4 bis 0,5‰ erreicht wurden. Nach der Unterbrechung gingen die Salzgehalte zunächst auf das Niveau der Grundversalzung zurück und nahmen danach auf Werte zwischen 0,5 und 0,6‰ zu. Die Entwicklung der Salzgehalte lässt sich nicht mit Sicherheit direkt der Tidesteuerung zuordnen. Am ehesten lässt der Anstieg zwischen dem 19. und dem 29.07. einen Zusammenhang mit Unterbrechung der Tidesteuerung erkennen. Vermutlich übten das Oberwasser, die Tideverhältnisse und die großräumige Salzgehaltsverteilung einen verhältnismäßig großen Einfluss aus, so dass die Wirkung der Tidesteuerung auf den Salzgehalt nicht deutlich zu erkennen war. Es ist anzunehmen, dass bei höheren Salzgehalten, so wie diese in den Sommermonaten der Vorjahre vorkamen, sich auch die Tidesteuerung deutlicher in der Entwicklung der Salzgehalte abgezeichnet hätte.

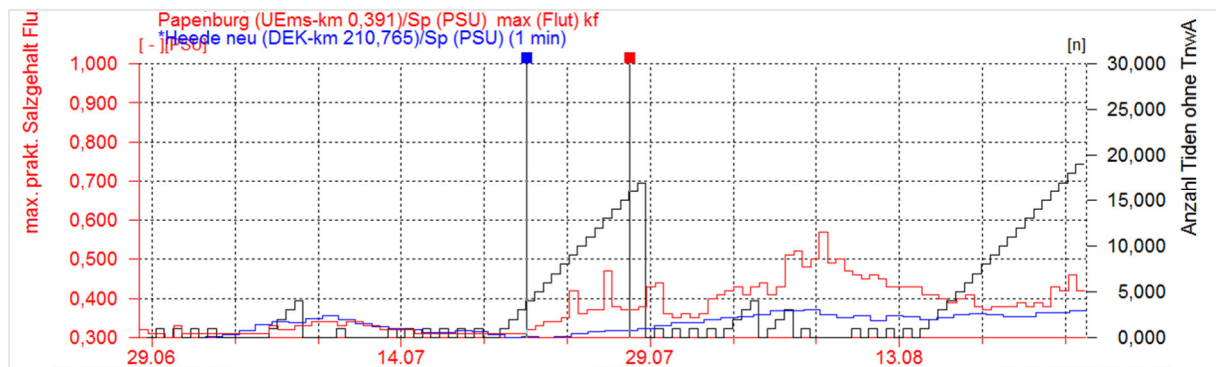


Abbildung 148: Maximaler Salzgehalt zum Ende der Flutphase an der Messstation **Papenburg** (rot), Tagesmittelwert des Salzgehaltes in Herbrum/Heede (oberhalb des Tidewehrs, blau) und Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (kumuliert, schwarz) im Zeitbereich 28.06. bis 24.08.2020. Die letzte Tideniedrigwasseranhebung fand am 14.08.2020 statt.

Zu Beginn des Tests waren in **Weener** im Vergleich zum Referenzzeitraum (2010 – 2019) niedrige Salzgehalte vorhanden. Bis zur Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.) traten zur Flutkenterung Werte um 0,6‰ ein. Die Tidesteuerung zeichnete sich bereits zu Beginn der Testphase durch eine leichte Abnahme der Salzgehalte ab. Sehr deutlich war auch die Zunahme der Salzgehalte während der mehrtägigen Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung, denn synchron mit der zunehmenden Anzahl der ungesteuerten Tiden stieg auch der Salzgehalt an. Nach der Unterbrechung blieben die Salzgehalte auf höherem Niveau. Die sich dann einstellenden Verhältnisse resultierten aus dem Wandel der natürlichen Randbedingungen (Tide, Oberwasser, großräumige Salzgehaltsverteilung) und der niedrigeren Intensität der Tidesteuerung.

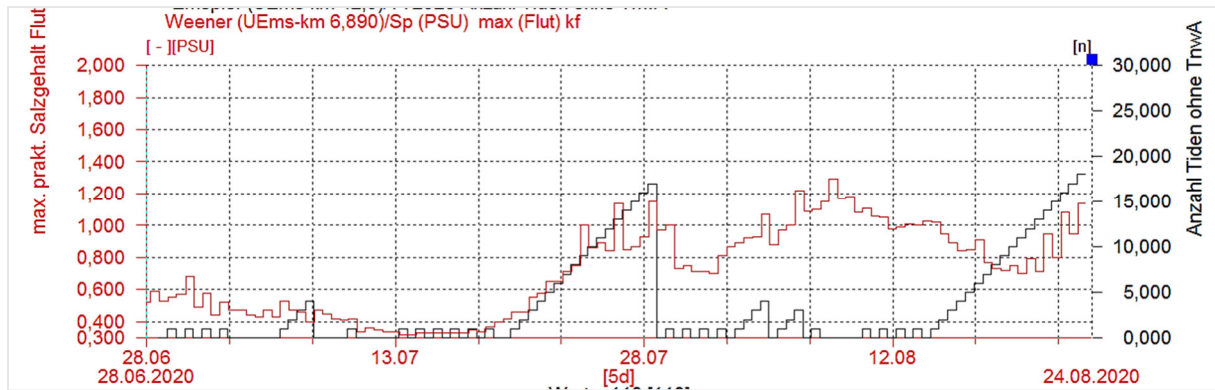


Abbildung 149: Maximaler Salzgehalt zum Ende der Flutphase an der Messstation **Weener** (rot) und Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (kumuliert, schwarz) im Zeitbereich 28.06. bis 24.08.2020. Die letzte Tideniedrigwasseranhebung fand am 14.08.2020 statt.

Zu Beginn des Tests waren in **Leerort** im Vergleich zum Referenzzeitraum (2010 – 2019) niedrige Salzgehalte vorhanden. Zunächst waren Werte zwischen 1 und 2‰ zur Flutkenterung zu messen. Mit Intensivierung der Tidesteuerung (Phasen in den jede Tide gesteuert wurde), gingen die Gehalte auf rd. 0,5‰ zurück. Bei geringerer Steuerungsintensität nahmen die Salzgehalte wieder etwas zu, wie z.B. nach dem 13.07., als jede zweite Tide gesteuert wurde. Der Einfluss der Tidesteuerung hob sich deutlich von dem der natürlichen Randbedingungen, wie z.B. der täglichen Ungleichheit der Tide, ab. Während der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.) nahmen die Salzgehalte synchron mit der zunehmenden Anzahl der ungesteuerten Tiden zu. Nach Wiederaufnahme der Tidesteuerung sanken die Gehalte erneut und im nachfolgenden Zeitbereich spiegelte sich die Steuerungsintensität im Verlauf der Salzgehalte wider, wobei es auch zur Überlagerung mit den natürlichen Randbedingungen kam.

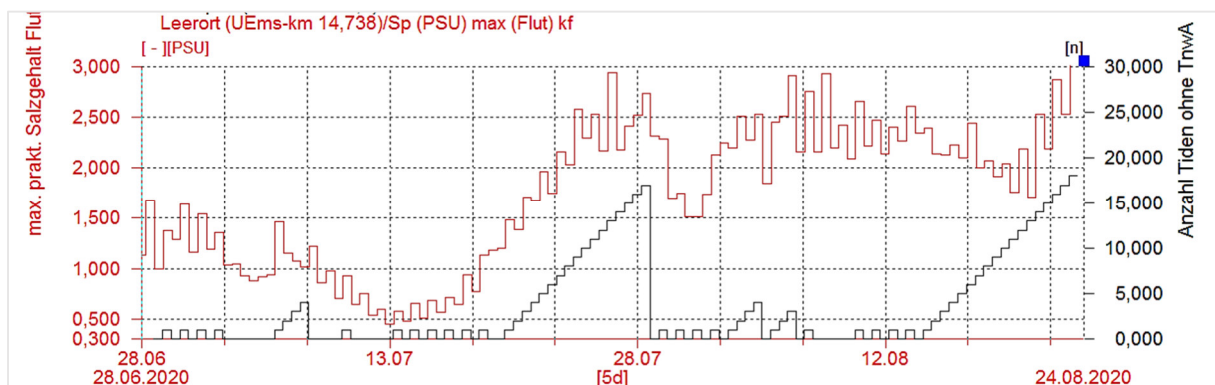


Abbildung 150: Maximaler Salzgehalt zum Ende der Flutphase an der Messstation **Leerort** (rot) und Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (kumuliert, schwarz) im Zeitbereich 28.06. bis 24.08.2020. Die letzte Tideniedrigwasseranhebung fand am 14.08.2020 statt.

Zu Beginn des Tests waren in **Terborg** im Vergleich zum Referenzzeitraum (2010 – 2019) niedrige Salzgehalte vorhanden. Zunächst waren Werte zwischen 6 und 10‰ zur Flutkenterung zu messen. Die Charakteristik der Salzgehaltsverhältnisse glich der bei Leerort: mit Intensivierung der Tidesteuerung (Phasen in den jede Tide gesteuert wurde), gingen die Gehalte auf 4 bis 6‰ zurück und bei geringerer Steuerungsintensität nahmen die Salzgehalte wieder etwas zu. Der Einfluss der Tidesteuerung hob sich von dem der natürlichen Randbedingungen, wie z.B. der täglichen Ungleichheit der Tide, ab. Allerdings war der Einfluss der natürlichen Randbedingungen größer als weiter Ems aufwärts. Bereits vor der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.) nahmen die Salzgehalte mit der Steuerung jeder zweiten Tide zu, anschließend erfolgte dieses synchron mit der zunehmenden Anzahl

der ungesteuerten Tiden. Nach Wiederaufnahme der Tidesteuerung sanken die Gehalte erneut und im nachfolgenden Zeitbereich spiegelte sich die geringere Steuerungsintensität im Verlauf der Salzgehalte weniger deutlich als an den Ems aufwärts liegenden Stationen wider, da diese in diesem Bereich durch die natürlichen Randbedingungen stärker überlagert wurden.

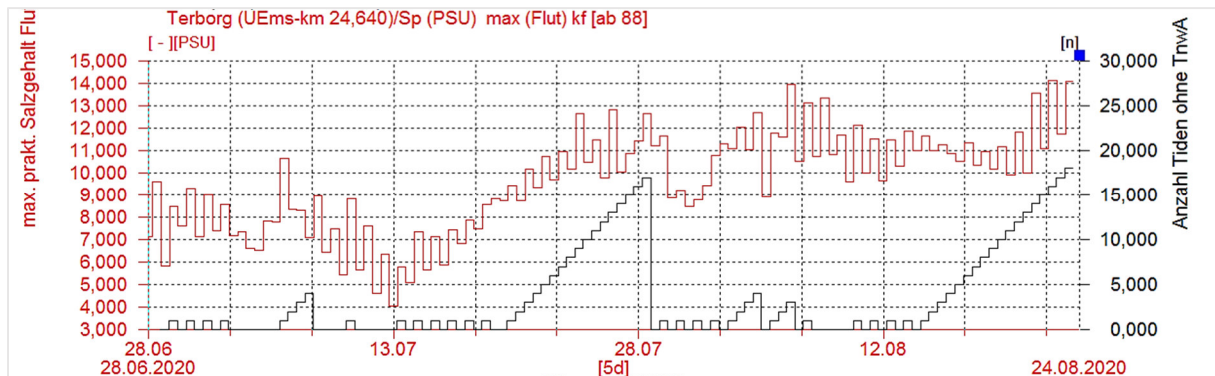


Abbildung 151: Maximaler Salzgehalt zum Ende der Flutphase an der Messstation **Terborg** (rot) und Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (kumuliert, schwarz) im Zeitbereich 28.06. bis 24.08.2020. Die letzte Tideniedrigwasseranhebung fand am 14.08.2020 statt.

Unterhalb von Terborg waren zu Beginn des Tests im Vergleich zum Referenzzeitraum (2010 – 2019) höhere Salzgehalte vorhanden, so auch in **Pogum**. Die Charakteristik der Salzgehaltsverhältnisse unterschied sich von denen der Ems aufwärts liegenden Stationen: mit Intensivierung der Tidesteuerung (Phasen in den jede Tide gesteuert wurde), gingen zwar auch hier die Gehalte zurück, allerdings wurden bereits während der Unterbrechung vom 05. bis 07.07. (4 Tiden) wieder die Salzgehalte des Ausgangszustands überschritten. Grund dafür war die Phase deutlich erhöhter Tiden, unter denen auch die leichte Sturmflut des 06.07. fiel. Deutlich wurde der stärkere Einfluss der natürlichen Einflüsse auf die Salzgehalte im unteren Emsabschnitt. So hob sich der Einfluss der Tidesteuerung von dem der natürlichen Randbedingungen zweitweise sehr viel weniger ab, als es bei den Ems aufwärts liegenden Stationen zu beobachten war, insbesondere in dem Zeitabschnitt nach der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.). Auch wenn die Tidesteuerung in kurzen Zeitabschnitten den Salzgehalt reduzierte, traf dieses nicht für die überwiegende Anzahl der Tiden zu, so dass selbst der Monatsmittelwert des Julis etwas über dem langjährigen Mittelwert lag.

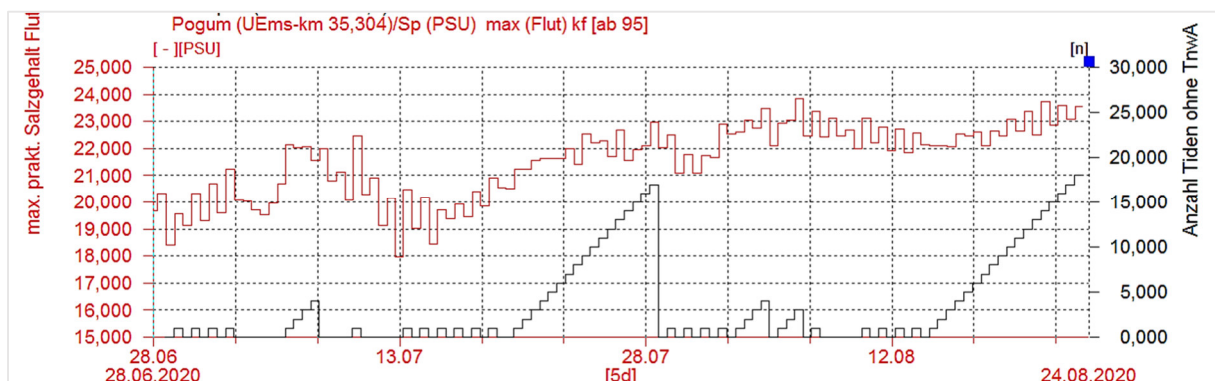


Abbildung 152: Maximaler Salzgehalt zum Ende der Flutphase an der Messstation **Pogum** (rot) und Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (kumuliert, schwarz) im Zeitbereich 28.06. bis 24.08.2020. Die letzte Tideniedrigwasseranhebung fand am 14.08.2020 statt.

An der **Knock** war kein wesentlicher Einfluss durch die Tidesteuerung mehr feststellbar. Die hier gemessenen Schwankungen des Salzgehaltes waren auf Variation der natürlichen Randbedingungen zurückzuführen.

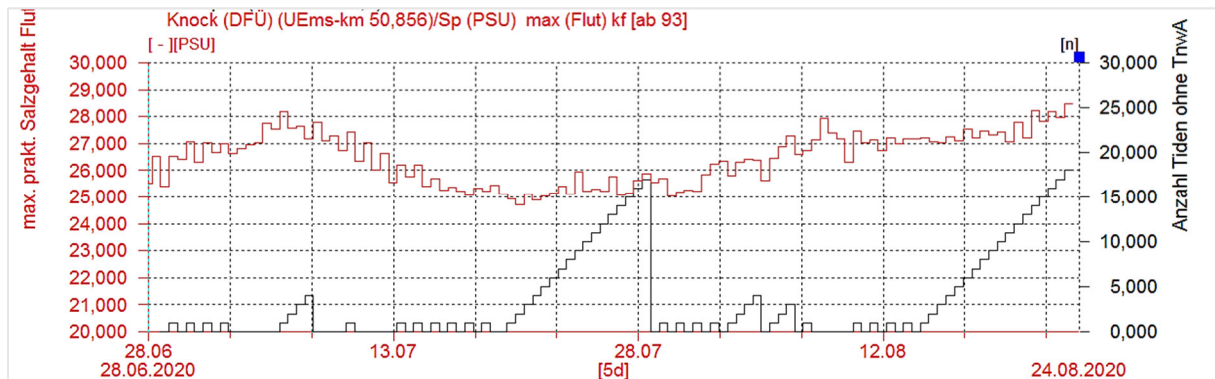


Abbildung 153: Maximaler Salzgehalt zum Ende der Flutphase an der Messstation **Knock** (rot) und Anzahl der Tiden ohne Tideniedrigwasseranhebung (kumuliert, schwarz) im Zeitbereich 28.06. bis 24.08.2020. Die letzte Tideniedrigwasseranhebung fand am 14.08.2020 statt.

6.14.3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse (Messstationen Salzgehalte)

Die Salzgehaltsverhältnisse wurden anhand der an den Messstationen aufgezeichneten Zeitreihen beurteilt, sowie auch die nach Flut- und Ebephassen getrennten Werte jeweils für sich. Dabei fanden die für die Flutphase bestimmten Maximalwerte, die zur Flutkenterung eintreten, Verwendung.

Unmittelbar vor Beginn des Tests waren von Herbrum/Heede bis Terborg niedrigere Salzgehalte als im langjährigen Mittel vorhanden. Dieses traf insbesondere für die Stationen Leerort, Leer (Leda) und Weener zu. Unterhalb von Terborg waren dagegen höhere Salzgehalte festzustellen. Während der Tide betragen die maximalen Werte bei Papenburg < 0,4‰, bei Weener < 0,6‰, bei Leerort < 2‰, bei Terborg < 10‰, bei Pogum < 21‰ und bei Knock < 27‰.

In Papenburg waren die Salzgehalte zu gering, um daran eine eindeutige Reaktion der Tidesteuerung ablesen zu können. Unterhalb von Terborg wirkte sich die Tidesteuerung nur bedingt auf die maximalen Salzgehalte aus, da dort der Einfluss der natürlichen Randbedingungen überwog und an der Knock war kaum noch eine Reaktion auf die Steuerung zu erkennen. Im Abschnitt zwischen Weener und Terborg wirkte sich die Tidesteuerung jedoch sehr deutlich auf die Salzgehalte aus: Mit Einsetzen der Tideniedrigwasseranhebung, die zunächst nur in jeder zweiten Tide stattfand, nahmen auch die Salzgehalte von Weener bis Terborg ab. Im weiteren Verlauf des Tests führte die Intensivierung der Tidesteuerung in diesem Emsabschnitt auch zu einer entsprechend deutlichen Abnahme der Salzgehalte. Bei geringerer Steuerungsintensität nahmen die Salzgehalte wieder etwas zu, wie z.B. nach dem 13.07., als jedes zweite Tideniedrigwasser angehoben wurde. Der Einfluss der Steuerung hob sich deutlich von dem der natürlichen Randbedingungen ab. Im Zeitabschnitt vor der mehrtägigen Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.) waren die maximalen Salzgehalte kurzzeitig stark zurückgegangen, und zwar bei Terborg auf 50%, bei Leerort auf rd. 40% und bei Weener auf rd. 75% des Ausgangszustands. In Pogum war der Salzgehalt lediglich auf etwa 90% des Ausgangszustands zurückgegangen. Während der Unterbrechung des Tests nahmen die Salzgehalte synchron mit der zunehmenden Anzahl der ungesteuerten Tiden zu. Dabei erreichten diese ein Niveau, welches erheblich über dem des Ausgangszustands lag, und zwar um 20 bis 30% bei Terborg, um 50 bis 100% bei Leerort und Weener sowie um 20 bis 40% bei Papenburg. Unterhalb von Terborg waren die Salzgehalte während der Unterbrechung weniger stark angestiegen, so lagen diese bei Gandersum 15 bis 20% über dem Niveau des Testbeginns, bei Pogum rd. 10% und bei Knock wichen diese nur kaum

vom Ausgangszustand ab. Weshalb die Salzgehalte insbesondere im Abschnitt Terborg bis Papenburg nach der Unterbrechung des Tests so weit anstiegen, könnte vielleicht mit der Veränderung des Salzgehaltsgefälles im Zeitabschnitt vor der Unterbrechung begründet sein. Denn die Salzgehalte waren im betreffenden Emssegment deutlich reduziert worden, so dass dadurch auch ein größeres Längsgefälle des Salzgehalts entstanden war. Nach der Unterbrechung sanken die Gehalte zwischen Papenburg und Terborg zunächst erneut und im nachfolgenden Zeitbereich bis zum Ende des Tests spiegelte sich die Steuerungsintensität im Verlauf der Salzgehalte wider, wobei es jedoch zur Überlagerung mit den natürlichen Randbedingungen kam. In der Zeit nach der mehrtägigen Unterbrechung waren die Salzgehalte höher als im Zeitabschnitt davor, weil einerseits die Steuerungsintensität geringer und auch unregelmäßiger war und andererseits vermutlich, weil das niedrigere Oberwasser und die relativ hohe Tideintensität den Ems aufwärts gerichteten Transport förderten. Zudem hatte sich zwischenzeitig ein Salzgehaltsgefälle im Längsverlauf eingestellt, welches nur durch eine intensivere Tidesteuerung (zunächst jede Tide, dann Übergang zur Steuerung jeder zweiten Tide) rascher günstig beeinflusst worden wäre.

Während des mehrwöchigen Tests waren die beeinflussenden Faktoren in unterschiedlicher Ausprägung vertreten: Die Tidesteuerung wurde in verschiedener Intensität ausgeführt und sogar für unterschiedlich lange Zeiten ausgesetzt, zudem variierte die beeinflussenden Faktoren Tideintensität und Oberwasser. Unter den gegebenen Randbedingungen führte die Tidesteuerung am deutlichsten von Terborg bis Weener zu einer Senkung der Salzgehalte. Die Schwankung der Werte unterhalb von Terborg gehen im Wesentlichen auf die Variation der Salzgehalte im Mündungsbereich zurück und die Werte bei Papenburg zumeist auf die Salzgehalte im zufließenden Oberwasser.

Diese Funktionalität konnte die Tideniedrigwasseranhebung in den zurückliegenden Testwochen unter Beweis stellen. Dagegen war die geringe Anzahl der Flutstromsteuerungen zum Ende des Technischen Tests nicht ausreichend, um vergleichbare Resultate zu liefern.

Der Zeitraum des Technischen Tests überschneidet sich mit einer Baggerkampagne zur Vorbereitung einer Schiffsüberführung Ende August (SPIRIT of ADVENTURE, Überführungstermin 30.08.2020). Die Baggerintensität wurde zum Ende des Tests deutlich gesteigert und die räumliche Ausdehnung der Baggerstrecken vergrößert. Vor der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung über 17 Tiden (vom 20. bis 28.07.) war lediglich ein Laderaumsaugbagger tätig und förderte eine tägliche Laderaummenge von im Mittel 6.000 m³. Während der Steuerungspause wurde die Baggerintensität gesteigert und dessen räumliche Ausdehnung vergrößert. Nachdem die Tidesteuerung fortgesetzt wurde, existierte einerseits eine geringe Steuerungsintensität (häufiges Aussetzen der Steuerung) und andererseits eine weiterhin hohe Baggerintensität. Möglicherweise hatten die Baggerungen Einfluss auf das Volumen und die Verteilung des Flüssigschlicks sowie der Schwebstoffkonzentrationen, womit auch Einfluss auf die Salzausbreitung ausgeübt worden sein kann. Die Entwicklung der Salzgehalte lässt sich durch die Intensität der Tidesteuerung und astronomischen und witterungsbedingten Randbedingungen erklären. Die tatsächliche Einflussnahme der Baggerkampagne auf die Salzgehalte geht aus den Daten nicht hervor.

Im Leda-Jümme-Gebiet erfolgten, mit Ausnahme an der Messstation Leer/Leda am Ledasperrwerk und in der Jümme bei Nortmoor (ab 23.07.), keine Leitfähigkeitsmessungen. Die positive Entwicklung der Salzgehaltsverhältnisse, d.h. die Abnahme der Konzentrationen, bei Leerort/Ems (s.o.) lassen sich auch auf die Station Leer/Leda übertragen. Im Weiteren sind die Randbedingungen wie folgt zu interpretieren: Mit der Abnahme des Tidehubs geht auch der Eintrag von Salz aus Richtung Ems einher. Aufgrund der frei auslaufenden Tide nimmt die Wirkung der Tidesteuerung mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung ab.

6.15 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salzgehalte der Ems (begleitende Modelluntersuchung)

Bearbeitet von Anton Rosenhagen (BAW) mit Ergänzungen von Andreas Engels (NLWKN)

Um die Wirkung der Tidesteuerung auf die Wasserstände und Strömungen beschreiben zu können, wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau ein Hydrodynamisch-Numerisches (HN-) Modell eingesetzt. Unter Berücksichtigung der realen Tide- und Abflussbedingungen an den Modellrändern sowie der realen Windverhältnisse erfolgten Rechenläufe mit und ohne Tidesteuerung. Anhand der Berechnungen können die Unterschiede der gesteuerten Tiden zum Referenzfall (ohne Steuerung) nachvollzogen werden.

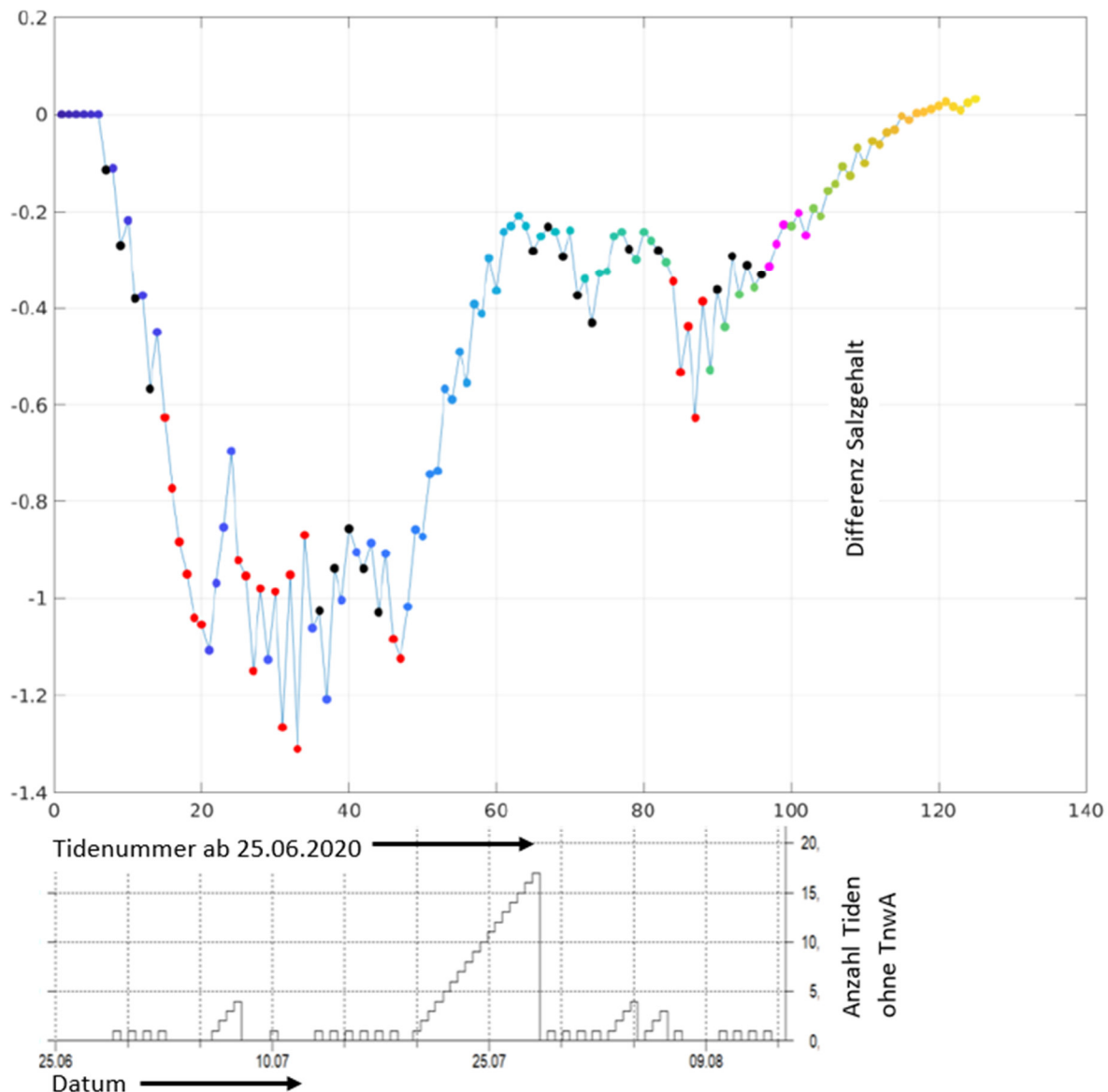


Abbildung 154: Oben: Differenz (PSU) des eingetretenen maximalen Salzgehaltes zum Referenzwert in der Ems bei Leerort. Dargestellt sind die Tiden des Zeitraums vom 25.06. bis zum 30.08.2020. Die Tideniederwasseranhebung begann am 28.06. und endete in der Morgentide des 14.08.2020. Anschließend folgten bis zum 17.08. insgesamt fünf Flutstromtidesteuerungen. Rote Punkte: Tideniederwasseranhebung in aufeinanderfolgenden Tiden; schwarze Punkte: Tideniederwasseranhebung in jeder zweiten Tide; magenta Punkte: Flutstromtidesteuerung, andersfarbige Punkte: keine Tidesteuerung.

Unten: Abschnitt der Testphase, in dem die Tideniedrigwasseranhebung durchgeführt wurde. Dargestellt ist die kumulierte Anzahl der Tiden, in denen die Tideniedrigwasseranhebung für eine oder mehrere Tiden ausgesetzt wurde. Die Tideniedrigwasseranhebung wurde zwischen dem 19. und 29.07. für 17 Tiden ausgesetzt. Vor dieser langen Pause erfolgte eine intensivere Steuerung als danach. Die Flutstromtidesteuerungen sind in der unteren Abbildung unberücksichtigt. Quelle der Abbildungen: BAW und NLWKN.

Mit Beginn der Tideniedrigwasseranhebung nahmen die Salzgehalte bei Leerort ab. Zum Ende der intensiven Steuerungsphase bis zur ersten Pause am 05.07. nahm der Salzgehalt um mehr als 1 PSU gegenüber dem Referenzzustand ab. Das Aussetzen über 4 Tiden führte dann wieder zu einer Zunahme bis auf einen Wert, der etwa 0,7 PSU unterhalb des Referenzniveaus lag. Bis zum 19.07. erfolgte wieder eine häufigere Steuerung, so dass der Salzgehalt erneut abnahm und zeitweise etwa 1,3 PSU unter dem Referenzwert lag. Bei Steuerung nur jeder zweiten Tide stieg der Gehalt wieder leicht an und lag rd. 0,9 PSU unterhalb der Referenz. Zwischen dem 19. und 29.07. wurde die Tideniedrigwasseranhebung für 17 Tiden ausgesetzt. In dieser Zeit stieg der Salzgehalt wieder an und unterschied sich zum Ende dieser Unterbrechung kaum von dem Referenzwert. Nach dieser langen Unterbrechung erfolgte eine Tidesteuerung in geringer Intensität, da diese häufig für eine oder auch mehrere Tiden unterbrochen wurde. Der Salzgehalt nahm aufgrund dessen auch nur leicht wieder ab. Erst bei Intensivierung der Steuerung wurde wieder ein Niveau von bis zu 0,6 PSU unterhalb der Referenz erreicht. Mit Einsetzen der Flutstromtidesteuerung nahm der Salzgehalt wieder zu und nach Beendigung des Tests wurde wieder der Salzgehalt des Referenzzustands erreicht.

6.16 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Flüssigschlickverteilung zwischen Knock und Herbrum

Bearbeitet von Dennis Oberrecht, Patrick Bruckert und Rens van der Wel (NLWKN)³⁴

Die Variabilität der Mächtigkeit und räumlichen Ausdehnung der Flüssigschlickschichten entlang der Strecke Knock bis Herbrum wurde anhand der Echolot-Messdaten ausgewertet. Für die hier durchgeführte Ergebnisdarstellung wird nur auf Schichten eingegangen, die deutlich erkennbar sind (>10cm Dicke).

In Abbildung 155 sind die Flüssigschlickverteilung von der Nullmessung vor Beginn des technischen Testbetriebs und von der Messung eine Woche nach dessen Beendigung dargestellt. Beide Messungen sind bei Springtideverhältnissen durchgeführt worden. Zur Nullmessung konnten die Messschiffe MEMMERT und ASCHENDORF aus organisatorischen Gründen nicht gemeinsam eingesetzt werden, so dass für diesen Tag zwar für das größere Teilstück, von Knock bis Papenburg/Halte, Messwerte zur Verfügung stehen, oberhalb davon bis nach Herbrum jedoch keine Daten vorliegen. Auf eine Kombination von Messergebnissen unterschiedlicher Tage zur Darstellung eines Ausgangszustands der Gesamtstrecke wurde verzichtet.

Es ist sowohl bei der Nullmessung, als auch bei der Nachmessung zu beobachten, dass die Lutokline bei Halte von der freien Wassersäule zur mobilen Flüssigschlickschicht in etwa bei 2 m u. NHN liegt. Nahezu identisch ist auch die Ausdehnung und Mächtigkeit im Bereich Weekeborg-Papenburg (Unterems-Km 0 bis 12), Terborg-Jemgum (Unterems-Km 20 bis 24) und im Emdrer Fahrwasser (Unterems-Km 40 bis 53). Anhand der Echolot-Peilungen ist daher kaum ein Unterschied in der Flüssigschlickverteilung zwischen der Nullmessung und der Nachmessung zu erkennen. Lediglich oberhalb von Halte können Veränderungen existieren, aber aufgrund der nahezu identischen vertikalen Lage der Lutoklinen bei Papenburg und den nahezu identischen Tideverhältnissen (Springtide) wird davon allerdings nicht ausgegangen.

³⁴ Siehe auch den ungekürzten Untersuchungsbericht im Anhang: Oberrecht, D., P. Bruckert & R. van der Wel (2021): Technischer Testbetrieb zur flexiblen Tidesteuerung des Ems-sperrwerk - Begleitendes Längsprofil-Monitoring; NLWKN-Forschungsstelle Küste; unveröffentlicht; Norden, Juli 2021

Die Nullmessung zeigt, dass es über weite Strecken entlang der tiefen Rinne der Ems von der Knock bis Papenburg zu einer Flüssigschlickbildung kommt. Im westlichen Teil des Emders Fahrwassers bildet sich eine ca. 1-2 m mächtige Schicht aus. Die maximale Ausdehnung von ca. 2m wurde hier bei Unterems-Km 48 gemessen. Der größte Teil des Flüssigschlicks bildet hier allerdings die stationäre Schicht. Nur im Bereich der maximalen vertikalen Ausdehnung bildet sich auch eine schwach mobile Schicht aus. Zwischen Emden und Terborg bildet sich keine oder nur eine sehr schwache Flüssigschlickschicht aus. Oberstrom von Terborg bis ca. Leerort bildet sich in kurzen Strecken eine bis zu 1m dicke stationäre Flüssigschlickschicht mit nur einer darüber liegenden nur sehr schwachen (wenige Dezimeter) mobilen Flüssigschlickschicht aus.

Oberhalb der Ledamündung bei Unterems-Km 14 bildet sich eine bis zu 4 m dicke Flüssigschlickschicht bei Tidehochwasser aus. Bei der Nullmessung und bei der Nachmessung ist bis zu Unterems-Km 4 erst nur eine Bildung von einer 1 m dicken Schicht zu beobachten, die aber dann oberhalb davon auf eine Mächtigkeit von 4 m bei Rhede (Unterems-Km -8) zunimmt und bis zum Tidewehr in Herbrum so mächtig bleibt (bei der Nachmessung). Im Bereich Leerort (Unterems-Km 14) bis Unterems-Km 4 hat sich neben der mobilen Schicht auch eine stationäre Schicht von ca. 0.5 m ausgebildet.

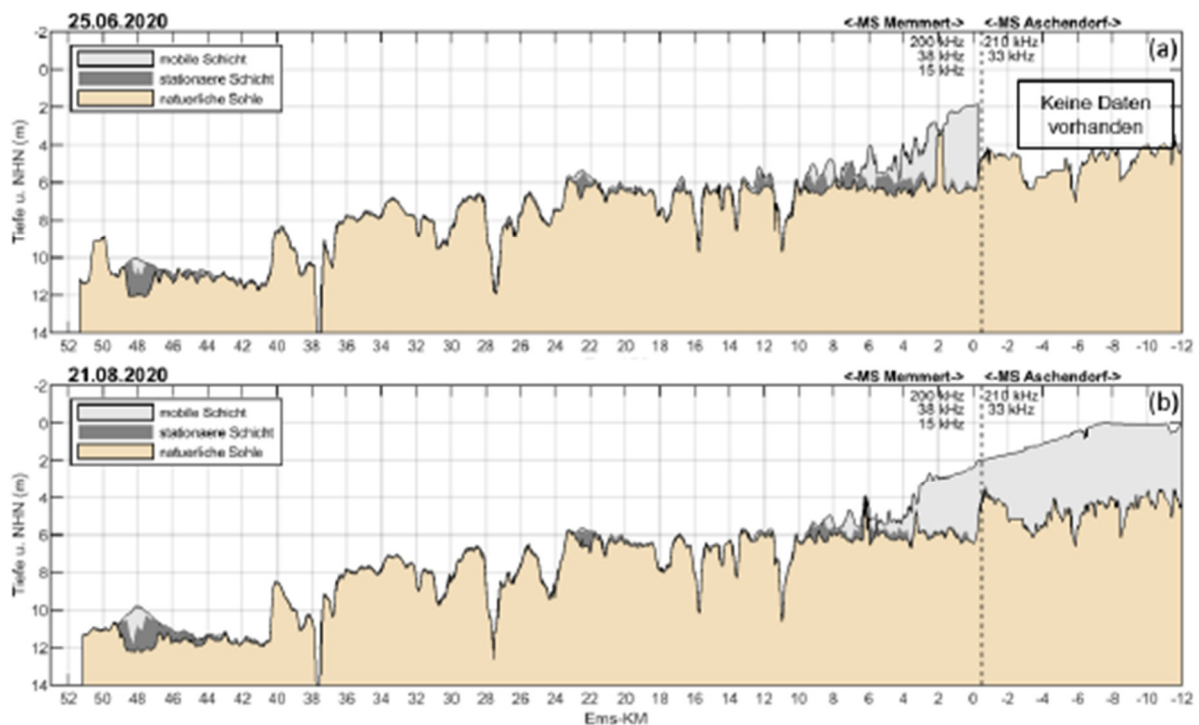


Abbildung 155: Darstellung der mobilen und stationären Flüssigschlickverteilung zu Tidehochwasser während der Nullmessung (a) und bei der Nachmessung (b) nach Beendigung des technischen Testbetriebs (hellgrau: mobile Flüssigschlickschicht, dunkelgrau: stationäre Flüssigschlickschicht, hellbraun: natürliche/feste Sohle)

Aufgrund der intermittierenden Ausführung der Tidesteuerung und der nur mit Verzögerung reagierenden Flüssigschlickverteilung auf die Variabilität der Gezeitenverhältnisse ist es schwierig eine bestimmte Flüssigschlickverteilung einem Steuerungsereignis zuzuordnen. Da es bei der flexiblen Tidesteuerung primär um eine Reduzierung des Schlickproblems in der Unterems geht, wird hier die jeweils letzte Verteilung eines definierten Zeitabschnitts dargestellt (Abbildung 156). Die Einteilung des gesamten technischen Testbetriebs erfolgt dabei in vier Zeitabschnitte: der Tideniedrigwasseranhebung Phase I (vom Beginn des Tests bis zur Unterbrechung am 19.07.2020), der ungesteuerten Phase (zwischen 19. und 29.07.), der Tideniedrigwasseranhebung Phase II (bis zum 14.08.) und der Flutstromtidesteuerung (bis zum 17.08.).

Ein signifikanter Unterschied der drei gesteuerten Phasen, verglichen mit dem ungesteuerten Zeitraum, zeigt sich im Bereich oberhalb von Weekeborg (Unterems-Km 11). Von hier stromaufwärts an und nicht erst, wie bei den ungesteuerten Tiden, von Km 4 bildet sich in den gesteuerten Phasen

eine deutlich messbare mobile Schicht aus mit einer Höhe von ca. 2 m. Zugleich nimmt die Mächtigkeit der mobilen Schicht oberhalb von Papenburg bis zum Tidewehr von ursprünglich ca. 4 m auf 2 bis 2,5 m Dicke ab. Bei den Phasen I und II der Tideniedrigwasseranhebung nimmt die Mächtigkeit oberhalb von Papenburg aufgrund des relativ wesentlich stärkeren Eingriffs in die Tidedynamik (weniger Impuls oberstrom von Halte) stärker ab im Vergleich zur Flutstromsteuerung.

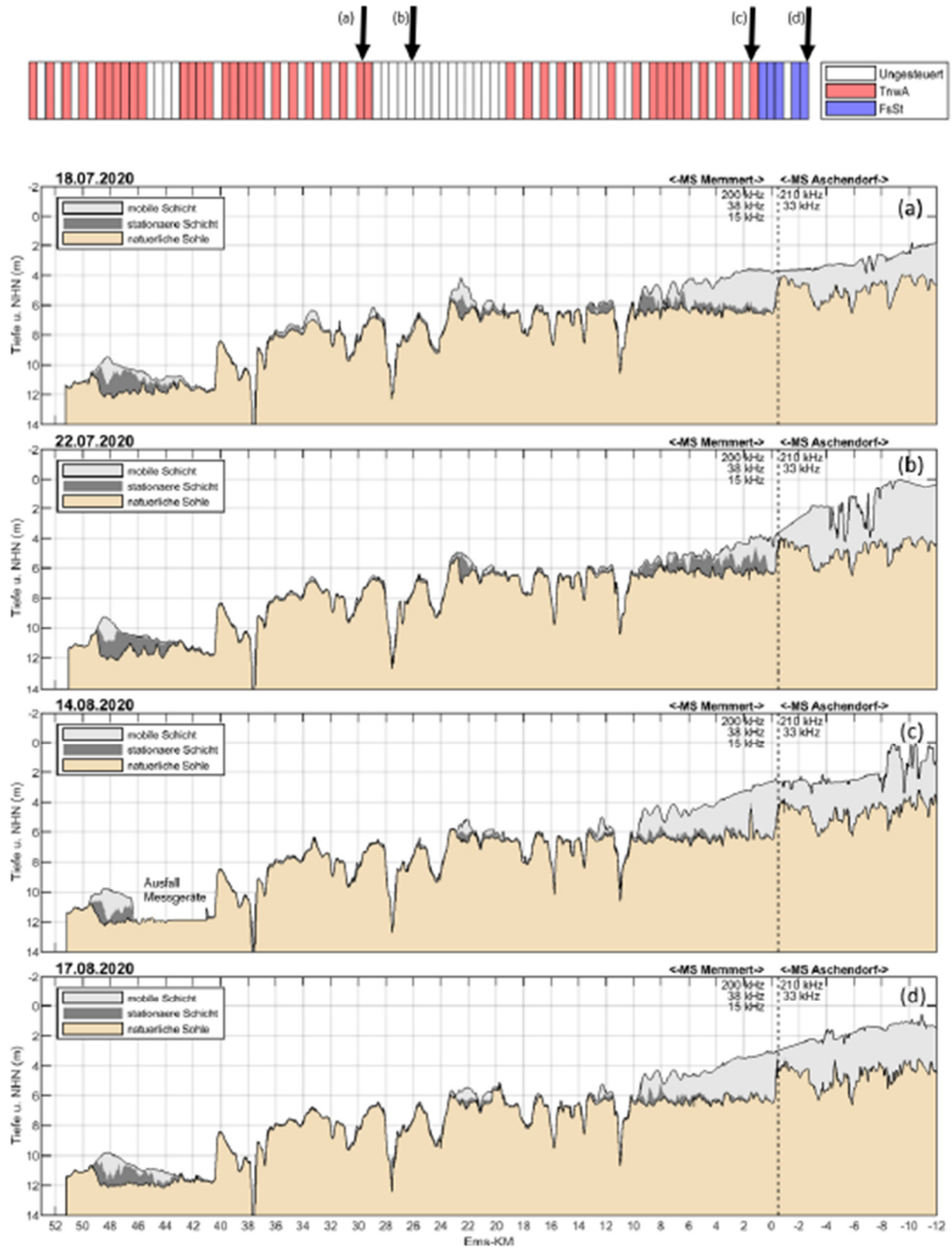


Abbildung 156: Darstellung der mobilen und stationären Flüssigschlickverteilung entlang der tiefen Rinne von Knock bis zum Tidewehr in Herbrum zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des technischen Test-betriebs: (a) am Ende von TnwA Phase I, (b) zu Beginn des ungesteuerten Zeitraums, (c) am Ende von TnwA Phase II und (d) am Ende der Flutstromsteuerung.

Die dargestellte Messung der ungesteuerten Phase (Teil b der Abbildung 156) ist ca. 5 Tiden nach Beendigung der TnwA-Phase I durchgeführt worden. Es zeigt sich, dass sich nach einer relativ kurzen Zeit bereits wieder eine ähnliche Ausdehnung und Verteilung des mobilen Flüssigschlicks oberhalb von

Weekeborg gebildet hat, ähnlich wie bei der Null- bzw. Nachmessung. Das hier dargestellte Längsprofil der ungesteuerten Phase fand während Springtideverhältnissen statt. Hier zeigt sich, dass sich zu diesem Zeitpunkt eine mächtigere stationäre Flüssigschlickschicht von Unterems-Km 0 bis 10 ausbildet im Vergleich zur Situation vom 18.07. (Teil a der Abbildung 156), dem letzten Tag der TnWA-Phase I. Dies bestätigt Untersuchungen von WINTERWERP et al. (2018)³⁵. Sie haben festgestellt, dass die Flüssigschlickbildung in der Unterems eher aus der lokalen Verfügbarkeit von Feinsedimenten und lokalen Strömungssituation entsteht, und daher nur untergeordnet aus einem großräumigen Netto-Sedimenttransport in der Unterems. Daraus kann abgeleitet werden, dass es durch die Steuerungsvarianten des technischen Testbetriebs zu einer leicht seewärtigen Verlagerung der Nullzone („Trübungszone“) kommt (OBERRECHT & WURPTS, 2019; OBERRECHT & WURPTS, 2020³⁶). Das dieser Effekt bei der Messung zwischen dem 17.8 und der Nachmessung am 21.08 nicht erkennbar ist kann am Einsatz von drei Baggerschiffe (in der Unterems) während dieser letzten Phase liegen. Der verstärkte Einsatz von Baggerschiffen kann auch aus der Folge des längerfristigen Aussetzens der Tidesteuerung entstehen. Beide Zusammenhänge müssten aber noch weiter untersucht werden. Eine weitere Veränderung hinsichtlich der Schichtdicken zeigt sich auch im Bereich Terborg bis Jemgum. Zum Ende der TnWA-Phase I (Teil a der Abbildung 156) hat sich hier eine wesentlich dickere mobile Schicht gebildet im Vergleich zur Nullmessung (Abbildung 155 oben). Diese Schicht ist ebenfalls nach der TnWA-Phase II (Teil c der Abbildung 156) und nach der FsTs-Phase (Teil d der Abbildung 156) deutlich zu erkennen. Lediglich in der ungesteuerten Phase und bei der Null- und Nachmessung ist keine oder nur eine sehr dünne mobile Schicht sichtbar. Dieses Verteilungsmuster unterstreicht ebenfalls die Vermutung der Wichtigkeit der lokalen Sedimentverfügbarkeit im Bereich oberstrom von Jemgum.

Der dritte Bereich mit Bildung von Flüssigschlick ist das Emders Fahrwasser. Hier zeigt sich ebenfalls eine Variabilität. Zu Beginn der ungesteuerten Phase scheint sich hier eine deutlichere stationäre Schicht auszubilden. Diese ist hier aber in allen Messungen von einer mobilen Schicht überlagert.

6.16.1 Zusammenfassung Flüssigschlick

Die Messungen zeigen deutlich, dass der durchgeführte Technische Test einen Effekt auf die Flüssigschlickverteilung und die Gewässergüte entlang der tiefen Rinne von Knock bis Herbrum hatte. Ein Effekt über den Zeitraum des Technischen Tests hinaus kann anhand der hier durchgeführten Messungen im Längsschnitt nicht festgestellt werden.

Bei beiden Steuerungsvarianten konnte grundsätzlich eine erweiterte seewärtige Ausdehnung der mobilen Flüssigschlickschicht beobachtet werden. Die geringfügig nach unterstrom entstehende Verlagerung ist die Folge aus der Reduzierung der Tideenergie in der Unterems und hat gleichzeitig eine Reduzierung der Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht oberhalb von Papenburg zur Folge. Ebenso wurde beobachtet, dass die Neubildung der mobilen Flüssigschlickschicht im Bereich Weekeborg-Weener hauptsächlich durch lokale Resuspendierung stattfindet. Neben der Verlagerung der Schichten zeigte sich am Ende der TnWA-Phase I bis zum Ende des ungesteuerten Zeitraums eine einsetzende Kompaktierung des schluffigen Materials. Im weiteren Verlauf des Testbetriebs konnte dieses Verhalten nicht wieder beobachtet werden.

Im Emders Fahrwasser konnte, wie auch in der Unterems, eine Zunahme der stationären Schlickschicht über die TnWA-Phase I beobachtet werden. Diese Zunahme könnte aufgrund der starken

³⁵ WINTERWERP, J.C., VROMM, J., WANG, Z.B., KREBS, M., HENDRIKS, E.C.M., VAN MAREN, D.S., SCHROTTKE, K., BORGSMÜLLER, C AND SCHÖL, A., (2017), SPM response to tide and river flow in the hyper-turbid Ems River, Ocean Dynamics, Vol. 67(5), pp 559-583

³⁶ OBERRECHT, D. & WURPTS, A. (2019): Auswirkungen des geplanten technischen Testbetriebs zur Wirkung der flexiblen Tidesteuerung – Hydro- und Morphodynamische Modelluntersuchung, NLWKN-Forschungsstelle Küste, Norderney, Gutachten 04/2019

OBERRECHT, D. & WURPTS, A. (2020): Hydro- und morphodynamische Auswirkungen der 4h-Flutstromsteuerung im Rahmen des geplanten technischen Testbetriebs zur Wirkung der flexiblen Tidesteuerung, NLWKN-Forschungsstelle Küste, Norderney, Gutachten 01/2020

Tidevolumenreduzierung auf eine lokale Sedimentation innerhalb des Fahrwassers hinweisen. Hier müsste weiter geprüft werden ob diese Verlandung zu erhöhten Baggermengen führt.

6.17 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse des Emders Fahrwassers und Emders Außenhafens

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)³⁷

Modellgestützte mögliche Auswirkungen des Technischen Test wurden anhand von numerischen Betrachtungen des NLWKN, Forschungsstelle Küste dargestellt. Eine der potentiellen Auswirkungen war eine zunehmende Sedimentation im Außenhafen Emden bzw. im Emders Fahrwasser. Es war also naheliegend, Messungen in Form von Peilungen zu planen, die genau diesen Sachverhalt per Naturmessung darstellen. In Zusammenarbeit mit NPorts wurde ein sogenanntes Referenzprofil (RP) für den Außenhafen Emden festgelegt, um direkt maßgebliche Sedimentationen und damit mögliche Behinderungen oder Erschwernisse in der Hafenunterhaltung darstellen zu können.

6.17.1 Das Referenzprofil

Das Referenzprofil (Abbildung 157) wurde zwischen NPorts und dem WSA Ems-Nordsee gemeinsam festgelegt und beginnt im Außenhafen auf Höhe der Randzelbrücke, verläuft in gerade Linie zwischen den Molen hindurch und passiert anschließend sämtliche Liegeplätze von NPorts in der Außenems zwischen den Liegewannen und der Fahrrinne. Das Referenzprofil verläuft bewusst vor den Liegeplätzen, da dort keine Beeinflussung bzw. Behinderung durch liegende Schiffe verursacht wird und das Profil daher zu jeder Zeit gepeilt werden kann. Der Baggerbetrieb der WSV findet zu keiner Zeit auf dem RP statt. Rezirkulationsaktivitäten von NPorts finden im Außenhafen flächig und teilweise entlang der Ems im Bereich der Zufahrten zu den Liegeplätzen auf dem Referenzprofil statt. Durch das Rezirkulationsverfahren von NPorts wird das Material für den nautischen Tiefengewinn nicht entnommen, sondern in seiner Konsistenz verändert. Die Intensität der Rezirkulationsmaßnahmen ist für die von NPorts unterhaltenen Bereiche je nach Lage sehr unterschiedlich. In diesem Zusammenhang auswertbare Daten wurden nicht zur Verfügung gestellt. Das Referenzprofil sichert den „morphologischen footprint“ und dokumentiert damit im Sinne einer Momentaufnahme einen für diesen Bereich typischen bzw. charakteristischen Zustand. Das Referenzprofil wird über den Technischen Test als langfristige, mehrjährige Monitoringmaßnahme fortgeführt. Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse sind kontinuierliche Aufnahmen des RP durch ein Sedimentecholot eine sinnvolle Ergänzung, um vor einem erneuten Test oder Wirkbetrieb eine solide Datengrundlage im Hinblick auf die sehr spezielle Sedimentdynamik zu besitzen.

Das Referenzprofil wurde erstmalig am 29.04.2020 durch das Vermessungsschiff Paapsand gepeilt. Teilweise wurden 2 Peilungen pro Tag durchgeführt. Die Aufnahmen der Paapsand finden grundsätzlich mit den Frequenzen 33 und 210 kHz als Linienpeilung statt, wobei die niedrige Frequenz relevant im Sinne der Schifffahrt ist. Seitens NPorts wurde das Profil ebenfalls mehrfach durch das Peilschiff Delfin mit 15 und 200 kHz erfasst, wobei im direkten Vergleich mit den Ergebnissen der Paapsand die gepeilten Tiefen der Delfin um 3 – 5 dm größer, d. h. tiefer sind (siehe Abbildung 157 bis Abbildung 159) Für die vorliegende Betrachtung wurden 152 Peilfahrten mit 33 kHz vom 29.04.2020 bis 02.07.2021 sowie 97 Peilfahrten mit 210 kHz der Paapsand in einem Zeitraum vom 29.04.2020 bis

³⁷ Siehe auch gesonderten Bericht des WSA Ems-Nordsee im Anhang: KREBS 2021; Technischer Test 2020 – Ergebnisbericht des WSA Ems-Nordsee zum durchgeführten Monitoring; Emden Dezember 2021

15.11.2020 ausgewertet. Die Datenbasis zur Klärung der Fragestellung kann als sehr gut bezeichnet werden.

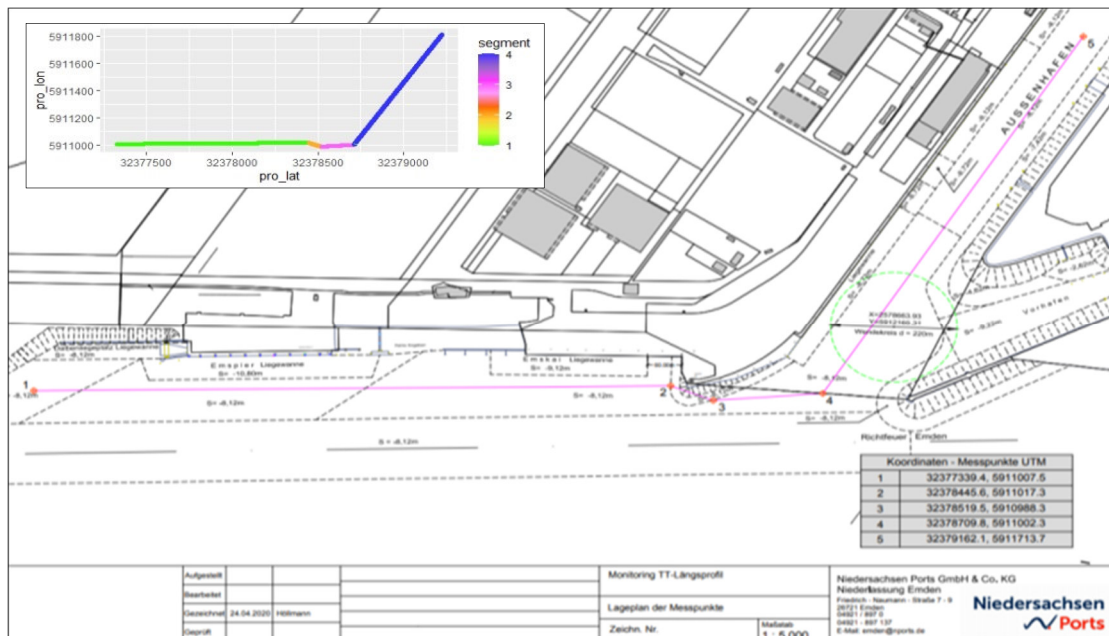


Abbildung 157: Außenhafen Emden mit Lage des Referenzprofils sowie (links oben) die Festlegung der Segmente im Referenzprofil für die Auswertung. Punkt 4 liegt zwischen den Molen im Einfahrtsbereich zum Außenhafen, bei Station 1376 m im Bereich der sogenannten Barre sowie im Zentrum der Zufahrt Außenhafen bzw. Neue Seeschleuse

Da jede Peilfahrt praktisch von der Ideallinie (Polygon) mehr oder weniger abweicht, ist zu Beginn der Auswertung zunächst eine Projektion aller gemessenen Punkte der Peilfahrt auf das Sollprofil (=Referenzprofil) durchgeführt worden. Hierdurch sind typische Merkmale wie Untiefen, Kolke oder auch die Barre stets an der gleichen Station zu finden. Damit kann dann stets über die gleichen Bereiche bilanziert werden. Die Profile wurden weiterhin so aufbereitet, dass sie einerseits normiert, d.h. Peilpunkte dann äquidistant vorliegen und die Profile alle den gleichen Startpunkt bzw. die gleiche Peilrichtung haben.

Die Bilanzierungen über die Segmente 1 – 4 werden im Folgenden dargestellt. Ein Punkt entspricht dabei der mittleren Höhe des jeweiligen Segmentes (farblich getrennt, siehe Abbildung 157) einer Peilfahrt. Das erste Diagramm stellt damit die Änderung der mittleren Tiefe über Segment 1 und damit die Morphodynamik im Bereich der Großschiffsliegeplätzen an der Ems dar (Emskaje bis Dalbenliegeplatz). Es werden zuerst die Peilungen mit 33 kHz dargestellt, da diese einen Hinweis auf (dauerhafte) Sedimentation bzw. Erosion geben. Die Peilungen mit der höheren Frequenz von 210 kHz geben an der Ems darüber hinaus Aufschluss über die Lage und Bewegung des Flüssigschlickhorizontes, vor allem im Bereich ab den Molen in Richtung binnen d.h. Richtung Randzelbrücke/Nesserlander Seeschleuse. Abbildung 158 und Abbildung 159 geben also die Bewegung der mittleren Höhe von Segment 1 und 3 und damit im unmittelbar von der Ems beeinflussten Bereich wieder.

Eine Zunahme der Sedimentation infolge des Technischen Tests ist nicht erkennbar, da sich sowohl bei Segment 1 als auch bei Segment 3 kein wirklicher Trend zur Zeit vor dem Technischen Test einstellt. Die Tiefen nehmen im Mittel nach dem Test bis Jahresende sogar eher leicht um ca. 0,55 m von -10,7 auf -11,25 m NHN zu. Ähnlich verhält sich das lilafarbene Segment 3 wobei hier im Beobachtungszeitraum von Beginn an bis zum Ende des Tests ein leichter Rückgang der Tiefen zu beobachten ist und nach dem Test dann die Tiefen wieder anwachsen und der Höhenbewegung von Segment 1 folgen. Segment 2 ist kurz und wird hier, da die Ergebnisse nicht wesentliche Unterschiede zu S1 und S3 aufweisen, nicht dargestellt. Augenfällig ist, dass die zunehmenden Wassertiefen bei

S1/S3 nach dem Technischen Test einhergehen mit ausbleibenden Baggermengen, ein Hinweis dafür, dass die Wassertiefen in der Fahrrinne durch die Strömung auf Tiefe gehalten werden.

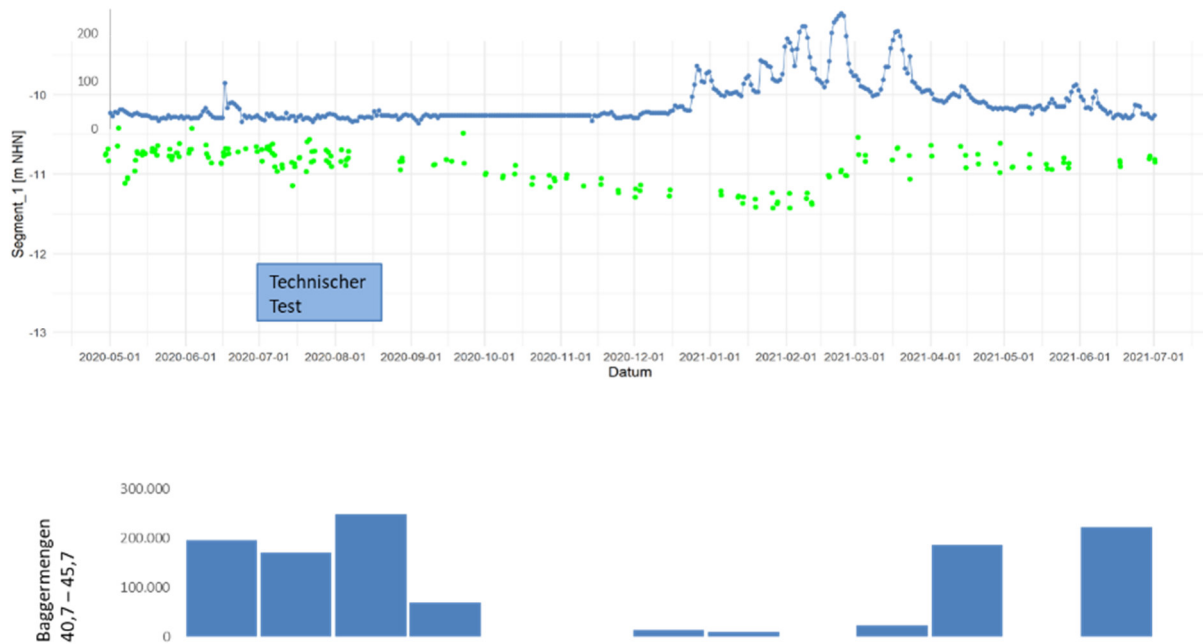


Abbildung 158 oben: 33 kHz - Tiefen (m NHN) gemittelt über Segment 1 (Liegewannen Ems/EFW) je Messfahrt sowie Oberwasser (blaue Linie; unten: Baggermengen im nahegelegenen WSV Baggerabschnitt

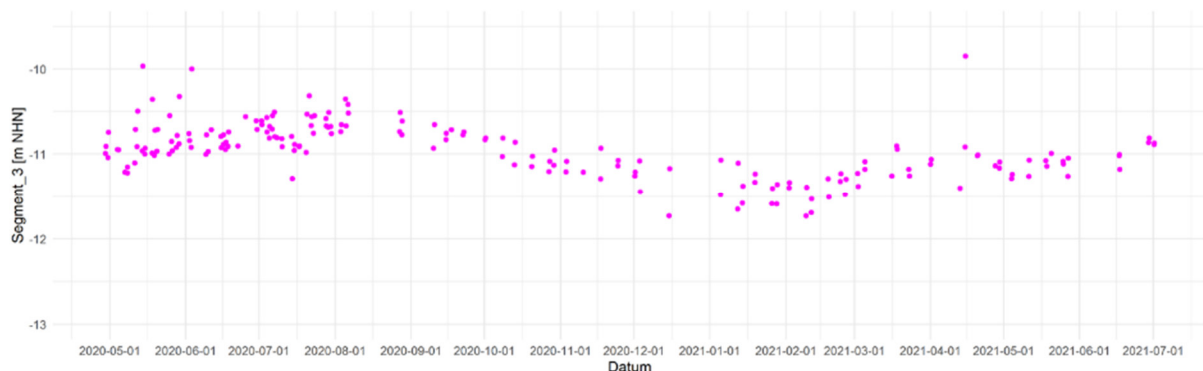


Abbildung 159: 33 kHz - Tiefen (m NHN) gemittelt über Segment 3 (Molen) je Messfahrt

Abbildung 160 zeigt die Situation der mittleren Tiefe im Emdrer Außenhafen anhand der 33 kHz-Peilung. Die mittleren Tiefen in diesem Segment nehmen von Mai bis etwa Mitte August kontinuierlich ab und nach diesem Zeitpunkt über den Jahreswechsel 2020/2021 bis etwa Mitte Februar 2021 wieder zu. Das höhere Oberwasser im Februar/März 2021 hat auf die Tiefen im Außenhafen keine sichtbare Wirkung. Im Jahr 2021 nach dem Hochwasser liegen die Tiefen im Juli 2021 fast identisch wie im Juli 2020.

Blickt man gezielt auf die Peilungen im Bereich des Technischen Tests so ist erkennbar, dass im Zeitraum des Tests Anfangs die Tiefen zunehmen, in der zweiten Hälfte etwa ab dem 20. Juli offenbar aber vermehrt wieder Sedimentation eintritt und die Tiefen teils signifikant abnehmen. Der Zeitraum geringer Tiefen reicht bis etwa Mitte September, danach stabilisiert sich die Situation. Die Wassertemperatur in Abbildung 160 liefert Hinweise auf eine Abhängigkeit. Die physikalischen Eigenschaften der Hafensedimente stehen in enger Beziehung zum mikrobiellen Ökosystem. Die Wassertemperatur im Hafen wird nicht gemessen sodass der Zusammenhang u. U. mit besseren Daten noch klarer darstellbar wäre. Seit Anfang Juli wird die Wassertemperatur durch eine WSV Messstelle

an der Ranzelbrücke in zwei Tiefen registriert. An dieser Stelle wäre eine Darstellung der Scherfestigkeitsuntersuchungen die von NPorts laufend durchgeführt werden interessant und hilfreich.

Anhand der Zusammenstellung einiger aufgenommener Profile weiter unten über ausgewählte Zeitpunkte ist dieser Aspekt ebenfalls erkennbar. Gerade der deutliche Anstieg während des Tests spricht für eine Mobilisierung der Sedimente im Bereich der Ems (Liegewannen) sowie einem Import von Sediment in den Außenhafen.

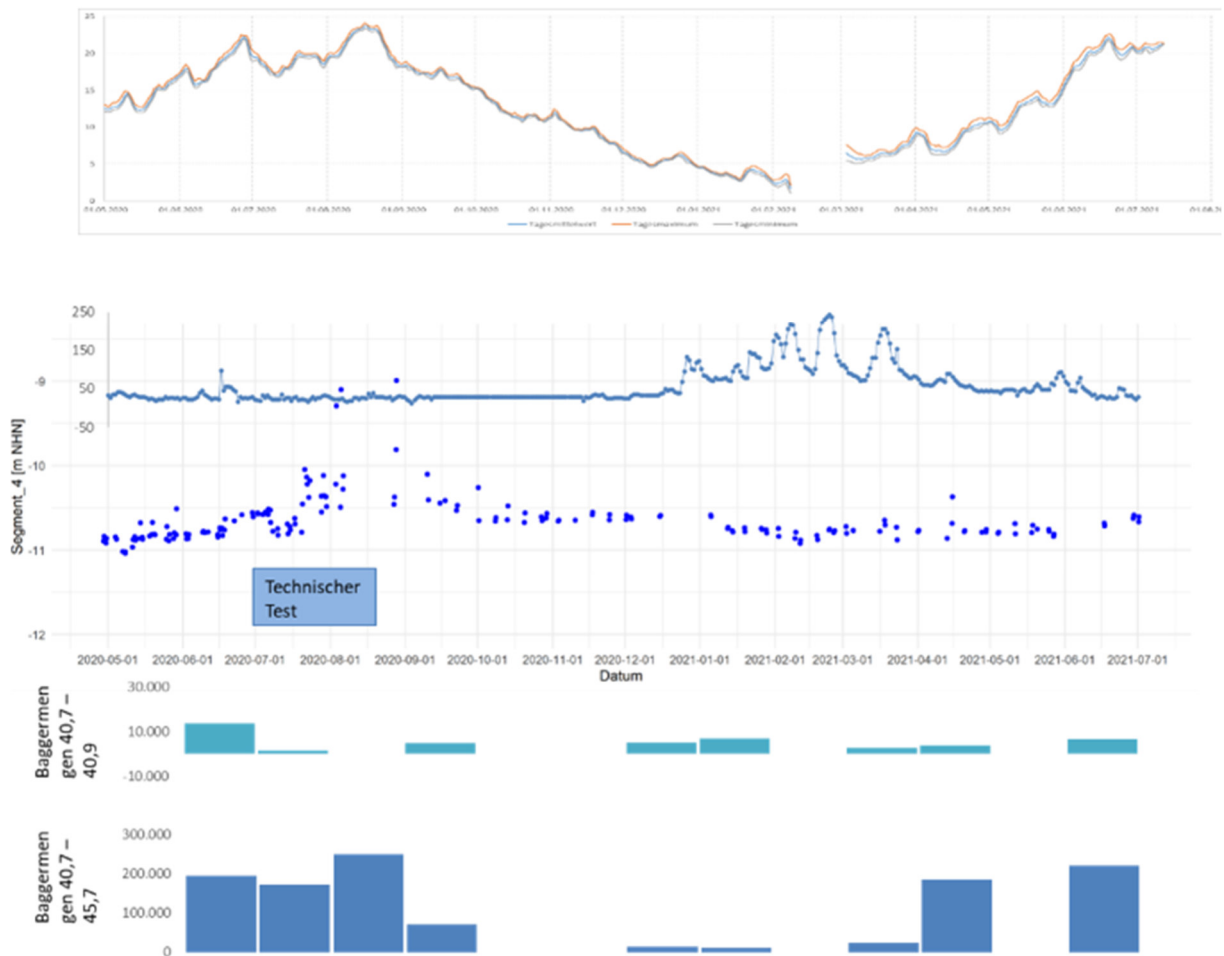


Abbildung 160: von oben nach unten Wassertemperatur [°C] der Ems vor der Ostmole Emden, Oberwasserabfluss Versen [m³/s], 33 kHz - Tiefen (m NHN) gemittelt über Segment 4 (Außenhafen) je Messfahrt sowie Baggermengen [m³] im jeweiligen Baggerschnitt

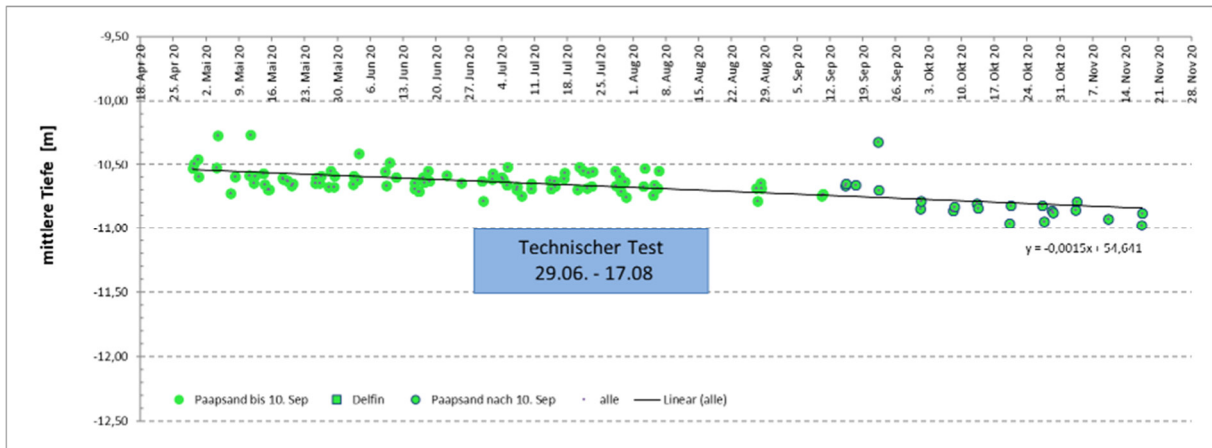


Abbildung 161: 210 kHz - Tiefen (m NHN) gemittelt über Segment 1 (Liegewannen Ems/EFW) je Messfahrt

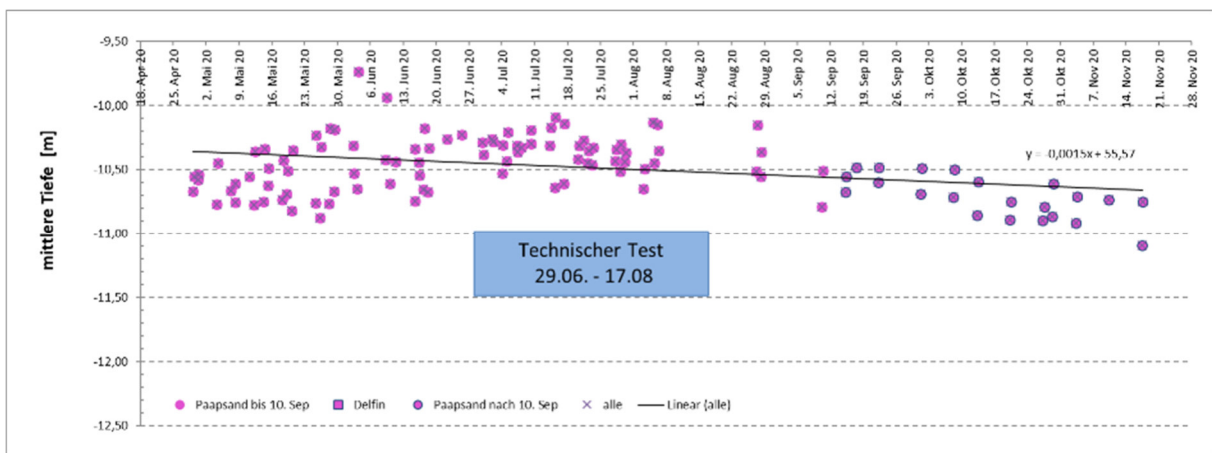


Abbildung 162: 210 kHz - Tiefen (m NHN) gemittelt über Segment 3 (Molen) je Messfahrt

Abbildung 161 und Abbildung 162 geben die mittleren Tiefen der Peilfrequenz 210 kHz in den Segmenten 1 und 3 (Liegewannen Ems/EFW) sowie vor und zwischen den Molen wieder. Im Ergebnis verhalten sich die mittleren Tiefen wie bei der vorigen Darstellung mit 33 kHz. Bei S1 ist die Varianz der gemessenen Tiefen geringer. Der Grund wird in der Zusammensetzung der Sedimente vermutet, da die niedrige Frequenz im Vergleich zur höheren Frequenz weichere Sedimente auch mit geringem Sandanteil noch durchdringt, die hohe Frequenz aber stets den obersten Sedimenthorizont als Sohle erkennt.

Abbildung 163 zeigt die Veränderung der mittleren Tiefenlage bzw. die Oberfläche des gemessenen Flüssigschlickhorizontes im Emder Außenhafen. Die Betrachtung des 33 kHz-Horizontes zeigt, dass die Tiefen bis Ende September abnehmen um sich dann auf einer Tiefe von -10,7 m NHN zu stabilisieren. Bei der 210 kHz Messung nehmen die Tiefen im Zeitraum Mai bis Ende November dagegen kontinuierlich zu, was einen völlig anderen Trend bis Anfang September darstellt und auf Austrag oder zunehmende Konsolidierung der Sedimente (oder beides) schließen lässt. Im Zeitraum des Technischen Tests ist ein leichtes Verharren des Flüssigschlickniveaus im Hafen beobachtbar. Der Gedanke, dass durch den Test dem Außenhafen mehr Weichsediment zugeführt (und in Folge auch intensiver umgelagert wird) liegt nahe und wird durch das 33 kHz-Signal bestätigt. Weshalb sich die mittleren Tiefen des Flüssigschlickhorizontes im Prinzip von Ende April bis Ende November verringern bleibt unklar und muss durch weitere Messungen und Analysen untersucht werden.

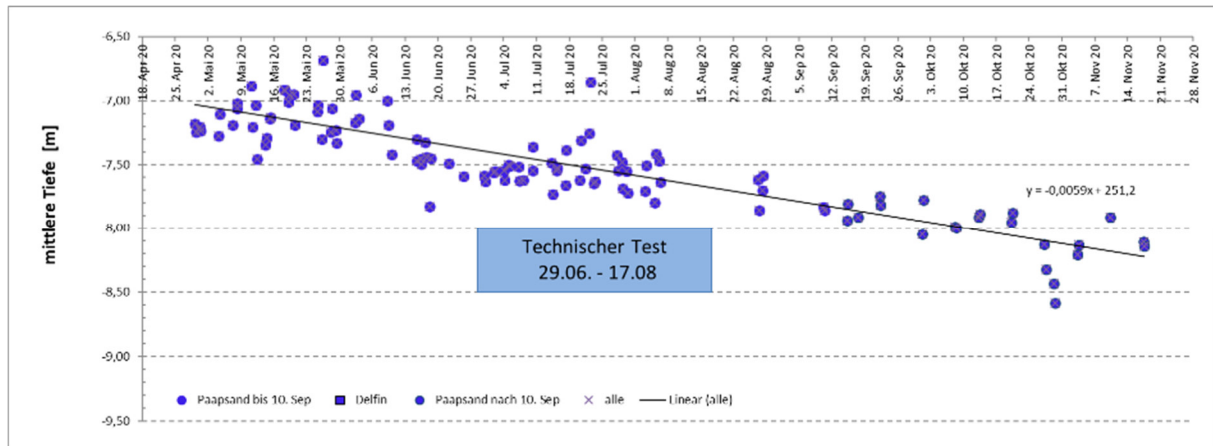


Abbildung 163: 210 kHz - Tiefen (m NHN) gemittelt über Segment 4 (Außenhafen) je Messfahrt

6.17.2 Barre im Einfahrtbereich des Außenhafens

Die Abbildung 163 und Abbildung 164 zeigen 19 ausgewählte Messfahrten zwischen dem 29.04. und dem 15.12.2020. Die ersten zehn Peilfahrten liegen vor dem Beginn des Technischen Tests, die nachfolgenden 9 während bzw. danach. Die eingezeichnete schwarze Linie ist der aus 97 Peilfahrten errechnete Mittelwert des Referenzprofils. Die Solltiefe im Bereich der Hafeneinfahrt beträgt $S = -8,12$ m SKN und entspricht $-10,50$ m NHN. Aus den folgenden Abbildungen ist ersichtlich, dass die Solltiefe im Bereich der Barre, ausgedrückt durch das mittlere Referenzprofil, um ca. 25 cm unterschritten wird. Da die Tiefen von NPorts durch deren Peilungen um etwa 3-5 dm größer (tiefer) sind liegt der Mittelwert (schwarzes Profil) des Barrenrückens als größte Untiefe unterhalb der Solltiefe und damit nicht im kritischen Bereich. Die Barre weist im gemessenen Querschnitt die mehr oder weniger typische Form eines Sedimentationsmusters im Bereich von Hafeneinfahrten/Einmündungen auf, welche sich durch die sich ausbildende Scherzone und damit angrenzend Bereiche deutlich niedrigerer Strömungsgeschwindigkeit sowie Turbulenz ergeben (Vollmers H., BAW). Die Form der Barre variiert in Abhängigkeit der Geometrie, der Hydrodynamik sowie der Zusammensetzung der bildenden Sedimente. Hohe Sandanteile sprechen für eine steilere flussseitige Böschungsneigung, flachere Neigungen für höhere Anteile von schlackigem (Feinschluff, Ton) Sediment.

Die ersten zehn Abbildungen vor Beginn des Technischen Tests lassen eine Barrenhöhe erkennen, die in neun von zehn Fällen über der mittleren Höhenlage der Barre liegt. „Über“ bedeutet in diesem Fall eine geringere Tiefe. Lediglich in einem Fall am 04. Mai um 12:23 wurde die mittlere Höhenlage um 2-3 cm unterschritten (sie lag also tiefer) wobei die vorangehende Peilung am Morgen des gleichen Tages noch eine deutlich höhere Barre ergab.

Die beiden sich anschließenden Peilungen vom 10. Juli (beide innerhalb des Technischen Tests) liegen wenige Zentimeter über dem Mittelwert (flacher) und spiegeln damit etwa die Verhältnisse bis zu diesem Zeitpunkt wieder.

Die Peilungen am 17. September sowie am 29. Oktober (nach dem Technischen Test) markieren einen deutlichen Anstieg der Barrenhöhe. Neben dem Anstieg ist auch eine Verlagerung der Barre in Richtung Außenhafen festzustellen. Die erreichte Höhe am 17. September wird nur durch die Höhenlage der Barre am 30. April (vor dem Technischen Test) noch übertroffen. Es ist gut erkennbar, dass auch die gemessenen Tiefen im sich anschließenden Außenhafen (zwischen Barre und Randzelbrücke) am 17. September deutlich höher (flacher) als der Mittelwert liegen. Letzter Aspekt ist

jedoch in der Vielzahl der Peilungen auch schon vor dem Technischen Test zu beobachten gewesen, so bspw. am 29. Mai.

Die sich anschließenden Peilungen vom 01. bis 03. Dezember lassen eine Höhenlage im Bereich der mittleren Höhe erkennen. In den letzten beiden Peilungen vom 03. und 15. Dezember liegt die Barre wieder leicht über dem Mittelwert.

Mit Ausnahme der Peilung vom 29. Mai ist über den hier dargestellten Zeitraum eine horizontale Verlagerung von Station 1320 m auf Station 1450 m der Barre in Richtung Außenhafen bzw. Ranzelbrücke erkennbar. Die Ursache ist ohne Hinzunahme weiterer Messdaten nicht ohne weiteres erklärbar. Denkbar ist eine saisonale Änderung im Strömungs- oder Sedimentregime; auch eine geänderte Baggerstrategie seitens der WSV wäre denkbar. Die Entwicklung der jährlichen Zunahmen der Rezirkulationsmengen (s. Berichtsteil NPorts) im Außenhafen in den Jahren 2016 bis 2018 liegt bei jährlich über 50%. Im Jahr 2019 ist ein leichter Rückgang der Rezirkulationsmengen zu beobachten. Das darauffolgende Jahr 2020 reiht sich jedoch wieder in den Trend der bisherigen jährlichen Zuwächse ein. In der Ausarbeitung von NPorts findet sich zusätzlich eine Darstellung von Rezirkulationsmengen (im gleichen Zeitbereich wie der Technische Test sowie aus vorangegangenen Jahren) in der Steigerungen im Außenhafen von über 100% zu erkennen sind, was die Variabilität der Rezirkulationsmengen (auch ohne Technischen Test) darstellt.

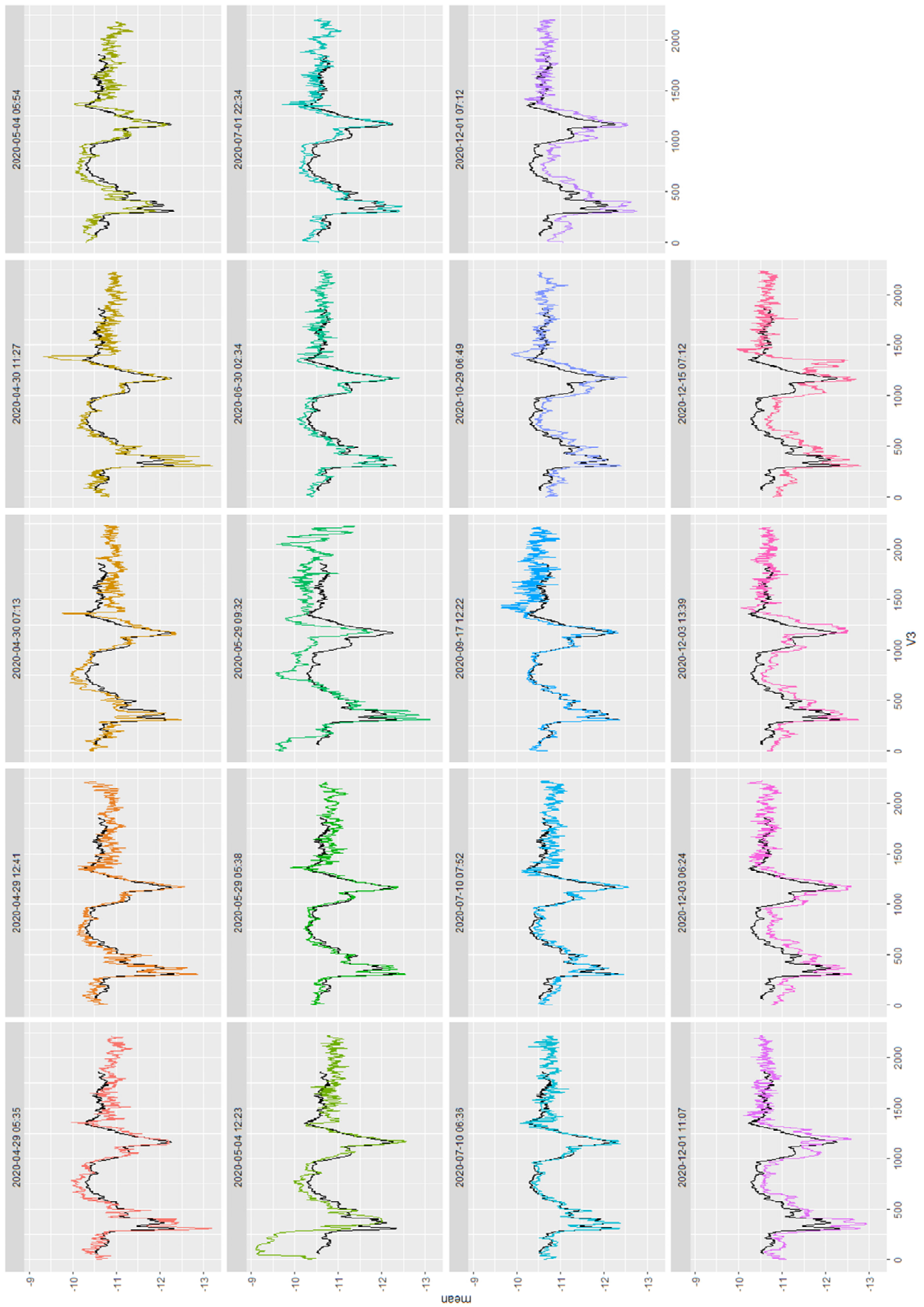


Abbildung 164: Ausgewählte Peilungen über den Zeitraum von April bis Dezember. In Farbe die jeweilige Peilung über dem gemittelten (alle Aufnahmen) Profil in schwarz.

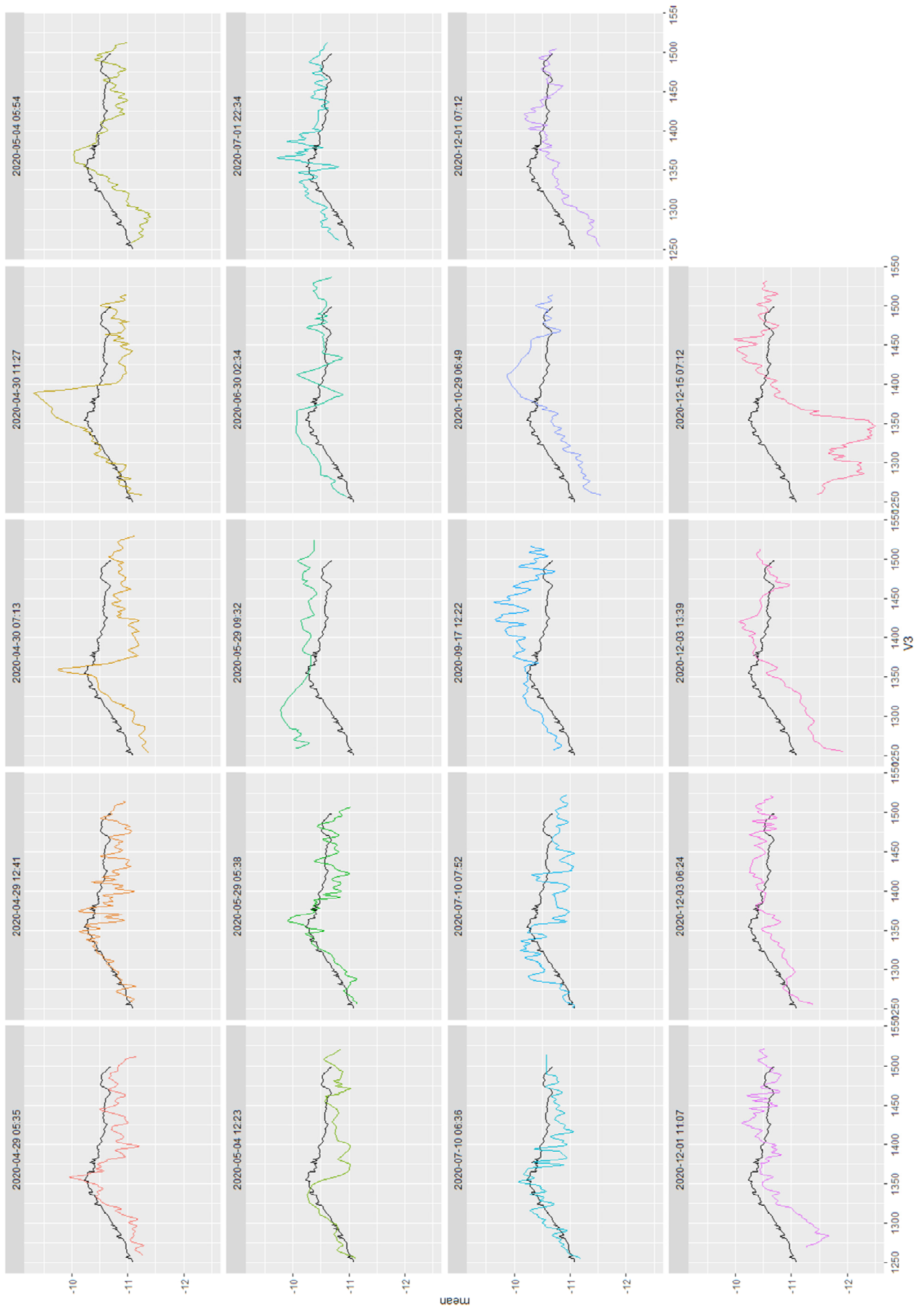


Abbildung 165: Analog zu voriger Abbildung, Fokus auf den Bereich der Barre zwischen Station 1250 m und 1500 m

6.18 Auswirkungen der Tideniedrigwasseranhebung auf die Bewirtschaftung des Emdener Hafens - Monitoringbericht NPorts Emden

Bearbeitet von Bärbel Amman (NPorts Emden)³⁸

6.18.1 Allgemein

Die prognostizierten Auswirkungen der Tidesteuerung und hier insbesondere die prognostizierten Auswirkungen der Tideniedrigwasseranhebung auf den Emdener Hafen sind bezogen auf den Absink eingetreten bzw. leicht übertroffen worden.

Die größten Gefahren wurden im Vorfeld im möglichen Absink, einer möglichen erhöhten Sedimentation, möglichen zeitlichen Einschränkungen im Unterhaltungseinsatz und anderen Unwägbarkeiten in der Folge gesehen. Während des Testbetriebs wurde daher das Unterhaltungsgerät in Standby versetzt. Die folgende Auswertung bezieht sich daher auf mögliche Veränderungen in den erforderlichen Einsatzzeiten (Mehrstunden und Einsatzschwerpunkte), Mengenentwicklungen und Auffälligkeiten im und auch nach dem Testbetrieb. Außerdem wird auf den Umgang mit der Rampenproblematik und dem aufwendigen Prüfverfahren für jede Schiffsabwicklung eingegangen.

6.18.2 Veränderte Einsatzzeiten, Mehrstunden und veränderte Einsatzschwerpunkte

Während des Testbetriebs wurde der Hopperbagger zusätzlich an den Samstagen und Sonntagen jeweils 12 Stunden in Standby vorgehalten bzw. wurde das Gerät in diesen Zeiten eingesetzt. Dazu kamen weitere zusätzliche Standby-Zeiten bzw. Einsatzzeiten an Freitagen, die normal keine Einsatztage gewesen wären. Insgesamt war der Hopperbagger während des Testbetriebs zusätzlich 135 Stunden im Einsatz und 175 Stunden auf Standby, also insgesamt 310 Std zusätzlich, was Mehrkosten verursacht hat.

Es kam ebenfalls zu einer Verlagerung des Einsatzschwerpunktes. Im Normalbetrieb ist pro Monat eine Woche im Standby geplant für Wartung und Reparatur. Den Einsatzschwerpunkt bildet der Neue Binnenhafen, d.h. an den meisten Tagen einer Woche wird mindestens einmal in einem Teil des neuen Binnenhafens gearbeitet.

Während des Testbetriebs von der KW 27 bis KW 33 (Anmerkung 29.06. bis 17.08.2020) nahmen die Tage, an denen im Tidebereich (Außenhafen und Vorhafen) gearbeitet wurde zu. Im Normalbetrieb ist pro Monat eine Woche im Standby für Wartung und Reparatur des Gerätes vorgesehen, während der Testdurchführung entfiel dieser Anteil vollständig. Ohne diese Umstellung wäre die Unterhaltung der Wassertiefen im Emdener Hafen mit einem Gerät nicht möglich gewesen.

Auch nach dem Testbetrieb blieb es bei dem verstärkten Einsatz. Es wurden weiterhin zusätzliche Stunden in den Standby Wochen gearbeitet und auch über den Jahreswechsel keine längere Pause eingelegt.

In der Gesamtbetrachtung des Jahres 2020 ergibt sich folgendes Bild:

³⁸ Siehe auch gesonderten Bericht NPorts im Anhang: NPorts 2021; Testbetrieb Tidesteuerung – Monitoringbericht NPorts Emden; Emden 19.10.2021

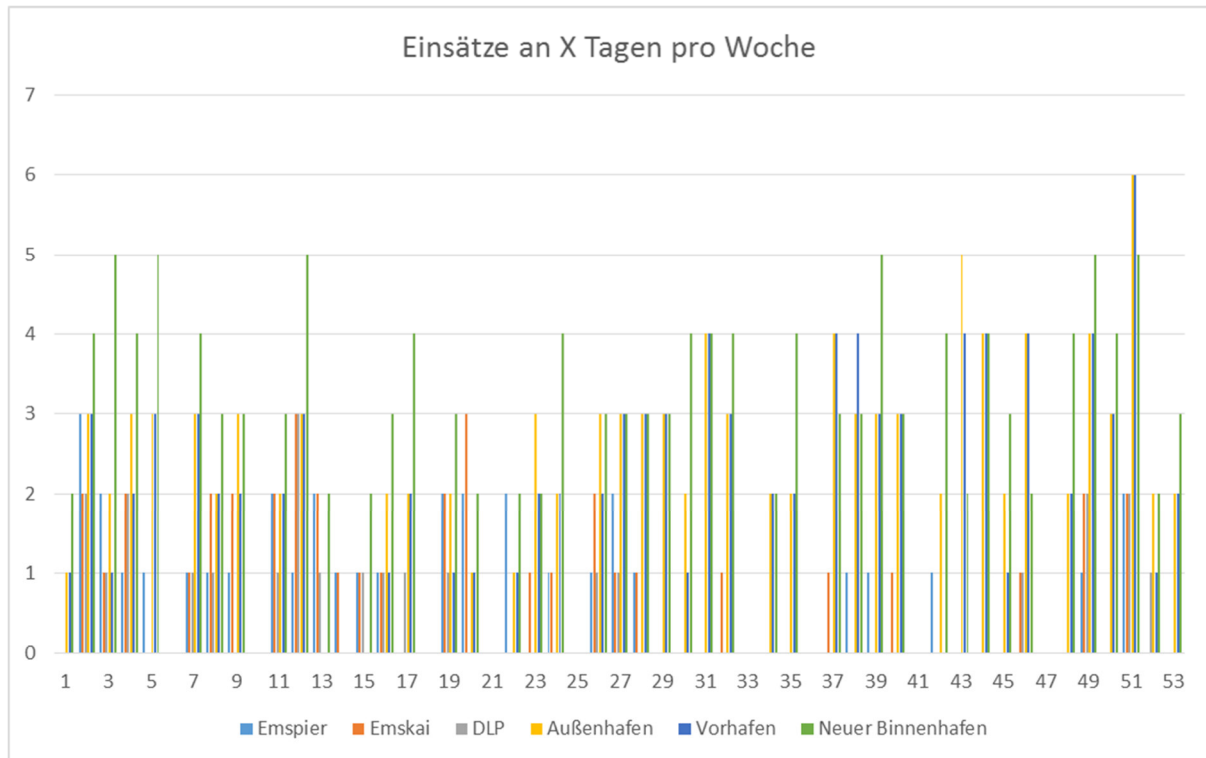


Abbildung 166: Jahresübersicht Einsatzfrequenz Hopperbagger 2020

Bezogen auf die Einsätze pro Woche ergibt sich für das gesamte Jahr ein unterschiedliches Bild für die Liegeplätze an der Ems (Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz) und den Außen- und Vorhafen.

Am Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz nahm die Einsatzhäufigkeit über das Jahr betrachtet ab. Auch während des Testbetriebs wurden in diesem Bereich deutlich weniger Einsätze durchgeführt. Die Einsatzfrequenz korrespondiert mit den Rezirkulationsmengen.

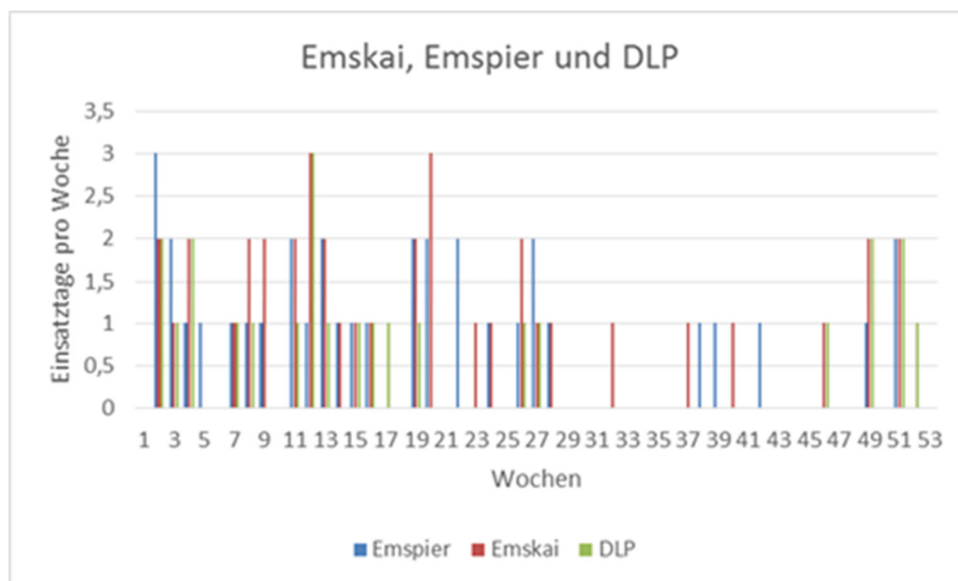


Abbildung 167: Einsätze Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz

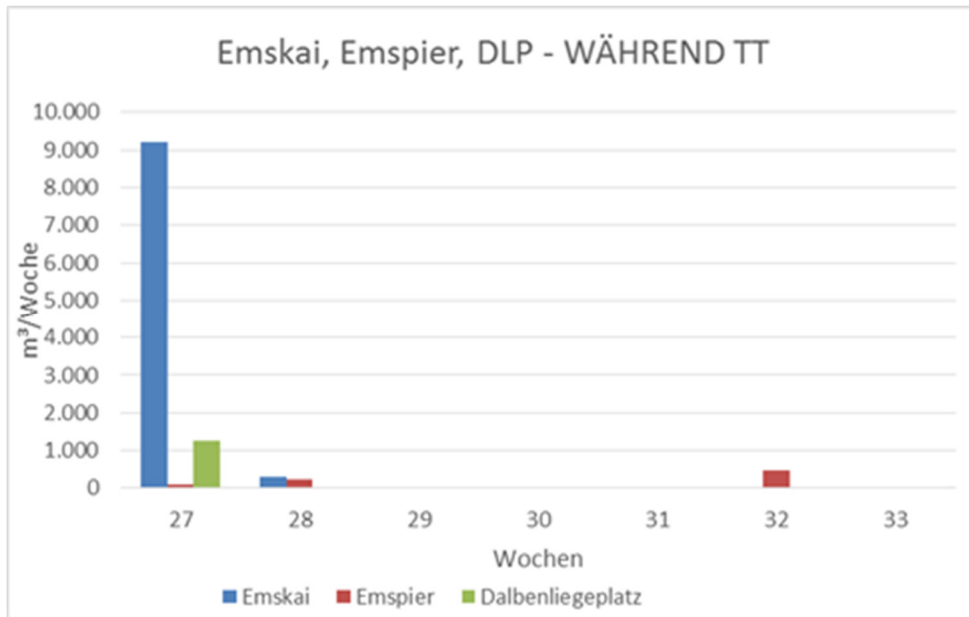


Abbildung 168: wöchentliche Rezirkulationsmengen Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz während des Testbetriebs

Ganz anders war die Entwicklung im Außen- und Vorhafen. Hier fanden im Jahresverlauf zunehmend Baggereinsätze statt.

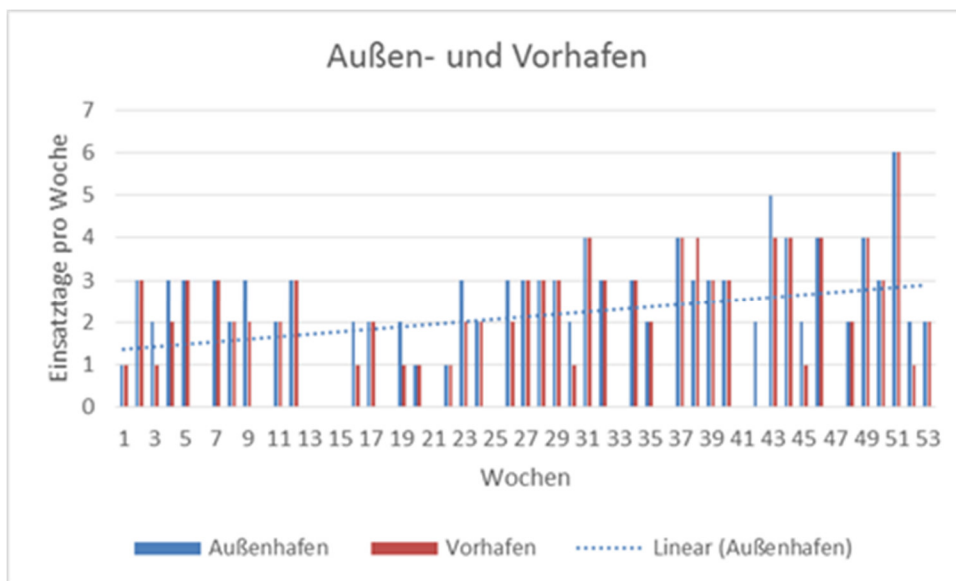


Abbildung 169: Einsätze Außen- und Vorhafen

Die Anzahl der Tage, an denen in den bestimmten Bereichen gearbeitet wurde, sagt noch nichts über den Umfang der dort durchgeführten Arbeiten. Wir erkennen nur, in welcher Frequenz der Einsatz erforderlich war, d.h. die Regelmäßigkeit. Außerdem wird deutlich, dass mehr gearbeitet werden musste, denn die Standby Wochen sind zunehmend entfallen.

Gleichzeitig muss man die Mengenentwicklung im Auge behalten. Für den Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz wurde gezeigt, dass Mengenentwicklung und Einsatzhäufigkeit korrespondieren.

Für den Außen- und Vorhafen wird diese Betrachtung detailliert erfolgen, wichtig ist auch der Zeitraum nach der Tidesteuerung, da es in dieser Zeit in der Unterhaltung zu großen Problemen im Zufahrtbereich zum Hafen kam.

6.18.3 Mengenentwicklungen, auch im Hinblick auf Vergleichszeiträume in den Vorjahren

Immer wieder kommt es zu Schwankungen in den rezirkulierten Mengen. Bei Ausschreibungen wird daher immer das Mittel über die letzten vier Jahre zu Grunde gelegt. Um jetzt Aussagen zur Mengenentwicklung im Zusammenhang mit dem Testbetrieb Tidesteuerung zu machen, werden daher auch die entsprechenden Zeiträume der Vorjahre einbezogen und mit den entsprechenden Zeiträumen (vor, während und nach dem Test, soweit möglich) verglichen. Betrachtet werden jeweils die Kalenderwochen 1 bis 26, 27 bis 33 und 34 bis 53 für den tidebeeinflussten Bereich des Emdor Hafens:

Tabelle 64: Rezirkulationsmengen in Vorjahresvergleichszeiträumen (1.-26. KW, 27.-33. KW, 34.-52. KW)

	KW	Emskai	Emspier	DLP	Außenhafen	Vorhafen	Gesamt
2017	1-26	101.220	60.115	75.595	235.829	98.537	571.296
2018	1-26	156.396	41.086	77.262	335.441	71.660	681.845
2019	1-26	127.669	31.613	55.769	370.374	88.960	674.385
2020	1-26	99.423	72.293	50.003	443.475	103.073	768.267
2021	1-26	166.949	96.685	34.318	727.114	145.032	1.170.098

	KW	Emskai	Emspier	DLP	Außenhafen	Vorhafen	Gesamt
2017	27-33	37.395	5.091	29.126	69.272	36.153	177.037
2018	27-33	14.301	3.939	10.149	155.765	25.533	209.687
2019	27-33	20.349	4.502	9.777	142.220	10.862	187.710
2020	27-33	9.515	977	1.255	222.774	49.785	284.306
2021	27-33	18.490	8.485	4.394	157.326	47.725	236.420

	KW	Emskai	Emspier	DLP	Außenhafen	Vorhafen	Gesamt
2017	34-52	83.574	21.966	30.625	198.268	40.958	375.391
2018	34-52	20.747	4.216	23.264	414.035	89.597	551.859
2019	34-52	41.994	9.549	27.919	403.361	109.161	591.984
2020	34-52	897	4.135	16.607	638.766	192.840	853.245
2021							

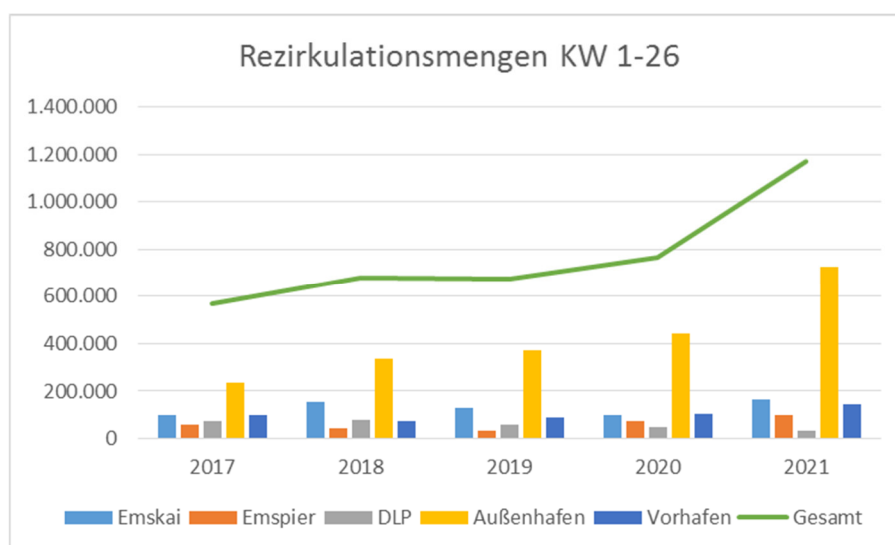


Abbildung 170: Rezirkulationsmengen in Vorjahresvergleichszeiträumen (1.-26. KW)

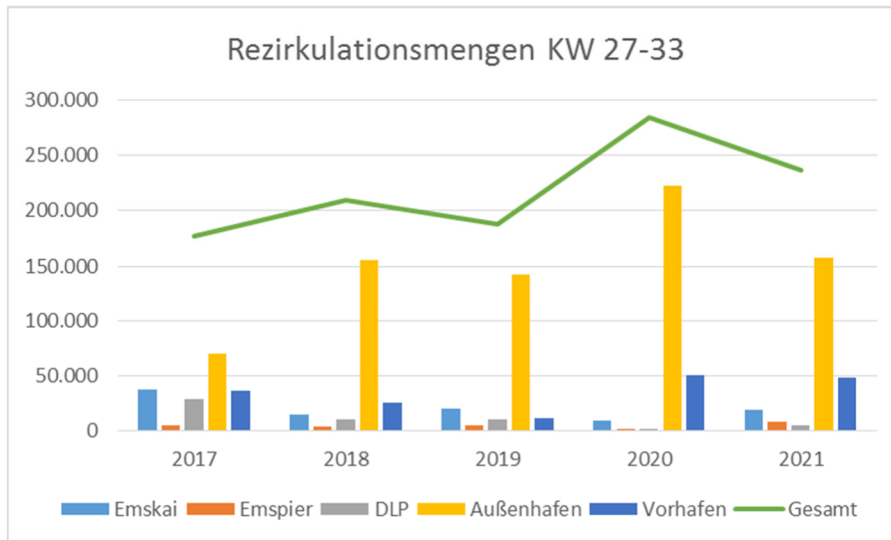


Abbildung 171: Rezirkulationsmengen in Vorjahresvergleichszeiträumen (27.-33. KW)

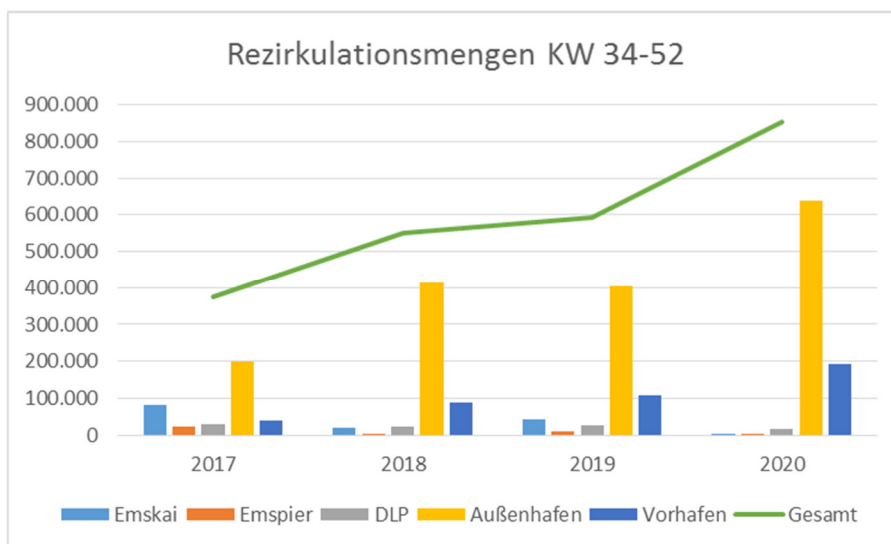


Abbildung 172: Rezirkulationsmengen in Vorjahresvergleichszeiträumen (34. -52. KW)

Während die Mengen an Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz zurückgingen, haben sie im Außen- und Vorhafen zugenommen. Der Rückgang am Emskai erklärt sich dadurch, dass der Einsatz in 2017 sehr hoch war, da intensiv für neue Verkehre (Zellulosestiefgänger) gearbeitet wurde. Seitdem hält sich der Aufwand auf etwa einem Niveau. Am Dalbenliegeplatz wurde im Zusammenhang mit der Vertiefung der Emspier 2019 ebenfalls eine Entnahmebaggerung durchgeführt, so dass sich hier der Aufwand entsprechend reduzierte.

Im Außen- und Vorhafen sieht man, dass es auch in den Vorjahren zu Schwankungen kam, allerdings ist die Zunahme in 2020 gravierend. Noch nicht enthalten sind im Stundenlohn gebaggerte Mengen.

Bezogen auf die Jahresrezirkulationsmengen ergibt sich das gleiche Bild:

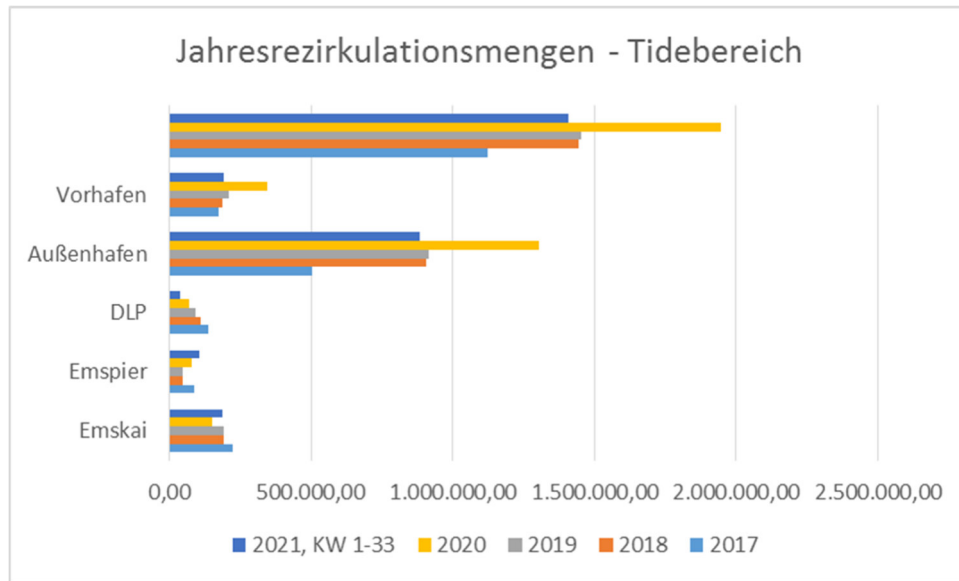


Abbildung 173: Jahresrezirkulationsmengen 2016 bis 2020 und 2021 bis KW 33

Im Bereich der Stromkajen Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz gab es keine gravierenden Veränderungen (siehe oben). Die Gesamtrezirkulationsmenge im Tidebereich hat in 2020 durch die starke Zunahme im Bereich Außen- und Vorhafen jedoch gravierend zugenommen. Für 2021 liegen erst Rezirkulationsmengen für den Zeitraum KW 1 bis KW 33 vor. Es wird jedoch schon sehr deutlich, dass die Rezirkulationsmengen im Außenhafen und Vorhafen weiterhin sehr hoch sind und dass es auch zu Zunahmen im Bereich der Stromkajen kommt.

Im Bereich des Außen- und Vorhafens soll hier genauer auf die Entwicklungen eingegangen werden, da die Jahresmengen beträchtlich zugenommen haben und es auch nach dem Testbetrieb zu auffälligen Veränderungen kam.

Im Außen- und Vorhafen bietet sich vor dem Testbetrieb Tidesteuerung ein uneinheitliches Bild bezogen auf die Mengenentwicklung. Die Wochenrezirkulationsmengen schwanken, Standby-Wochen sind deutlich zu erkennen.

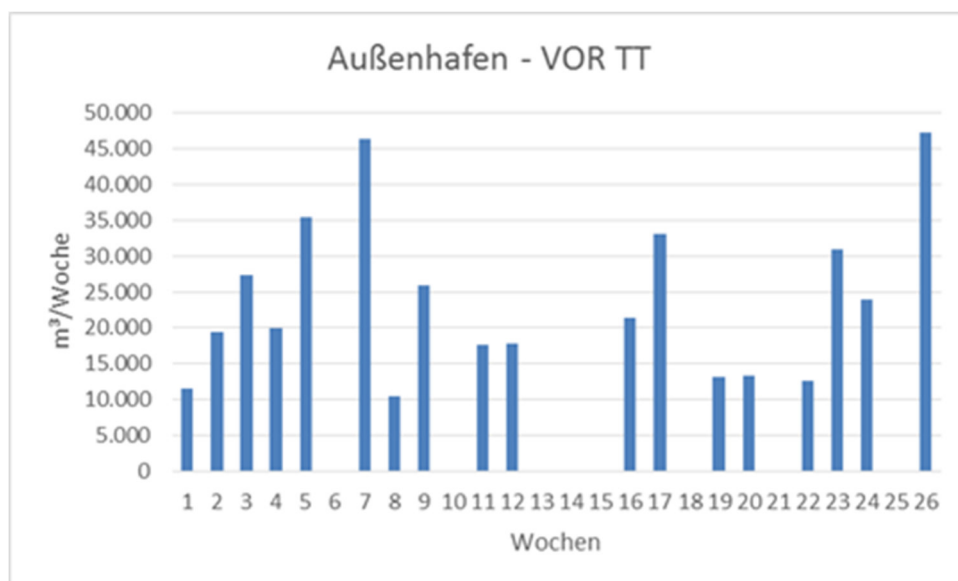


Abbildung 174: Rezirkulationsmengen Außenhafen im Zeitraum KW 1. – 26. 2020 (vor Testbetrieb)

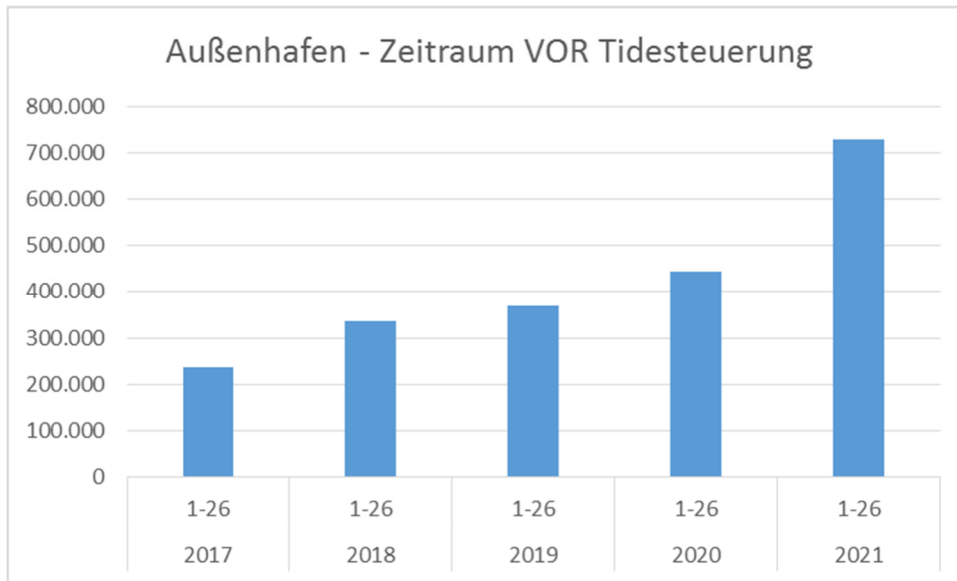


Abbildung 175: Rezirkulationsmengen Außenhafen – Zeitbereich KW 1-26 verschiedener Jahre im Vergleich

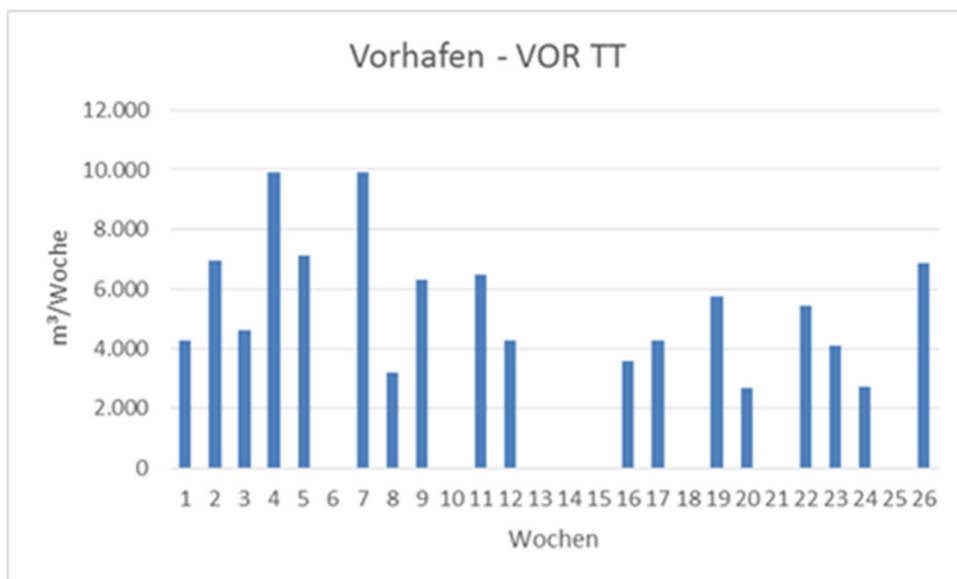


Abbildung 176: Rezirkulationsmengen Vorhafen im Zeitraum KW 1. – 26. 2020 (vor Testbetrieb)

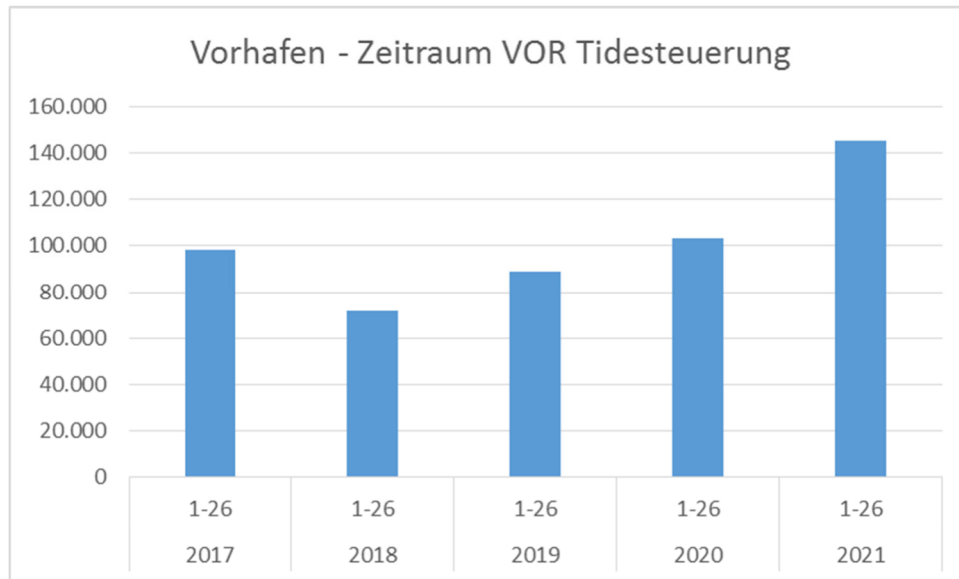


Abbildung 177: Rezirkulationsmengen Vorhafen – Zeitbereich KW 1-26 verschiedener Jahre im Vergleich

In 2021 blieben die Rezirkulationsmengen im Außenhafen im Vergleichszeitraum KW 1 bis 26 allerdings auf sehr hohem Niveau. Die später beschriebene Barrenbildung im Zufahrtsbereich zum Außenhafen, die noch Anfang 2021 zu beobachten war, hat sich hier niedergeschlagen.

Während des Testbetriebs pendeln sich die Wochenmengen auf einem mittleren Niveau ein. Es gibt keine Woche ohne Einsatz.

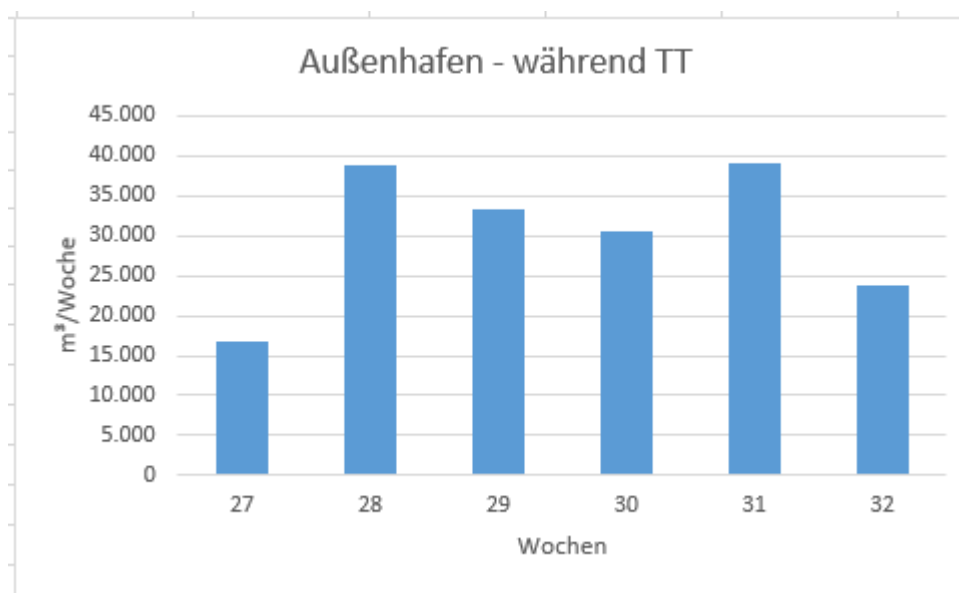


Abbildung 178: Rezirkulationsmengen Außenhafen im Zeitraum KW 27. – 32. 2020 (Testbetrieb)

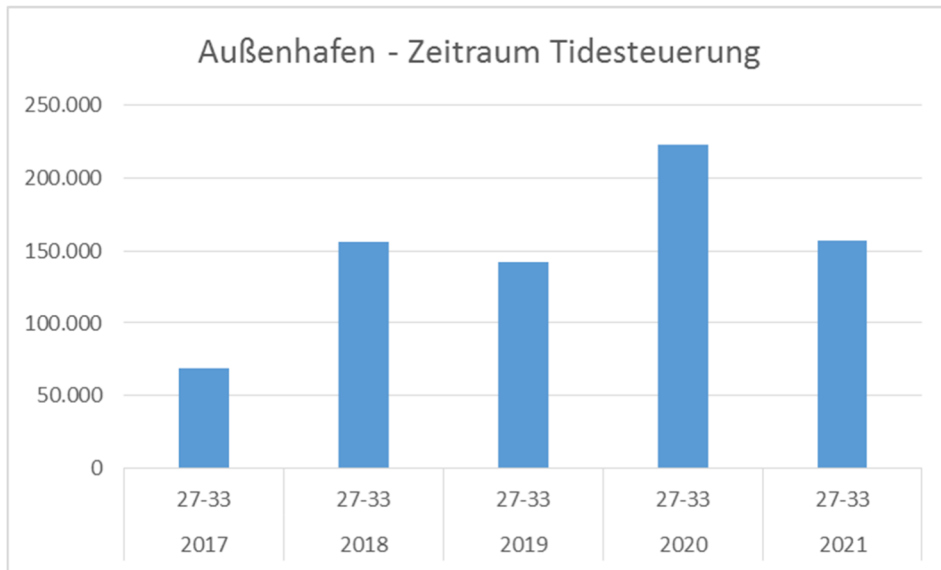


Abbildung 179: Rezirkulationsmengen Außenhafen – Zeitbereich KW 27-33 verschiedener Jahre im Vergleich

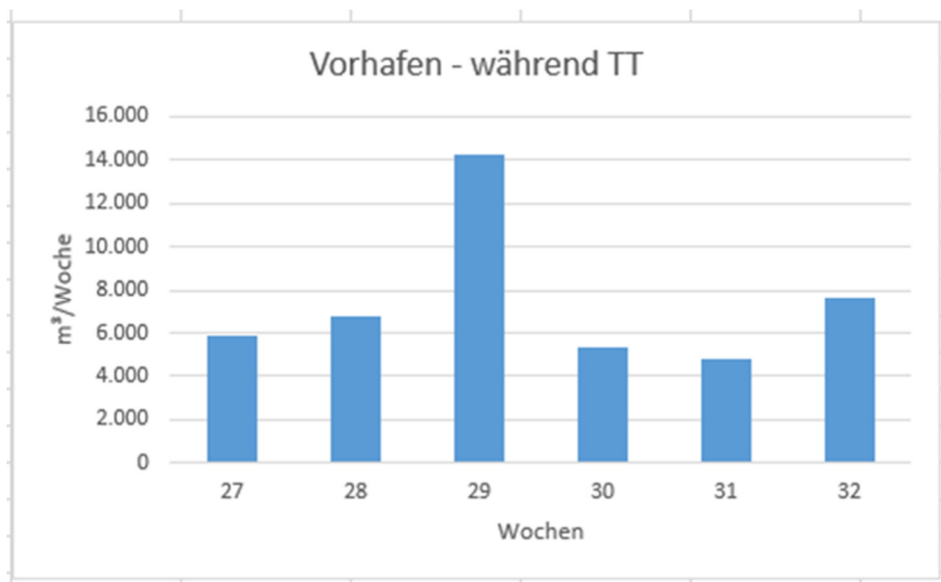


Abbildung 180: Rezirkulationsmengen Vorhafen im Zeitraum KW 27. – 32. 2020 (Testbetrieb)

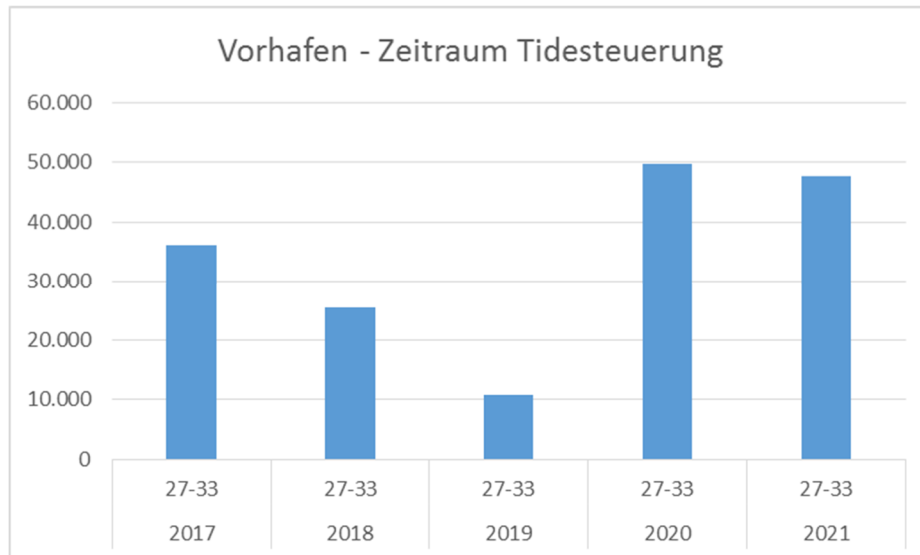


Abbildung 181: Rezirkulationsmengen Vorhafen – Zeitbereich KW 27-33 verschiedener Jahre im Vergleich

Hier erkennt man, dass sich die Situation im Zufahrtsbereich zum Außenhafen wieder stabilisiert hat, allerdings auf hohem Niveau. Das gleiche gilt für den Vorhafen.

Mit Ende des Testbetriebs stellt sich jedoch nicht wieder die Situation vor dem Test ein. Die Wochenrezirkulationsmengen bleiben auf hohem Niveau, weiterhin wird nahezu jede Woche gearbeitet.

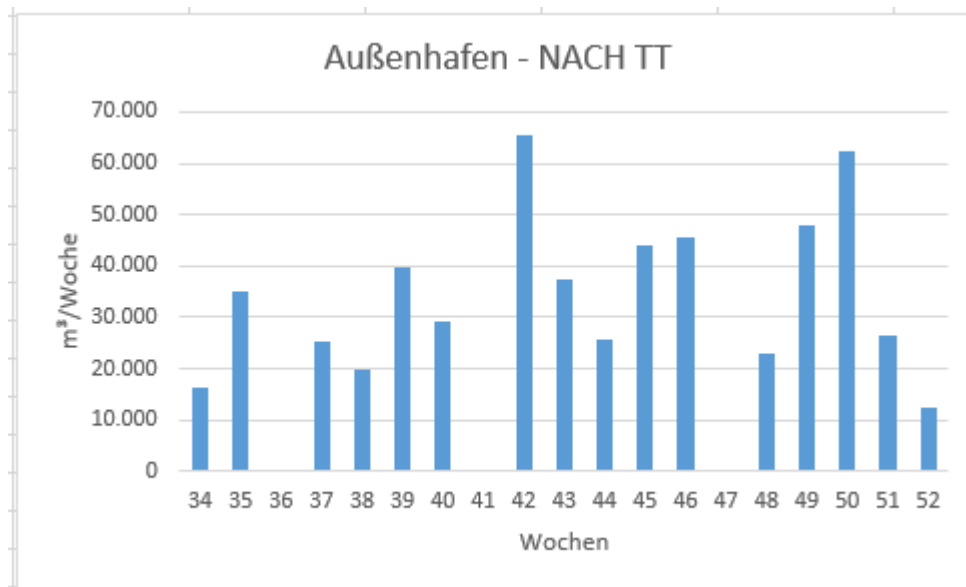


Abbildung 182 Rezirkulationsmengen Außenhafen im Zeitraum KW 34. – 52. 2020 (nach Testbetrieb)

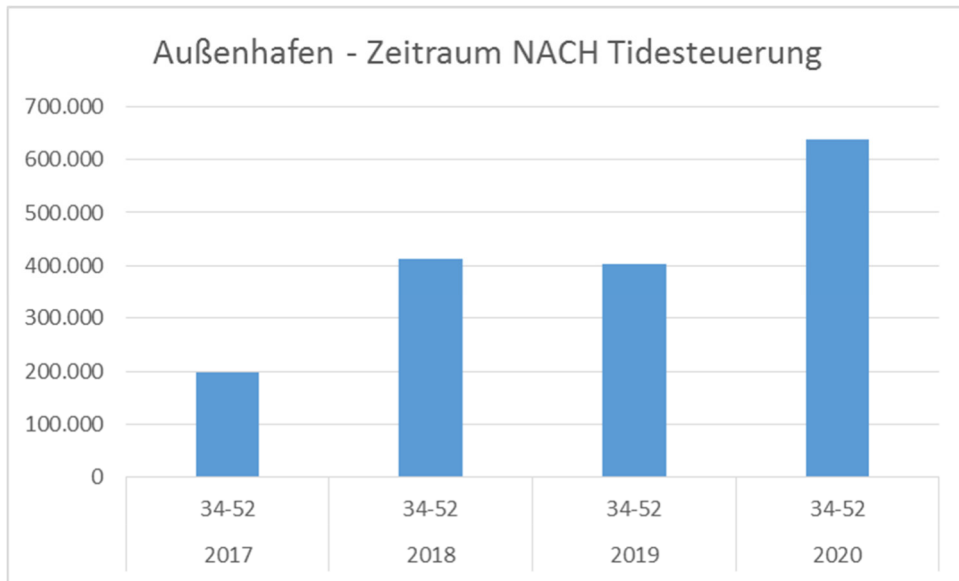


Abbildung 183: Rezirkulationsmengen Außenhafen – Zeitbereich KW 34-52 verschiedener Jahre im Vergleich

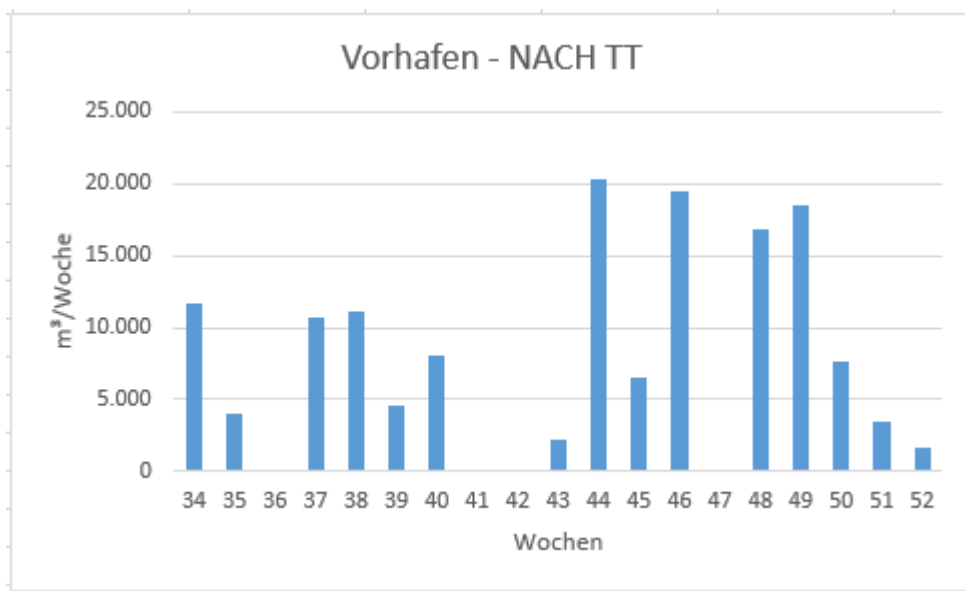


Abbildung 184: Rezirkulationsmengen Vorhafen im Zeitraum KW 34. – 52. 2020 (nach Testbetrieb)

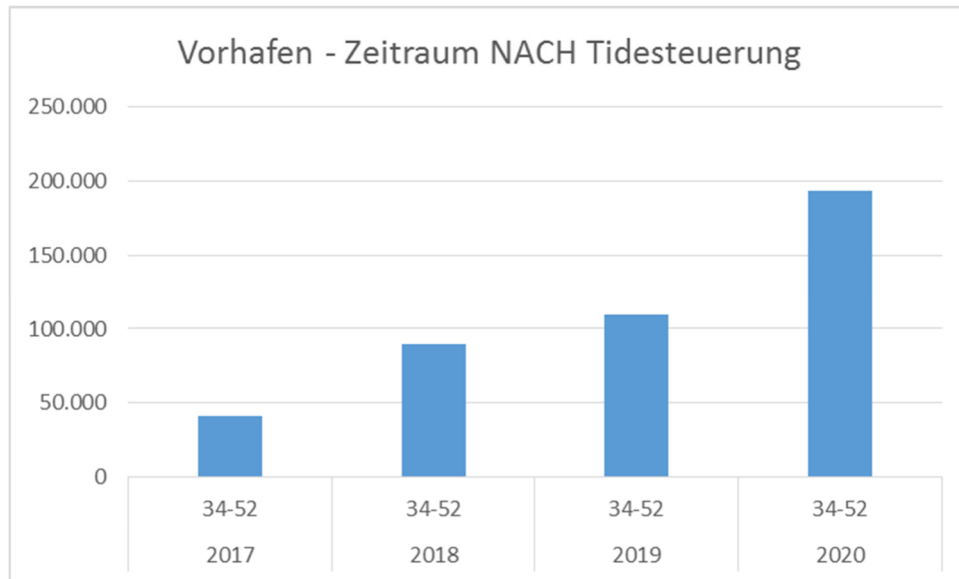


Abbildung 185: Rezirkulationsmengen Vorhafen – Zeitbereich KW 34-52 verschiedener Jahre im Vergleich

Bei genauer Betrachtung stellen wir fest, dass es nicht wie erwartet während des Testbetriebs zu einer Zunahme der Rezirkulationsmengen kam, sondern dass im Bereich der Hafenzufahrt (Außen- und Vorhafen) erst nach Ende des Testbetriebs die Rezirkulationsmengen exorbitant zugenommen und damit den Unterhaltungsbagger in diesem Bereich gebunden haben:

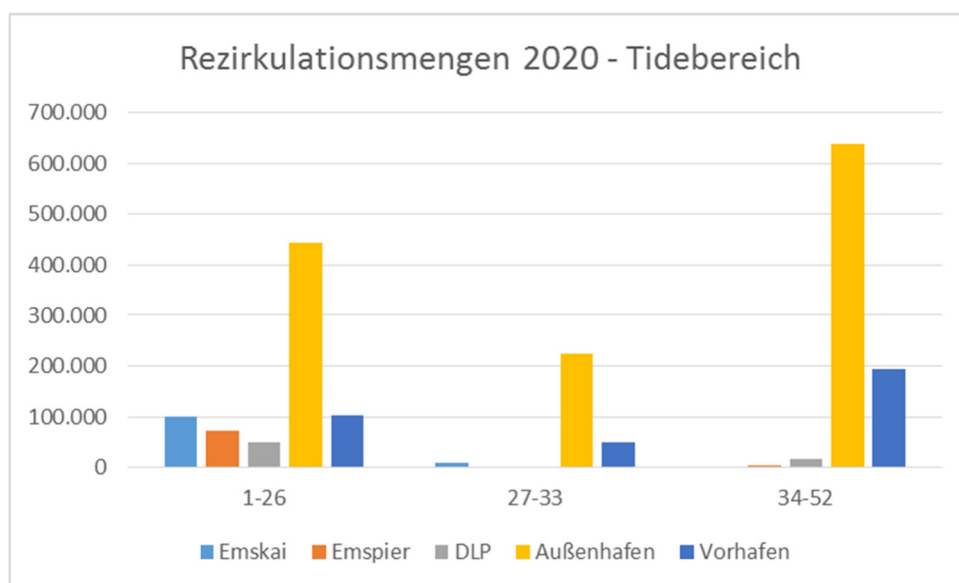


Abbildung 186: Vergleich Rezirkulationsmengen vor, während und nach Testbetrieb im Tidebereich

Deutlich wird, dass die größte Zunahme nach Abschluss des Testbetriebs erfolgt ist.

Auch in 2021 hat sich in der Unterhaltungsbaggerung nicht die Situation wieder eingestellt, die vor dem Testbetrieb war. Bereits in den KW 1 bis 33 in 2021 liegt die gesamte Rezirkulationsmenge im Tidebereich mit rd. 1.400.000 m³ in etwa auf dem Niveau von 2019 für die KW 1 bis 52!

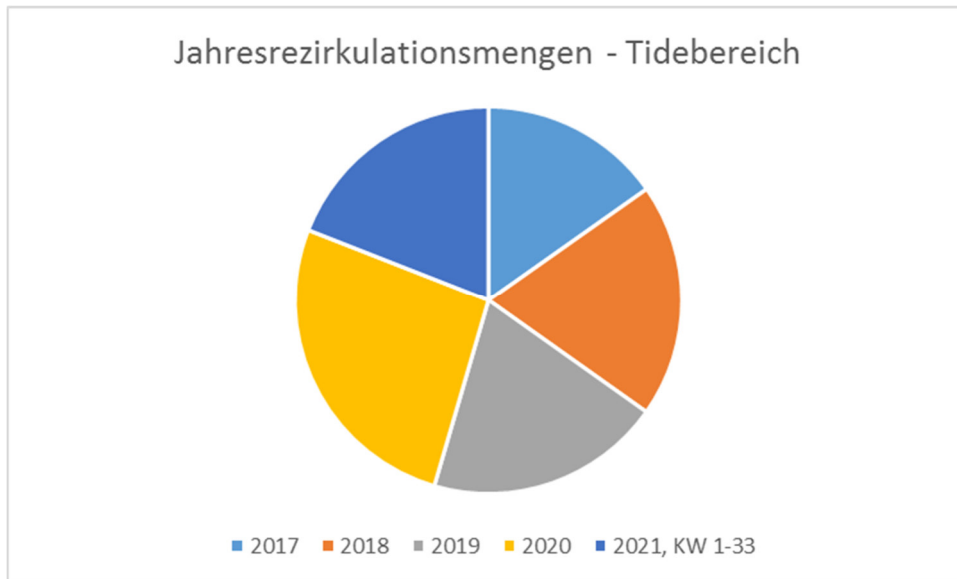


Abbildung 187: Jahresrezirkulationsmengen Tidebereich 2017 bis 2021 (in 2021 bisher nur Daten KW 1 bis 33!)

6.18.4 Auffälligkeiten während des Testbetriebs

Während der Tidesteuerung wurden auch die Kontrollpeilungseinsätze verstärkt, um sofort auf Veränderungen reagieren zu können. Eine dieser Kontrollpeilungen wies in der 28. KW eine Untiefe im Bereich des Emskai aus. Daraufhin wurde umgehend ein Baggereinsatz durchgeführt, allerdings wurde kaum Material gebaggert. Als gebaggertes Material werden im Tidebereich Dichten $> 1,20 \text{ t/m}^3$ erfasst; dies wurde so festgelegt, da die Wassertiefe im Hafen Emden parametrisch bestimmt wird. Neben der regelmäßigen Kontrollpeilung mit 15 kHz, die die „Unterkante“ des Fluid Mud Körpers, also den Bereich des Übergangs vom schiffbaren Fluid Mud zum sedimentierenden Fluid Mud erfasst, werden die Parameter Dichte und Scherfestigkeit zur Kontrolle herangezogen. Die Peilung wies eine Untiefe aus, allerdings war kaum Material mit einer Dichte $> 1,20 \text{ t/m}^3$ in der Liegewanne zu baggern. Solches kann passieren, wenn sich Schichten bilden, in denen Sandanteile auf der Fluid-Mud-Schicht die Peilung verfälschen.

Dieses Phänomen wurde im Verlauf der Tidesteuerung mehrfach am Emskai und auch am Liegeplatz VW A beobachtet.

6.18.5 Auffälligkeiten nach Beendigung des Testbetriebs

Nach Beendigung der Tidesteuerung wurde in der Monatspeilung am 20.10.2020 eine Barrenbildung im Außen- und Vorhafen festgestellt, die sich deutlich von den normalen Tendenzen in diesem Bereich unterscheidet:

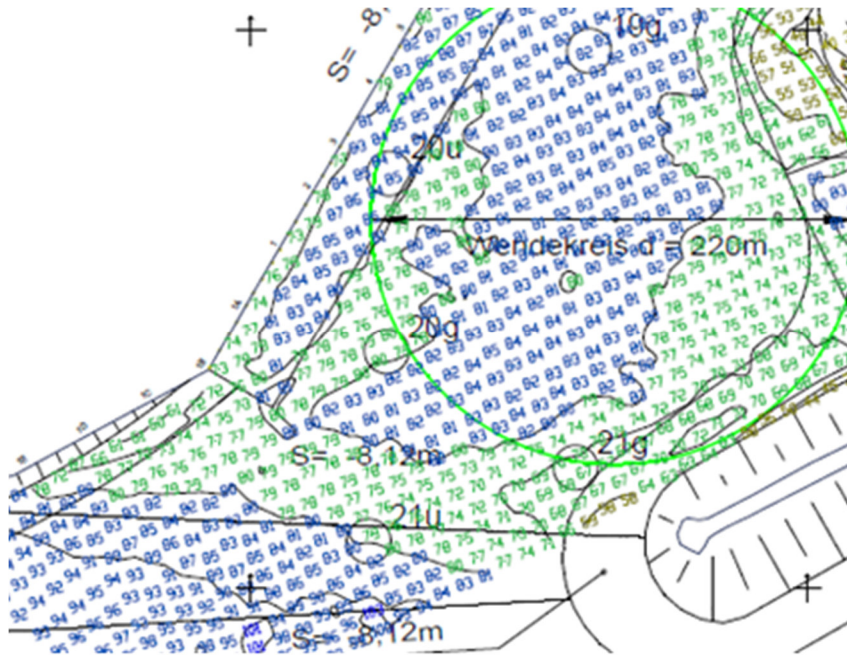


Abbildung 188: Ausschnitt aus Peilplan 2020-10-20, Außenhafen, Peilung Zufahrt Außenhafen vom 20.10.2020

Umgehend wurde der Bereich intensiv gebaggert (Außenhafen 32.131 m³, Vorhafen 2.178 m³) und dann am 22.10.2020 erneut gepeilt. Da die Barre weiterhin vorhanden war, wurde der intensive Baggereinsatz über die Folgetage fortgesetzt und begleitend gepeilt.

Obwohl intensiv im Zufahrtsbereich zum Außen- und Vorhafen rezirkuliert wurde, konnte die Sollwassertiefe nicht hergestellt und gehalten werden. Im ausführlichen Monitoringbericht NPorts Emden, der in der Anlage beigefügt ist, wird diese Situation ausführlich beschrieben.

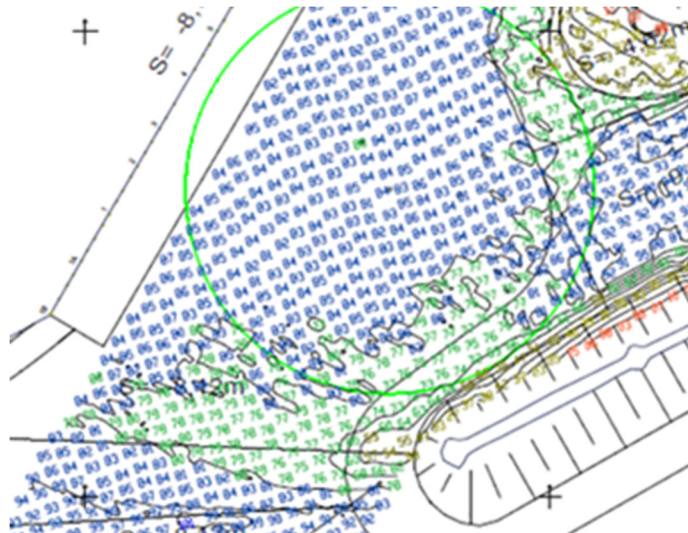


Abbildung 189: Ausschnitt aus Peilplan 2020-10-30, Vorhafen, Peilung Zufahrt Außenhafen vom 30.10.2020

Es zeichnete sich ab, dass durch Rezirkulation das Problem nicht in den Griff zu bekommen war. Es wurden außerdem Proben aus den Punkten 15G, 20G, 21G und 21U entnommen und Kornkurven erstellt, um das Material beurteilen zu können:



Abbildung 190: Ausschnitt aus 2020-05-27_Probenentnahmepunkte_ungrade_und_grade_Monate

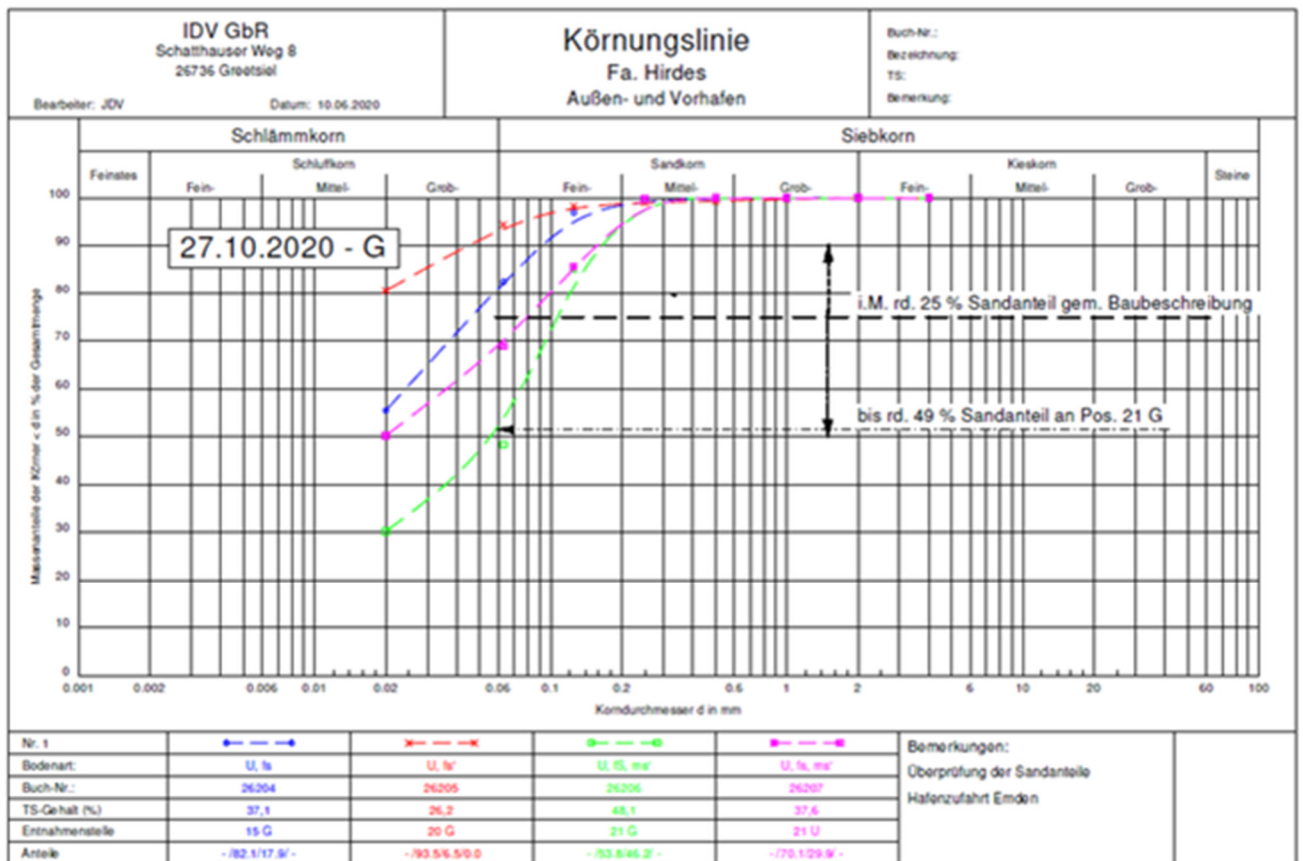


Abbildung 191: Kornkurven 15G, 20G, 21G und 21U

Bei den festgestellten Sandanteilen stößt das Rezirkulationsverfahren an seine Grenzen und birgt die Gefahr der Separation von Sand. Hinzu kommt, dass durch den intensiven Einsatz im Zufahrtsbereich zum Außenhafen der Bagger gebunden ist und somit an anderer Stelle Einsatzstunden fehlen. Das kann im übrigen Hafengebiet sehr schnell zu Problemen führen, da im Unterhaltungsgebiet jeder Hafenteil in einem Turnus bearbeitet werden muss.

Aufgrund des zeitlichen Zusammenhangs kann derzeit nicht abschließend sicher ausgeschlossen werden, dass es sich bei der Barrenbildung um „morphologischen Nachlauf“ des Technischen Tests handelt. Da die Barre aus sandigem Material bestand, wurden auf Grundlage der wasserrechtlichen Erlaubnis für den Technischen Test vom 8. Juni 2020, Nebenbestimmung Nr.14 mit Unterstützung des WSA Ems-Nordsee zwei unterstützende Entnahmebaggerungen durchgeführt und insgesamt 20.000 m³ durch den für das WSA-tätigen Hopperbagger TRISTAO DA CUNHA entnommen und verklappt.

Mit dem Jahreswechsel 2020/2021 hat sich die Lage im Zufahrtbereich zum Außenhafen wieder stabilisiert. Die Unterhaltung der Wassertiefen kann derzeit wieder durch Rezirkulation, d. h. ohne Entnahme sichergestellt werden. Es wird weiterhin in kurzen Abständen gepeilt und intensiv im Zufahrtbereich unterhalten. Zusätzlich werden monatlich Kornkurven aus 6 festgelegten Probenentnahmepunkten genommen (Lageplan siehe Abbildung 190): im Vorhafen Punkt 15, im Außenhafen die Punkte 19, 20 und 21, und zum Vergleich die Punkte 23 und 24 im Bereich Emskai:

Tabelle 65: Sandanteile monatliche Proben 15, 19, 20, 21, 23 und 24, Lage der Probenentnahmepunkte siehe Abbildung 190

Sandanteil >63µm %		Tideabhängiger Bereich																	
		Vorhafen			Außenhafen						Emskai			Emspier			DLP		
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
2020	Nov.			18				7	49	65	75	75	35	40	40	50	?		
	Dez.			20			10	12	50		35	80							
2021	Jan.			18			4	4	25		41	48							
	Feb.			12			2	17	65		14	34							
	März																		
	April			9			1	7	59		49	65							
	Mai			6,3			1,9	3,6	23,1		25,9	18,1							
	Juni			11			2	4	20		65	22							
	Juli			4			1	2	25		42	69							
	August			6			2	4	20		36	57							
	Sept.			12			2	3	29		70	39							
	Okt.																		
	Nov.																		
	Dez.																		

Es ist auffällig, dass die Sandanteile in der Zeit, in der intensiv gegen die Barre gearbeitet werden musste (Oktober bis Dezember) im Außenhafenzufahrtbereich sehr hoch waren. Seit sich dort die Lage entspannt hat, scheinen auch die Sandanteile wieder abgenommen zu haben, allerdings mit starken Schwankungen und zeitlich verzögert. Diese monatlichen Untersuchungen werden fortgesetzt.

Seit Ende des Testbetriebs Tidesteuerung bis Ende Dezember 2020 wurden schwerpunktmäßig im Zufahrtbereich Außenhafen rd. 750.000 m³ und im Vorhafen rd. 225.000 m³ rezirkuliert, um die Zufahrt zum Hafen Emden aufrecht zu erhalten (siehe Abbildung 186: Vergleich Rezirkulationsmengen vor, während und nach Testbetrieb im Tidebereich)

Im Normalfall gehen wir im Außenhafen von rd. 638.000 m³/Jahr und im Vorhafen von 181.000 m³/Jahr aus (Grundlage bildet das Mittel der vorhergehenden 4 Jahre). In 2020 wurden diese Ansätze jedoch bei weitem übertroffen, hauptsächlich durch den erhöhten Rezirkulationseinsatz nach dem Testbetrieb Tidesteuerung im Zusammenhang mit der Barrenbildung im Zufahrtbereich Außenhafen.

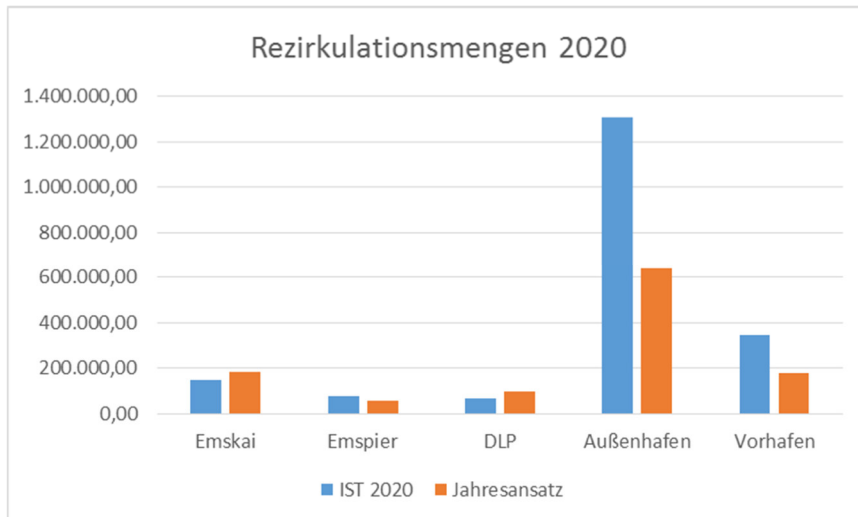


Abbildung 192: Rezirkulationsmengen 2020 - Jahresansatz gemäß Ausschreibung und tatsächliche Rezirkulationsmenge

Seitdem sich die Situation im Zufahrtsbereich zum Außenhafen entspannt hat, haben sich die Rezirkulationsmengen im Bereich Emskai, Emspier, Dalbenliegeplatz und Zufahrten stark erhöht. Dieser Bereich wird weiterhin intensiv gepeilt und beobachtet.

6.18.6 Umschlag / Beschreibung der Rampenproblematik

In der Testphase hat sich gezeigt, dass der prognostizierte Absenk in Folge der Tideniedrigwasser-Anhebung von bis zu 40-50 cm (35 cm im Mittel) tatsächlich zu erheblichen Beeinträchtigungen der Nutzbarkeit der RoRo-Rampen der Schiffe führt.

Eine der großen Herausforderungen bei der Abwicklung von RoRo-Schiffen liegt darin, die Laderampe der Schiffe über die Abfertigungszeit arbeitsfähig zu halten. Die Rampe muss immer oberhalb der Kaikante bleiben und darf diese nicht berühren. Schon jetzt wird bei den meisten Schiffen das Vorschiff tiefer geballastet und zusätzlich Backbord-Schlagseite gegeben, um das Heck (Rampe zur Kaikante) höher zu bekommen (siehe Abbildung 193).



Abbildung 193: Heckrampe Autotransporter am Emskai (Quelle: NPorts)

Damit entsteht aber auch ein größerer Tiefgang. Bei einer Verringerung der Wassertiefe bis zu 40-50 cm (35 cm im Mittel) in Kombination mit einer gemäß Prognose verstärkten Sedimentation kann die Heckrampe bei den meisten der RoRo - Schiffe über den Tideniedrigwasser - Zeitraum für ca. 1 – 4 Stunden nicht mehr arbeitsfähig gehalten werden, d.h. der Umschlag muss eingestellt werden.

Ein begleitendes Justieren der Heckrampen zu dem schlagartig sinkenden Wasserstand kann durch die hydraulischen Heckrampen nicht sichergestellt werden, da der Steuerungsprozess dafür zu „träge“ ist. Auch der Einsatz von Seitenrampen stellt keine Lösung dar, da diese bei den meisten Schiffen nicht mehr höhenverstellbar sind.

In einem solchen Fall muss der Lade- / Löschbetrieb unterbrochen werden, in der Folge verlängern sich die Abfertigungszeiten der Schiffe. Es entstehen hohe Kosten für alle Ladungsbeteiligten. Auch in diesem Fall kann es zu Verzögerungen für nachfolgende Schiffe kommen, der Emden Hafen wird für die Reeder und Kunden unzuverlässig. Diese Folgen bedeuten für den Emden Hafen gravierende Probleme, die weitreichende Konsequenzen auf das Image des Hafens haben.

Der Einsatz der mobilen RoRo-Rampen (Liegeplatz Außenhafen und Dalbenliegeplatz) ist hingegen weitestgehend unproblematisch. Diese bleiben auch bei niedrigen Wasserständen arbeitsfähig.

Durch die Tidesteuerung entsteht in der HBZ (Hafenbetriebszentrale) ein zusätzlicher Aufwand: es muss geprüft werden, ob die angemeldeten Fahrzeuge durch das niedrigere NW betroffen sind. Das betrifft auch die Schiffe/Liegeplätze im Außenhafen, die nicht zu den wirklichen Tiefgängern gehören. Wenn ja, ist eine Überwachung notwendig (Berechnung und Benachrichtigung von Betroffenen, ggfs. Aussetzen der Steuerung oder Unterbrechung des Verladevorgangs). Durchschnittlich sind das zurzeit 4 Fahrzeuge pro Tag oder ca. 120 pro Monat.

6.18.7 Schleusen

Bereits heute können Ostwindlagen dazu führen, dass der Schleusenverkehr temporär eingestellt werden muss. An der Großen Seeschleuse erfolgt die Betriebseinstellung bei NN < -2,50 m, an der Nesserlander Schleuse bei NN -2,30 m. Das mittlere Tideniedrigwasser liegt bei NN -1,74 m. Fällt dieser

Wert um die prognostizierten Werte niedriger aus, so steigt die Wahrscheinlichkeit von Schleusensperrungen und damit von Wartezeiten für die Schifffahrt stark an.

6.18.8 Binnenhafen

Sedimentation / Baggerunterhaltung

Der Binnenhafen wird ebenso wie der Außenhafen im Rezirkulationsverfahren unterhalten. Dabei wird ein Fluid Mud Körper im Binnen- und Außenhafen und an den Emsliegeplätzen aufrechterhalten und regelmäßig rezirkuliert. Es besteht derzeit ein Gleichgewicht, das dafür sorgt, dass weder Material aus dem Hafen in die Ems fließt, noch in umgekehrter Richtung. Eine Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen im Emders Fahrwasser im Bereich der Hafenzufahrt könnte diese Verhältnisse umkehren, so dass möglicherweise mehr Material in den Außenhafen und über die Schleusen in den Binnenhafen gelangt. Das würde den erforderlichen Unterhaltungsaufwand erhöhen und möglicherweise müsste zusätzliches Gerät eingesetzt werden. Da dieser vermutete Effekt sich nicht umgehend einstellt und zu diesem Zeitpunkt nicht ausgewertet bzw. nachgewiesen ist, sind die Ergebnisse des Monitorings für die zukünftig erwarteten Veränderungen maßgeblich.

Hinzu kommt, dass ein erhöhter Einsatzbedarf im tidebeeinflussten Hafenbereich Baggerkapazitäten aus dem Binnenhafen abzieht, was möglicherweise dort zu Problemen führt. Möglicherweise kann die erforderliche Leistung nicht mehr mit einem Gerät erbracht werden und es ist ein zweites Gerät erforderlich. Damit erhöhen sich die Kosten für die Unterhaltung des Hafens Emden.

Nautik / Schifffahrt

Die Auswirkungen auf den Binnenhafen sind gleichlautend zu den Auswirkungen auf den Schleusenbetrieb.

Zusätzlich ist der Wasserverlust durch Schleusungen bei niedrigem Tideniedrigwasser größer und wirkt sich dadurch negativ auf den Hafenwasserstand und Hafenwasserhaushalt aus. Bei ungünstigen Witterungslagen kann dieser Wasserverlust nicht oder nur wenig durch Hochwasser oder Pumpenleistung aufgefüllt werden. In der Folge wird dann wiederum mehr sedimentreiches Material in den Binnenhafen eingetragen.

6.18.9 Maschinentechnik

Es wird vermutet, dass die durch die Tidesteuerung erhöhte Sedimentation im Außenhafen auch Auswirkungen auf die Maschinentechnik der vorhandenen Anlagen haben wird. Dies betreffe sowohl die Technik in den RoRo-Anlagen als auch die Schleusen. Eine erhöhte Sedimentation verursacht womöglich größeren Wartungsaufwand sowie einen schnelleren Verschleiß der Anlagenteile.

Auch die wartungsbedingten Torwechsel an der Großen Seeschleuse müssten gegebenenfalls an kürzeren Abständen erfolgen. Dies verursacht dann neben dem Arbeits- und Maschineneinsatz auch Einschränkungen im Hafenbetrieb.

6.18.10 Belegung der Warteplätze für die Binnenschiffe

Die Liegeplätze im Binnenhafen werden regelmäßig als Warteplatz für den nächsten Umschlag oder für eine günstige Tide zum Auslaufen genutzt. Auch an Wochenenden sowie Feiertagen dienen die Liegeplätze im Binnenhafen als Warteplatz.

Der Binnenhafen kann von den relevanten Fahrzeugen nur durch die beiden Seeschleusen angelaufen werden. Einschränkungen in den Schleusenverkehr wirken sich somit auch auf den Binnenhafen aus.

6.19 Auswirkungen der Tidesteuerung auf den Schiffsverkehr

Bearbeitet von WSA Ems-Nordsee und NPorts

Der technische Test ist für die gewerbliche Schifffahrt aufgrund umfangreicher Vorgespräche und Abstimmungen ohne größere Probleme verlaufen – die Schifffahrtstreibenden waren bereit, konstruktiv mitzuwirken.

Alle während des Versuches vorgetragenen Hinweise bzw. Anmerkungen oder Beschwerden wurden während des Tests im WSA Ems-Nordsee zentral erfasst und durch nachträgliche Interviews validiert und ausgewertet.

Die Seeschifffahrt im Emdener Hafen kam wegen der umfangreichen und detaillierten Einzelabsprachen zwischen allen Beteiligten, hinsichtlich der prognostizierten Auswirkungen in dieser kurzen Testphase relativ gut zurecht. Durch die konstruktive Herangehensweise und das zeitweilige Aussetzen des Tests bei bestimmten Wasserständen, konnte der Umschlag im Hafen jederzeit sicher durchgeführt werden.

Hinsichtlich der Schifffahrt in und aus Richtung Papenburg wurde das Aussetzen der Tidesteuerung bei besonderen Transporten von vornherein berücksichtigt.

Die Binnenschifffahrt hatte ihre Fahrten den Wieder-Öffnungszeiten des Sperrwerks angepasst, teilweise kam es zu vermehrten Brennstoff- und Personalkosten. Im Rahmen der Flutstromsteuerung erwies sich die Sperrung der Wasserfläche ab Emden als ungünstig, da die sehr hohe Anzahl an wartenden Binnenschiffen dadurch die Einfahrt in den Hafen Emden behinderten.

Aus Rücksicht auf die Erfordernisse des Emdener Hafens kurzfristig abgesagte Sperrungen konnten zu Schwierigkeiten in der Gestaltung von Schiffsfahrplänen und damit zu Unregelmäßigkeiten in der Logistikkette führen.

Insgesamt war ein 24/7-Betrieb der Schleuse Herbrum erforderlich. Hinsichtlich der Warteplätze gab es einige Verbesserungsvorschläge. - Die Warteplätze wurden von voll beladenen Binnenschiffen nicht genutzt.

Die Fahrgastschifffahrt hatte sich kooperativ auf den technischen Test eingestellt. Dabei stellte sich auch heraus, dass ein Unternehmen bei dauerhaften Sperrungen, die tagsüber durchgeführt werden, in seiner Existenz bedroht wäre.

Auch die Emsfähre Ditzum berichtete von Behinderungen durch während der Fahrzeiten durchgeführte Tideniedrigwasseranhebungen, da die Außenmuhde aufgrund der Wasserstandsverhältnisse nur mit Einschränkungen zu befahren ist.

Die Sportschifffahrt ist durch gefährliche und leichtsinnige Manöver aufgefallen und war oft nicht informiert. Es ist daher zu überlegen, ob Sperrungen grundsätzlich von Sicherungsfahrzeugen begleitet werden sollten.

Trotz der grundsätzlich positiven Resonanz sollte insgesamt die Information der Schifffahrt, insbesondere der Binnen- und der Sportschifffahrt, noch weiter intensiviert werden.

Um Abhilfemaßnahmen für die prognostizierten Auswirkungen im Emdener Hafen zu ermitteln, wurde von N-Ports bereits ein Gutachten in Auftrag gegeben. Auch das WSA Ems-Nordsee hat zwischenzeitlich ein Gutachten in Auftrag gegeben, in dem die Art der Betroffenheit bei dauerhafter Einführung einer flexiblen Tidesteuerung ermittelt wird und wodurch diese Auswirkungen minimiert werden können. Für die Schifffahrt allgemein sowie auch der Fahrgastschifffahrt gilt es, eine für beide Seiten passende Lösung zu finden.

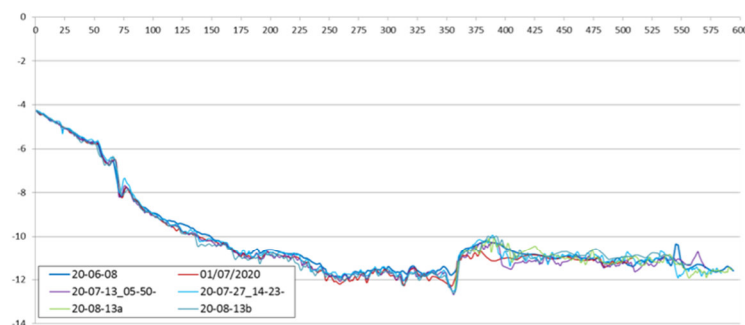
6.20 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse mehrerer Querprofile der Unterems

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)³⁹

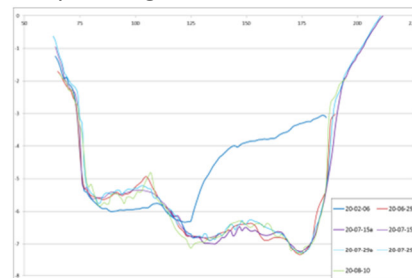
Zur Dokumentation der Veränderung der Gerinnegeometrie, die durch Sedimentation und Erosion verursacht wird und ab einer bestimmten Größenordnung peiltechnisch erfasst werden kann, wurden in drei Bereichen jeweils mehrfach Querprofile aufgenommen:

EFW: Ems-km 40,7 bis 43,
 Jemgum: Ems-km 24 bis 24,
 Papenburg: Ems-km 0 bis 5,

Emder Fahrwasser: 40,7 bis 43



Papenburg: km 0 bis 5



Jemgum: km 19 bis 24



Abbildung 194: beispielhafte Darstellung einiger Querprofile in den jeweiligen Bereichen

Die Vorbereitung der Querprofilaten erfolgte analog der Daten zum Referenzprofil (siehe 6.17). Die Auswertung unterscheidet sich jedoch insoweit vom Referenzprofil als dass die Querprofile eine wesentlich größere Varianz in der Wassertiefe aufweisen, was einerseits offensichtlich so sein muss, andererseits aber die Frage nach der Auswertung, Bedeutung und Darstellung aufwirft. So sind beispielsweise die seitlichen Bereiche des Querprofils (außer Papenburg) anfänglich oftmals flach und je nach Örtlichkeit mit z. T. großen Tiefensprüngen (Unterwasserböschungen), die Bereiche in denen die Fahrrinne liegt eher homogen mit wenig Tiefenvarianz. Die Verteilung der Peilpunkte kann daher entsprechend niedrig in den flachen oder steilen Bereichen und hoch in den tieferen Sohlbereichen bzw. der Fahrrinne sein. Die Auswertung wurde im Vergleich zum Referenzprofil an Tiefenbereichen ausgerichtet da bei den Querprofilen sowohl Flächen gepilt werden die gebaggert werden als auch solche für die dies nicht gilt. Für die Gesamtbetrachtung wurden diese Bereiche dann entsprechend der Anzahl der Peilpunkte, d.h. bei Normierung auf gleiche Peildichte, dann nach Flächenanteilen gewichtet.

Die Querprofile sind vermessungstechnisch durch Referenzpunkte (grün und rot) vermarkt und in der Peilsoftware hinterlegt. Diese Referenzpunkte liegen für die Querprofile in Emden im Einsatzbereich

³⁹ Siehe auch gesonderten Bericht des WSA Ems-Nordsee im Anhang: KREBS 2021; Technischer Test 2020 – Ergebnisbericht des WSA Ems-Nordsee zum durchgeführten Monitoring; Emden Dezember 2021

des Peilschiffes, sodass der gemessene und ausgewertete Bereich nicht am tatsächlichen Fließprofilrand (praktisch hier bspw. der Geiseleitdamm) sondern weiter in Richtung Fahrrinne liegt (vergl. Abbildung 194). Für die Querprofile bei Jemgum und Papenburg liegen die Referenzpunkte an Land, sodass das Peilschiff hier das gesamte Querprofil aufnehmen kann.

In der nachfolgenden Abbildung 195 sind die aufgenommenen Querprofile an der Station 41,9 dargestellt. Die Blickrichtung ist wie in allen nachfolgenden Darstellung von Binnen nach See. An dieser Stelle kann man davon ausgehen, dass das Querprofil tatsächlich vollständig aufgenommen wurde, da offenbar die Auflandung vom Geiseleitdamm in Richtung Fahrwasser schon bis an die Referenzpunkte heranreicht. Erkennbar sind die Baggerfurchen in den tieferen Bereichen (Fahrwasser) sowie die Liegewannen von NPorts im rechten Profilteil.

6.20.1 Querprofile Emden (Ems-km 40,7 bis 43)

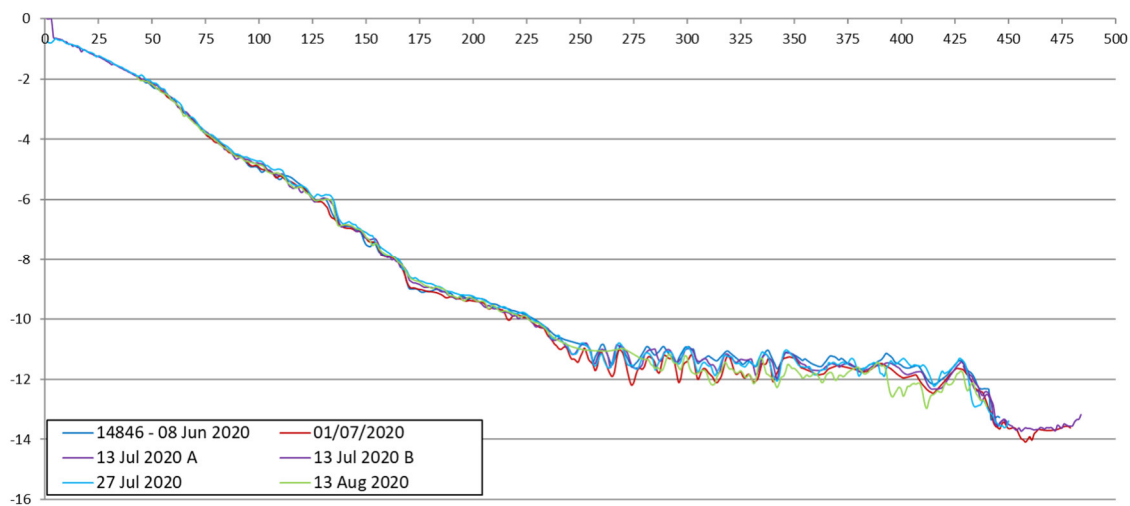


Abbildung 195: Typische Querprofilaufnahmen im Bereich Emden bei Ems-km 41,9

Ausgangs- bzw. Referenzzustand ist der 08.06.2020, also drei Wochen vor Beginn des Technischen Tests. Querprofilaufnahmen während des Technischen Tests wurden am 01.07.20, 13.07.20, 27.07.20 und 13.08.20 durch das Vermessungsschiff VS Weekeborg durchgeführt. Wie schon erwähnt, wird für bestimmte Tiefenbereiche (-4 bis -12 m alle 2 m) ein Mittelwert bestimmt, der dem Querprofilkilometer zugeordnet wird. Die Mittelwertberechnung des Gesamtprofils erfolgt durch Gewichtung des jeweiligen (gemittelten) Tiefenbereiches anhand der Anzahl von ausgewerteten Peilpunkten. Daten außerhalb der Referenzprofile werden nicht betrachtet. Es muss weiterhin davon ausgegangen werden, dass (tiefe) Bereiche der Fahrrinne durch Unterhaltungsbaggerungen beeinträchtigt sein können.

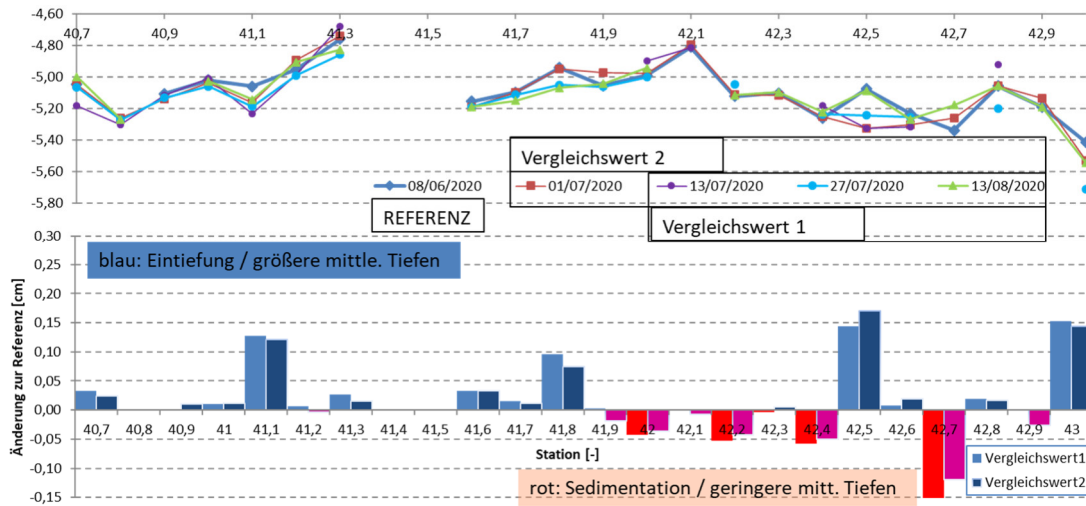


Abbildung 196: Darstellung der Auswertesystematik anhand des Tiefenbereiches -4 bis -6 m NHN für Bereich Emden

In Abbildung 196 sind die jeweiligen Mittelwerte des Tiefenbereiches -4 bis -6 m über den Fahrwasserkilometern aufgetragen. Das Liniendiagramm im oberen Bildteil zeigt die Ergebnisse der einzelnen Peilungen sofern sich in dem jeweiligen Querprofil überhaupt genügend Punkte befinden. Die Referenzpeilung (REFERENZ) gilt als unbeeinflusst und wird fortan immer mit zwei beeinflussten Zuständen verglichen (Vergleichswert 1 & 2, VG1 & VG2). Liegen die Vergleichswerte (siehe Liniengraphen im oberen Teil) unter der Referenz, hat sich das Querprofil in diesem Tiefenbereich (hier -4 bis -6 m NHN) vertieft und wird im Säulendiagramm blau (Erosion) markiert. Liegen der Vergleichswert über der Referenz ist Sedimentation gemessen worden was zu einer roten Säule im unteren Balkendiagramm führt.

Für jeden Abschnitt wurden mehrere Tiefenschichten nach auswertepraktischen Gesichtspunkten festgelegt. Die Ergebnisse der Tiefenschichten können getrennt interpretiert werden. Insgesamt darf/muss aber auch die Frage nach der Gesamtentwicklung des Abschnittes gestellt werden dürfen. In der Folge nun die Darstellung der unterschiedlichen Tiefenschichten sowie die Gesamtbetrachtung am Ende des jeweiligen Abschnittes.

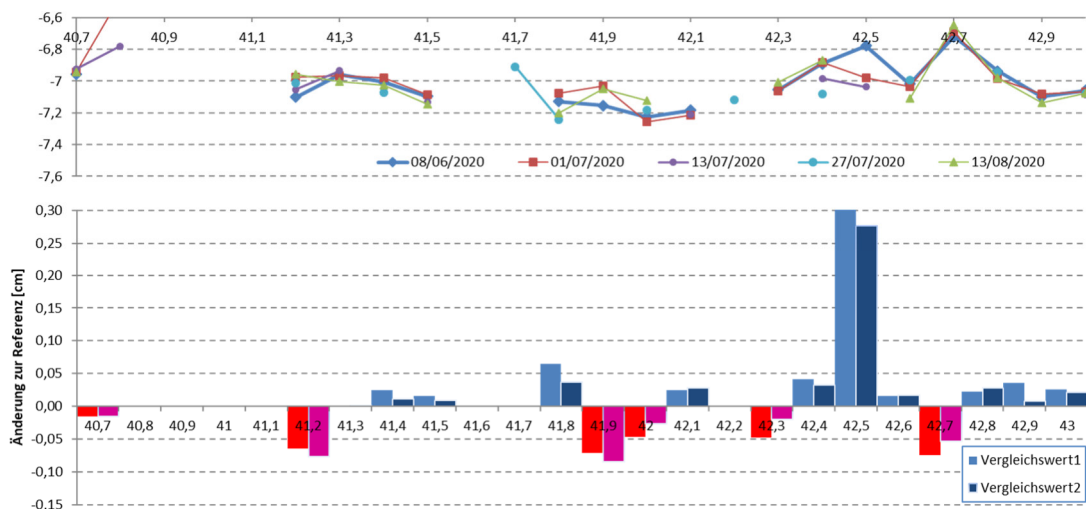


Abbildung 197: Querprofile im Bereich Emden, Tiefenbereich -6 bis -8 m

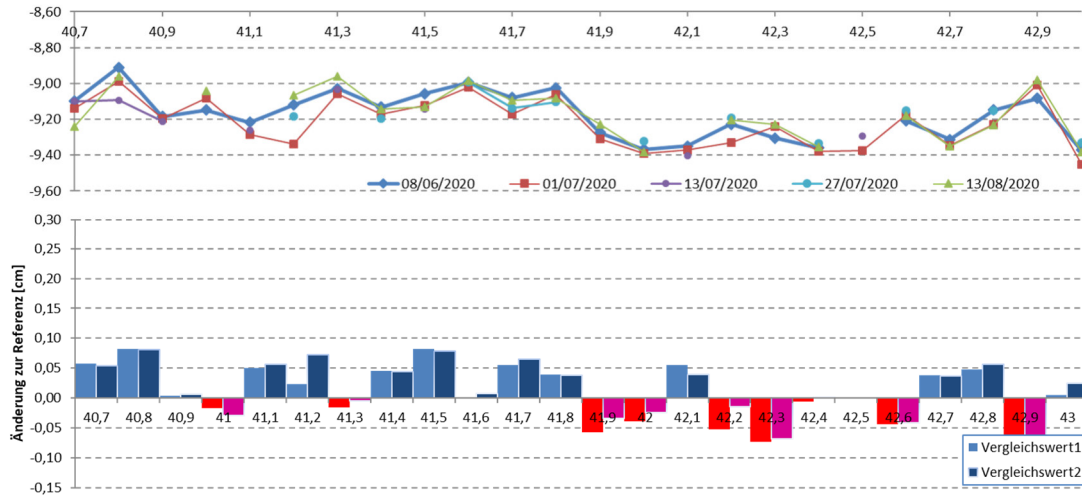


Abbildung 198: Querprofile im Bereich Emden, Tiefenbereich -8 bis -10 m

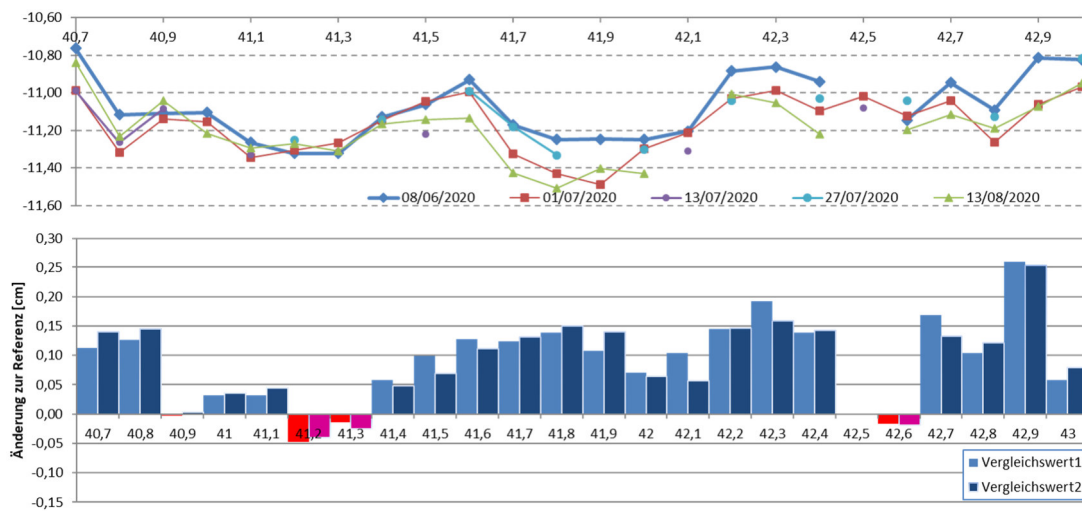


Abbildung 199: Querprofile im Bereich Emden, Tiefenbereich -10 bis -12 m

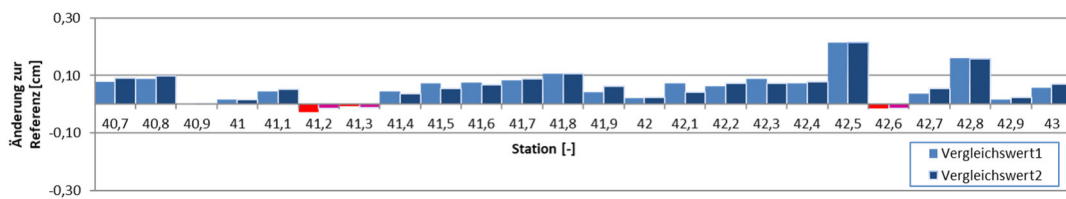


Abbildung 200: Querprofile im Bereich Emden, Mittel über alle Tiefenbereiche

Das Emdener Fahrwasser ist hinsichtlich der Sedimentumlagerungen ein sehr aktiver Bereich und gleichzeitig die bedeutsamste Baggerstrecke an der Tideems. Der Beitrag des Dollart über den mehr und mehr überströmten Geiseleiddamm ist unbekannt. Sedimente treiben ständig ein, und es wird permanent durch Strömung und Baggerschiffe umgelagert. Es ist damit nicht darstellbar ob zusätzliches Material aus der Unterems ins Emdener Fahrwasser eingetrieben ist. Durch die Erkenntnisse im Rahmen des Referenzprofils spricht jedoch vieles dafür, dass tatsächlich größere Schwebstoffmengen transportiert und sich im Emdener Außenhafen ablagern konnten. Die höheren Transporte lassen sich nicht durch transportwirksam höhere

Strömungsgeschwindigkeiten erklären da diese durch den Technischen Test insgesamt betrachtet geringer ausfielen. In den Bereichen jenseits des Fahrwassers, in denen nicht gebaggert wird, stellt sich die Situation ohnehin differenzierter dar. Vor allem ab Ems-km 41,9 ist in diesen „flacheren“ Bereichen Sedimentation zu beobachten. Dies lässt sich durch die Querschnittsaufweitung nach der Emspriel erklären. Auch die Querschnittsaufweitung vor der

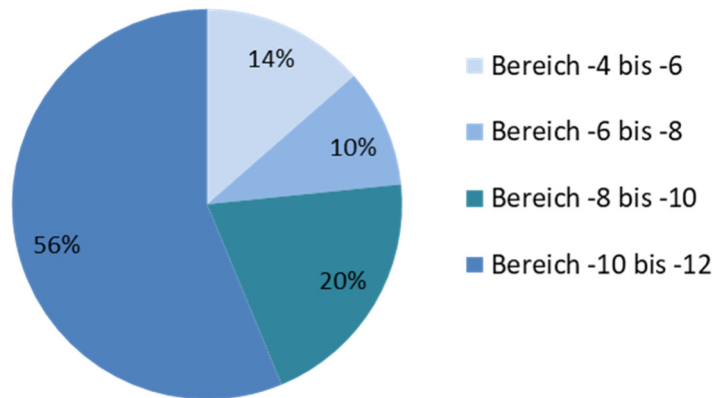


Abbildung 201: prozentualer und flächenmäßiger Anteil der gepeilten Tiefenbereiche Emden

Emspriel (41,2 bis 41,3) zeigt Sedimentation. Eine Ausnahme stellt das Querprofil bei Ems-km 42,5 dar, in dem im Tiefenbereich zwischen -4 und -8 m Erosion beobachtet wird. Für die vergleichende Betrachtung des Referenzprofils sowie der gepeilten Querprofile lässt sich sagen, dass die mittlere berechnete Eintiefung der Querprofile mit 5,2 cm nahe an der mittleren Eintiefung der Referenzprofile (Segment 1) von 4,7 cm im betrachteten Bereich liegt und dies eine Absicherung der Darstellung liefert.

6.20.2 Querprofile Jemgum (Ems-km 19 bis 24)

Die Profile bei Jemgum liegen in einem geraden Flussabschnitt der Unterems und stellen wie das Emdener Fahrwasser einen Sedimentations- bzw. Baggerschwerpunkt dar. Das Fahrwasser ist in diesem Abschnitt insgesamt 75 m breit. Das Profil ist in diesem Bereich ebenfalls relativ breit und bei Flut und Ebbe ungleich (Flut- / Ebberinnen) durchströmt. Es bietet durch die Breite Raum für Ablagerungen außerhalb der Fahrrinne in Tiefenbereichen von -3 bis -5 m. Die Nullpeilung in diesem Profil analog Emden Ende Juni konnte hier aus technischen Gründen nicht stattfinden. Es wurde daher eine weiter zurückliegende Peilung als Ausgangspeilung genommen und diese durch die Peilung vom 01.07. ergänzt. Es existieren damit 2 Referenzen mit denen dann jeweils ein Vergleichswert gebildet wird.

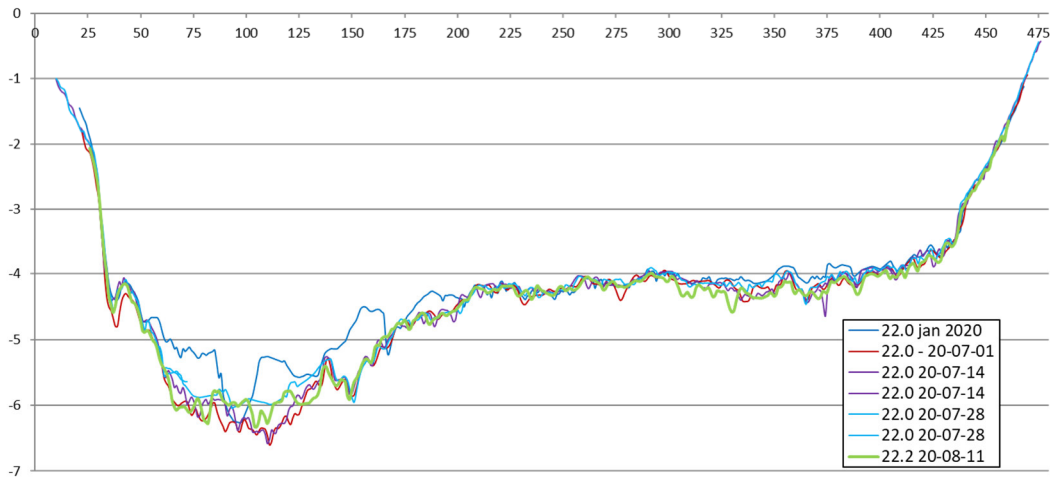


Abbildung 202: Typische Querprofilaufnahmen im Bereich Jemgum bei Ems-km 22

In den nachfolgenden Darstellungen zeigt sich, dass die beiden Referenzen einerseits doch teils große Unterschiede von der Höhenlage aufweisen, andererseits die Vorzeichen aber in der Regel gleich sind. Dies bedeutet, dass wenn der Vergleichswert 1 (VG1) eine Erosion anzeigt, gleiches auch beim Vergleichswert 2 zu erkennen ist. VG2 (dunkelblaue und violettfarbene Säulen) wird aufgrund der zeitlichen Nähe zu den beeinflussten Zuständen dennoch als vorteilhafter angesehen auch wenn er theoretisch bereits leicht durch 2 TnWA Ereignisse beeinflusst sein kann. Der Tiefenbereich zwischen -4 und -5 muss etwas hervorgehoben werden da er den Bereich mit den geringsten Fehlstellen darstellt und zudem ein Bereich ist, in dem zumeist nicht gebaggert wird.

Im Ergebnis betrachtet finden sich in diesem Bereich für den VG2 nur geringe Ausschläge zu Erosion und noch geringere zu Sedimentation hin. Die beiden sich anschließenden Tiefenbereiche von -5 bis -6 sowie von -6 bis -7 zeigen dagegen etwas deutlichere Signale d.h. mehr Erosion und Sedimentation im erstgenannten Bereich ab Ems-km 21,8 sowie im tiefsten Bereich. Vor allem Sedimentation von Ems-km 19 bis 21,4 und eine sehr begrenzte Erosion bei Ems-km 21,6.

Insgesamt betrachtet (Abbildung 210) wechseln sich, über die 5 km durch Querprofile gepeilte und dargestellte Strecke, Bereiche mit Erosion und Sedimentation ab. Bereiche in denen üblicherweise nicht gebaggert werden muss belaufen sich auf 2/3 des Querschnittes bzw. der Fläche. Der zahlenmäßig größte Flächenbereich ist von der Sedimentdynamik her betrachtet auch gleichzeitig der am wenigsten Auffällige. Diese Bereiche finden sich während des Technischen Tests mehr oder weniger in stabilem Gleichgewicht. Da die Reduktionen der Strömungsgeschwindigkeiten durch die TnWA in diesem Bereich mit am größten ist (vergleiche Abbildung 66 und Abbildung 67), wären Auswirkungen auf die Sedimentation eigentlich zu erwarten gewesen. Das dem nicht so ist, kann teilweise durch die Verwendung der tiefen Frequenz (33 kHz) bzw. dem nicht ausreichenden Konsolidierungsgrad der Sedimente erklärt werden. Um diesem Problem zu begegnen, müsste die hohe Peilfrequenz von 210 kHz herangezogen werden. Dies war für die Peilung der Querprofile praktisch nicht durchführbar. An dieser Stelle muss auf die

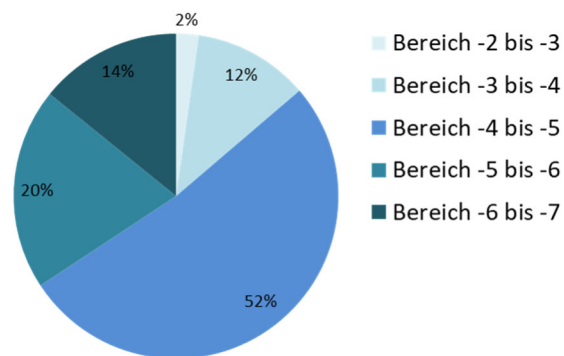


Abbildung 203: prozentualer und flächenmäßiger Anteil der gepeilten Tiefenbereiche Jemgum

Längsfahrten des NLWKN verwiesen werden die darauf ausgerichtet waren mit hoher Frequenz die Feinsedimentdynamik abzubilden.

Die Baggermengen gelten für die Bereiche unter -5 m. Verteilt man die Baggermengen auf die Fahrrinne zwischen Ems-km 19 und 24 so ergeben sich für den Monat Juli 4 cm und für das erste Drittel im Monat August (Peilung am 11.08.) 6 cm Baggerhöhe. Bezogen auf den gesamten Querschnitt wären diese Werte nochmals auf 1,4 bzw. 2 cm zu reduzieren. Baggeraktivitäten spielen so gesehen eine untergeordnete Rolle. Der Abschnitt ist als im Gleichgewicht zu betrachten.

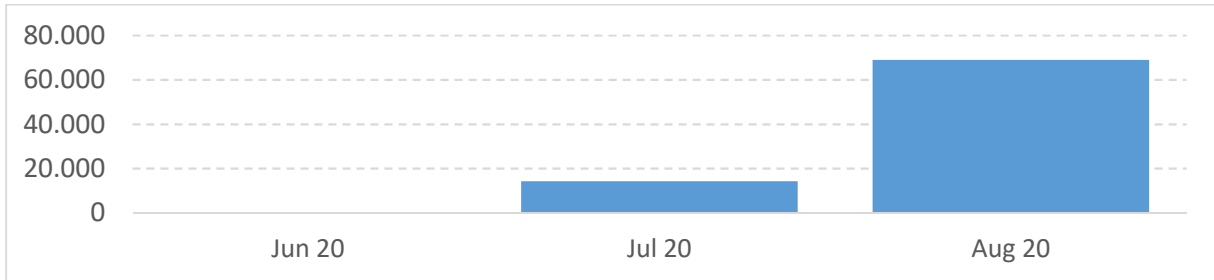


Abbildung 204: Baggermengen von Ems-km 20 bis 24 für die Monate Juni, Juli und August 2020

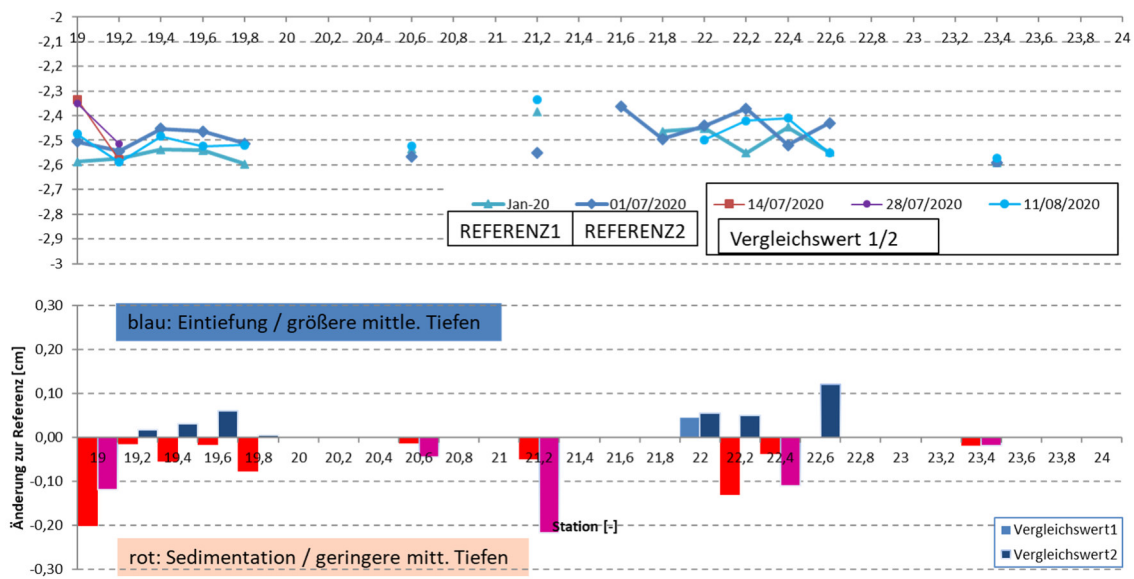


Abbildung 205: Querprofile im Bereich Jemgum, Tiefenbereich -2 bis -3 m

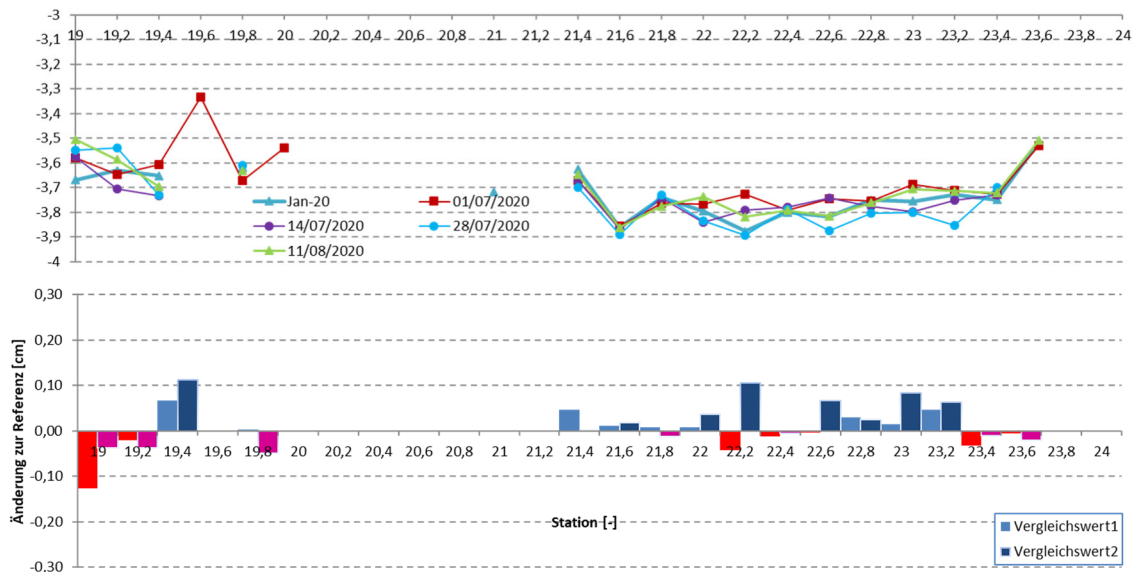


Abbildung 206: Querprofile im Bereich Jemgum, Tiefenbereich -3 bis -4 m

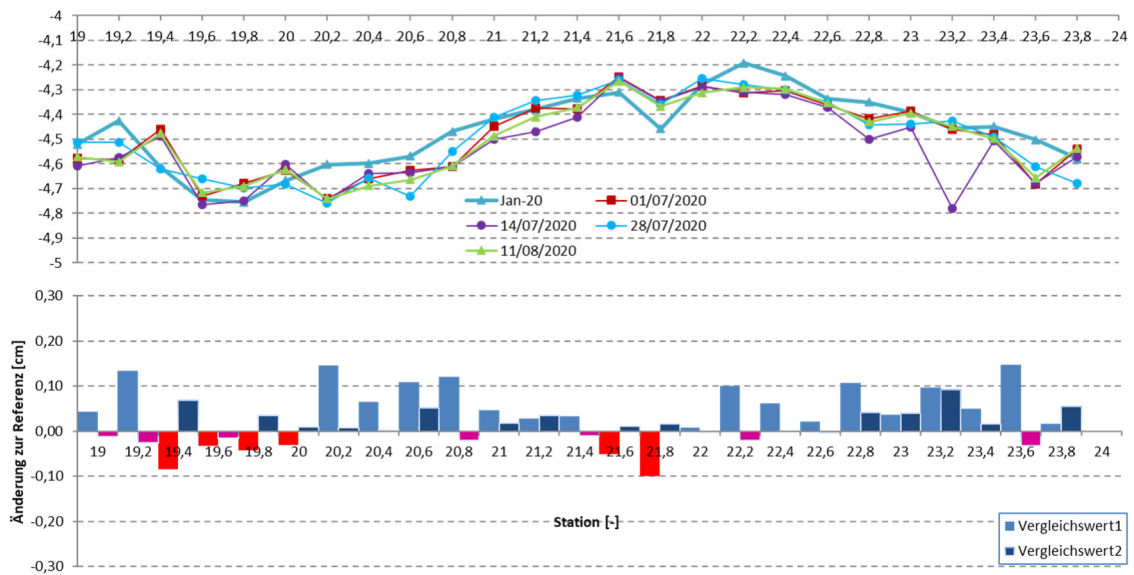


Abbildung 207: Querprofile im Bereich Jemgum, Tiefenbereich -4 bis -5 m

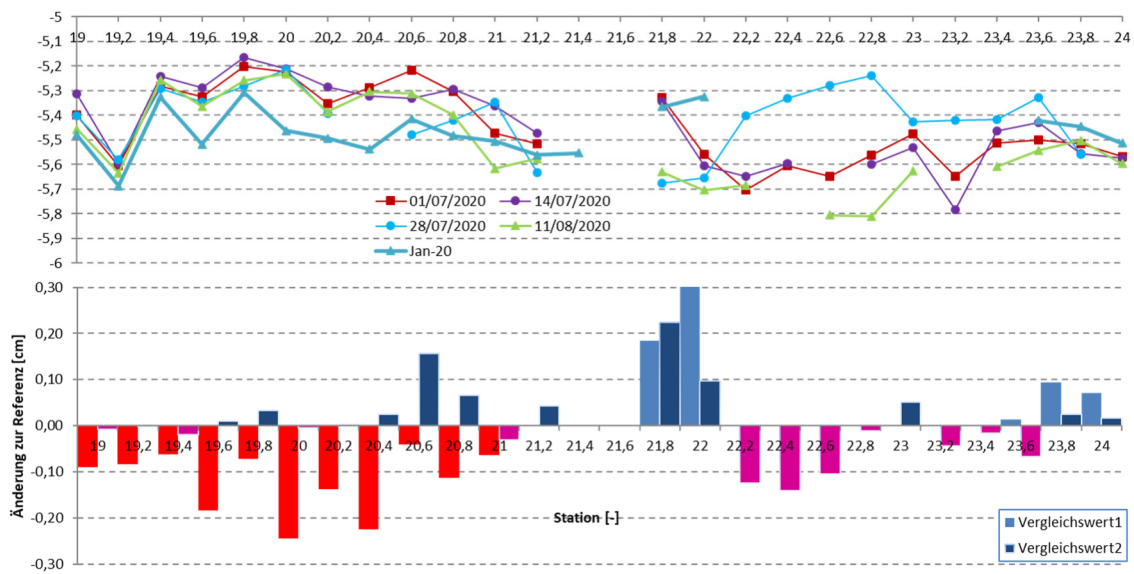


Abbildung 208: Querprofil im Bereich Jemgum, Tiefenbereich -5 bis -6

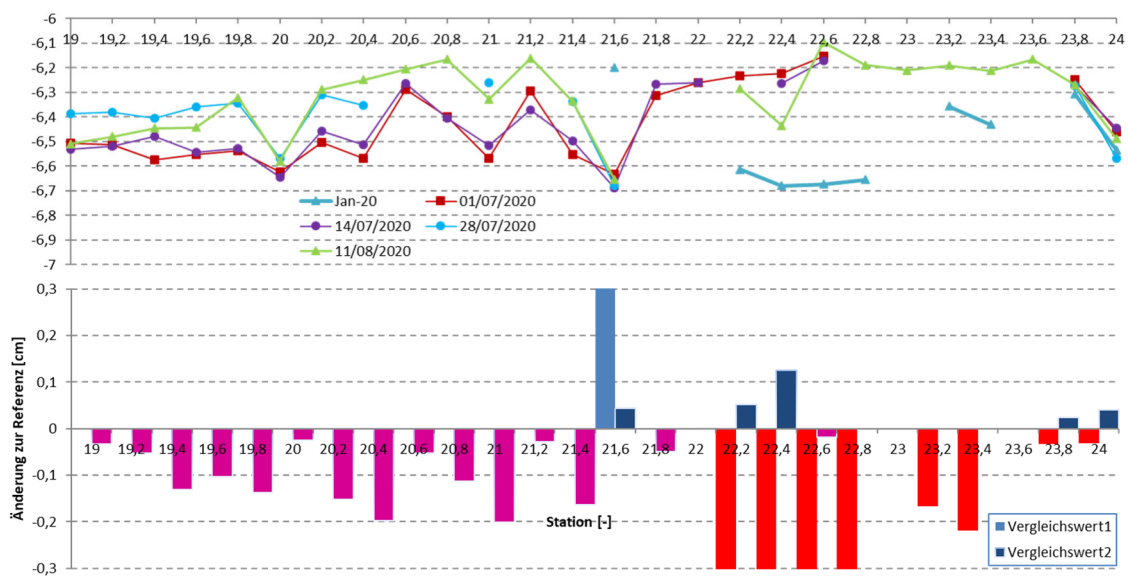


Abbildung 209: Querprofil im Bereich Jemgum, Tiefenbereich -6 bis -7

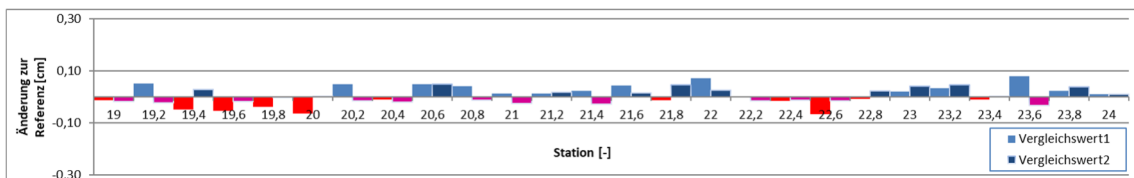


Abbildung 210: Querprofile im Bereich Jemgum, Mittel über alle Tiefenbereiche

6.20.3 Querprofile bei Papenburg (Ems-km 0 bis 5)

Die Querprofile im Bereich Papenburg unterscheiden sich von den vorigen durch die Tiefenverteilung, die in diesem Bereich fast ausschließlich Tiefen zwischen -5 und -8 m aufweisen, entsprechend 2/3 der Gesamtfläche. Das Tiefenverhältnis zwischen den beobachteten Abschnitten Papenburg und Jemgum

ist von der Verteilung her daher umgekehrt. Morphologisch handelt es sich hier eigentlich eher um einen Kanalquerschnitt. Dies wird in der nachfolgenden Abbildung deutlich. Analog der Vorgehensweise wurden auch hier zwei Referenzzustände festgelegt und zur Bilanzierung herangezogen. Die in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Peilung „bagger“ (im Rahmen einer Baggervorpeilung aufgenommen) spricht für die bekannte und hohe Sedimentationsdynamik in diesem Gerinneabschnitt.

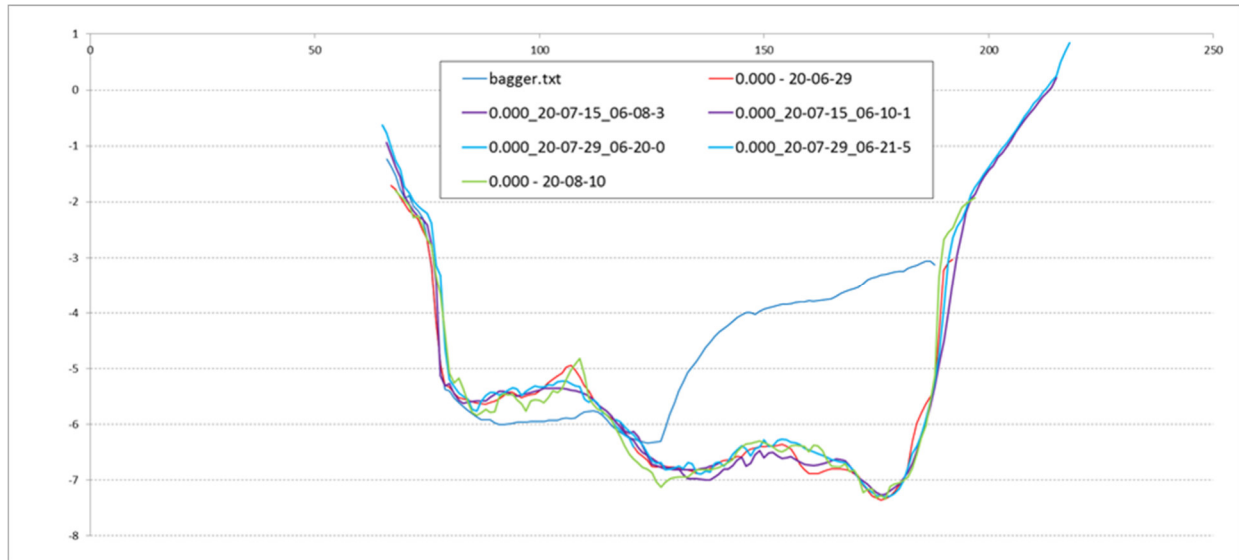


Abbildung 211: Querschnitte im Bereich Papenburg hier bei Ems-km 0

Die Darstellung der Unterschiede zu den jeweiligen Referenzen definiert sich über den Vergleichswert 1 (zu Jan 2020) bzw. Vergleichswert 2 (zu Juni 2020). Analog der Betrachtung der Ergebnisse bei Jemgum stellt sich VG2 auch für Papenburg als aussagekräftiger dar. Im Fall einer Sedimentation ist die Säule im unteren Diagrammbereich violett angelegt (Differenz zum VG2). In den flacheren Bereichen von -2 bis -4 m ist von Ems-km 0 bis 2,4 Sedimentation als vorherrschender Prozess zu erkennen. Der sich anschließende, vom prozentualen Anteil her weniger bedeutsame Tiefenbereich von -4 bis -5 m zeigt ebenfalls Sedimentation aber abschnittsweise auch Erosion vor allem auf dem ersten Kilometer. Die Erosion auf dem ersten Kilometer ist auch im folgenden Tiefenbereich von -5 bis -6 m erkennbar. Von Ems-km 2 bis 3,2 fehlen Daten in dieser Tiefenschicht. Da dieser Tiefenbereich für die Überführung der SPIRIT of ADVENTURE (30.08.2020) gebaggert wurde ist es durchaus möglich, dass diese Bereiche bereits „auf Tiefe“ gebracht wurden und in dieser Tiefenklasse nicht mehr zu sehen sind. Für diesen Erklärungsansatz spricht, dass in diesem Abschnitt die sog. Bedarfstiefe erreicht ist und im sich anschließenden noch nicht. Darüber hinaus deutet die Tiefenbewegung im sich anschließenden Bereich von Ems-km 3,2 bis 4 genau auf diesen sukzessiven Zuwachs an Tiefe durch Baggerung hin. Wäre ein anderer Mechanismus dafür verantwortlich, würden sich auch andere Abschnitte wie z. B. von Ems-km 0 bis 1,2 genauso oder sehr ähnlich verhalten. Dies ist so nicht zu beobachten.

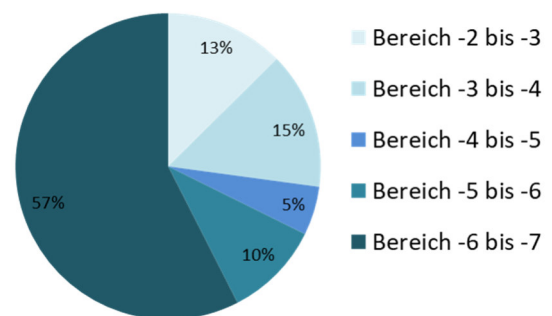


Abbildung 212: prozentualer und flächenmäßiger Anteil der gepeilten Tiefenbereiche Papenburg

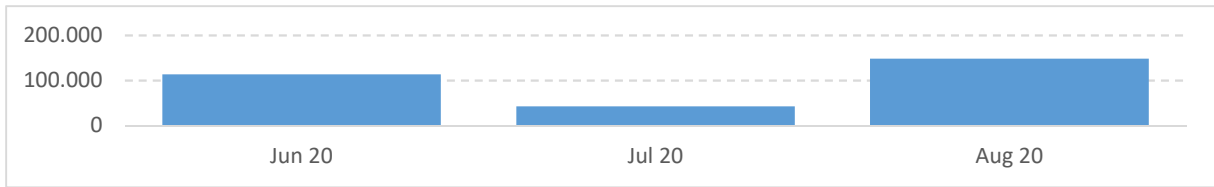


Abbildung 213: Baggermengen von Ems-km 0 - 4 für die Monate Juni, Juli und August 2020

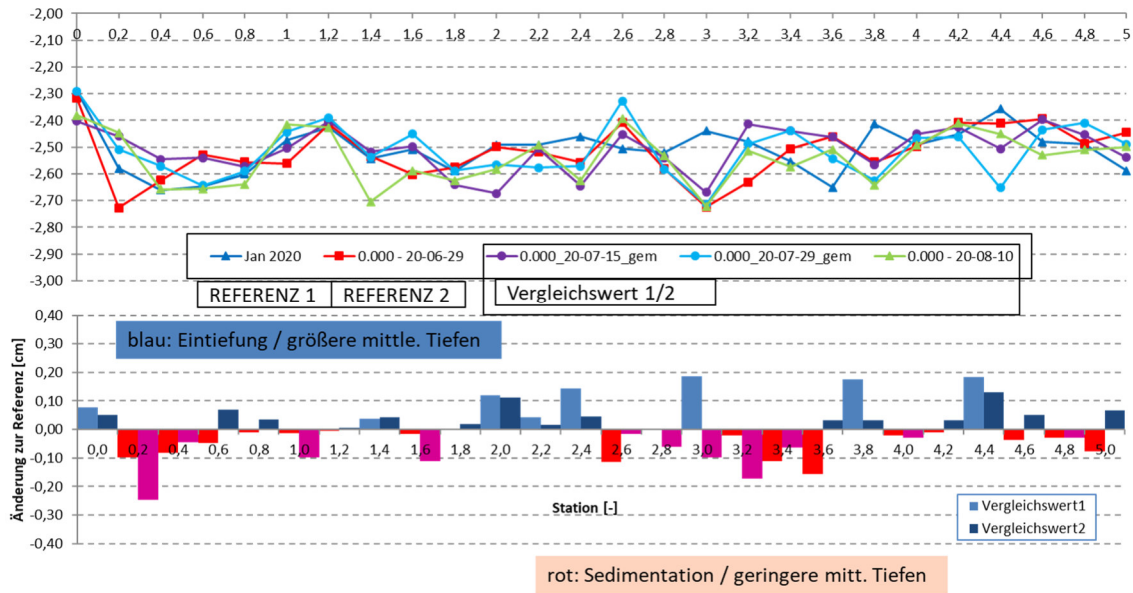


Abbildung 214: Querprofile im Bereich Papenburg, Tiefenbereich -2 bis -3 m

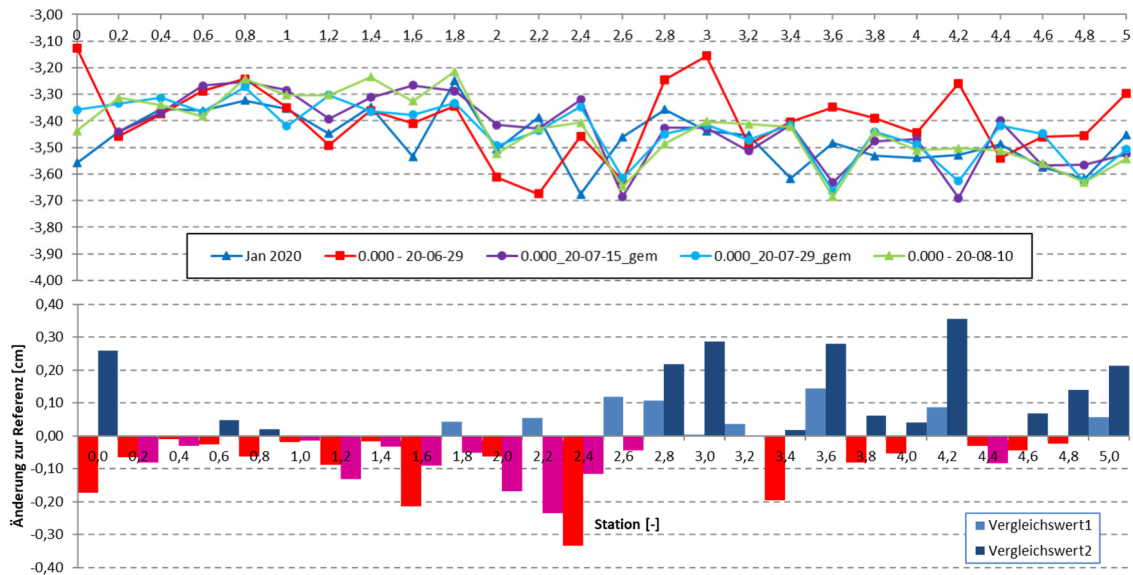


Abbildung 215: Querprofile im Bereich Papenburg, Tiefenbereich -3 bis -4 m

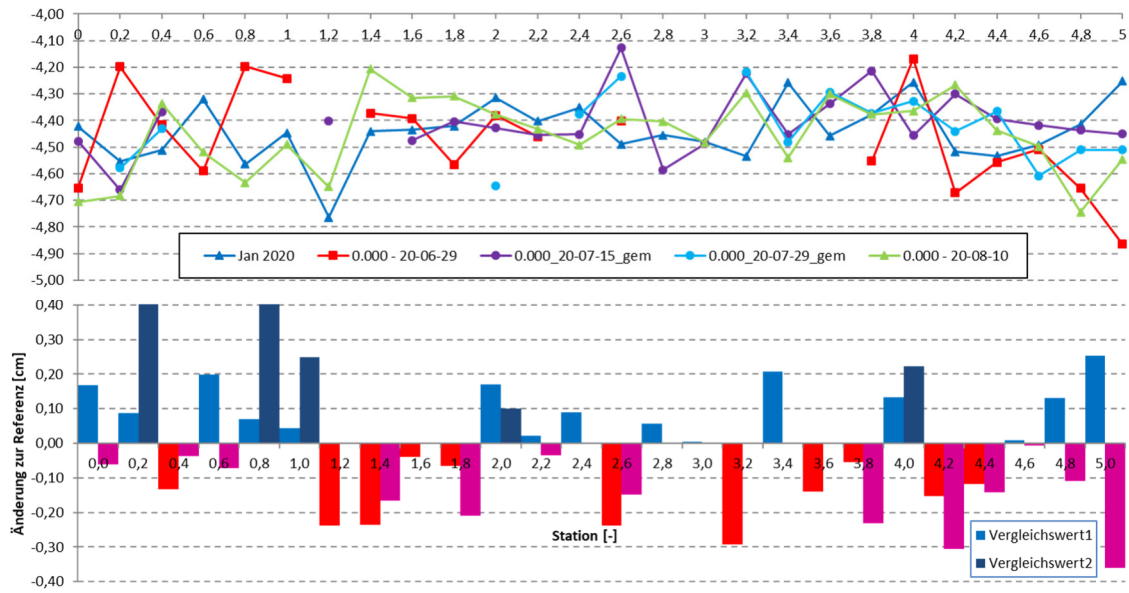


Abbildung 216: Querprofile im Bereich Papenburg, Tiefenbereich -4 bis -5 m

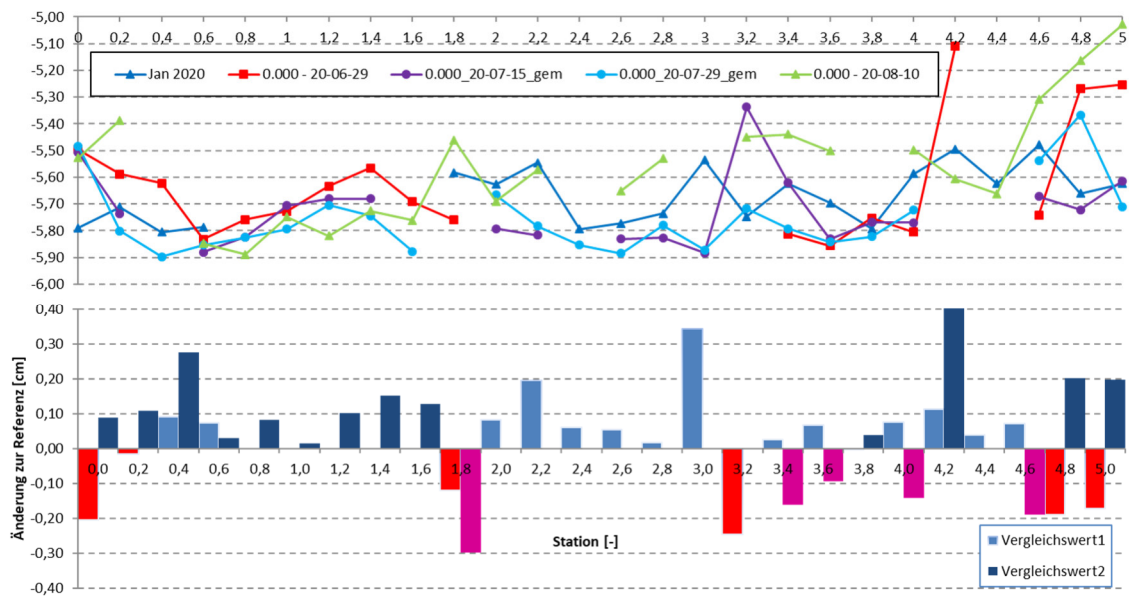


Abbildung 217: Querprofile im Bereich Papenburg, Tiefenbereich -5 bis -6 m

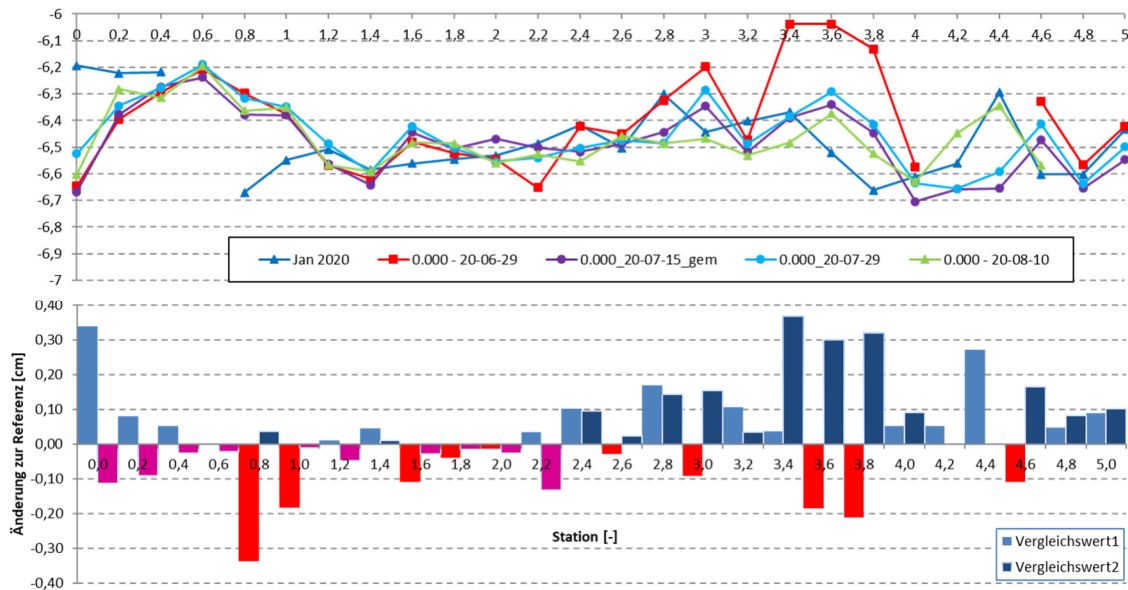


Abbildung 218: Querprofile im Bereich Papenburg, Tiefenbereich -6 bis -7 m

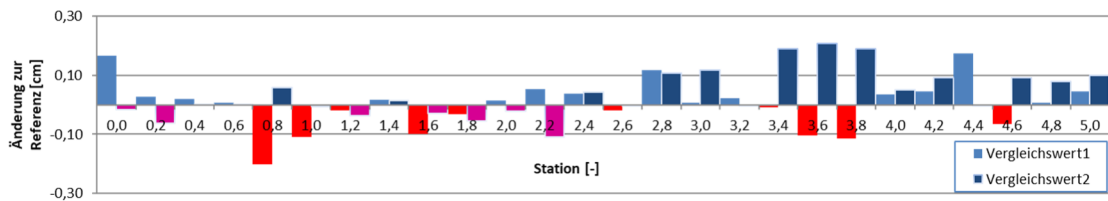


Abbildung 219: Querprofile im Bereich Papenburg, Mittel über alle Tiefenbereiche

Insgesamt betrachtet ist im Abschnitt Papenburg über alle Tiefenbereiche, vor allem aber in den flacheren Bereichen außerhalb des Fahrwassers Sedimentation zu beobachten. Wo dieses Material herkommt, kann durch die Peildaten nicht geklärt werden.

6.21 Mögliche Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sedimentzusammensetzung

Bearbeitet von Martin Krebs (WSA Ems-Nordsee)⁴⁰

Von Ems-km 0 (Papenburg) bis 55 (Knock) werden vom WSA Ems-Nordsee regelmäßig Sedimentproben mit dem Van-Veen Greifer jeweils jeden vollen Kilometer durch das gewässerkundliche Messschiff M Friesland entnommen und anschließend im Sedimentlabor im Außenbezirk Leer des WSA untersucht. Die Entnahmen finden z. T. im Rahmen der regelmäßigen Schadstoffbewertung der Emsedimente statt. Üblicherweise werden zweimal jährlich die Sedimente auf diese Art und Weise entnommen. Die Methodik der Probenahme sowie die Auswertung ist seit dem Jahr 2004 stets die Gleiche. Kornfraktionen werden nach Vorgabe der BfG bestimmt und liefern 128 Fraktionen aus denen anschließend die Ton-, Schluff- und Sandfraktionen bestimmt werden. Im Rahmen des Technischen Tests wurden zwei zusätzliche Kampagnen (Juni und August 2020) durchgeführt. Ergänzend zur

⁴⁰ Siehe auch gesonderten Bericht des WSA Ems-Nordsee im Anhang: KREBS 2021; Technischer Test 2020 – Ergebnisbericht des WSA Ems-Nordsee zum durchgeführten Monitoring; Emden Dezember 2021

Untersuchung der Sohlsedimente wurden die Sedimente im Bereich der Liegewannen Außenhafen und Emsliegeplätze untersucht.

Es bietet sich an, die prozentualen Sandgehalte über dem Längsverlauf der Ems von Ems-km 0 bis 52 darzustellen. In Abbildung 220 ist der prozentuale Sandanteil der Probe (Summe aus Fein-, Mittel- und Grobsand) vor dem Beginn des Technischen Tests anhand der blauen Kurve (Probenahme 22./23.06.2020) derart dargestellt. Nach Abschluss des Tests wurde am 25.08.2020 erneut eine Entnahme der Sohlsedimente durchgeführt und analysiert (gelbe Kurve). Zur Einschätzung einer Veränderung der Sedimentation und damit auch des Transportregimes infolge der Tidesteuerung, ist es erforderlich, eine typische Sedimentverteilung zu wählen, die charakteristisch für den Zustand vor dem Testzeitraum ist.

Oberwasser und Baggeraktivitäten sind Faktoren, welche die Sedimentverteilung und damit auch die Verteilung der Sande grundsätzlich beeinflussen können. Es wird daher eine Auswahl von Zuständen auf der Grundlage eines mittleren Oberwassers im Zeitraum von 50 Tagen vor der Probenahme durchgeführt. Für den Technischen Test liegt dieser spezielle Oberwasserwert bei 30,7 m³/s. Es fallen 7 Sedimentuntersuchungen in diesen Gewässerabschnitt, wobei der älteste Zustand aus dem Jahr 2010 stammt.

Baggeraktivitäten finden sich vor allem im Bereich zwischen Papenburg und Leerort die einhergehen mit sehr feinem, homogenen Material. Der Einfluss der Baggerei wird daher hinsichtlich der Sohlsedimente zum Zeitpunkt der Sedimentproben als weniger bedeutsam im Vergleich zum Oberwasser angesehen.

6.21.1 Darstellung der Sedimente von Papenburg bis zur Knock

Im Bereich feiner Sedimente (z.B. im Abschnitt zwischen Papenburg und Jemgum) findet die Probenahme mit dem Van Veen Greifer typischerweise im Bereich der konsolidierten Sohle (bei kohäsivem Material) statt. Bei kohäsiven Sedimenten ist der Übergang von mobilem Weich- zu stationär, konsolidiertem Schlick durch den Farbwechsel der Frischsedimente an der Oberfläche erkennbar (vergl. Abbildung 231). Evtl. anstehender Flüssigschlick wird zu keiner Zeit beprobt, da der Greifer durch diese Schichten ohne auszulösen hindurchfällt. Dort wo die Sohle sandig ist, wird die oberste aktive Ablagerungsschicht bzw. Austauschschicht beprobt. Je nach Sediment und Strömung liegt die mittlere Eindringtiefe des Van-Veen Greifers etwa bei 1 bis 1,5 Dezimetern.

Die Sedimentprobe stellt durch die Entnahme mit dem Greifer bereits ein Mittel über einen gewissen Zeitraum dar (je nach Morphodynamik), d. h. es liegt zu keiner Zeit eine Momentaufnahme des aktuellen Sedimentationsgeschehens vor. Wie groß der Zeitraum ist, der per Greiferprobe abgebildet wird, lässt sich nicht genau sagen, sondern bei Sedimentation anhand von Peildaten höchstens abschätzen. Beträgt die Sedimentation 2 dm und der zugehörige Peilabstand 2 Wochen dann ist von einem Probenalter in dieser Größenordnung auszugehen. In der Regel ist nicht bekannt, ob Erosion oder Sedimentation am Ort der Probenahme vorliegt. Die Aussagekraft einer Einzelprobe ergibt sich im Kontext weiterer Proben zu anderen Zeitpunkten bzw. Oberwasserabflüssen am gleichen und benachbarten Orten.

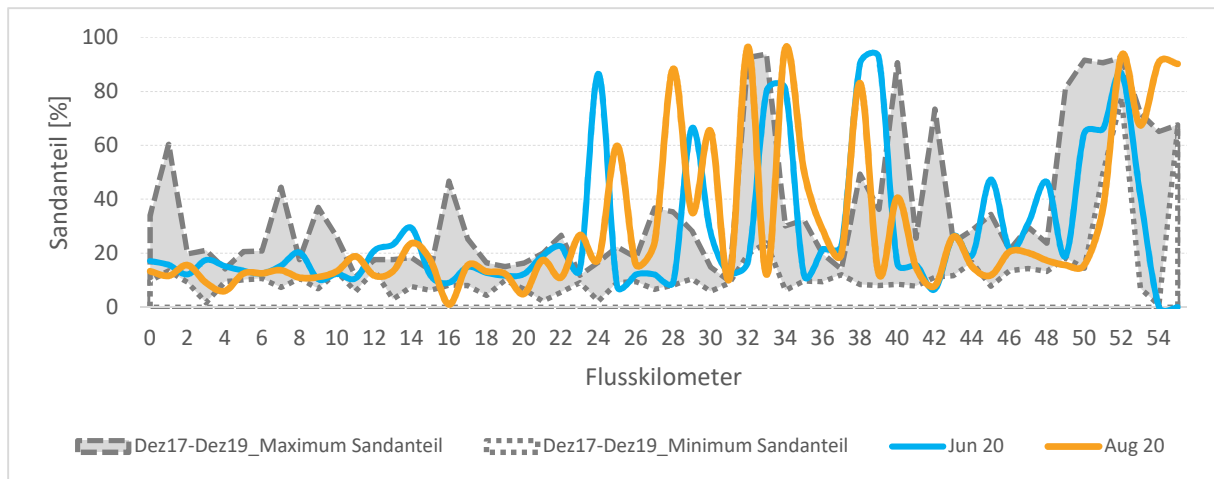


Abbildung 220: Sandanteile der Sedimentproben vor und nach dem TT 2020 (grau: Streubereich Sandanteil aus 2017, 2018 & 2019); Stationierung: von Unterems-Km 0 (Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 54.

Sandanteile haben in der Betrachtung einen besonderen Stellenwert, da Sand die Unterhaltung der Liegeplätze sowie den Hafen Emden, bedingt durch das sog. Rezirkulationsverfahren, in dem Sand verfahrensstörend ist, entscheidend beeinflusst. Darüber hinaus ist Sand in der Unterems aus ökologischer Sicht unterrepräsentiert und ein Vorhandensein damit positiver zu bewerten als Feinsedimente der Ton- und Schlufffraktion. Da die Tonfraktion relativ konstant zwischen 5 und 10 % beträgt und Kies und Fels nur vereinzelt und unbedeutend vorkommen, ist das Komplement zur Sandfraktion die Schlufffraktion.

Höhere Sandanteile finden sich zunächst im Ganzen betrachtet entlang der Fahrwasserachse lokal vor allem ab Ems-km 24 bis 40 sowie dann wieder ab Ems-km 50. Mit dem bereits in Kapitel 6.17 gemachten Aussagen im Hinblick auf den saisonalen (für Emden bei Oberwasser unter $200 \text{ m}^3/\text{s}$), landeinwärts gerichteten Transport, stellen sich die Sandanteile stromauf von Emden als zumeist marine Sedimente dar. Die kontinuierlich leichte Zunahme der Wassertiefen in Segment 1 des Referenzprofils lassen sich interpretieren als Folge des landeinwärts gerichteten Sedimenttransports, zu gewissen Teilen sicherlich auch als Konsolidierung von kohäsiven Sedimenten im betreffenden Abschnitts des Profils. Das Ausbleiben von Baggermengen ab September 2020 bis einschließlich März 2021 deutet auf den Mechanismus, dass Material, welches gebaggert werden muss, vor allem durch große Oberwasser aus der Unterems ins Emden Fahrwasser eingetragen wird. Dünenformen im Vorfeld der Einmündung des Emden Fahrwassers im Bereich der Knock liefern hinsichtlich landeinwärts gerichtetem Transport die gleichen Hinweise.

Betrachtet man die Sandverteilung vor und nach dem Technischen Test im Juni und August (Abbildung 220) so fällt auf, dass die Anteile von Ems-km 0 bis 23 nur geringe Unterschiede aufweisen. Die mittleren Sandanteile liegen zwischen 0 und 30 %. Zwischen Unterems-Km 23 und 40 fallen im Juni 4 Orte mit Sandanteilen von 60 bis über 90 % auf. Die Ergebnisse im August, nach dem Technischen Test, sind mit den Ergebnissen davor in Verbindung zu bringen. Es ist allerdings erkennbar, dass die Orte hohen Sandgehaltes oberhalb des Emssperrwerks von Juni nach August Richtung See wandern. Die Positionen unterhalb des Emssperrwerks, an denen im Juni hohe Sandgehalte festzustellen sind, befinden sich in der August-Beprobung weiter in Richtung Gandersum. Kulminationspunkt für die sandigen Fraktionen ist somit der Bereich des Emssperrwerks. Durch den Technischen Test, in Verbindung mit den saisonal niedrigen Oberwasserabflüssen, sind offensichtlich größere Sandanteile einerseits von Unterems-km 40 bis 51 stromaufwärts transportiert worden. Andererseits findet durch den Test hinsichtlich der Sandfraktion auch ein Transport von Binnen in Richtung Emssperrwerk statt.

Der Oberwasserabfluss zwischen den beiden Messungen im Juni und Dezember war annähernd konstant auf typisch niedrigem sommerlichen Niveau. Der Gesamtsandanteil verändert sich im Abschnitt Unterems-km 0 bis 24 von 4,22 % im August auf 5,34 % im Dezember. Die Messung im Juni ergab in diesem Abschnitt einen Sandanteil von 6,14 %. Die Veränderung der Sandanteile von August zu Dezember kann nach dem Technischen Test als Rückkehr zum typischen Zustand (unter niedrigem Oberwasser) gewertet werden. Die Veränderungen finden sich hauptsächlich im Feinsand wieder. Sandige Anteile breiten sich nach dem Technischen Test ausgehend vom Emssperrwerk nach Ober- und Unterstrom aus.

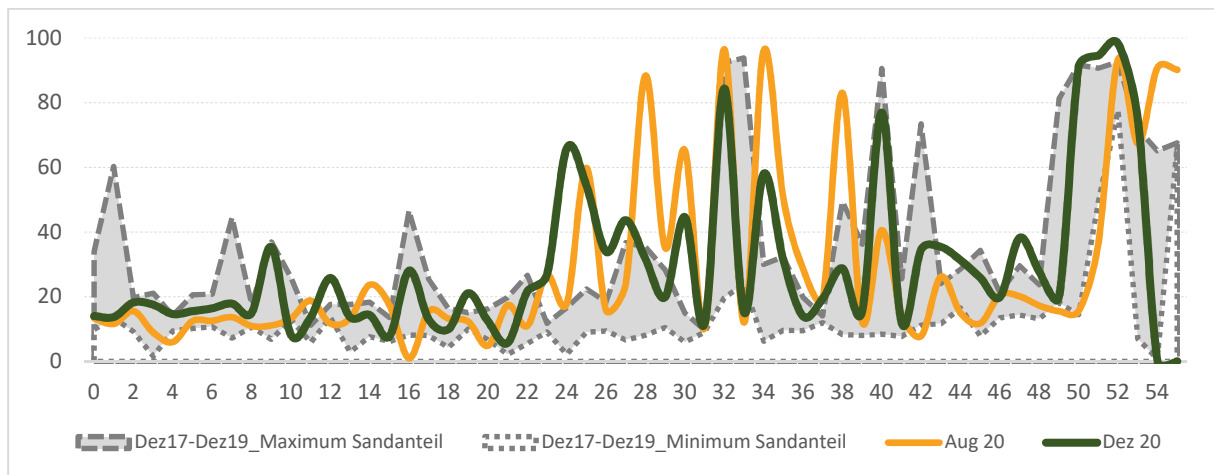


Abbildung 221: Sandanteile der Sedimentproben nach dem TT 2020 (grau: Streubereich Sandanteil aus 2018 & 2019); Stationierung: von Unterems-Km 0 (Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 54.

Betrachtet man die grau hinterlegten Bereiche in den vorigen beiden Diagrammen, so überschreiten die Probenahmen von Juni, August und Dezember 2020 die minimalen bzw. maximalen Werte an einigen Stellen. Vor allem Überschreitungen dieser „Hintergrundwerte“ finden sich sehr häufig. Um dies besser zu verstehen, wurde nach geeigneten Vergleichszuständen gesucht. Es wird davon ausgegangen, dass eine bestimmte Sedimentverteilung eine dazugehörige Abflusshistorie voraussetzt. Daher wurde der 50 Tage Mittelwert des Oberwassers vor der Sedimententnahme bestimmt und anhand dieses Wertes die einzelnen Sedimententnahmen in kleiner $31 \text{ m}^3/\text{s}$ und größer $100 \text{ m}^3/\text{s}$ unterteilt. Der letztgenannte Bereich enthält Hochwasserwellen größer oder gleich $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Bereich dazwischen wird nicht dargestellt. Die Sedimententnahmen vor und nach dem Technischen Test (Juni: 32.7 , August: 26.3 und Dezember: 29.8) fallen mit Ausnahme des Junis in die Klasse kleiner $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei einem Vergleich der Juni-Untersuchung mit dieser Klasse wird der Effekt der leichten Überschreitung aber als vernachlässigbar eingeschätzt. Die folgenden Abbildungen zeigen das Ergebnis dieser längerfristigen Betrachtung über 10 Jahre. Probenahmen im Bereich niedriger Oberwasserabflüsse wurden nochmals unterteilt in eine Gruppe unter $24,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (50 Tage Mittelwert vor der Probenahme).

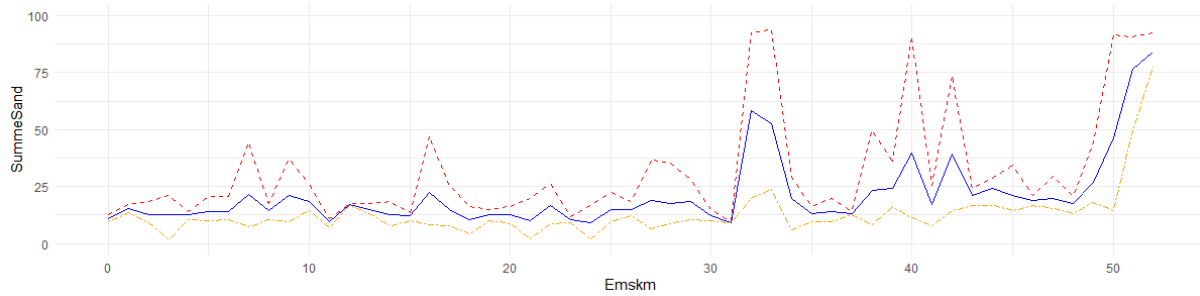


Abbildung 222: Gesamtsandgehalt der Proben („trockene Jahre“ 2018 – 2019) bei Oberwasserabflüssen unter $24,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Maximale (rot gestrichelt), mittlere (blau durchgezogen) und minimale (orange strichpunktiert) Sandgehalte; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

Betrachtet man die Sandverteilungen unter sehr niedrigem Oberwasserabfluss von $24 \text{ m}^3/\text{s}$ und $31 \text{ m}^3/\text{s}$ vergleichend nebeneinander, so sind Unterschiede nur vereinzelt erkennbar. Die Sandgehalte in der Unterems sind praktisch identisch mit einer leichten Abweichung bei Ems-km 8. Im Bereich des Emssperrwerks finden sich bei $31 \text{ m}^3/\text{s}$ höhere Sandanteile bei Unterems-km 32 bis 34. Der sich daran anschließende Abschnitt zeigt lediglich im Bereich der Hafeneinfahrt Emden (Unterems-km 41) höhere Sandgehalte bei $31 \text{ m}^3/\text{s}$.

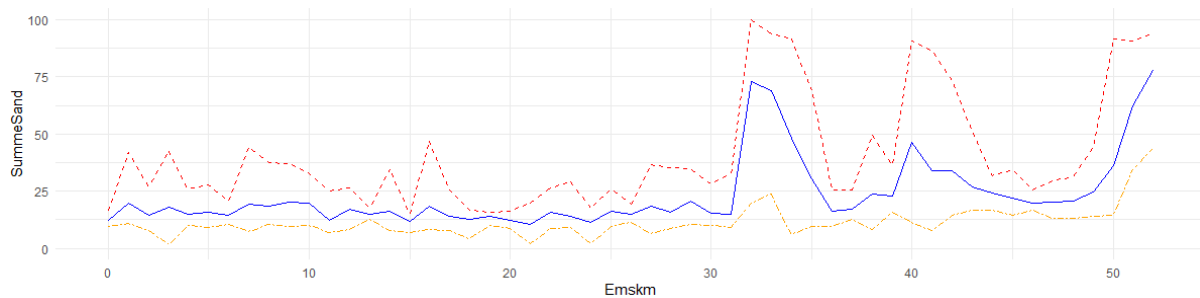


Abbildung 223: Gesamtsandgehalt aller Proben (2010 – 2020) bei Oberwasserabflüssen unter $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Maximale (rot gestrichelt), mittlere (blau durchgezogen) und minimale (orange strichpunktiert) Sandgehalte. Probennahme im Juni 2020 ist NICHT Bestandteil der Auswertung; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

Vergleicht man nun durch Hinzunahme des Juni 2020 die Sandgehalte, so fallen in der nachfolgenden Abbildung deutliche Unterschiede auf. Bei Unterems-km 24 und 29 ist ein merklicher

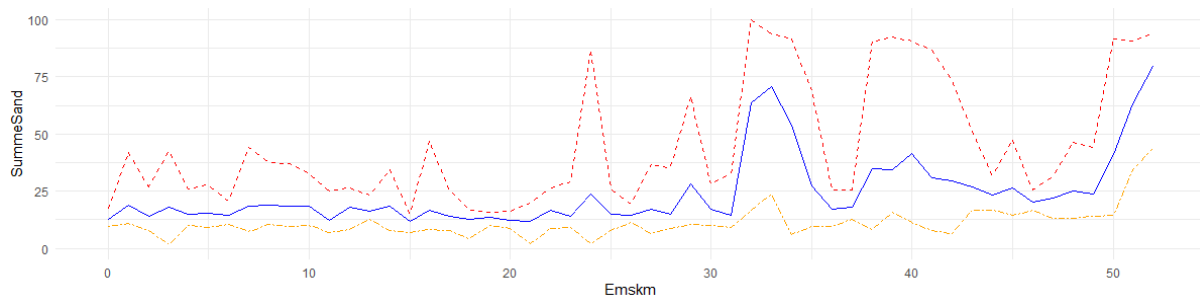


Abbildung 224: Gesamtsandgehalt aller Proben (2010 – 2020) bei Oberwasserabflüssen unter $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Maximale (rot gestrichelt), mittlere (blau durchgezogen) und minimale (orange strichpunktiert) Sandgehalte. Probennahme im Juni 2020 IST Bestandteil der Auswertung; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

Anstieg der Sandgehalte im Vergleich zu Abbildung 223 und Abbildung 224 zu sehen. Ähnlich ist die Veränderung bei Unterems-km 38 und 45. Die Wirkung des Technischen Tests ist wie in Abbildung 220 auch in Abbildung 224 und Abbildung 225 zu erkennen. Die Rückkehr zu Sandverteilungen wie zu

Anfang mit Abflüssen von $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (ohne Juni 2020) sowie $24 \text{ m}^3/\text{s}$ deutet sich im Dezember (Abbildung 226) an.

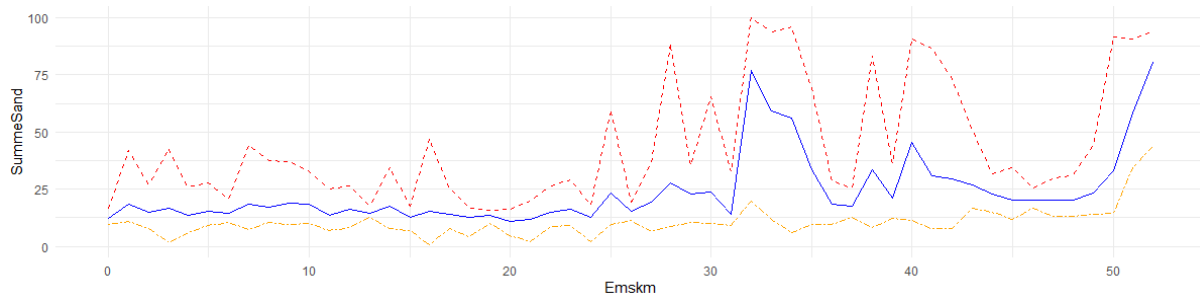


Abbildung 225: Gesamtsandgehalt aller Proben (2010 – 2020) bei Oberwasserabflüssen unter $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Maximale (rot gestrichelt), mittlere (blau durchgezogen) und minimale (orange strichpunktiert) Sandgehalte. Probennahme im August 2020 IST Bestandteil der Auswertung; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Pegel Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

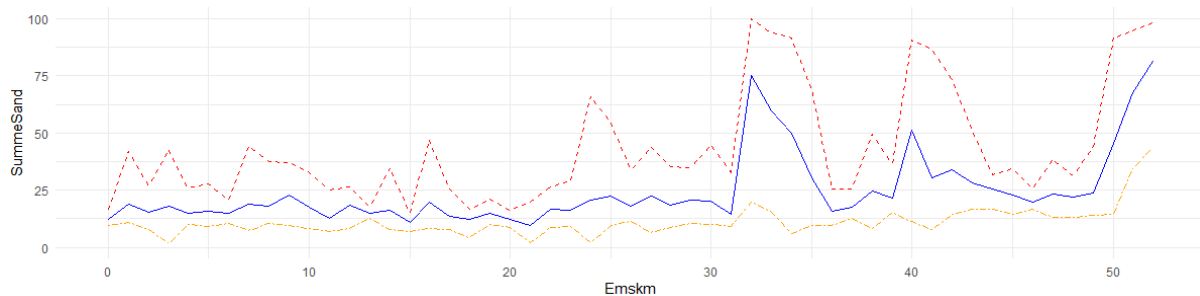


Abbildung 226: Gesamtsandgehalt aller Proben (2010 – 2020) bei Oberwasserabflüssen unter $31 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Maximale (rot gestrichelt), mittlere (blau durchgezogen) und minimale (orange strichpunktiert) Sandgehalte. Probennahme im Dezember 2020 IST Bestandteil der Auswertungen; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Pegel Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

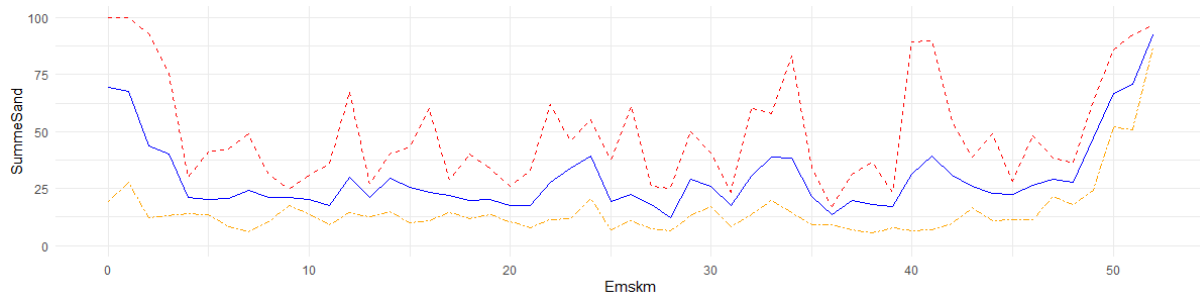


Abbildung 227: Gesamtsandgehalt der Proben (2008 – 2020) bei Oberwasserabflüssen über $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Maximale (rot gestrichelt), mittlere (blau durchgezogen) und minimale (orange strichpunktiert) Sandgehalte; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Pegel Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

Die Verteilung der Sedimente bei hohen Oberwasserabflüssen gibt ebenfalls Hinweise auf die Sedimentdynamik innerhalb eines durchschnittlichen hydrologischen Abflussjahres. Erkennbar ist die deutliche Veränderung der gemittelten Sandgehalte in der Unterems mit Schwerpunkt Papenburg wo die Sandgehalte um 50 % ansteigen (vergl. Abbildung 227). Die Veränderung betrifft jedoch einen längeren Flussabschnitt von Unterems-km 0 bis 24. Die Orte hoher Sandgehalte von Ems-km 24 bis 40 lassen eine Reduktion der Sandgehalte (größter Rückgang um ca. 20 % am Emssperwerk) und für den Peak bei Unterems-km 40 eine Abnahme um ca. 10 % und zusätzlich eine Verlagerung nach See um einen Kilometer erkennen. Die Sandgehalte bis Unterems-km 45 liegen im Vergleich zum niedrigen Abflusszenario darunter.

Die Sedimentverteilung im niedrigen Abflussbereich ($24 - 31 \text{ m}^3/\text{s}$, Abbildung 222 ff) unterscheiden sich dennoch deutlich von der Probenahme aus Juni bzw. August 2020. Auffallend ist die geringere Varianz der Sandgehalte einerseits sowie das Fehlen der beiden Orte hohen Sandgehaltes oberhalb des Emssperrwerks. Das Teilsystem zwischen Emssperrwerk und Papenburg ist zwischen 2019 und 2020 „sandiger“ geworden. Dies wird als Folge der „trockenen Jahre“ gesehen und hat von 2018 nach 2019 auch zum Absinken des Tideniedrigwassers bei Papenburg geführt. Die Sedimentverteilung vor dem Technischen Test ist damit wenig typisch, gemessen an dem Zeitraum zwischen 2010 und 2020.

Für die nachfolgende Darstellung von Sedimentproben, anhand von Fotos vor und nach dem Technischen Test (Probenahme M Friesland), können die Sandgehalte für die jeweiligen Beprobungen zu den gleichen Zeitpunkten vergleichend mitbetrachtet werden. Neben den mittleren Sandgehalten findet sich noch die Verteilung der Sandgehalte über den Zeitraum sehr niedriger Oberwasserabflüsse, wie zuvor bereits dargestellt und diskutiert.

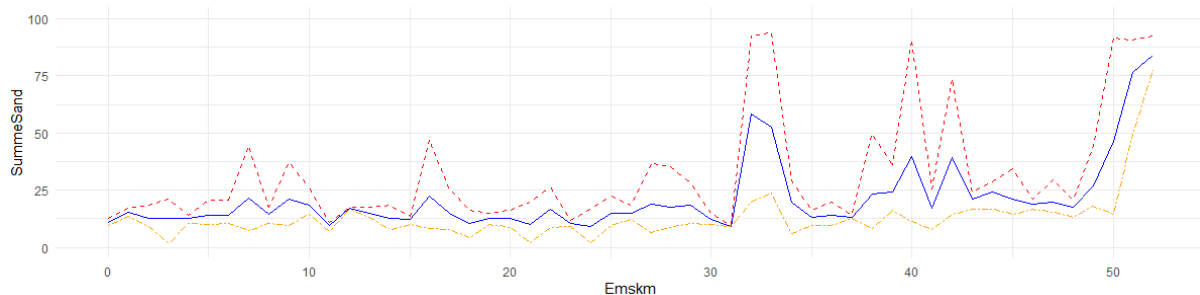


Abbildung 228: Gesamtsandgehalt der Proben („trockene Jahre“ 2018 – 2019) bei Oberwasserabflüssen unter $24 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme) sowie vor dem TT. Maximale (rot gestrichelt), mittlere (blau durchgezogen) und minimale (orange strichpunktiert) Sandgehalte; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Pegel Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

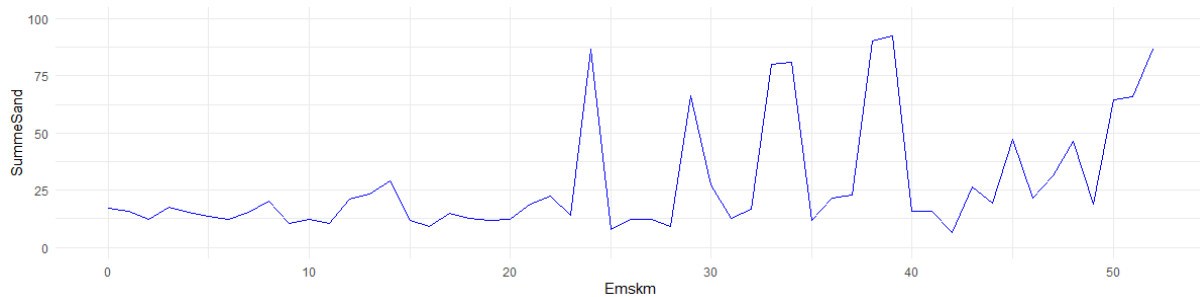


Abbildung 229: Gesamtsandgehalt der Probe vom 22./23. Juni 2020 bei einem Oberwasserabfluss von $32,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Mittlere Sandgehalte blau durchgezogen; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Pegel Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

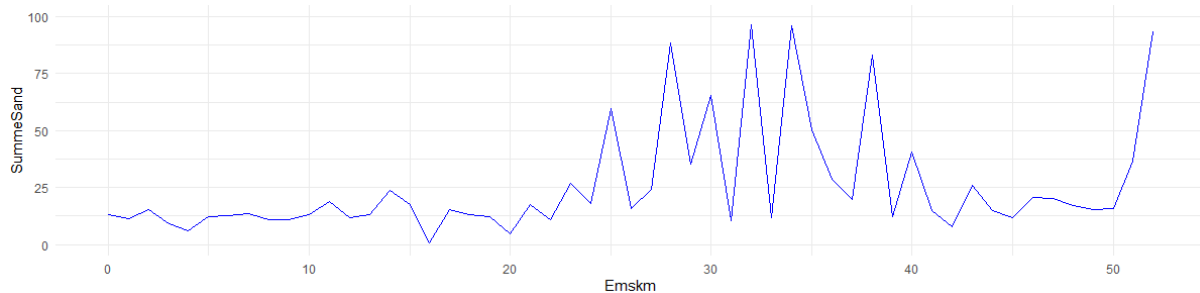


Abbildung 230: Gesamtsandgehalt der Probe vom 25. August 2020 bei einem Oberwasserabfluss von $26,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (50-Tage Mittel vor Probennahme). Mittlere Sandgehalte blau durchgezogen; Stationierung: von Unterems-Km 0 (Pegel Papenburg) über 51 (Pegel Knock) bis rd. 52.

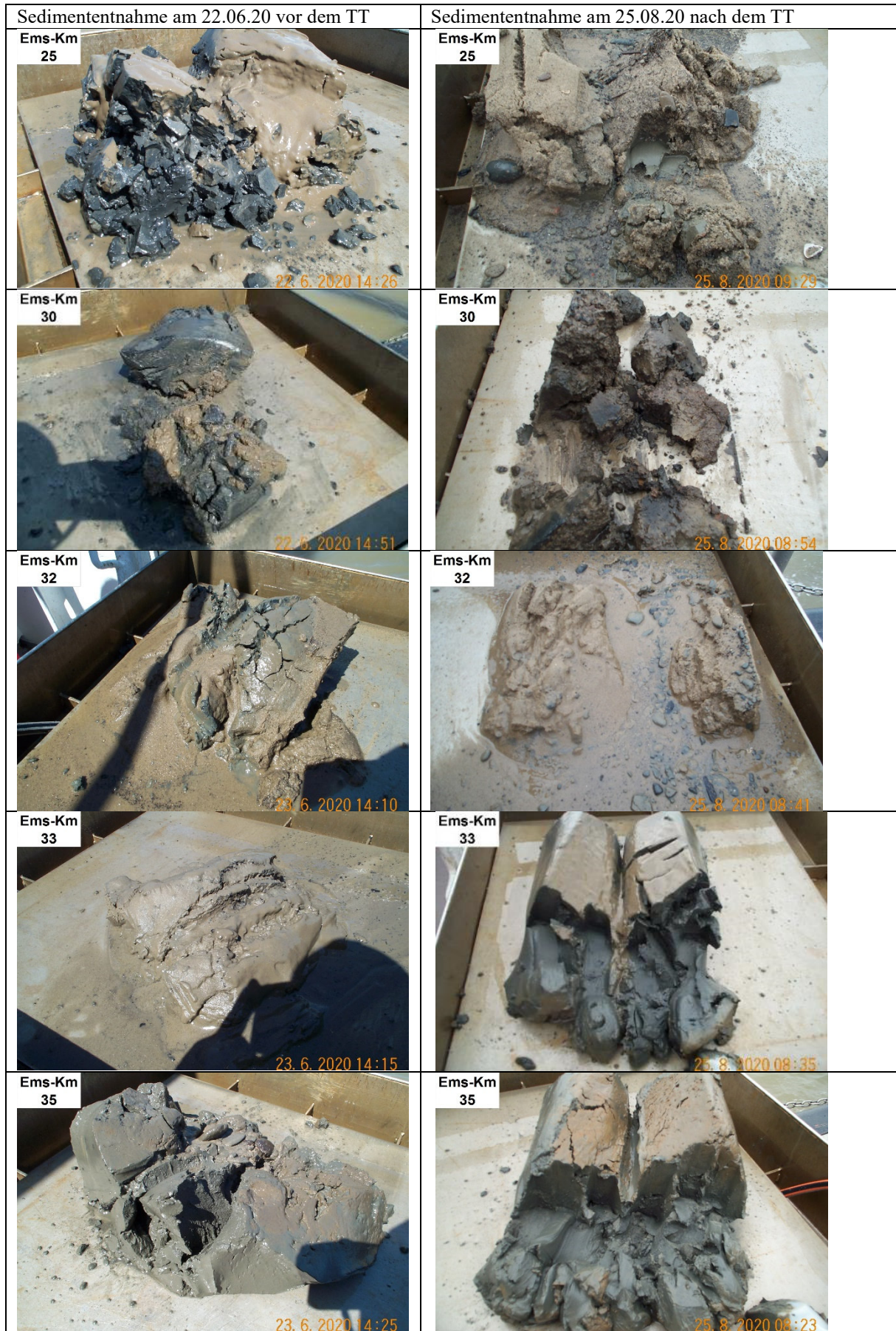


Abbildung 231: Auswahl fotografiertes Sedimentproben vor und nach dem Technischen Test 2020; Angabe der Stationierung: Unterems-Km 25 (etwa Terborg), 30 (etwa Oldersum), 32 (etwa Gandersum), 33 (etwa Ditzum) und 35 (etwa Pogum).

6.21.2 Sedimentuntersuchung der Liegewannen im April, Mai und Juni 2020

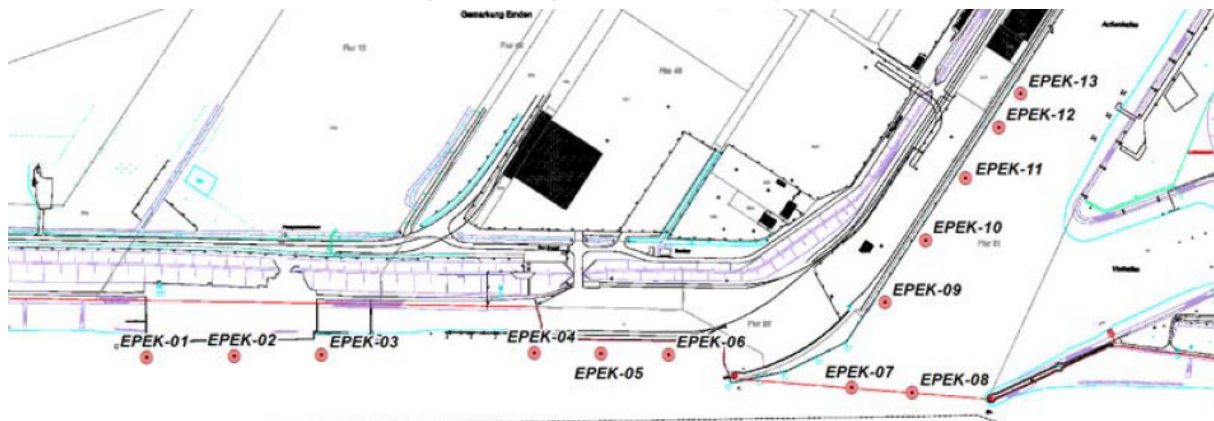


Abbildung 232: Probenahmestellen im Bereich der Liegewannen NPorts

Die Untersuchung der Liegewannen, im Hinblick auf die Veränderung der Sedimentationsdynamik im Bereich der Schiffs Liegeplätze, erfordert eine differenzierte Betrachtung, da hier nicht nur Proben aus dem freifließenden Gewässer Ems, sondern auch Proben aus dem Außenhafen Emden diskutiert werden. Beide Umgebungen zeichnen sich durch völlig unterschiedliche Bedingungen hinsichtlich Strömung, Sediment, vertikale Dichte- und Temperaturverteilung aus.

Die Untersuchungszeiten der Liegewannensedimente liegen nicht identisch mit der Untersuchung der Sedimente in der Fahrrinnenachse. Ausnahme ist die Untersuchung im Juni 2020 (vor dem Technischen Test), da hier am 22./23.06. die Emsedimente und einen Tag später am 24.06. die letzte Untersuchung der Liegewannensedimente durchgeführt wurde. Da die Liegewannen ständig baggertechnisch unterhalten werden, sind Aussagen zur Veränderung der Zusammensetzung der Sedimente auch unter dem Aspekt zu sehen.

Die beiden Messstellen EPEK-07/08 (vergl. Abbildung 232) liegen im Eingang zum Außenhafen zwischen den Molen. Die Messung am 24.06.2020, nur 4 Tage vor Beginn des Technischen Tests, ergibt an beiden Messstellen relativ niedrige Sandgehalte von 9,1 und 9,6 %. Die Werte korrespondieren sehr gut mit den Untersuchungen in der Fahrrinne (vergl. Abbildung 229). Im April und Mai liegen die Sandgehalte zwischen den Molen im Mittelwert fast identisch bei 13 %. Von Mai nach Juni verringern sich die mittleren Sandgehalte von 13 nach 9 % (vergl. Abbildung 234) gegen den Trend fast aller übrigen Messstellen. Der im vorigen Abschnitt im Vergleich zu den Vorjahren dargestellte Ausgangszustand „Juni 2020“ lässt sich auch durch die Proben im Bereich der Emspier von April nach Juni betrachten.

Geringere Sandgehalte finden sich, abgesehen von der Einfahrt zum Außenhafen im Zeitraum April, auch im Bereich der Emspier. In diesem Bereich finden sich von April nach Mai allerdings auch die größten Zuwächse an sandigem Material. Im Mai konnten zwei Messstellen (EPEK 1 & 2) nicht angefahren werden, da die Liegewannen belegt waren. Die Mittelwerte der Messstellen EPEK 3-6 liegen im Bereich von 30 % Sandanteil, wobei eine leichte Veränderung um 3-4 % von April zu Mai/Juni hauptsächlich an der Veränderung der Sedimente im Bereich Emspier liegt (Zuwachs bei EPEK 1 und 2 von im Mittel 18 %).

Die Messstellen EPEK 9-13 (Abbildung 232 und Abbildung 235) im Außenhafen sind vom Sandgehalt her gesehen untereinander wesentlich homogener und ähnlicher. Die mittleren Sandgehalte liegen im April bei etwa 2 %. Im Mai steigt der Gehalt auf knapp 10% und im Juni auf 12 %. Von der Größenordnung her betrachtet, liegen diese damit im Bereich der Sandgehalte zwischen den Molen.

Weshalb die Sandgehalte im Außenhafen von April nach Mai geringfügig ansteigen ist unklar, da die Transportprozesse in der Ems nicht 1:1 auf die Verhältnisse im Außenhafen übertragbar sind. Die Strömungsmuster im Hafen sind im Vergleich zur Ems komplex und von Walzenströmungen geprägt. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Außenhafen sind deutlich geringer, dennoch ist ein Transport von Feinsand von Richtung EPEK9 nach EPEK13 aufgrund der in Abbildung 233 dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten möglich. In der gleichen Abbildung, welche die Treibkörperbahnen in der zweiten Hälfte der Flut darstellt, ist erkennbar, dass der Einstrom von Emswasser vor allem in den tieferen Schichten dichtegetrieben stattfindet. Die Strömungen an der Oberfläche sind zur Ems hin gerichtet, was gleichzeitig einen Einblick in die ausgeprägt vertikalen Strömungsmuster gibt. Diese Transportprozesse werden wesentlich durch barokline Effekte getrieben, die im Außenhafen durch den Flüssigschllickkörper, den Salzgehalt sowie die Temperatur abgebildet werden.

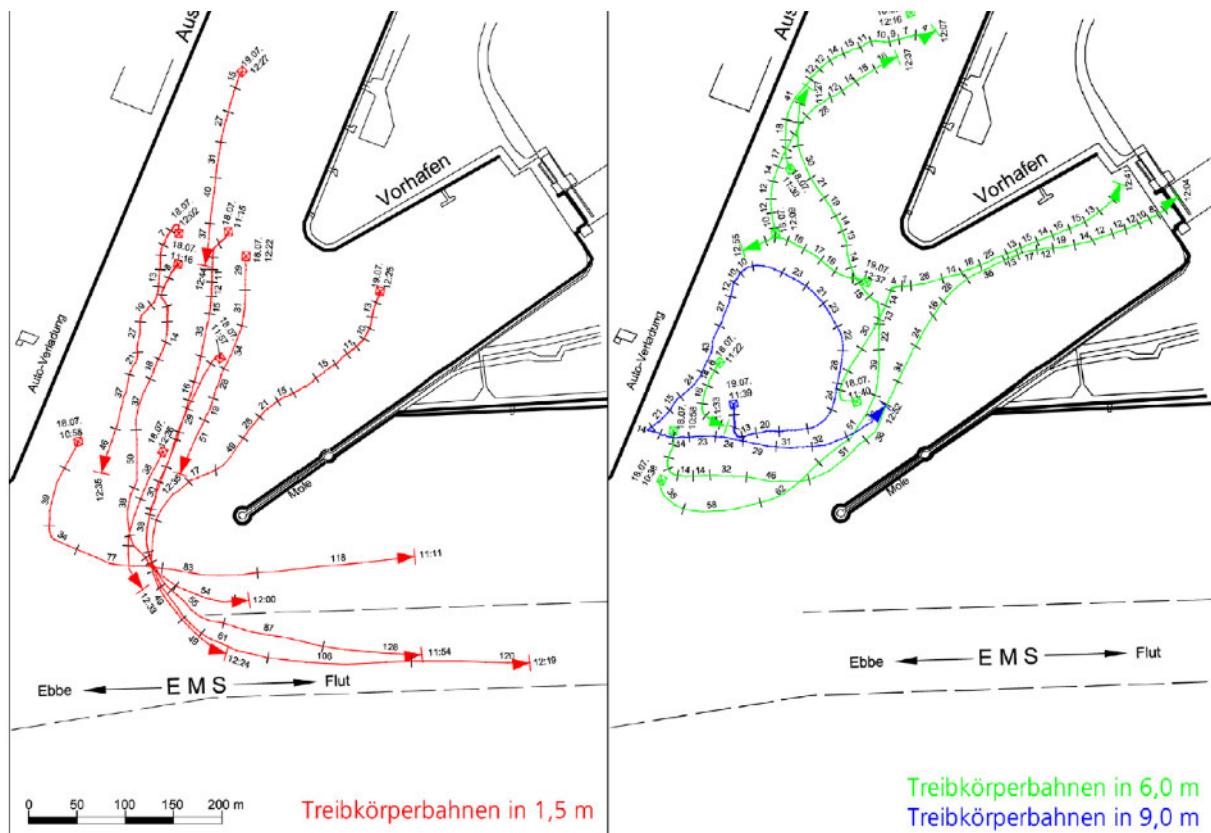


Abbildung 233: Treibkörpermessungen bei Flutstrom im Emdener Außenhafen, entnommen aus "Hydromechanische und morphologische Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen, 03KIS019, Nasner H., 2003

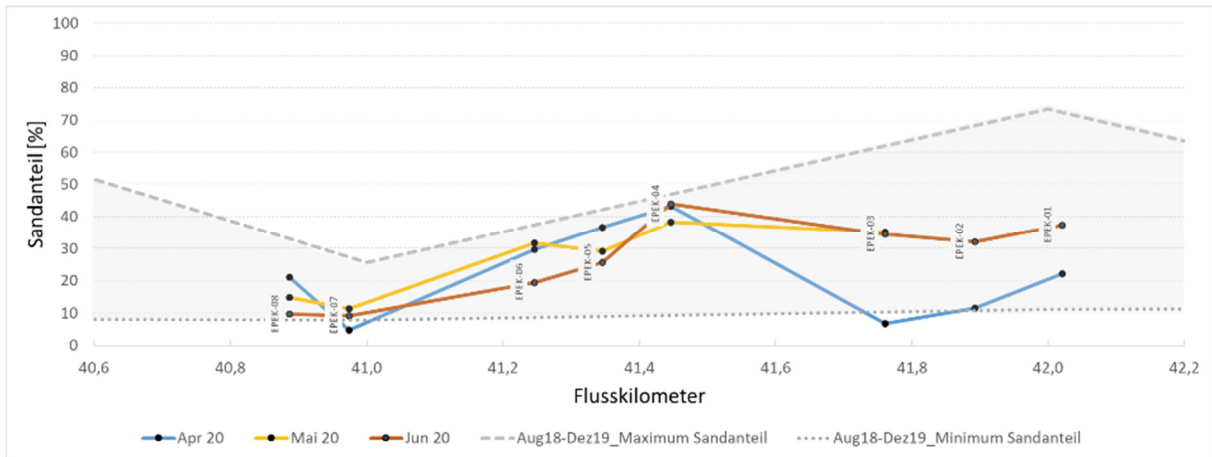


Abbildung 234: Sandanteile der Sedimentproben an den Liegeplätzen NPorts vom 08.04., 20.05. und 24.06.2020; Stationierung: Unterems-Km

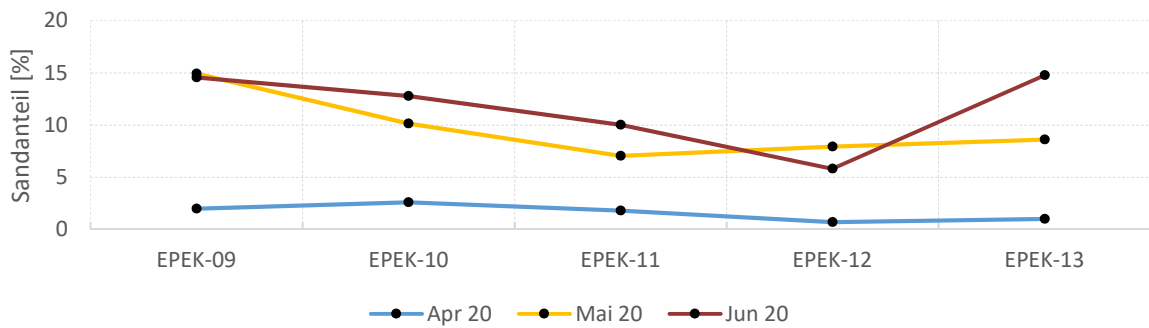


Abbildung 235: Sandanteile der Sedimentproben im Außenhafen sowie an den Liegeplätzen NPorts vom 08.04., 20.05. und 24.06.2020

6.22 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse im Bereich des Emssperrwerks

*Messung, Aufarbeitung und Darstellung der Daten: Holger Dirks, Rabea Tants und Patrick Bruckert;
Text: Andreas Engels (alle NLWKN)*

6.22.1 Durchgeführte Flächenpeilungen

Ober- und unterhalb des Emssperrwerk wurden bis zu einem Abstand von rd. 300 m zur Bauwerksachse mit einem Fächerecholot Flächenpeilungen durchgeführt und damit die Tiefenverhältnisse des gesamten Areals, inklusive der Sperrwerksöffnungen, lückenlos aufgenommen. Mit der vor dem Test ausgeführten Nullmessung wurde der Ausgangszustand der Tiefenverhältnisse ermittelt. Anschließend liefen die Peilungen begleitend zum Test weiter, indem diese unmittelbar nach einer Tidesteuerung stattfanden, so dass jeweils die Option bestand, bei einer sich entwickelnden Gefährdungslage die Fortsetzung des Tests zu unterbrechen oder gar zu beenden. Ein Abbruchkriterium wäre eine nicht zu tolerierende Erosion oder Ablagerung gewesen, die zu einer Gefährdung der Bauwerkssicherheit oder des Schiffverkehrs geführt hätte. Eine solche Gefährdungslage entwickelte sich zwar nicht, dennoch wurde zum Ende des Testzeitraums die Steuerung einer Tide ausgesetzt, um die nach drei direkt aufeinander folgenden Flutstromtidesteuerungen im Nahbereich des Sperrwerks entstandenen Auskolkungen zu bewerten. Nachdem diese als nicht kritisch eingestuft wurden, konnte der Test unverändert fortgeführt werden. Alle weiteren Unterbrechungen der Tidesteuerung erfolgten im Zeitraum, in dem die Tideniedrigwasseranhebung getestet wurde, und ausschließlich aus Rücksichtnahme auf die Hafenvirtschaft Emden. - Unerwünschte Umlagerungen traten in dieser Testphase nicht auf.

Die große Anzahl von 42 Tideniedrigwasseranhebungen konnten letztlich unter Berücksichtigung der Belange der Hafenvirtschaft in unterschiedlicher zeitlicher Abfolge ausgeführt werden: in mehreren direkt aufeinander folgenden Tiden, in jeder zweiten Tide, in unregelmäßigen Abständen und mit einer längeren Unterbrechung. So blieb das Sperrwerk zwischen dem 19. und 29.07. über 17 Tiden durchweg geöffnet, so dass in diesem Zeitraum lediglich der natürliche Tideeinfluss herrschte. Zum Ende des Technischen Tests wurden fünf Flutstromtidesteuerungen durchgeführt. Dabei wurden zunächst drei direkt aufeinander folgende Tiden gesteuert, dann eine Tide ausgesetzt (s.o.) und danach zwei weitere Tiden beeinflusst.

Die Variante „Tideniedrigwasseranhebung“ lässt grundsätzlich keine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in Bauwerksnähe erwarten. Dagegen ist bei der Variante „Flutstromtidesteuerung“ durch den Spaltdurchfluss des teilweise geöffneten Sperrwerks prinzipiell mit erhöhten Geschwindigkeiten und zu Umlagerungen des Sohlmaterials zu rechnen. Neben der Nullmessung wurden 16 Flächenpeilungen während der Testphase der Tideniedrigwasseranhebung ausgeführt. Während der Phase der Flutstromtidesteuerungen wurde in jeder Tide und damit sechs Mal gemessen, womit eine engmaschigere Kontrolle erfolgte. Zum Abschluss wurde eine weitere Messung 10 Tage nach Testende aufgenommen, um den Nachlauf zu betrachten.

Über die durchgeführten Flächenpeilungen lassen sich die Auswirkungen der vorgenannten Tidesteuerungen auf die Tiefenverhältnisse, vor dem Hintergrund des natürlichen Tideeinflusses, bewerten. Zudem gehen die Daten der Peilungen in die Bemessung einer möglichen Erweiterung der Sohlsicherung ein. Sollte zukünftig die Variante Flutstromtidesteuerung dauerhaft zum Einsatz kommen, wird die dafür erforderliche Bemessung der Sohlsicherung einen schadlosen Dauerbetrieb gewährleisten.

6.22.2 Die vorhandenen Tiefenverhältnisse am Emssperwerk und dessen Umgebung

Die Querschnittsgestaltung des Emssperwerks wurde so gewählt, dass der Durchflussquerschnitt und ebenso die Tidedynamik des Flusses möglichst wenig beeinflusst werden. Zwischen etwa Ditzum und Oldersum verläuft die Hauptströmung nördlich der Querschnittsmitte. Diese natürliche Strömungsverteilung wurde bei der Anlage des Emssperwerks berücksichtigt. Auf die vier nördlichen Sperrwerksöffnungen, die aufgrund ihrer Abmessungen einen großen Querschnitt haben, entfällt somit auch der größte Anteil des Durchflusses.

Das Sperrwerk hat insgesamt sieben Öffnungen, sechs Strom- und zwei Randpfeiler. Die 60 m breite Hauptschiffahrtsöffnung liegt aus nautischen und hydraulischen Gründen im Verlauf des bisherigen Fahrwassers, nördlich davon eine 50 m breite Nebenöffnung und südlich die ebenso breite Binnenschiffahrtsöffnung. Daran schließen sich nach Süden 4 weitere Nebenöffnungen mit je 63,5 m Breite an.

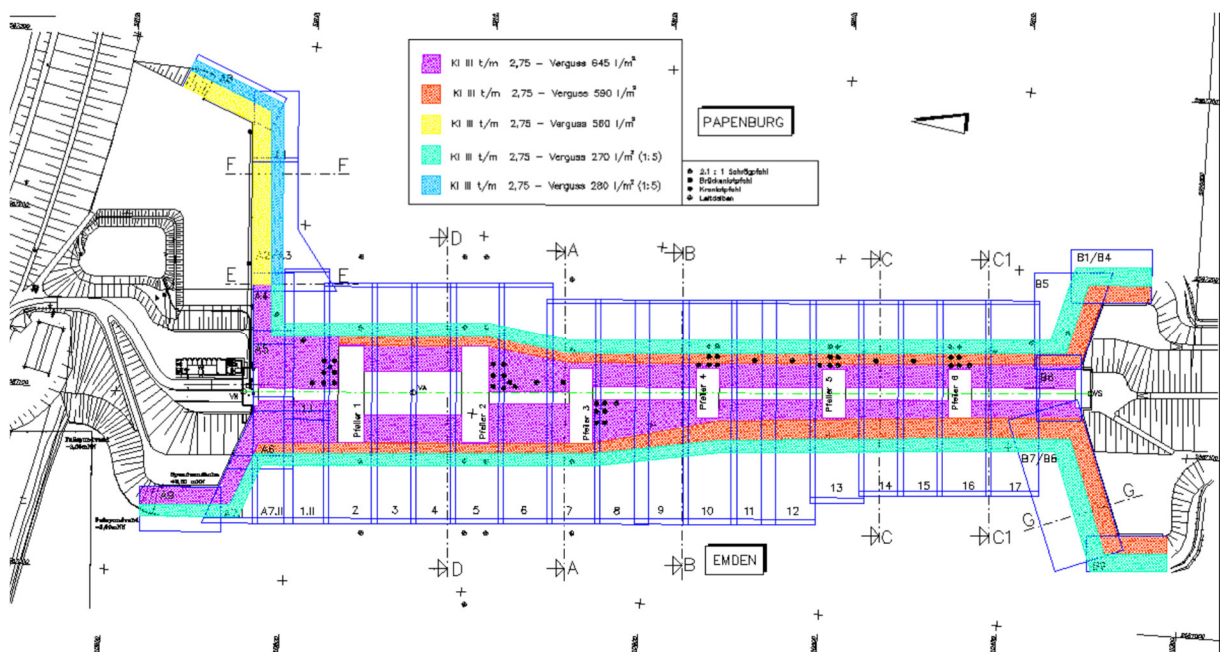


Abbildung 236: Beim Bau des Emssperwerks eingebrachte Sohlsicherung (blauer Rahmen). Die Drepel der Sperrwerksöffnungen bestehen aus Beton, in den farbig markierten Zonen beiderseits der Bauwerksachse erfolgte der Einbau einer Steinschüttung mit Vollverguss, im Übergang zur natürliche Gewässersohle wurde eine lose Steinschüttung eingebracht. Die Oberfläche der Drepel und die Flächen mit einer Vergussmenge von 645 und 590 l/m³ sind horizontal, die daran anschließende Flächen mit einem Verguss von 270 l/m³ und die lose Steinschüttung haben eine Neigung von 1:7. Die in der Legende angegebene Neigung von 1:5 trifft nur auf den äußeren Rand der losen Steinschüttung zu.

Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen, die beim Schließvorgang einer Sturmflutsperrung und während der stufenweisen Öffnung nach einem Aufstau der Ems vorkommen können, erfordern eine massive Sohlsicherung ober- und unterhalb des Bauwerks. Von der Bauwerksachse ausgehend schließt an die betonierten Drepel der Sperrwerksöffnungen zu beiden Seiten eine Sohlsicherung in Form einer Steinschüttung an. Diese ist in Bauwerksnähe vollvergossen und geht ab einem bestimmten Abstand in eine lose Schüttung über, an die letztlich die natürliche Sohle anschließt. Die Steindurchmesser, Schüttdicken und Vergussmengen sind vom Bauwerk ausgehend abgestuft eingebaut. In unmittelbarer Bauwerksnähe ist die Oberfläche der Schüttung horizontal und höhengleich mit dem jeweiligen Drepel, daran anschließend ist die Oberfläche geneigt, wobei Höhen- zu Längenverhältnisse zwischen 1:12 und 1:27 existieren. Der untere Rand der losen Steinschüttung hat auf einer Länge von 2,5 m eine Neigung von 1:5, womit die Schüttung zur unbefestigten Sohle hin ausläuft. Sowohl die Pfeiler als auch die Drepel wurden im Schutze von Baugruben, die mittels tiefgründender Spundwände gesichert waren, hergestellt. Sämtliche

Baugrubenwände sind als Schutz gegen Unterspülung der Bauteile im Untergrund verblieben. Im Sommer 2010 wurde ein auf der Oldersumer Seite der Hauptschifffahrtsöffnung entstandener Kolk verfüllt, mit einem Mehrstufen-Filter abgedeckt und eine sich an die bis dahin vorhandene Sohlsicherung anschließende Steinschüttung eingebracht.

Tabelle 66: Übersicht der Sperrwerkstore, deren Abmessungen und Öffnungsgröße im geöffneten Zustand, bei der Tideniedrigwasseranhebung und Flutromtidesteuerung.

Abfolge der Öffnungen von Nord nach Süd	Torbreite [m]	Höhenlage Drempel [mNHN]	ESW offen: Durchfluss -fläche unter NHN [m ²]	ESW bei TnWA: Durchfluss -fläche unter NHN [m ²]	ESW bei FsTs: Durchfluss -fläche unter NHN [m ²]
Nebenöffnung 1	50	-7	350	0	125
Hauptschifffahrtsöffnung	60	-9	540	0	0
Binnenschifffahrtsöffnung	50	-7	350	0	125
Nebenöffnung 2	63,5	-7	445	0	159
Nebenöffnung 3	63,5	-5	318	0	114
Nebenöffnung 4	63,5	-5	318	0	114
Nebenöffnung 5	63,5	-5	318	0	63,5

Die Abbildung der Flächenpeilung der Nullmessung zeigt die Höhen der Drempel in den Sperrwerksöffnungen und den Übergang zu den Höhen der natürlichen Sohle ober- und unterhalb des Bauwerks. Ebenfalls ist in der Aufnahme die natürliche Oberflächenstruktur, wie Rinnen und Strömungsriffel, zu erkennen. Deutlich ist die natürliche Geometrie des Durchflussquerschnittes zu sehen, mit größeren Tiefen im Norden und flacheren Bereichen im Süden. Zudem lassen sich die Vertiefungen erkennen, die durch das Strömungsmuster entstanden sind, welche durch das Sperrwerk induziert wird. Hier sind die länglichen Vertiefungen ober- und unterhalb der Strompfeiler und auch die Vertiefungen im Nahbereich der Dalben der Hauptschifffahrts- und der Binnenschifffahrtsöffnung zu nennen.

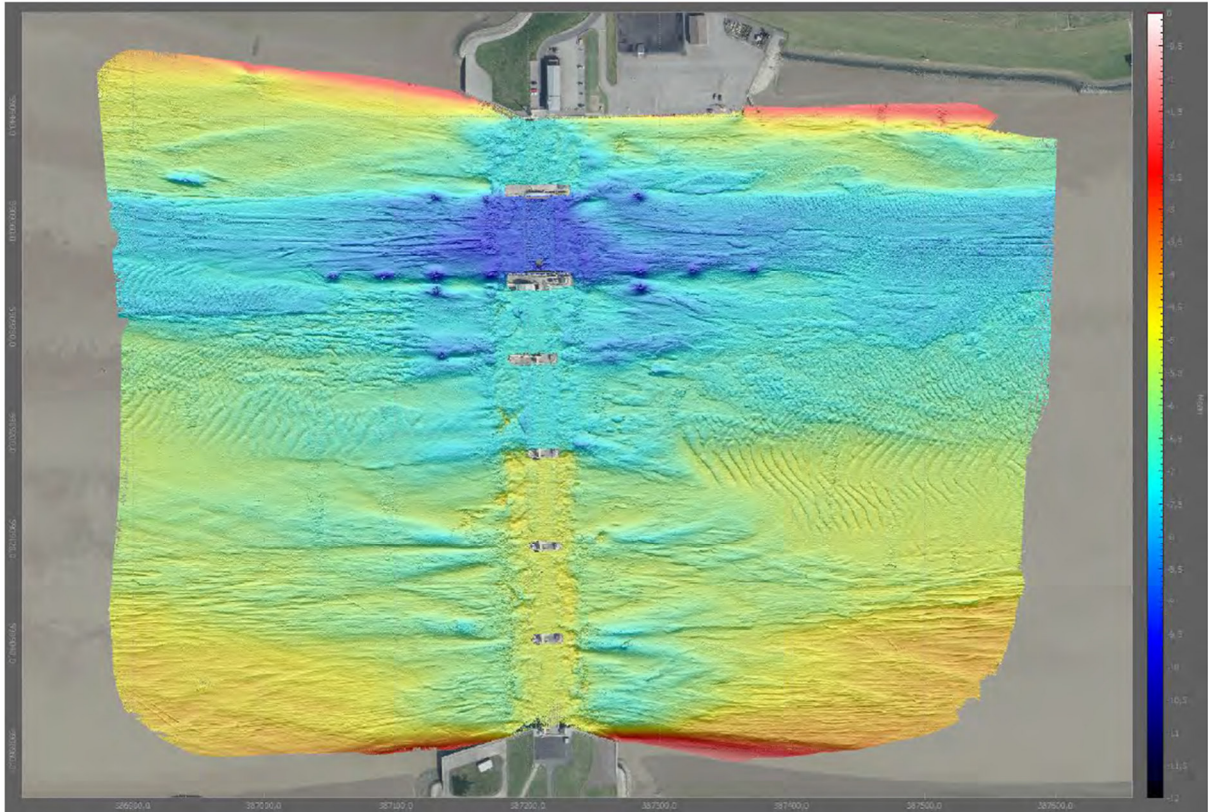


Abbildung 237: Flächenpeilung im Bereich des Emssperrwerks zur Zeit der Nullmessung am 24.06.2020 (Tiefenangaben in mNHN; Skalierung: Weiß = 0 m, Rot = -1 bis -2 m, Gelb = -4 bis -5 m, Grün = -5 bis -6 m, Türkis = -7 m, Blau > -7)

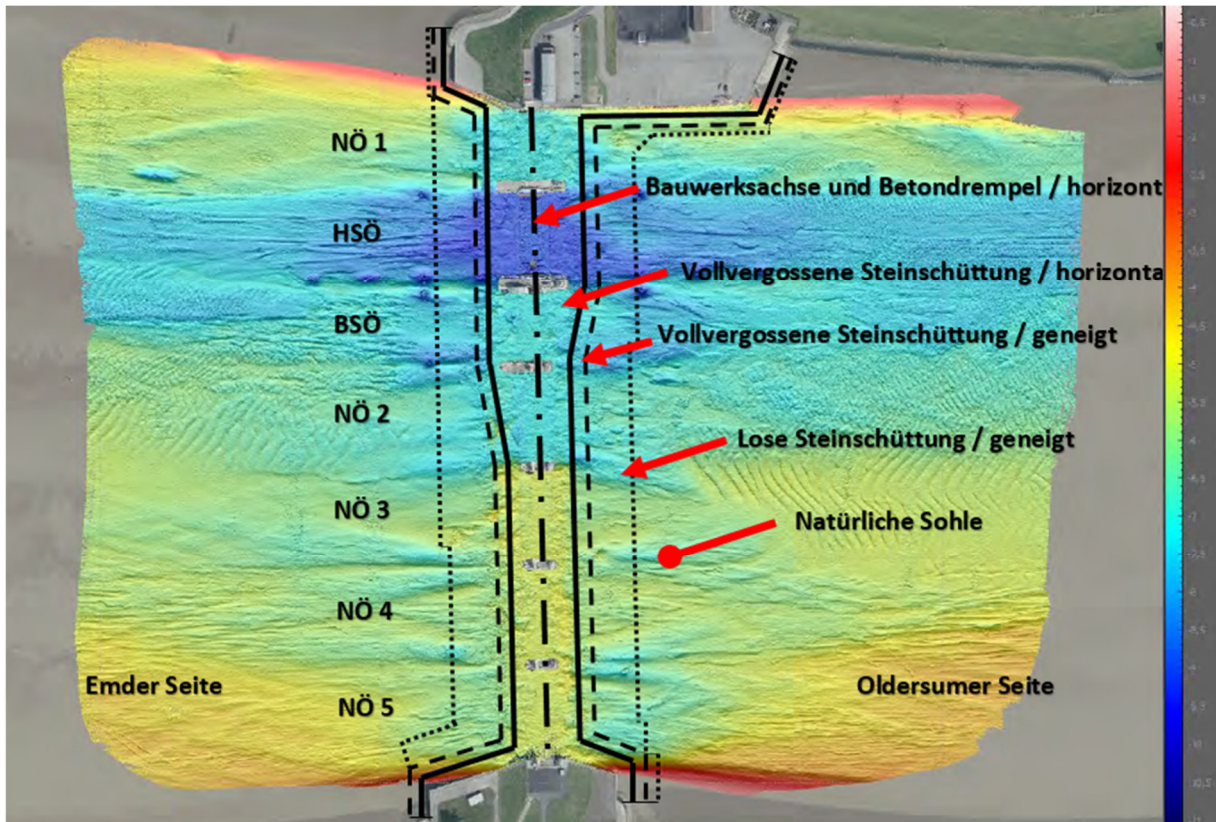


Abbildung 238: Flächenpeilung im Bereich des Emssperrwerks zur Zeit der Nullmessung am 24.06.2020 (Tiefenangaben in mNHN; Skalierung: Weiß = 0 m, Rot = -1 bis -2 m, Gelb = -4 bis -5 m, Grün = -5 bis -6 m, Türkis = -7 m, Blau > -7) und Lage der Sohlensicherung. Die Sohlordinat der Drempel liegt bei NHN -9 m (HSÖ), NHN -7 m (NÖ1, BSÖ und NÖ2) und NHN -5 m (NÖ3-5). Der äußere Rand der vollvergossenen und geneigten Steinschüttung (gestrichelte Linie) liegt im Bereich der NÖ2 bei etwa

NHN -7,3 m. Der äußere Rand der losen Steinschüttung (gepunktete Linie), liegt im Bereich der NÖ2 bei NHN -9 m. Auf der geneigten Sohlsicherung liegt eine mehrere Meter dicke Sedimentschicht.

Die Oberfläche der befestigten Sohle fällt leicht zur natürlichen Sohle hin ab. Im Laufe der Zeit lagerte sich insbesondere auf dem geneigten Abschnitt der Steinschüttung Sediment ab, so dass diese im heutigen Zustand fast vollständig damit bedeckt ist.

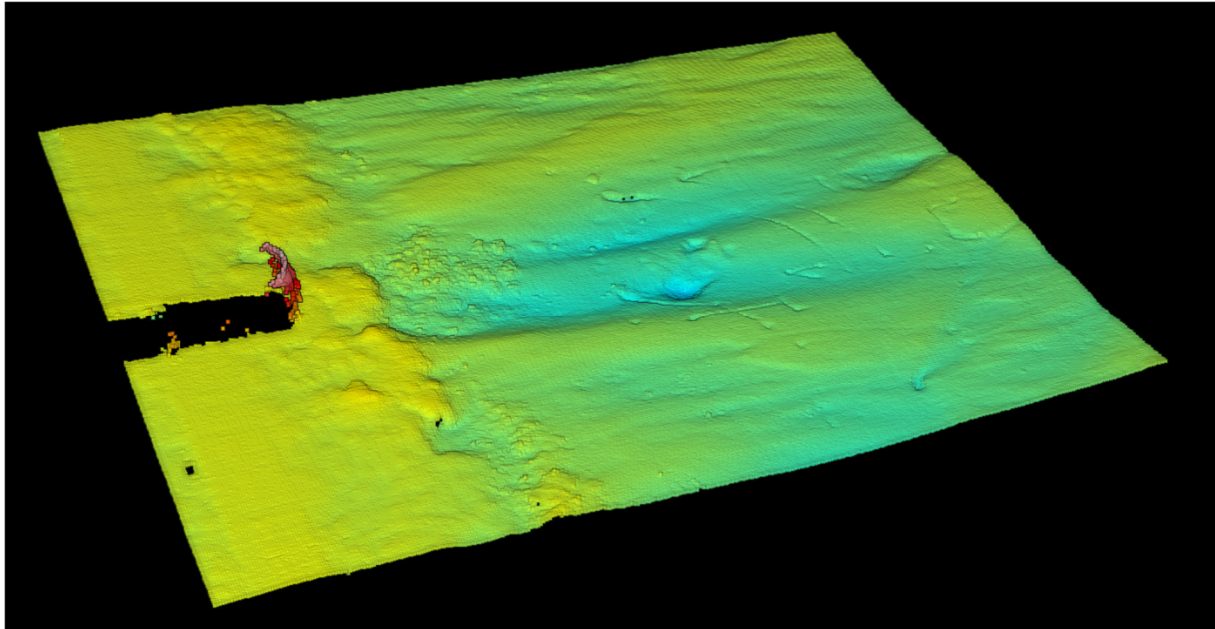


Abbildung 239: Flächenpeilung am Emssperrwerk, 3-dimensionale Darstellung eines Ausschnitts im Bereich der Nebenöffnungen 4 und 5. Die Darstellung veranschaulicht den Übergangsbereich von den Drempeln der Öffnungen (links) zur mit Sediment überlagerten befestigten Sohle (rechts, in Richtung Oldersum). Die in der Bildmitte befindliche Mulde stammte von einem Bootswrack, welches kurze Zeit vorher geborgen wurde (Aufnahme vom 08.07.2020 17:35 Uhr)

Die Gestalt des Durchflussquerschnittes ober- und unterhalb des Emssperrwerks ist das Resultat der Strömungsverhältnisse bzw. der daraus resultierenden Erosions- und Akkumulationsvorgänge. Bis auf die befestigten Bereiche unterliegt die Bathymetrie der tide- und witterungsbedingten Variabilität und wird auch durch den Betrieb des Emssperrwerks beeinflusst.

Das Sperrwerk wird bislang nach bestimmten Vorgaben eingesetzt, die in dem aktuell gültigen Betriebsplan verankert sind. Demnach wird das Sperrwerk zum Aufstau der Ems sowie zum Sperren von Sturmfluten geschlossen. Der Aufstau der Ems zur Überführung tiefgehender Werftschiffe findet etwa ein- bis dreimal jährlich statt. Sturmflutsperrungen erfolgen statistisch nur einmal in zwei Jahren oder seltener. Zu Beginn des Technischen Tests lag der letzte Betrieb des Sperrwerks bereits lange Zeit zurück, denn der letzte Aufstau der Ems fand am 22.03.2020 und die letzte Sturmflutsperrung am 12.02.2020 statt. Am 24.06.2020, fünf Tage vor Beginn des Technischen Tests, erfolgte die Nullmessung. Aufgrund des langen Zeitabstands zum letzten vorhergehenden Sperrwerkeinsatz ist davon auszugehen, dass die dabei aufgenommenen Tiefenverhältnisse durch den natürlichen Tideeinfluss entstanden waren.

Um die Entwicklung der Gewässersohle in Abhängigkeit der Tide und der Sperrwerkssteuerung besser beurteilen zu können, wurden die Höhendifferenzen zu jeder Vormessung sowie auch zur Nullmessung berechnet und dargestellt.

6.22.3 Verhalten der Gewässersohle in der Versuchsphase der Tideniedrigwasseranhebungen

In den fünf Tagen zwischen Nullmessung und erster Tideniedrigwasseranhebung hatte sich durch den natürlichen Tideeinfluss auf einer kleinen Fläche der westlichen Seite (zwischen der Nebenöffnung 4

und 5) eine leichte Vertiefung um etwa 0,5 m gebildet. Im Zeitraum zwischen dem 04. und 08.07. wurde die Tideniedrigwasseranhebung in Rücksichtnahme auf die Hafenvirtschaft Emden für vier Tiden ausgesetzt. In diesem Zeitraum traten erhöhte Tiden, u.a. eine leichte Sturmflut am 06.07. ein. In dieser Zeit wurde auf einer weiteren Fläche Sohlmaterial abgetragen, diesmal auf der östlichen Seite des Emssperrwerks (im Bereich der Nebenöffnung 2). Im weiteren Testverlauf, in dem die Tideniedrigwasseranhebung intermittierend ausgeführt wurde, änderten sich die Tiefenverhältnisse kaum. Lediglich die Riffel änderten ihre Lage. Auch die vorgenannten Vertiefungen, die zu Anfang des Tests durch die natürliche Tide entstanden waren, änderten sich nur unwesentlich. Wie eingangs beschrieben, unterliegt die Sohlgestalt auch der Variabilität der Tide. Folglich hatte sich vermutlich an den betreffenden Stellen vor der Nullmessung Material abgelegt und wurde durch die späteren Tideverhältnisse wieder fortgetragen. In den Differenzenplänen aller weiteren Messungen sind diese beiden Flächen weiterhin, sich über die Dauer leicht abschwächend, zu sehen. Bis zum Ende der Testphase, in der die Tideniedrigwasseranhebungen durchgeführt wurden, entstanden keine weiteren vergleichbaren Erosionen.

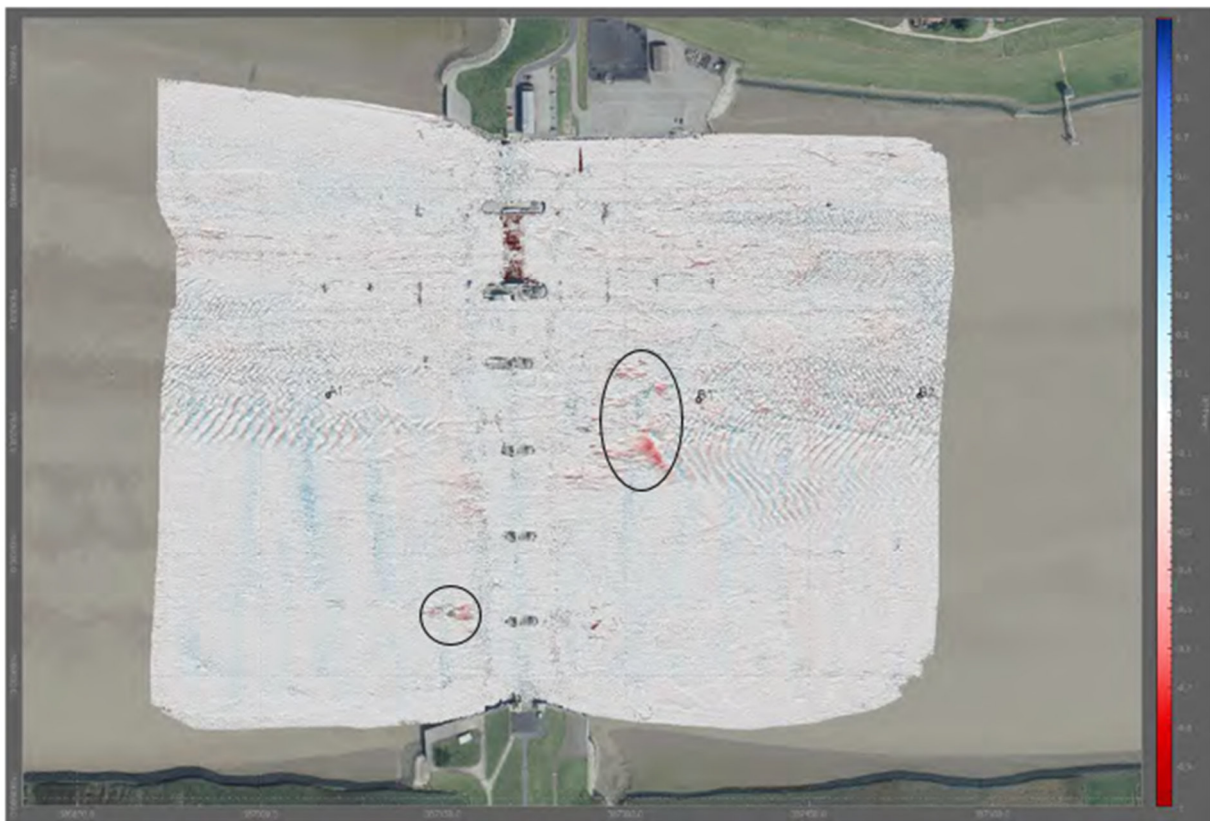


Abbildung 240: Differenzen zwischen der Flächenpeilung des 08.07. und der Nullmessung am 24.06.2020 (Erosion: negative Werte/Rot; Akkumulation: positive Werte/blau; Skalierung von -1 m bis +1 m). Die Abträge in den beiden markierten Bereichen, die maximal etwa 0,5 m betragen, entstanden unabhängig von der Tideniedrigwasseranhebung durch den natürlichen Tideeinfluss. Die leichte Erosion im Südwesten war im Zeitraum zwischen dem 24.06. (Nullmessung) und dem 29.06. (erste Tideniedrigwasseranhebung) entstanden und der Abtrag auf der anderen Fläche zwischen dem 04.07. und 08.07.2020. Im letztgenannten Zeitraum wurde die Tidesteuerung über vier Tiden ausgesetzt. Gleichzeitig traten deutlich erhöhte Tiden auf, insbesondere während der leichten Sturmflut am 06.07.2020. Die befestigte Sohle ist mit einer mehreren Meter dicken Sedimentschicht bedeckt. Die tiefsten Punkte der Erosionsbereiche befanden sich daher weit oberhalb der Sohlbefestigung.

Die leichte Rot- (Abtrag) und Blaufärbung (Ablagerung) in den Differenzenplänen, die hauptsächlich flächenhaft festzustellen war und in einzelnen Strukturen räumlich und zeitlich wechselte, geht vermutlich hauptsächlich auf die tidebedingte Variabilität der Gewässersohle zurück. Die natürlichen Einflüsse auf die Umlagerung von Sediment waren demzufolge stärker als der Einfluss, der von den Tideniedrigwasseranhebungen ausging.

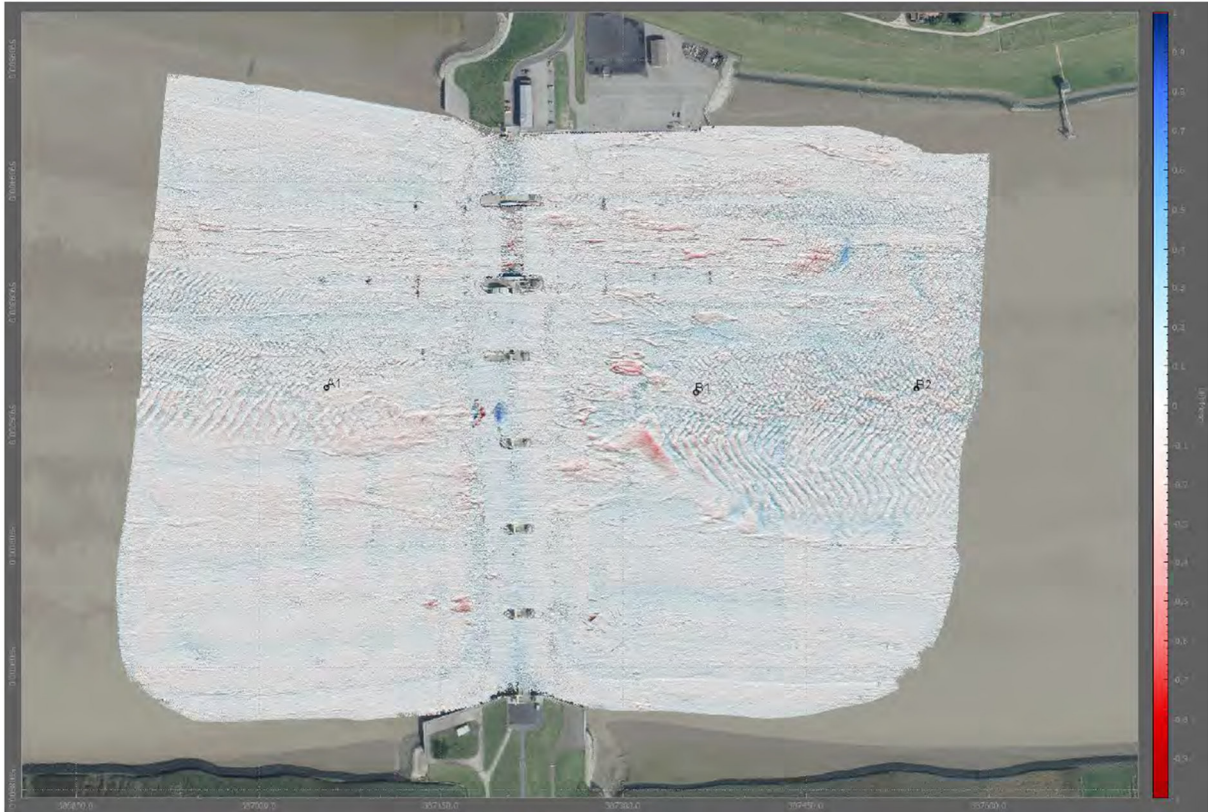


Abbildung 241 Differenzen zwischen der Flächenpeilung des 14.08. (nach letzter Tideniedrigwasseranhebung) und der Nullmessung am 24.06.2020 (Erosion: negative Werte/Rot; Akkumulation: positive Werte/blau; Skalierung von -1 m bis +1 m). Deutlich treten noch die beiden Flächen in Erscheinung, auf denen gleich zu Anfang des Technischen Tests durch natürliche Tideeinwirkung leichte Abträge entstanden waren (vgl. vorhergehende Abbildung). Im Laufe der Testphase nahmen deren Tiefen ab. Die punktuelle Höhenänderung in der Nebenöffnung 3 (sowohl Zunahme als auch Abnahme) stammte von einer Baumaßnahme Anfang August, in der eine Unebenheit in der verklammerten Steinschüttung ausgeglichen wurde.

6.22.4 Auswirkungen der Flutstromtidesteuerung auf die Gewässersohle am Emssperrwerk

Bei der Flutstromtidesteuerung waren in direkter Sperrwerksnähe Turbulenzen und an den Dalben Wirbel auf Oldersumer Seite zu beobachten. Diese gingen mit zunehmendem Abstand zum Sperrwerk in eine ruhige und über die gesamte Gewässerbreite verteilte Strömung über, ohne großräumige Wirbel auszubilden. Auf Emders Seite waren keine vergleichbaren Bedingungen in unmittelbarem Sperrwerksbereich zu erkennen. Die Strömungsverhältnisse der Flutstromtidesteuerung führten zu einer örtlich begrenzten Erosion auf der Oldersumer Seite im Bereich der Nebenöffnungen 1, 2, 3, 4 und der Binnenschifffahrtsöffnung. Dabei war die Abtragung bei der Nebenöffnung 2 wesentlich stärker als an den anderen Toren, was sich in einer größeren Erosionsfläche und -tiefe äußerte. Die tiefste Stelle des Erosionsbereichs hatte eine Höhenlage von NHN -8,1 m und befand sich rd. 40 m von der Bauwerksachse entfernt bzw. rd. 18 m unterhalb der vollvergossenen Schüttung. Damit ereignete sich die Erosion im Abschnitt der losen Steinschüttung, deren Oberfläche mit einer Neigung von im Mittel 1:19 vom Bauwerk abfällt. Folglich war die tiefste Stelle des Erosionsbereichs höhengleich mit der Oberfläche der Steinschüttung an betreffender Stelle. Es ist daher festzustellen, dass dort ausschließlich das auf der Sohlsicherung liegende Sediment abgetragen wurde, die Steinschüttung selber wurde nicht angegriffen. Wie bereits eingangs erläutert, fand nach jeder Flutstromtidesteuerung eine Kontrollmessung statt. Die Tiefenentwicklung nahe der Nebenöffnung 2 gaben Anlass, nach drei direkt aufeinander folgenden Flutstromtidesteuerungen zunächst eine Tidesteuerung auszusetzen. Aus Sicherheitsgründen sollten die bis dahin entstandenen

Sohldifferenzen bewertet werden, bevor mit dem Test fortgefahren würde. Dabei konnte geklärt werden, dass lediglich die auf der Sohlsicherung befindliche Sedimentlage örtlich begrenzt abgetragen wurde und die darunter befindliche Sohlsicherung unbeschadet blieb. Daraufhin wurde der Test unverändert fortgeführt. Bereits in der Machbarkeitsstudie zur Tidesteuerung wurde die mögliche Kolkentwicklung im Sperrwerksbereich durch ein Gutachten, das sich auf eine morphodynamische Modellrechnung stützte, prognostiziert ^{41, 42}. Die dabei berücksichtigte Torsteuerung entsprach der tatsächlich ausgeführten Steuerung, allerdings wurde eine durchweg höhere Tideintensität und über längere Zeit dauerhafte Steuerung zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Randbedingungen stimmt die Gestalt der Erosionsflächen auf Oldersumer Seite grundsätzlich mit dem Ergebnis der morphodynamischen Berechnung überein. Allerdings wurde darin angenommen, dass sich die Auskolkungen nicht nur im Abstrom des Sperrwerks (also auf Oldersumer Seite) auftreten, sondern auch im Anstrom. Der Grund dieser Prognose war, dass sich dort kurz vor dem Eintritt in die Sperrwerksöffnungen die Strömung konzentriert und diese dabei beschleunigt. Dieses kann dazu führen, dass an jeder Stelle dieses Bereichs mehr Sediment abtransportiert als antransportiert wird, was eine Kolkbildung zur Folge haben kann. Zusätzlich zu dieser Prognose kann auch angenommen werden, dass bei häufiger Tidesteuerung die Verlagerung der Hauptströmung dazu führt, dass sich diese ein neues Gerinne schafft. Der für die Emders Seite prognostizierte Erosionsprozess trat während des Test nicht in Erscheinung. Dieses kann mit der relativ geringen Anzahl der Flutstromtidesteuerungen zu tun haben, die insbesondere auch nicht dazu ausreichte, dass sich die Strömung ein neues Gerinne schuf.

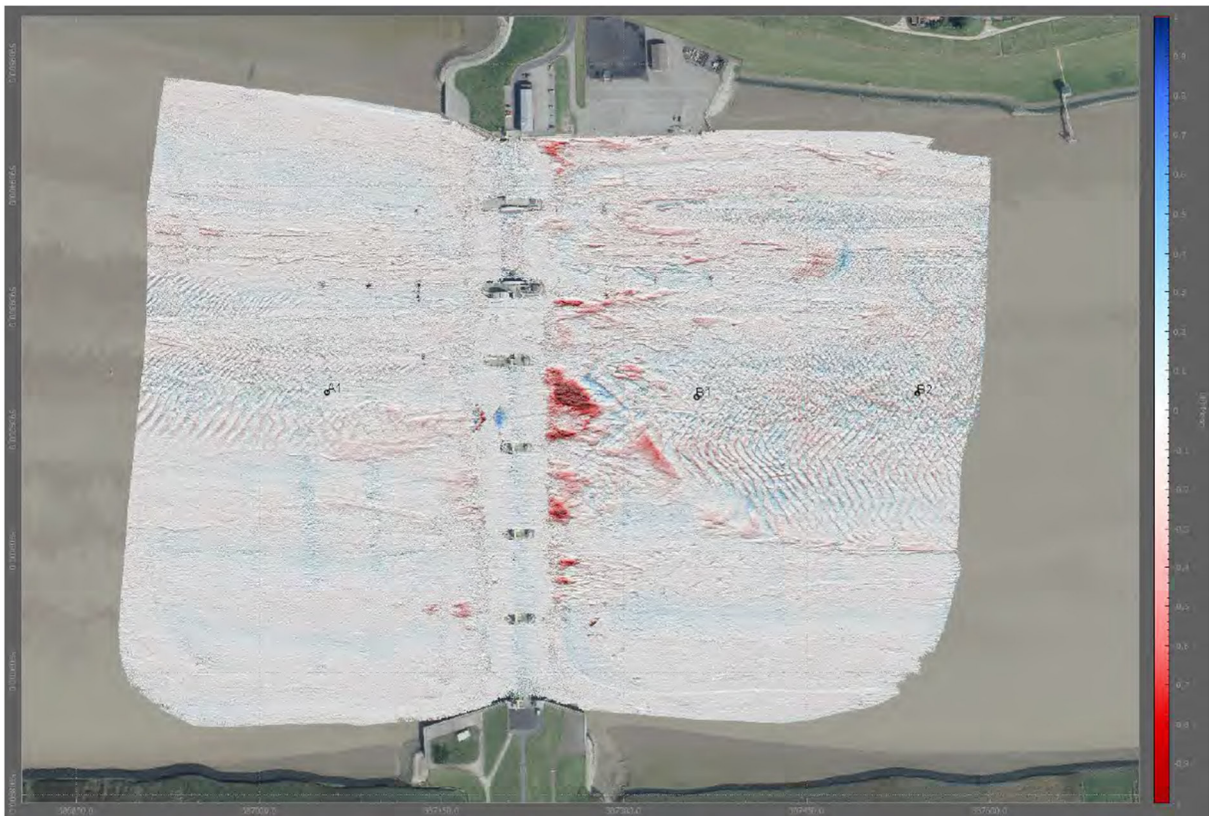


Abbildung 242: Differenzen zwischen der Flächenpeilung des 17.08. (nach letzter Flutstromtidesteuerung) und der Nullmessung am 24.06.2020 (Erosion: negative Werte/Rot; Akkumulation: positive Werte/blau; Skalierung von -1 m bis +1 m).

⁴¹ NLWKN Aurich (2016) Masterplan Ems 2050 – Machbarkeitsuntersuchung zur Tidesteuerung mit dem Emssperrwerk Gandersum; NLWKN Betriebsstelle Aurich, Dezember 2016

⁴² ZANKE (2016) Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Sohlsicherung und Kolkbildung am Emssperrwerk bei Betriebsfällen zur Tidebeeinflussung; Zanke und Partner, Garbsen Januar 2016

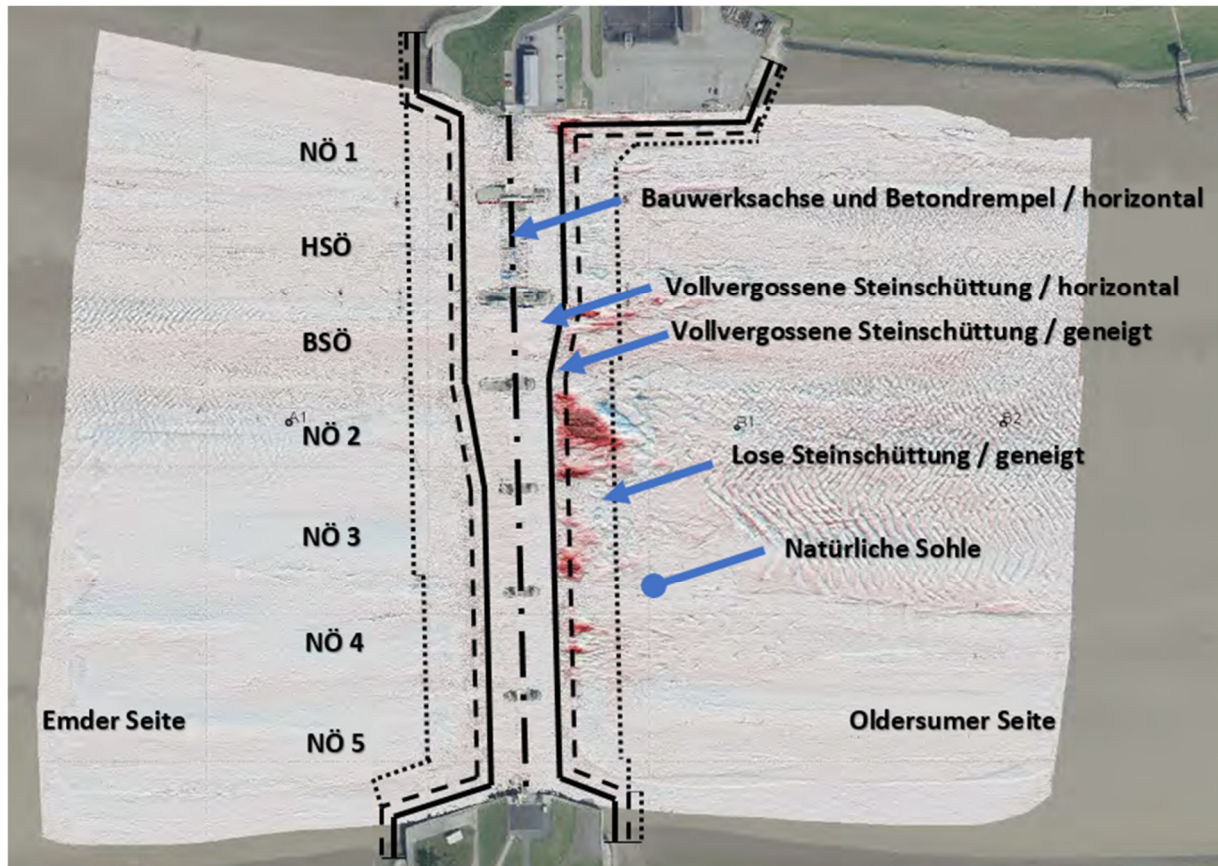


Abbildung 243: Differenzen zwischen der Flächenpeilung des 17.08.2020 und Lage der Sohlsicherung. Die Sohlordinate der Drempel liegt bei NHN -9 m (HSÖ), NHN -7 m (NÖ1, BSÖ und NÖ2) und NHN -5 m (NÖ3-5). Der äußere Rand der vollvergossenen und geneigten Steinschüttung (gestrichelte Linie) liegt im Bereich der NÖ2 bei etwa NHN -7,3 m. Der äußere Rand der losen Steinschüttung (gepunktete Linie), liegt im Bereich der NÖ2 bei NHN -9 m. Auf der geneigten Sohlsicherung liegt eine mehrere Meter dicke Sedimentschicht. Der tiefste Punkt des erodierten Bereichs nahe der NÖ2 lag bei NHN -8,1 m und war damit höhengleich mit der Steinschüttung an betreffender Stelle.

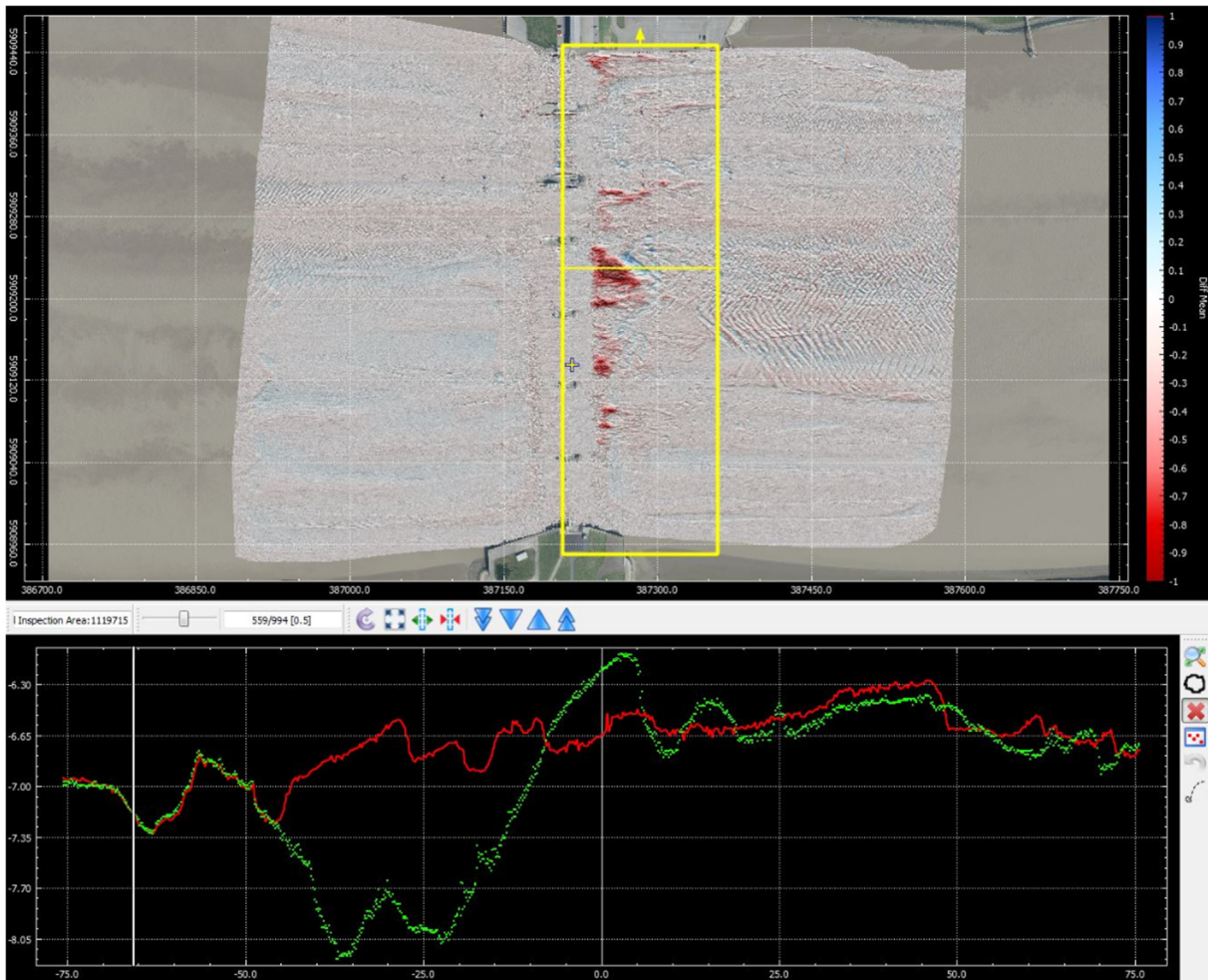


Abbildung 244: Oben: Differenzen zwischen der Flächenpeilung des 17.08. (nach letzter Flutstromtidesteuerung) und der Messung vom 14.08.2020 (Vor Beginn der Flutstromtidesteuerung) sowie Vermessung des Erosionsbereichs an der Nebenöffnung 2. Unten: Querschnitt des Sohlverlaufs durch das Zentrum des Erosionsbereichs an der Nebenöffnung 2, von der Sperrwerksachse (linker Bildrand) über die vollvergossene und lose Steinschüttung bis zur natürlichen Sohle. Die rote Linie kennzeichnet den Verlauf des 14.08. und die grüne Linie die des 17.08.2020. Der tiefste Punkt des erodierten Bereichs lag bei NHN -8,1 m und war damit Höhengleich mit der Steinschüttung an dieser Stelle. Über die Flutstromtidesteuerung wurde eine auf der festen Sohlsicherung liegende Sedimentauflage, die an dieser Stelle eine Dicke von 1,4 m hatte, abgetragen. Anmerkung: die Abbildung unten ist stark überhöht, Höhenangaben in (m NHN) / Einteilung 0,35 m, Längenangaben in (m) Einteilung 25 m.

6.23 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Tiefenverhältnisse von Außenmuhden

Messung, Aufarbeitung und Darstellung der Daten: Patrick Bruckert und Rabea Tants; Text: Andreas Engels (alle NLWKN)

6.23.1 Ausführung der Messung

Im Abschnitt zwischen Knock bis Stapelmoor (rd. 19 km unterhalb bis rd. 29 km oberhalb des Emssperrwerks) wurden in einem Abstand von zumeist zwei bis drei Kilometern Außenmuhden und Hafeneinschnitte jeweils ein Mal vor und nach dem Technischen Test flächenhaft gepeilt. Die Vormessungen fanden zwischen dem 18. und 22.06.2020 statt und die Nachmessungen erfolgten im Zeitraum zwischen dem 19.08. und dem 02.09.2020. Mit einem Fächerecholot wurde jeweils die Höhenlage der Schlickoberfläche aufgenommen und mit einem parametrischen Echolot die Dicke der Schlicksicht vermessen.

Eine mögliche Sedimentation in den Auslaufbereichen der Mündungsbauwerke kann die Leistungsfähigkeit der Binnenentwässerung, insbesondere der Siel-Entwässerung, beeinträchtigen und in den Häfen kann dadurch die Befahrbarkeit eingeschränkt werden. In einer Auswahl von Muhden, über die auch eine Siel-Entwässerung erfolgt, fanden Messungen statt. Dazu gehören die Ausläufe der Mündungsbauwerke Knock, Borßum, Pogum, Petkum, Ditzum, Oldersum, Coldeborg, Sautel, Soltborg und Stapelmoor. Ebenfalls wurden die Muhden der Mündungsbauwerke Terborg, Coldemüntje, Kloster Muhde und Mark vermessen, wo die Binnenentwässerung ausschließlich über ein Schöpfwerk stattfindet. Über die Schleusenzufahrten Oldersum (Ems-Seitenkanal) und Weener (Hafen) sowie im Sportboothafen Jemgum erfolgt keine Binnenentwässerung, hier stand die Beobachtung der Sedimentation hinsichtlich der Befahrbarkeit im Vordergrund. Die Muhden Sautel, Petkum und Ditzum haben sowohl eine Funktion als Entwässerungsauslauf sowie auch als (Sportboot-) Hafen. In Ditzum ist eine Kutterflotte beheimatet, zudem befinden sich in Ditzum und Petkum Anleger einer ganzjährig verkehrenden Fährverbindung. Die betrachteten Außenmuhden haben sehr unterschiedliche Flächengrößen, -formen und Tiefen. Die Ausläufe der oberhalb von Leerort befindlichen Mündungsbauwerke Coldemüntje, Mark und Stapelmoor sind eng und relativ kurz. Dagegen sind die unterhalb von Leerort liegenden Muhden zumeist breiter und sehr langgestreckt. Die Sedimentation im Emdener Außenhafen und den dazu gehörenden Anlegestellen im Emdener Fahrwasser wurde ebenfalls beobachtet. Die Auswertung dazu erfolgt in einem gesonderten Kapitel.

Mit Ausnahme von Pogum, wo nach der ersten Vermessung eine Räumung stattfand, wurden die Messungen aller anderen Auslaufbereiche ausgewertet. Dazu wurden die Differenzen von Vor- zu Nachmessung des Fächerecholots bestimmt und zur besseren Übersicht die mittlere Differenz zwischen beiden Höhen berechnet. Dabei bezieht sich diese mittlere Änderung der Schlickoberfläche auf die Gesamtfläche, die eindeutig dem Auslaufbereich zuzuordnen ist. Zudem wurde für jede Muhde die größte Höhenzu- und Höhenabnahme bestimmt, wobei Einzelwerte, die nur einen örtlich begrenzten Bereich innerhalb der Muhde repräsentieren, miteinander verglichen wurden.

6.23.2 Die mittlere Höhendifferenz der Schlickoberfläche

Die Veränderung des arithmetischen Mittelwertes aller Höhendifferenzen innerhalb einer Muhde ist grundsätzlich dazu geeignet, den dortigen Entwicklungstrend zu repräsentieren. Allerdings war in allen Muhden eine große Schwankungsbreite um den Mittelwert festzustellen, wodurch dieser die tatsächliche Änderung nur mit Vorbehalt charakterisiert.

In den Muhden entlang der Ems kamen sowohl positive als auch negative mittlere Höhendifferenzen vor. Die größte Abnahme war in Stapelmoor festzustellen, wo eine mittlere Differenz von -31 cm vorlag. Die größte Zunahme war in der Außenmuhde Knock mit im Mittel +30 cm festzustellen. In den dazwischen befindlichen Muhden bot sich ein uneinheitliches Bild. An den meisten Orten war nach dem Test eine höhere Schlickoberfläche vorhanden, wobei zumeist nur Differenzen bis +5 cm und in wenigen Fällen zwischen +10 bis +15 cm eintraten. Jedoch war in einigen Muhden nach dem Test auch niedrigere Schlickoberfläche zu messen, wobei auch Differenzen um -20 cm vorkamen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zwar in den meisten Fällen nach dem Test eine leicht höhere Schlickoberfläche vorhanden war, dem jedoch eine deutlich niedrigere Oberfläche in einigen Muhden gegenüberstand. Die große Streuung der Daten entlang der Ems lässt keine Differenzierung der Gesamtstrecke in Abschnitte zu, denen eindeutig ein Ein- oder Austrag von Sediment durch die Tidesteuerung zuzuordnen ist.

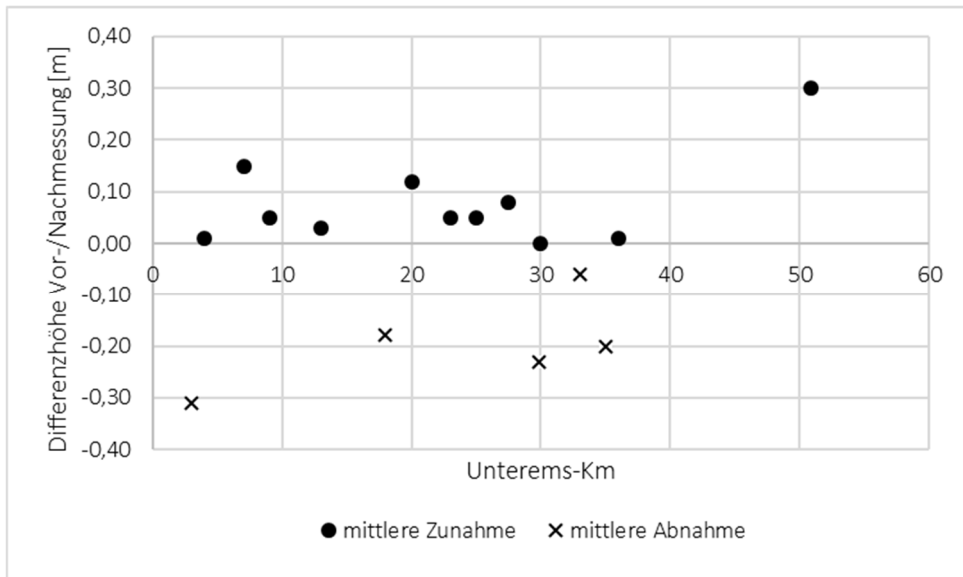


Abbildung 245: Höhendifferenz der Schlickoberfläche in den Muhden zwischen Stapelmoor (Unterems-Km 3) bis Knock (Km 51). Mittlere Differenz der Höhenlage zwischen der Vormessung (18. bis 22.06.2020) und der Nachmessung (19.08. bis 02.09.2020).

6.23.3 Stärkste Zu- und Abnahmen der Tiefenverhältnisse

In jeder Muhde gab es positive und negative Differenzen zur Vormessung. Ein positiver Extremwert steht für die stärkste Anhäufung und ein negativer Extremwert repräsentiert den stärksten Abtrag gegenüber der Vormessung. Werden die positiven Extremwerte aller Muhden miteinander verglichen, so lagen diese entlang der Ems zumeist zwischen +0,5 und +1 m. Der Vergleich aller negativen Extreme zeigt oberhalb von Leerort Werte zwischen -0,5 und -1 m. Unterhalb von Leerort nahmen die negativen Werte sogar auf -1 bis -2 m zu. Insgesamt steigt die Spanne, also die Differenz zwischen den Extremwerten innerhalb einer Muhde, von Stapelmoor nach Knock deutlich an, und zwar von < 1,5 m oberhalb von Leerort bis > 2,5 m in Oldersum und unterhalb davon. Dieses Ergebnis spricht für eine Umlagerung von Sediment, deren Intensität in Richtung Knock zunahm. Die Umlagerung des Sediments kann durch die Entwässerung über das Mündungsbauwerk, durch die Strömung der Ems oder durch Wellen (Wind) verursacht worden sein. Ob das Material innerhalb der jeweiligen Muhde umgelagert oder darin eingetragen bzw. heraustransportiert wurde, geht aus den Daten nicht hervor.

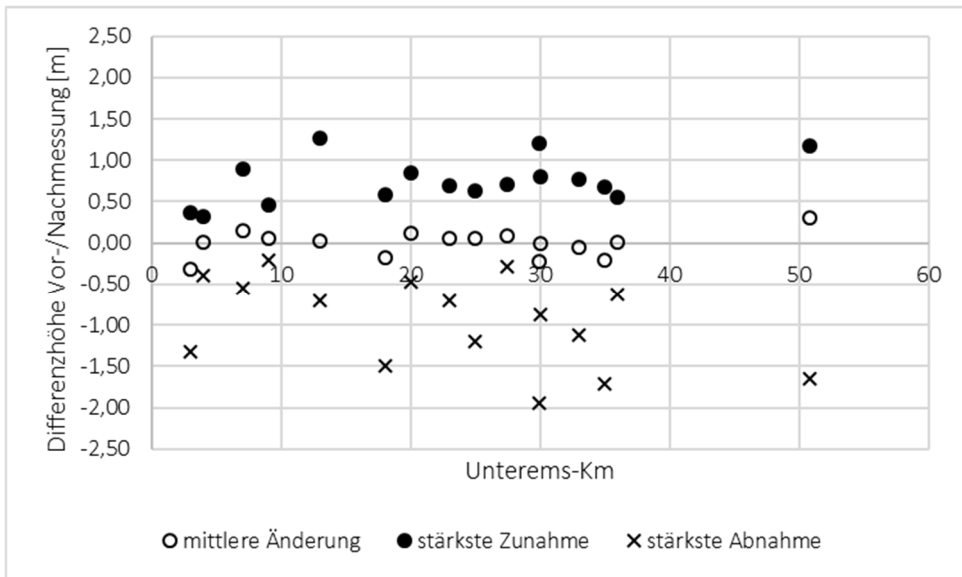


Abbildung 246: Höhendifferenz der Schlickoberfläche in den Muhden zwischen Stapelmoor (Unterems-Km 3) bis Knock (Km 51). Mittlere Differenz, stärkste Abnahme und stärkste Zunahme der Höhenlage zwischen der Vormessung (18. bis 22.06.2020) und der Nachmessung (19.08. bis 02.09.2020).

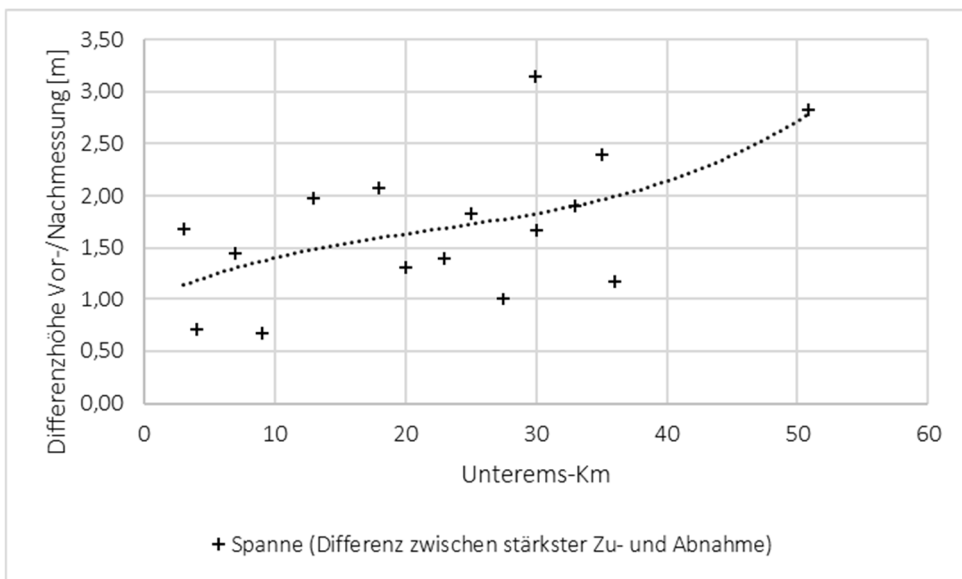


Abbildung 247: Höhendifferenz der Schlickoberfläche in den Muhden zwischen Stapelmoor (Unterems-Km 3) bis Knock (Km 51). Spanne zwischen stärkster Abnahme und stärkster Zunahme der Höhenlage.

Tabelle 67: Zusammenstellung der Differenzen von Vor- und Nachmessung mit dem Fächerecholot in den Auslaufbereichen der Siel- und Schöpfwerke Stapelmoor bis Knock; Anmerkung: Über die meisten der betrachteten Muhden erfolgt ein Siel- und Schöpfbetrieb, in einigen Fällen kommt nur ein Schöpfwerk zum Einsatz und in Einzelfällen findet keine Binnenentwässerung über die Muhde statt. Die Muhde des Siels und Schöpfwerks Pogum wurde nach der Vormessung geräumt, so dass keine vergleichbaren Daten erhoben werden konnten.

Ort	AEo [km ²]	Unterems-Km	Differenz Vor- zu Nachmessung [m]			
			Größte Abnahme der Tiefe	Größte Zunahme der Tiefe	Spanne	Mittelwert
Knock	350	51	1,18	-1,65	2,83	0,30
Borßum	128	36	0,55	-0,63	1,18	0,01
Pogum	58	35	Räumung zwischen Vor- und Nachmessung			(-0,18)
Petkum	50	35	0,67	-1,72	2,39	-0,20
Ditzum	50	33	0,77	-1,13	1,90	-0,06
Oldersum / Schleuse	Keine Binnenentwässerung	30	0,80	-0,87	1,67	0,00
Oldersum	200	30	1,20	-1,95	3,15	-0,23
Coldeborg	40	28	0,71	-0,29	1,00	0,08
Terborg	23 / nur Schöpfbetrieb	25	0,63	-1,20	1,83	0,05
Sautelersiel	189	23	0,69	-0,71	1,40	0,05
Jemgum	Keine Binnenentwässerung	20	0,84	-0,47	1,31	0,12
Soltborg	46	18	0,58	-1,49	2,07	-0,18
Kloster Muhde	18 / nur Schöpfbetrieb	13	1,27	-0,71	1,98	0,03
Coldemüntje	30 / nur Schöpfbetrieb	10	0,46	-0,21	0,67	0,05
Weener / Schleuse	Keine Binnenentwässerung	7	0,90	-0,55	1,45	0,15
Mark	36 / nur Schöpfbetrieb	4	0,32	-0,39	0,71	0,01
Stapelmoor	21	3	0,36	-1,32	1,68	-0,31

6.23.3.1 Beispiel Knock

Zwischen der Vormessung am 18.06. und der Nachmessung am 02.09.2020 (Differenz 2,5 Monate) nahm die mittlere Tiefe der Muhde Knock um 30 cm ab. Die Höhenänderung war nicht gleichmäßig verteilt. Örtlich begrenzt betrug die maximale Abnahme der Tiefe 1,18 m und die stärkste Zunahme der Tiefe sogar 1,65 m. Diese Höhenänderungen waren sehr viel stärker als in den anderen, Ems aufwärts liegenden Muhden.

Der Differenzplan der Flächenpeilungen zeigt direkt unterhalb des Mündungsbauwerks, im Bereich des Auslaufs der Pumpe 1, eine rinnenförmige Eintiefung. Der Plan zeigt eine Auflandung unterhalb des in der Bauwerksmitte befindlichen Siellaufs 2 sowie kaum eine Höhenänderung im Auslaufbereich des danebenliegenden Siellaufs 1. Über einen großen Bereich der gesamten Muhde ist eine flächenhafte Höhenabnahme ersichtlich. Im Zeitraum zwischen Vor- und Nachmessungen wurde in fünf Fällen das Schöpfwerk eingesetzt, wobei fast ausschließlich die o.g. Pumpe 1 beteiligt war. In der selben Zeit fanden insgesamt 22 Sielzüge statt, bei denen überwiegend der Siellauf 1 geöffnet war. Bei den Entwässerungsvorgängen wurden über die Muhde unterschiedlich große Volumen in Richtung Ems abgeschlagen, von kleineren Mengen < 25.000 m³ bis Mengen von rd. 200.000 m³, welche dem

mittleren Höchstwert des Sommers entsprechen. Ein Großteil der Entwässerung fand nach Beendigung des Technischen Tests und der Nachmessung statt.

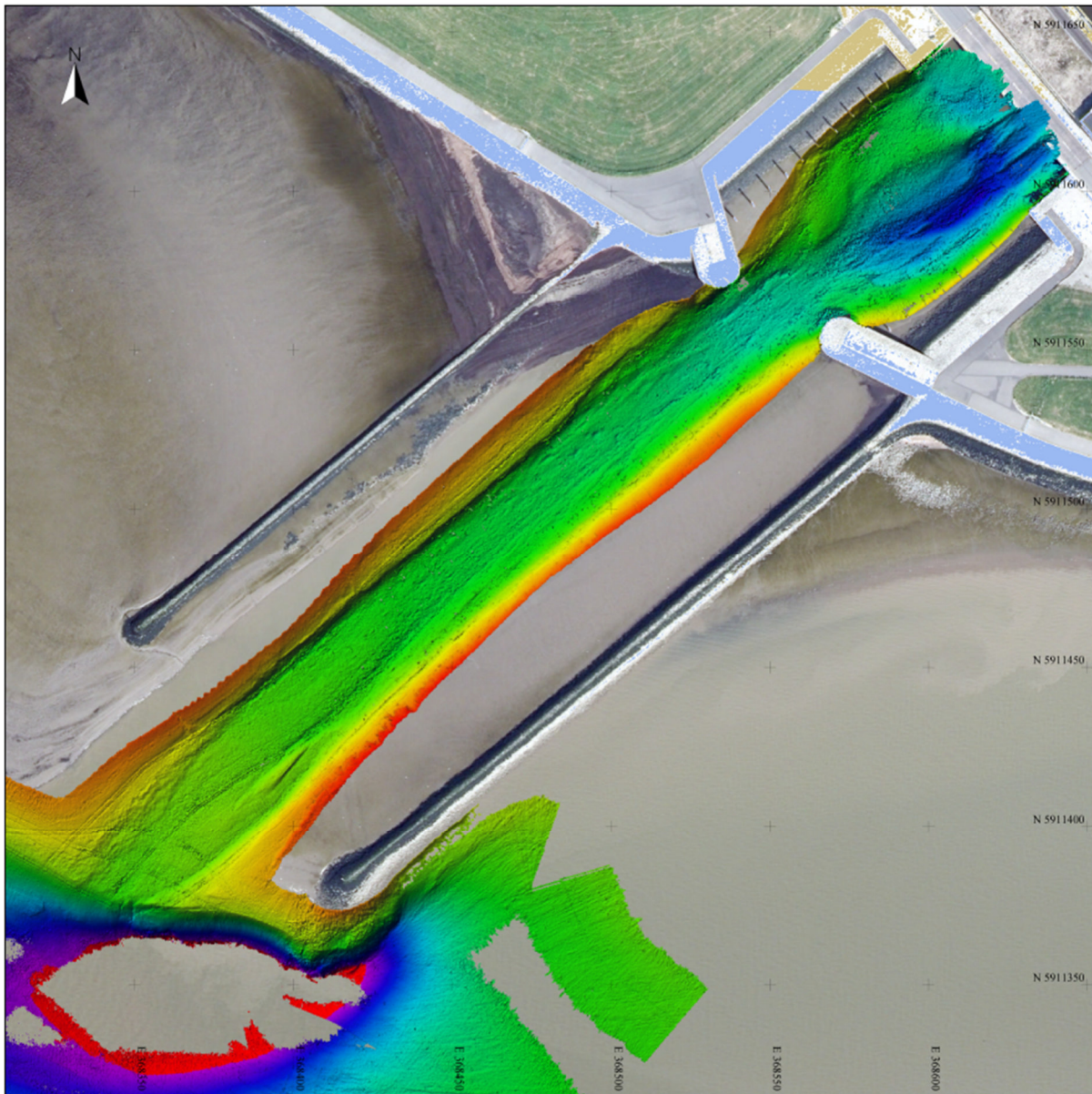
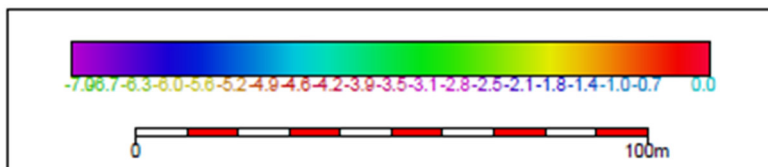


Abbildung 248: Tiefenverteilung in der Außenmuhde des Siels und Schöpfwerks Knock – Vormessung am 18.06.2020



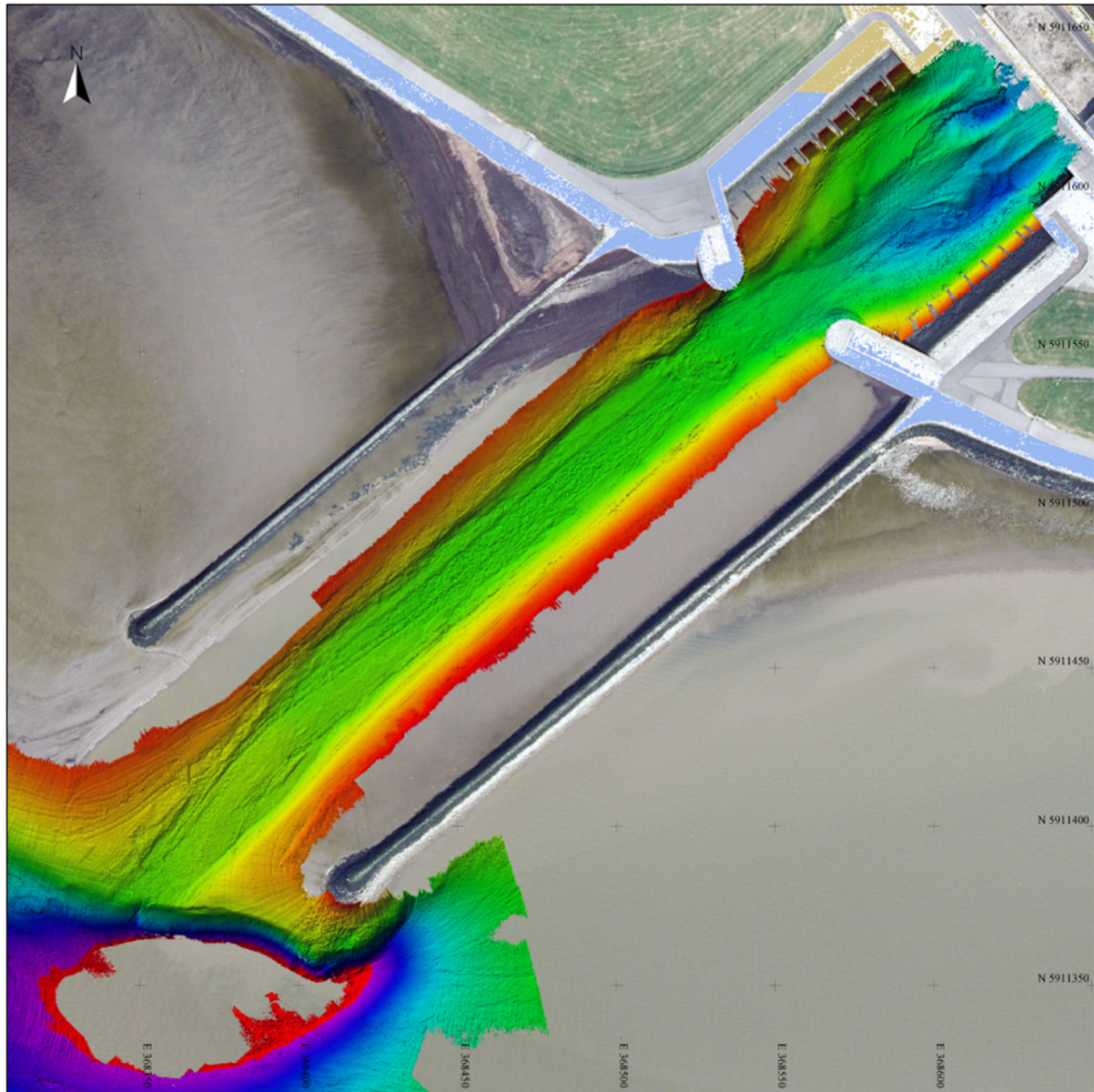


Abbildung 249: Tiefenverteilung in der Außenmuhde des Siels und Schöpfwerks Knock – Nachmessung am 02.09.2020

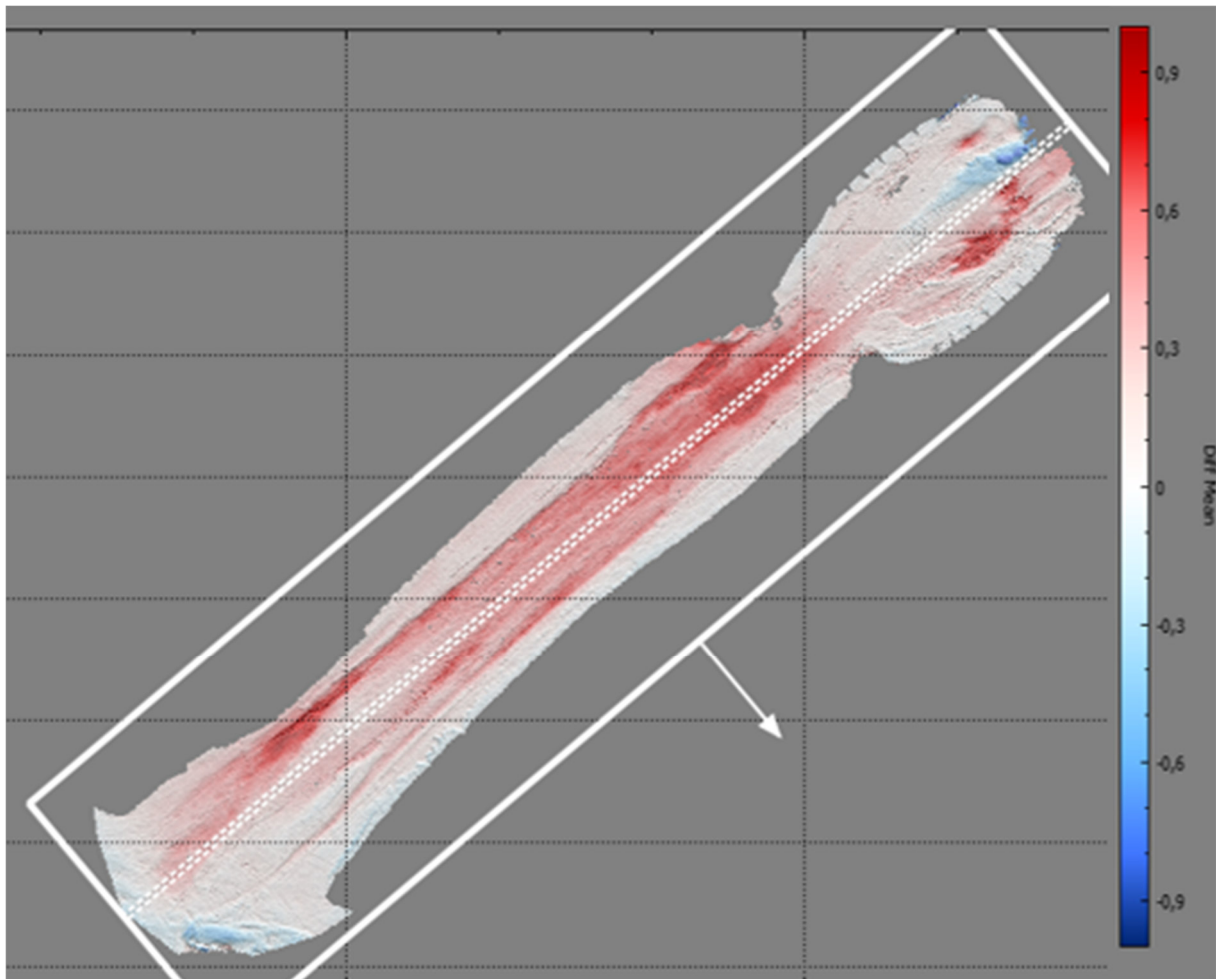


Abbildung 250: Differenzplan der Flächenpeilungen vom 18.06. und 02.09.2020 in der Muhde des Siels und Schöpfwerks Knock. Die mittlere Abnahme der Tiefe (Auflandung) betrug 0,3 m, die stärkste Tiefenzunahme 1,65 m und die stärkste Tiefenabnahme 1,18 m. Die Extremwerte traten nur räumlich begrenzt auf.

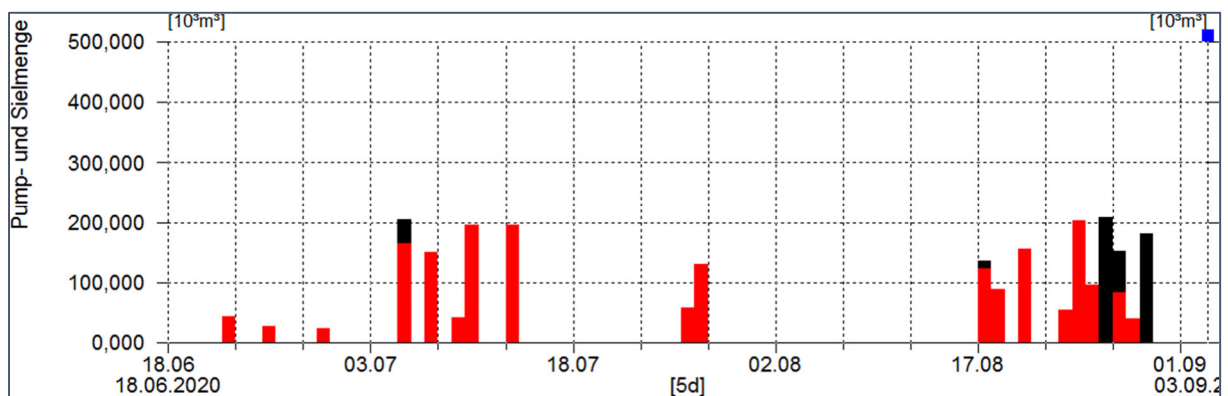


Abbildung 251: Pump- und Sielmengen (schwarz) sowie Anteil der Sielmenge (rot) über das Siel und Schöpfwerk Knock im Zeitraum zwischen der Vormessung (18.06.) und der Nachmessung (02.09.2020); Angaben in Tsd. m^3

6.23.3.2 Beispiel Ditzum

Zwischen der Vormessung am 18.06. und der Nachmessung am 31.08.2020 nahm die mittlere Tiefe der Muhde Knock um 6 cm zu. Die Höhenänderung war nicht gleichmäßig verteilt. Örtlich begrenzt betrug die maximale Abnahme der Tiefe rd. 0,8 m und die stärkste Zunahme der Tiefe 1,1 m.

Der Differenzplan der Flächenpeilungen zeigt eine leichte Eintiefung der (Fahr-) Rinne im Längsverlauf des Hafens und im Anlege- und Wendebereich der Fähre. Der westliche Seitenbereich und der südliche Abschnitt des Hafenschlauchs, in Richtung Siel, sind dagegen etwas flacher geworden.

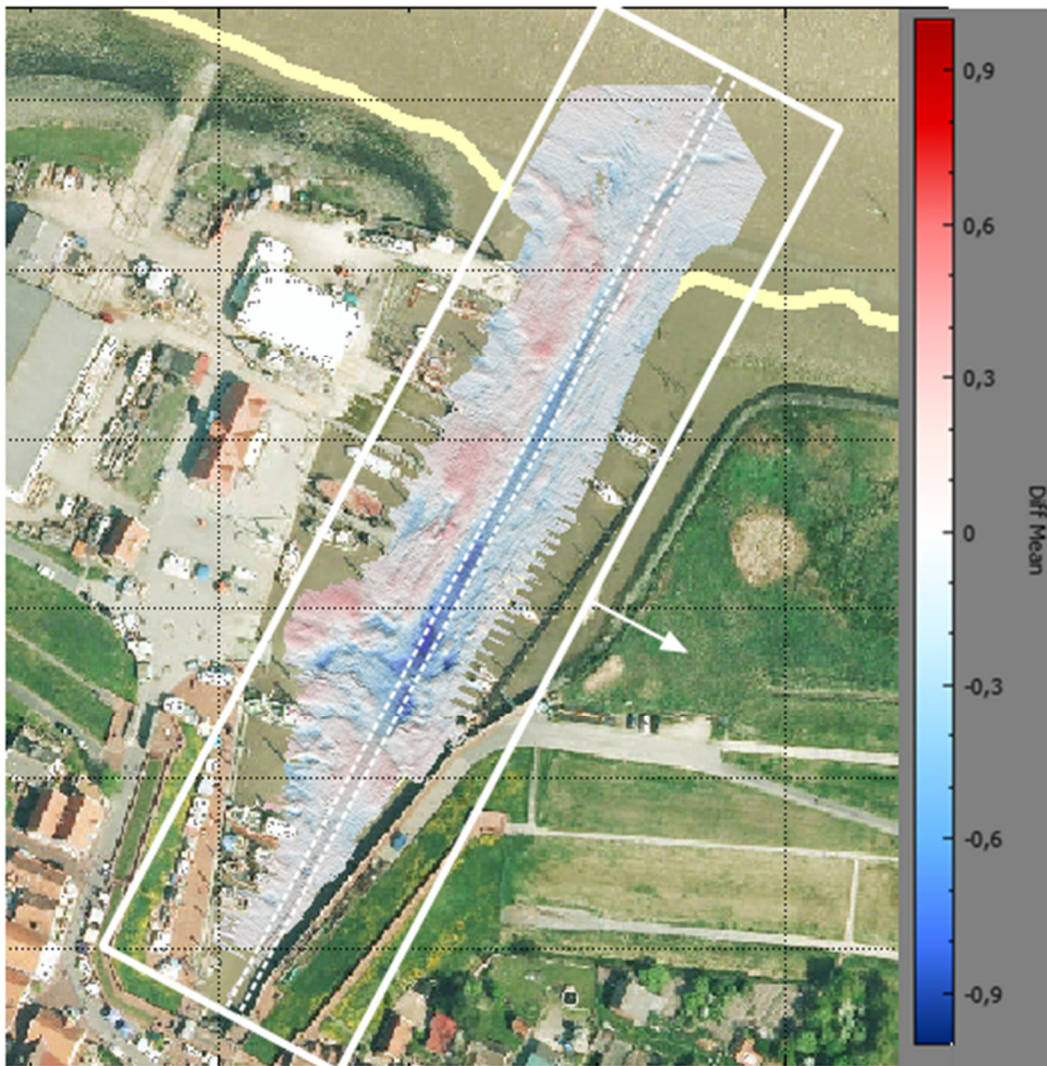


Abbildung 252: Differenzplan der Flächenpeilungen vom 18.06. und 30.08.2020 des Hafenschlauchs bzw. der Sielmuhde Ditzum. Die mittlere Zunahme der Tiefe (Abtrag) betrug 0,06 m, die stärkste Tiefenzunahme 1,1 m und die stärkste Tiefenabnahme (Auflandung) 0,8 m. Die Extremwerte traten nur räumlich begrenzt auf.

6.23.3.3 Beispiel Petkum

Zwischen der Vormessung am 18.06. und der Nachmessung am 31.08.2020 nahm die mittlere Tiefe der Muhde Knock um 20 cm zu. Die Höhenänderung war nicht gleichmäßig verteilt. Örtlich begrenzt betrug die maximale Abnahme der Tiefe rd. 0,7 m und die stärkste Zunahme der Tiefe sogar 1,7 m.

Der Differenzplan der Flächenpeilungen zeigt eine leichte Tiefenzunahme der gesamten Muhde sowie eine deutliche Eintiefung der Fahrrinne im Längsverlauf bis zum Anlege- und Wendebereich der Fähre.

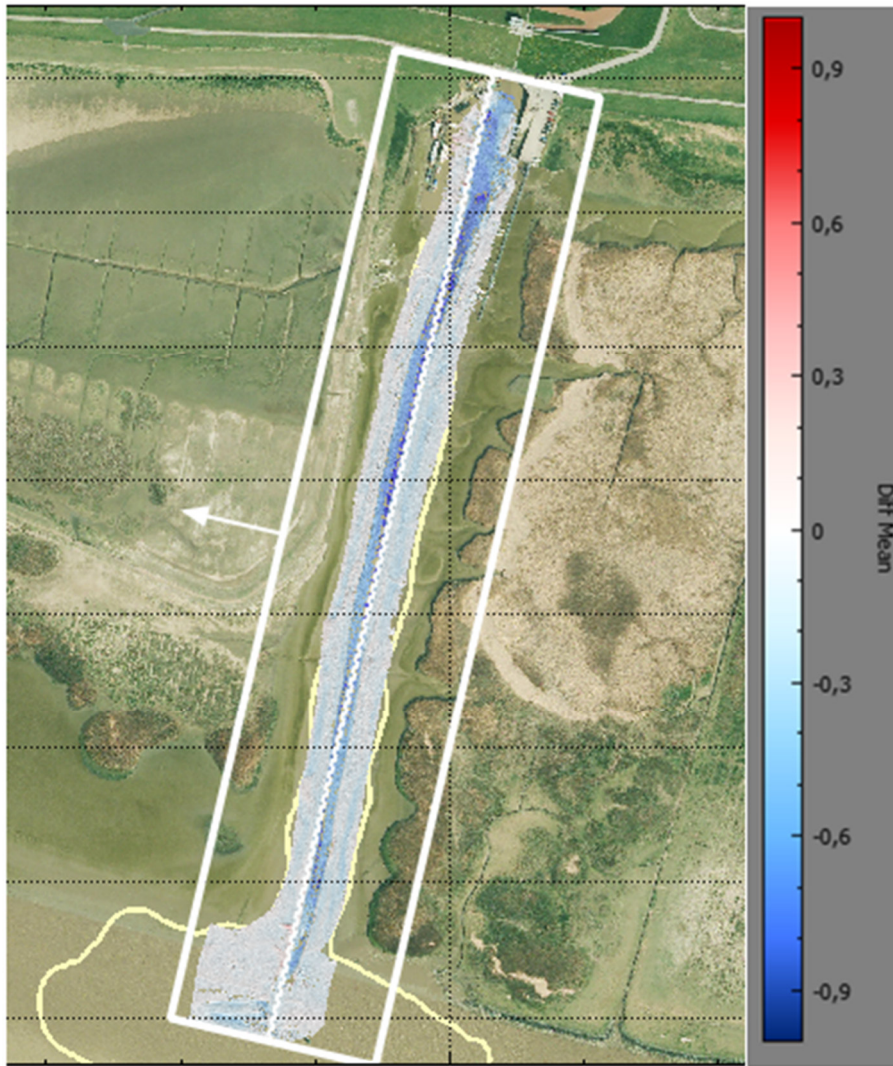


Abbildung 253: Differenzplan der Flächenpeilungen vom 18.06. und 30.08.2020 der Sielmuhde mit Fähranleger Petkum. Die mittlere Zunahme der Tiefe (Abtrag) betrug 0,20 m, die stärkste Tiefenzunahme 1,7 m und die stärkste Tiefenabnahme (Auflandung) 0,7 m. Die Extremwerte traten nur räumlich begrenzt auf.

6.23.3.4 Beispiel Jemgum

Zwischen der Vormessung am 22.06. und der Nachmessung am 19.08.2020 nahm die mittlere Tiefe der Muhde Knock um 0,1 m ab. Die Höhenänderung war nicht gleichmäßig verteilt. Örtlich begrenzt betrug die maximale Abnahme der Tiefe rd. 0,8 m und die stärkste Zunahme der Tiefe 0,5 m.

Der Differenzplan der Flächenpeilungen zeigt eine von außen nach innen stärker werdende Tiefenabnahme. Vor dem ehemaligen Siel betrug die Auflandung rd. 0,5 m.

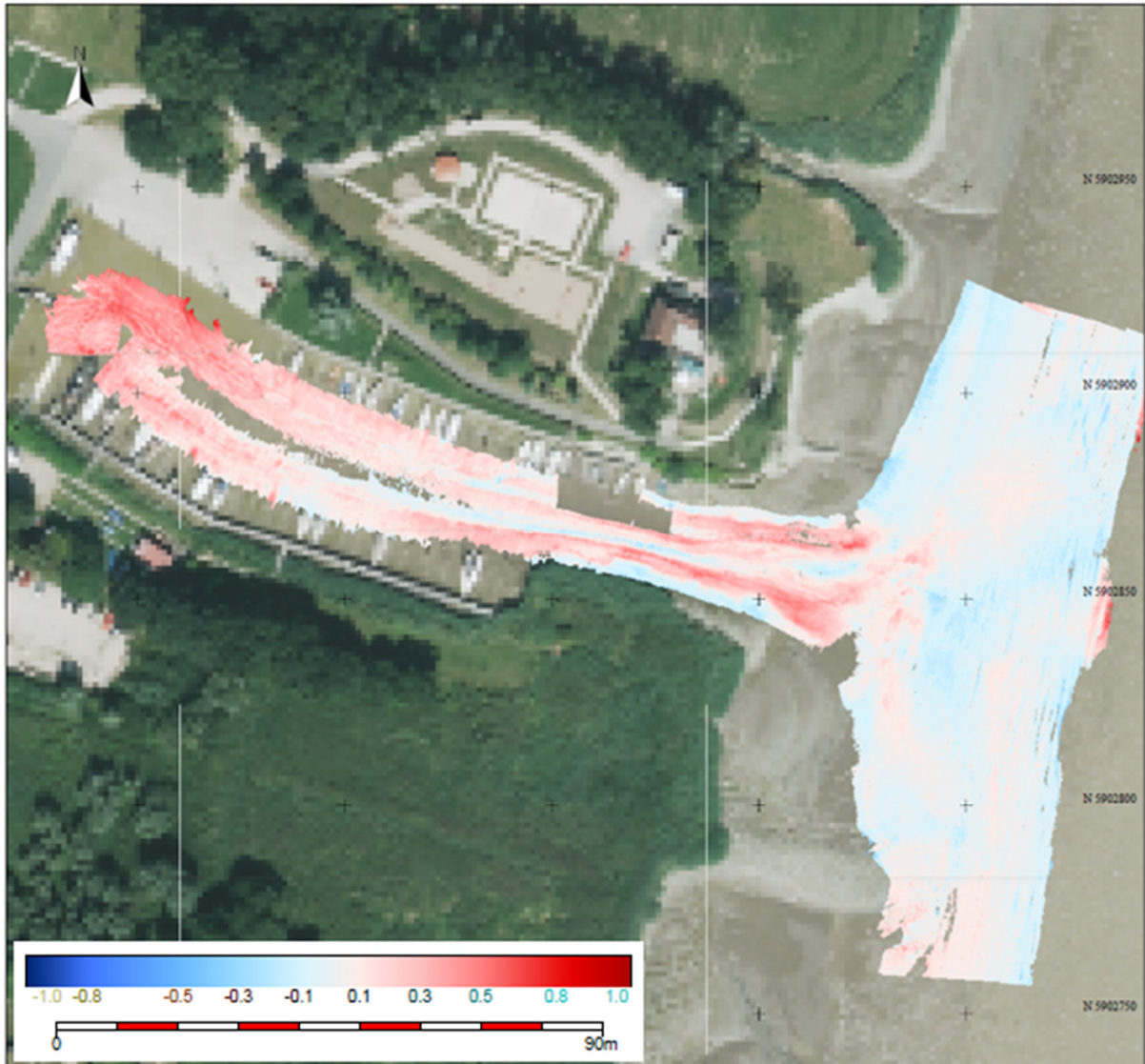


Abbildung 254: Differenzplan der Flächenpeilungen vom 22.06. und 19.08.2020 des Sportboothafens Jemgum. Die mittlere Auflandung (Tiefenabnahme) betrug 0,1 m, die stärkste Tiefenzunahme 0,5 m und die stärkste Tiefenabnahme 0,8 m. Die Extremwerte traten nur räumlich begrenzt auf.

6.23.3.5 Beispiel Sautelersiel

Zwischen der Vormessung am 22.06. und der Nachmessung am 19.08.2020 nahm die mittlere Tiefe der Muhde Knock um 0,05 m ab. Die Höhenänderung war nicht gleichmäßig verteilt. Örtlich begrenzt betrug die maximale Abnahme der Tiefe rd. 0,7 m und die stärkste Zunahme der Tiefe 0,7 m.

Der Differenzplan der Flächenpeilungen zeigt eine von außen nach innen stärker werdende Tiefenabnahme. Vor dem Siel und Schöpfwerk betrug die Auflandung 0,3 bis 0,5 m.

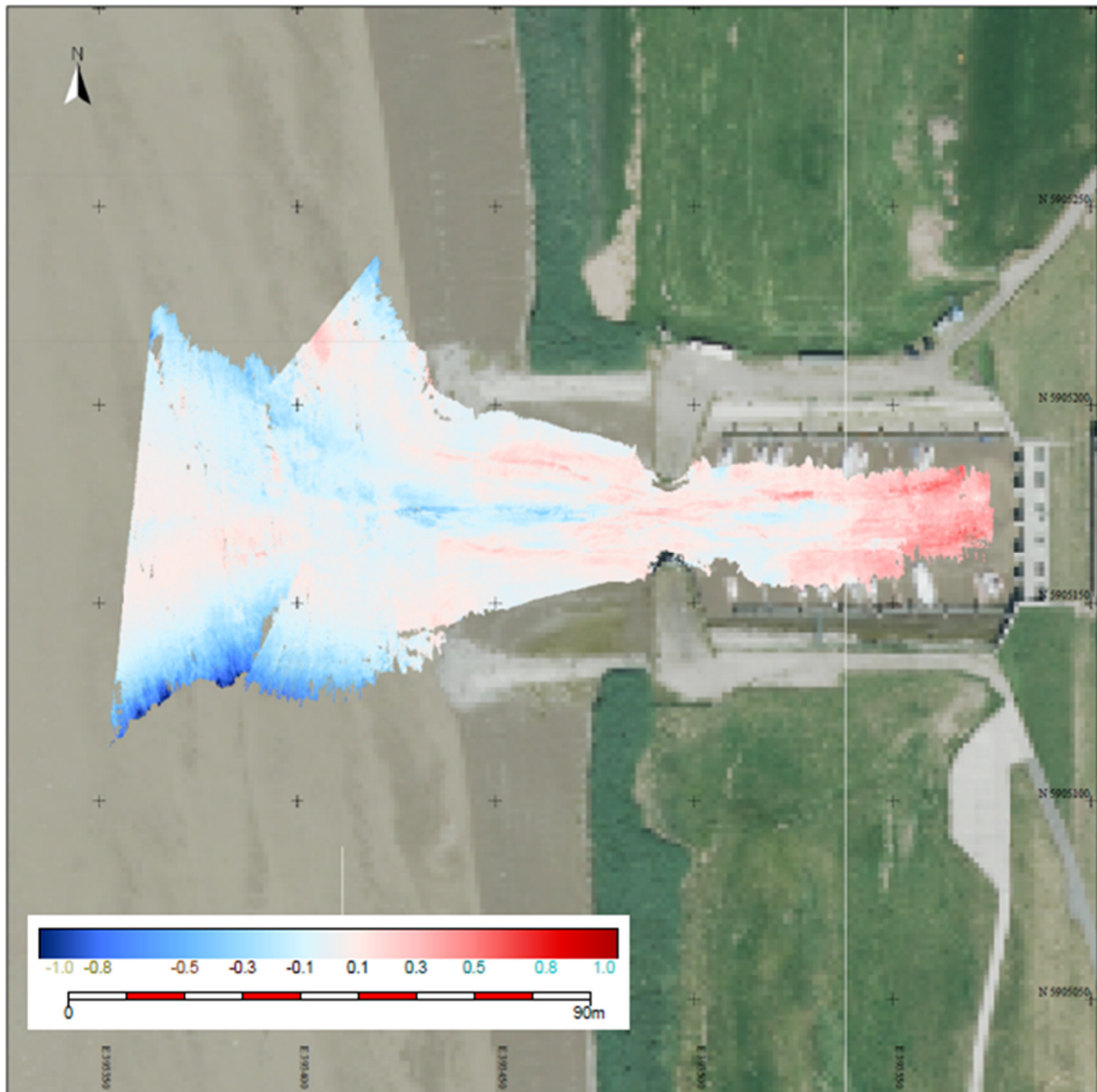


Abbildung 255: Differenzplan der Flächenpeilungen vom 22.06. und 19.08.2020 der Muhde des Siels und Schöpfwerks Sautel mit Sportboothafen. Die mittlere Auflandung (Tiefenabnahme) betrug $< 0,1$ m, die stärkste Tiefenzunahme $0,7$ m und die stärkste Tiefenabnahme $0,7$ m. Die Extremwerte traten nur räumlich begrenzt auf.

6.23.4 Zusammenfassung

Vorbehaltlich der großen Streuung kann der Mittelwert der Höhendifferenzen innerhalb einer Muhde als Resultat des Nettotransports interpretiert werden. Damit wäre in den meisten Fällen ein leichter Eintrag zwischen 0 und 5 cm und an der Knock sogar von 30 cm anzunehmen, in einigen Muhden jedoch auch ein Austrag von mehr als 20 cm. Anhand des Nettoeintrags bzw. -austrags unterscheiden sich die oberhalb des Emssperrwerks befindlichen Muhden nicht grundlegend von denen unterhalb des Bauwerks. Insbesondere ist der relativ hohe Eintrag an der Knock nicht auf die ebenfalls unterhalb des Sperrwerks befindlichen Ausläufe Borßum, Ditzum und Petkum zu übertragen, wo sich die mittlere Höhenlage entweder kaum änderte oder sogar deutlich abnahm.

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass Sediment innerhalb der jeweiligen Muhde umgelagert und auch darin eingetragen bzw. heraustransportiert wurde. Zu welchen Anteilen dieses jeweils geschah,

geht aus den Daten nicht hervor. Im Falle eines Nettotransports in die Muhde lässt die Datenlage keinen Rückschluss auf die Quelle zu. So ist es möglich, dass dieses aus dem Uferbereich selbst und/oder aus dem Hauptgerinne der Ems stammte. Im letztgenannten Fall ist nicht bekannt, welche Richtung der Nettotransport des Material vorher hatte, also ob das Sediment aus der Unter- oder Außenems stammte. Der Vergleich von Vor- und Nachmessung lässt auf eine Umlagerung von Sediment schließen, deren Intensität in Richtung Knock zunahm.

Die vorliegenden Ergebnisse beruhen nur auf eine Vor- und eine Nachmessung, die in einem zeitlichen Abstand von zwei bis drei Monaten durchgeführt wurden. Die Variabilität der Sedimentationsvorgänge wird bei dem Vergleich der Vor- und Nachmessung außer Acht gelassen. Unter anderem wird diese durch Wind bzw. die dadurch hervorgerufenen Wellen verursacht. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass es im betreffenden Zeitraum Phasen mit stärkerem Wind gab und sogar leichte Sturmfluten auftraten. Im Weiteren ist davon auszugehen, dass die Sedimentationsvorgänge saisonal schwanken. Dabei wird generell im Sommer eine stärkere Sedimentation in den Muhden erfolgen, da dann eine höhere Feststofffracht der Ems vorherrscht und die sporadische Binnenentwässerung nur zur Umlagerung von Sediment führt, jedoch nicht zu dessen Austrag. Darüber hinaus wird in den Muhden, die durch Wasserfahrzeuge befahren werden, die Sedimentumlagerung auch zum Teil darauf zurückzuführen sein. Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren ergibt sich eine starke Variabilität des Sedimentationsverhaltens. Vor diesem Hintergrund lassen die vorliegenden Messergebnisse die Umlagerung und den Ein- bzw. Austrag von Sediment nicht der intermittierenden Tidesteuerung zuordnen. Um die von der Tidesteuerung verursachte Sedimentation bzw. Erosion generell von den natürlichen Transportvorgängen unterscheiden zu können, wäre eine längere Beobachtungsdauer erforderlich, z.B. über turnusmäßige Flächenpeilungen. Auch wenn die Messungen kein eindeutiges Ergebnis liefern können, verdeutlichen diese die Komplexität der Sedimentationsvorgänge und konkretisieren diese den zukünftigen Messaufwand.

6.24 Belastung der Verschlusskörper (Nebenöffnungen) durch die Tidesteuerung

*Bearbeitung im Auftrage des NLWKN durch TÜV Nord*⁴³

Die TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG (EnSys) führte computergestützte Belastungsanalysen der Festigkeit des Hubtors 2 des Emssperrwerks durch. Dabei wurde das Hubtor 2 als das am stärksten belastete Hubtor stellvertretend für alle Nebenöffnungen ausgewählt. Die Teilöffnung der Tore und deren Unterströmung bei der Steuerungsvariante Flutstromtidesteuerung stellen eine Belastung dar, deren mögliche Anregungsmechanismen so noch nicht betrachtet wurden. Bisher lag der Schwerpunkt der Untersuchungen zu den Toren in der Betrachtung der maximalen, statischen Belastung aus Wasserdruck bei vollständiger Schließung der Tore. Wie weit die Lasten und Anregungen der Teilöffnung der Hubtore Auswirkungen auf die Beanspruchung und Tragfähigkeit der Struktur haben, wurden durch die Messungen erfasst bzw. Berechnungen ermittelt. Auf der o.g. Grundlage wurden computergestützte Belastungsanalysen der Festigkeit des Hubtors 2 durchgeführt, die Erkenntnisse auf die anderen Hubtore übertragen sowie die Belastung durch eine dauerhafte Tidesteuerung bei einer theoretischen Nutzungsdauer des Sperrwerks von 60 Jahren beurteilt.

Die Auswertung der Messdaten hinsichtlich der Eigenschwingungen zeigte eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Eigenfrequenzen und den Werten der Voruntersuchungen aus dem Jahr 2009.

⁴³ Siehe gesonderten Bericht im Anhang: TÜV NORD (2021): Ermüdungsnachweis eines Hubtores des Sperrwerks Gandersum für die Betriebsweise Tidesteuerung; TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Auftrag des NLWKN; Hamburg 20.04.2021

Aus den Messdaten lässt sich keine relevante Schwingungsanregung während der Tidesteuerung und bei der Fahrweise der Schiffsüberführung erkennen. Die stochastische Anregung aus Wasserdruck, Strömung und weiteren Einflüssen hat keine resonante Strukturantwort zur Folge.

Die statischen Berechnungen lassen keine Schädigung der Struktur erwarten. Die Sicherheit gegen konservativ ermittelte Belastungswerte liegt bei 1,77.

Der Ermüdungsnachweis zeigt, dass infolge der betrachteten Fahrweisen in den nächsten 60 Jahren eine Schädigung der Struktur nicht zu erwarten ist. Je nach Häufigkeit höherer Lastsituationen ist die Ermüdungsbetrachtung neu zu bewerten. Eine Kontrolle der Lasten ist mit der verwendeten Messtechnik möglich und zu empfehlen.

Die Nebenöffnungen 2 bis 5 haben jeweils eine Länge von 63,50 m. Während die Nebenöffnungen 3 bis 5 eine Höhe von 8,50 m aufweisen, ist das stellvertretend untersuchte Hubtor der 2. Nebenöffnung 10,50 m hoch. Diese größere Höhe, wie auch die Lage im Bereich der größten Strömung der Ems, begründen die im Vergleich zu den anderen Toren größere Belastung des Hubtors 2. Die Konstruktion der Hubtore ist sehr vergleichbar, wobei die geringer belasteten Hubtore teils geringere Blechdicken aufweisen. Aufgrund der geringen Auslastung des Hubtors 2 unter den gemessenen Beanspruchungen ist unter Berücksichtigung der o.g. Vergleichbarkeit anzunehmen, dass auch die weniger belasteten Nebenöffnungen 3 bis 5 unter der Betriebsweise Tidesteuerung in den nächsten 60 Jahren keine Schädigung erfahren werden.

7 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung

Bearbeitet von Andreas Engels (NLWKN)

7.1 Aspekt Aussagekraft des Technischen Tests

7.1.1 Unterbrechung der Tidesteuerung

Aus Rücksicht auf die Schiffs- und Umschlagssituation im Emdener Außenhafen und den dazugehörigen Liegestellen entlang der Ems war eine Tideniedrigwasseranhebung in jeder Tide, so wie es ursprünglich in der ersten Hälfte des Tests vorgesehen war, nicht zu realisieren. Insgesamt wurde eine geringere Anzahl der Tiden gesteuert, die zudem nicht immer zeitlich direkt aufeinander folgten, sondern in unterschiedlicher Form intermittierend stattfanden. Von der Charakteristik her geht die ausgeführte Steuerung daher in Richtung einer verkehrsverträglichen Tidesteuerung, die zur Gewährleistung der Durchgängigkeit des Emssperrwerks für die Berufsschifffahrt und den Bootsverkehr auch ungesteuerte Tiden vorsieht. In Rücksichtnahme auf die Hafenvirtschaft Emden musste die Tideniedrigwasseranhebung zwischen dem 19. und 29.07. für 17 direkt aufeinander folgende Tiden ausgesetzt werden.

Der gesamte Testzeitraum lässt sich aus mehreren Gesichtspunkten in einen Abschnitt vor und einen weiteren Abschnitt nach der mehrtägigen Unterbrechung einteilen. In diesen beiden Zeitbereichen erfolgte nicht nur eine unterschiedliche Intensität der Tidesteuerung, sondern es herrschten jeweils auch andere hydro-meteorologische Randbedingungen und zudem wechselte die Intensität und räumliche Ausweitung der Baggermaßnahme, die für die Ende August durchzuführende Schiffsüberführung erforderlich war. Insbesondere führte die Variabilität der hydro-meteorologischen Einflüsse und die intermittierende Ausführung der Tidesteuerung zu einem breiten Spektrum unterschiedlicher Randbedingungen.

Da über die begrenzte Dauer des Technischen Tests noch keine Tendenzen der sich nur über längere Zeiträume entwickelnden Parameter zu erwarten waren, wurde das begleitende Monitoring auf eine Auswahl physikalisch-chemischer Parameter ausgerichtet. Zudem wurde über eine laufende Gewässervermessung die morphologische Entwicklung beobachtet und das Verhalten des Emssperrwerks als zentrales Instrument dieser Maßnahme beobachtet. Damit wurden wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der technischen Ausführbarkeit, der Reduzierung des stromaufwärts gerichteten Feststofftransportes und der Verbesserung der Gewässerökologie (Gewässergüte) gesammelt. Dabei war trotz der Variabilität der hydro-meteorologischen Randbedingungen und der Steuerungsintensität ein guter Einblick in die Wirksamkeit der Tidesteuerung gegeben und ermöglicht einen Ausblick hinsichtlich der Durchführbarkeit eines zukünftigen Dauerbetriebs.

7.1.2 Natürliche Randbedingungen des Tests - Ausgangssituation der Gewässergüte

Unmittelbar vor Beginn des Technischen Tests waren in Bezug auf den Referenzzustand relativ hohe Wassertemperaturen und zumeist rel. niedrige Salzgehalte, rel. niedrige Schwebstoffwerte und rel. hohe Sauerstoffkonzentrationen vorhanden.

Schwebstoff: Bemerkenswert ist, dass nach Abklingen der Oberwasserwelle im Frühjahr die Schwebstoffgehalte in der Unterems relativ niedrig blieben. An den Stationen Leerort und Weener wurde die Unterschreitung der Mittelwerte zum Juni hin sogar noch größer und erreichte ein außergewöhnlich hohes Maß. Im Vergleich zu den Verhältnissen der Vorjahre waren hier somit wesentlich höhere Schwebstoffgehalte zu erwarten gewesen. An der Station Papenburg waren im April noch relativ niedrige Schwebstoffwerte zu messen. Anschließend nahmen dort allerdings die

Konzentrationen zu und erreichten später sogar ein relativ hohes Niveau. Die vorgenannten Aussagen gelten für die mittleren Schwebstoffkonzentrationen beider Tidephasen.

Sauerstoff: Ab März blieben die Sauerstoffkonzentrationen auf einem relativ hohen Niveau, wobei besonders ab April deutlich höhere Werte als in den Vorjahren eintraten. Die Stationen Papenburg und Knock nahmen sich von dieser Entwicklung aus, dort waren nur kurzzeitig relativ hohe Werte vorhanden, die bis zum Beginn des Tests jedoch wieder abnahmen und auch als relativ niedrig zu bezeichnen sind.

Salzgehalte: Nach Abklingen der Oberwasserwelle im Frühjahr blieben die Salzgehalte oberhalb von Terborg relativ niedrig. Im Vergleich zu den Verhältnissen der Vorjahre wurden hier höhere Salzgehalte erwartet, die jedoch nicht eintraten. Hingegen waren unterhalb von Terborg relativ hohe Salzgehalte zu beobachten.

7.1.3 Art des Monitorings

Der technische Test wurde durch eine umfangreiche Messkampagne begleitet. Die beteiligten Institutionen waren das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ems-Nordsee (WSA), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Niedersachsen Ports Niederlassung Emden (NPorts) und der NLWKN (Forschungsstelle Küste und Betriebsstelle Aurich). Die verschiedenen Messungen erfolgten von Knock bis Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet, zum einen stationär in hoher zeitlicher Auflösung und zum anderen mobil mit höherer räumlicher Information. Es wurden Daten des Wasserstands, der Strömung, der Gewässergüte (Temperatur, Sauerstoff, Schwebstoff, Salz, Nährstoffe) gesammelt und zudem die Tiefenverhältnisse aufgenommen, wozu auch die Flüssigschlickverteilung zählt. Stationären Messungen u.a. der Gewässergüte finden bereits seit mehreren Jahrzehnten statt und zeigen die Dynamik der jeweiligen Parameter in Abhängigkeit der Tide, des Mondzyklus und der Jahreszeit. Zudem lassen sich an den Langzeitmessungen Veränderungen ablesen, die durch den Ausbau der Ems hervorgerufen wurden. Die mobilen Messungen ermöglichten eine Datenerfassung an einer Vielzahl von Positionen und waren damit eine Ergänzung zu den stationären Messungen.

Die Wasserstände wurden durch Pegel im gesamten Einflussbereich der Tidesteuerung aufgezeichnet, wozu auch das Niederungsgebiet des Leda-Jümme-Gebiets gehört. Strömungen wurden an zahlreichen Positionen entlang der Ems aufgenommen sowie auch im Nahbereich des Emssperrwerks. Die Vermessung der Gewässersohle erfolgte sowohl entlang der Ems, im Außenhafen Emden und in einigen Außenmuhden, als auch zeitlich und räumlich hoch aufgelöst im Nahbereich des Emssperrwerks. Die Messung im Bereich des Emssperrwerks war insbesondere während der Flutstromtidesteuerung erforderlich, um das Verhalten der Gewässersohle und der vorhandenen Sohlsicherung unter der stärkeren Strömungsbelastung zu beobachten. Um die Auswirkung der Tidesteuerung auf das Emssperrwerk an sich zu untersuchen, wurden an diesem Schwingungsmessungen durchgeführt.

Die mobilen Messungen der Gewässergüte fanden durch Längsfahrten statt, wobei die längsten Distanzen von Borkum bis Herbrum reichten. Bei einigen Längsmessungen fand während der Fahrt eine kontinuierliche Aufnahme von Gewässergüteparametern an der Wasseroberfläche statt, ergänzend dazu erfolgte bei den anderen Längsfahrten in bestimmten Abständen die Aufnahme von Vertikalprofilen von der Wasseroberfläche bis zur festen Sohle.

Die stationären Messungen wurden über unterschiedlich lange Zeiten ausgeführt. Die von Schiffen, welche an ausgewählten Positionen verankert waren, durchgeführten Messungen, erfolgten über die Dauer einer Ebephase, wobei Vertikalprofile von der Wasseroberfläche bis zur festen Sohle aufgenommen wurden. Im Weiteren kamen an der Sohle verankerte Messstränge zum Einsatz. Die daran befestigten Geräte nahmen die Parameter kontinuierlich an der Wasseroberfläche und im Sohlbereich auf. Diese Messstränge sind bereits seit mehreren Jahren an einer Vielzahl von Positionen

entlang der Ems im Einsatz, so dass bereits längere Zeitreihen vorliegen. Ergänzend dazu wurden an ausgewählten Positionen weitere Messstränge ausgelegt, u.a. mit einer größeren Anzahl von über die gesamte Wassertiefe verteilten Messgeräten, so dass ein detailliertes Bild des Vertikalprofils erreicht werden konnte. Die Langzeitmessungen durch die seit mehreren Jahrzehnten kontinuierlich betriebenen Messstationen stellen eine fundierte Basis bei der Beurteilung der Auswirkung der Tidesteuerung dar. Die Messung an diesen Stationen finden zumeist im Sohlbereich statt.

Eine wichtige Erkenntnis des Technischen Test ist, dass das Emssperrwerk technisch imstande ist, die Tidesteuerung auszuführen und dass bereits vereinzelt Tideniedrigwasseranhebung einen positiven Effekt auf die Gewässergüte ausübten. Allerdings reichte die Wirkung bei der Steuerung nur einer Tide nicht über diese hinaus. Wurden allerdings mehrere direkt aufeinander folgende Tideniedrigwasser angehoben, so zeichnete sich eine rasche und signifikante Verbesserung ab, die sich auch über den Zeitraum der gesteuerten Tide hinaushielt. Bei Übergang zu einer Steuerung jeder zweiten Tide war zwar eine Verschlechterung der Güte festzustellen, dieser war aber trotzdem besser als der Referenzzustand.

7.2 Aspekt Schwebstoff und Flüssigschlick

In Zeiträumen, in denen der Oberwasserzufluss aus dem Binnengebiet niedrig ist, treten in der Unterems hohe, zeitlich und räumlich stark variierende Schwebstoffgehalte in der frei fließenden Wassersäule auf, insbesondere im Bereich stromauf von Terborg. Die Gewässersohle ist dann vor allem in diesem Abschnitt häufig von einer Flüssigschlickschicht mit einer Mächtigkeit von mehreren Metern bedeckt. Diese weist unterhalb der Lutokline, dem Dichtesprung zwischen frei fließender Wassersäule und Flüssigschlickschicht, eine mobile Schicht mit Schwebstoffgehalten zwischen 20 g/l und 100 g/l auf, welche regelmäßig in die darüber liegende Wassersäule eingemischt wird. Unterhalb einer zweiten Lutokline schließt sich eine stationäre Flüssigschlickschicht an, mit Schwebstoffkonzentrationen oberhalb der Gelkonzentration (100 bis 500 g/l). Die Mächtigkeit der mobilen und stationären Flüssigschlickschicht sowie deren horizontale Ausdehnung ist auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen sehr variabel und wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. In den Monaten vor Beginn des technischen Testbetriebs unterschied sich die Schwebstoffsituation sowie die Ausdehnung und Mächtigkeit des Flüssigschlicks im Vergleich zu den Vorjahren deutlich. Die Flüssigschlickschicht mit mehreren Metern Mächtigkeit bildete sich hauptsächlich im Bereich Weener bis Herbrum aus und nicht wie langzeitlich unter sommerlichen Verhältnissen beobachtet von Terborg bis Herbrum. Die Verlagerung hatte zur Folge, dass neben den Salzgehalten auch die Schwebstoffkonzentrationen insbesondere an den Messpegeln seewärts von Weener wesentlich geringer ausfielen.

7.2.1 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Schwebstoffsituation und Flüssigschlickbildung

Auf Basis von seit 2009 regelmäßig durchgeführten Längsprofilfahrten konnte gezeigt werden, dass die oberflächennahe Schwebstoffverteilung entlang der Tideems während des Technischen Tests verändert war (siehe ab Seite 179). Bei den Messfahrten traten von Unterems-Km 0 bis 20 Schwebstoffgehalte auf, die unter den minimalen Gehalten der Längsfahrten der Jahre 2009 bis 2019 lagen. Unterhalb von Unterems-Km 20 war dagegen nur eine geringe Abweichung von den langjährigen Messungen zu erkennen.

Die Langzeitmessungen an den Gewässergütemessstationen der Unterems, die die Schwebstoffgehalte an einem Punkt, zeitweise oberhalb der Flüssigschlickschicht erfassen, (siehe ab Seite 217) zeigen, dass durch die Tideniedrigwasseranhebung im Monatsmittel sowohl bei Ebb- als auch bei Flutstrom deutlich niedrigere Schwebstoffgehalte eintraten als im Referenzfall, der den Zeitraum von 2010 bis 2019 berücksichtigt. Die Tideniedrigwasseranhebung führte zur stärksten

Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen, wo vor Testbeginn die höchsten Schwebstoffwerte gemessen wurden und sich eine Flüssigschlickschicht ausgebildet hatte. Bei der Analyse der zeitlich hochaufgelösten Schwebstoffganglinien der Gewässergütemessstationen wird deutlich, dass das darauf zurückzuführen ist, dass es nicht mehr zu einem deutlichen Resuspendieren der mobilen Flüssigschlickschicht bis auf Höhe der Sonden kommt. Da es durch die TnWA insbesondere zu einer Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten beim Einsetzen des Flutstromes kommt, konnte auch in Bezug auf die Schwebstoffgehalte während der Flutphase die deutlichste Reduzierung der Schwebstoffkonzentrationen beobachtet werden. Auch wenn die darauffolgende Tide nicht gesteuert wurde war die vertikale Durchmischung noch teilweise reduziert.

Aus dem Vergleich von über eine Tide zeitlich hochaufgelöst erfassten Tiefenprofilen vor Beginn des technischen Tests mit den Messungen direkt nach Beginn der Sperrwerkssteuerungen bei Unterems-Km 7,2 (Weener) und Km 18,2 (Soltborg) ist ersichtlich, dass die Schwebstoffgehalte in den oberen und mittleren Wasserschichten mit Beginn der Tidesteuerung unmittelbar stark abgenommen hatten. Im weiteren Verlauf des technischen Testbetriebs konnten teilweise sogar Verhältnisse ohne deutlichen vertikalen Schwebstoffgradienten in der oberen Wassersäule zum Zeitpunkt der Aufnahme der Tiefenprofile beobachtet werden. Eine mobile Flüssigschlickschicht war an den Messpunkten dann nicht mehr zu beobachten, die stationäre Schicht nahm dafür an Mächtigkeit zu. Es konnte anhand der ergänzenden Vertikalprofilmessungen gezeigt werden, dass in Bereichen, in denen im ungesteuerten Zustand umfangreiche mobile Flüssigschlickschichten auftreten diese durch eine intensive TnWA in ihrer Mächtigkeit abnehmen können und somit dort weniger mobiles Material für Transportprozesse zur Verfügung steht. Diese vertikalen Beobachtungen unterstreichen das grundlegende Verständnis der TnWA, dass eine generelle Reduzierung der vertikalen Durchmischung entsteht und damit Schwebstoffe nur noch in sehr geringem Umfang in die obere Wassersäule eingemischt werden.

Auf Grundlage der kontinuierlich erfassten Schwebstoffgehalte und Strömungsparameter an den Dauermessstellen wurde die Summe des instantanen Schwebstofftransportes für jede Ebb- und Flutphase getrennt abgeschätzt.

Die transportierten Mengen werden durch die Steuerung an allen Stationen sowohl während Ebbstrom als auch während Flutstrom reduziert, da die Zeiträume mit transportrelevanten Strömungsgeschwindigkeiten kürzer sind und weniger Material bis auf Höhe der Messsonden eingemischt wird.

Diese Reduzierung der Transporte fällt bei Flutstrom stärker aus, da hier die besonders hohen Flutstromgeschwindigkeiten zu Beginn der Flutphase durch die Steuerung nicht mehr auftreten.

Die in der frei fließenden Wassersäule transportierten Schwebstoffmengen können von denen in den darunter häufig auftretenden hoch konzentrierten Flüssigschlickschichten (mobiler Flüssigschlick und stationärer Flüssigschlick) deutlich in Betrag und Richtung abweichen. Das kann dazu führen, dass sich die Auswirkungen der TnWA auf die tatsächlichen resultierenden Transportrichtungen im Flüssigschlick und in der darüber liegenden Wassersäule unterscheiden. Die hier genannten Änderungen beziehen sich daher lediglich auf die Messposition und nicht auf den gesamten Querschnitt.

Neben der verminderten Durchmischung (s.o.) konnte mit dem Beginn der TnWA auch eine Ausdehnung der Flüssigschlickbildung Ems abwärts beobachtet werden. Dieses zeigte die Auswertung von Mehrfrequenzecholeiteilungen und ergänzenden Vertikalprofilen. Dieses Verhalten folgt aus der Reduzierung der Tideenergie in der Unterems und hatte gleichzeitig eine Reduzierung der Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht oberhalb von Papenburg zur Folge. Ebenso wurde beobachtet, dass die Neubildung der mobilen Flüssigschlickschicht im Bereich Weekeborg-Weener und die Reduzierung oberhalb Papenburgs hauptsächlich aus der intertidalen Variabilität der Schichten selber folgt. Parallel aufgezeichnete Vertikalprofile der Schwebstoffkonzentration und des Salzgehaltes entlang der Unterems verdeutlichen, dass sich die mittlere Schwebstoffkonzentration der mobilen und stationären Schicht nicht ändern, ihre Variabilität in der vertikalen Ausdehnung innerhalb eines Tidezyklus wird allerdings durch die Tidesteuerung beeinflusst.

Mit Beginn der TnWA konnte im Emders Fahrwasser eine Zunahme der stationären Schlickschicht bis zur mehrtägigen Unterbrechung der Steuerung beobachtet werden. Diese Zunahme könnte aufgrund

der starken Tidevolumenreduzierung auf eine lokale Sedimentation innerhalb des Emders Fahrwassers hinweisen.

7.2.2 Auswirkung der Flutstromtidesteuerung auf die Schwebstoffsituation und Flüssigschlickbildung

Im Gegensatz zur TnWA beruht die Flutstromtidesteuerung (FsTs) auf der Wirkung der netto-Stärkung des Ebbstromtransportes durch entsprechende Senkung des Flutstromtransportes im Bereich der Flüssigschlickbildung. Bei langfristiger Steuerung würde darüber die Feststoffmenge in der Unterems reduziert werden, woraus sich eine entsprechende Verminderung der Flüssigschlickbildung und Schwebstoffkonzentration ergäbe.

Die stationären Messungen deuten dieses Verhalten grundsätzlich an. Die Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit ist bei der FsTs an allen Stationen nahezu genauso groß wie die Reduzierung durch die TnWA, anders als bei der TnWA fehlt bei diesem Steuerungsszenario allerdings der Zeitraum von ca. 2 h, in dem das Sperrwerk komplett verschlossen ist und ganz geringe Strömungsgeschwindigkeiten in der Unterems auftreten. Das Material hat somit weniger Zeit um zu sedimentieren. An den Messpositionen im Bereich der Flüssigschlickschicht (oberhalb Leerort) sind die maximalen Schwebstoffkonzentrationen während des Flutstromes gegenüber dem Referenzzustand deutlich reduziert. Ebenfalls zeigt sich, dass eine längere Dauer der Verschlusszeiten der Steuerung auch einen positiven/reduzierenden Effekt auf die Schwebstoffkonzentrationen haben. Wegen der kurzen Testphase von nur 5 gesteuerten Tiden sind Aussagen über den Einfluss der FsTs auf die Schwebstoffdynamik nur sehr begrenzt möglich. Zu berücksichtigen ist auch, dass der Zustand zu Beginn der FsTs unter Einfluss der vorhergehenden TnWA stand und damit die beobachtete Wirkungsweise der wenigen FsTs auch unter Einfluss dieser speziellen Umstände stand. Da in der Unterems oberhalb von Leerort durch die vorausgegangene TnWA wahrscheinlich weniger mobiles Material zur Verfügung stand als im unbeeinflussten Zustand, war die angestrebte Schwebstoffmobilisierung während des Ebbstromes, die bei einem langfristigen Einsatz zur Räumung des Systems beitragen würde, noch eingeschränkt. Aufgrund der nur 5 gesteuerten Tiden kann auch kaum eine Aussage zur langfristigen Verlagerung oder Kompaktierung der Flüssigschlickschicht gemacht werden. Es zeigt sich jedoch, dass sich ebenfalls nach einer gesteuerten Tide eine Verlagerung bzw. horizontale Ausdehnung der mächtigen Flüssigschlickschicht einstellt, was dem Zustand bei der TnWA entspricht.

7.2.3 Betrachtung der Auswirkungen der Tidesteuerung während des gesamten gesteuerten Zeitraumes

Der gesamte Testzeitraum lässt sich aus mehreren Gesichtspunkten in einen Abschnitt vor und einen weiteren Abschnitt nach der mehrtägigen Unterbrechung (zwischen 19. und 29.07.) einteilen. In diesen beiden Zeitbereichen erfolgte nicht nur eine unterschiedliche Intensität der Tidesteuerung, sondern es herrschten jeweils auch andere hydro-meteorologische Randbedingungen und zudem wechselte die Intensität und räumliche Ausweitung der Baggermaßnahme, die für die Ende August durchzuführende Schiffsüberführung erforderlich war. Insbesondere führte die Variabilität der hydro-meteorologischen Einflüsse und die intermittierende Ausführung der Tidesteuerung zu einem breiten Spektrum unterschiedlicher Randbedingungen. Die Beobachtung der Schwebstoffkonzentrationen bei der TnWA und FsTs lässt die Schlussfolgerung zu, dass diese umso stärker abnahmen, je größer die Anzahl direkt aufeinander folgender Sperrungen war. In den Fällen, in denen nach einer Phase mit direkt aufeinander folgenden Sperrungen nur noch jede zweite Tide gesteuert wurde, stiegen die Schwebstoffwerte in den ungesteuerten Tiden lediglich geringfügig, in Abhängigkeit der vertikalen Flüssigschlickausdehnung, wieder an. Allerdings ist aus den häufigeren TnWA-Steuerungen auch ersichtlich, dass jede längerfristige Unterbrechung dieser Tidesteuerung (mehr als 2 Tiden) wieder zur

Zunahme der Schwebstoffgehalte führte. Je länger die Unterbrechung dauerte, desto höher stiegen auch wieder die Schwebstoffgehalte an.

Die TnWA wirkte vor und nach der mehrtägigen Unterbrechung unterschiedlich stark. Im Vergleich zur ersten Phase sanken die Schwebstoffgehalte nach der Unterbrechung nur zögerlich. Warum diese nicht so abnahmen wie zu Beginn des Tests, als auch bei hohem Schwebstoffniveau mit der Steuerung begonnen wurde, lag vermutlich daran, dass sich mittlerweile ein niedrigeres Oberwasser eingestellt hatte und in der zweiten Phase eine höhere Tideintensität herrschte, womit sich wesentlich ungünstigere Voraussetzungen boten. Dabei konnte auch salzhaltigeres Wasser tiefer in die Unterems eindringen und darüber zu einer Verstärkung der ästuarinen Zirkulation führen.

Zusätzlich zu diesen unterschiedlichen Ausgangsbedingungen erfolgte nach der mehrtägigen Unterbrechung eine Steuerung, die sich insgesamt in ihrer Charakteristik von der Steuerung in der ersten Phase unterschied und darüber zu einer Entwicklung u.a. der Schwebstoffkonzentrationen führte, die nicht unmittelbar mit der ersten Phase vergleichbar war. Zwar begannen beide Phasen mit der Steuerung jeder zweiten Tide, in der zweiten Phase schloss dann allerdings ein Zeitraum deutlich geringerer Steuerungsintensität an, während dessen in der ersten Phase die Intensität gesteigert wurde. Der Unterschied bestand insbesondere auch darin, dass es in der ersten Phase mehrfach Abschnitte gab, in denen direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden, während in der zweiten Phase mehrfach längere Steuerungspausen vorkamen.

Nach der mehrtägigen Pause wurde die Baggerintensität deutlich gesteigert und die räumliche Ausdehnung der Baggermaßnahme vergrößert. Zwar ist der genaue quantitative Einfluss einer Baggeraktivität auf die Schwebstoffkonzentrationen und auf die Flüssigschlickbildung bislang weitestgehend unbekannt, allerdings gaben bisherige Untersuchungen der BfG keinen Hinweis darauf, dass diese zur Variabilität der Schwebstoffkonzentration beitragen⁴⁴. Somit können eine großräumige Beeinflussung und ein langfristiger Einfluss auf die Gewässerökologie durch den Baggereinsatz ausgeschlossen werden.

Je nach Ausprägung der zusammenwirkenden verschiedenen Einflussfaktoren kann es zeitweise zu positiveren als auch negativeren Auswirkungen kommen, als durch den reinen physikalischen Effekt der Steuerung selber möglich war. Aus diesen Gründen wurde in der zweiten Phase der TnWA die anfänglich hohe Wirkung der Steuerung nicht reproduziert.

7.2.4 Langfristige Auswirkung der Tidesteuerung

Die Naturmessungen ermöglichen Aussagen hinsichtlich der Dauer, über die sich nach Beendigung der Tidesteuerung die Verhältnisse wieder bis in den ursprünglichen Zustand zurückbilden. Auf Grundlage der Auswertung der Flüssigschlickverteilung (Längsmessungen) kann festgestellt werden, dass ein Effekt über den Zeitraum des Technischen Tests hinaus nicht festgestellt werden kann (siehe ab Seite 246). Auch die Interpretation von stationären Messungen des Schwebstofftransports lässt die Schlussfolgerung zu, dass eine Unterbrechung der Steuerung wahrscheinlich innerhalb weniger Tiden wieder zur Herstellung unbeeinflusster Zustände führt (siehe ab Seite 159).

7.2.5 Übertragung der Aussagen auf das Leda-Jümme-Gebiet

Die u.a. für die Station Leerort/Ems festgestellte positive Entwicklung der Schwebstoffverhältnisse, d.h. die Abnahme der Konzentrationen, lässt sich auch auf die Station Leer/Leda übertragen. Darüber hinaus stehen keine weiteren Schwebstoffmessungen innerhalb des weitverzweigten und tidebeeinflussten Leda-Jümme-Gebiets zur Verfügung. Die Auswirkung der Tidesteuerung auf das Leda-Jümme-Gebiet kann daher nur über eine Bewertung der bekannten Randbedingungen

⁴⁴ BfG 2008: Einfluss von Unterhaltungsbaggerungen auf die Schwebstoffdynamik der Unterems - Monitoring während eines baggerungsfreien Zeitraums; BfG Bericht 1488; Koblenz 2008

angenommen werden und ist, im Gegensatz zu den vorgenannten Ergebnissen des Technischen Tests, daher hypothetisch: Es ist davon auszugehen, dass insbesondere die durch die Tideniedrigwasseranhebung verursachte Abnahme des Tidevolumens zu einem verminderten Eintrag von Schwebstoffen in das Leda-Jümme-Gebiet aus Richtung Ems führte. Darüber hinaus wird die Beruhigung der Strömungsverhältnisse zu einer verstärkten Sedimentation geführt haben, so wie dieses auch in der Ems zu beobachten war. Da die Sedimentationsstärke u.a. von der in Suspension befindlichen Feststoffmenge abhängt, ist davon auszugehen, dass diese im unteren Abschnitt der Leda am größten war und mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung abnahm.

7.3 Aspekt Sedimentation und Erosion in der Ems

7.3.1 Bereich Emden

In der Gesamtbetrachtung nahmen im Abschnitt Emden (Unterems-Km 40,7 bis 43) die Tiefen überwiegend zu. Möglicherweise war dieses Verhalten auf die in diesem Bereich stattgefundenen Baggerungen zurückzuführen. Das Emdener Fahrwasser ist hinsichtlich der Sedimentumlagerungen ein sehr aktiver Bereich und gleichzeitig die bedeutsamste Baggerstrecke der Tideems. Der Beitrag des Dollart über den zunehmend stärker überströmten Geiseleiddamm ist jedoch unbekannt. Es ist davon auszugehen, dass kontinuierlich Sedimente aus dem Dollart in das Emdener Fahrwasser eingetragen werden und Sediment permanent durch die Tideströmung und durch die Baggermaßnahmen umgelagert wird. Allerdings ist damit nicht darstellbar ob während des Technischen Tests zusätzliches Material aus der Unterems ins Emdener Fahrwasser eingetrieben wurde.

Durch die Erkenntnisse im Rahmen des Referenzprofils (siehe 7.4) spricht jedoch vieles dafür, dass tatsächlich größere Schwebstoffmengen transportiert und sich im Emdener Außenhafen ablagern konnten. Die höheren Transporte lassen sich allerdings nicht durch transportwirksame höhere Strömungsgeschwindigkeiten erklären, da diese durch den Technischen Test insgesamt betrachtet geringer ausfielen. In den Bereichen jenseits des Fahrwassers, in denen nicht gebaggert wurde, stellt sich die Situation ohnehin differenzierter dar. Vor allem ab Ems-km 41,9 ist in „flacheren“ Bereichen Sedimentation zu beobachten. Dies lässt sich durch die Querschnittsaufweitung unterhalb der Emspier erklären. Auch die Querschnittsaufweitung vor der Emspier (41,2 bis 41,3) zeigt eine Sedimentation. Eine Ausnahme stellt das Querprofil bei Ems-km 42,5 dar, in dem im Tiefenbereich zwischen NHN -4 und -8 m Erosion beobachtet wurde (siehe 6.20.1).

7.3.2 Bereich Jemgum

Im Bereich Jemgum (Unterems-Km 19 bis 24) wechselten sich Bereiche mit Erosion und Sedimentation ab. Bei etwa 2/3 der betrachteten Flächen handelte es sich um Bereiche, in denen üblicherweise nicht gebaggert werden muss. Der zahlenmäßig größte Flächenbereich war von der Sedimentdynamik her betrachtet auch gleichzeitig der am wenigsten Auffällige. Diese Bereiche befanden sich während des Technischen Tests mehr oder weniger in stabilem Gleichgewicht. Da die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten durch die Tideniedrigwasseranhebung in diesem Bereich mit am größten war, wären Auswirkungen auf die Sedimentation eigentlich zu erwarten gewesen. Die Ursache könnte der nicht ausreichende Konsolidierungsgrad der Sedimente sein. Für eine detailliertere Betrachtung wäre die zusätzliche Interpretation weiterer Peilfrequenzen hilfreich (siehe 6.20.2).

7.3.3 Bereich Papenburg

Im Bereich Papenburg (Unterems-Km 0 bis 2,4) ist in den flacheren Bereichen von NHN -2 bis -4 m die Sedimentation als vorherrschender Prozess zu erkennen. Der sich anschließende, vom prozentualen Anteil her weniger bedeutsame Tiefenbereich von NHN -4 bis -6 m zeigt ebenfalls Sedimentation aber abschnittsweise auch Erosion vor allem im Abschnitt Unterems-Km 0 bis 1. Von Unterems-Km 2 bis 3,2 fehlen Daten in dieser Tiefenschicht. Da dieser Tiefenbereich für die Überführung der SPIRIT of ADVENTURE (30.08.2020) gebaggert wurde ist es durchaus möglich, dass diese Bereiche bereits „auf Tiefe“ gebracht wurden und in dieser Tiefenklasse nicht mehr zu sehen waren. Für diesen

Erklärungsansatz spricht, dass in diesem Abschnitt die sog. Bedarfstiefe erreicht war und im sich anschließenden Abschnitt noch nicht. Darüber hinaus deutet die Tiefenbewegung im sich anschließenden Bereich von Unterems-Km 3,2 bis 4 genau auf diesen sukzessiven Zuwachs an Tiefe durch Baggerung hin. Wäre ein anderer Mechanismus dafür verantwortlich, würden sich auch andere Abschnitte wie z. B von Unterems-Km 0 bis 1,2 genauso oder sehr ähnlich verhalten. Dies ist so nicht zu beobachten. Insgesamt betrachtet ist im Abschnitt Papenburg über alle Tiefenbereiche, vor allem aber in den flacheren Bereichen außerhalb des Fahrwassers Sedimentation zu beobachten. Der Ursprung des Materials kann anhand der Peildaten nicht ermittelt werden (siehe 6.20.3).

7.4 Aspekt Sedimentation im Emder Fahrwasser, in den Liegewannen und im Außenhafen Emden

Anhand eines Referenzprofils, welches über längere Zeit beobachtet wurde, war das Sedimentationsverhalten in diesem Abschnitt vor dem Hintergrund der natürlichen Schwankungen zu bewerten. Das Referenzprofil, auf dem auch nach dem Technischen Test weiterhin regelmäßig Tiefenvermessungen durchgeführt werden, beginnt im Außenhafen auf Höhe der Randzelbrücke, verläuft in gerader Linie zwischen der West- und Ostmole hindurch und passiert anschließend sämtliche Liegeplätze von NPorts seitlich des Emder Fahrwassers, zwischen den Liegewannen und der Fahrinne. Das Profil verläuft bewusst vor den Liegeplätzen da dort weniger Beeinflussung und Behinderung durch liegende Schiffe verursacht wird. Es sollte weiterhin eine Beeinflussung sowohl durch den Baggerbetrieb der WSV als auch von NPorts vermieden werden.

Für die Bewertung des Sedimentationsverhaltens wurden die Peilfrequenzen 33 kHz verwendet, die einen Hinweis auf (dauerhafte) Sedimentation geben. Die Peilungen mit der höheren Frequenz (210 kHz) geben darüber hinaus Aufschluss über die Lage des Flüssigschlickhorizontes bzw. der Bewegung dieses Weichsediments.

Es zeigt sich vor allem im jährlichen Kontext, dass ausgeprägte saisonale Schwankungen vorhanden sind, die zumindest für die Bereiche der emsnahen Liegewannen größere Bedeutung besitzen als die vermeintliche Wirkung des Technischen Tests. So ist anhand von Sedimentuntersuchungen bereits vor dem Test und direkt in den Liegewannen ein Anstieg des Sandgehaltes an 6 von 8 Stellen dokumentiert. Dies wird hauptsächlich in Verbindung gebracht mit einer Intensivierung des Transportes mariner Sedimente wie sie in den Sommermonaten und weit in den Herbst und Winter hinein unter geringen Oberwasserabflüssen typisch sind. Die Sedimententnahmen im Bereich der Liegestellen sowie zusätzliche auf dem Referenzprofil werden im Hinblick auf einen erweiterten Test oder Wirkbetriebes begonnen bzw. fortgesetzt.

Für den Bereich des Außenhafens wird gegenwärtig von einer Beeinträchtigung durch die TnWA ausgegangen. Der Außenhafen folgt nur bedingt der Sedimentationsdynamik der äußeren Liegeplätze. Vielmehr besitzt er ganz eigene individuelle Merkmale und vor allem eine große Homogenität nicht zuletzt durch den stabilen Fluid mud. Durch das größere Austauschvolumen infolge stärkerer Absenkung der Tideniedrigwasserstände, deutliche Druckunterschiede infolge des Absunks können die stabilen Verhältnisse beeinflusst werden. Die Abnahme des Flüssigschlickkörpers im Außenhafen kann als mögliche Folge der geänderten Wasserstände bzw. des schnellen Absunks interpretiert werden. Infolge der TnWA eingetragener Sand kann sich negativ auf das Konsolidationsverhalten der Sedimente auswirken. Dieser Aspekt wird durch zusätzliche Untersuchungen langfristig beobachtet werden.

Sehr wichtig erscheinen die Untersuchung und das bessere Verständnis von biologischen Vorgängen im Außenhafen selbst. Die deutlichen Verluste an Wassertiefe, dargestellt durch das Segment 4 vor allem im Monat August lassen einen starken Zusammenhang mit biologischen Prozessen als Funktion der Wassertemperatur vermuten. Erste Konsequenz daraus ist im Bereich der Randzelbrücke eine neue Messposition um die Wassertemperatur in zwei Horizonten ergänzend zur Messung vor den Molen des Emder Hafens dauerhaft zu beobachten.

Die querprofilbasierte Untersuchung der Sedimentationsdynamik hat anhand der Untersuchung im Abschnitt Emden (Ems-km 40,7 bis 43,0) die Aussage des Referenzprofils bestätigt. Die Aussagen über alle Querprofile geben darüber hinaus die Baggerwirkungen richtig wieder. Im Untersuchungszeitraum

ist vor allem in den nicht durch Baggeraktivitäten berührten flachen Bereichen ab km 41,9 etwa 1 km seewärts der Hafeneinfahrt Emden Sedimentation in größeren Abschnitten festzustellen. Es lässt sich durch die Untersuchung nicht darstellen, auf welcher Fahrwasserseite dies tatsächlich eingetreten ist. Durch Überströmungsvorgänge auf der Dollartseite wird die Präferenz aber auf der roten und damit der Seite der Hafeneinfahrt gesehen. Die Sedimentationshöhen liegen zwischen 0,5 und 1,5 dm und sind moderat.

Aufgrund der charakteristischen Strömungsverhältnisse im Einfahrtbereich des Außenhafens kommt es dort generell zu einer typischen Sedimentation, deren Gestalt als Barre bezeichnet wird. Die Ausprägung dieser Barre ist nicht statisch, sondern ändert sich entsprechend der stets dynamischen Einflussfaktoren. Die Barre weist im gemessenen Querschnitt die mehr oder weniger typische Form eines Sedimentationsmusters im Bereich von Hafeneinfahrten/Einmündungen auf, welche sich durch die sich ausbildende Scherzone und damit angrenzend Bereiche deutlich niedrigerer Strömungsgeschwindigkeit sowie Turbulenz ergeben. Die Form der Barre variiert in Abhängigkeit der Geometrie, der Hydrodynamik sowie der Zusammensetzung der bildenden Sedimente. Hohe Sandanteile sprechen für eine steilere flusseitige Böschungsneigung, flachere Neigungen für höhere Anteile von schlickigem (Feinschluff, Ton) Sediment. Die Solltiefe im Bereich der Hafeneinfahrt beträgt $S = SKN -8,12$ m, entsprechend $NHN -10,50$ m. Während des Technischen Tests wurde die Solltiefe im Bereich der Barre um ca. 25 cm unterschritten, d.h. es lag eine sogenannte Mindertiefe vor, die für den Schiffsverkehr kritisch zu bewerten ist.

Nach dem Technischen Test wurde ein deutlicher Anstieg der Barrenhöhe und auch eine Verlagerung der Barre Hafen einwärts festgestellt (Peilungen im September und Oktober). Die im September erreichte Höhe der Barre wurde allerdings bereits im Frühjahr (April) übertroffen. Somit war ein Sedimentationsverhalten wie während und nach dem Technischen Test auch schon unabhängig davon zu beobachten. In späteren Peilungen wurde zunächst eine Höhenlage der Barre festgestellt, die deren mittleren Höhe entsprach (Anfang Dezember) oder leicht höher waren.

Mit Ausnahme einer Peilfahrt wurde eine horizontale Verlagerung der Barre in Richtung Außenhafen bzw. Randzelbrücke festgestellt. Aufgrund der Vielzahl der beeinflussenden Faktoren ist anhand der bisher vorliegenden Daten die Ursache dieser Bewegung nicht zu benennen. Denkbar ist eine saisonale Änderung im Strömungs- oder Sedimentregime und / oder eine Veränderung im Ablauf der Unterhaltungsbaggerungen. Zur weiteren Beobachtung werden die Peilungen auf dem Referenzprofil weiter fortgesetzt.

Siehe auch Kapitel 6.17 und gesonderten Untersuchungsbericht KREBS 2021 im Anhang.

7.5 Aspekt Beeinflussung der Hafenwirtschaft - NPorts

Der im Vorfeld des Technischen Tests prognostizierte Absink des Wasserstands bei Emden trat wie erwartet ein. Dieser führte allerdings zu vorher nicht von NPorts abgeschätzten Schwierigkeiten im Bereich des Außenhafens und den dazu gehörenden Liegewannen, so dass mehrfach Tidesteuerungen ausgesetzt werden mussten.

Eine nennenswerte Sedimentation in den Liegewannen konnte während des Testbetriebs von NPorts nicht festgestellt werden. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Kontrollpeilungen während des Tests intensiviert und entsprechend bei Bedarf mit zusätzlichen Unterhaltungsbaggerungen reagiert wurde. Die Wochenrezirkulationsmengen während des Testbetriebs blieben allerdings im Rahmen der normalen Schwankungen. Allerdings kam es nach Abschluss des Testbetriebs zu einem starken Anstieg der Wochenrezirkulationsmengen im Bereich Außen- und Vorhafen.

Im Tidebereich wurde mindestens zweimal in der Woche, bei Bedarf auch öfter, durch NPorts gepeilt. Das eigene Peilschiff wurde durchgehend einsatzfähig gehalten, um bei Problemen sofort reagieren

und die knappen zur Verfügung stehenden Zeitfenster, in den die Liegewannen nicht belegt waren, nutzen zu können.

Nach Beendigung des Testbetriebs kam es im Bereich der Zufahrt zum Hafen zu einer Barrenbildung bzw. zur Veränderung der bereits vorhandenen speziellen Tiefenverhältnisse mit dem Auftreten von Mindertiefen (siehe auch detaillierte Beschreibung in KREBS 2021 / Anhang bzw. in Kapitel 6.17 und zusammenfassend in Kapitel 7.4). Aufgrund des zeitlichen Zusammenhangs schließt NPorts derzeit nicht abschließend aus, dass es sich bei dem beobachteten Verhalten der Barre um einen „morphologischen“ Nachlauf des Technischen Tests handelte. Die Situation im Zufahrtbereich zum Außenhafen stabilisierte sich zum Jahreswechsel 2020/21. Zeitgleich konnte aber von NPorts festgestellt werden, dass zur Aufrechterhaltung in den Liegewannen Emskai, Emspier und Dalbenliegeplatz und auch in den Zufahrtbereichen zu diesen Liegeplätzen ein erhöhter Rezirkulationsaufwand benötigt wird und die Rezirkulationsmengen zugenommen haben. Dieser Effekt wird weiter intensiv von NPorts gepeilt und bearbeitet.

Im Normalfall beobachtet NPorts im Tidebereich des Hafens wechselnde Sandanteile, zunehmend je näher der Bereich der Ems liegt. Im Mittel wird im Außen- und Vorhafen von 25 %, im Bereich der Emsliegeplätze und ihrer Zufahrten von bis zu 35 % ausgegangen. Die im Zusammenhang mit dem Barrenproblem im Zufahrtbereich erstellten Kornkurven weisen Sandanteile von 50 % und mehr im Zufahrtbereich zum Außenhafen aus. NPorts kann zurzeit nicht abschließend feststellen, ob diese Veränderung im Zusammenhang mit dem Testbetrieb steht oder ob es andere dafür geben könnte.

Während des Testbetriebs konnte NPorts die erforderliche Unterhaltungsbaggerung nicht im normalen Rahmen durchführen. Es war eine intensive Abstimmung freier Zeitfenster erforderlich, da zum einen das Sediment häufiger zu bearbeiten war, um die Wassertiefen jederzeit sicherstellen zu können, zum anderen waren aufgrund der besonderen Umstände teilweise längere Liegezeiten der Schiffe vorhanden, wodurch die jeweiligen Liegestellen nicht jederzeit für die erforderlichen Arbeiten zugänglich waren. Durch diese zusätzlichen Einsatz- und Stand-by- Stunden entstanden NPorts zusätzliche Kosten.

Durch die Tidesteuerung entstand der Hafenbetriebszentrale (HBZ) ein zusätzlicher Aufwand: Für jedes Schiff musste im Vorfeld geprüft werden, ob unter Berücksichtigung des jeweiligen Tiefgangs und der Beeinflussung der Wasserstandsverhältnisse ausreichend Wassertiefe in der Liegewanne vorhanden sein würde. Jedes Schiff musste intensiv durch die Nautik betreut und ggfs. Ladungsvorgänge unterbrochen werden, woraus sich im Einzelnen eine zeitliche Verzögerung des Ladungsvorganges und darüber auch die o.g. Einschränkung des Zeitfensters für erforderliche Baggereinsätze folgte.

Den Schiffen selber entstand ein Mehraufwand, wenn diese wegen des niedrigeren Tideniedrigwassers die Laderampe (RoRo) hochfahren mussten. Zum Teil war diese Vorkehrung auch außerhalb der eigentlichen Verladezeiten (nachts) zu treffen.

Ausblickend muss bemerkt werden, dass der Anteil der tiefgehenden Schiffe zunimmt und damit die Beeinflussung der Wasserstandsverhältnisse um Tideniedrigwasser zunehmend ins Gewicht fällt.

Die Unterbrechung des Ladevorganges, welches die spezielle Konstruktion der Rampen erfordert, kann zunehmend zu einer Verschiebung der Abfahrtszeiten führen. Dabei ist zu beachten, dass die Verzögerung bis zu 24 Stunden oder zwei Hochwasser betragen kann und damit auch ein entsprechender Rückstand in den Folgehäfen einhergehen wird.

Die längeren Liegezeiten werden zu einer stärkeren Belegung der vorhandenen Liegeplätze führen, wodurch wiederum weniger Zeitfenster für die erforderlichen Baggereinsätze zur Verfügung stehen werden. Die Einsatzzeiten des Baggers müssen ausgeweitet werden, was zusätzliche Kosten verursacht und bei weiterer Zunahme nicht mehr mit einem Gerät abgedeckt werden kann.

Es wird auf den vollständigen Untersuchungsbericht von NPorts im Anhang verwiesen (NPORTS 2021).

7.6 Aspekt Sauerstoff

7.6.1 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Sauerstoffverhältnisse

Zu Beginn des Tests waren im Vergleich mit langjährigen Aufzeichnungen im unteren und oberen Abschnitt der Unterems niedrigere Sauerstoffwerte vorhanden, in dem dazwischenliegenden Abschnitt waren diese relativ hoch. Auch in der Außenems Richtung Nordsee waren im Vergleich zur typischen Sommersituation geringere Sauerstoffwerte zu messen (siehe 4.4 und 6.9.3).

Während des mehrwöchigen Tests waren die beeinflussenden Faktoren in unterschiedlicher Ausprägung vertreten: Die Tidesteuerung wurde in verschiedener Intensität ausgeführt und sogar für unterschiedlich lange Zeiten ausgesetzt, zudem variierte die Tideintensität und damit die Schwebstoffkonzentration, die Wassertemperatur und das Oberwasser. Unter den gegebenen Randbedingungen führte die Tidesteuerung am deutlichsten oberhalb von Terborg zu einer Anhebung der Sauerstoffkonzentrationen. Die Schwankung der Sauerstoffgehalte im Bereich von Gandersum und unterhalb davon waren im Wesentlichen auf die Variation der Tide- und Witterungsverhältnisse zurückzuführen. Die Änderungen der Sauerstoffwerte in Richtung Papenburg waren im Wesentlichen der Tidesteuerung zuzuordnen. Der Test verdeutlichte, dass die Sauerstoffgehalte in vergleichbarem Maß zunehmen, wenn das Tideniedrigwasser windbedingt erhöht und der Tidehub darüber verkleinert wird.

Trotz der intermittierenden Tideniedrigwasseranhebung, in denen nur phasenweise direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden und auch Unterbrechungen von bis zu 17 Tiden vorkamen, war die Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen insgesamt so deutlich, dass sich dieser im Juli in einer auffälligen Zunahme der Monatsmittelwerte im Abschnitt von Terborg bis Papenburg äußerte. Die Zunahme unterhalb von Terborg ging zu einem größeren Teil auf die Witterungsverhältnisse zurück und der Anstieg in Herbrum/Heede hatte ihre Ursache allein in der Witterung. Obwohl der Test bereits Mitte August endete, waren die Mittelwerte des gesamten Monats von Pogum bis Weener gegenüber dem Referenzfall noch leicht erhöht. Im September und Oktober nahmen die Konzentrationen aufgrund der sinkenden Wassertemperatur zu, gegenüber der Referenz waren diese zunächst im Abschnitt Pogum bis Weener und später von Pogum bis Leerort relativ hoch. Dieser Effekt ist allerdings nicht mit der Tidesteuerung in Verbindung zu bringen, sondern ist vermutlich auf die besonderen Umstände zurückzuführen, die bereits vor dem Test zu relativ hohen Sauerstoffgehalten geführt hatten. Am oberen und unteren Rand der Unterems stellten sich nach dem Test zunehmend niedrigere Werte als im Referenzfall ein (siehe 6.14.2.1).

Vor Beginn des Tests schwankten die Sauerstoffgehalte während der Tide bei Papenburg zwischen 0 und 4 mg/l, bei Gandersum zwischen 3 und 5 mg/l und bei Knock zwischen 5 und > 6 mg/l. Mit Einsetzen der Tideniedrigwasseranhebung, die zunächst nur in jeder zweiten Tide stattfand, wurde das Sauerstoffniveau oberhalb von Gandersum insgesamt deutlich angehoben. Dabei äußerte sich die positive Wirkung am deutlichsten im oberen Abschnitt der Unterems, wo vor dem Test besonders niedrige Sauerstoffkonzentrationen vorhanden waren. Die Betrachtung der Monatsmittelwerte lässt aber auch auf eine Verbesserung der Sauerstoffsituation im Abschnitt Gandersum bis Knock schließen. In der ersten Woche des Technischen Tests waren in der gesamten Ems Sauerstoffgehalte zwischen 6 und 8 mg/l vorhanden. Da selbst die Sauerstoffminima in diesem Wertebereich lagen, stellte dieses gegenüber dem Ausgangszustand eine sehr deutliche Verbesserung dar. Die hohen Sauerstoffkonzentrationen waren sogar als untypisch für die sonst sehr niedrigen Werte des Sommers zu bezeichnen und traten in vergleichbarer Art bisher nur bei außergewöhnlichen Randbedingungen auf, wie z.B. unter Einfluss eines hohen Oberwasserzuflusses und niedrigen Wassertemperaturen (siehe 6.14.2.2).

Die vertikalen Sauerstoffgradienten änderten sich z.T. stark mit dem Wechsel der natürlichen Randbedingungen und der Steuerungsintensität. Bei intensiver Tidesteuerung traten relativ hohe Sauerstoffwerte über die ganze Wassersäule bis oberhalb der Flüssigschlickschicht auf. Je nach Kombination der Einflussfaktoren wurden jedoch zeitweise auch niedrige Sauerstoffgehalte im Sohlbereich, verbunden mit einem starken vertikalen Gefälle, beobachtet. Bei Weekeborg, Soltborg,

Terborg und Ditzum trat nach Versuchsbeginn ein sofortiger Anstieg der Sauerstoffgehalte auf. Insbesondere bei Weekeborg und Soltborg zeigte sich insgesamt eine starke Reaktion der sohnahen Sauerstoffgehalte auf die Steuerung. Weniger deutlich war diese im Sohlbereich bei Unterems-Km 24 und Km 33 (siehe 6.11).

Je mehr Tideniedrigwasseranhebungen in direkter Folge ausgeführt wurden, desto geringer war das Volumen der mobilen Flüssigschlickschicht, insbesondere oberhalb von Weener und desto niedriger waren die Schwebstoffkonzentrationen zwischen Herbrum und Gandersum. Da im Flüssigschlick nur sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen oder gar kein gelöster Sauerstoff vorhanden ist, führte dessen Volumenabnahme auch zur Ausdehnung des sauerstoffreicheren Milieus. Darüber hinaus nahmen die Sauerstoffkonzentrationen im Wasserkörper insbesondere oberhalb von Leerort zu. War vorher oberhalb von Weener ein Bereich mit sehr niedrigen Sauerstoffwerten festzustellen, nahm das Sauerstoffgefälle entlang der Unterems über die Folge der Tideniedrigwasseranhebungen ab. Dabei verkürzte sich die Strecke mit niedrigen Sauerstoffgehalten, bis dass überall Werte von > 5 mg/l vorhanden waren (siehe 6.13).

7.6.2 Intermittierender Betrieb der Tidesteuerung

Bei Aussetzen einer Tidesteuerung traten nicht sofort hohe Schwebstoffkonzentrationen bzw. niedrige Schwebstoffwerte auf. Wurde jedes zweite Tideniedrigwasser angehoben, setzte zwar eine Verschlechterung ein, in Form einer Zunahme der Flüssigschlickschicht, der Zunahme der Schwebstoffwerte und Abnahme der Sauerstoffgehalte, jedoch hielt sich die Verschlechterung in Grenzen. Im Technischen Test wurde zeitweise ein Anteil von $> 60\%$ der Tiden gesteuert, womit gegenüber dem Referenzzustand eine wesentliche Verbesserung der Verhältnisse erreicht werden konnte. Erst bei Steuerung eines geringeren Anteils der Tiden, insbesondere bei einem Aussetzen der Tidesteuerung über mehrere Tiden in Folge, setzte eine signifikante Verschlechterung der Gewässergüte ein. Dabei nahm mit Zunahme der Unterbrechung auch wieder die Flüssigschlickschicht zu, insbesondere oberhalb von Weener, und die Höhe der Schwebstoff- und Sauerstoffwerte sowie deren Verteilung tendierten wieder in Richtung des Zustandes, wie er vor Beginn des Technischen Tests existierte.

Bereits eine einzelne Tideniedrigwasseranhebung schien direkt einen positiven Effekt auf die Gewässergüte auszuüben, allerdings reichte die Wirkung nicht über die gesteuerte Tide hinaus. Wurden mehrere direkt aufeinander folgende Tideniedrigwasser angehoben, so zeichnete sich eine rasche und signifikante Verbesserung ab, die sich auch über den Zeitraum der gesteuerten Tide hinaus hielt. Bei Übergang von der Steuerung jeder Tide zu einer Steuerung jeder zweiten Tide war zwar eine Verschlechterung der Güte festzustellen, aber der gegenüber dem Referenzzustand immer noch wesentlich bessere Zustand war durch die geringere Steuerungsintensität zu halten (siehe 6.13).

7.6.3 Unterbrechung der Tidesteuerung

Der Zeitraum des Technischen Tests überschneidet sich mit einer Baggerkampagne zur Vorbereitung einer Schiffsüberführung Ende August (SPIRIT of ADVENTURE, Überführungstermin 30.08.2020). Die Baggerintensität wurde zum Ende des Tests deutlich gesteigert und die räumliche Ausdehnung der Baggerstrecken vergrößert. Vor der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung über 17 Tiden (vom 20. bis 28.07.) war lediglich ein Laderaumsaugbagger tätig und förderte eine tägliche Laderaummenge von im Mittel 6.000 m^3 . Während der Steuerungspause wurde die Baggerintensität gesteigert und dessen räumliche Ausdehnung vergrößert. Nachdem die Tidesteuerung fortgesetzt wurde, existierte einerseits eine geringe Steuerungsintensität (häufiges Aussetzen der Steuerung) und andererseits eine weiterhin hohe Baggerintensität. Möglicherweise hatten die Baggerungen Einfluss auf das Volumen und die Verteilung des Flüssigschlicks sowie der Schwebstoffkonzentrationen und darüber auch auf die Sauerstoffgehalte. In der Phase nach der langen Steuerungspause war die Gewässergüte offensichtlich aufgrund der geringeren Steuerungsintensität schlechter als vor der Pause. Allerdings war in der späteren Phase auch eine wesentlich höhere Baggerintensität vorhanden.

Die Tideniedrigwasseranhebung wirkte vor und nach der mehrtägigen Unterbrechung (zwischen 19. und 29.07.) unterschiedlich stark. Im Vergleich zur ersten Phase sanken die Schwebstoffgehalte bzw. stiegen die Sauerstoffwerte nach der Unterbrechung nur zögerlich. Warum diese nicht so abnahmen wie zu Beginn des Tests, als auch bei hohem Schwebstoff- und niedrigem Sauerstoffniveau mit der Steuerung begonnen wurde, lag vermutlich daran, dass in dieser Phase ein niedrigeres Oberwasser, eine höhere Wassertemperatur und eine höhere Tideintensität herrschten und damit wesentlich ungünstigere Voraussetzungen boten. Gleichzeitig erfolgte nach der Unterbrechung nur eine unregelmäßige Steuerung, in der wiederum einige Tiden ausgelassen wurden. Hinzu kam die deutliche Steigerung der Baggerintensität und die größere räumliche Ausdehnung der Baggermaßnahme zum Ende der Versuchsphase, womit möglicherweise ein Einfluss auf das Volumen der Flüssigschlickschicht und auf die Schwebstoffkonzentrationen genommen wurde. Die Abfolge verschiedener Einflussfaktoren sowie auch die Baggerkampagne kann dafür ursächlich sein, dass sich die Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung auf die Schwebstoff- und Sauerstoffverhältnisse zeitweilig auch trotz vergleichbarer Randbedingungen in den verschiedenen Phasen des Technischen Tests unterschieden. Aus diesem Grund konnte in der letzten Phase der Tideniedrigwasseranhebung die anfänglich hohe Wirkung der Steuerung nicht reproduziert werden.

7.6.4 Nachhaltigkeit der Tidesteuerung

Wie bereits für die Schwebstoffgehalte beschrieben, schienen auch die Sauerstoffverhältnisse von einer längeren Dauer direkt aufeinander folgender Tideniedrigwasseranhebungen zu profitieren. Wurde im Anschluss dieser Phase nur jede zweite Tide gesteuert, nahmen die Konzentrationen zwar wieder ab, jedoch erreichten sie nicht das Niveau unbeeinflusster Tiden. Erst mit längerem Aussetzen der Steuerung gingen die Sauerstoffwerte wieder auf das ursprüngliche Niveau zurück. Nachdem die Tideniedrigwasseranhebung für 17 Tiden unterbrochen worden war, stiegen die Sauerstoffgehalte mit der Wiederaufnahme des Steuerungsbetriebs nur zögerlich. Die Tideniedrigwasseranhebung bewirkte allerdings auch nach der Unterbrechung eine Zunahme des gesamten Sauerstoffniveaus, so auch der Sauerstoffminima, die gegenüber dem Ausgangszustand deutlich anstiegen: im Zeitraum vor der mehrtägigen Unterbrechung im Mittel um 2 bis 4 mg/l und im Testzeitraum nach der Unterbrechung im Mittel um bis zu 2 mg/l. Es ist darauf hinzuweisen, dass in einzelnen Tiden die Zunahmen weitaus größer waren als im Mittel. Dieses wird auch durch den o.g. Wertebereich der ersten Testwoche verdeutlicht, als bei Papenburg die Sauerstoffminima um fast 6 mg/l zunahmen.

7.6.5 Unterschiedliche Wirkung der Steuerungsvarianten

Ein wesentlicher Unterschied der beiden Steuerungsvarianten ist, dass bei der Tideniedrigwasseranhebung die Tideenergie in der Unterems sehr viel stärker reduziert wird als bei der Flutstromtidesteuerung. Dieses führt zu einer Beruhigung der Bewegungsvorgänge, zur Verminderung der Resuspension und insbesondere im oberen Abschnitt der Unterems zur Abnahme der Mächtigkeit der Flüssigschlickschicht. Der Wechsel der Steuerung von der Tideniedrigwasseranhebung auf die Flutstromtidesteuerung führt daher wieder zur Zunahme der Schichtdicke der Flüssigschlickschicht und es kommt zur Neubildung der mobilen Flüssigschlickschicht durch lokale Resuspendierung, so wie dieses auch im Bereich Weekeborg-Weener beobachtet wurde (siehe ab Seite 209). Erst über eine längere Dauer als während des Technischen Tests für diese Variante zur Verfügung stand, würde sich der eigentliche Effekt zeigen, indem u.a. ein ebbseitiger Nettotransport zum Austrag von Feinsediment, zur Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen und darüber zur Zunahme der Sauerstoffwerte in der Unterems führt. Die Anzahl von fünf Flutstromsteuerungen am Ende des Technischen Tests reichte nicht aus, um die Wirkung dieser Variante unter Beweis zu stellen.

7.6.6 Übertragung der Aussagen auf das Leda-Jümme-Gebiet

Im Leda-Jümme-Gebiet erfolgten, mit Ausnahme an der Messstation Leer/Leda am Ledasperrwerk, keine Sauerstoffmessungen. Die positive Entwicklung der Sauerstoffverhältnisse, d.h. die Zunahme der Konzentrationen, bei Leerort/Ems lassen sich auch auf die Station Leer/Leda übertragen. Im Weiteren

sind die Randbedingungen wie folgt zu interpretieren: Die Sauerstoffkonzentrationen sind stark von den Schwebstoffgehalten abhängig. Da davon auszugehen ist, dass die Schwebstoffkonzentrationen in Leda und Jümme durch die Tidesteuerung abnahmen, wird dieses zu einer Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen geführt haben. Die Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen ist an die Verringerung des Tidehubes gebunden. Aufgrund der frei auslaufenden Tide nimmt die Wirkung der Tidesteuerung mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung ab. Es ist anzunehmen, dass die Abnahme der Schwebstoffkonzentrationen im Leda-Jümme-Gebiet zum einen auf den Rückgang des Eintrags aus Richtung Ems resultiert und zum anderen auf eine verstärkte Sedimentation. Da die Sedimentationsstärke von der Höhe der in Suspension befindlichen Feststoffmenge abhängt, ist davon auszugehen, dass diese im unteren Abschnitt der Leda am größten war und mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung abnahm. Die Sauerstoffkonzentrationen werden daher in den Unterläufen von Leda und Jümme am deutlichsten durch die Tidesteuerung angestiegen sein (siehe 6.14).

7.7 Aspekt Salz

7.7.1 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Salzgehalte

Nach Abklingen der Oberwasserwelle im März 2020 blieben anschließend die Salzgehalte oberhalb von Terborg relativ niedrig. Unmittelbar vor Beginn des Tests waren von Herbrum/Heede bis Terborg niedrigere Salzgehalte als im langjährigen Mittel vorhanden. Dieses traf insbesondere für die Stationen Leerort, Leer (Leda) und Weener zu. Unterhalb von Terborg waren dagegen höhere Salzgehalte festzustellen (siehe 4.4.1).

Während des mehrwöchigen Tests waren die beeinflussenden Faktoren in unterschiedlicher Ausprägung vertreten: Die Tidesteuerung wurde in verschiedener Intensität ausgeführt und sogar für unterschiedlich lange Zeiten ausgesetzt, zudem variierte die beeinflussenden Faktoren Tideintensität und Oberwasser. Unter den gegebenen Randbedingungen führte die Tidesteuerung am deutlichsten von Terborg bis Weener zu einer Senkung der Salzgehalte. Die Schwankung der Werte unterhalb von Terborg gehen im Wesentlichen auf die Variation der Salzgehalte im Mündungsbereich zurück und die Werte bei Papenburg zumeist auf die Salzgehalte im zufließenden Oberwasser.

In Papenburg waren die Salzgehalte zu gering, um daran eine eindeutige Reaktion der Tidesteuerung ablesen zu können. Unterhalb von Terborg wirkte sich die Tideniedrigwasseranhebung nur bedingt auf die maximalen Salzgehalte aus, da dort der Einfluss der natürlichen Randbedingungen überwog und an der Knock war kaum noch eine Reaktion auf die Steuerung zu erkennen. Im Abschnitt zwischen Weener und Terborg wirkte sich diese jedoch sehr deutlich auf die Salzgehalte aus: Mit Einsetzen der Tideniedrigwasseranhebung, die zunächst nur in jeder zweiten Tide stattfand, nahmen auch die Salzgehalte von Weener bis Terborg ab. Im weiteren Verlauf des Tests führte die Intensivierung der Tidesteuerung in diesem Emsabschnitt auch zu einer entsprechend deutlichen Abnahme der Salzgehalte. Der Einfluss der Steuerung hob sich deutlich von dem der natürlichen Randbedingungen ab. Im Zeitabschnitt vor der mehrtägigen Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung (19. bis 29.07.) waren die maximalen Salzgehalte kurzzeitig stark zurückgegangen, und zwar bei Terborg auf 50%, bei Leerort auf rd. 40% und bei Weener auf rd. 75% des Ausgangszustands. In Pogum hatte der Salzgehalt lediglich auf etwa 90% des Ausgangszustands abgenommen.

Trotz der intermittierenden Tideniedrigwasseranhebung, in denen nur phasenweise direkt aufeinanderfolgende Tiden gesteuert wurden und auch Unterbrechungen von bis zu 17 Tiden vorkamen, war die Wirkung insgesamt so deutlich, dass sich diese im Juli in einer auffälligen Abnahme der Monatsmittelwerte im Abschnitt von Terborg bis Leerort und auch in der unteren Leda (Messstation Leer) äußerte. Da oberhalb von Leerort bereits vor Testbeginn relativ niedrige Salzgehalte vorhanden waren, trat dort die absolute Abnahme nicht ganz so deutlich in Erscheinung. Im Verhältnis zum langjährigen Mittelwert war aber auch die Abnahme in Weener signifikant. Das über das Tidewehr

Herbrum kommende Wasser hatte bereits vor dem Technischen Test einen niedrigeren Salzgehalt als im langjährigen Mittel. Auffallend waren hier die relativ niedrigen Werte im Juli. Dieser Verlauf war jedoch vollkommen unabhängig von der Tidesteuerung und ist wahrscheinlich auf den Stopp der Einleitung stark chloridhaltigen Grubenwassers (Ibbenbüren) Anfang Juni 2020 zurückzuführen. In Papenburg wirkten vermutlich beide Faktoren zusammen: die Reduzierung des Salzgehaltes im Oberwasser und die Abnahme des Salzgehaltes durch die Tidesteuerung. So wurden an dieser Stelle auch im Juli relativ niedrige Salzgehalte festgestellt. Die Monatsmittelwerte des Augusts entsprachen von Leerort bis Papenburg wieder in etwa dem Niveau vor dem Test, während die Werte von Terborg bis Knock deutlich erhöht waren. Diese Verhältnisse blieben in der Folgezeit bestehen (siehe 6.9.2, 6.14.3 und 6.15).

7.7.2 Unterbrechung der Tidesteuerung

Während der Unterbrechung des Tests nahmen die Salzgehalte synchron mit der zunehmenden Anzahl der ungesteuerten Tiden zu. Dabei erreichten diese ein Niveau, welches erheblich über dem des Ausgangszustands lag, und zwar um 20 bis 30% bei Terborg, um 50 bis 100% bei Leerort und Weener sowie um 20 bis 40% bei Papenburg. Unterhalb von Terborg waren die Salzgehalte während der Unterbrechung weniger stark angestiegen, so lagen diese bei Gandersum 15 bis 20% über dem Niveau des Testbeginns, bei Pogum rd. 10% und bei Knock wichen diese nur kaum vom Ausgangszustand ab. Weshalb die Salzgehalte insbesondere im Abschnitt Terborg bis Papenburg nach der Unterbrechung des Tests so weit anstiegen, könnte mit der Veränderung des Salzgehaltsgefälles im Zeitabschnitt vor der Unterbrechung begründet sein. Denn die Salzgehalte waren im betreffenden Emssegment deutlich reduziert worden, so dass dadurch auch ein größeres Längsgefälle des Salzgehaltes entstanden war. Nach der Unterbrechung sanken die Gehalte zwischen Papenburg und Terborg zunächst erneut und im nachfolgenden Zeitbereich bis zum Ende des Tests spiegelte sich die Steuerungsintensität im Verlauf der Salzgehalte wider, wobei es jedoch zur Überlagerung mit den natürlichen Randbedingungen kam. In der Zeit nach der mehrtägigen Unterbrechung waren die Salzgehalte höher als im Zeitabschnitt davor, weil einerseits die Steuerungsintensität geringer und auch unregelmäßiger war und andererseits vermutlich, weil das niedrigere Oberwasser und die relativ hohe Tideintensität den Ems aufwärts gerichteten Transport förderten. Zudem hatte sich zwischenzeitlich ein Salzgehaltsgefälle im Längsverlauf eingestellt, welches nur durch eine intensivere Tidesteuerung (zunächst jede Tide, dann Übergang zur Steuerung jeder zweiten Tide) rascher günstig beeinflusst worden wäre.

Der Zeitraum des Technischen Tests überschneidet sich mit einer Baggerkampagne zur Vorbereitung einer Schiffsüberführung Ende August (SPIRIT of ADVENTURE, Überführungstermin 30.08.2020). Die Baggerintensität wurde zum Ende des Tests deutlich gesteigert und die räumliche Ausdehnung der Baggerstrecken vergrößert. Vor der Unterbrechung der Tideniedrigwasseranhebung über 17 Tiden (vom 20. bis 28.07.) war lediglich ein Laderaumsaugbagger tätig und förderte eine tägliche Laderaummenge von im Mittel 6.000 m³. Während der Steuerungspause wurde die Baggerintensität gesteigert und dessen räumliche Ausdehnung vergrößert. Nachdem die Tidesteuerung fortgesetzt wurde, existierte einerseits eine geringe Steuerungsintensität (häufiges Aussetzen der Steuerung) und andererseits eine weiterhin hohe Baggerintensität. Möglicherweise hatten die Baggerungen Einfluss auf das Volumen und die Verteilung des Flüssigschlicks sowie der Schwebstoffkonzentrationen, womit möglicherweise auch Einfluss auf die Salzausbreitung ausgeübt wurde.

7.7.3 Übertragung der Aussagen auf das Leda-Jümme-Gebiet

Im Leda-Jümme-Gebiet erfolgten, mit Ausnahme an der Messstation Leer/Leda am Ledasperrwerk und in der Jümme bei Nortmoor (ab 23.07.), keine Leitfähigkeitsmessungen. Die positive Entwicklung der Salzgehaltsverhältnisse, d.h. die Abnahme der Konzentrationen, bei Leerort/Ems lassen sich auch auf die Station Leer/Leda übertragen. Im Weiteren sind die Randbedingungen wie folgt zu interpretieren: Mit der Abnahme des Tidehubs geht auch der Eintrag von Salz aus Richtung Ems einher. Aufgrund der

frei auslaufenden Tide nimmt die Wirkung der Tidesteuerung mit zunehmendem Abstand zur Ledamündung ab.

7.8 Aspekt Verträglichkeit der Tidesteuerung für das Emssperrwerk

7.8.1 Sohlsicherung

Die große Anzahl von 42 Tideniedrigwasseranhebungen konnten letztlich unter Berücksichtigung der Belange der Hafenvirtschaft in unterschiedlicher zeitlicher Abfolge ausgeführt werden: in mehreren direkt aufeinander folgenden Tiden, in jeder zweiten Tide, in unregelmäßigen Abständen und mit einer längeren Unterbrechung. So blieb das Sperrwerk zwischen dem 19. und 29.07. über 17 Tiden durchweg geöffnet, so dass in diesem Zeitraum lediglich der natürliche Tideeinfluss herrschte. Zum Ende des Technischen Tests wurden fünf Flutstromtidesteuerungen durchgeführt. Dabei wurden zunächst drei direkt aufeinander folgende Tiden gesteuert, dann eine Tide ausgesetzt und danach zwei weitere Tiden beeinflusst.

Die Variante „Tideniedrigwasseranhebung“ lässt grundsätzlich keine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in Bauwerksnähe erwarten. Dagegen ist bei der Variante „Flutstromtidesteuerung“ durch den Spaltdurchfluss des teilweise geöffneten Sperrwerks prinzipiell mit erhöhten Geschwindigkeiten und zu Umlagerungen des Sohlmaterials zu rechnen. Neben der Nullmessung wurden 16 Flächenpeilungen während der Testphase der Tideniedrigwasseranhebung ausgeführt. Während der Phase der Flutstromtidesteuerungen wurde in jeder Tide und damit sechs Mal gemessen, womit eine engmaschige Kontrolle erfolgte. Zum Abschluss wurde eine weitere Messung 10 Tage nach Testende aufgenommen, um den Nachlauf zu betrachten.

Über die durchgeführten Flächenpeilungen lassen sich die Auswirkungen der vorgenannten Tidesteuerungen auf die Tiefenverhältnisse, vor dem Hintergrund des natürlichen Tideinflusses, bewerten. Zudem gehen die Daten der Peilungen in die Bemessung einer möglichen Erweiterung der Sohlsicherung ein. Sollte zukünftig die Variante Flutstromtidesteuerung dauerhaft zum Einsatz kommen, wird die dafür erforderliche Bemessung der Sohlsicherung einen schadlosen Dauerbetrieb gewährleisten.

Bei der Flutstromtidesteuerung waren in direkter Sperrwerksnähe Turbulenzen und an den Dalben Wirbel auf Oldersumer Seite zu beobachten. Diese gingen mit zunehmendem Abstand zum Sperrwerk in eine ruhige und über die gesamte Gewässerbreite verteilte Strömung über, ohne großräumige Wirbel auszubilden. Auf Emders Seite waren keine vergleichbaren Bedingungen in unmittelbarem Sperrwerksbereich zu erkennen. Die Strömungsverhältnisse der Flutstromtidesteuerung führten zu einer örtlich begrenzten Erosion auf der Oldersumer Seite im Bereich der Nebenöffnungen 1, 2, 3, 4 und der Binnenschifffahrtsöffnung. Dabei war die Abtragung bei der Nebenöffnung 2 wesentlich stärker als an den anderen Toren, was sich in einer größeren Erosionsfläche und –tiefe äußerte. Die tiefste Stelle des Erosionsbereichs hatte eine Höhenlage von NHN -8,1 m und befand sich auf Oldersumer Seite rd. 40 m von der Bauwerksachse entfernt bzw. rd. 18 m unterhalb der vollvergossenen Schüttung. Damit ereignete sich die Erosion im Abschnitt der losen Steinschüttung, deren Oberfläche mit einer Neigung von im Mittel 1:19 vom Bauwerk abfällt. Folglich war die tiefste Stelle des Erosionsbereichs höhengleich mit der Oberfläche der Steinschüttung an betreffender Stelle. Es ist daher festzustellen, dass dort ausschließlich das auf der Sohlsicherung liegende Sediment abgetragen wurde, die Steinschüttung selber wurde nicht angegriffen. Nach jeder Flutstromtidesteuerung fand eine Kontrollmessung statt. Die Tiefenentwicklung nahe der Nebenöffnung 2 gaben Anlass, nach drei direkt aufeinander folgenden Flutstromtidesteuerungen zunächst eine Tidesteuerung auszusetzen. Aus Sicherheitsgründen sollten die bis dahin entstandenen Sohldifferenzen bewertet werden, bevor mit dem Test fortgefahren würde. Dabei konnte geklärt werden, dass lediglich die auf der Sohlsicherung befindliche Sedimentlage örtlich begrenzt abgetragen

wurde und die darunter befindliche Sohlsicherung unbeschadet blieb. Daraufhin wurde der Test unverändert fortgeführt. Bereits in der Machbarkeitsstudie zur Tidesteuerung wurde die mögliche Kolkentwicklung im Sperrwerksbereich durch ein Gutachten, das sich auf eine morphodynamische Modellrechnung stützte, prognostiziert. Die dabei berücksichtigte Torsteuerung entsprach der tatsächlich ausgeführten Steuerung, allerdings wurde eine durchweg höhere Tideintensität und über längere Zeit dauerhafte Steuerung zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Randbedingungen stimmt die Gestalt der Erosionsflächen auf Oldersumer Seite grundsätzlich mit dem Ergebnis dieser morphodynamischen Berechnung überein. Allerdings wurde darin angenommen, dass sich die Auskolkungen nicht nur im Abstrom des Sperrwerks (also auf Oldersumer Seite) auftreten, sondern auch im Anstrom. Der Grund dieser Prognose war, dass sich dort kurz vor dem Eintritt in die Sperrwerksöffnungen die Strömung konzentriert und diese dabei beschleunigt. Dieses kann dazu führen, dass an jeder Stelle dieses Bereichs mehr Sediment abtransportiert als antransportiert wird, was eine Kolkbildung zur Folge haben kann. Zusätzlich zu dieser Prognose kann auch angenommen werden, dass bei häufiger Tidesteuerung die Verlagerung der Hauptströmung dazu führt, dass sich diese ein neues Gerinne schafft. Der für die Emdor Seite prognostizierte Erosionsprozess trat während des Test nicht in Erscheinung. Dieses kann mit der relativ geringen Anzahl der Flutstromtidesteuerungen zu tun haben, die insbesondere auch nicht dazu ausreichte, dass sich die Strömung ein neues Gerinne schuf (siehe 6.22.4).

7.8.2 Tore

Wie weit die Lasten und Anregungen der Teilöffnung der Hubtore Auswirkungen auf die Beanspruchung und Tragfähigkeit der Struktur haben, wurden durch Messungen erfasst bzw. Berechnungen ermittelt. Auf dieser Grundlage wurden computergestützte Belastungsanalysen der Festigkeit des Hubtors 2 durchgeführt, die Erkenntnisse auf die anderen Hubtore übertragen sowie die Belastung durch eine dauerhafte Tidesteuerung bei einer kalkulatorischen Restnutzungsdauer der Verschlüsse beurteilt. Dabei wurde das Hubtor 2 als das am stärksten belastete Hubtor stellvertretend für alle Nebenöffnungen ausgewählt.

Aus den Messdaten lässt sich keine relevante Schwingungsanregung während der Tidesteuerung und bei der Fahrweise der Schiffsüberführung (Stau der SPIRIT of ADVENTURE am 30.08.2020) erkennen. Die stochastische Anregung aus Wasserdruck, Strömung und weiteren Einflüssen hatte keine resonante Strukturantwort zur Folge. Die statischen Berechnungen ließen keine Schädigung der Struktur erwarten und ergaben eine hohe Sicherheit gegen konservativ ermittelte Belastungswerte. Der Ermüdungsnachweis zeigt, dass infolge der betrachteten Fahrweisen über die kalkulatorische Restnutzungsdauer der Verschlüsse keine Schädigung der Struktur zu erwarten ist. Je nach Häufigkeit höherer Lastsituationen ist die Ermüdungsbetrachtung neu zu bewerten (siehe 6.24 und gesonderten Bericht im Anhang⁴⁵).

7.9 Aspekt Wasserstand

7.9.1 Auswirkung der Tideniedrigwasseranhebung

Die Auswirkungen der Tideniedrigwasseranhebung sind von Dukegat bis Herbrum und im Leda-Jümme Gebiet bis über den Pegel Dreyschloot hinaus nachweisbar. Die Steuerung führte in den durchgeführten Versuchen oberhalb des Emssperrwerks im Mittel zu einer Niedrigwasseranhebung von bis zu 70 cm (Terborg und Leerort), bis zu 39 cm bei Herbrum und bis zu 11 cm am Pegel Dreyschloot in der Leda. Seewärts des Emssperrwerks führt die Steuerung zu einer Absenkung des

⁴⁵ Siehe gesonderten Bericht im Anhang: TÜV NORD (2021): Ermüdungsnachweis eines Hubtores des Sperrwerks Gandersum für die Betriebsweise Tidesteuerung; TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Auftrag des NLWKN; Hamburg 20.04.2021

Tideniedrigwassers, die sich bis zum Pegel Knock nachweisen lässt. Bei Emden betrug die Absenkung 35 cm, zudem trat das Tideniedrigwasser früher ein.

Die tatsächlich durchgeführten Versuche zur Tideniedrigwasseranhebung wurden entgegen den ursprünglichen Planungen in reduzierter Anzahl ausgeführt. Die geringere Anzahl der beeinflussten Tiden hatte auf die Wasserstandsveränderungen nur eine geringe Auswirkung. Die durch den Versuch veränderten und ermittelten Werte der Steig-/Fallgeschwindigkeit werden an der Ems zwischen Papenburg und Herbrum regelmäßig auch ohne TnWA erreicht. Die schnellen Wasserstandsveränderungen stellen für den Hafen Emden speziell bei der Be- und Entladung eine Einschränkung dar (siehe 6.1.1).

Der Zeitbereich, über die der Wasserstand gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht war, begann mit dem beeinflussten Tideniedrigwasser, danach folgte der zügige Anstieg des Wasserstands (Schwall) und dann die „Stauphase“. Oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks, wo der Schwall und die sogenannte „Stauphase“ auftreten, werden die Wasserstandsverhältnisse im Niedrigwasserbereich nur unvollständig durch das beeinflusste Tideniedrigwasser charakterisiert, da dieses hauptsächlich den Schließwasserstand repräsentiert und nur für sehr kurze Zeit vorhanden ist. Insbesondere zur Beurteilung der Entwässerung im Freigefälle (Sielzug) ist in diesen Abschnitten das sich nach dem beeinflussten Tideniedrigwasser einstellende Wasserstandsniveau sowie die Dauer, über die der Wasserstand über dem einer unbeeinflussten Tide liegt, relevant (siehe 6.2.1 und 7.12.2).

7.9.2 Auswirkung der Flutstromtidesteuerung

Die Flutstromsteuerung fand vom 14. – 17.08.2020 statt wobei 5 Tiden gesteuert wurden. Die erste Steuerung wurde im Nippzeitraum durchgeführt, die übrigen während der Mitt-Tide. Durch die geringe Anzahl von gesteuerten Tiden erhöht sich die Unschärfe im Sinne der statistischen Betrachtung. An den Pegeln Dukegat bis Pogum führte Flutstromtidesteuerung zu einer Erhöhung der Tideniedrigwasser, wobei die Zunahmen im einstelligen Bereich lagen. Im Abschnitt oberhalb des Emssperrwerks traten dagegen niedrigere Tideniedrigwasser ein. Die größte Unterschreitung fand mit 23 cm am Pegel Dreyschloot statt (siehe 6.1.5).

7.10 Aspekt Grundwasserstand

Der Großteil der Grundwassermessstellen reagierte unmittelbar auf die Tideniedrigwasseranhebung. Diese Reaktion resultierte aus der Kommunikation des Grundwassers mit dem, durch die Tidesteuerung beeinflussten, Oberflächengewässer und lässt mit zunehmender Entfernung zum Emssperrwerk, mit größer werdendem Abstand zu einem tidebeeinflussten Gewässer sowie einer größeren Filtertiefe der Grundwassermessstelle nach. Kurz- und langfristige Auswirkungen der Tideniedrigwasseranhebung konnten jedoch nicht eindeutig erkannt werden. Ursächlich hierfür waren die ungewöhnlichen Witterungsverhältnisse mit dem zeitlich und lokal sehr unterschiedlichen Niederschlagsgeschehen sowie der kurze Beobachtungszeitraum. Aber auch weitere Einflussfaktoren, wie die Verdunstung, das örtliche Abflussgeschehen und die Entwässerung hatten vermutlich einen wesentlichen Einfluss.

Daher wird ein weiteres Monitoring, über einen längeren Zeitraum mit weiteren Messstellen verschiedener Filtertiefen und Entfernungen empfohlen, um auch die Wirkung der Tideniedrigwasseranhebung bis ins Binnenland differenzierter beurteilen zu können. Zudem sollten alle Parameter des Wasserhaushalts lokal erfasst und für die Auswertung herangezogen werden. Ein wichtiger Parameter, der bisher nicht berücksichtigt wurde, ist die Veränderung der Leitfähigkeiten während der Tideniedrigwasseranhebung. Dieser sollte im künftig analog zur Überwachung der Grundwasserstände erfasst werden. Für die Auswertung dieser zahlreichen und komplexen Datengrundlagen wird ein hydrogeologisches Gutachten erforderlich sein.

Ein weiteres Monitoring an der Deponie Breinermoor wird als nicht erforderlich angesehen, da die Messungen zeigten, dass die Tideniedrigwasseranhebung keinen Einfluss auf die Grundwasserstände hat.

Bei einer Flutstromtidesteuerung wird dagegen keine Veränderung der Grundwasserstände erwartet, da das Tidevolumen nur unwesentlich reduziert wird.

7.11 Aspekt Sunk Emders Außenhafen

7.11.1 Der Absunk des Wasserstands im Emders Außenhafen

Das Schließen des Emssperrwerks im Ebbstrom (Steuerungsvariante „Tideniedrigwasseranhebung“) führt zur Ausbildung einer Schwallwelle, die sich oberhalb des Sperrwerks in Richtung Herbrum und auch in die Leda fortbewegt sowie zu einer Sunkwelle, die sich unterhalb des Emssperrwerks ausbreitet und in Richtung Außenems ausläuft. Bei Emden fiel der Wasserstand in dieser zeitlich begrenzten Sunkwelle zumeist um 40 bis 45 cm. Dabei sank der Wasserstand mit 4-5 cm/min sehr viel schneller als in einer unbeeinflussten Tide (1-2 cm/min). Das Tideniedrigwasser trat anschließend gegenüber dem Referenzfall verfrüht und im Mittel 35 cm niedriger ein.

Die Höhe des auf den vollständigen Sperrvorgang folgenden Tideniedrigwassers ist im Fall der Steuerungsvariante „Tideniedrigwasseranhebung“ vom Schließzeitpunkt bzw. der Ausführung des Schließvorgangs abhängig. Der Schließvorgang des Emssperrwerks sollte nach numerischen Vorbetrachtungen der BAW derart gesteuert sein, dass der maximale Sunk zeitlich nicht identisch mit dem Niedrigwasser zusammenfällt um die Absenkung so verträglich wie möglich zu gestalten. Da das nächste Tnw Emden von der Höhe und dem Zeitpunkt nicht bekannt ist, stellt dies eine gewisse Unwägbarkeit dar. Je weiter das beeinflusste Tnw zeitlich vor dem berechneten, unbeeinflussten liegt, umso geringer ist die Absenkung bezogen auf die Lage des unbeeinflussten Tnw (siehe 6.1.3).

7.11.2 Möglichkeit zur Verringerung des Absunks

Für das Be- und Entladen von Schiffen im Hafen Emden (NPorts) stellen die absunkbedingten Wasserstandsveränderungen ein Problem dar. Im Umkehrschluss wurden viele geplante Steuerungen abgesagt, da die Höhe des Absunks nicht einschätzbar war und damit eine zu große Gefahr für Mensch und Technik darstellte. Um die Einschränkungen zu minimieren wären nach bisherigen Erkenntnissen zusätzliche Eingangsdaten zur verbesserten Steuerung des Emssperrwerks hilfreich und möglich. Durch Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Fahrrinne des Emders Fahrwassers ist praktisch Potential zur Verbesserung der Prognose bzw. zur Reduktion des Absunks zu erwarten. Soll ein Absunk größer als 40 cm vermieden werden, so sollte die Strömungsgeschwindigkeit in der Fahrrinne kleiner oder gleich 85 cm/s sein. Diese Geschwindigkeit ist im Zeitbereich von etwa 30 bis 90 Minuten vor Eintritt des Tideniedrigwassers zu erwarten (siehe 6.1.3.1).

7.12 Aspekt Sunk, Schwall und Stauphase in der Ems

7.12.1 Sunk und Schwall

Das Schließen des Emssperrwerks im Ebbstrom (Steuerungsvariante „Tideniedrigwasseranhebung“) führt zur Ausbildung einer Schwallwelle, die sich oberhalb des Sperrwerks in Richtung Herbrum und auch in die Leda fortbewegt sowie zu einer Sunkwelle, die sich unterhalb des Emssperrwerks ausbreitet und in Richtung Außenems ausläuft.

Im Vorfeld der Versuche wurde im Hinblick auf die Schifffahrt die mögliche Gefährdung durch Wellen thematisiert. Aus diesem Grund wurden in der Nähe des Emssperrwerks zusätzliche Radarsensoren

montiert, die den Wasserspiegel mit höherer Frequenz abtasten als die üblichen zur Wasserstandserfassung gebräuchlichen Radarsensoren. Die „Wellenpegel“ wurden bei Pogum sowie bei Terborg an den Pegeldalben bzw. den für Radarsensoren vorhandenen Auslegern montiert. Vor dem Hintergrund der durch den Schiffsverkehr verursachten Wellen führte die Steuerung des Emssperrwerks zu keinen negativen Auswirkungen.

Für Schiffe, die sich in Sperrwerksnähe in Wartepositionen befanden, wurden ebenfalls zusätzliche Strömungsmessgeräte ausgebracht um potentielle Wirkungen zu erfassen. Die Messungen wurden sinngemäß im Nahbereich der Warteplätze Ditzum und Gandersum ausgelegt. Aus den Messungen ergaben sich keinerlei Hinweise auf kurzfristige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten. Mit dem Eintreten des Absunks gingen die Strömungsgeschwindigkeiten deutlich zurück. Die Strömungsrichtung ändert sich durch den Absunk entweder nicht oder nur geringfügig und kurzzeitig um etwa 10-20°. Dieses stellte weder für liegende als auch in Fahrt befindliche Schiffe eine Beeinträchtigung dar (siehe 6.1.4).

7.12.2 Stauphase

In der Ems zwischen Emssperrwerk und Herbrum sowie in der Leda bis etwa Wiltshausen existierte im Zeitraum zwischen dem Durchgang der Schwallwelle und dem eindeutigen Eintritt der Flut kein stetiges Steigen oder Fallen des Wasserstands, so dass die Charakteristik dieser Phase weder der Flut- noch der Ebbephase zuzuordnen war. Der mittlere Wasserstand dieser Phase lag am Emssperrwerk (Oberpegel) NHN -0,5 m (s.o.). In der Ems zwischen Emssperrwerk und Ledamündung variierte während dieser Phase der Wasserstand relativ wenig, in der Ems oberhalb der Ledamündung änderte sich die Art dieser Phase zunehmend, so dass bei Herbrum ein langsames Heben und Senken des Wasserstands zu beobachten war.

Der Zeitbereich, über die der Wasserstand gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht war, begann mit dem beeinflussten Tideniedrigwasser, danach folgte der zügige Anstieg des Wasserstands (Schwall) und dann die „Stauphase“. Die Dauer dieses Zeitbereichs betrug zwischen Emssperrwerk und Leerort im Mittel 2 Stunden 20 Minuten, wobei die „Stauphase“ etwa 2 Stunden dauerte. Oberhalb von Leerort nahm die Dauer bis nach Herbrum ab. Bei Herbrum war der Wasserstand im Mittel über eine Dauer von 2 Stunden und 5 Minuten gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht, wobei der Wasserstand über etwa 1 Stunde und 40 Minuten relativ wenig schwankte.

Oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks, wo der Schwall und die sogenannte „Stauphase“ auftreten, werden die Wasserstandsverhältnisse im Niedrigwasserbereich nur unvollständig durch das beeinflusste Tideniedrigwasser charakterisiert, da dieses hauptsächlich den Schließwasserstand repräsentiert und nur für sehr kurze Zeit vorhanden ist. Insbesondere zur Beurteilung der Entwässerung im Freigefälle (Sielzug) ist in diesen Abschnitten das sich nach dem beeinflussten Tideniedrigwasser einstellende Wasserstandsniveau sowie die Dauer, über die der Wasserstand über dem einer unbeeinflussten Tide liegt, relevant.

7.13 Aspekt Strömung

7.13.1 Veränderung der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Tideniedrigwasseranhebung

Die Wirkung der Tideniedrigwasseranhebung betraf zwar überwiegend Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten, die Auswirkungen auf die Flut waren jedoch bedeutsamer. Die Tideniedrigwasseranhebung reduzierte die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten wesentlich stärker als die der Ebbe. Die Steuerung verhinderte vor allem am Anfang der Flutphase die typischerweise

hohen Flutstromgeschwindigkeiten. Erkennbar war weiterhin, dass die Ebbstromgeschwindigkeiten geringeren Schwankungen unterlagen als die Flutstromgeschwindigkeiten (siehe Kapitel 6.5.1.).

Papenburg

Im Referenzzustand sind die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Flut höher als bei Ebbe. In den unbeeinflussten Tiden des Testzeitraums waren die maximalen Geschwindigkeiten der Flut rd. 5% höher als die der Ebbe.

Durch die Tideniedrigwasseranhebung traten in der verbleibenden Zeit der Flutphase, die auf das Öffnen der Tore folgte, deutlich niedrigere maximale Flutstromgeschwindigkeiten auf als im ungesteuerten Zustand. Darüber hinaus war eine Phase von etwa 2 h zu beobachten, in der sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschten. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten waren von der Tideniedrigwasseranhebung dagegen kaum betroffen. Damit änderte sich das Verhältnis von Flut- zu Ebbgeschwindigkeiten deutlich. Sind im Referenzzustand die maximalen Geschwindigkeiten der Flut höher als die der Ebbe, führte die Tidesteuerung zu einer Umkehr des Verhältnisses. Dabei waren die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Ebbe rd. 20% höher als die der Flut.

Leerort

Durch die Tidesteuerung nahmen die Strömungsgeschwindigkeiten während des Flutstromes signifikant ab, wodurch während des Flutstromes viel weniger Material transportiert wurde als während der Ebbe. Daraus ergab sich in den gesteuerten Tiden eine deutlichen Ebbstromdominanz.

Terborg

Im Referenzzustand sind die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Flut erheblich höher als bei Ebbe. In den unbeeinflussten Tiden des Testzeitraums waren die maximalen Geschwindigkeiten der Flut rd. 30% höher als die der Ebbe.

Durch die Tideniedrigwasseranhebung traten in der verbleibenden Zeit der Flutphase, die auf das Öffnen der Tore folgte, deutlich niedrigere maximale Flutstromgeschwindigkeiten auf als im ungesteuerten Zustand. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten waren von der Tideniedrigwasseranhebung dagegen kaum betroffen. Damit änderte sich das Verhältnis von Flut- zu Ebbgeschwindigkeiten deutlich. Sind im Referenzzustand die maximalen Geschwindigkeiten der Flut höher als die der Ebbe, führte die Tidesteuerung zu einer Umkehr des Verhältnisses. Dabei waren die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Ebbe 20 bis 30% höher als die der Flut.

Emden

Im Referenzzustand unterscheiden sich die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von Flut und Ebbe nur wenig. In den unbeeinflussten Tiden des Testzeitraums waren die maximalen Geschwindigkeiten der Flut in etwa so hoch wie die der Ebbe.

Durch die Tideniedrigwasseranhebung traten in der verbleibenden Zeit der Flutphase, die auf das Öffnen der Tore folgte, deutlich niedrigere maximale Flutstromgeschwindigkeiten auf als im ungesteuerten Zustand. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten wurden in Folge der Tideniedrigwasseranhebung geringfügig vermindert. Insgesamt führte die Tideniedrigwasseranhebung dazu, dass die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Ebbe 30 bis 40% höher waren als die der Flut.

Messpfahl Emders Fahrwasser (nahe Geisespitze)

Im Referenzzustand sind die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Flut höher als bei Ebbe. In den unbeeinflussten Tiden des Testzeitraums waren die maximalen Geschwindigkeiten der Flut rd. 10% höher als die der Ebbe.

Durch die Tideniedrigwasseranhebung traten in der verbleibenden Zeit der Flutphase, die auf das Öffnen der Tore folgte, deutlich niedrigere maximale Flutstromgeschwindigkeiten auf als im ungesteuerten Zustand. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten waren von der Tideniedrigwasseranhebung dagegen kaum betroffen. Damit änderte sich das Verhältnis von Flut- zu

Ebbgeschwindigkeiten deutlich. Sind im Referenzzustand die maximalen Geschwindigkeiten der Flut höher als die der Ebbe, führte die Tidesteuerung zu einer Umkehr des Verhältnisses. Dabei waren die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Ebbe 10 bis 20% höher als die der Flut.

Die begleitende Modelluntersuchung ergab, dass die Tideniedrigwasseranhebung zu einer leichten Zunahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Knock führte. Von Knock in Richtung Emden fielen diese gegenüber der Referenz zunehmend geringer aus und zwischen Emden und etwa Rhede waren die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Mittel 0,4 bis 0,6 m/s niedriger als in den ungesteuerten Vergleichstiden. Oberhalb von Rhede glichen sich die maximalen Geschwindigkeiten wieder denen der Referenzfälle an (siehe Kapitel 6.6).

Interpretation der Strömungsgeschwindigkeit hinsichtlich des Sedimenttransports

Da es durch die Tideniedrigwasseranhebung insbesondere zu einer Reduzierung der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten beim Einsetzen des Flutstromes kam, konnte auch in Bezug auf die Schwebstoffgehalte während der Flutphase die deutlichste Reduzierung der Schwebstoffkonzentrationen beobachtet werden. Auch wenn die darauffolgende Tide nicht gesteuert wurde war die vertikale Durchmischung noch teilweise reduziert. Die transportierten Mengen wurden durch die Steuerung während des Flutstroms reduziert, da die Zeiträume mit transportrelevanten Strömungsgeschwindigkeiten kürzer waren und weniger Material in die Wassersäule eingemischt wurde. Aber auch während des Ebbstrom war eine geringere Schwebstoffkonzentration zu beobachten. Durch die starke Verminderung des flutseitigen Transports ergab sich letztlich eine deutliche Ebbstromdominanz des Sedimenttransports in den gesteuerten Tiden.

Strömungsgeschwindigkeiten bei Sunk und Schwall

Das vollständige Verschließen des Durchflussquerschnittes bei Ebbstrom führte zur Ausbildung einer Sunkwelle, die sich vom Emssperrwerk in Richtung Emden/Außenems bewegte sowie zur Bildung einer Schwallwelle, die von Gandersum in Richtung Herbrum lief. Aus den Strömungsmessungen ergaben sich keinerlei Hinweise auf kurzfristige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten.

7.13.2 Veränderung der maximalen Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten während der Flutstromtidesteuerung

Die Reduktion der transportwirksamen großen Flutstromgeschwindigkeiten ist die Hauptwirkung der Flutstromtidesteuerung. Die Reduktion stellt sich in Abhängigkeit des gewählten Verschlussgrades des Emssperrwerks ein und ist damit regelbar. Die eingetretene Wirkung war im Nahfeld des Emssperrwerks am größten und nahm in Richtung Papenburg deutlich ab. Größenordnungsmäßig wurden die stärksten Flutstromgeschwindigkeiten bei Terborg um 20 bis 30 % reduziert, bei Leerort etwa um 20 bis 40 % und bei Papenburg etwa bis 10 %. Die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten durch die Steuerungsvariante Tideniedrigwasseranhebung war im Vergleich dazu bedeutend größer (siehe 6.5.2).

Anders als bei der Tideniedrigwasseranhebung fehlt bei der Flutstromtidesteuerung der Zeitraum von ca. 2 h, in dem das Sperrwerk komplett verschlossen ist und ganz geringe Strömungsgeschwindigkeiten in der Unterems auftreten.

Die begleitende Modelluntersuchung ergab, dass die Flutstromtidesteuerung im Bereich der Knock zu keiner Änderung der maximalen Flutströmungsgeschwindigkeit führte, für die Strecke zwischen Emden und etwa Rhede wurde jedoch eine Abnahme ermittelt. Im Nahfeld des Sperrwerks wichen die Geschwindigkeiten stärker von der Referenz ab (siehe 6.6).

7.13.3 Auswirkung der Tidesteuerung auf die Strömungsverhältnisse am Emssperrwerk

In Sperrwerksnähe (ca. 150m, bzw. 300m Distanz) zeigen die Ergebnisse der durch die BAW durchgeführten Messungen eine unmittelbare Wirkung der Betriebsform Tideniedrigwasseranhebung (TnWA). Die maximalen Werte für die Flutstromgeschwindigkeit und die Schwebstoffkonzentration reduzieren sich deutlich.

Die Betriebsform Flutstromtidesteuerung (FsTs) hingegen zeigt deutlich geringere bis keine Abnahmen der Geschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentrationen gegenüber unbeeinflussten Tideverhältnissen. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die Stellung der Sperrwerkstore sein. Bei der FsTs werden die Tore nicht vollständig geschlossen, ca. 1/3 des Sperrwerk-Querschnitts bleibt weiterhin durchströmt, während bei der TnWA das Sperrwerk vollständig geschlossen wird.

Die Ergebnisse gelten für den Nahbereich des Sperrwerks und es müssen auch lokale Effekte, z.B. durch die kleinräumige Topographie oder auch das Bauwerk selbst in Betracht gezogen werden.

Im unmittelbaren Bauwerksbereich, d.h. in weniger als 150 m Distanz, ist von erhöhten Flutstromgeschwindigkeiten auszugehen. Hierzu lassen sich aus den durchgeführten Messungen jedoch keine Aussagen ableiten (siehe 6.7 und gesonderten Untersuchungsbericht MAUSHAKE 2021 im Anhang).

7.14 Aspekt Außenmuhden

Vorbehaltlich der großen Streuung der Messwerte kann der Mittelwert der Höhendifferenzen innerhalb einer Muhde als Resultat des Nettotransports interpretiert werden. Damit wäre in den meisten Fällen ein leichter Eintrag zwischen 0 und 5 cm und an der Knock sogar von 30 cm anzunehmen, in einigen Muhden jedoch auch ein Austrag von mehr als 20 cm. Anhand des Nettoeintrags bzw. -austrags unterscheiden sich die oberhalb des Emssperrwerks befindlichen Muhden nicht grundlegend von denen unterhalb des Bauwerks. Insbesondere ist der relativ hohe Eintrag an der Knock nicht auf die ebenfalls unterhalb des Sperrwerks befindlichen Ausläufe Borßum, Ditzum und Petkum zu übertragen, wo sich die mittlere Höhenlage entweder kaum änderte oder sogar deutlich abnahm.

Es ist grundsätzlich davon auszugehen, dass Sediment innerhalb der jeweiligen Muhde umgelagert und auch darin eingetragen bzw. heraustransportiert wurde. Zu welchen Anteilen dieses jeweils geschah, geht aus den Daten nicht hervor. Im Falle eines Nettotransports in die Muhde lässt die Datenlage keinen Rückschluss auf die Quelle zu. So ist es möglich, dass dieses aus dem Uferbereich selbst und/oder aus dem Hauptgerinne der Ems stammte. Im letztgenannten Fall ist nicht bekannt, welche Richtung der Nettotransport des Material vorher hatte, also ob das Sediment aus der Unter- oder Außenems stammte. Der Vergleich von Vor- und Nachmessung lässt auf eine Umlagerung von Sediment schließen, deren Intensität in Richtung Knock zunahm.

Die vorliegenden Ergebnisse beruhen nur auf eine Vor- und eine Nachmessung, die in einem zeitlichen Abstand von zwei bis drei Monaten durchgeführt wurden. Die Variabilität der Sedimentationsvorgänge wird bei dem Vergleich der Vor- und Nachmessung außer Acht gelassen. Unter anderem wird diese durch Wind bzw. die dadurch hervorgerufenen Wellen verursacht. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass es im betreffenden Zeitraum Phasen mit stärkerem Wind gab und sogar leichte Sturmfluten auftraten. Im Weiteren ist davon auszugehen, dass die Sedimentationsvorgänge saisonal schwanken. Dabei wird generell im Sommer eine stärkere Sedimentation in den Muhden erfolgen, da dann eine höhere Feststofffracht der Ems vorherrscht und die sporadische Binnenentwässerung nur zur Umlagerung von Sediment führt, jedoch nicht zu dessen Austrag. Darüber hinaus wird in den Muhden, die durch Wasserfahrzeuge befahren werden, die Sedimentumlagerung auch zum Teil darauf zurückzuführen sein. Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren ergibt sich eine starke Variabilität des Sedimentationsverhaltens. Vor diesem Hintergrund lassen die vorliegenden Messergebnisse die

Umlagerung und den Ein- bzw. Austrag von Sediment nicht der intermittierenden Tidesteuerung zuordnen. Um die von der Tidesteuerung verursachte Sedimentation bzw. Erosion generell von den natürlichen Transportvorgängen unterscheiden zu können, wäre eine längere Beobachtungsdauer erforderlich, z.B. über turnusmäßige Flächenpeilungen. Auch wenn die Messungen kein eindeutiges Ergebnis liefern können, verdeutlichen diese die Komplexität der Sedimentationsvorgänge und konkretisieren diese den zukünftigen Messaufwand (siehe 6.23, sowie der darin enthaltenen detaillierten Dokumentation der Sedimentations- und Erosionsvorgänge am Beispiel mehrerer Außenmuhden).

7.15 Aspekt Sielentwässerung

7.15.1 Sielentwässerung entlang der Ems

In der Ems zwischen Emssperrwerk und Herbrum sowie in der Leda bis etwa Wiltshausen existierte im Zeitraum zwischen dem Durchgang der Schwallwelle und dem eindeutigen Eintritt der Flut kein stetiges Steigen oder Fallen des Wasserstands, so dass die Charakteristik dieser Phase weder der Flut- noch der Ebbephase zuzuordnen war. Der mittlere Wasserstand dieser Phase lag am Emssperrwerk (Oberpegel) NHN -0,5 m. In der Ems zwischen Emssperrwerk und Ledamündung variierte während dieser Phase der Wasserstand relativ wenig, in der Ems oberhalb der Ledamündung änderte sich die Art dieser Phase zunehmend, so dass bei Herbrum ein langsames Heben und Senken des Wasserstands zu beobachten war.

Der Zeitbereich, über die der Wasserstand gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht war, begann mit dem beeinflussten Tideniedrigwasser, danach folgte der zügige Anstieg des Wasserstands (Schwall) und dann die „Stauphase“. Die Dauer dieses Zeitbereichs betrug zwischen Emssperrwerk und Leerort im Mittel 2 Stunden 20 Minuten, wobei die „Stauphase“ etwa 2 Stunden dauerte. Oberhalb von Leerort nahm die Dauer bis nach Herbrum ab. Bei Herbrum war der Wasserstand im Mittel über eine Dauer von 2 Stunden und 5 Minuten gegenüber einer unbeeinflussten Tide erhöht, wobei der Wasserstand über etwa 1 Stunde und 40 Minuten relativ wenig schwankte.

Oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks, wo der Schwall und die sogenannte „Stauphase“ auftreten, werden die Wasserstandsverhältnisse im Niedrigwasserbereich nur unvollständig durch das beeinflusste Tideniedrigwasser charakterisiert, da dieses hauptsächlich den Schließwasserstand repräsentiert und nur für sehr kurze Zeit vorhanden ist. Insbesondere zur Beurteilung der Entwässerung im Freigefälle (Sielzug) ist in diesen Abschnitten das sich nach dem beeinflussten Tideniedrigwasser einstellende Wasserstandsniveau sowie die Dauer, über die der Wasserstand über dem einer unbeeinflussten Tide liegt, relevant (siehe 6.2.1).

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser in der Unterems oberhalb von Emden abgenommen, woraus sich günstigere Umstände für die Sielentwässerung ergaben. Die Wasserstandsanhhebung in Herbrum und Papenburg entspricht in etwa dem Maß, um das sich der Tideniedrigwasserstand in dem betreffenden Abschnitt in den letzten 50 Jahren abgesenkt hatte. Unterhalb von Papenburg ist die Wasserstandsanhhebung größer als die zurückliegende Absenkung. Bei Leerort und Weener ist die Wasserstandsanhhebung rd. 0,5 m größer und bei Oldersum und Terborg ist diese um rd. 0,8 m größer als die zurückliegende Absenkung des Tideniedrigwassers. An der Knock stieg in der Vergangenheit das Tideniedrigwasser auf natürlichem Wege um 0,1 m an. Die Steuerungsvariante „Tideniedrigwasseranhebung“ verursacht dagegen eine Absenkung des Niedrigwasserstandes um etwa 0,1 m, womit der natürliche Trend kompensiert wird.

Während des Technischen Tests war oberhalb des Emssperrwerks stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich, da die Tideniedrigwasseranhebung in intermittierender Form ausgeführt wurde. Eine reale Beeinträchtigung des Sielbetriebs bestand daher nicht. Selbst bei extremen Randbedingungen (hoher Außenwasserstand und hohe Abflussspende in den

Einzugsgebieten der Mündungsbauwerke) wäre keine Gefahrensituation zu befürchten gewesen. Die detaillierten Untersuchungen zur Auswirkung der festen Sohlschwelle auf die Wasserwirtschaft haben mit Ausnahme des Außensieles Oldersum keine Vulnerabilität der Siel- und Schöpfwerksgebiete oberhalb des Emssperrwerks ermittelt (IMS 2013). Ergänzend ist hinzuzufügen, dass ein extremes Niederschlagsereignis im Sommer lediglich regional begrenzt auftritt und nicht die Abflussspende des gesamten jeweiligen Einzugsgebietes extrem ansteigen ließe.

Mit Ausblick auf einen möglichen Dauerbetrieb der Tideniedrigwasseranhebung wäre eine größere Aufmerksamkeit im Abschnitt oberhalb des Emssperrwerks in Phasen direkt aufeinander folgender Niedrigwasseranhebungen in den Übergangszeiten (Oktober / November und März / April) geboten, in denen noch eine Tidesteuerung sinnvoll ist aber bereits höhere Abflussspenden in den Einzugsgebieten vorhanden sein können, deren Mündungsbauwerk auch ein Siel enthalten. Zwar wäre die Hochwassersicherheit in jedem Fall durch die ebenfalls vorhandene Ausstattung mit Schöpfwerken gegeben, allerdings wird in bisheriger Praxis die Sielentwässerung solange wie möglich aufrecht gehalten, da diese eine kostengünstige Form der Entwässerung darstellt (siehe Kap. 6.2.6, in dem sich auch eine detaillierte Betrachtung der Mündungsbauwerke befindet).

7.15.2 Sielentwässerung im Leda-Jümme-Gebiet

In der Ems zwischen Emssperrwerk und Ledamündung sowie in der Leda bis etwa Wiltshausen existierte im Zeitraum zwischen dem Durchgang der Schwallwelle und dem eindeutigen Eintritt der Flut kein stetiges Steigen oder Fallen des Wasserstands, so dass die Charakteristik dieser Phase weder der Flut- noch der Ebbephase zuzuordnen war und somit als „Stauphase“ bezeichnet wird (siehe auch 7.15.1). In der Leda und Jümme oberhalb von Wiltshausen nahm die Tidekurve einen zunehmend harmonischen Verlauf an, bei der keine sogenannte „Stauphase“ existierte. Dort sank der Wasserstand bis zum Eintritt des Tideniedrigwassers kontinuierlich weiter und danach setzte der stetige Wasserstandsanstieg der Flutphase ein. Gegenüber einer unbeeinflussten Tide war dort jedoch die Sinkgeschwindigkeit zum Ende der Ebbephase vermindert und das Tideniedrigwasser erhöht. Während des Technischen Tests betrug die Dauer, über die zum Ende der Ebbe Phase eine verminderte Sinkgeschwindigkeit vorhanden war, entsprechend der Schließdauer des Emssperrwerks im Mittel $2\frac{1}{2}$ Stunden. Zur freien Tidegrenze nahm diese Erscheinung jedoch ab, so dass sie letztlich nicht mehr erkennbar war.

In den Abschnitten oberhalb des geschlossenen Emssperrwerks, in denen die sogenannte „Stauphase“ auftritt, werden die Wasserstandsverhältnisse im Niedrigwasserbereich nur sehr unvollständig durch das beeinflusste Tideniedrigwasser charakterisiert, da dieses hauptsächlich den Schließwasserstand repräsentiert und nur für sehr kurze Zeit erscheint. Daher ist in diesen Abschnitten das sich nach Durchgang der Schwallwelle einstellende Wasserstandsniveau relevant. In den Abschnitten ohne „Stauphase“, die in der Leda und Jümme oberhalb von Wiltshausen vorhanden sind, werden die Verhältnisse im Niedrigwasserbereich weiterhin durch das Tideniedrigwasser repräsentiert (siehe 6.3.1.1).

Während des Technischen Tests war stets ein zeitnaher Sielzug bei unbeeinflusster Vorflut möglich, da die Tideniedrigwasseranhebung in intermittierender Form ausgeführt wurde. Eine reale Beeinträchtigung des Sielbetriebs bestand daher nicht und wäre lediglich vorhanden gewesen, wenn ein außergewöhnlich hohes Niederschlagsereignis einen unmittelbaren Sielzug erforderlich gemacht hätte oder auch, wenn bei erhöhter Abflussspende keine Unterbrechung der Tidesteuerung vorgenommen worden wäre. Relativierend ist jedoch anzuführen, dass ein extremes Niederschlagsereignis im Sommer lediglich regional begrenzt auftritt und nicht die Abflussspende des gesamten jeweiligen Sieleinzugsgebietes extrem ansteigen lässt.

In den vergangenen Jahrzehnten haben die Höhen der Tideniedrigwasser im Leda-Jümme-Gebiet abgenommen, woraus sich günstigere Umstände für die Sielentwässerung ergaben. Die Wasserstandsanhhebung entspricht in etwa dem Maß, um das sich die Tideniedrigwasserstände in den letzten 50 Jahren absenkte. In der unteren Leda ist die Wasserstandsanhhebung größer als die zurückliegende Absenkung. An der Ledamündung (Leerort) ist die Wasserstandsanhhebung rd. 0,5 m größer und am Ledasperrwerk um etwa 0,3 m größer als die zurückliegende Absenkung des Tideniedrigwassers.

Hinsichtlich eines möglichen Dauerbetriebs einer Flexiblen Tidesteuerung ist die Vulnerabilität zahlreicher Siel- und Schöpfwerksgebiete zu berücksichtigen, die unter Berücksichtigung der detaillierten Untersuchungen zur Auswirkung der festen Sohlschwelle auf die Wasserwirtschaft (IMS 2013) ermittelt wurde. Eine größere Aufmerksamkeit ist in Phasen direkt aufeinander folgender Niedrigwasseranhebungen in den Übergangszeiten (Oktober / November und März / April) geboten, in denen noch eine Tidesteuerung sinnvoll ist aber bereits höhere Abflussspenden in den Siel-Einzugsgebieten vorhanden sein können. In diesen Zeiten ist bei Bedarf in Rücksichtnahme auf die Gebiete, die ausschließlich mit einem Siel entwässert werden und über kein Schöpfwerk verfügen, ein rasches Ändern des Betriebsplans mit Anpassung an die aktuellen hydrologischen Randbedingungen erforderlich (siehe Kap. 6.3.2; es wird auch auf die darin enthaltene Diskussion der unterschiedlichen Interessen im Leda-Jümme-Gebiet verwiesen).

7.16 Aspekt Flusstauraum und Hochwasserschutz im Leda-Jümme-Gebiet

Durch die Absenkung des Tideniedrigwassers, die sich in den letzten Jahrzehnten durch den Ausbau der Ems ergab, nahm im Gegenzug die Größe des Flusstauraums zu. Dem steht zwar eine Abnahme des Flusstauraums durch eine Verschlickung und Verschlammung gegenüber, diese dürfte jedoch geringer sein als die Volumenänderung durch das sehr deutliche Absinken der Tideniedrigwasserstände. Im heutigen Zustand steht während eines Hochwasserfalls ein tendenziell größerer Stauraum im Gewässersystem zur Verfügung, als in der Vergangenheit.

Der Technische Test fand in einem Zeitraum statt, in dem das Auftreten eines Hochwasserereignisses praktisch ausgeschlossen werden kann. Ausblickend auf einen Dauerbetrieb der Tideniedrigwasseranhebung ist festzustellen, dass im Zeitraum von Mai bis September keine Beeinträchtigung des Hochwasserschutzes durch die Tideniedrigwasseranhebung zu erwarten ist. Im Zeitraum von Anfang Oktober bis einschließlich April ist jedoch eine höhere Vorsicht geboten und die Tideniedrigwasseranhebung stets durch eine Prognose der Windverhältnisse (Windstau) sowie der Niederschlags- und Abflusssituation im Leda-Jümme-Gebiet zu begleiten. Dabei sind Vorhersagen des Wetterdienstes über verschiedene Zeiträume zu verwenden, indem eine Entwicklungstendenz über mehr als eine Woche betrachtet wird (Langfristprognose) und eine Kurzfristvorhersage den detaillierteren Witterungsverlauf über die bevorstehenden 3 Tage angibt. Unter Berücksichtigung, dass sich die Prognosegüte mit Verlängerung des Vorhersagezeitraums verringert und Prognosefehler besonders in Abschnitten mit sehr unbeständigem Wetter auftreten, kann die Grenze der Brauchbarkeit einer Vorhersage mit 6 bis 7 Tagen angegeben werden. Die Vorhersage des Luftdrucks und damit des Windes ist weniger komplex als die Prognose des Niederschlags. Aus diesem Grunde kann ein etwaiger Windstau und damit eine Erhöhung des Tideniedrigwassers früher vorhergesagt werden als die Höhe der zu erwartenden Regenmengen. Zur Sicherheit sollte daher die Tidesteuerung in den Übergangszeiten auf ein Minimum zurückgefahren werden, sobald sich eine Phase erhöhter Tideniedrigwasserstände ankündigt, insbesondere, wenn zusätzlich zu den erhöhten Wasserständen ergiebige Niederschläge vorhergesagt werden.

Die Phase des Technischen Tests, von Ende Juni bis Mitte August, befand sich in einem Zeitraum, in dem der Eintritt eines Hochwasserereignisses unwahrscheinlich ist. Diesbezüglich hätte die Testphase

ohne einen Konflikt mit dem Hochwasserschutz von Mai bis September stattfinden können (siehe 6.3.2).

7.17 Aspekt Beeinflussung der Tideniedrigwasser in den oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer im Leda-Jümme-Gebiet

7.17.1 Vermeidung extrem niedriger Tideniedrigwasser im Leda-Jümme-Gebiet

Die Beeinflussung des Tideniedrigwasserstandes berührt im Leda-Jümme-Gebiet viele verschiedene Interessen. Einerseits besteht ein Interesse, in oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer das Tideniedrigwasser zu stützen, hier ist insbesondere das Aper Tief zu nennen: Die Änderung der hydrologischen Randbedingungen und der Absenk des Tideniedrigwassers in der Ems, bedingt durch den Fahrwasserausbau, führte in den letzten Jahrzehnten in den betreffenden Abschnitten zu einem deutlich abnehmenden Trend der Tideniedrigwasserstände, sowie zum häufigeren Eintritt außergewöhnlich niedriger Pegelstände. Dieses trifft für das abflussärmere Sommerhalbjahr und, im Zusammenhang mit der Betriebsweise des Ledasperrwerks, auch auf die Monate Oktober und November zu. In den betreffenden Gewässerabschnitten ist eine Vermeidung außergewöhnlich niedriger Wasserstände gewünscht und daher die Anhebung bzw. Stützung des Tideniedrigwassers willkommen. Hier ist besonders das Aper Tief zu nennen, in dem die außergewöhnlich niedrigen Wasserstände u.a. aus Sicht der Ökologie kritisch zu bewerten sind. Die betroffenen Abschnitte profitierten von der Tideniedrigwasseranhebung des Technischen Tests, da unter unbeeinflussten Bedingungen häufiger niedrigere Wasserstände eingetreten wären. Wären während des Testzeitraums ohne Tidesteuerung extrem niedrige Wasserstände vorgekommen, hätte die Tideniedrigwasseranhebung deren Eintritt verhindert und stattdessen ein moderates Wasserstandsniveau gehalten. Die Tidesteuerung wurde intermittierend ausgeführt, wodurch auch weiterhin ungesteuerte Niedrigwasser eintraten. Bei einer längeren Betriebsdauer der Tidesteuerung würde die Anzahl der nicht gesteuerten extremen Tideniedrigwasser vermindert und zudem auch deren Eintrittswahrscheinlichkeit reduziert.

7.17.2 Überschneidung der Wirkung von Tidesteuerung und Oberwasser auf die Tideniedrigwasseranhebung

Während des Technischen Tests wurden in den oberen Abschnitten der tidebeeinflussten Gewässer erhöhte Wasserstände wahrgenommen. So meldete die Friesoyther Wasseracht, der für die Sagter Ems zuständige Unterhaltungsverband, deutliche Abweichungen von dem für gewöhnlich vorhandenen Wasserstandsniveau und berief sich auf eigene Beobachtungen sowie auf Hinweise von Anwohnern des Gewässers.

Für den Mündungsbereich der Sagter Ems kann eine Anhebung von 10 bis 15 cm für die von der Steuerung betroffenen Tiden angenommen werden. Am rd. 11 km oberhalb davon befindlichen Pegel Ramsloh muss die Wasserstandsanhhebung damit deutlich unter 10 cm betragen haben und zudem kann diese nur in den gesteuerten Tiden aufgetreten sein. Als grobe Schätzung kann eine Wasserstandsanhhebung der von der Steuerung betroffenen Niedrigwasser von 5 cm (Median) angegeben werden.

Es ist davon auszugehen, dass die Beobachtung des signifikant erhöhten Wasserstandsniveaus nicht auf die Tideniedrigwasseranhebung zurückzuführen war, sondern auf das außergewöhnlich hohe Niederschlagsereignis am 13.06.2020, dem ein starker Anstieg des Oberwassers folgte (siehe 4.1.1.4). Die gemeinsame Betrachtung der tagesgemittelten Wasserstandsverläufe der Pegel Neuburlage (Burlager-Langholter-Tief, staugeregelt) und Ramsloh zeigt einen synchronen Verlauf, mit einem starken Anstieg zeitgleich mit der Zunahme des Oberwassers. Bei Ramsloh wurde der Tagesmittelwert

um rd. 50 cm angehoben und der Tidehub verringerte sich von etwa 60 cm auf 30 cm. Die Wasserstände beider Pegel sanken anschließend annähernd kontinuierlich jedoch nur sehr langsam und erreichten erst im August das vorherige Niveau. Noch einen Monat nach dem Niederschlagsereignis waren die Tagesmittelwerte bei Ramsloh noch um etwa 10 cm erhöht. Die Ursache des ungewöhnlich langsamen Rückgangs kann derzeit nicht erklärt werden. Ein Zusammenhang mit der Steuerung des Emssperrwerks ist aber weitestgehend auszuschließen, da die Charakteristik auch am vollkommen davon unabhängigen Pegel Neuburlage auftrat und dieses Phänomen selbst die Tagesmittelwerte beeinflusste, obwohl sich die Tidesteuerung nur in den betreffenden Tiden mit deutlich weniger als 10 cm auswirken müsste. Darüber hinaus zeichnen sich in dem Verlauf der Tagesmittelwerte nicht die Steuerungspausen ab, insbesondere nicht die zwischen dem 19. und 29.07.2020. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Abhängigkeit der Tidegrenze vom Oberwasser und die Einteilung der Gewässerabschnitte in „Küsten- und Binnendominanz“ in Kapitel 6.3 verwiesen.

7.18 Aspekt Sportbootverkehr im Leda-Jümme-Gebiet

Seitens der Sportschifffahrt im Leda-Jümme-Gebiet besteht sowohl Interesse an niedrigen als auch hohen Tideniedrigwasserständen. Eine Anhebung des Tideniedrigwasserstandes erleichtert einerseits die Befahrbarkeit der Gewässer, andererseits kann diese die Durchfahrt unter den festen Brücken im Leda-Jümme-Gebiet begrenzen, wie z.B. in der Ortschaft Stickhausen, wo die feste Straßenbrücke (Burgstraße) und die Eisenbahnbrücke (Linie Leer-Oldenburg) den Nordgeorgsfehkanal queren. Beim mittleren Tideniedrigwasser ist dort jeweils eine Durchfahrtshöhe von bis zu 2,7 m vorhanden und beim mittleren Tidehochwasser beträgt die Durchfahrtshöhe maximal 1,1 m. Entsprechend der Bootsgröße muss dort der passende Wassersand abgewartet werden. Gleichfalls wird von der Sportschifffahrt in den oberen Gebieten des Tideinflusses ein höherer Tideniedrigwasserstand begrüßt, woraus sich höhere Wassertiefen und damit eine ungehindertere Fahrt ergibt. Entsprechend der astronomischen und witterungsbedingten Einflussfaktoren unterliegen die Tidewasserstände einer natürlichen Schwankung. Hinzu kommt die Beeinflussung durch den Betrieb des Ledasperrwerks. Je nach Ausprägung der Randbedingungen können die mittleren Tideniedrigwasser zeitweise beträchtlich über- und unterschritten werden. Sofern der Eintritt dieser Umstände vorher bekannt ist, können auch Sportschiffe mit höherem Aufbau diese Tiden zur Unterquerung von festen Brücken nutzen oder meiden. Eine Tidesteuerung würde bei hohen Wasserständen im Leda-Jümme-Gebiet, verursacht durch hohes Oberwasser und/oder Windstau, pausieren. Die geringen Durchfahrtshöhen unter den festen Brücken würden daher nur durch die natürlichen Umstände hervorgerufen. Unter den Umständen, die zu sehr niedrigen Wasserständen führen, würde allerdings häufig eine Steuerung erfolgen, so dass in diesen Fällen niedrigere Durchfahrtshöhen vorhanden wären, als unter natürlichen Umständen zu erwarten.

Aufgrund der hydrologischen Randbedingungen während des Technischen Tests wurden die Wasserstände bei Stickhausen um 23 cm (Median) gegenüber den ohne Steuerung zu erwartenden Scheitelhöhen angehoben. In 5% der Tiden lag der eingetretene Wasserstand allerdings nur weniger als 11 cm über der Höhe, die in den betreffenden Tiden ohne Tidesteuerung zu erwarten gewesen war. Die Ursache dafür waren die speziellen hydrologischen Randbedingungen zur Zeit dieser Tiden. Dagegen ergab sich in 5% der Tiden gegenüber der Referenz eine Anhebung von über 33 cm, da die jeweiligen Tiden aufgrund spezieller Randbedingungen ohne Steuerung sehr niedrig ausgefallen wären. Die Differenz zwischen dem tatsächlich eingetretenen Wasserstand und der Referenz war insgesamt größer, als ohne Steuerung durch die astronomischen und meteorologischen Einflussfaktoren verursacht worden wäre. Die Durchfahrtshöhen unter den festen Brücken waren geringer als unter natürlichen Umständen zu erwarten.

Hinsichtlich der Zunahme der Wassertiefen hat die Sportschifffahrt durch den Technischen Test profitiert, denn diese waren größer als unter natürlichen Umständen zu erwarten (siehe 6.3).

7.19 Aspekt Schifffahrt

Der technische Test ist für die gewerbliche Schifffahrt aufgrund umfangreicher Vorgespräche und Abstimmungen ohne größere Probleme verlaufen – die Schifffahrtstreibenden waren bereit, konstruktiv mitzuwirken.

Alle während des Versuches vorgetragenen Hinweise bzw. Anmerkungen oder Beschwerden wurden während des Tests im WSA Ems-Nordsee zentral erfasst und durch nachträgliche Interviews validiert und ausgewertet. Die Seeschifffahrt im Emdener Hafen kam wegen der umfangreichen und detaillierten Einzelabsprachen zwischen allen Beteiligten, hinsichtlich der prognostizierten Auswirkungen in dieser kurzen Testphase relativ gut zurecht. Durch die konstruktive Herangehensweise und das zeitweilige Aussetzen des Tests bei bestimmten Wasserständen, konnte der Umschlag im Hafen jederzeit sicher durchgeführt werden.

Trotz der grundsätzlich positiven Resonanz sollte insgesamt die Information der Schifffahrt, insbesondere der Binnen- und der Sportschifffahrt, noch weiter intensiviert werden.

Die Schließungen im Zuge der Tidesteuerungsmodelle bedingen diverse zeitweilige Sperrungen der Seeschifffahrtsstraße Ems für die gesamte dort verkehrende Schifffahrt. Es gibt Hinweise, dass die Unterems dann nicht mehr zu jeder Zeit ungehindert befahren werden kann, wodurch u.a. Konzentrationswirkungen des im Status Quo uneingeschränkten Verkehrsablauf zu besorgen sind.

Um Abhilfemaßnahmen für die prognostizierten Auswirkungen im Emdener Hafen zu ermitteln, wurde von N-Ports bereits ein Gutachten in Auftrag gegeben. Auch das WSA Ems-Nordsee hat zwischenzeitlich ein Gutachten in Auftrag gegeben, in dem die Art der Betroffenheit bei dauerhafter Einführung einer flexiblen Tidesteuerung ermittelt wird und wodurch diese Auswirkungen minimiert werden können. Für die Schifffahrt allgemein sowie auch der Fahrgastschifffahrt gilt es, eine für beide Seiten passende Lösung zu finden.

8 Literaturverzeichnis

ALRUTZ (2021a) bis ALRUTZ (2021c): Darstellung Tiefenprofile Schwebstoffgehalt, Sauerstoffgehalt und Salzgehalt; NLWKN Bst. Aurich, Juni 2021

AquaEcology (2021): Aktualisierung der Antragsunterlagen zur Vertiefung der Außenems - Ergebnisbericht Phyto- und Zooplankton, im Auftrag des WSA Ems/Nordsee

BECKER, M., MAUSHAKE, C., & WINTER, C. (2018): Observations of mud-induced periodic stratification in a hyperturbid estuary. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1029/2018GL077966>

BEHRENDT, T. (2017): Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Schwebstoff- und Sauerstoffgehalt auf Basis der kontinuierlichen Sondenmessungen, Bachelorarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

BfG (2008): Einfluss von Unterhaltungsbaggerungen auf die Schwebstoffdynamik der Unterems- Monitoring während eines baggerungsfreien Zeitraums; BfG Bericht 1488; Koblenz 2008

BFG (2016): Sedimentmanagementkonzept Tideems; BfG-JAP-Nr. M39630104029; Koblenz Oktober 2016

- BfG (2019): Plankton und Wasserbeschaffenheit in der Tideems 2009 - 2016; BfG-Bericht 1959; Koblenz 2019
- BfG (2021): Plankton und Wasserbeschaffenheit in der Tideems 2017 - 2020; BfG-Bericht 2061 (Update zu BfG-Bericht 1959); Koblenz 2021
- ENGELS, A. (2014): Ermittlung der hundertjährigen Wasserstände im tidebeeinflussten Niederungsgebiet von Leda und Jümme (unveröffentlicht); NLWKN Aurich; Juli 2014
- ENGELS, A. (2019 a): Ledasperrwerk Leer - Entwurf zur Anpassung der Sturmflutsperrungen an die Oberwasserverhältnisse des Leda-Jümme-Gebietes (unveröffentlicht); NLWKN Aurich, März 2019
- ENGELS, A. (2019 b): Hydrologie zur Machbarkeitsstudie Polder Leer – Masterplan Ems 2050; NLWKN Aurich, Dezember 2019
- FRANK, T. (2007): Hochwassersicherheit in sielbeeinflussten Gewässersystemen am Beispiel des Bongsieler Kanals; Dissertation an der TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik; Dresden 2007
- HUPFER, H. und KUTTLER, W. (2006): Witterung und Klima – Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie; Teubner-Verlag
- IMS (2013): Aktionsprogramm Ems - Studie zu den Auswirkungen einer Tnw-Anhebung beim Emssperrwerk auf die Wasserwirtschaft; IMS Ingenieurgesellschaft im Auftrag der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes; Hamburg 2013
- KREBS (2021); Technischer Test 2020 – Ergebnisbericht des WSA Ems-Nordsee zum durchgeführten Monitoring; Emden Dezember 2021
- LAWA (2018): Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch; 5. Auflage; Herausgegeben von der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Stuttgart 2018
- MAUSHAKE (2021): Technischer Bericht zur flexiblen Tidesteuerung des Ems-Sperrwerks; Begleitende Messungen der BAW; Bericht-Nr. B3955.03.12.10234; BAW Hamburg, 23.02.2021
- NAW (1993): DIN 4049 – Hydrologie; Normenausschuss Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung; Beuth Verlag Berlin und Köln; 1994
- NLWKN (2020): Antrag auf Erlaubnis gem. § 8 Abs. 1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) i. V. m. § 9 Abs. 1 Nr. 2 WHG für die Durchführung eines technischen Tests am Emssperrwerk für max. 8 Wochen in der Zeit vom 29.06.2020 bis zum 21.08.2020; Betriebsstelle Aurich des NLWKN, 10.03.2020
- NLWKN (2008): Hochwasserschutzplan Leda-Jümme; NLWKN; Norden 2008
- NLWKN Aurich (2016) Masterplan Ems 2050 – Machbarkeitsuntersuchung zur Tidesteuerung mit dem Emssperrwerk Gandersum; NLWKN Betriebsstelle Aurich, Dezember 2016
- NPorts (2021): Testbetrieb Tidesteuerung – Monitoringbericht NPorts Emden; Emden 19.10.2021

OBERRECHT (2020): Abschätzung des Wirkraums der flexiblen Tidesteuerung auf Basis bereits durchgeführter numerischer Berechnungen; Vermerk NLWKN FSK, Norderney 30.03.2020

OBERRECHT, D. & WURPTS, A. (2019): Auswirkungen des geplanten technischen Testbetriebs zur Wirkung der flexiblen Tidesteuerung – Hydro- und Morphodynamische Modelluntersuchung, Gutachten 04/2019; NLWKN-Forschungsstelle Küste; Norderney im Nov. 2019, aktualisiert 13.05.2020

OBERRECHT, D. & WURPTS, A. (2020): Hydro- und morphodynamische Auswirkungen der 4h-Flutstromsteuerung im Rahmen des geplanten technischen Testbetriebs zur Wirkung der flexiblen Tidesteuerung, Gutachten 01/2020; NLWKN-Forschungsstelle Küste, unveröffentlicht; Norderney im Mai 2020

OBERRECHT, D., P. BRUCKERT & R. VAN DER WEL (2021): Technischer Testbetrieb zur flexiblen Tidesteuerung des Emssperrwerk - Begleitendes Längsprofil-Monitoring, Untersuchungsbericht 01/2021; NLWKN-Forschungsstelle Küste; unveröffentlicht; Norden, Juli 2021

Planfeststellungsbeschluss von 1998 und nachfolgende Planänderungsbeschlüsse

ROSENHAGEN (2021): Modellbegleitung des Technischen Tests; Masterplan Ems, Fachgespräche Modellierungen; BAW Hamburg, Hamburg 03.05.2021

SCHOEL (2021): Erläuterung Algorithmus-Kategorisierung-Tidephasen; BfG Koblenz; Juli 2021

TÜV NORD (2021): Ermüdungsnachweis eines Hubtores des Sperrwerks Gandersum für die Betriebsweise Tidesteuerung; TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Auftrag des NLWKN; Hamburg 20.04.2021

WINTERWERP, J.C., VROMM, J., WANG, Z.B., KREBS, M., HENDRIKS, E.C.M., VAN MAREN, D.S., SCHROTTKE, K., BORGSMÜLLER, C AND SCHÖL, A., (2017): SPM response to tide and river flow in the hyper-turbid Ems River, Ocean Dynamics, Vol. 67(5), pp 559-583

WSA EMDEN (1997): Betriebsordnung für das Leda-Sperrwerk; Emden März 1997

ZANKE (2016): Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Sohlensicherung und Kolkbildung am Emssperrwerk bei Betriebsfällen zur Tidebeeinflussung; Zanke und Partner, Garbsen Januar 2016

9 Anlagen

ALRUTZ (2021a) bis ALRUTZ (2021c): Darstellung Tiefenprofile Schwebstoffgehalt, Sauerstoffgehalt und Salzgehalt; NLWKN Bst. Aurich, Juni 2021

KREBS (2021); Technischer Test 2020 – Ergebnisbericht des WSA Ems-Nordsee zum durchgeführten Monitoring; Emden Dezember 2021

MAUSHAKE (2021): Technischer Bericht zur flexiblen Tidesteuerung des Ems-Sperrwerks; Begleitende Messungen der BAW; Bericht-Nr. B3955.03.12.10234; BAW Hamburg, 23.02.2021

NPorts (2021): Testbetrieb Tidesteuerung – Monitoringbericht NPorts Emden; Emden
19.10.2021

OBERRECHT, D., P. BRUCKERT & R. VAN DER WEL (2021): Technischer Testbetrieb
zur flexiblen Tidesteuerung des Emssperrwerk - Begleitendes Längsprofil-Monitoring,
Untersuchungsbericht 01/2021; NLWKN-Forschungsstelle Küste; unveröffentlicht; Norden,
Juli 2021

ROSENHAGEN (2021): Modellbegleitung des Technischen Tests; Masterplan Ems,
Fachgespräche Modellierungen; BAW Hamburg, Hamburg 03.05.2021

SCHOEL (2021): Erläuterung Algorithmus-Kategorisierung-Tidephasen; BfG Koblenz; Juli
2021

TÜV NORD (2021): Ermüdungsnachweis eines Hubtores des Sperrwerks Gandersum für die
Betriebsweise Tidesteuerung; TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Auftrag des NLWKN;
Hamburg 20.04.2021

