

Z&P

Zanke & Partner

Prof. Dr.-Ing habil. Prof. h.c. U. Zanke
Ackerstraße 21,
30826 Garbsen
Tel. 05131 53269
Fax 05131 54743
mobil: 0172 5417028
email zanke@aol.com

Januar 2016

Gutachtliche Stellungnahme

zur Frage der

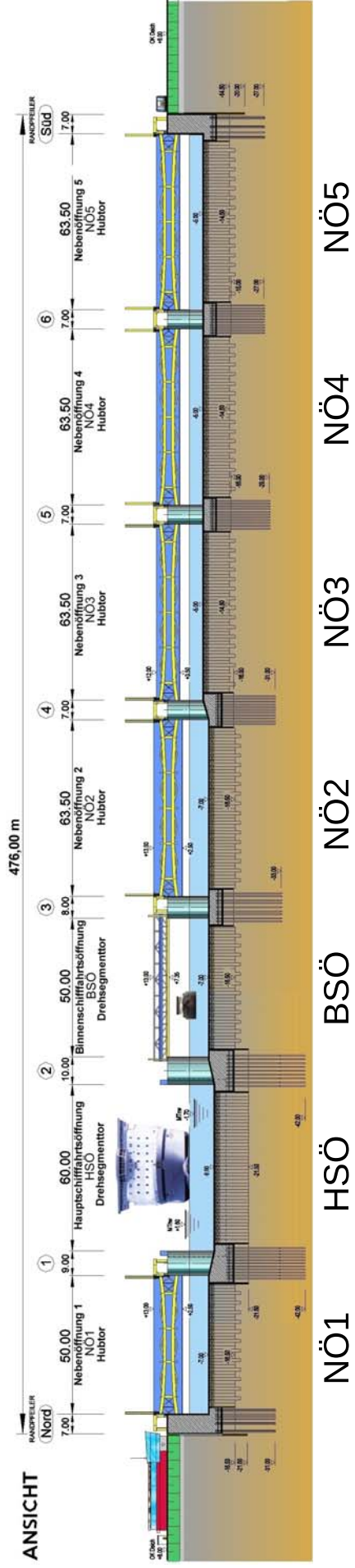
Sohlensicherung und Kolkbildung am Emssperrwerk

bei Betriebsfällen zur Tidebeeinflussung

im Auftrag des NLWKN Aurich

Ansicht des Emssperrwerks

mit Blickrichtung von See her



1. Veranlassung

Als Maßnahme zur Verbesserung der Schlicksituation in der Unterems wird eine entsprechend angepasste Betriebssteuerung des Sperrwerks in Betracht gezogen. Solche Maßnahmen zur Tidesteuerung ziehen erhöhte Strömungsbelastungen der Emssohle im Nahfeld des Emssperrwerks nach sich und können im Umfeld des Emssperrwerks zu Auskolkungen führen, die durch Kolkenschutzmaßnahmen zu beherrschen sind. Der Aufwand für einen Kolkenschutz steigt und fällt mit der Intensität und der absoluten Tiefe der Kolke.

Bezüglich des Kolkenschutzes ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

1. relativ kurz anhaltenden Belastungen der Sohle wie z.B. bei außergewöhnlichen Betriebsfällen bei Sturmflut und
2. mehr oder weniger ständigen Einwirkungen im Falle von Tidesteuerungen mit zeitweisem Anstau des Wassers bei jeder oder auch jeder zweiten Tide (Betriebssteuerung).

Im ersteren Falle sind wegen der relativ kurzen Einwirkzeit von nur einigen Stunden eher geringere, unkritische Kolkdimensionen zu erwarten. Daher reicht hier eine Bemessung der Kolkssicherung allein auf Grundlage der zu den verschiedenen Betriebsfällen berechneten Strömungsintensitäten aus.

Anders ist dies im Fall der Tidesteuerung. Hier liegt eine Dauerwirkung erhöhter Strömungsintensitäten vor. Im Fall einer langfristig betriebenen Tidesteuerung sind daher neben den bauwerksnahen Strömungen auch die Kolkentwicklungen und deren Lage ein wichtiger Bestandteil der Bemessung der Sohlensicherung. Mithin sind bei der langfristig auf die Sohle einwirkenden Tidesteuerung in weitaus größerem Maße als bei den Sturmflut-Betriebsfällen auch die jeweiligen, sich entwickelnden Kolke beim Kolkenschutz zu berücksichtigen.

Das Ziel dieses Gutachtens ist es, die grundsätzliche Machbarkeit einer dauerhaften Tidebeeinflussung am Emssperrwerk im Hinblick auf die Reaktion der Gewässersohle zu untersuchen. Dies betrifft die sich zwangsläufig entwickelnden Kolke bezüglich Tiefe, Ausdehnung und Lagestabilität. Weiterhin betrifft dies mit der Kolkbildung und dauerhaft geänderten Strömung einhergehende mögliche nachteilige Auflandungsvorhänge.

Diese Nahfeldeffekte sind zu unterscheiden von langfristigen Fernfeldeffekten im weiteren Verlauf der Ems, die Gegenstand anderer Gutachten sind. Die hier untersuchten Nahfeldeffekte betreffen gemäß der vorstehenden Strömungsuntersuchungen einen Abschnitt von etwa 2 bis 2,5 km Länge an der Binnenseite und rd. 300 m an der See-
seite des Sperrwerks.

Vor diesem Hintergrund wurde der Unterzeichner vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) - Betriebsstelle Aurich - mit Schreiben vom 01.04.2015 mit der Untersuchung der Kolkproblematik im Morphodynamisch-numerischen Modell beauftragt.

2 Aufgabe des Gutachtens

Auf der Grundlage mehrerer Gespräche zur Sache zwischen dem NLWKN und dem Unterzeichner umfassen die Aufgaben dieses Gutachtens folgende Punkte:

2.1 Ermittlung von maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Betriebszuständen der Tidesteuerung bei folgenden Varianten der Sperrwerkssteuerung (Voraussetzung: HSÖ immer offen)

- 1) HSÖ offen + BSÖ offen
- 2) HSÖ offen + NÖ1 offen
- 3) HSÖ offen+ NÖ2 offen
- 4) HSÖ offen + NÖ3 offen
- 5) HSÖ offen + NÖ4 offen
- 6) HSÖ offen + NÖ5 offen
- 7) HSÖ offen + BSÖ offen sowie NÖ1-NÖ3 teilgeöffnet

8) HSÖ offen + alle anderen Öffnungen teilgeöffnet

Dieser Teilschritt dient der Vorauswahl von Varianten, die sich zur weiteren Untersuchung der Kolkbildung im morphodynamischen Modell eignen. Hierzu waren die Ergebnisse der Strömungsmodellierungen hinsichtlich der sich einstellenden Strömungen bezüglich

1. Stärke,
2. Lagestabilität der Hauptströmungen und
3. erwartbarer Kolkintensität

zu beurteilen. Die in diesem Arbeitsschritt gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Definition der anschließenden Modellierungen mit beweglicher Sohle (morphodynamische Modellierungen).

2.2 Morphodynamische Kolkuntersuchungen mit beweglicher, erodierbarer Sohle

Mit den Erkenntnissen aus den Strömungsmodellierungen lassen sich Varianten als voraussichtlich sowohl für die Tidesteuerung als auch bezüglich Kolken günstig oder auch weniger günstig einstufen.

Anschließend wird die als am günstigsten eingeschätzte Variante auf ihre Eigenschaften hinsichtlich der Kolkbildung im morphodynamischen Modell, also mit beweglicher Sohle unter Rückkopplung zwischen Strömung und Sedimentverlagerung, modelliert. Je nach den aus dieser Modellierung gewonnenen Erkenntnissen werden weitere Varianten entwickelt und die zugehörigen Kolkbildungen näher untersucht.

3 Grundlagen des Modellbetriebs

3.1 Modellgebiet

Für die Untersuchungen wurde ein Modell der Nordsee mit integrierter Ems genutzt. Der eigentliche Untersuchungsbereich des Emssperrwerks ist in hoher räumlicher Auflösung eingebettet. Der Abstand der Rechenpunkte betrug auf einer Länge von ca. 1 km beidseitig des Sperrwerks im Modell 7,5 m. Auf Abb. 1 ist das gesamte Modellgebiet zu sehen. Die roten und blauen Pfeile an den offenen Rändern des Modells stehen für die ein- und austretenden Flut- und Ebbeströmungen. Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt aus Abb. 1 mit dem näheren Untersuchungsgebiet. Die Abbildungen 3, 4 und 5 zeigen weitere Details.

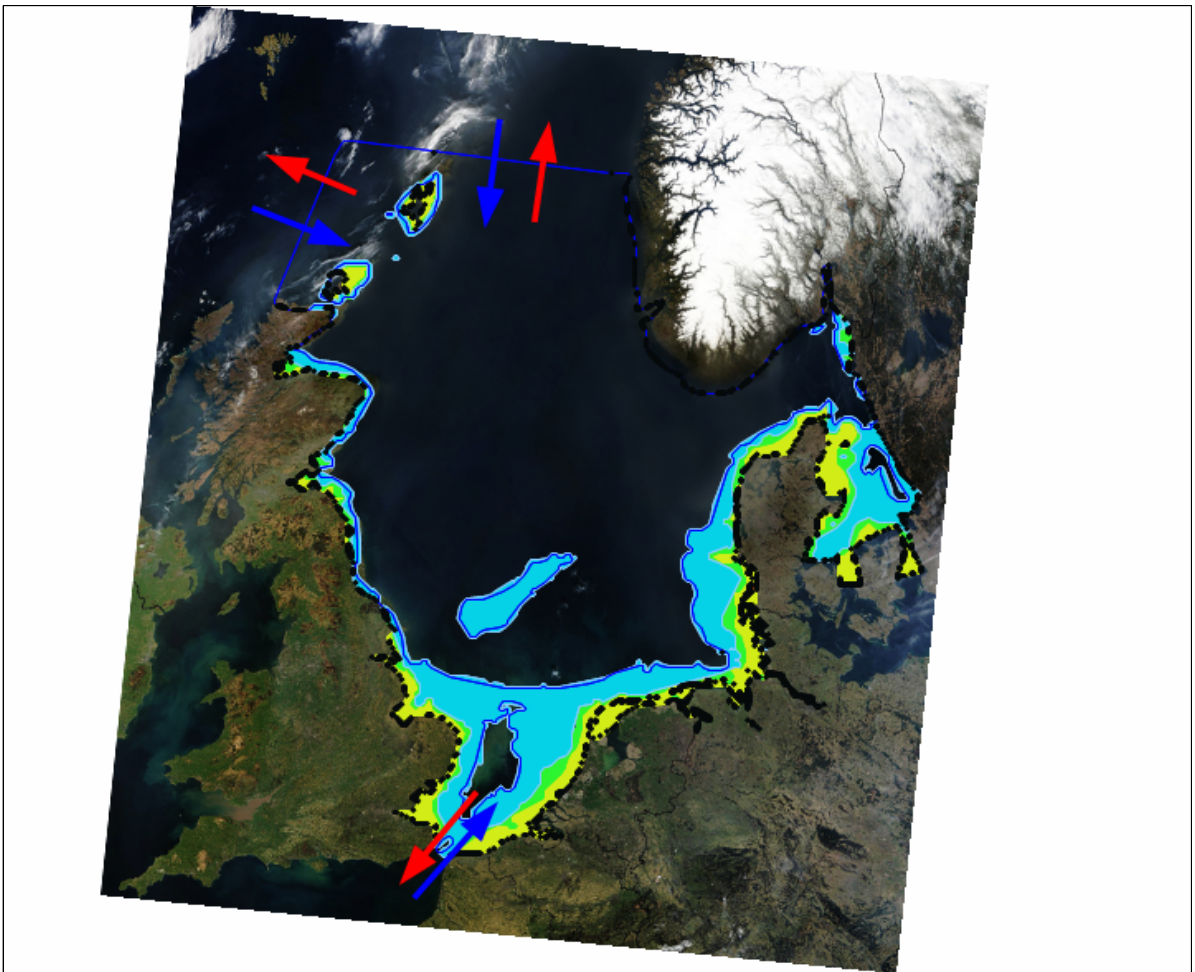


Abb. 1: Gesamtmodellgebiet

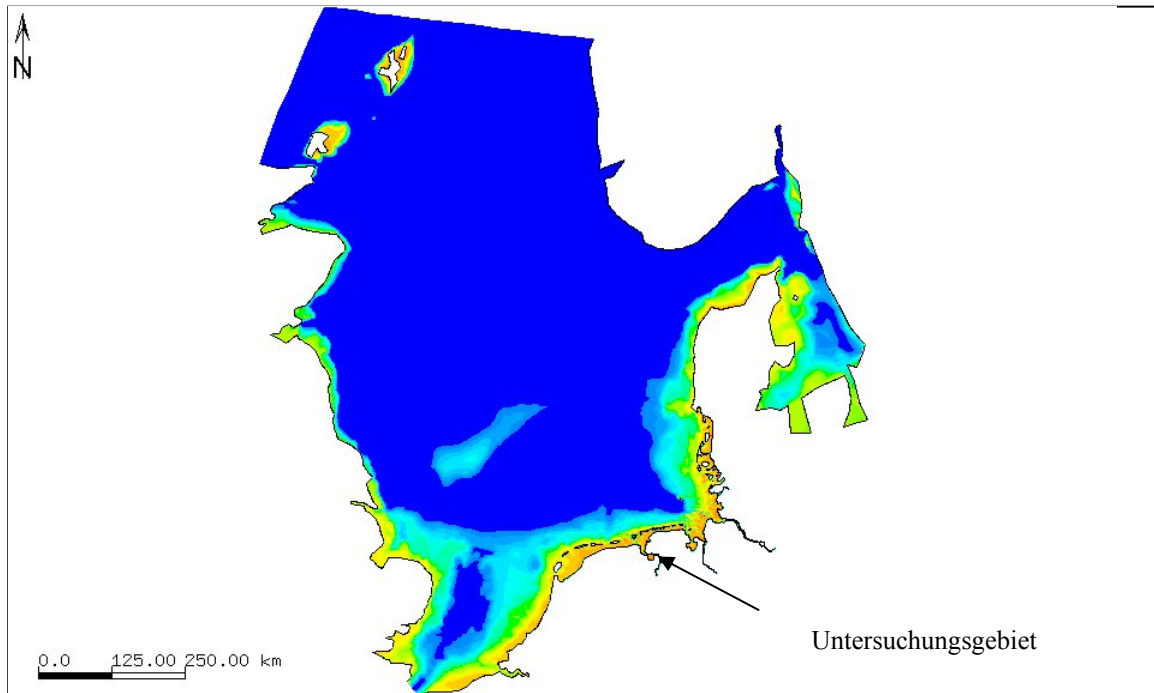


Abb. 2: Gesamtmodellgebiet mit Lage des näheren Untersuchungsgebietes

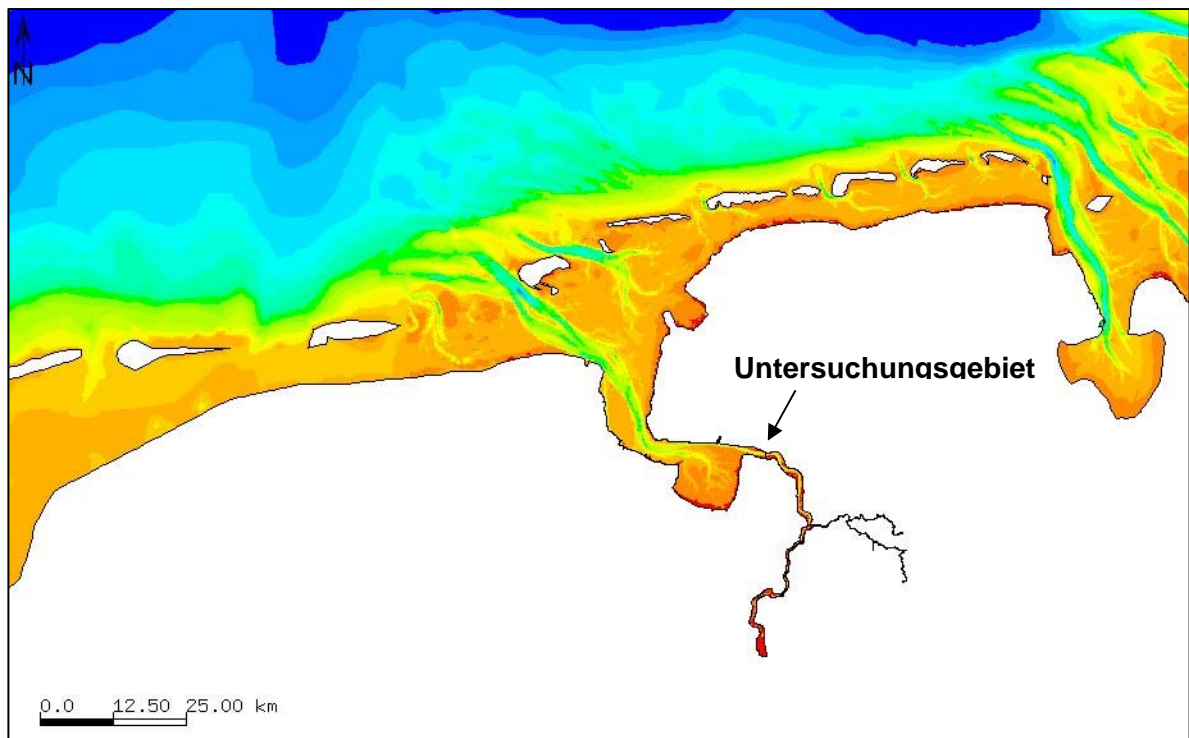


Abb. 3: Ausschnitt aus dem Gesamtmodellgebiet mit Lage des näheren Untersuchungsgebietes, Ausschnitt aus Abb. 2

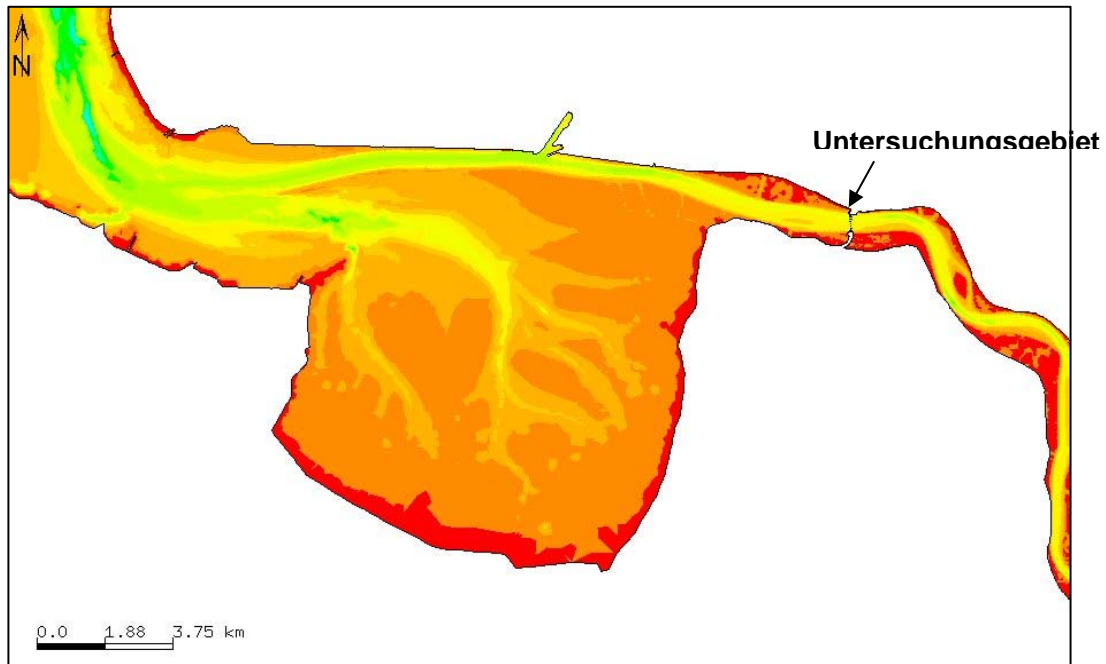


Abb. 4: Ausschnitt aus Abb. 3

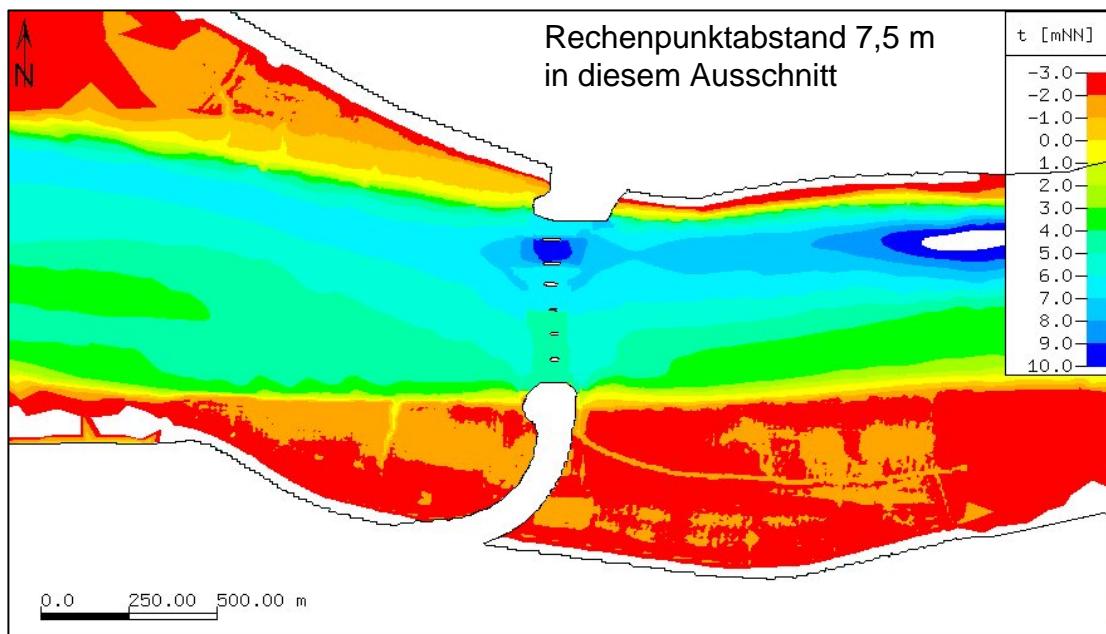


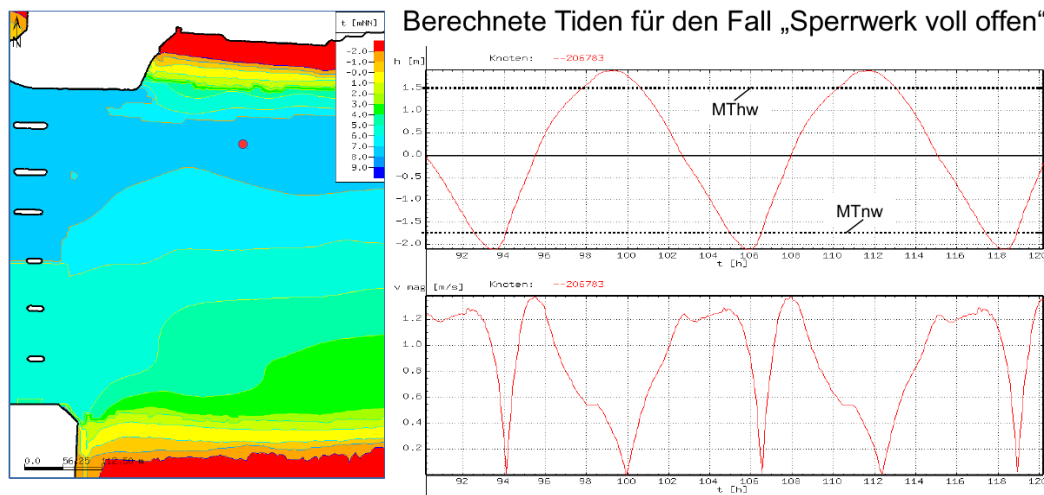
Abb. 5: Ausschnitt aus Abb. 4

3.2. Zugrunde gelegte Tideverhältnisse und deren Verifikation

In der Natur haben Tidehub und Strömungsgeschwindigkeiten eine Variationsbreite im Spring-Nippzyklus. Stärkste Strömungen und mithin auch die maßgebenden Kolkin-

tensitäten treten bei Springtiden auf. Als Grundlage der Modellierungen wurde daher eine Springtide in Ansatz gebracht, deren Tidehub, exemplarisch um rd. 20% gegenüber den mittleren Tiden erhöht ist (Abb. 6).

Der Oberwasserzufluss wurde mit $20 \text{ m}^3/\text{s}$ in Ansatz gebracht.



**Ab
b.
6:** Modelltide an der im linken Teil bild durch

ch einen roten Kreis markierten Position. Gestrichelt mit eingetragen sind MThw und Mtnw.

Eine entsprechende Steuerung der Wasserstände an den offenen Rändern des Nordseemodells ergab für den Nahbereich des Emssperrwerks eine Modelltide mit folgenden Kenndaten:

$$Thw = + 1,9 \text{ m NN}, Tnw = - 2,1 \text{ m NN}, Thb = 4 \text{ m}.$$

Die zugehörigen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten betragen im Modell (SPW offen):

$$\begin{array}{ll} \text{Ebbestrom} & \text{Flutstrom} \\ v_{e,\max} = \text{rd. } 1,25 \text{ m/s} & v_{f,\max} = \text{rd. } 1,4 \text{ m/s} \quad (\text{tiefengemittelt}) \end{array}$$

Diese Kennwerte lassen sich anhand anderer Modellierungen des Untersuchungsraums bezüglich ihrer Wirkintensität einordnen. So wurden in [2], s. dort Bilder 67 und 68, Geschwindigkeiten am Sperrwerk für einen Spring-Nippzyklus berechnet, der in [2] als charakteristischer Systemzustand beschrieben wird:

$$v_{e,\max} = \text{rd. } 1,1 \text{ m/s} \quad v_{f,\max} = \text{rd. } 1,3 \text{ m/s} \quad (\text{tiefengemittelt})$$

Mithin liegen die hier zugrunde gelegten Strömungsbelastungen höher und kennzeichnen einen besonders starken Belastungszustand der Sohle bezüglich der Kolkungswirkungen.

Das bestätigt weiterhin eine Vergleichsrechnung auf der Grundlage der erhöhten Springtide ($T_{hb} = \text{rd. } 4\text{m}$) mit gemessenen Werten am Sperrwerk in einem hydraulischen Modell bei erhöhter Normaltide ($T_{hb} = \text{rd. } 3,75\text{ m}$) [4]. In [4] wurden für einen Betriebszustand, bei dem außer der HSÖ nur die BSÖ und die NÖ5 offen waren ermittelt:

$$v_{f,\max} = \text{rd. } 3,45 \text{ m/s} \quad (\text{in der Fahrrinne, an der Wasseroberfläche}).$$

In einer eigens für diesen Vergleich zusätzlich durchgeführten Strömungsmodellierung im hier eingesetzten numerischen Modell ergaben sich für die Modelltide

$$v_{f,\max} = \text{rd. } 3,5 \text{ m/s} \quad (\text{Fahrrinne, tiefengemittelt})$$

Da die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten i.d.R. um 10% bis 20% geringer sind als die Geschwindigkeiten an der Oberfläche, entspricht dies im numerischen Modell einer maximalen Flutstromgeschwindigkeit von $v_{f,\max} = \text{rd. } 4 \text{ m/s}$. Damit belegt auch dieser Vergleich, dass die in Ansatz gebrachte Modelltide für die Kolkuntersuchungen die Anforderungen an vergleichsweise kolkintensive Strömungsverhältnisse erfüllt. Mit anderen Worten: unter durchschnittlichen Tideverhältnissen sind schwächere Kolkwirkungen zu erwarten.

Eine Überprüfung der Naturähnlichkeit von Richtung und Verlauf der berechneten Strömungen kann mit einem Vergleich von in der Natur gemessenen und im Modell berechneten Strömungen durchgeführt werden. Für diesen Vergleich waren die Ergebnisse von Strömungsmessungen aus dem Jahr 2009 verfügbar (Abb. 7, rechtes Teilbild). Auf der Abbildung sind für die gleiche grundsätzliche Strömungssituation (nur HSÖ und BSÖ geöffnet) berechnete Strömungen (links) und in der Natur gemessene Strömungen (rechts) zu sehen. Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Strömungsrichtungen und -verläufen.

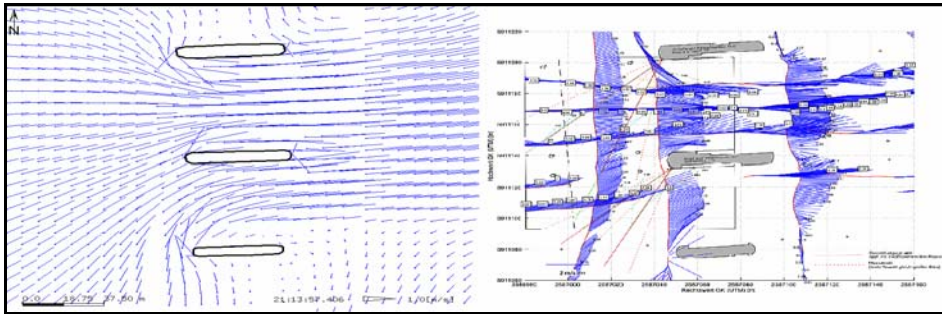


Abb. 7: Strömungsrichtungen gemäß Messung Franzius-Institut [4] Sept. 2009 (rechts) und Strömungsrichtungen im Modell (links)

3.3 Steuerung des Ems-Sperrwerks

Das Ems-Sperrwerk wurde im Modell durch je einen Pegel im Oberwasser und im Unterwasser nach den zu den einzelnen Betriebsfällen vorgegebenen Kriterien gesteuert. Vorgaben seitens des AG waren:

<u>Schließen (= Beginn der Betriebssteuerung):</u>	so, dass Schließvorgang zur Stromkenterung beendet ist.
<u>Dauer Schließvorgang:</u>	ca. 15 Minuten
<u>Dauer SPW geschlossen:</u>	3½ Stunden
<u>Öffnungsvorgang (= Ende der Betriebssteuerung):</u>	ca. 20 Minuten

"Die Hauptschifffahrtsöffnung (HSÖ) wurde vom Auftraggeber für die Modelluntersuchungen mit Rücksicht auf die Schifffahrt zunächst als stets geöffnet vorgegeben."

4. Maximale Strömungsgeschwindigkeiten bei den zu untersuchenden Betriebsfällen

4.1 Vorbemerkung

Nachfolgend werden die berechneten, maximalen Geschwindigkeiten für die zu untersuchenden Betriebsfälle grafisch dargestellt.

Zum besseren Verständnis soll hier eingangs festgehalten werden, dass die maximalen Geschwindigkeiten nicht an jedem Ort zur gleichen Zeit auftreten. Das Geschwindigkeitsmaximum in den offen bleibenden Öffnungen tritt erst mehrere Stunden nach dem Schließen auf. Im Fall, dass eines oder mehrere Sperrwerkstore offen bleiben und die anderen Öffnungen geschlossen werden, treten bei letzteren während des Wiederöffnens maximale Geschwindigkeiten auf. Dies ist im Abbau des Aufstaus begründet. Daher wurde die Auswertung so angelegt, dass für jeden Rechenpunkt des Modellgebietes die dort im Verlauf der Tide aufgetretene Maximalgeschwindigkeit ermittelt wurde. Mit anderen Worten, die auf den folgenden Abbildungen dargestellten maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bilden nicht einen Zeitpunkt, sondern zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den jeweiligen Orten innerhalb der rd. 3½ -stündigen Dauer der Teilspernung aufgetretene Maximalwerte ab.

Zum qualitativen Vergleich der nachfolgend beschriebenen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der untersuchten Betriebsfälle gegenüber dem Fall „ohne Tidebeeinflussung“ dient Abb. 8. Sie weist für den Nahbereich des Sperrwerks Geschwindigkeiten im Bereich 1 m/s bis 1,5 m/s aus (hellblaue Skalenfarbe).

Allgemeine Anmerkung zu den grafischen Darstellungen:

- Bei flächenhaften Darstellungen wurden die Skalen so gewählt, dass eine möglichst gute Erkennbarkeit der dargestellten Gegebenheiten erreicht wird. Dadurch kann es zu Über- oder Unterschreitungen der Skalenendwerte kommen. Diese sind durch weiße Flächen in roten Flächen (bei Überschreitung) und in blauen Flächen (bei Unterschreitung) gekennzeichnet. Ein Beispiel sieht man auf den Abb. 11 und 12. In den weißen Flächen in den roten Zonen wurden Geschwindigkeiten von mehr als dem Skalenende berechnet, das hier bei 4 m/s liegt.

- Das mathematische Koordinatensystem der Modellierungssoftware weist bei den Tiefen positiv von NN nach unten und erfasst über NN liegende Orte mit negativen Werten. Entsprechend sind die Tiefenangaben zu lesen (z.B. auf Abb. 5).

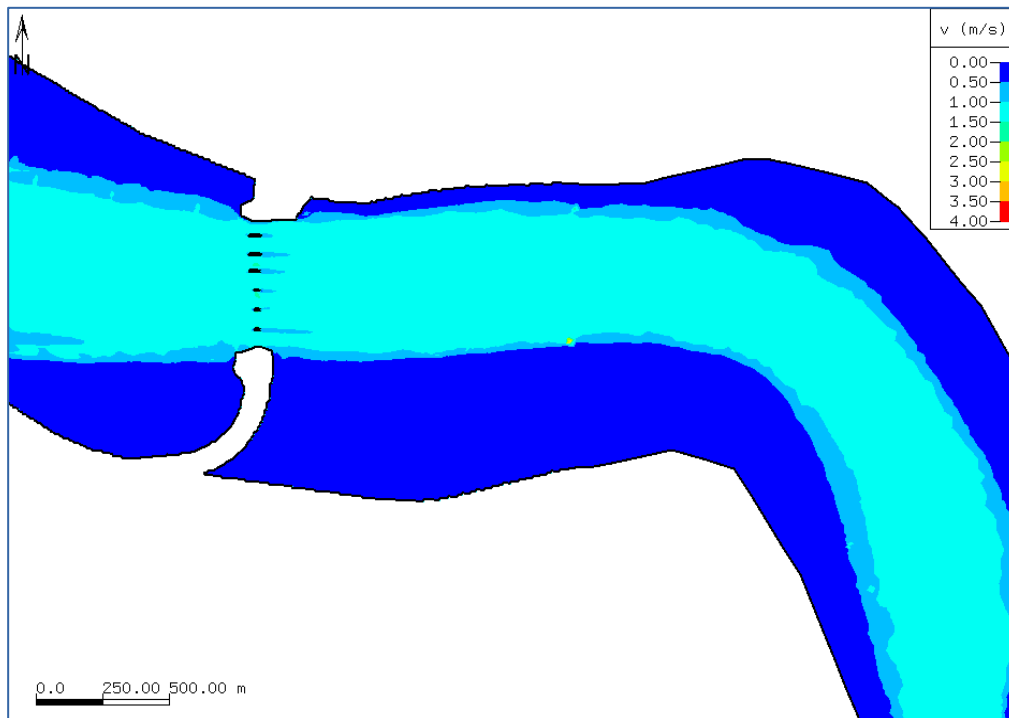


Abb. 8: Maximal während der Tide aufgetretene Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „ohne Tidebeeinflussung“

4.2 Ergebnisse für die einzelnen Betriebsfälle

4.2.1 Variante 1 HSÖ offen + NÖ1 offen

Bei der Variante 1 bildete sich im Strömungsschatten der geschlossenen Tore zeitweise eine große Strömungswalze aus, die von der starken Strömung durch NÖ1 und HSÖ angetrieben wird (Momentanzustand auf Abb. 9). Infolge dessen bleibt die Hauptströmung über rd. 500 m zunächst am nördlichen Ufer um dann zum südlichen Ufer mit Richtung auf die Innenkurve des Emsbogens bei Oldersum zu schwenken. Ausserdem erzeugt die Rückströmung der großen Walze am Südufer in einer Zone zwischen rd. 250 m und 750 m vom Sperrwerk entfernt, erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten. Diese liegen dort bei 2 m/s bis 2,5 m/s.

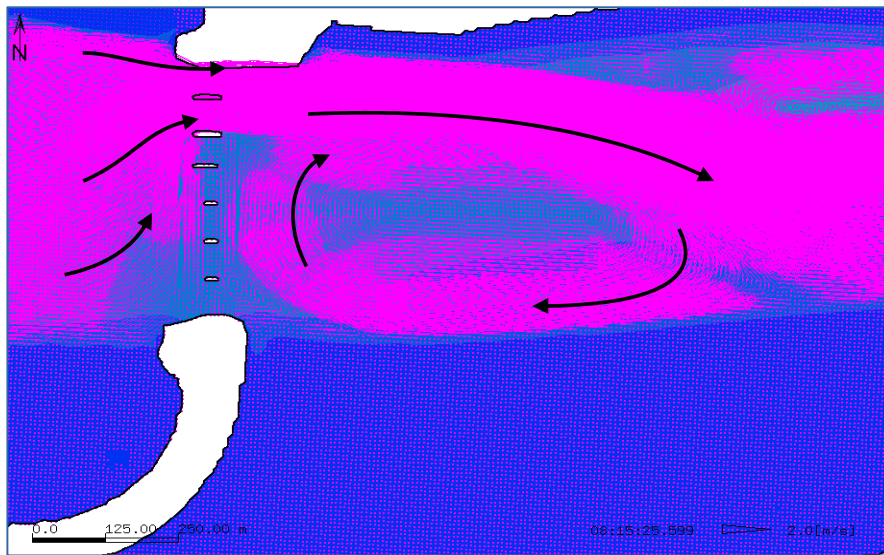


Abb. 9: Zeitweise auftretende Walzenströmung

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bei diesem Betriebsfall sind auf Abb. 10 weiträumig und auf Abb. 11 für den Nahbereich dargestellt. Maximalwerte von $v > 4$ m/s treten in und kurz hinter der offenen HSÖ und NÖ1 auf. Diese sind erkennbar an den weißen Bereichen innerhalb der roten Zone, die für Geschwindigkeiten zwischen $v = 3,5$ m/s und 4 m/s steht (vgl. hierzu die Legende rechts oben in der Abbildung). Diese Zone erstreckt sich bis ca. 500 m hinter den Öffnungen. Etwa im Kurvenscheitel der Ems, rd. 2 km vom Sperrwerk entfernt, haben sich die Strömungsgeschwindigkeiten nahezu auf den Wert ermäßigt, der bei voll offenem Sperrwerk aufgetreten wäre (vgl. mit Abb. 8 die hellblauen Bereiche). Weiter ist im Vergleich zu Abb. 8 zu bemerken, dass die Strömungsgeschwindigkeiten seeseitig des Sperrwerks abgenommen haben. Diese Abnahme belegt die gewünschte Drosselungswirkung der Tidesteuerung.

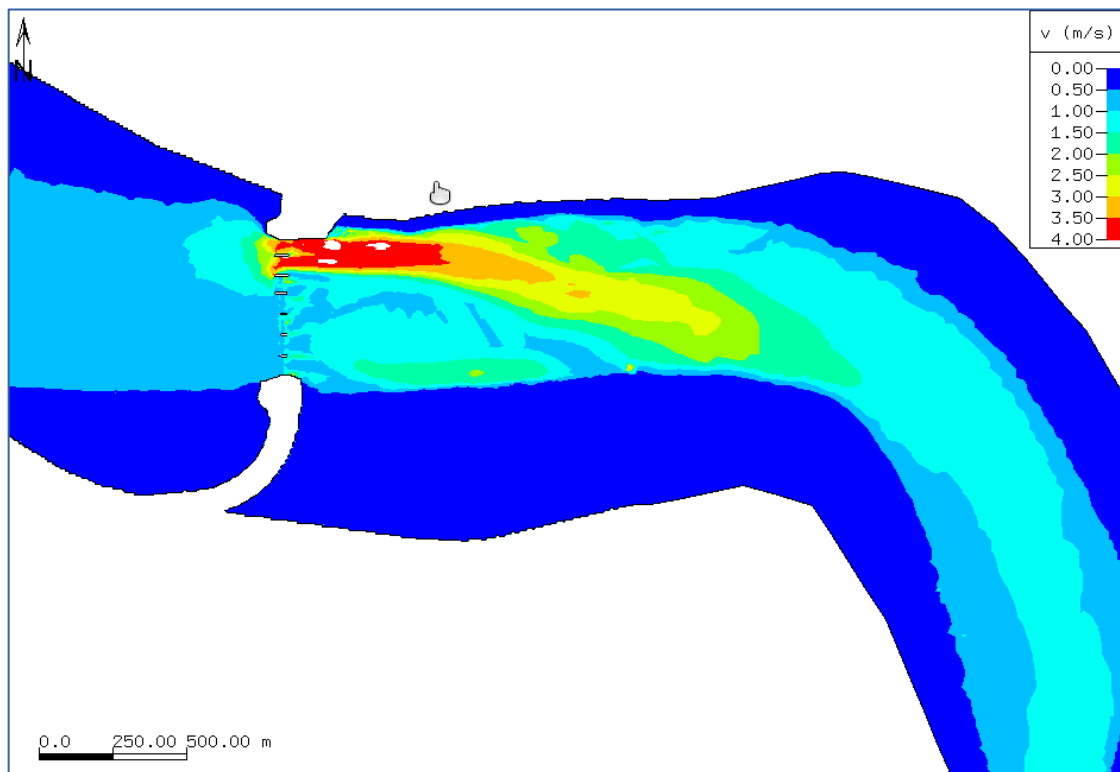


Abb. 10: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ1 offen“

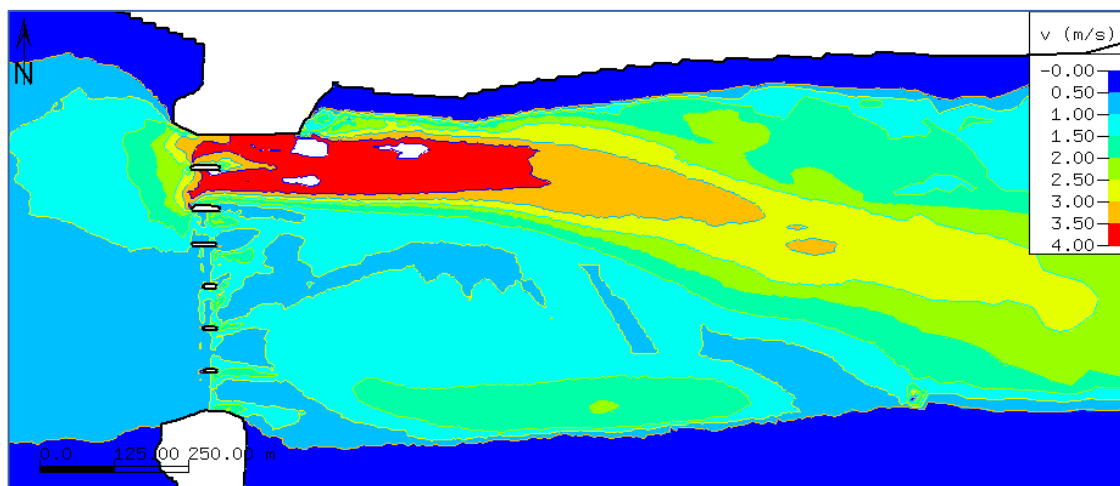


Abb. 11: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ1 offen“ (Ausschnitt aus Abb. 10)

4.2.2 Variante 2 HSÖ offen + BSÖ offen

Im Fall der Variante 2 sind HSÖ und BSÖ geöffnet. Die maximal auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten sind bei dieser Konfiguration, abgesehen von der unmittelbaren Nähe zum Sperrwerk, etwas geringer als im Fall der Variante 1, wie man aus dem Vergleich der Abb. 12 und 13 mit den Abb. 10 und 11 erkennt. Im Strömungsschatten der geschlossenen Tore dreht sich bei Variante 2 ebenfalls zeitweise eine große Strömungswalze, die, wie in Variante 1, eine Erosionsbelastung des südlichen Ufers mit sich bringt. Zusammen mit der Schräganströmung der BSÖ (vgl. hierzu auch Abb. 7) bewirkt die Walzenströmung eine leichte Verschwenkung der Hauptströmung gegen das nördliche Ufer um dann im weiteren Verlauf ebenfalls, wie bei Variante 1, in Richtung Innenkurve zu verschwenken.

Die Größenordnung der Geschwindigkeiten und Breitenausdehnung des austretenden Strahls ist jedoch gegenüber der Variante 1 etwas vermindert, was vor allem an der ungünstigen Schräganströmung der BSÖ von Süden her liegt. Abb. 7 verdeutlicht diese ungünstige Anströmung mit Messergebnissen aus der Natur sowie mit Ergebnissen der Modellierung. Man beachte auf dieser Abbildung den großen, keinen Abfluss leistenden Strömungsschatten, am südlichen Pfeiler der BSÖ.

Wie auch bei Variante 1 treten am südlichen Ufer im Bereich der Walze Geschwindigkeiten von mehr als 2 m/s auf.

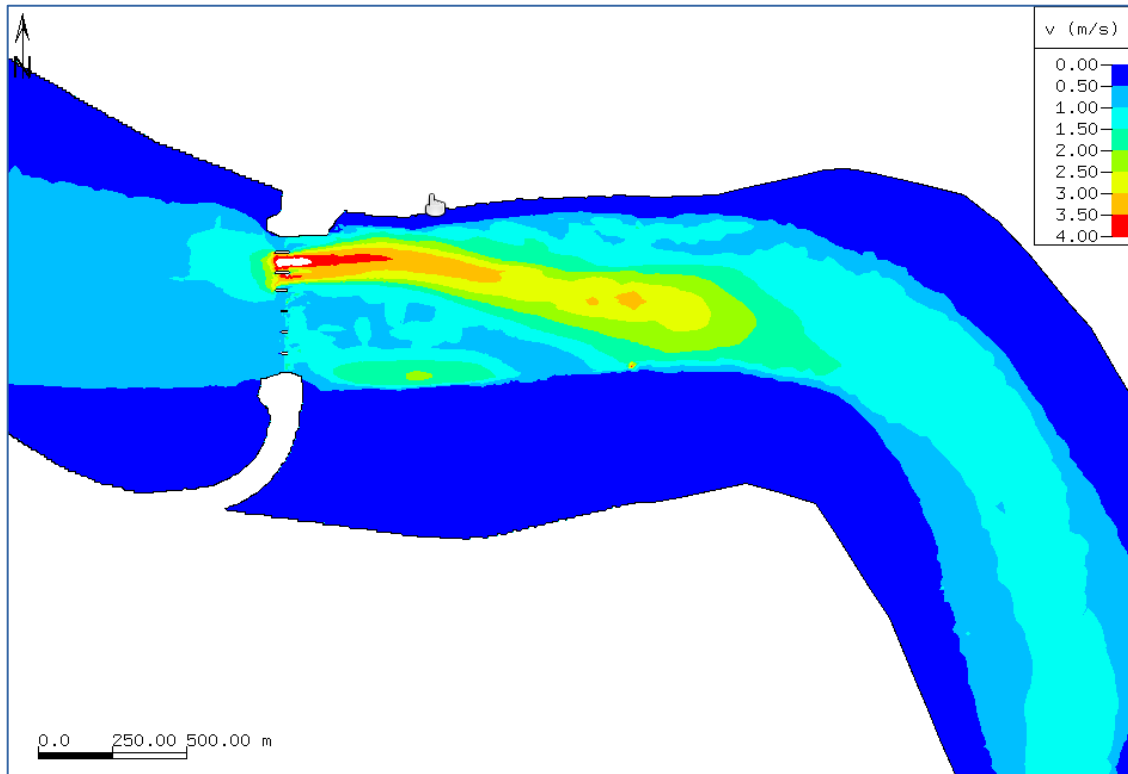


Abb. 12: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und BSÖ offen“

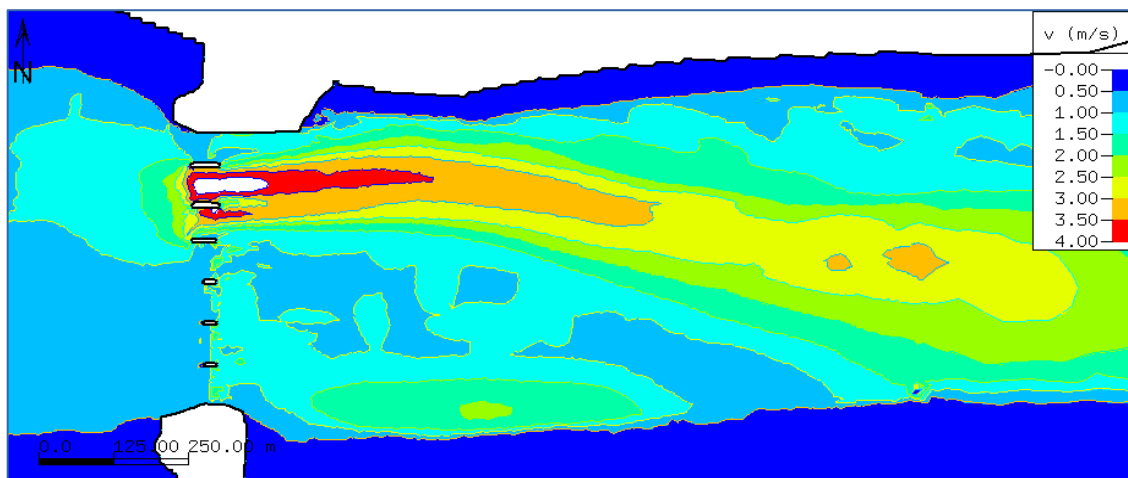


Abb. 13: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und BSÖ offen“ (Ausschnitt aus Abb. 12)

4.2.3 Variante 3

HSÖ offen und NÖ2 offen

Bei alleiniger Öffnung von HSÖ und NÖ2 sind die Strömungsgeschwindigkeiten gegenüber den beiden vorstehend beschriebenen Fällen deutlich ermäßigt. Abb. 14 und 15 weisen als Ergebnis der Berechnung maximale Geschwindigkeiten von mehr als 3,5 m/s (rote Flächen) aus, die sich nur etwa halb so weit ausdehnen wie in Variante 2 und nur etwa 1/3 wie in Variante 1.

Die Strömung durch die NÖ2 verschwenkt nach Passieren der Öffnung leicht nach Norden und tendiert zu einer Vereinigung mit den Durchflüssen aus der HSÖ. Im weiteren Verlauf ergibt sich auch bei dieser Variante eine Walzenströmung im Schatten der geschlossenen NÖ3 bis NÖ5, ähnlich jener auf Abb. 9. Wie auch bei den Varianten 1 und 2 erkennt man als Folge dieser Walze lokal erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten am Südufer und eine Verschwenkung der Hauptströmung in Richtung Innenkurve der Ems.

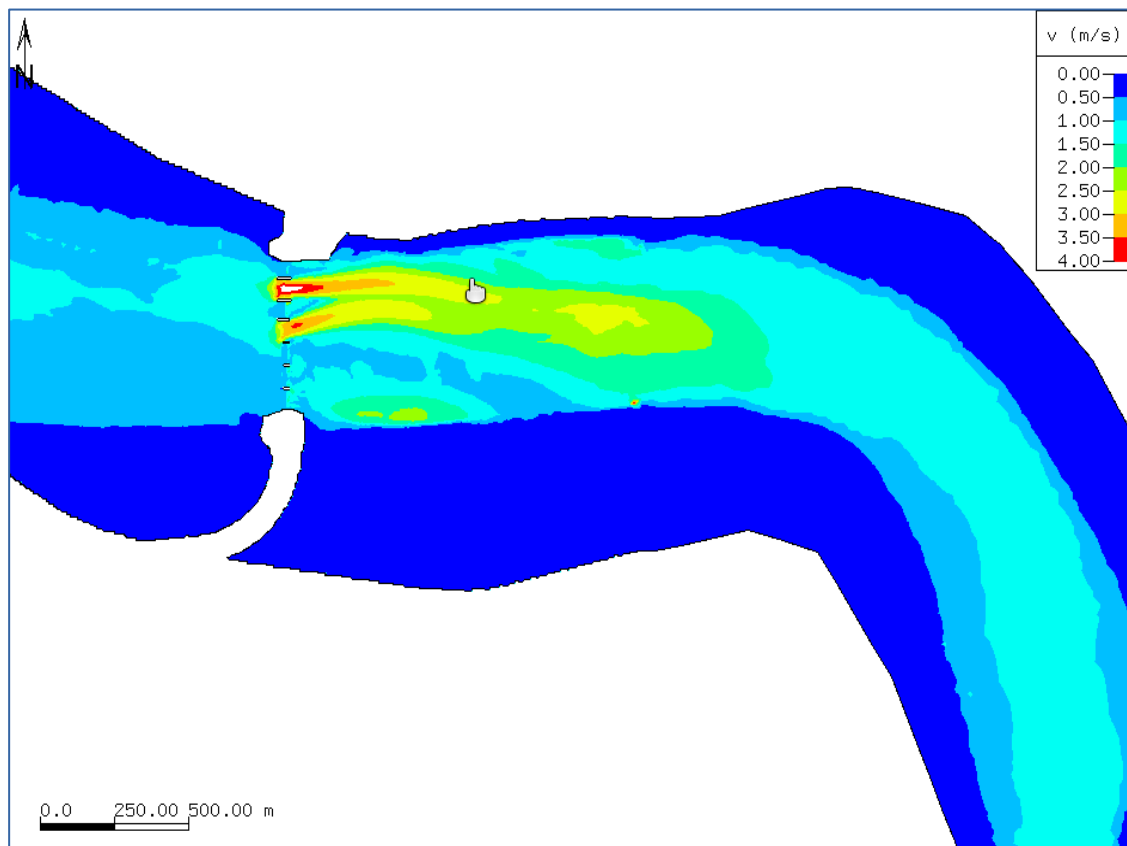


Abb. 14: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ2 offen“

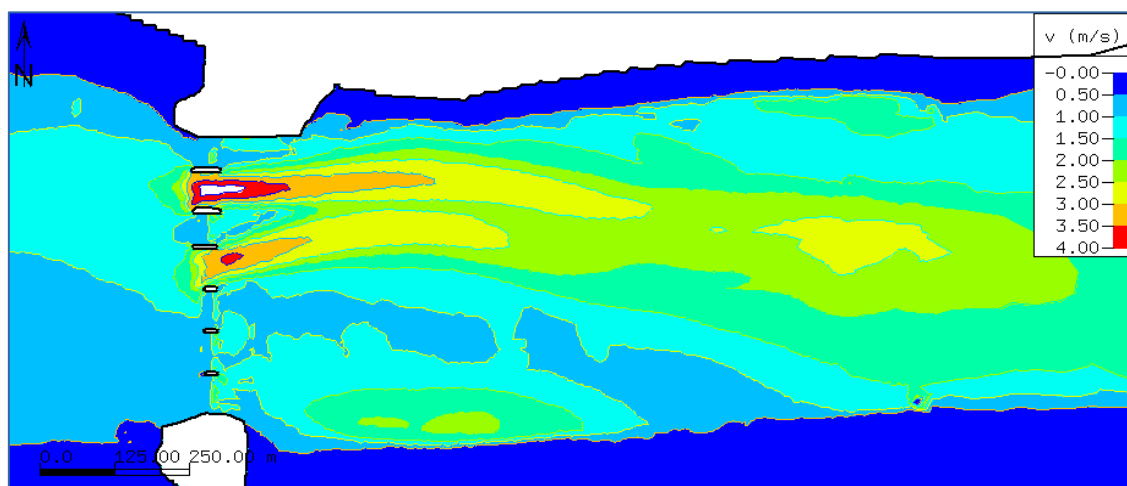


Abb. 15: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ2 offen“
(Ausschnitt aus Abb. 14)

4.2.4 Variante 4

HSÖ offen und NÖ3 offen

Die maximal aufgetretenen Strömungsgeschwindigkeiten im Betriebssteuerungsfall "HSÖ und NÖ3 geöffnet" ist auf den Abbildungen 16 und 17 zu sehen. Ein Vergleich mit Abb. 14 und 15 (HSÖ und NÖ2 offen, Variante 3) zeigt höhere maximale Strömungen bei Variante 4 und begründet sich in geringerer Schräganströmung im Vergleich mit den vorstehenden Varianten. Dies ist erkennbar am zur Emsachse zunächst weitgehend parallelen Abstrom aus der NÖ3, der z.B. bei Variante 3 für die dort betriebene NÖ2 nicht gegeben ist.

Im weiteren Verlauf des Abstroms verschwenkt die schwächere Strömung aus NÖ3 zur stärkeren Strömung aus der HSÖ. Im weiteren Verlauf ist eine Verschwenkung der vereinigten Strömung in Richtung Innenkurve der Ems zu erkennen.

Auch bei der Variante 4 tritt eine Walzenströmung südlich der Hauptdurchflüsse auf, wiederum erkennbar an den erhöhten Geschwindigkeiten am südlichen Ufer. Anders als bei Variante 3 wird der Abstrom aus der HSÖ hier leicht nach Süden verschwenkt. Eine Auswirkung davon ist eine gegen den Uhrzeigersinn drehende, zeitweise Strömungswalze zwischen dem Stahl aus der HSÖ und dem Nordufer. Dies ist erkennbar an der erhöhten Geschwindigkeit am Nordufer, gleich binnenseitig des Betriebsgeländes. Ähnliche Verhältnisse treten bei Variante 5 auf, erkennbar am mittleren Bild von Abb. 20.

Im Zwischenraum zwischen den beiden Durchströmungen der HSÖ und NÖ3 bilden sich pulsierend Walzenströmungen aus mit der Folge, dass die beiden Hauptströmungen etwas hin und her pendeln. Die Verhältnisse sind grundsätzlich ähnlich wie in der nachfolgend beschriebenen Variante 5, wo Abbildung 20 dies anhand einer Bildabfolge erläutert.

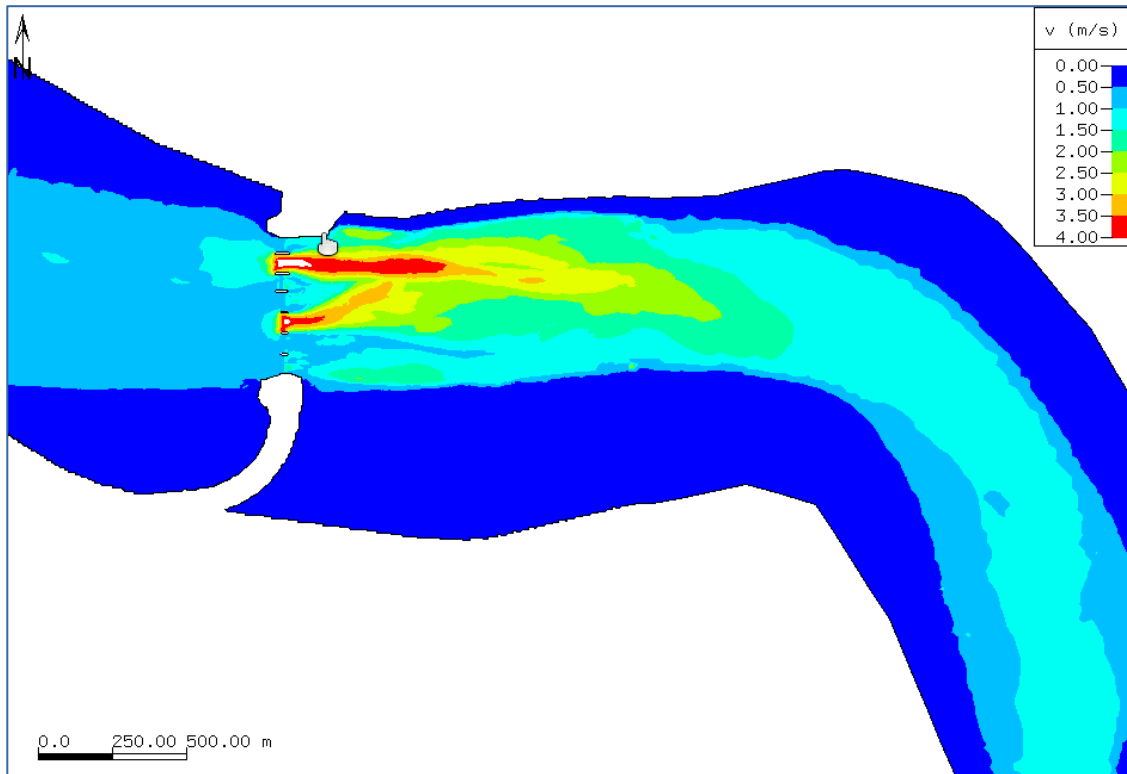


Abb. 16: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ3 offen“

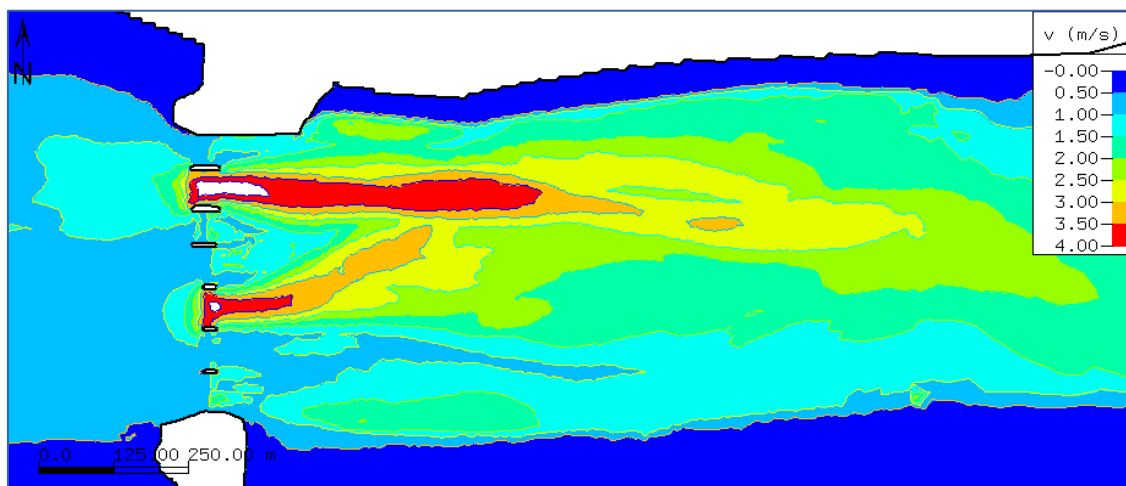


Abb. 17: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ3 offen“
(Ausschnitt aus Abb. 16)

4.2.5 Variante 5

HSÖ offen und NÖ4 offen

Die Strömungen bei Variante 5 befinden sich in einem Übergangszustand zwischen Stromvereinigung und getrenntem Strömen der beiden austretenden Strahlströmungen. Die Strömungsrichtung, insbesondere des Ausstroms aus NÖ4 ist sehr indifferent. Wie schon bei Variante 4 besteht auch hier eine deutliche Tendenz zur Vereinigung der beiden Strahlströmungen. Ebenfalls hier verläuft der impulsreichere Strahl aus der HSÖ stabiler, während der Strahl aus NÖ4 zeitweise nach Nordost schwenkt, aber zu anderer Zeit auch eher geradeaus verläuft. Man erkennt das an der Auffächerung der Zonen erhöhter Geschwindigkeit und der gelben „Brücke“ zum Strahl aus der HSÖ hin (vgl. Abb. 18 und 19) sowie an den Maximalgeschwindigkeiten weiter in Strömungsrichtung. Die Tendenz, zu einer Vereinigung ist aber schwächer als bei Variante 4, was an der größeren Entfernung der beiden Strahlen liegt.

Die drei Momentaufnahmen auf Abb. 20 verdeutlichen das unruhige Strömungsverhalten anhand der wechselhaften Momentanströmungsbilder.

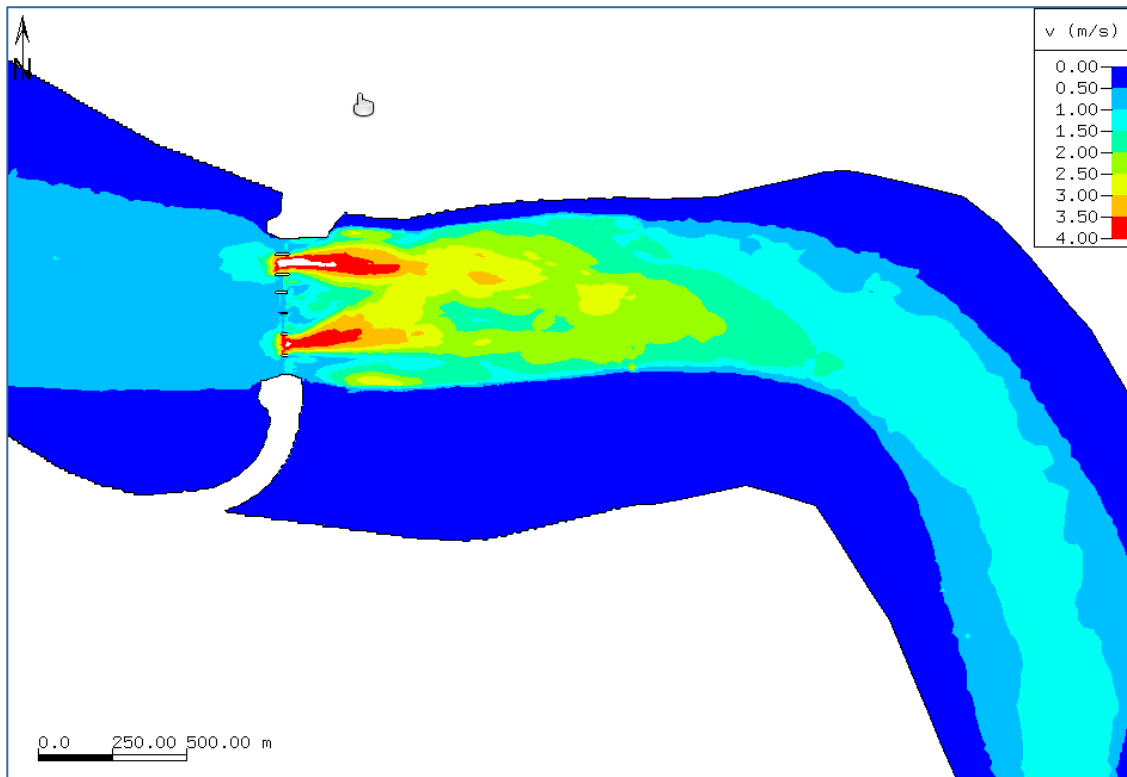


Abb. 18: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ4 offen“

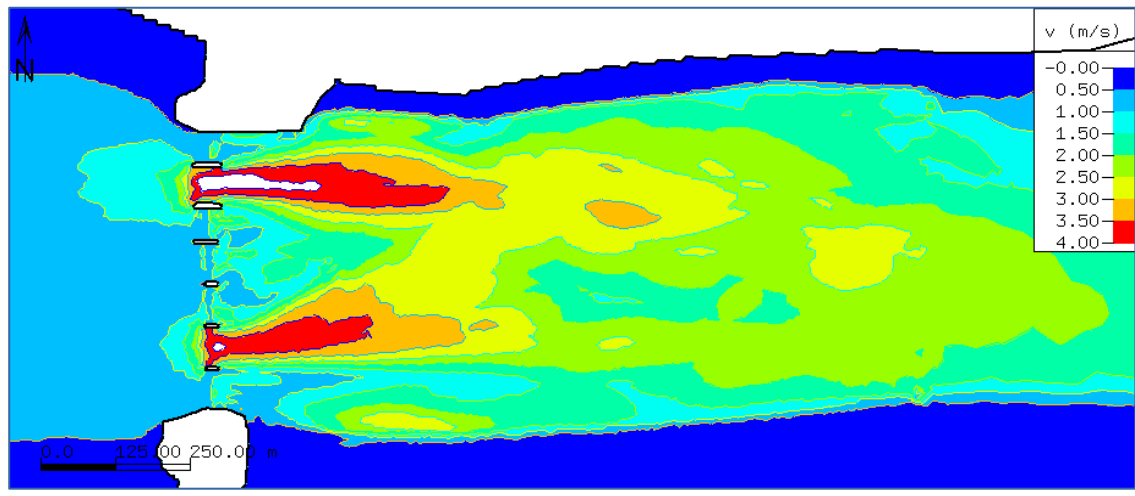


Abb. 19: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ4 offen“ (Ausschnitt aus Abb. 18)

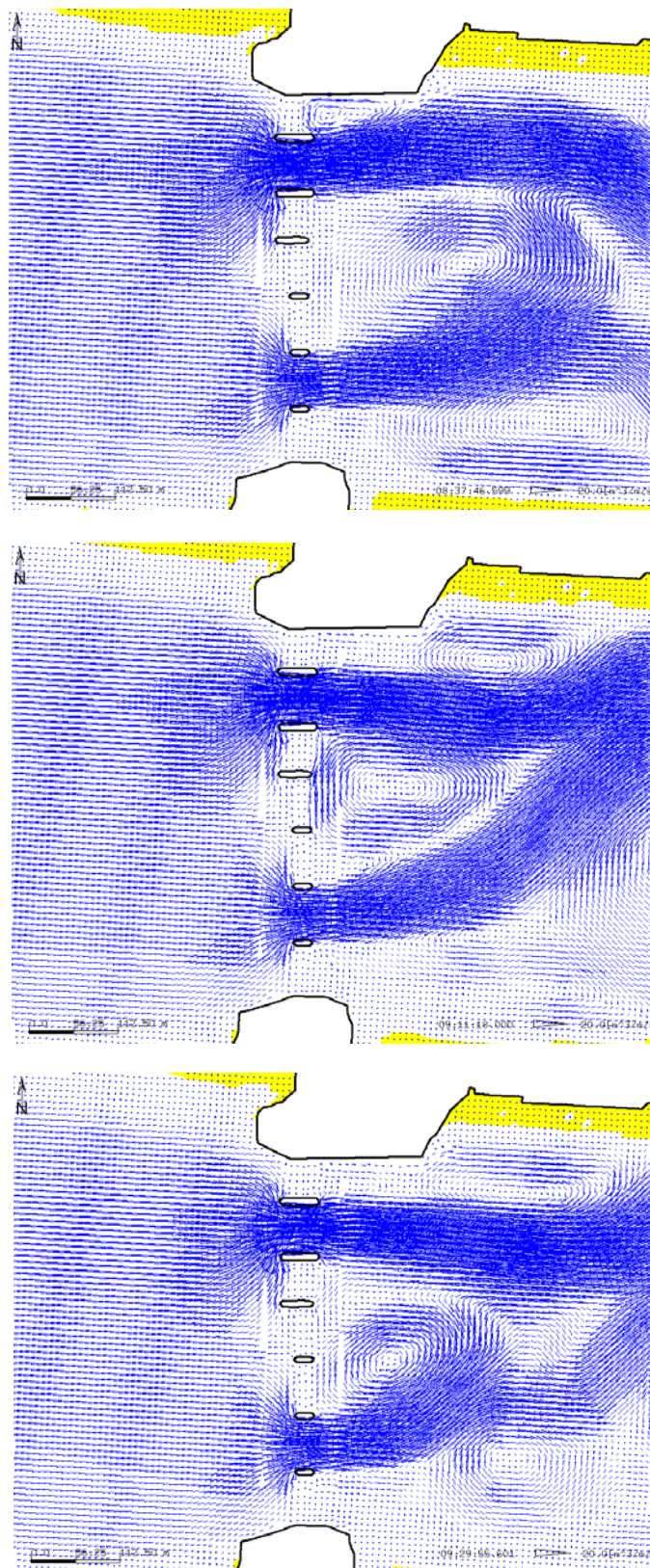


Abb. 20: Beispiele für momentane, wechselhafte Strömungszustände der Durchströmung von HSÖ und NÖ4, beginnend rd. $\frac{3}{4}$ Stunden nach Schließen und andauernd bis zum Ende der Betriebssteuerungsphase.

4.2.6 Variante 6

HSÖ offen und NÖ5 offen

In der Konfiguration von Variante 6 sind die beiden, aus den Toren austretenden Strahlen soweit voneinander entfernt (Abb. 21 und 22), dass keine Tendenz zu einer Vereinigung infolge des Bernoulli-Effekts¹ mehr erkennbar ist. Vielmehr verlaufen die beiden Strahlen relativ lagestabil. Der Strahl aus der HSÖ verhält sich ähnlich wie bei den Varianten 1 und 2. Er tendiert zunächst leicht nach Norden, um dann zur Innenkurve des Emsbogens bei Oldersum abzuschwenken. Dort trifft er mit dem in Achsrichtung der Ems verlaufenden Strahl aus der NÖ 5 zusammen. Die vergleichsweise höhere Lagestabilität der austretenden Strahlen im Vergleich zu den vorigen Varianten erkennt man an der deutlich geringeren Breite der Zone mit besonders hohen Maximalgeschwindigkeiten. Bald nach dem Zusammentreffen verlieren die Strahlen gegen Ende der Innenkurve ihre Identität.

¹ Nach dem Satz von Bernoulli bewirkt eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit eine Absenkung des Drucks. Dadurch neigen benachbarte Strahlen dazu, sich einander anzunähern.

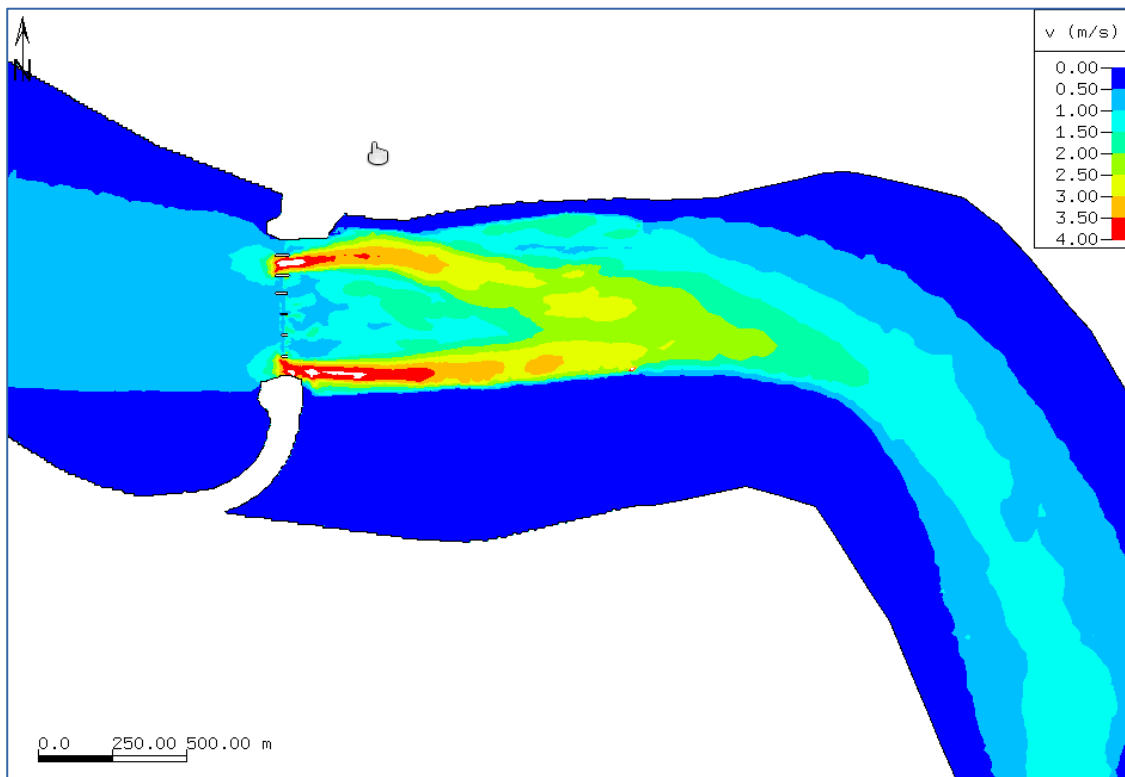


Abb. 21: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ5 offen“

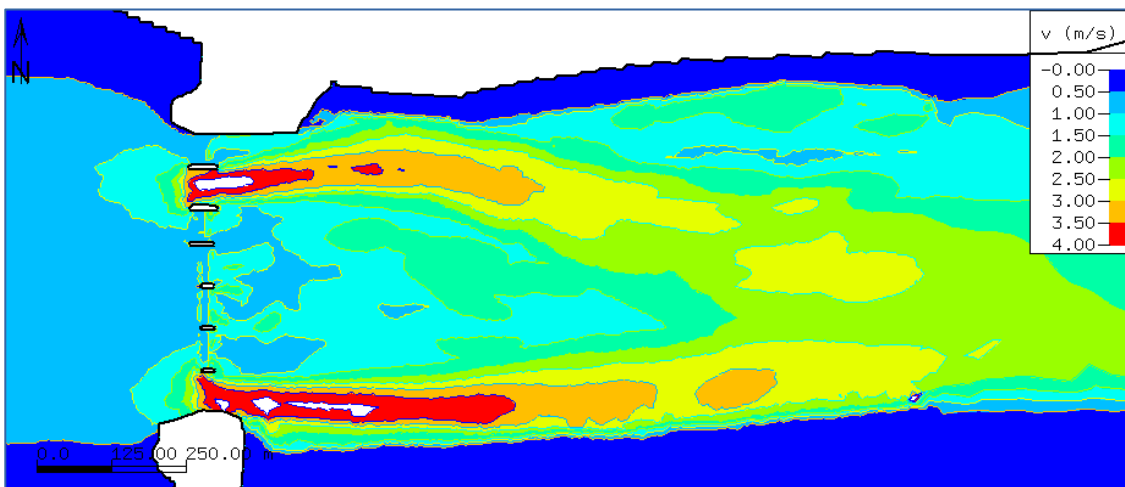


Abb. 22: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und NÖ5 offen“(Ausschnitt aus Abb. 21)

4.2.7 Zwischenbewertung der Varianten 1 bis 6

Die bisher untersuchten Varianten 1 bis 6 sind dadurch gekennzeichnet, dass stets je zwei Durchlässe geöffnet waren. Ausser der HSÖ, die immer offen blieb, waren nacheinander die Kombinationen mit NÖ1, BSÖ und die NÖ2, NÖ3, NÖ4 und NÖ5 untersucht worden. Bei allen sechs Varianten traten Strömungsgeschwindigkeiten bis rd. 4 m/s, z.T. auch wenige Dezimeter/s darüber, auf und erstrecken sich in dieser Stärke über mehrere 100 m vom Sperrwerk entfernt. Diese Strömungsverhältnisse lassen erhebliche Kolkungen erwarten. Darüberhinaus traten große Walzenströmungen in den Strömungsschatten hinter den geschlossenen Toren auf, die am südlichen Ufer zu vergleichsweise starken Rückströmungen führte (s. Strömungsgeschwindigkeiten zu den Varianten 1 bis 5). Bei den Varianten 3, 4 und 5 bestanden gegenseitige Rückwirkungen zwischen den aus den jeweiligen Öffnungen austretenden Strahlströmungen derart, dass die Strömung im Bereich dazwischen sehr unruhig wurde. Dadurch entstünden für die Schifffahrt schwer einschätzbare Strömungen.

Um diesen nachteiligen Strömungsverhältnissen entgegen zu wirken wurden zwei weitere Varianten 7 und 8 untersucht. Anstelle nur einer Öffnung zusätzlich zur HSÖ wurden nunmehr neben der HSÖ mehrere Sperrwerksöffnungen gesteuert, allerdings nur mit Teilöffnungen, um den erforderlichen Verbauungsgrad zu gewährleisten.

Bei Variante 7 wurden außer HSÖ und BSÖ (entsprechend Variante 2) noch die Nebenöffnungen NÖ1 bis NÖ3 um 1 m teilgeöffnet.

Für die Betriebssteuerung bei Variante 8 wurde die HSÖ offen gehalten sowie teilgeöffnet um 1,2 m die NÖ1, BSÖ und NÖ2 und teilgeöffnet um 0,7 m die NÖ3, NÖ4 und NÖ5.

4.2.8 Variante 7

HSÖ offen BSÖ offen sowie

NÖ1 bis NÖ3 um 1m teilgeöffnet

Variante 7 entspricht Variante 2 mit zusätzlich teilgeöffneten Toren der NÖ1 bis NÖ3. Der Betrieb gemäß dieser Steuerungsdefinitionen führte zu dem angestrebten Ziel (Abb. 23 und 24):

Zum einen werden wegen der, wenn auch vergleichsweise schwachen, Durchströmung der Nebenöffnungen die Walzenströmungen binnenseitig der Nebenöffnungen verhindert, was insgesamt eine beruhigtere Strömung zur Folge hat. Durch diese Schwächung der Walzen wird der Hauptstrom zum anderen nicht mehr zur Innenkurve hin abgelenkt, wie bei den vorigen Varianten. Weiterhin wird die Strömungsgeschwindigkeit insgesamt vergleichmäßigt und die Maximalgeschwindigkeiten werden geringer. Ein Vergleich der Maximalgeschwindigkeiten mit denen der Variante 2 (Abb. 12 und 13) lässt auch den entlastenden Einfluss der Teilöffnungen mit verringerten Maximalgeschwindigkeiten deutlich erkennen (vgl. Auch Abb. 27).

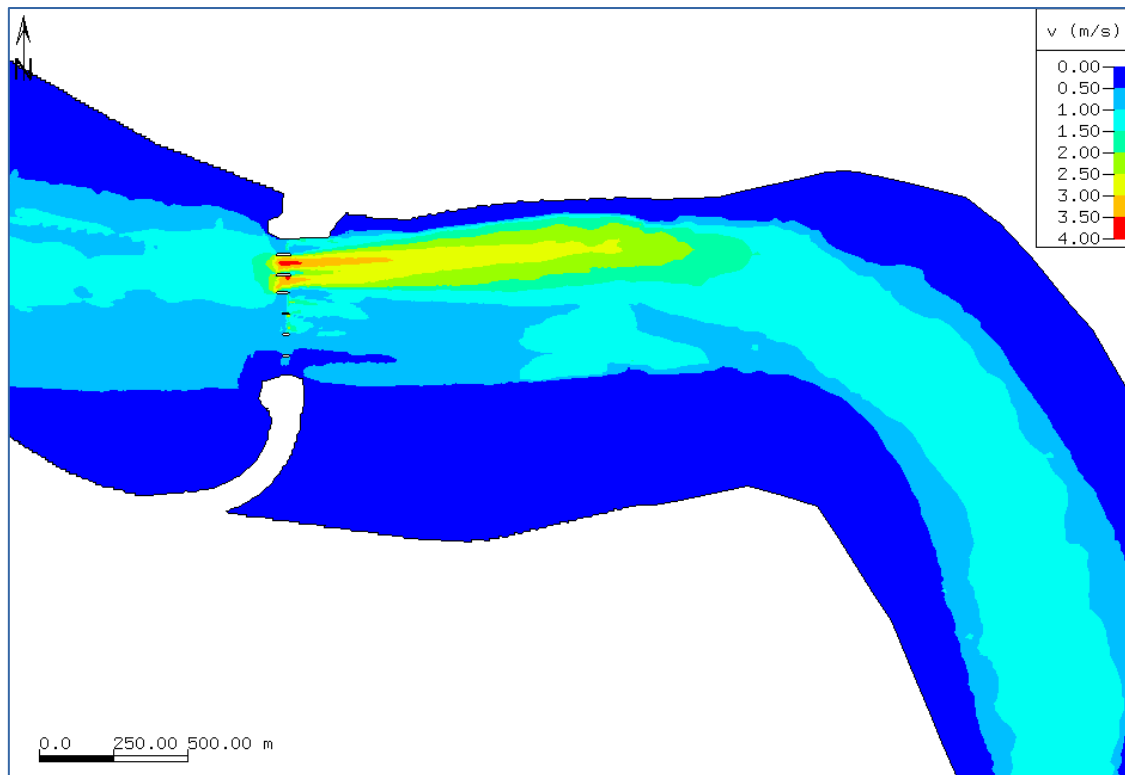


Abb. 23: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und BSO offen sowie NÖ1 bis NÖ3 teilgeöffnet um 1m“

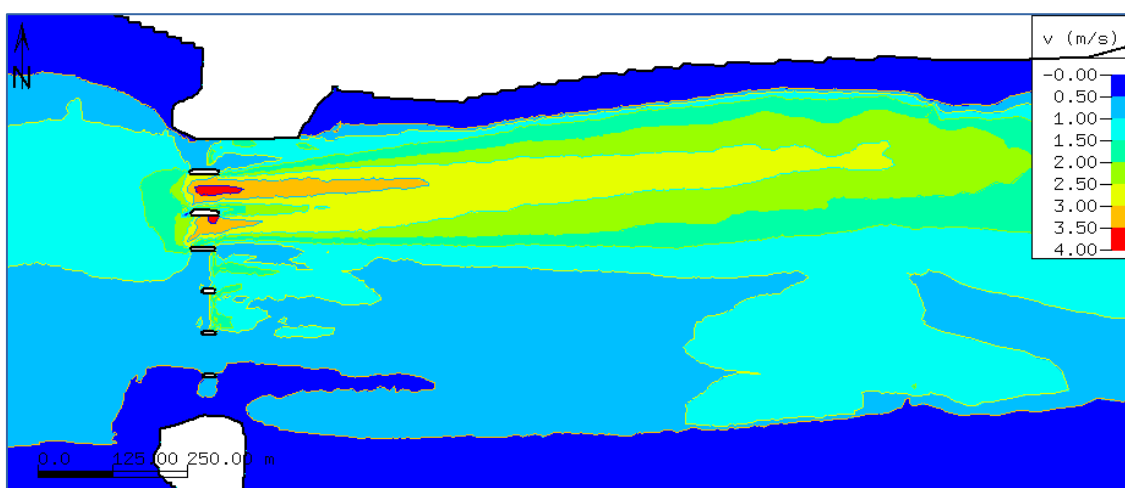


Abb. 24: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ und BSÖ offen sowie NÖ1 bis NÖ3 teilgeöffnet um 1m“(Ausschnitt aus Abb. 23)

4.2.9 Variante 8 HSÖ offen sowie teilgeöffnet um 1,2 m: NÖ1, BSÖ und NÖ2 teilgeöffnet um 0,7 m: NÖ3, NÖ4 und NÖ5

Diese Variante führt insgesamt gesehen zu ähnlichen maximalen Strömungen wie Variante 7. Der aus der HSÖ austretende Strahl verläuft etwa parallel zum nördlichen Ufer. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sind in der HSÖ und bis rd. 500 Meter nach Westen etwas größer als bei Variante 7. Sie betragen beim Übergang des bestehenden Kolkschutzes zur beweglichen Sohle maximal rd. 3,8 m/s während für Variante 7 dort rd. 3,6 m/s berechnet wurden. Die Geschwindigkeiten klingen aber bei Variante 8 im weiteren Verlauf etwas schneller ab. Der Grund für die zunächst höhere Geschwindigkeit im Abstrom der HSÖ bei Variante 8 liegt darin, dass die BSÖ weniger Abfluss leistet als bei Variante 7. Bei Variante 8 sind die Durchflüsse der BSÖ hingegen reduziert und z.T. auf die übrigen Öffnungen verteilt. Die geringeren Durchflüsse durch die BSÖ führen bei Variante 8 dann im weiteren Verlauf des Abstroms dazu, dass die gemeinsame Wirkung des Abstroms aus HSÖ und BSÖ und damit auch die maximal aufgetretenen Geschwindigkeiten schwächer sind als bei Variante 7.

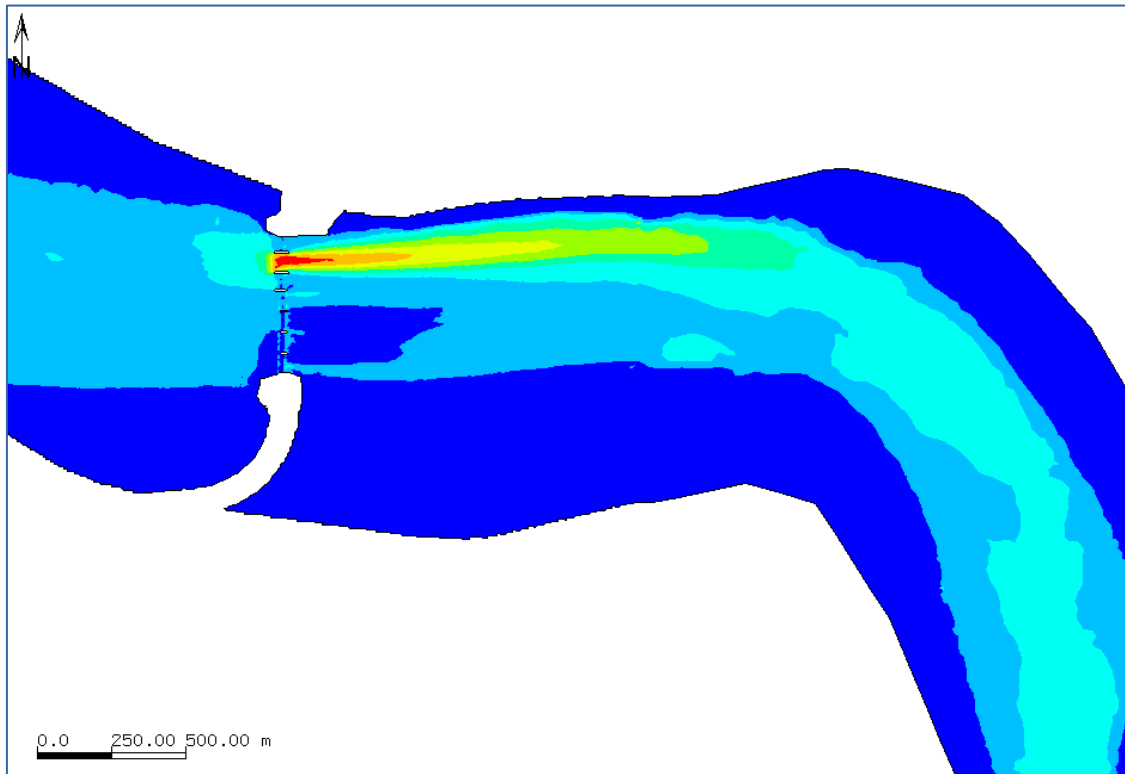


Abb. 25: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ offen NÖ1,BSÖ,NÖ2 teilgeöffnet 1,2m und NÖ3 bis NÖ5 teilgeöffnet 0,7m“

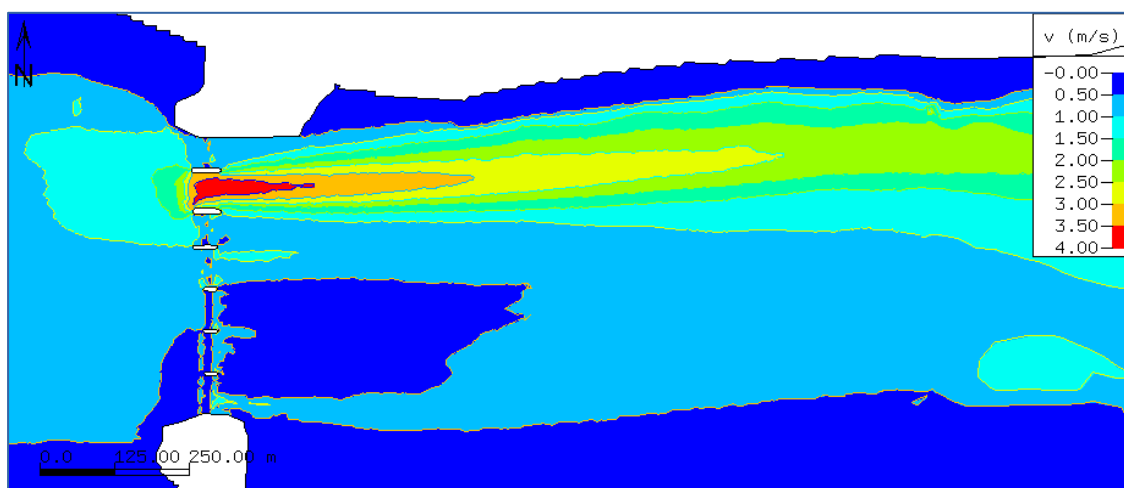


Abb. 26: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Fall „HSÖ offen NÖ1,BSÖ,NÖ2 teilgeöffnet 1,2m und NÖ3 bis NÖ5 teilgeöffnet 0,7m“ (Ausschnitt aus Abb. 25)

4.2.10 Bewertung der Strömungen der untersuchten Varianten eines Tidesteuerbetriebs im Hinblick auf Kolkentwicklungen und Kolkschutz

Abb. 27 gibt zur besseren Vergleichbarkeit einen Überblick über die Ergebnisse zu den acht, bezüglich der maximalen Strömungen untersuchten Varianten. Abb. 27a zeigt die Überlagerung aller Teilergebnisse von Abb. 27. Sie weist den Einflußbereich bis zum Abklingen der betriebssteuerungsbedingt erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten bis auf die natürlichen Werte aus. Dieser Bereich erstreckt sich bis in die Emskurve bei Oldersum.

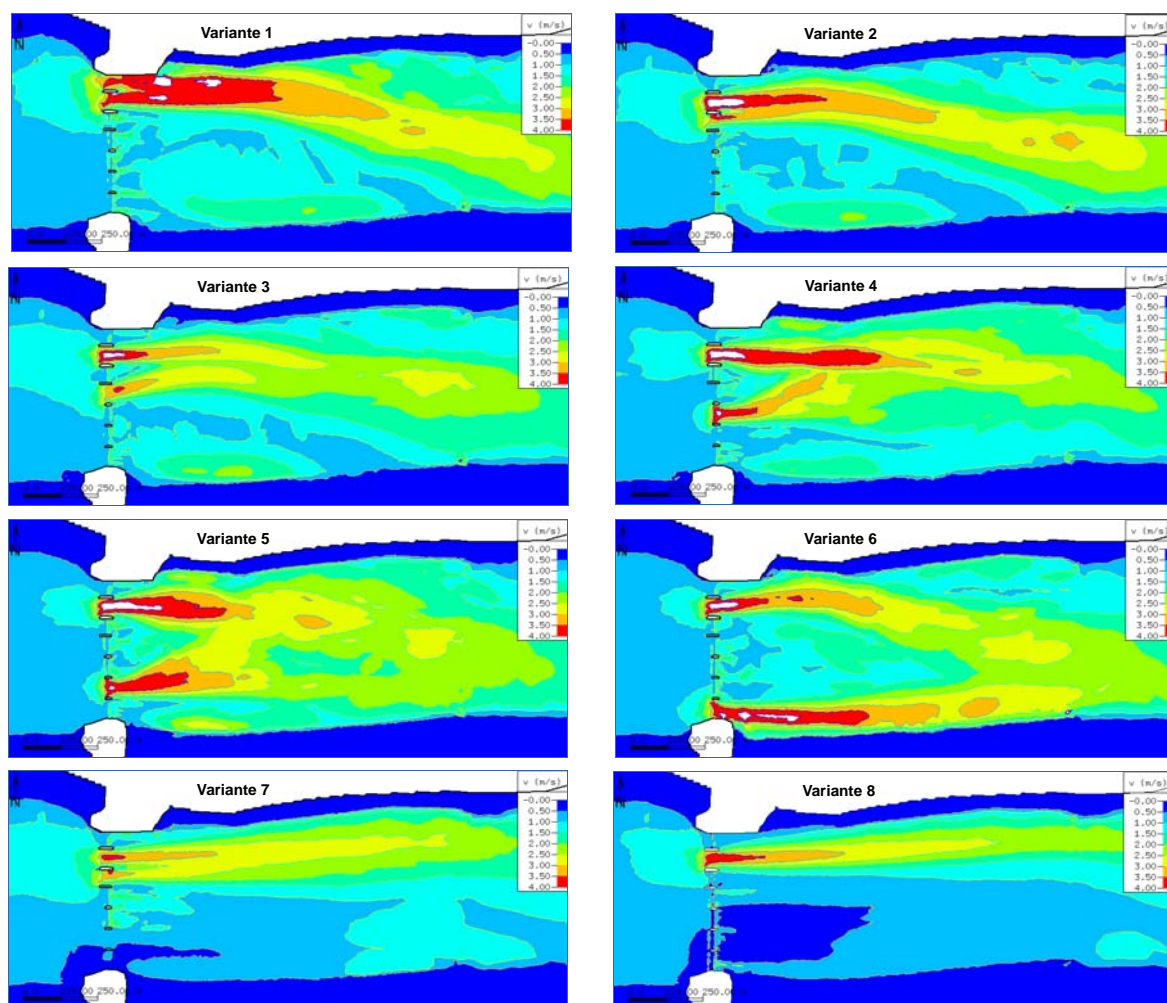
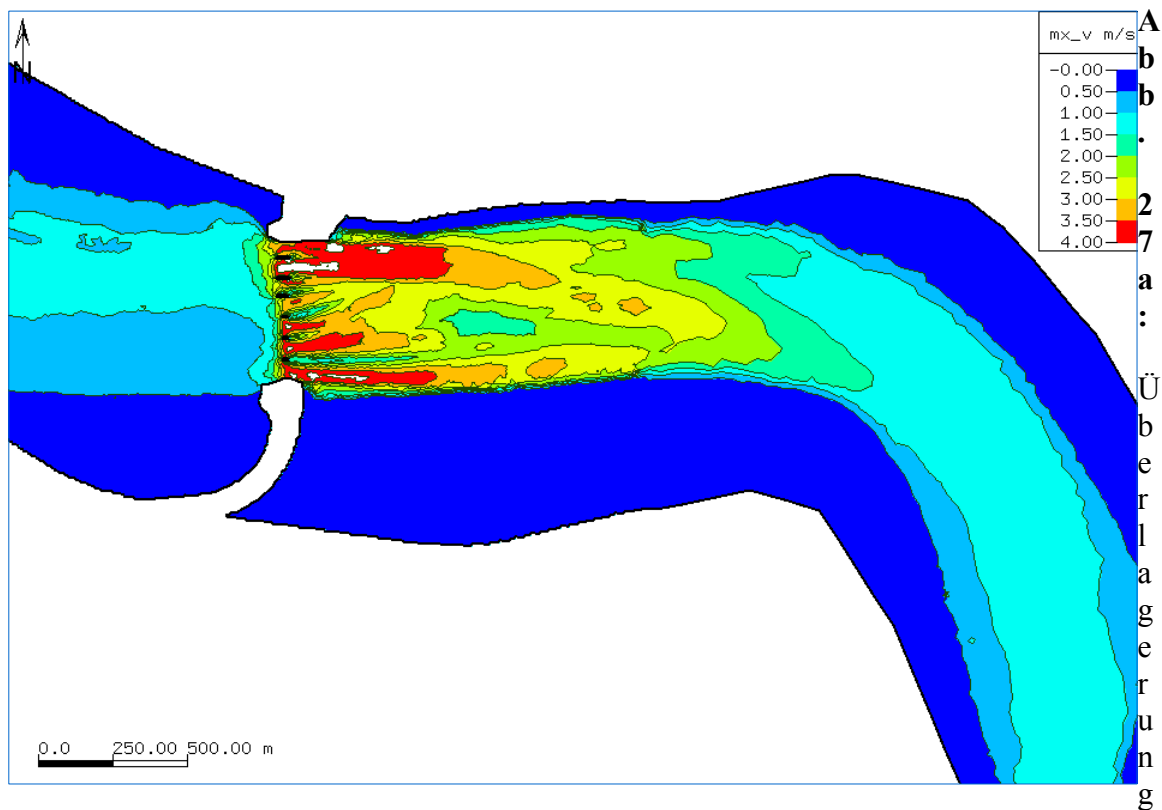


Abb. 27: Übersicht über die maximal aufgetretenen Strömungsgeschwindigkeiten der Betriebssteuerungs-Varianten 1 bis 8



der Maximalgeschwindigkeiten der Varianten 1 bis 8

Bezüglich der Kolkentwicklung ist im vorliegenden Fall zu beachten:

1. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit, desto schneller entwickeln sich Kolke und desto tiefer werden sie.
2. Eine instabile Lage des Ausflusstrahls überstreicht eine größere Fläche, in der sich Kolke ausbilden können. Mithin ist die zu sichernde Fläche in solchen Fällen größer.

Günstig im Hinblick auf die Kolk-sicherung sind daher die Varianten der Tidesteuerung mit vergleichsweise geringen Maximalgeschwindigkeiten und zugleich vergleichsweise lagestabilen, also wenig hin- und her pendelnden Strömungsverhältnissen.

Unter diesem Gesichtspunkt scheiden die Varianten 1 bis 6 aus, da sie sehr kolkintensiv sind und überdies in einigen Konfigurationen (Varianten 3 bis 5) unruhige und für die Schifffahrt schwer einschätzbare Strömungsverhältnisse erwarten lassen.

Betriebsfälle, wie die Varianten 7 und 8, bei denen außer der vorgabegemäß stets offenen HSÖ nicht nur eine weitere Öffnung voll betrieben wird, sondern mehrere Tore teilgeöffnet werden, erwiesen sich als günstiger im Hinblick erwartbare Kolke.

5. Prognose der Kolke bei langfristiger Tidebeeinflussung

5.1 Grundlegendes zur Frage von Kolken und Kolksicherheit

Gewässersohlen sind in ihrer Höhenlage trotz Sedimentbewegung stabil, wenn an jeder Stelle soviel Sediment ankommt, wie abtransportiert wird. In einem natürlichen Gewässer, bei dem sich Strömung und Gewässerbett über lange Zeit aufeinander einstellen konnten, trifft dies weitgehend zu, erkennbar daran, dass die Veränderungen des Gewässerbettes trotz z.T. heftigem Sedimenttransport nur schleichend sind.

Kolke (örtlich begrenzte Erosionen) entstehen, wenn aus einem Bereich der Sohle mehr Sediment von der Strömung abtransportiert als wieder eingetragen wird, also ein Sedimentdefizit vorliegt. Dieser Fall tritt z.B. dort auf, wo die Strömungsgeschwindigkeiten sich entlang des Fließweges erhöhen. Dies ist am Emssperrwerk bei allen Varianten der geplanten Tidesteuerung der Fall. Wie z.B. Abb. 27 zeigt, treten bei Verschluss oder Teilverschluss mehrerer Sperrwerksöffnungen aus den offen gelassenen Toren stark beschleunigte Strömungen aus und bewirken lokal ein Sedimentdefizit. Ohne besondere Schutzmaßnahmen würden hier Kolke entstehen, die die Standsicherheit des Bauwerks schon in kurzer Zeit gefährden würden.

Als Gegenmaßnahme muß die Sohle vor Auskolkungen geschützt werden. Allerdings kann man mit einer Kolkschutzfläche nur verhindern, dass Kolke im Bereich dieser Fläche auftreten. Am Ende (Rand) der Schutzschicht, dort wo die Strömung wieder auf eine ungeschützte Sohle trifft, würden sich Randkolke ausbilden weil dort ein Sedimentdefizit besteht: Auf der einen Seite kommt mit der Strömung wenig Sediment am Boden an, weil beim Überströmen der Kolkschutzfläche kein Sediment aufgenommen werden kann. Andererseits kann nach dem Übergang von der geschützten Sohle zur natürlichen, erodierbaren Sohle mehr Sediment von der Strömung aufgenommen werden, als die Strömung antransportiert. Das gilt sowohl für den bodennahen Geschiebetransport, als auch für die in Suspension transportierten Sedimente. Die Randkolke wiederum müssen daran gehindert werden, durch rückschreitende Erosion die Kolkschutzfläche anzugreifen. Ohne eine weitere Schutzmaßnahmen gegen Randkolke könnten diese ansonsten die Schutzschicht rückschreitend zerstören, ggf. bis zum Sperrwerk hin.

Randkolke bilden sich nicht oder nur geringfügig aus, wenn man die zu schützende Fläche bis in Bereiche führt, in denen die Strömungsgeschwindigkeiten etwa auf die natürlichen Werte abgeklungen sind. Im vorliegenden Fall sind das bei den Varianten 1 bis 6 rd. 2,5 km bis in die Emskurve bei Oldersum und bei den Varianten 7 und 8 rd. 2 km.

Für den Kolkenschutz ist also ein Kompromiss zu suchen zwischen einer langen Schutzfläche mit weniger Aufwand gegen Randkolke und einer kürzeren Schutzfläche mit höherem Aufwand gegen die unvermeidlichen Randkolke.

5.2 Grundlegendes zur Modellierung

Die Morphodynamik der Gewässer, also die Veränderung der Gestalt der Gewässersohlen, läuft auf Grundlage einer steten Rückkopplung zwischen Strömung, Veränderung der Sohle, dadurch veränderter Strömung und wiederum veränderten Sedimenttransportraten und -richtungen usw. usw. ab. Dieses komplexe Geschehen kann weder mit einfachen Gleichungen, noch mit Erfahrung erfasst und prognostiziert werden. Hierfür sind grundsätzlich nur Modelle geeignet, die diese Rückkopplungen nachstellen können.

Solche Modelle können hydraulische Maßstabsmodelle mit beweglicher Sohle sein oder numerische Modelle. Hydraulische Modelle mit beweglicher Sohle sind aufgrund der Modellgesetze in Untersuchungsgebieten mit groben Sedimenten einsetzbar, jedoch im vorliegenden Fall mit sandigen und feineren Sedimenten ungeeignet, weil die Modellgesetze der Strömung und der Sedimentbewegung dann unterschiedlich sind und sich nicht gleichzeitig einhalten lassen (s.z.B. Zanke 1982). Diese prinzipielle Einschränkung trifft auf numerische Modelle nicht zu. Die nachfolgende Untersuchung des Kolkverhaltens am Emssperrwerk bei verschiedenen Betriebssteuerungsszenarien wurde daher mit einem Morphodynamisch-Numerischen Simulationssystem durchgeführt. Zum Einsatz kam das seit 1992 vielfältig im Auftrag verschiedener Bundesländer eingesetzte Morphodynamisch-Numerische Simulationssystem TIMOR3 (Zanke 1993, 1994, 1995, 2004, 2008). TIMOR3 bildet die in der Natur ablaufenden Prozesse der Sedimentmechanik entsprechend des Standes der Forschung im einzelnen nach. TIMOR3 bildet die Strömungen mit einem Quasi-3D-Verfahren nach,

das auch die Wirkungen von Sekundärströmungen an der Sohle erfasst. Es behandelt den Gewässerboden fraktioniert und dreidimensional.

Prozessorientierte, morphodynamische Modelle sind geeignet, wesentliche Merkmale von Untersuchungsgegenständen aufzudecken und unterschiedliche Planungsvarianten gegeneinander zu bewerten. Sie sind aber keine exakten Abbilder der Natur, denn es gibt keine exakten Lösungen für den Sedimenttransport, weshalb nicht exakte empirische Lösungen einbezogen werden müssen. Andererseits sind die Randbedingungen und Eingangsdaten nur exemplarisch ausgewählt oder z.T. auch unbekannt, wie im vorliegenden Fall z.B. der Bodenaufbau. Für die vorliegende Machbarkeitsstudie war es ausreichend, zunächst exemplarisch von einem Mittelsand auszugehen.

5.3 Sedimentologische Randbedingungen

Kolkprozesse werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Von Bedeutung sind neben der Geometrie des Untersuchungsgebietes und der Stärke der Strömungen auch die Erodierbarkeit des Gewässerbodens, beschrieben durch die sogenannte kritische Geschwindigkeit des Sediments. Geringere kritische Geschwindigkeit führt bei sonst gleichen Randbedingungen zu schnellerer Kolkbildung und zu tieferen Kolken. Umgekehrt entwickeln sich Kolke bei höherer kritischer Geschwindigkeit langsamer und erreichen eine geringere Tiefe.

Die Erodierbarkeit, also bei welchen Geschwindigkeiten die Sedimente von der Strömung bewegt werden können, lässt sich z.B. der Hjulströmkurve entnehmen (s. z.B. Zanke (1982, 2002)). Diese weist für Feinsand, Mittelsand und feinere Grobsande weitgehend gleiche kritische Geschwindigkeiten um 0,28 m/s bis 0,32 m/s aus. Diese Werte gelten für weitgehend kohäsionslosen Sand. Im vorliegenden Fall wird die kritische Geschwindigkeit im Raum des Emssperrwerks durch Beimengungen von bindigem Sediment, z.B. Schlickanteilen, zumindest in den obersten Bodenschichten vergrößert. Zahlenwerte hierfür liegen derzeit nicht vor. Um dies zu berücksichtigen wurde die kritische Geschwindigkeit im Modell erhöht. Bei einer Erhöhung um rd. 50% infolge bindiger Sedimentanteile lieferte das Modell die im Kap. 5.4 ausgewiesene Naturähnlichkeit.

In der vorliegenden Untersuchung geht es im Rahmen einer Machbarkeitsstudie um die Erkundung des generellen Kolkverhalten hinsichtlich Tiefenentwicklung und Lage/Ausdehnung der Kolkzonen, insbesondere im Vergleich verschiedener Varianten untereinander.

Für spätere Ausführungsplanungen sind eingehendere Untersuchungen auf Grundlage von Bodenaufschlüssen erforderlich. Alternativ können systemanalytische Untersuchungen mit unterschiedlichen in Ansatz zu bringenden Sedimentzusammensetzungen ausgeführt werden, mit denen der Ergebnisraum der Kennwerte der Kolke (Tiefe, Lage, Ausdehnung, Geschwindigkeit der Eintiefung) eingegrenzt werden kann.

5.4 Nachweis der Naturähnlichkeit

5.4.1 Vergleich der Kolkentwicklung Naturversuch 2010 vs. Modellierung

In einem ersten Schritt war die Naturähnlichkeit der Modellergebnisse festzustellen. Hierzu wurde der Naturversuch aus dem Jahre 2010 morphodynamisch nachgestellt. Bei diesem Versuch war nur die Hauptschiffahrtsöffnung für den Durchfluss geöffnet. Die dabei entstandenen Kolke sind bezüglich ihrer Lage und Form aufgemessen worden (Abb. 28). Dieser Naturversuch wurde zur Überprüfung der Naturähnlichkeit des numerischen Modells nachgestellt und die berechneten Kolke wurden mit den aufgemessenen Kolken aus dem Jahr 2010 verglichen. Als Vergleichszeitpunkt wurde der Endzustand der in 2010 ausgebildeten Kolke herangezogen, bei dem Kolkiefen von ca. 7 m unter ursprünglicher Sohlenlage (entsprechend rd. 15 m unter NN) aufgetreten waren (Abb. 28).

Abb. 29 gibt den morphodynamisch-numerisch berechneten Zustand des Naturversuchs 2010 wieder. In der Abbildung sind in violetter Farbe die Tiefenlinien der Aufmessung aus 2010 mit eingetragen. Der Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Kolk zeigt, dass der Kolk im Modell, wie in der Natur, die charakteristische Verschwenkung zum nördlichen Ufer aufweist und des weiteren nach gleicher Zeit auch eine ähnliche Form hat. Im folgenden Kapitel 5.4.2 wird des weiteren auf Abb. 30 der zeitliche Verlauf des berechneten Kolkes gezeigt. Die rote Verlaufskurve weist

nach 7 Tiden eine Kolkentiefe von rd. 7 m aus, wie sie in der Natur nach gleicher Zeit ebenfalls aufgetreten war.

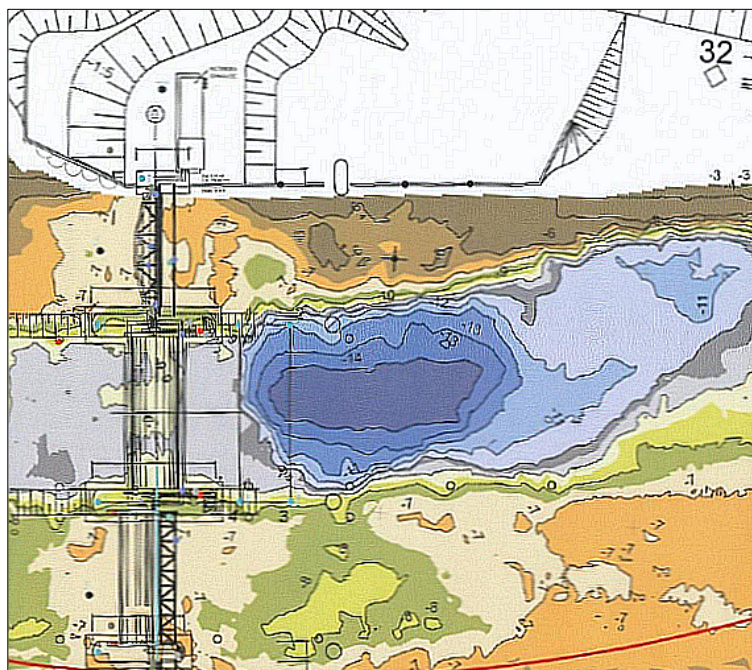


Abb. 28:
Im Naturversuch August 2010 hinter der allein geöffneten HSÖ entstandener Kolk an der Binnenseite des Emssperrwerks mit einer maximalen Kolkentiefe von knapp 15m unter NN.

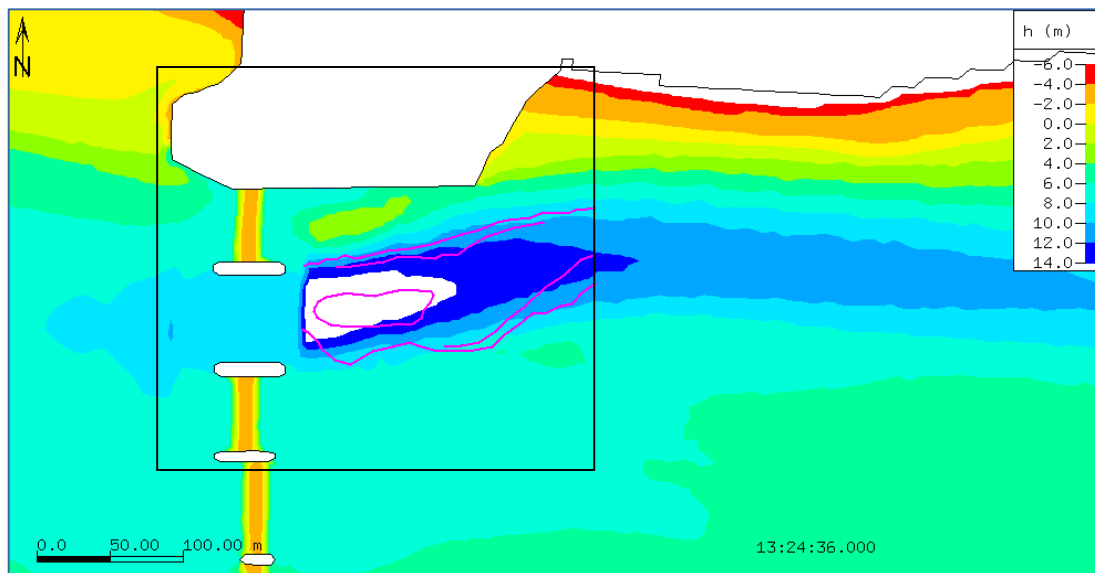


Abb. 29: Kolk im Modell bei Erreichen einer Kolkentiefe wie im Naturversuch (Kolkentiefe 15m u. NN). Die zum Vergleich mit eingetragenen magentafarbenen Linien sind

aus der Kolkaufmessung 2010 (Abb. 28) entnommene Tiefenlinien; von außen nach innen: 9 m, 10 m, 14 m. Der innere Rahmen zeigt etwa den Ausschnitt auf Abb. 28.

5.4.2 Nachweis der Naturähnlichkeit bei morphodynamische Beschleunigung (MB)

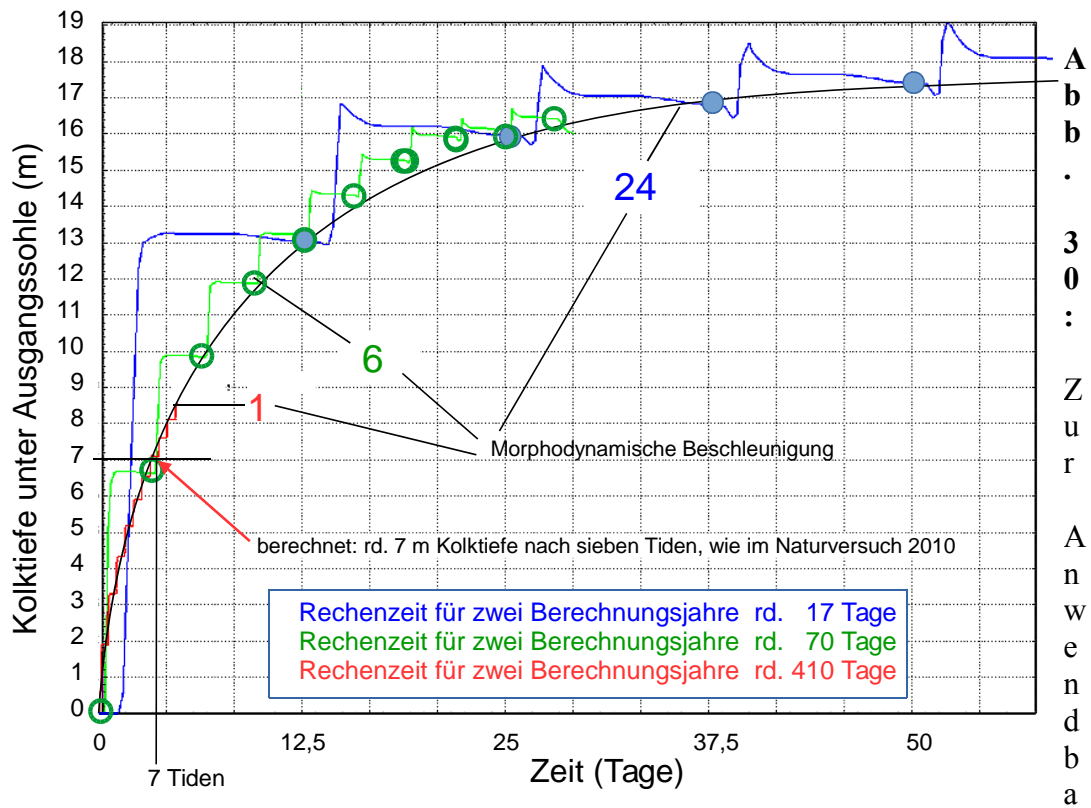
Im Gegensatz zu reinen Strömungsberechnungen müssen bei morphodynamischen Berechnungen stets lange Zeiträume durchlaufen werden. Im vorliegenden Fall war die Kolkentwicklung im Ablauf zunächst eines Jahres zu berechnen, die später auf zwei Jahre ausgedehnt wurde. Die für das Durchrechnen eines Jahres benötigten Rechenzeiten lägen ohne Anwendung einer morphodynamischen Beschleunigung bei etwas mehr als einem halben Jahr je Untersuchungsfall. Mit dem Verfahren der morphodynamischen Beschleunigung lassen sich die Rechenzeiten ohne wesentlichen Verlust der Naturähnlichkeit erheblich reduzieren. Im vorliegenden Fall ließ sich die Rechenzeit mit einem Beschleunigungsfaktor von 24 so verkürzen, dass 2 Jahre in der Natur vom Modell in rd. 17 Tagen anstelle von rd. 410 Tagen simuliert werden können. Das Verfahren der morphodynamischen Beschleunigung ist z.B. beschrieben in Zanke (2008), Roelvink & Reniers (2012) oder Latteux (1995).

Die Abb. 30 demonstriert das Verfahren und seine Anwendbarkeit im vorliegenden Fall. Sie zeigt die berechnete Kolkbildung in Abhängigkeit der Zeit für einen Fall der Betriebssteuerung am Emssperrwerk bei verschiedenen Beschleunigungsfaktoren.

Die in roter Farbe angelegte Verlaufskurve gibt die ohne morphodynamische Beschleunigung berechnete Kolkeintiefung wieder. (MB = 1)

Die grün eingefärbte Kurve zeigt die Kolkeintiefung bei Ansatz einer 6-fachen Beschleunigung (MB = 6) und die blaue Kurve steht für das Ergebnis bei einer 24-fachen Beschleunigung, die im vorliegenden Gutachten angesetzt wurde.

Man erkennt eine gute Übereinstimmung zwischen den mit unterschiedlicher Beschleunigung rechnerisch entstandenen Kolk-tiefen, wie die grünen Kreise für MB = 6 und die blauen Kreise für MB= 24 ausweisen. Die schwarze Kurve gibt etwa den weiteren Verlauf der Berechnung ohne Beschleunigung wieder.



rkeit des Verfahrens der morphodynamischen Beschleunigung. Die schwarze Kurve steht für die kontinuierliche Kolkiefen-Zeit-Funktion. Die anfänglich großen Tiefenzuwächse sind etwa in vierter Potenz von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig und kommen daher während der kurzen Zeit der höchsten Strömungsgeschwindigkeiten zustande. Zum Verständnis: Bei Beschleunigung "1" simuliert eine berechnete Tide die morphodynamische Entwicklung während einer Tide in der Natur. Entsprechend simuliert bei Beschleunigung "6" eine berechnete Tide die morphodynamische Entwicklung innerhalb sechs Tiden in der Natur und so weiter.

5.4.3 Einordnung der Zeitangaben

Die zeitliche Entwicklung der Kolkiefen ist, wie schon weiter oben erwähnt, von der Sedimentzusammensetzung abhängig. In dieser Machbarkeitsstudie wurde, wie ebenfalls schon angesprochen, mangels ausreichender Bodenaufschlüsse ein Mittelsand mit bindigen Anteilen in Ansatz gebracht. Wie Abb. 30 zeigt, liefert das Modell bei der Nachrechnung des Naturversuchs 2010 eine zutreffende Aussage zur zeitlichen Kolkentwicklung dieses Falles: Im Naturversuch stellte sich nach sieben Teilsperungen

eine Kolksohle bei rd. 15 m unter NN ein. Von der Höhenlage der Ausgangssohle (rd. 8 m unter NN) aus gemessen war der Kolk damit etwa 7 m tief. Ebenfalls rd. 7 m tief war der Kolk in der numerischen Berechnung (vgl. die rote Kurve auf Abb. 30) bei 7 Tiden Einwirkungsdauer. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass die zeitliche Zuordnung zu den weiter unten beschriebenen Kolkmodellierungen größenordnungsmäßig zutrifft, sofern nicht (derzeit unbekannt) Unstetigkeiten in der Sedimentverteilung im Boden vorhanden sind. Dem Gutachten d'Angemont (2011, S. 6) folgend hat sich der Kolk im Naturversuch 2010 nicht weiter eingetieft, weil er von der Beckenablagerung daran gehindert wurde. Solche Unstetigkeiten könnten z.B. bei lokal geringerer Erodierbarkeit Kolke zur Seite ablenken oder bei leichterer Erodierbarkeit größere Kolk-tiefen ermöglichen.

5.5 Voruntersuchung zur Definition der Kolkschutzfläche

5.5.1 Lösungsweg

Für die Untersuchungen der Kolkentwicklung bei verschiedenen Betriebssteuerungsszenarien des Sperrwerks war zunächst ein Bereich zu definieren, der durch eine Sohlsicherung gegen Kolkbildungen geschützt ist. Die Überlegungen für diese Festlegung sind nachfolgend beschrieben:

Man kann die Kolkschutzfläche theoretisch soweit ausdehnen, dass Randkolke für das Bauwerk ungefährlich werden. Im praktischen Fall wird es aus Kostengründen i.d.R. vorgezogen, eine wesentlich kleinere Kolkschutzfläche herzustellen. Allerdings wird dann eine aufwendigere Randkolksicherung erforderlich (s. Kap. 5.1). Damit erhebt sich die Frage nach einer wirtschaftlich günstigen Kombination von Länge der Kolkschutzfläche und Aufwand für eine Randkolksicherung. Ohne weitere Untersuchungen kann man lediglich feststellen, dass die Randkolke bei einer sehr kurzen Kolkschutzstrecke am aufwendigsten zu beherrschen sind und im vorliegenden Fall bei einer ca. 2,5 km langen Schutzfläche als weitestgehend unproblematisch eingeschätzt werden können.

Um hier detailliertere Kenntnisse zu gewinnen, wurden die erwartungsgemäßen Kolk-tiefen für unterschiedliche Längen der Sicherungsstrecke durch eine Voruntersuchung im morphodynamischen Modell abgeschätzt. Dieses Modell wurde als stationäres Ausschnittsmodell auf der Grundlage der maximal in den Strömungsmodellierungen (s.o., Kap. 4.2) aufgetretenen Geschwindigkeiten betrieben. Es umfasste einen Abschnitt der Ems von ca. 1,3 km seeseits des Sperrwerks und etwa 3 km binnenseits des Sperrwerks.

5.5.2 Ergebnisse der Voruntersuchung

Zur Vorerkundung der bei unterschiedlichen Ausdehnungen der Sicherungsstrecken zu erwartenden Kolk-tiefen wurden sechs Einzeluntersuchungen mit Kolksicherungsbereichen von 250 m, 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m und 2500 m Länge ab Sperrwerk

vorgegeben. Die jeweilige Sicherungsfläche wurde der Flußbreite entsprechend angesetzt.

Weiterhin wurde der Betrieb des Sperrwerks für alle sechs Fälle variiert: In einer Untersuchungsserie waren HSÖ und BSÖ offen während alle anderen Tore geschlossen blieben. Die Betriebsbedingungen der zweiten Untersuchungsserie waren: HSÖ offen, BSÖ,NÖ1,NÖ2 1,2 m teilgeöffnet und NÖ3,NÖ4,NÖ5 0,7 m teilgeöffnet.

Die Voruntersuchung wurde für 1 Jahr durchgeführt.

Die Ergebnisse sind auf Abb. 31 zusammengestellt und liefern folgende Aussage:

- Bei einer 2500 m langen Sicherungsstrecke ergaben sich nach einem Jahr Tiefen der Randkolke von etwa 2,5 m, unabhängig vom Steuerungsszenario des Sperrwerks. Dies ist darin begründet, dass die individuellen, aus den Sperrwerksöffnungen austretenden Strahlströmungen auf dem Weg ihre Identität verlieren. Die Geschwindigkeiten sind dann wieder auf ihr natürliches Niveau zurückgegangen. Diese Charakteristik kann man ab etwa 2000 m bis 2500 m vom Sperrwerk entfernt aus Abb. 31 entnehmen.
- Zwischen 2000 m und 1000 m wurde (von längeren zu kürzeren Sicherungsstrecken kommend) wurde ein starker Anstieg der Randkolk-tiefen von rd. 4 m auf Größenordnungen von 17 m bzw. 24 m (je nach Steuerungsvariante) unter Ausgangssohlage (GOK) festgestellt.
- Bei Sicherungsstrecken unter rd. 1500 m Länge wirkt sich die Art der Sperrwerkssteuerung auf die Randkolke aus. Bei kürzeren Sohlensicherungen ergaben sich im Fall "HSÖ und BSÖ offen" tiefere Randkolke als für den Fall, dass nur die HSÖ voll offen ist und die anderen Durchlässe teilgeöffnet sind.
- Bis hinunter zu einer Sicherungslänge von rd. 1 km vom Sperrwerk steigt die Kolk-tiefe weiter an, jedoch schwächt sich die Tiefenzunahme ab. Dies gilt für beide untersuchten Betriebsfälle wobei die absoluten Tiefen größer sind, wenn nur HSÖ und BSO geöffnet sind. Im anderen untersuchten Betriebsfall (HSÖ offen, BSÖ,NÖ1,NÖ2 1,2 m teilgeöffnet und NÖ3,NÖ4,NÖ5 0,7 m teilgeöffnet) ist die Strahlwirkung wegen der gleichmäßigeren Verteilung der Durchflüsse geringer (vgl. Abb. 13 mit Abb. 26). Dies wirkt sich direkt auf die Kolkintensität aus, weshalb auch die Kolke weniger Tiefe erreichen.

- Bei 250 m Sicherungsstrecke erreichen die Kolke im Modell rd. 17 m bis 22 m (HSÖ offen, Teilöffnungen weiterer Durchlässe) und etwa 24 bis 31 m (nur HSÖ und BSÖ offen).

Hieraus kann folgender Rückschluss gewonnen werden:

Wenn der Kolkschutz länger ausgeführt wird als rd. 2 km ist nur eine vergleichsweise schwache Sicherung gegen Randkolke erforderlich. Andererseits unterscheiden sich die Kolkiefen nach Abb. 31 bis 1 km Abstand vom Sperrwerk nur schwach, so dass eine z.B. 1 km lange Sicherungsstrecke gegenüber einer 500 m langen nur wenig Vorteile aber deutlich höhere Kosten nach sich ziehen würde.

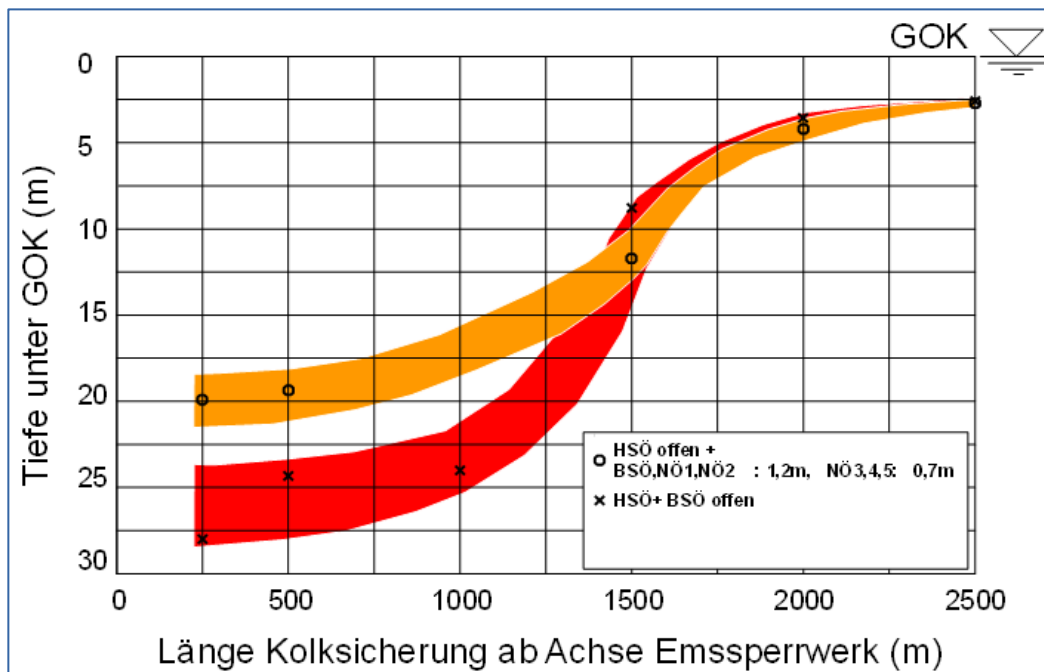


Abb. 31: Entwicklung der Kolkiefen in Abhängigkeit von der Länge der Kolksicherung (gemessen ab Sperrwerk) für zwei Betriebsfälle

Auf dieser Grundlage wurde in der Besprechung vom 07. Juli 2015 im NLWKN Au- rich für die folgenden Untersuchungen, nunmehr instationär im Tidebetrieb, eine 500 m lange Kolksicherung als Grundlage für die weiteren Berechnungen vereinbart (Abb. 32).

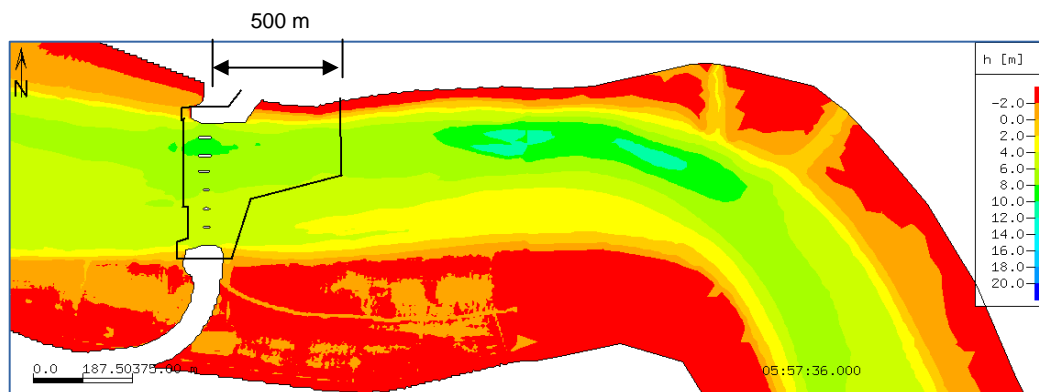


Abb. 32: Kolk­schutz­fläche für die Haupt­un­ter­suchungen mit be­weg­licher Sohle im Tide­be­trieb.

Der Kolk­schutz wurde im Modell in der Form rea­li­siert, dass die vor­han­dene Sohle in der vor­han­de­nen Tie­fen­lage fixiert wurde.

5.6 Kolkbildung im Tidebetrieb bei Betriebssteuerung

5.6.1 Häufigkeit der Betriebssteuerung

Vereinbarungsgemäß wird in den Modelluntersuchungen ganzjährig jede Tide gesteuert, also nicht nur die jeweilige Tagtide. Damit wird das Emssperrwerk bei Betriebssteuerung rd. 706 mal im Jahr teilverschlossen.

5.6.2 Hauptversuche Kolkentwicklung unter Tidebedingungen bei unterschiedlichen Betriebssteuerungen

5.6.2.1 Variante 1

Als Ergebnis der Besprechung vom 07. Juli 2015 im Hause des NLWKN Aurich wurden folgende Randbedingungen für das weitere Vorgehen bezüglich der morphodynamischen Kolksimulationen festgelegt. Leitlinie waren die Erkenntnisse aus den Strömungsanalysen (Kap. 4), die ein Betriebsschema (= Steuerungsfall) nahelegten, bei dem keine intensiven Walzenströmungen in Lee geschlossener Torgruppen auftreten. Solche von vorneherein ungünstigen Walzenströmungen werden vermieden, wenn die südlichen Nebenöffnungen wenigstens teildurchströmt werden.

Aus der Bauphase des Emssperrwerks vorhandene Bodenaufschlüsse weisen in der Tiefe binnenseitig des Emssperrwerks Beckenablagerungen aus der Elster-Eiszeit aus (Abb. 33). Solche Beckenablagerungen sind schwer erodierbar. Da erwartet wurde, dass die Kolke bei Betriebssteuerung bis auf die Beckenablagerungen stoßen könnten, wurden für Variante 1 zwei Fälle untersucht:

Fall a) ohne Berücksichtigung der Beckenablagerungen und

Fall b) mit Berücksichtigung als unerodierbar angenommener Beckenablagerungen.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse lässt sich die Auswirkung der Beckenablagerungen auf die Kolkausbildung entnehmen.

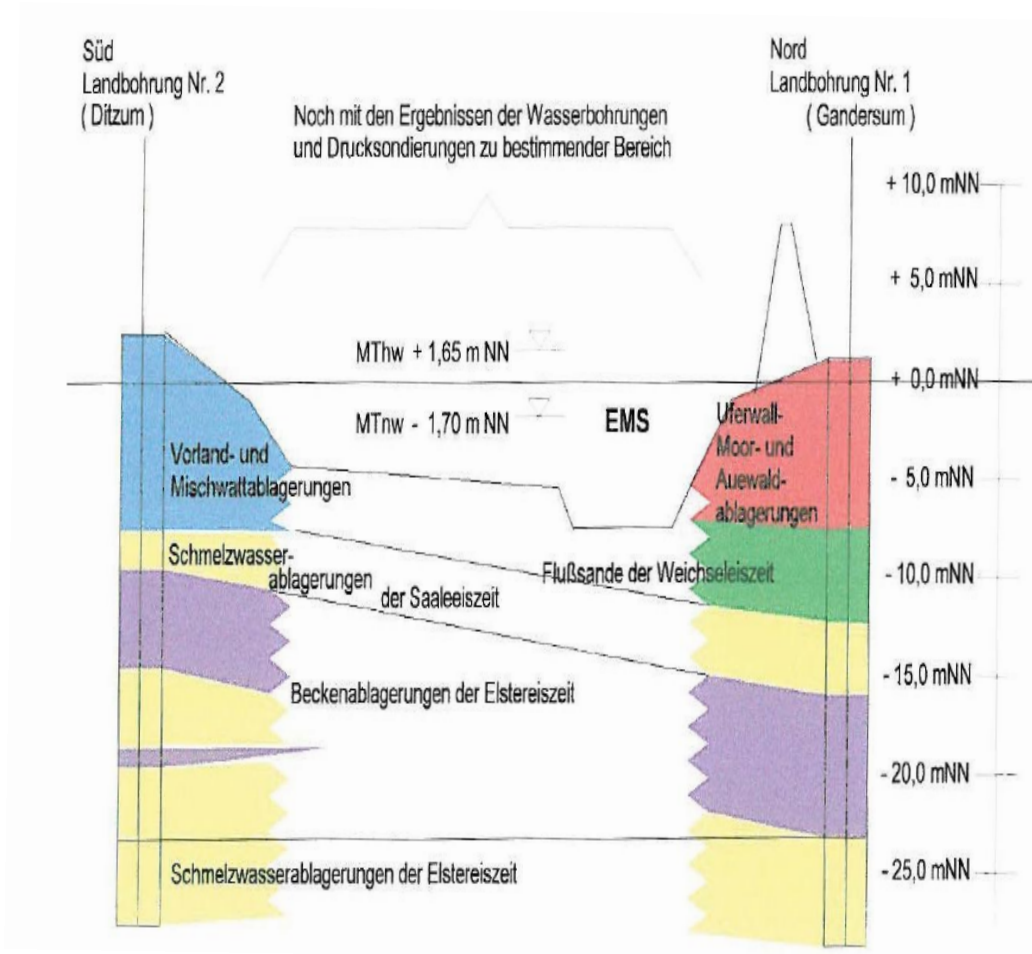


Abb. 33: Hinweis auf schwer erodierbare Beckenablagerungen aus der Elstereiszeit in Tiefenlagen, in die Kolke u.U. vorstoßen können.

Vor diesem Hintergrund wurden folgende Randbedingungen für die erste zu untersuchende Variante festgelegt:

1. Kolksicherung
Länge Sicherungsstrecke: 500 m
Fläche gemäß Umriss wie auf Abb. 32
2. Vorgaben bezüglich Beckenablagerungen
 - a) eine Berechnung ohne Beckenablagerungen (Variante 1a)
 - b) eine Berechnung mit Beckenablagerungen
(Annahme Beckenablagerungen unerodierbar, Variante 1b)
2. Sediment Mittelsand
3. Steuerungsfall: HSÖ offen

NÖ1, BSÖ und NÖ2 1,2 m geöffnet
NÖ3, NÖ4 und NÖ5 0,7 m geöffnet

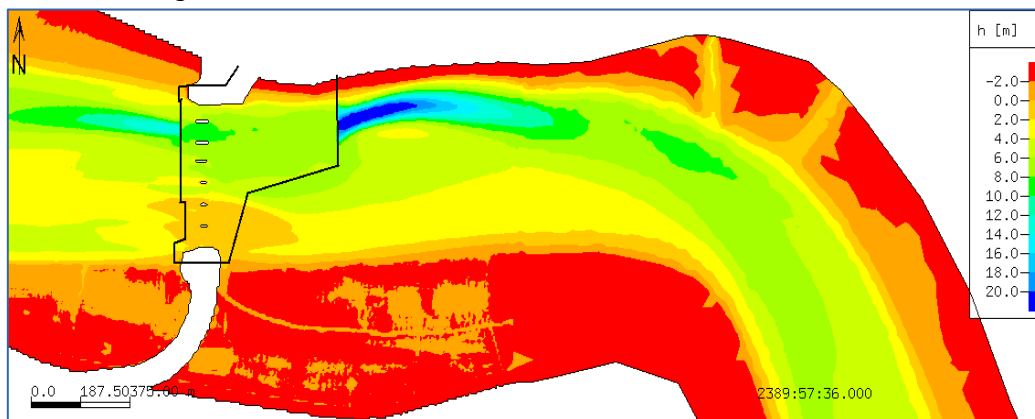
Variante 1a: Berechnung ohne Beckenablagerungen

Die Ergebnisse der Variante 1a (kein Ansatz von Beckenablagerungen) sind für drei Einwirkzeiten auf Abb. 34 dargestellt. Zunächst entwickelt sich ein Kolk entlang des nördlichen Ufers (oberes Teilbild). Der Kolk bleibt jedoch in dieser Lage nicht stabil, sondern schwenkt, in der Berechnung beginnend nach rd. 150 Tagen, nach Süden (mittleres Teilbild). Das untere Teilbild zeigt dann die südlichste Lage, von der aus sich der Kolk dann wieder nach Norden verlagerte (hier nicht mehr dargestellt).

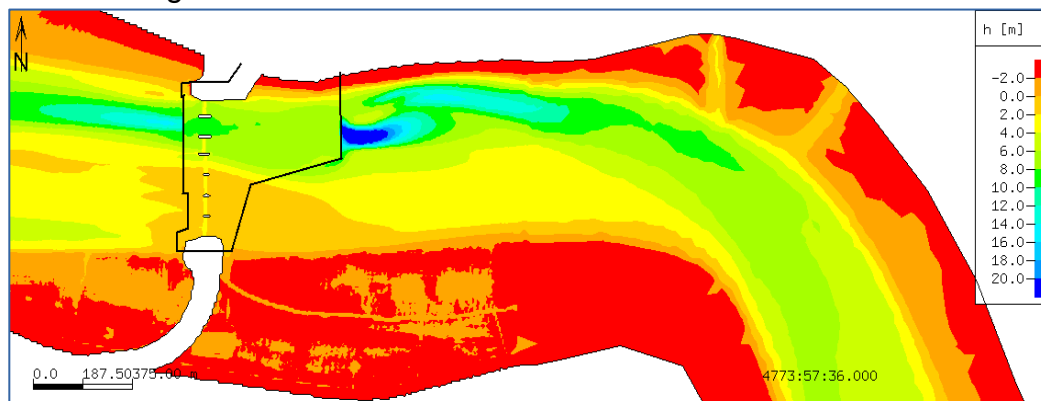
Die maximalen Tiefenlagen erreichten im nördlichen Kolk ca. 25 m unter NN und in der südlichen Lage ca. 33 m unter NN. Die Positionen der größten, zeitweilig aufgetretenen Kolk-tiefen sind auf Abb. 35 angegeben.

Im Zuge der Pendelbewegung des Kolkes treten z.T. erhebliche Verlandungen im Bereich der bestehenden Fahrrinne auf (vgl. Abb. 34). Darstellungen der Veränderung des Emsquerschnittes nach 125 Tagen (rd. 240 Tiden) verdeutlichen dies auf den Abbildungen 35 und 36.

rd. 100 Tage



rd. 200 Tage



rd. 375 Tage

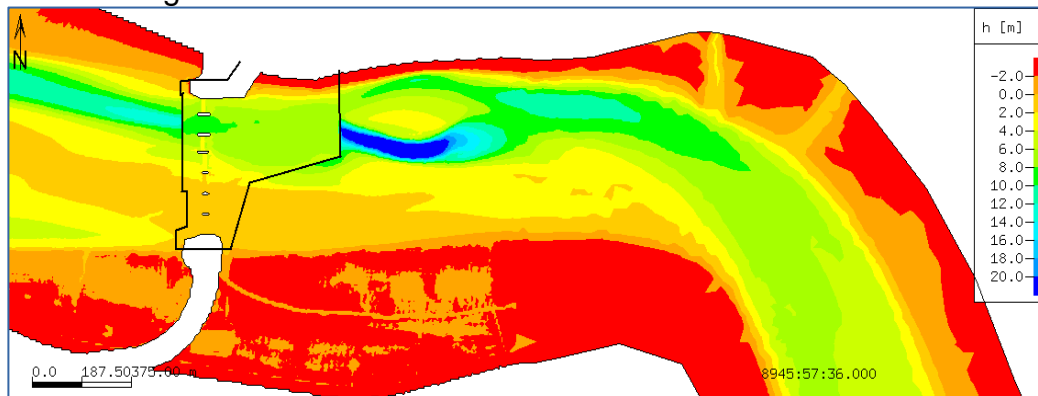


Abb. 34: Berechnete Kolkentwicklung für Variante 1a nach 100 Tagen, 200 Tagen und 375 Tagen

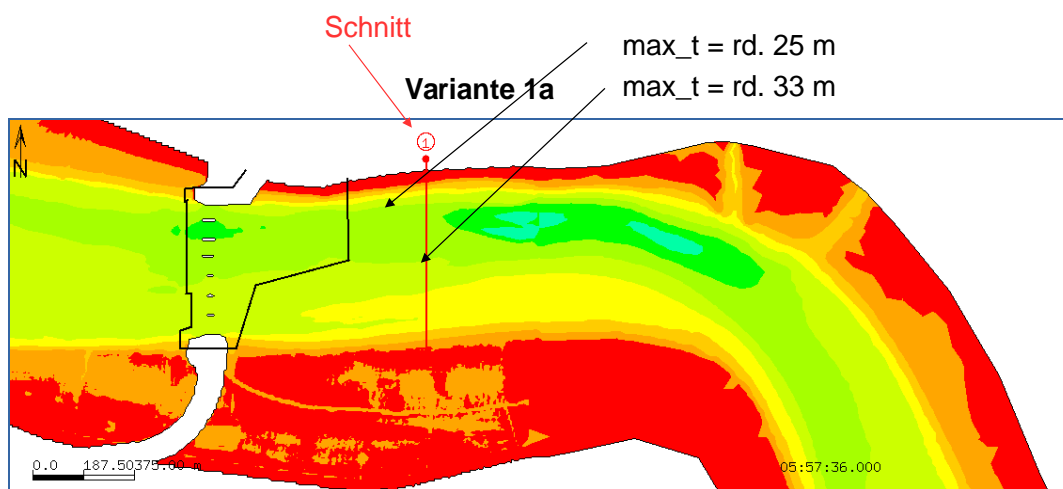


Abb. 35: Lage des Schnittes zu Abb. 36 und ungefähre Positionen der größten, in der Berechnung aufgetretenen Kolk-tiefen

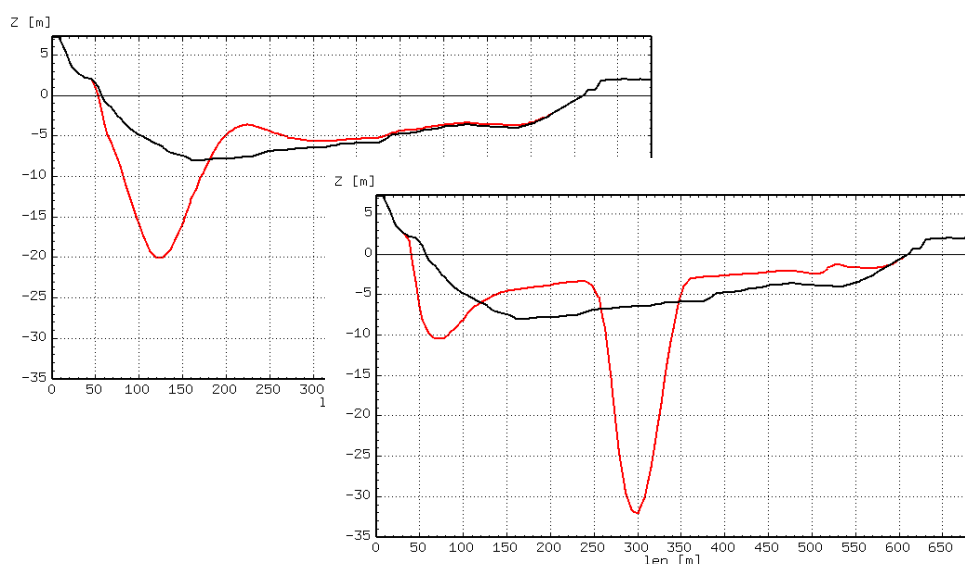


Abb. 36: Tiefen entlang des Schnittes (schwarz = Ausgangszustand, rot Berechnungszustand nach rd. 240 Tiden (oben) und rd. 670 Tiden (unten) mit zeitweiser Verminderung der Wassertiefe im Fahrrinnenbereich bis auf etwa 4 m unter NN.

Zusammenfassung der Ergebnisse zu Variante 1a

- Die Kolke haben eine Tendenz zum Pendeln.
- Der Bereich dieser Pendelbewegung hielt sich in den Berechnungen im Bereich der 500m - Zone der Kolk-sicherung.
- Es besteht eine deutliche Tendenz zu zeitweiligem Angriff auf das nördliche Ufer.

Variante 1b: Berechnung mit Berücksichtigung von Beckenablagerungen

Die Randbedingungen für diesen Versuch waren, bis auf die hier zu berücksichtigenden Beckenablagerungen, die gleichen wie bei Variante 1a. Die Beckenablagerungen wurden entsprechend Abb. 33 als unerodierbare Bodenschichten in den Modellboden übernommen. So, wie in der Natur gemäß Abb. 33 auch, fallen die Beckenablagerungen im Modell vom südlichen Emsufer zum nördlichen Emsufer hin schräg ab, von etwa 11 m unter NN auf etwa 15 m unter NN. Abb. 37 verdeutlicht dies durch Kennzeichnung des als unerodierbaren Bodens und Abb. 38 zeigt die Umsetzung in das Bodenmodell.

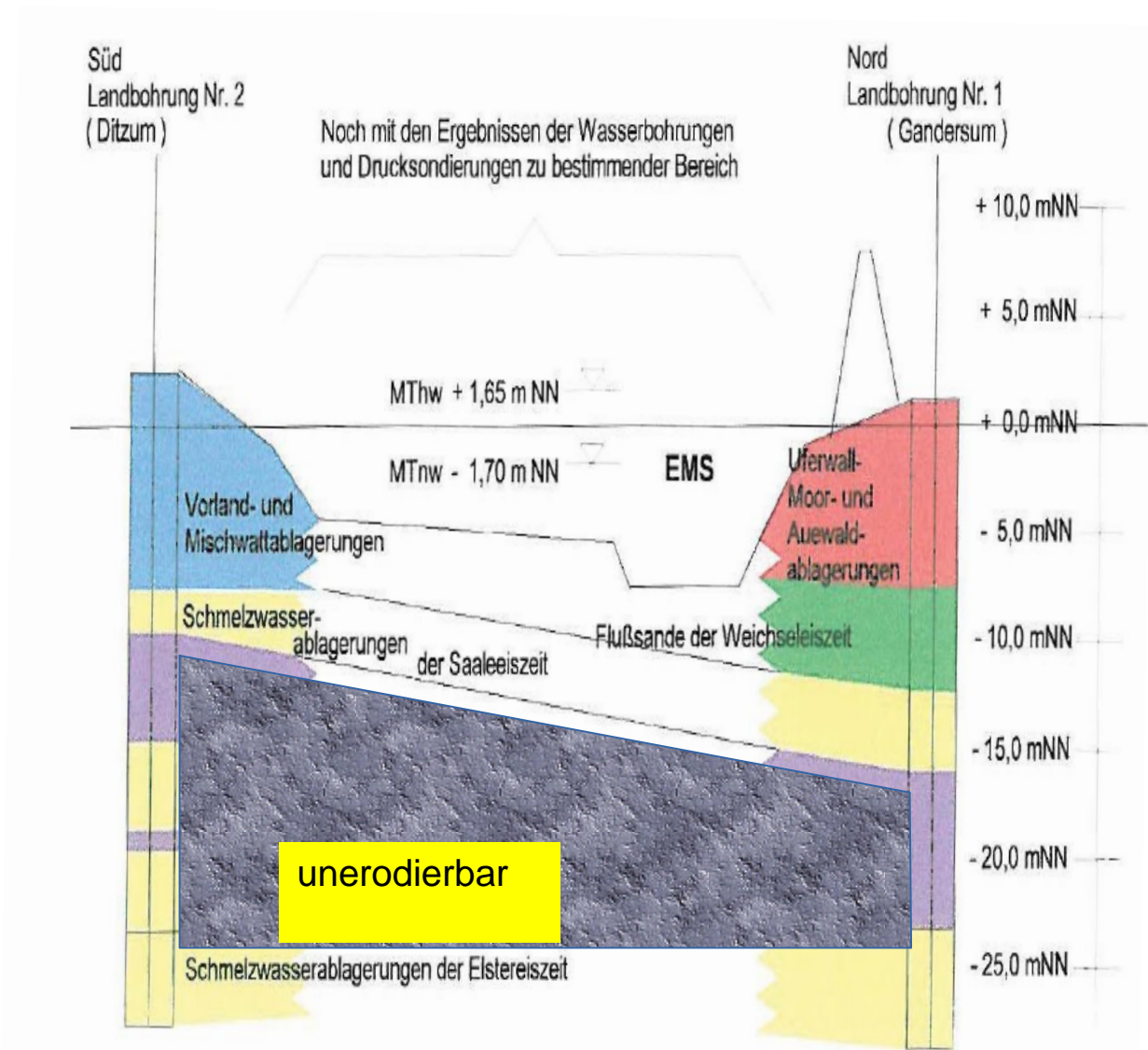


Abb. 37: Bohrungsergebnisse mit hervorgehobenen, im Modell als unerodierbar angesetzten Beckenablagerungen der Elstereiszeit.

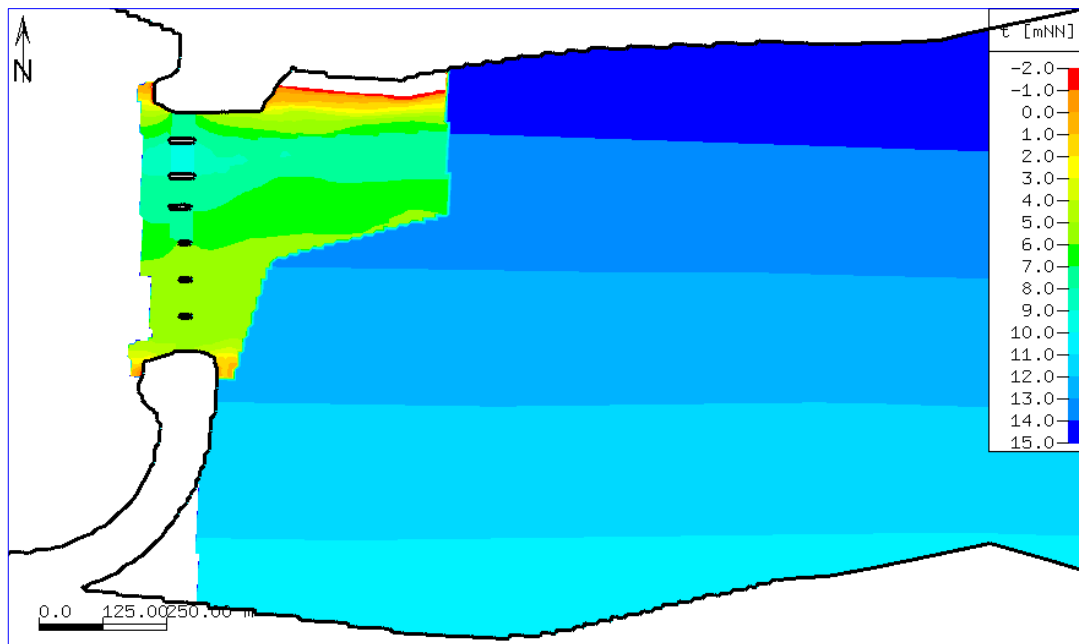


Abb. 38: Umsetzung der Beckenablagerungen der Elstereiszeit im Modell. Links, im Sperrwerksbereich die als Kolkchutz fixierte Sohle, Blau, von Süd nach Nord fallend, die unter der Oberfläche liegende Oberfläche der Beckenablagerungen.

Abb. 39 gibt das Ergebnis für die Variante 1b nach einem Berechnungsjahr wieder.

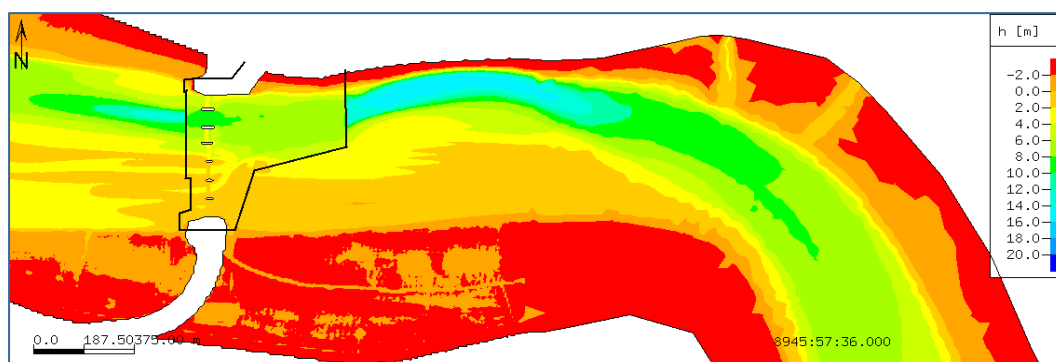


Abb. 39: Berechneter Kolk im Falle unerodierbarer Beckenablagerungen nach rd. 375 Tagen. Bis auf die Berücksichtigung der Beckenablagerungen gleiche Randbedingungen wie bei Variante 1.

Die Ergebnisse sind wie folgt kurz beschrieben:

- Im Falle einer durch die Beckenablagerungen behinderten Erosion der Sohle pendelt der Kolk nach den Modellergebnissen nicht.
- Er hat vielmehr die Tendenz, am nördlichen Ufer anzuliegen.
- Der Grund ist in der nach Norden hin abfallenden und als nicht erodierbar in Ansatz gebrachten Beckenablagerung zu sehen.
- Weiterhin wird der Kolk durch die von den Beckenablagerungen bewirkte Tiefenbegrenzung in der Fläche größer als im Falle einer durchgehend erodierbaren Sohle, wie ein Vergleich zwischen den Abbildungen 39 und 34 zeigt.

Nebeneffekte im Nahfeld des Sperrwerks bei den Varianten 1a und 1b

Bei beiden Varianten stellten sich mit der Zeit zunehmende Sedimentationen (Auflandungen) im südlichen Bereich des Sperrwerks ein. Ursache hierfür war die Tatsache, dass unter den teilgeöffneten Schützen der Nebenöffnungen im Zustand der Betriebssteuerung Sediment hindurchtritt. Weiter nach oberstrom fällt die Strömungsgeschwindigkeit wegen der Kontinuitätsbedingung stark ab: Die durchströmte Wassertiefe erweitert sich von dem Wert der Öffnungshöhe auf die gesamte Wassertiefe. Folge ist ein entsprechend starker Abfall der Sediment-Transportkapazität. Mit anderen Worten, es bleibt bei jeder Teilspernung Sediment liegen. Dieses Sediment konnte im Modell bei der nachfolgenden Ebbe nicht vollständig wieder abgetragen werden. Das veränderte mit der Zeit die gesamten Strömungen im südlichen Bereich mit der Folge großräumiger Auflandungen. Abbildung 40 verdeutlicht dies.

Für die Kolksicherheit zu beachten ist darüberhinaus, dass die Strömungskonzentration, insbesondere im Zustrom zur HSÖ, zu Erosionen der Sohle führen, die dort ebenfalls Sicherungsmaßnahmen erfordern (vgl. z.B. Abb. 40, markierte Bereiche).

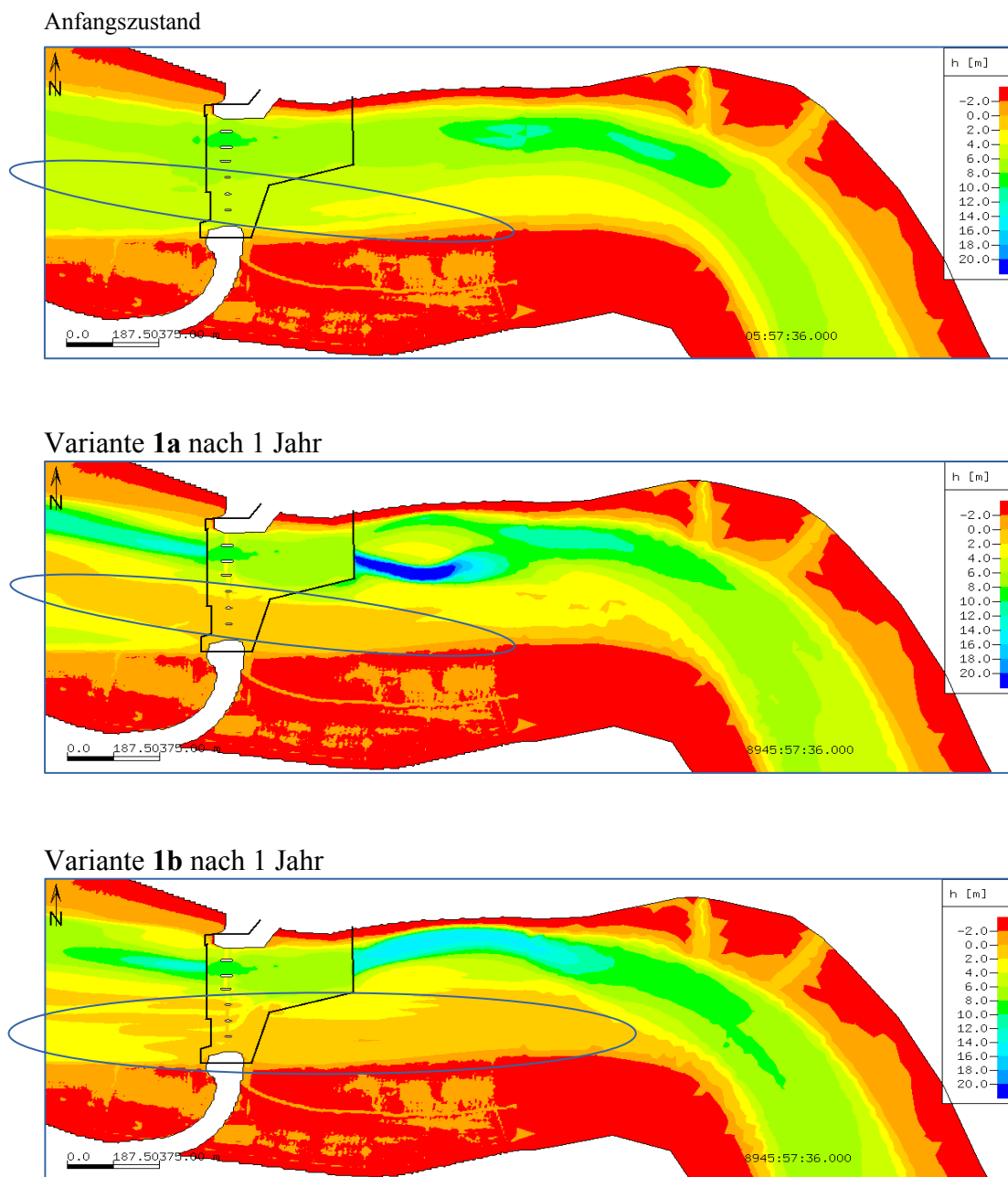


Abb. 40: Topographie im Bereich des Südufers. Oben Startzustand, Mitte Variante 1a nach 1 Berechnungsjahr, Unten Variante 1b nach 1 Berechnungsjahr

5.6.2.2 Variante 2

Als Ergebnis der Besprechung vom 17.08.2015 in Aurich sollte mit Variante 2 geklärt werden, ob eine stärkere Strömung im Bereich der südlichen Nebenöffnungen den Verlandungen im Bereich des Südufers entgegen wirken kann. Für die Variante 2 wurde in diesem Sinne folgende Torsteuerung vorgesehen:

NÖ3-NÖ5: Öffnung 1,2m NÖ1,BSÖ,NÖ2: Öffnung 1m

Gleichzeitig sollte die Wirkung unterschiedlicher Ausführungen des Kolkschutzes untersucht werden:

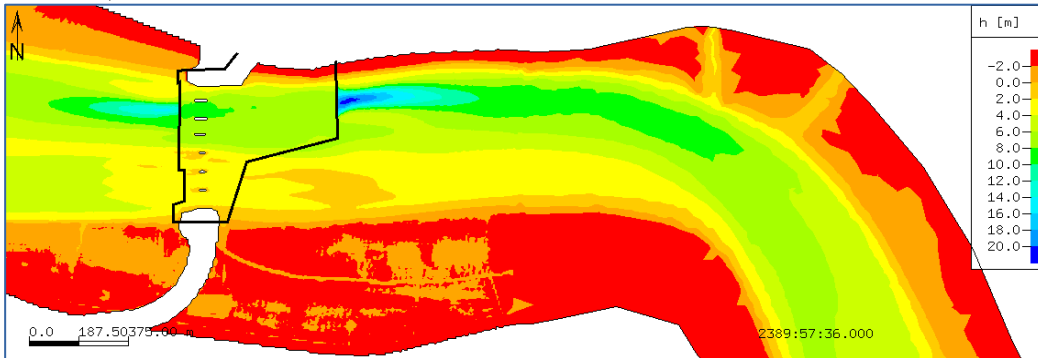
- Variante 2a: Kolkschutz durch fixierte Sohle in der vorhandenen Tiefenlage der Sohle, wie in Variante 1
- Variante 2b: Umriss des Kolkschutzes wie in Variante 1, jedoch bereichsweise in Strömungsrichtung fallend, d.h. unter den im Anfangszustand anstehenden Boden abtauchend.

Variante 2a

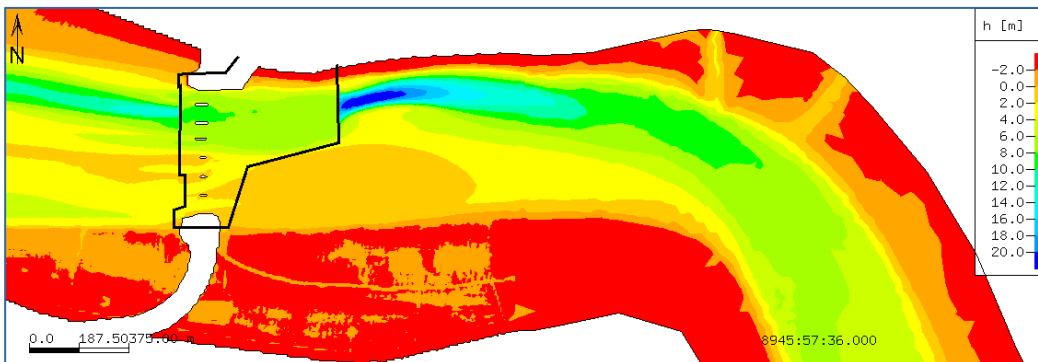
Variante 2a unterscheidet sich von Variante 1a nur durch weitere Öffnung der teilgeöffneten Tore. Abb. 41 gibt die Berechnungsergebnisse wieder. Zwar fallen die Auflandungen im südlichen Bereich etwas geringer aus als in Variante 1a, jedoch sind diese nach wie vor von einer nicht tragbaren Größenordnung. Der Kolk blieb im Untersuchungszeitraum deutlich lagestabiler als bei Variante 1a, jedoch lag er permanent am Nordufer an mit der Folge dort starker Erosionen.

Die maximalen berechneten Tiefenlagen im Kolk erreichten um 30 m unter NN.

rd. 0,5 Jahre Variante 2a



rd. 1 Jahr



rd. 1,5 Jahre

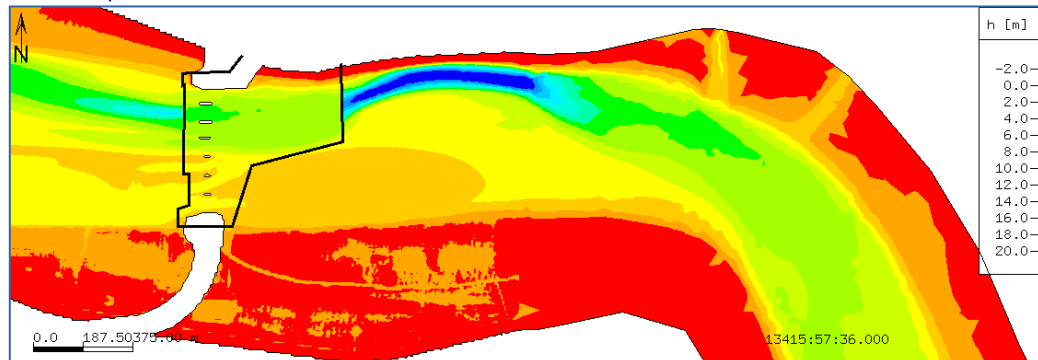


Abb. 41: Berechnete Kolkentwicklung unter den Randbedingungen der Variante 2a

Variante 2b

Variante 2b unterscheidet sich von Variante 2a nur durch das Fallen der Kolk­schutzfläche in Strömungsrichtung bis auf eine Tiefe von 20 m unter NN. Abb. 42 zeigt hierzu die Kolk­schutzfläche im Grundriss und entlang der roten Schnittlinie. Die Berechnungsergebnisse sind auf Abb. 43 für ½ Jahr, 1 Jahr und 1½ Jahre wiedergege­ben. Sie lassen keine Verbesserung der Kolk­situation hinsichtlich Kolk­tiefe und Lage erkennen. Im Gegenteil ergab sich eine deutliche Tendenz zu verstärkter Erosion des nördlichen Ufers im Vergleich zum Fall einer sohlenparallelen Kolk­schutzfläche (vgl. Abb. 43).

Die maximalen berechneten Tiefenlagen im Kolk erreichten auch bei dieser Variante außerhalb der gesicherten Kolk­schutzfläche (auf Abb. 43 gestrichelt) um 30m unter NN.

Für die Kolk­Sicherheit zu beachten ist auch bei den Varianten 2a und 2b, dass die Strömungskonzentration, insbesondere im Zustrom zur HSÖ, zu Erosionen der Sohle führen, die dort ebenfalls Sicherungsmaßnahmen erfordern (vgl. z.B. Abb. 41).

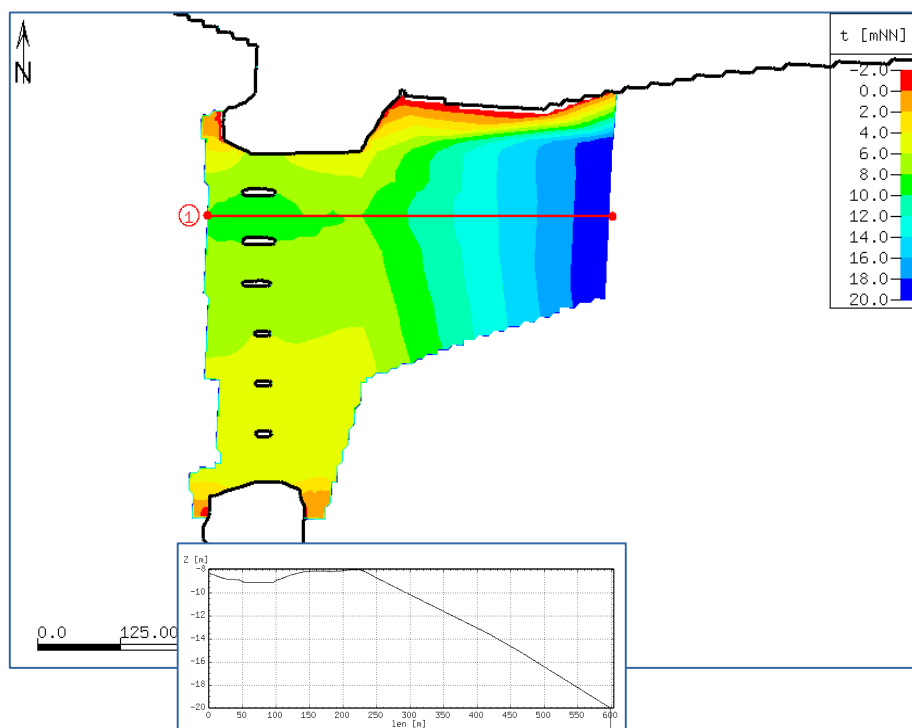
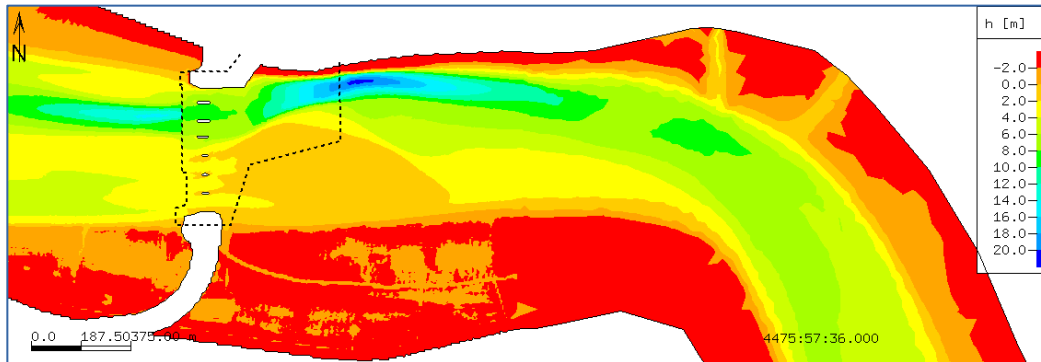
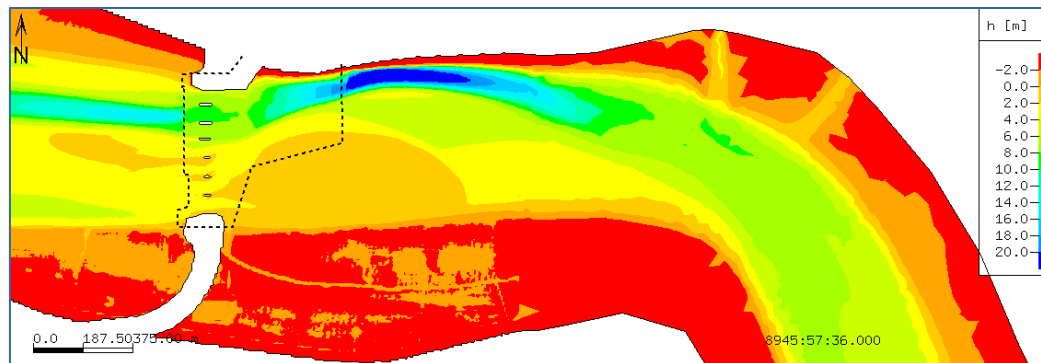


Abb. 42: Realisierung des bereichsweise fallenden Kolk­schutzes im Modell

rd. 0,5 Jahre Variante 2b



rd. 1 Jahr



rd. 1,5 Jahre

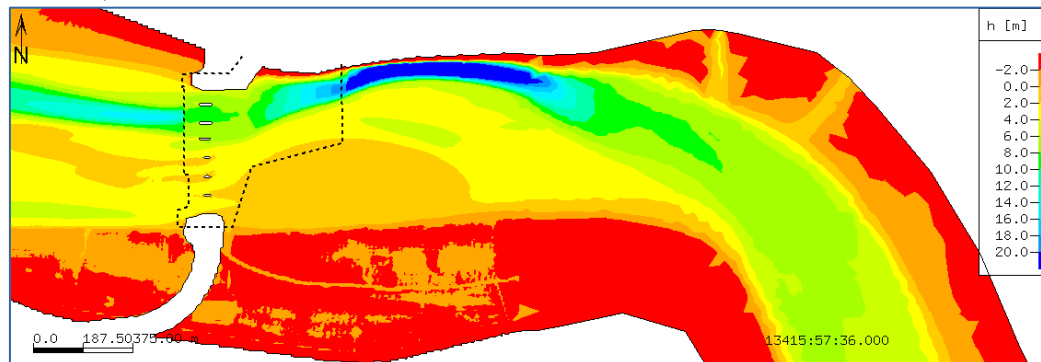


Abb. 43: Berechnete Kolkentwicklung unter den Randbedingungen der Variante 2b. Die Strichelung des Umrisses der Kolk Schutzfläche kennzeichnet den Unterschied zu den obigen Varianten: Hier fällt die Fläche gemäß Abb. 42 auf -20 mNN ab.

Bewertung der Ergebnisse zu Variante 2:

Die weitere Öffnung der Schütze der NÖs 3 bis 5 von $a=0,7\text{m}$ auf $a=1,2\text{ m}$ Öffnungshöhe (neue Torsteuerung) führte nicht zu einer signifikanten Verminderung der Auflandungen am südlichen Ufer.

Sowohl bei einem Kolkschutz auf Höhe der bestehenden Sohle als auch bei fallendem Kolkschutz führen die Auflandungen in Lee der südlichen NÖs zu einem Abdrängen des Hauptstromes nach Norden und einer Neugestaltung der Emssohle im Nahfeld des Sperrwerks. Diese Auflandungen haben ihren Ursprung sowohl bei der alten, als auch bei der neuen Torsteuerung darin, dass während der Zeit mit Teilöffnung Sediment durchtritt, das nicht weiter transportiert werden kann. Kurz nach dem Durchtritt fällt die Strömungsgeschwindigkeit wegen der Querschnittserweiterung von Tor-Durchflusshöhe auf die Wassertiefe der Ems stark ab und ein Teil der Sedimente fällt aus. Offensichtlich können sie bei der nächsten Ebbe nicht vollständig wieder erodiert werden.

Folge ist, dass die gewählten Lösungs- bzw. Betriebsarten zu nachteiligen morphologischen Änderungen führen.

Lösungsansatz Trenndamm

Aus den bisher ausgeführten Versuchen läßt sich folgern, dass eine Koexistenz der

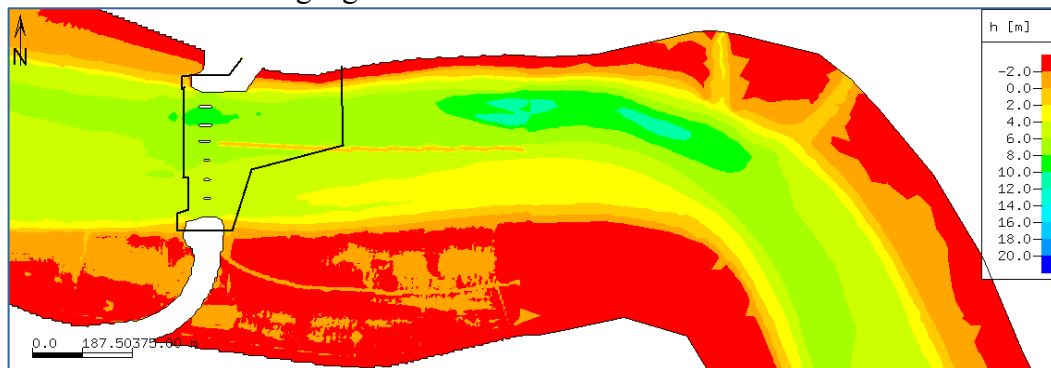
- Strahlströmungen im Bereich HSÖ/BSÖ einerseits und des
- Strömungsschattens hinter den NÖs2-5 andererseits

bei gleichzeitigem Erhalt des heutigen Emsbettes (außerhalb der in jedem Fall entstehenden Kolke) grundsätzlich nicht möglich ist. Diese beiden Strömungsklimata beeinflussen sich gegenseitig. Sie formen mit der Zeit ein dazu passendes, neues Emsbett.

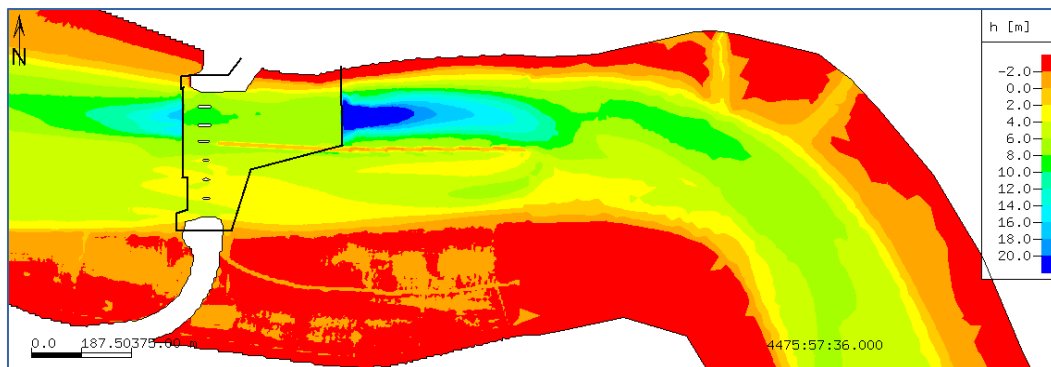
Mithin kann eine Trennung dieser beiden unterschiedlichen Strömungsklimata bessere Verhältnisse herstellen. Eine solche Trennung ist z.B. durch einen Leit-/Trenndamm erreichbar.

Durch Einbau eines Trenndamms in einer zunächst exemplarischen Anordnung konnte die nachteilige Auflandung im südlichen Bereich der Ostseite des Emssperrwerks wie erwartet unterbunden werden, wie Abb. 44 zeigt.

0 Jahre = Sohle im Ausgangszustand



0.5 Jahre



1 Jahr

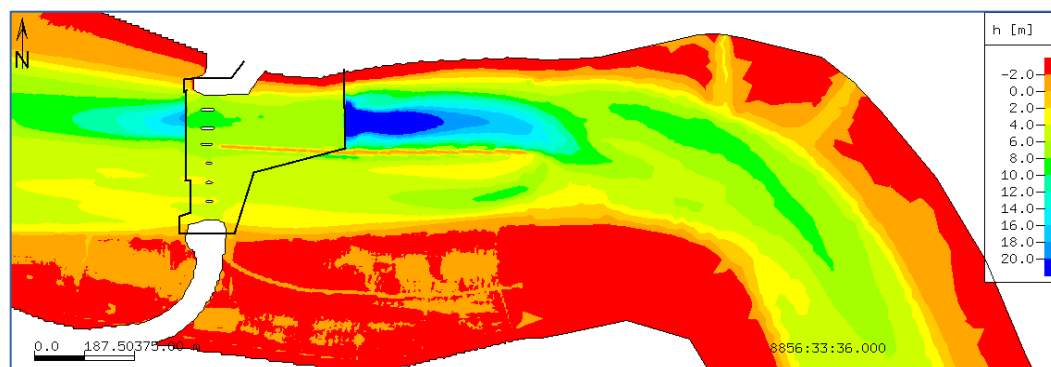


Abb. 44: Berechnete Kolkentwicklung mit Leitdamm. NÖ1, HSÖ und BSÖ voll offen, NÖ2 bis NÖ5 geschlossen.

Auch die Lage des Kolkes blieb stabiler. Ein Pendeln trat nicht auf. Mit der Lösung eines Trenndamms lassen sich offensichtlich einerseits stabile Kolke erzielen und andererseits die massiven Bettumformungen erheblich reduzieren, die ohne einen Trenndamm aufgetreten waren.

Von Nachteil bei dieser Lösung sind hingegen die zu erwartenden Kosten für Herstellung und Unterhaltung und die nach wie vor tiefen Kolke. Daher wurde dieser Lösungsansatz nicht weiter verfolgt. Stattdessen wurde, im Rahmen der Untersuchung der Machbarkeit, die Vorgabe einer stets geöffneten HSÖ dahingehend abgeändert, dass die HSÖ mit in die Betriebssteuerung einbezogen wird.

Variante 3

Die morphodynamischen Modellrechnungen zu den Varianten 1 und 2 hatten gezeigt, dass die erheblich unterschiedlichen Strömungsklimata mit sehr hohen Geschwindigkeiten im Abstrom aus der HSÖ und vergleichsweise niedrigen Geschwindigkeiten hinter den südlich der HSÖ gelegenen, teilbetriebenen Öffnungen zu starken Umformungen des Emsbettes führen. In dem schwach durchströmten südlichen Bereich stellten sich Auflandungen ein, die zu einem Abdrängen des aus der HSÖ austretenden Strahls nach Norden hin führten. Daraus resultierten Kolke von großer Tiefe bis hin zu Tiefstwerten um 30 m unter NN. Unter den Randbedingungen der Variante 1 stellte sich überdies ein Hin- und Herpendeln des Kolkes mit zeitweisen Untertiefen in der Schifffahrtsrinne ein (vgl. Abb. 34 und 36). Insbesondere bei Variante 2b wurde das nördliche Ufer stark angegriffen. Aus diesen Erfahrungen heraus wurde erwogen, die bisher als stets voll offen vorgegebene HSÖ versuchsweise bei der Betriebssteuerung geschlossen zu halten. In der Ergebnisbesprechung vom 05. November 2015 wurden die weiteren Randbedingungen für diesen Versuch erörtert und wie folgt festgelegt:

Variante 3a:

NÖ1 + BSÖ + NÖ2 Öffnungshöhe der Schütze $a = 1,75\text{m}$

NÖ3 + NÖ4 + NÖ5 Öffnungshöhe der Schütze $a = 2,00\text{m}$

Variante 3b:

NÖ1 + BSÖ + NÖ2 Öffnungshöhe der Schütze $a = 2,50\text{m}$

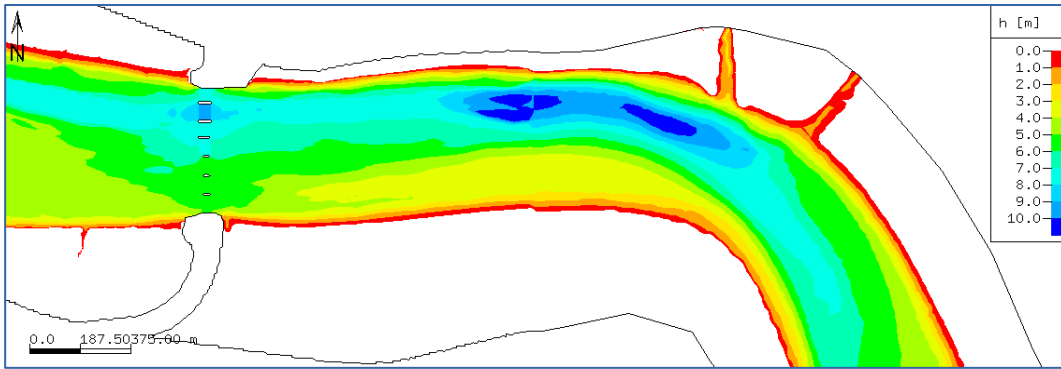
NÖ3 + NÖ4 + NÖ5 Öffnungshöhe der Schütze $a = 2,75\text{m}$

Aufgrund des Wegfalls des hochenergetischen Strahls aus der HSÖ bei Variante 3 wurde weiterhin vereinbart, den heute bestehenden Kolkenschutz in der Modellierung zugrunde zu legen. Bei den Varianten 3a und 3b traten dann auch erheblich kleinere Kolke auf als bei den Untersuchungen mit stets offener HSÖ. Um eine gute Lesbarkeit der Information in den Ergebnisabbildungen zu gewährleisten, wurde auf eine andere Tiefenskala übergegangen. Diese umfasst nachfolgend anstelle des auf den vorstehenden Abbildungen dargestellten Tiefenbereichs von 2 m üNN bis 20 m uNN nunmehr den Bereich von NN bis 10 m unter NN.

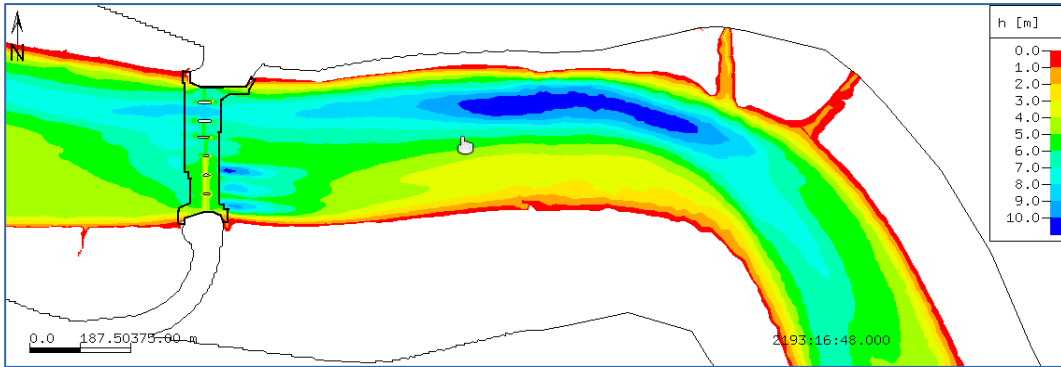
Variante 3a

Abb. 45 gibt die Ergebnisse der Modellierung zu Variante 3a wieder. Sie zeigt die Kolkentwicklung in 9 Teilabbildungen von 0 bis 2 Jahren in 1/4-jährlichen Zeitstufen:

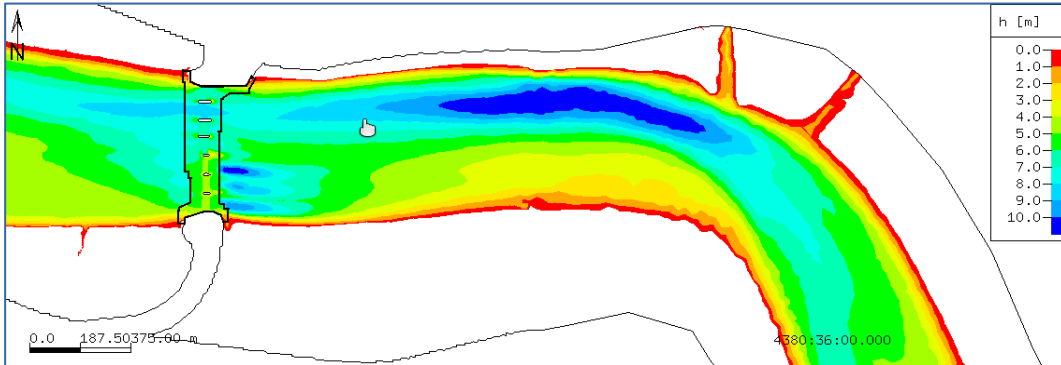
0 Jahre **Variante 3a**



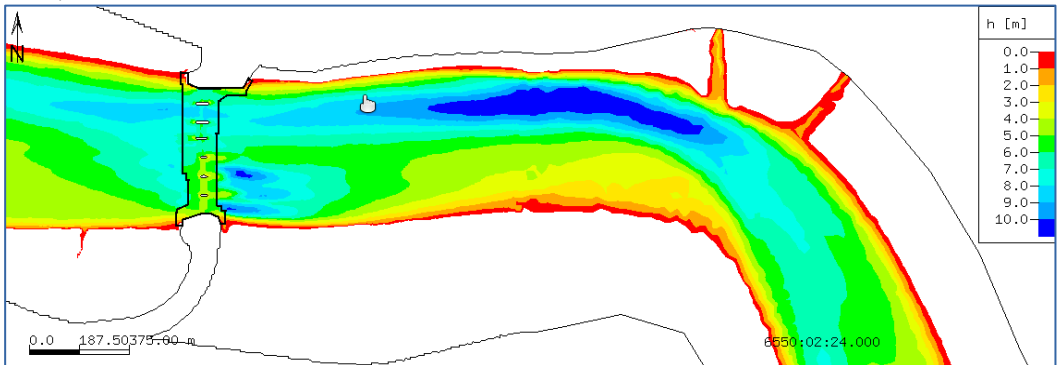
0,25 Jahre



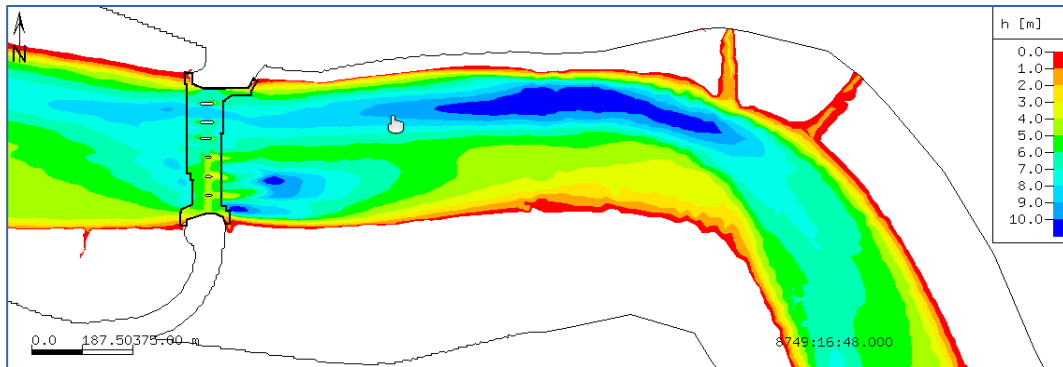
0,5 Jahre



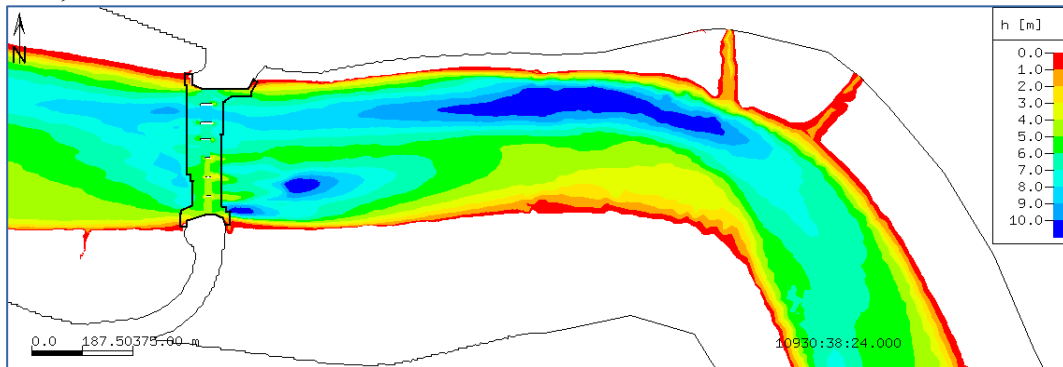
0,75 Jahre



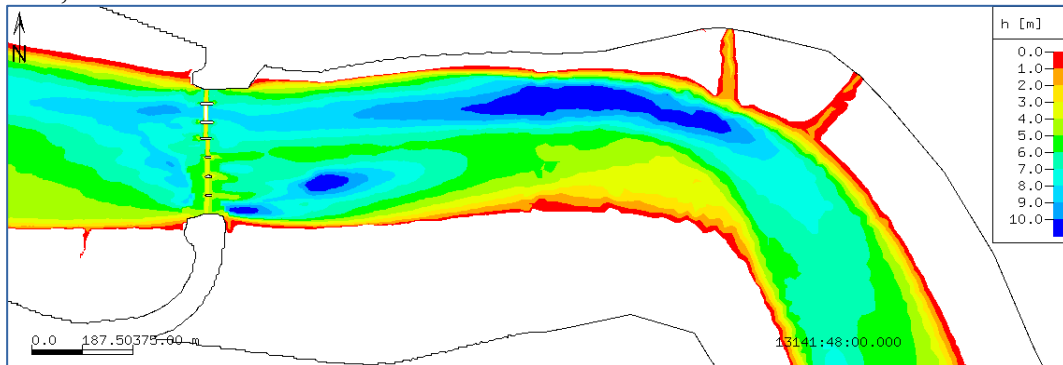
1 Jahr **Variante 3a**



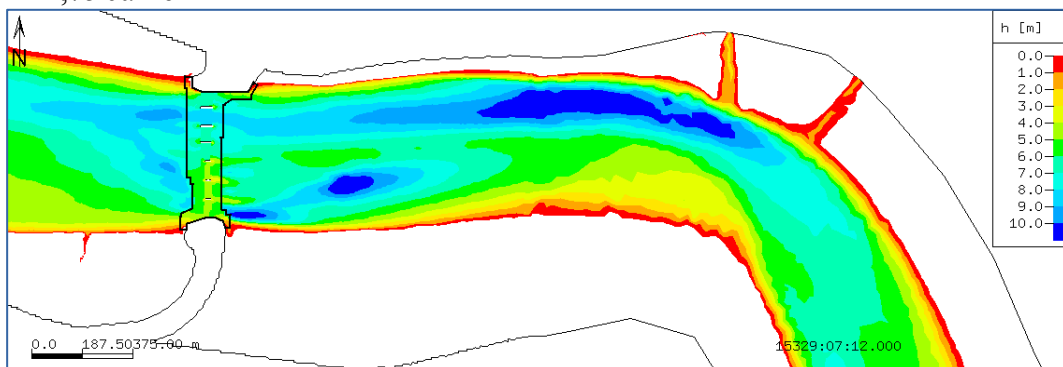
1,25 Jahre



1,5 Jahre



1,75 Jahre



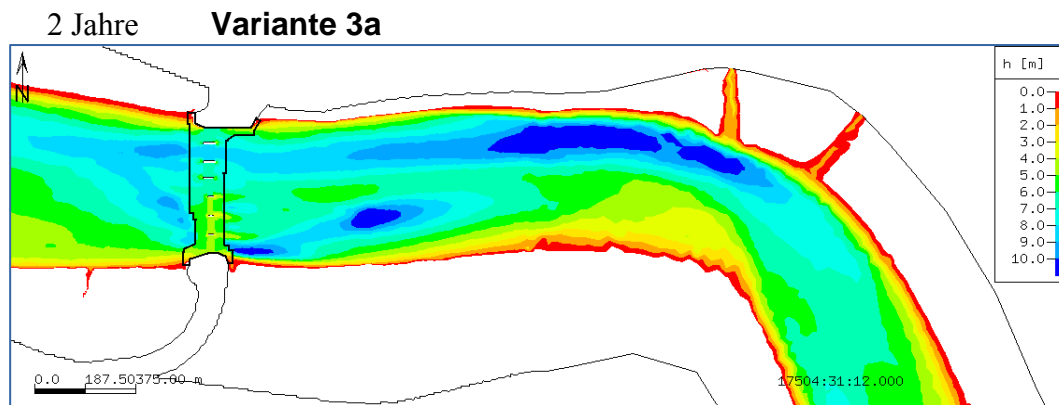


Abb. 45: Berechnete Kolkentwicklung für die Betriebssteuerung zu Variante 3a.

Variante 3b

Die Randbedingungen der Variante 3b unterscheiden sich von denen der Variante 3a durch eine weitere Öffnung der teilgeöffneten Schütze. Die Betriebsbedingungen sind wie folgt

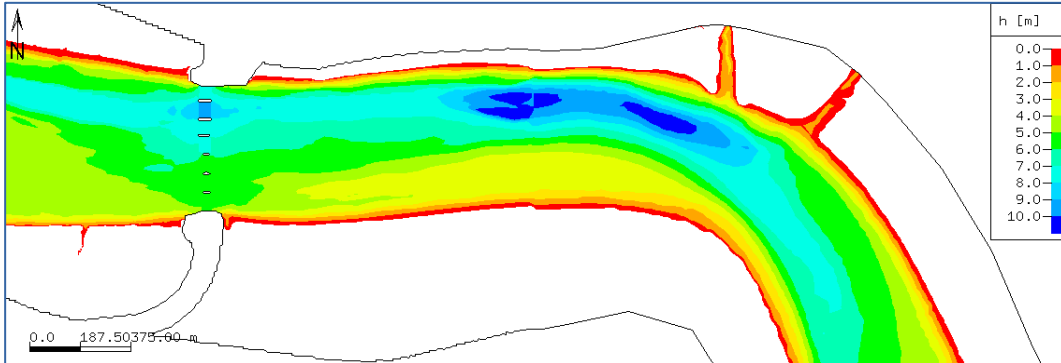
Umriss der Kolkschutzfläche wie z.Zt. am Emssperrwerk vorhanden

Schützöffnungshöhen NÖ3,4,5: 2,75m NÖ1,BSÖ,NÖ2: 2,5m

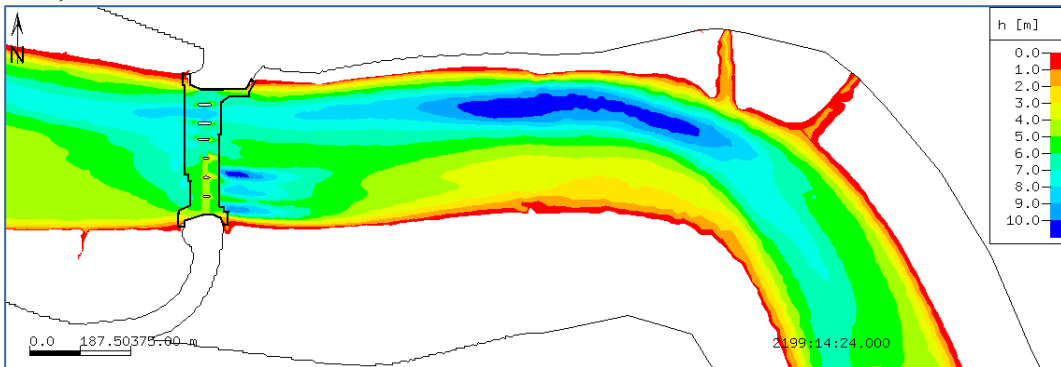
Betrieb der HSÖ geschlossen

Abb. 46 gibt die Ergebnisse der Modellierung zu Variante 3b analog zu jenen der Variante 3a (Abb45) wieder. Sie zeigt die Kolkentwicklung in 9 Teilabbildungen von 0 bis 2 Jahren in 1/4jährlichen Zeitstufen:

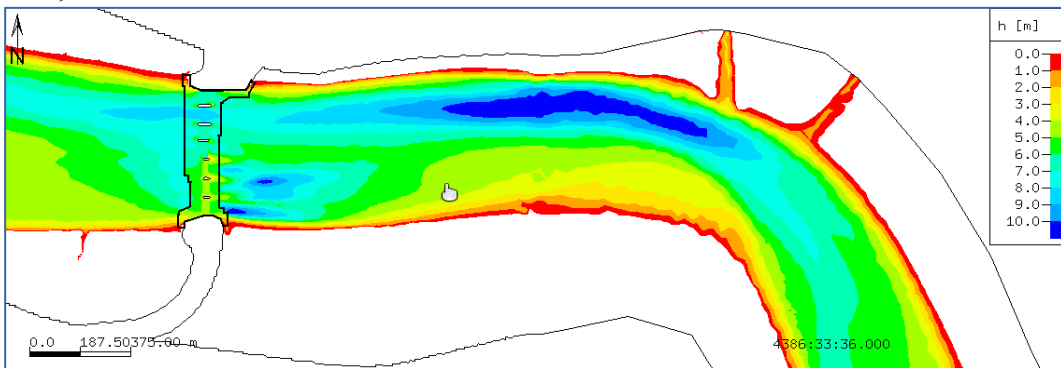
0 Jahre **Variante 3b**



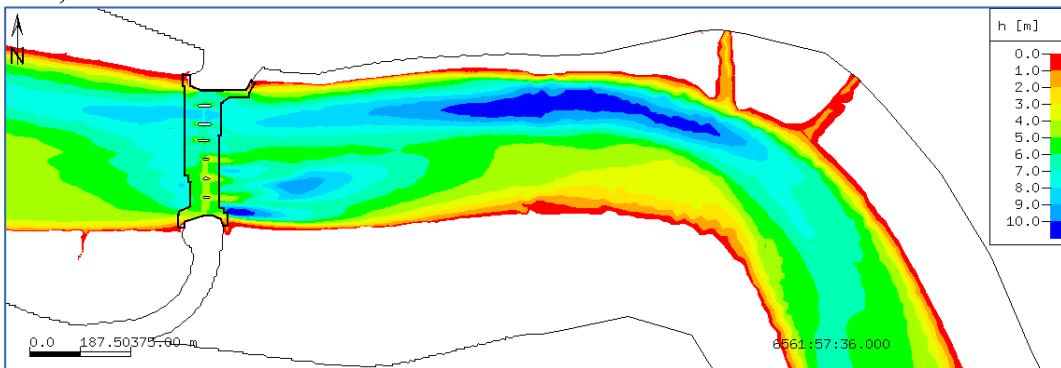
0,25 Jahre



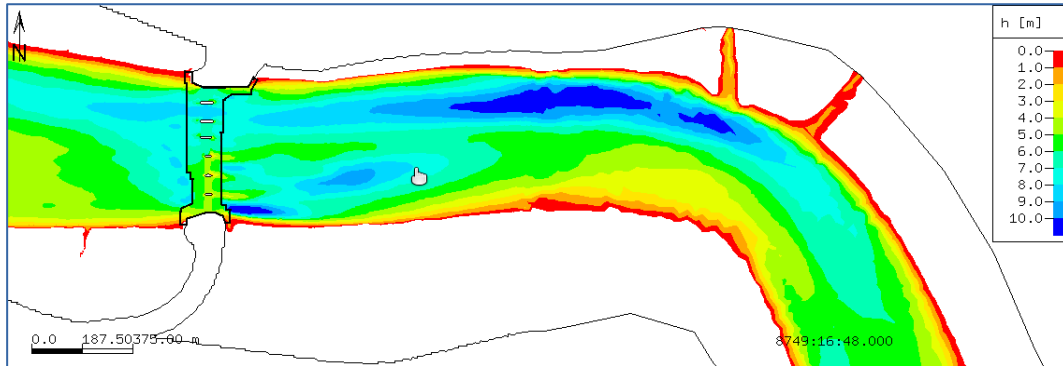
0,5 Jahre



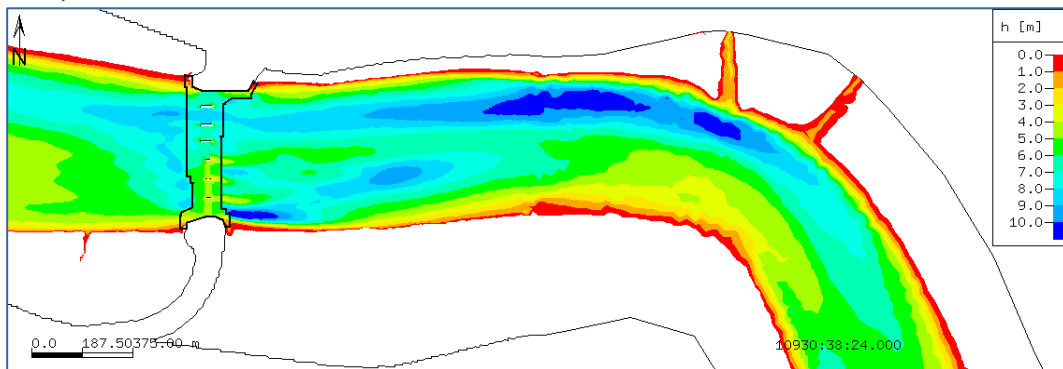
0,75 Jahre



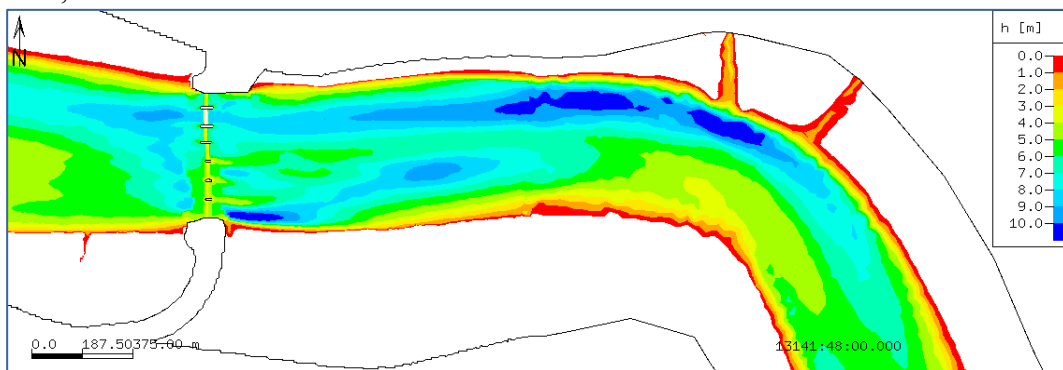
1 Jahr Variante 3b



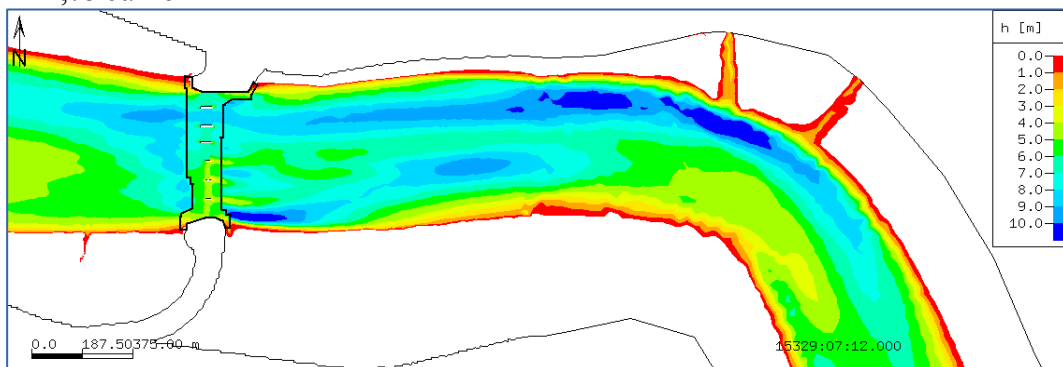
1,25 Jahre



1,5 Jahre



1,75 Jahre



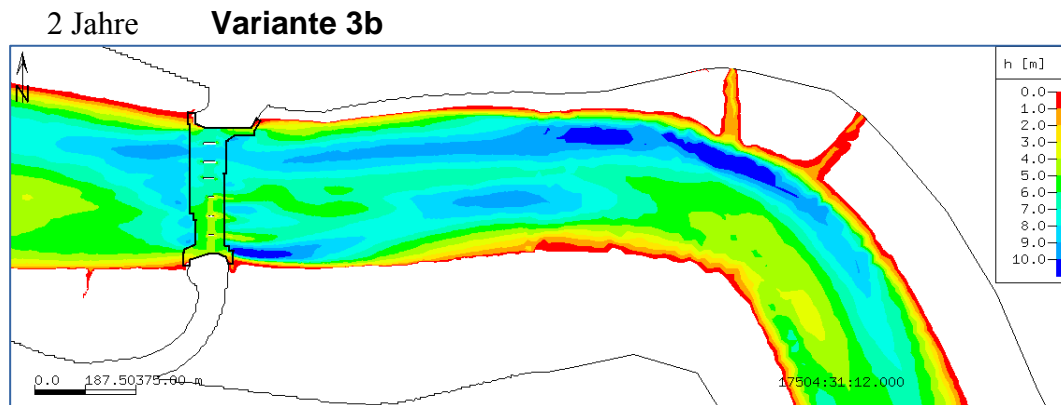


Abb. 46: Berechnete Kolkentwicklung für die Betriebssteuerung zu Variante 3b.

Bewertung der Varianten 3a und 3b

Durch die Umverteilung der HSÖ-Durchflüsse auf die übrigen Sperrwerksöffnungen ergibt sich eine relativ stärkere Beaufschlagung der südlichen Öffnungen. Das Emsbett passt sich diesen neuen Strömungsbedingungen an und macht den Zustrombereich leistungsfähiger: Der Zustrombereich vertieft sich, wie sich aus den Abb. 45 und 46 an der südlichen Seeseite des Sperrwerks deutlich erkennen läßt.

Bei beiden Varianten zeigte sich eine Tendenz der Kolke hinter den Nebenöffnungen zu einer Vereinigung der Kolke (s. Variante 3a nach 1 Jahr und Variante 3b nach 1/2 Jahr). Dieser Kolk wandert dann in Richtung Ostnordost und schiebt eine Kolkbank vor sich her. Das ist eine Auflandungszone aus dem erodierten Sediment des Kolkes. Dadurch erfolgt zunächst eine Sedimentansammlung in der Innenkurve des Emsbogens bei Oldersum. Im weiteren zeitlichen Verlauf tritt dann aber eine Erosion in der Innenkurve ein, während ein Teil dieser Sedimente weiter um die Kurve herum stromauf wandert. Als Folge hiervon ergab sich eine Verschiebung der tiefen Rinne und eine Eintiefung der Aussenkurve.

Das generelle Bild dieser morphodynamischen Anpassungen ist bei beiden Varianten 3a und 3b einander ähnlich. Im Fall der weiter geöffneten Schütze (Variante 3b) laufen

die Vorgänge i.W. nur schneller ab. Grund sind die größeren Strömungsgeschwindigkeiten in der Ems hinter dem Sperrwerk. Folgende Bilder zeigen hierzu:

- Ähnliche morphologische Reaktion bei Variante 3a (1 Jahr) und Variante 3b (½ Jahr)....Abb. 47
- Ähnliche morphologische Reaktion bei Variante 3a (2 Jahre) und Variante 3b (1 Jahr)....Abb. 48
- Deutlich weiter fortgeschrittene Anpassung nach gleicher Zeit bei Variante 3b gegenüber Variante 3a wegen weiter geöffneter Schütze (Abb. 49 nach 1 Jahr, Abb. 50 nach 2 Jahren).

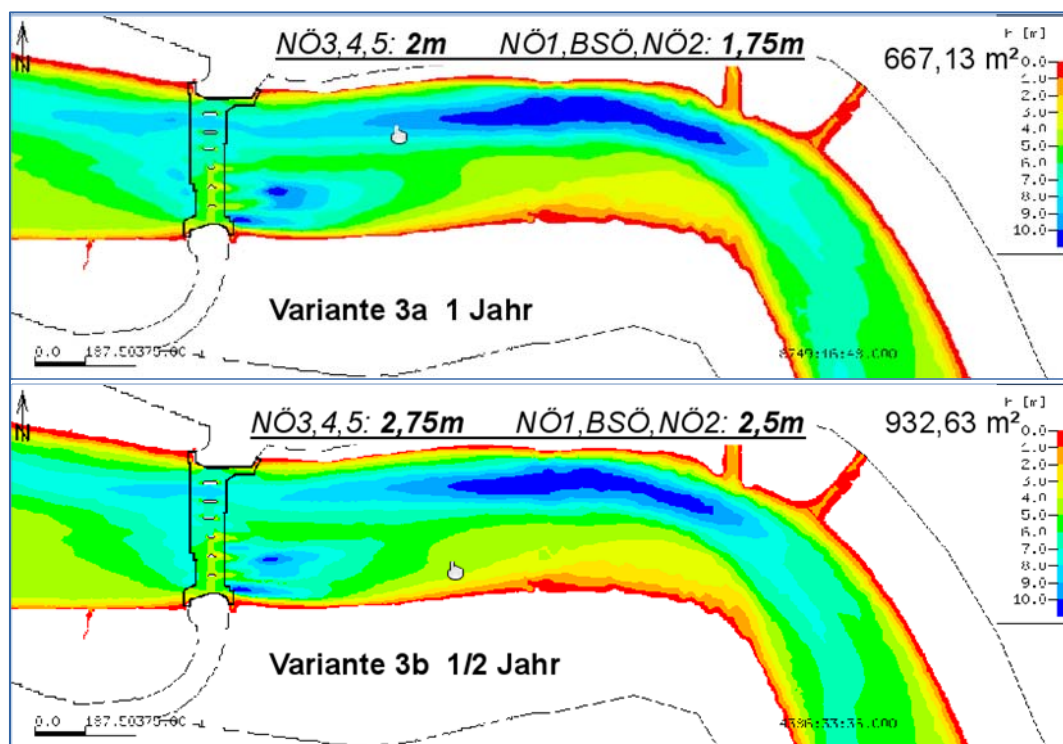


Abb. 47: Vergleich Variante 3a nach 1 Jahr und Variante 3b nach ½ Jahr. Rechts oben sind mit angegeben die Durchflussflächen unter NN.

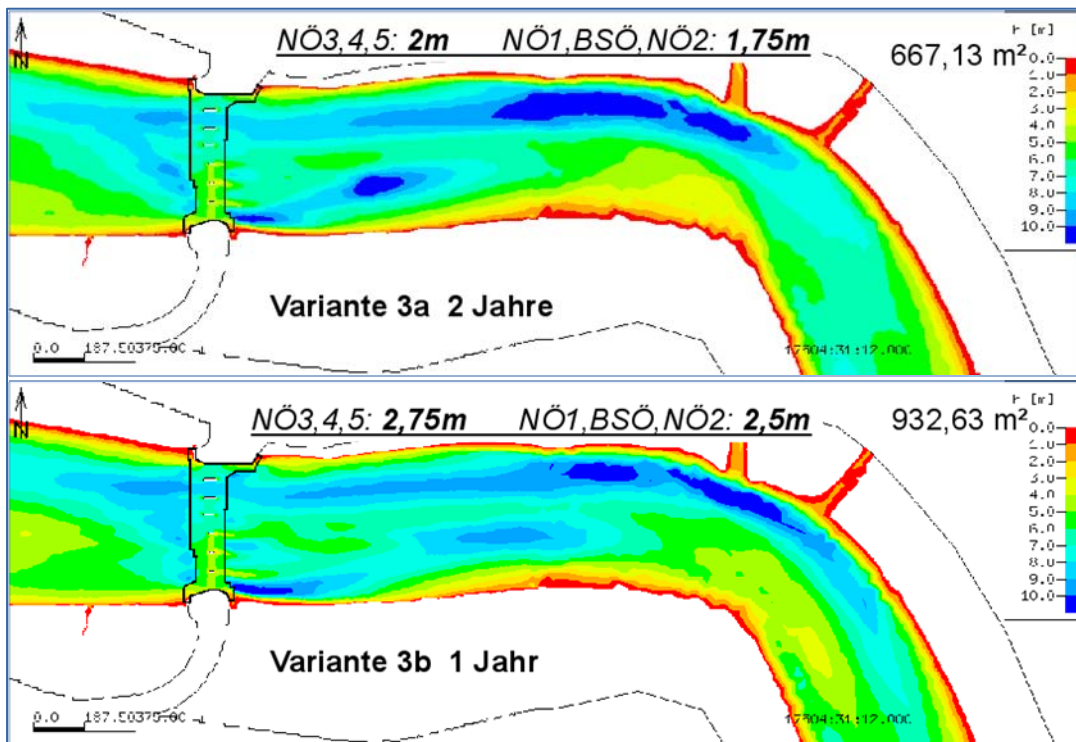


Abb. 48: Vergleich Variante 3a nach 2 Jahren und Variante 3b nach 1 Jahr. Rechts oben sind mit angegeben die Durchflussflächen unter NN.

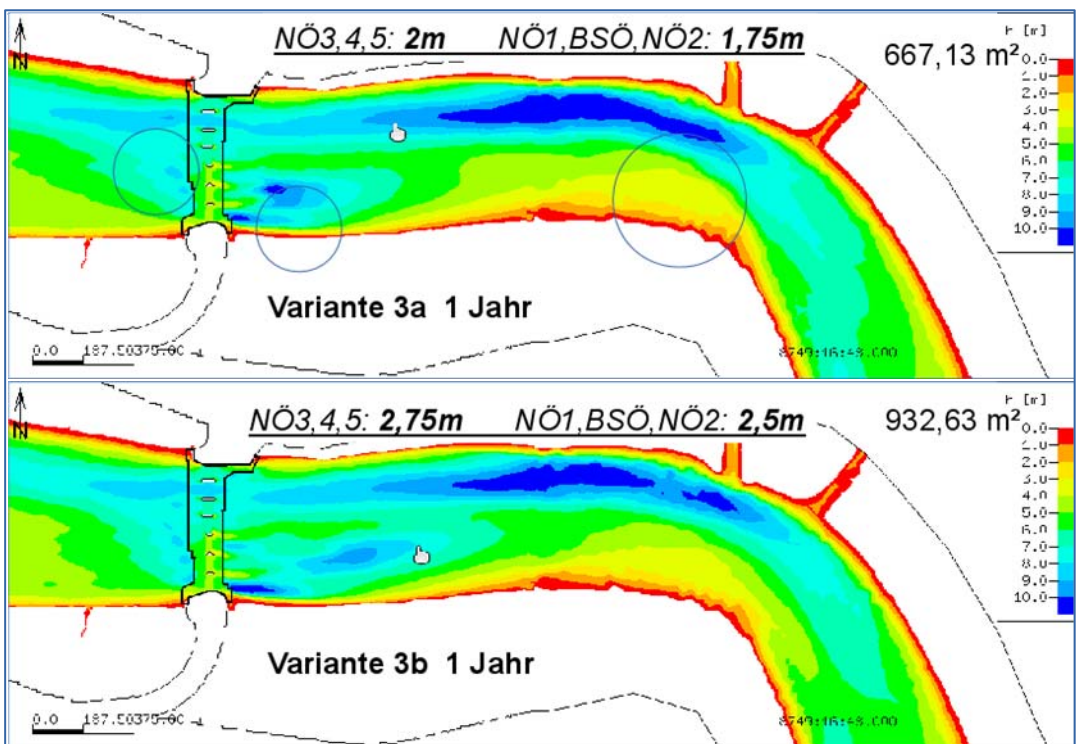


Abb. 49: Vergleich Variante 3a und Variante 3b nach jeweils 1 Jahr. Rechts oben sind mit angegeben die Durchflussflächen unter NN.

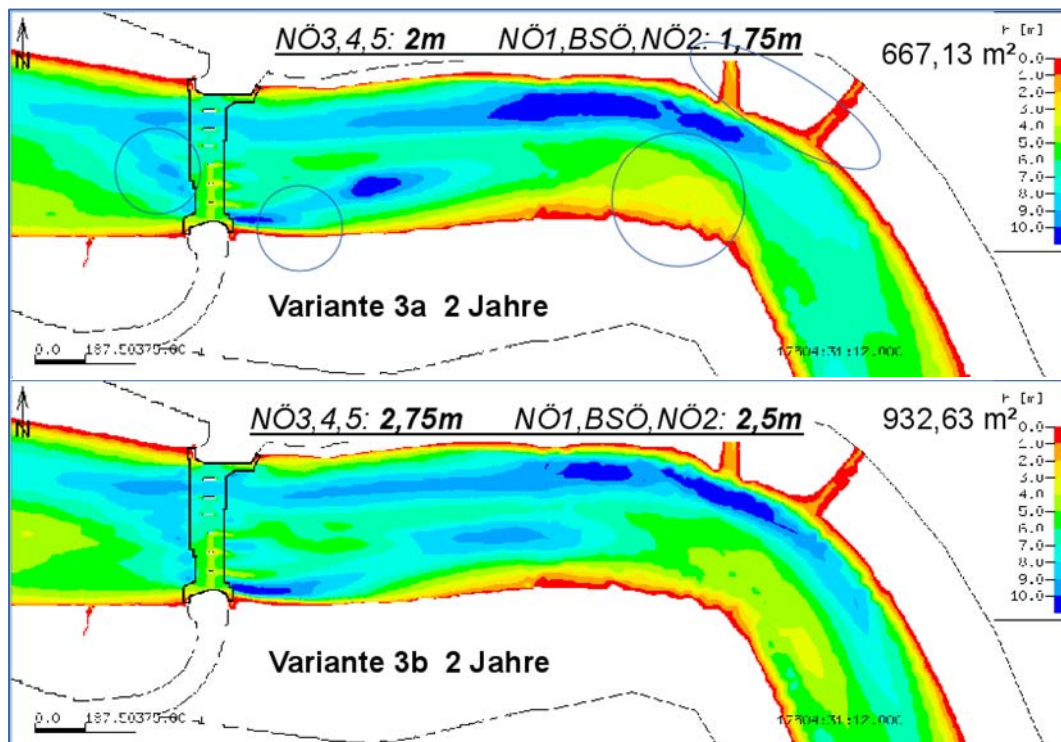


Abb. 50: Vergleich Variante 3a und Variante 3b nach jeweils 2 Jahren. Rechts oben sind mit angegeben die Durchflussflächen unter NN.

Die folgenden Abbildungen 51 und 52 geben die Berechnungsergebnisse nochmals auf andere Weise wieder. Flächenhaft sind die Tiefenänderungen dargestellt und für einige markante Positionen ist der berechnete zeitliche Verlauf der Änderung der Sohlenlage zu sehen. Die farbigen Kreise in den flächenhaften Darstellungen geben die Positionen der gleichfarbigen zeitlichen Tiefenentwicklung an. Die Kolke erreichten Tiefen von gut 7 m unter der ursprünglichen Sohle. Bei dem vom Bauwerk weg wandernden Kolk ist an der markierten Position (rot) bei beiden Varianten das Tiefenmaximum schon durchschritten, das der Kolk in seinem Tiefpunkt hat. Daher fällt die rote Verlaufskurve gegen Ende der 2 berechneten Jahre wieder ab.

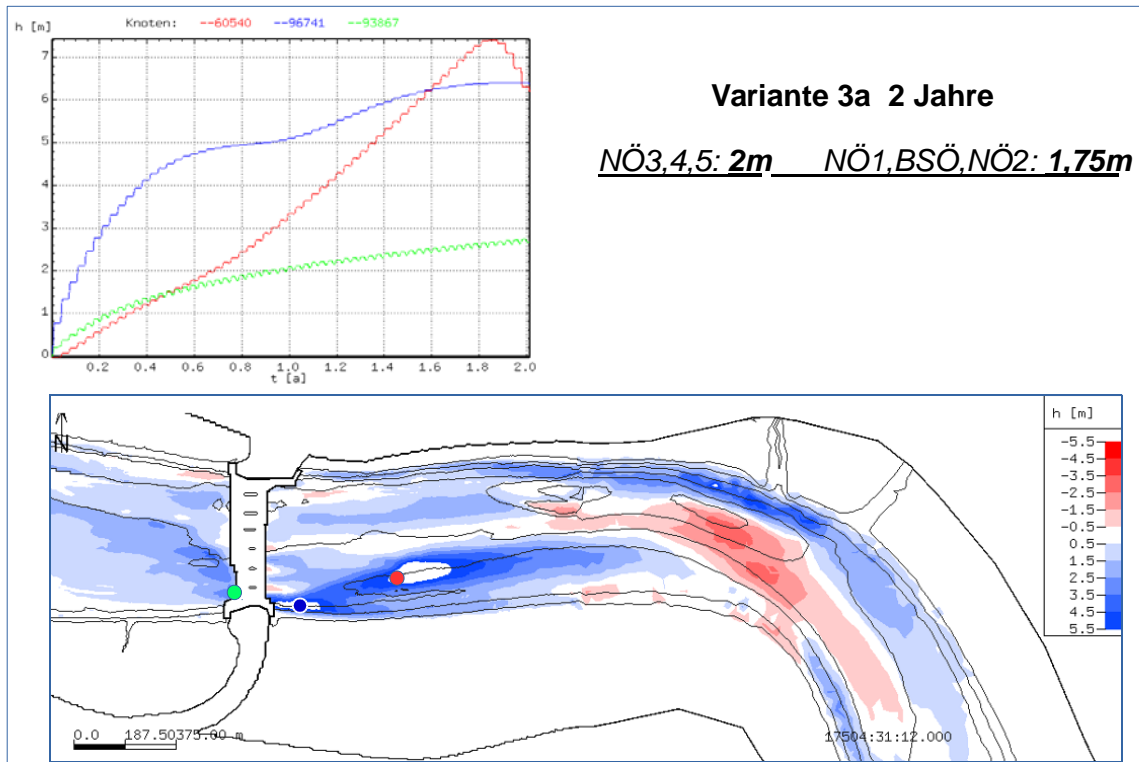


Abb. 51: Berechnete Kolkentwicklung Variante 3a, Oben: Zeitliche Entwicklung an ausgewählten Positionen. Unten: Tiefendifferenzen nach 2 Berechnungsjahren.

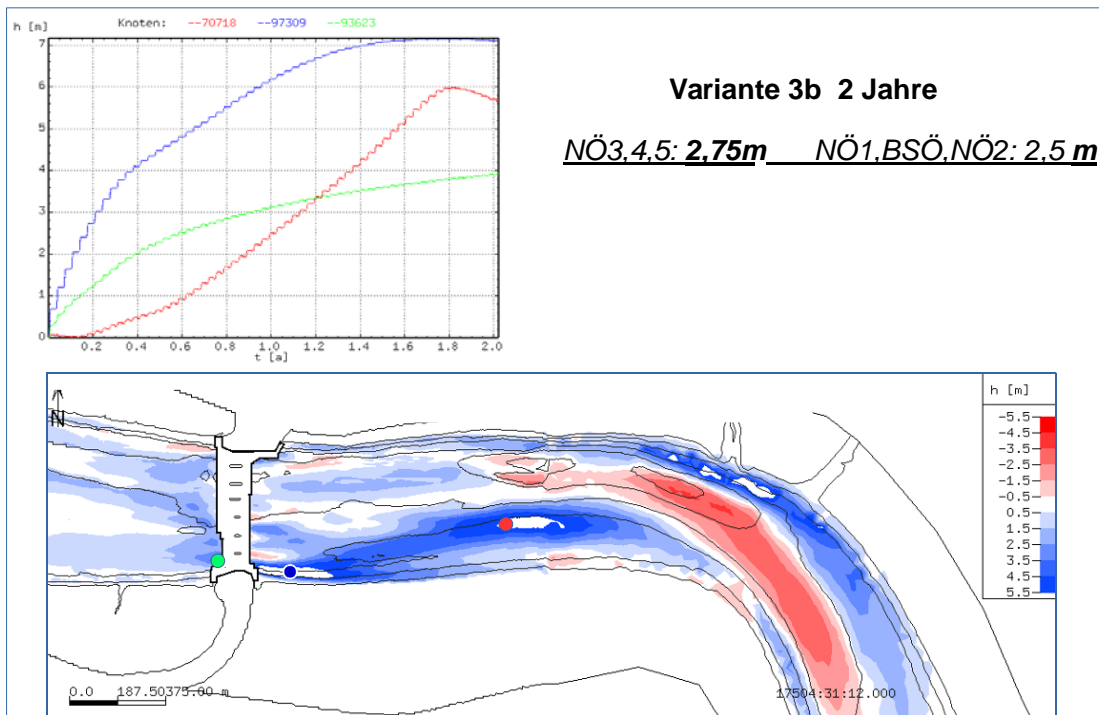


Abb. 52: Berechnete Kolkentwicklung Variante 3b, Oben: Zeitliche Entwicklung an ausgewählten Positionen. Unten: Tiefendifferenzen nach 2 Berechnungsjahren.

Generelle Beurteilung der Varianten 3a und 3b im Vergleich zu den Varianten 1 und 2 (nach 2 Jahren Simulationsdauer)

Durch die gleichmäßigere Verteilung der Durchflüsse und das Fehlen des Strahls aus der HSÖ bei den Varianten 3a und 3b entwickeln sich deutlich geringere Kolke als bei den Varianten 1 und 2.

Im Gegensatz zu den maximalen Tiefenlagen der Kolke von z.T. über 30 m uNN bei den Varianten 1 und 2 mit Betrieb der HSÖ, erreichen die Kolk-tiefen bei Variante 3 nur Werte um 10 m bis 12 m uNN bzw. Eintiefungen unter der jeweiligen Ausgangs-sole (GOK) um 6 m bis 7 m (s. Abb. 51 und 52).

Ursache sind die erheblich geringeren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Ems bei Variante 3. Die maximalen Geschwindigkeiten bei Variante 3b liegen hinter den Öffnungen nach Anpassung auf die im weiteren Emsverlauf vorherrschenden Tiefen

- unter rd. $v = 1,5$ m/s hinter NÖ3/4/5 und.

- unter rd. $v = 1$ m/s hinter NÖ1/BSÖ/NÖ2

Bei den Varianten 1 und 2 traten hingegen Werte von z.T. über $v = 4$ m/s auf.

Ein weiterer Effekt der geschlossenen HSÖ bei Betriebssteuerung wurde im Bereich der stromauf anschließenden tiefen Rinne der Ems festgestellt. Die Rinne vertiefte sich zwischen dem Sperrwerk und dem im Anfangszustand vorhandenem Kurvenkolk um 1,5 bis 2,5 m in 2 Jahren (vgl. Abb.). Dieses Verhalten lässt sich mit dem fehlenden Sedimentzustrom bei Flut begründen. Der Sedimenthaushalt verändert sich dort von einem bezüglich Flutstrom und Ebbestrom etwa ausgeglichenen Zustand in einen ebbestromorientierten Zustand. Dadurch breitet sich der ohnehin schon vorhandene Kurvenkolk etwas seewärts aus. Dieser Effekt bewegte sich mit den vorgenannten 1,5 bis 2,5 m im Rahmen der natürlichen Schwankungen der Höhenlage der Flußsohle.

Mithin führte das Schließen der HSÖ bei Betriebssteuerung insgesamt gesehen zu erheblichen Vorteilen bezüglich der Kolkbildung. Die Kolk-tiefen waren nach gleicher Einwirkdauer erheblich geringer.

Auswertung der Ergebnisse zu Variante 3 und Rückschlüsse zur weiteren Optimierung:

Die Kolke hinter NÖ1/BSÖ/NÖ2 sind bei beiden Varianten 3 vergleichsweise gering, weil dort aufgrund geringerer Öffnungshöhe der Schütze in Kombination mit größerer Wassertiefe im Abstrombereich deutlich kleinere Strömungsgeschwindigkeiten hinter der derzeit kolkgeschützten Sohle in der Ems auftreten als hinter NÖ3 bis NÖ5. Hier lässt eine Vergleichmäßigung der Strömungsgeschwindigkeiten des Abstroms bei Betriebssteuerung weitere Verbesserungen erwarten. Die Schützöffnungen sind dazu so einzustellen, dass die Geschwindigkeiten in der Ems hinter den Öffnungen über die Sperrwerkslänge betrachtet ungefähr gleich werden. Die Kriterien hierfür ergeben sich aus der Kontinuitätsgleichung unter der Näherungsannahme quasi-stationärer Verhältnisse und sind auf Abb. 53 zusammengefasst:

Durch die Betriebssteuerung entsteht ein Aufstau Δh an der Seeseite des Sperrwerks gegenüber der Landseite. Dieser Aufstau ist entlang der Sperrwerksachse ungefähr gleichbleibend. Die Strömungsgeschwindigkeit unter allen Schützen ist proportional zur Quadratwurzel von Δh . Gemäß der Kontinuitätsgleichung verhalten sich die Strömungsgeschwindigkeiten umgekehrt proportional wie die Wassertiefen (bei gleicher Durchflussbreite).

Somit kann unter der Bedingung gleicher Strömungsgeschwindigkeiten im Abstrom die erforderliche Öffnungshöhe bei beliebiger Abstromwassertiefe h_{Ems} angegeben werden, wenn für ein anderes Schütz Öffnungshöhe und Abstromwassertiefe bekannt bzw. vorgegeben sind.

Das Zahlenbeispiel auf Abb. 53 erläutert, dass etwa gleiche Geschwindigkeiten im Abstrom erreicht werden, wenn das Schütz bei NÖ3 um 1,8 m (rd. 5 m Wassertiefe h_{Ems}) angehoben wird während das Schütz in NÖ2 (rd. 7 m Wassertiefe h_{Ems}) auf eine Öffnungshöhe von 2,5 m eingestellt wird.

Es muss noch angemerkt werden, dass dieses Kriterium für den Anfangszustand zutrifft. Wenn sich später Kolke bilden, verändern sich die Wassertiefen h_{Ems} hinter den Öffnungen unterschiedlich und das Kriterium gleicher Abstromgeschwindigkeiten trifft nur noch grob zu. In jedem Falle ist aber eine Vergleichmäßigung der Sohlenbelastung durch eine vergleichmäßigte Abstromgeschwindigkeit zu erwarten. Eine weiter

optimierte Steuerung wäre durch ein Nachsteuern der Öffnungsweiten entsprechend der Entwicklung der Wassertiefen hinter den einzelnen Öffnungen möglich.

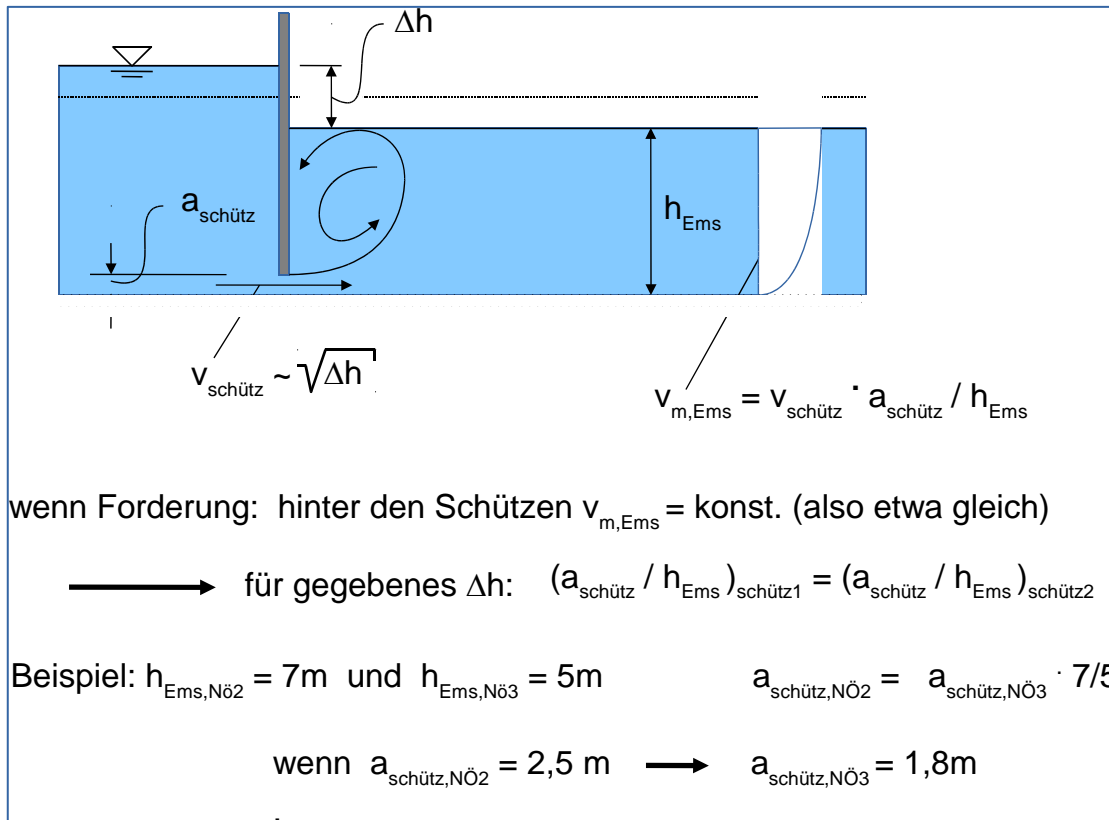


Abb. 53: Prinzipskizze Kriterien zur Herstellung ungefähr gleicher Abstromgeschwindigkeiten h_{Ems} in der Ems.

Weiterhin war bei den Varianten 3 im Abstrom der NÖ5 eine vergleichsweise stärkere Kolkbildung zu beobachten, die mit einem Angriff auf das südliche Ufer einhergeht. Um Information darüber zu erhalten, welche Auswirkung auf diesen Kolk und das Gesamtsystem eine reduzierte Öffnung der NÖ5 oder ihre gänzliche Schließung haben würde, wurden für die 4. Variante folgende Randbedingungen für die Betriebssteuerung definiert.

Variante 4

Die Steuerungsvorgaben für die Variante 4 wurden so gewählt, dass einerseits in beiden Vergleichsfällen gleiche Durchflussflächen gegeben waren. Weiterhin wurden die Öffnungshöhen der Schütze so gewählt, dass die Abstromgeschwindigkeiten h_{Ems} im Startzustand etwa gleich waren.

Variante 4a

NÖ1+BSÖ+NÖ2	→ a = 2,8 m	A = 458,80 m ² uNN
NÖ3+NÖ4	→ a = 1,9 m	A = 241,30 m ² uNN
NÖ5	→ a = 0 m	A = 0,00 m ² uNN
		A ≈ 700 m² uNN

Variante 4b

NÖ1+BSÖ+NÖ2	→ a = 2,5 m	A = 408,75 m ² uNN
NÖ3+NÖ4	→ a = 1,8 m	A = 228,6 m ² uNN
NÖ5	→ a = 1,0 m	A = 63,5 m ² uNN
		A ≈ 700 m² uNN

(Zum Vergleich die Durchflussflächen unter NN bei Variante 3:

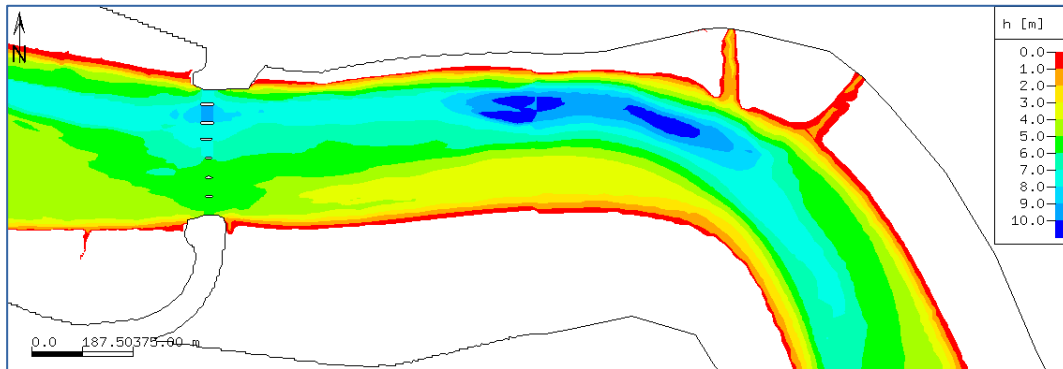
667,13 m² (Variante 3a)

932,63 m² (Variante 3b)

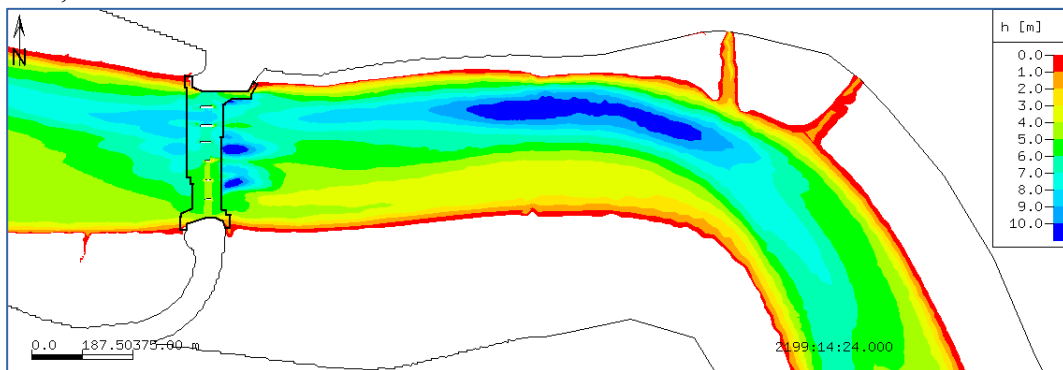
Die kolkgeschützte Fläche wurde, wie schon bei Variante 3 durch den heute am Sperrwerk vorhandenen Kolkschutz vorgegeben.

Zunächst werden die Berechnungsergebnisse für 2 Jahre Simulationsdauer dargestellt, 9 Zeitschritte für Variante 4a (Abb. 54) und 9 Zeitschritte für Variante 4b (Abb. 55):

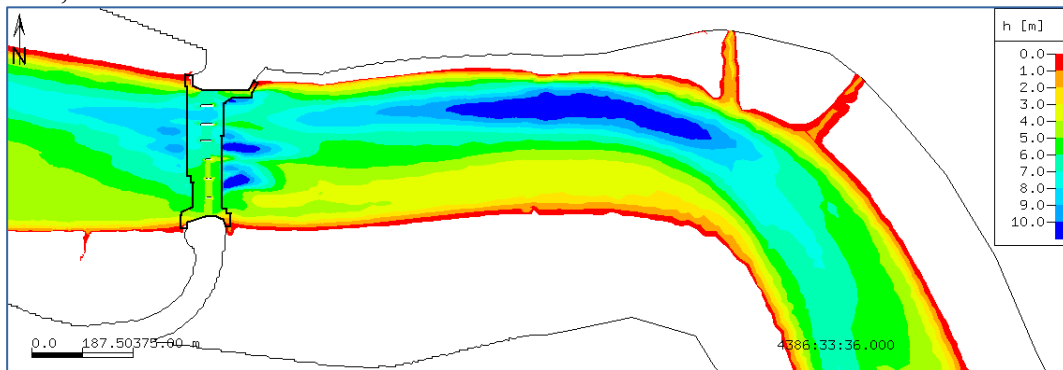
0 Jahre **Variante 4a**



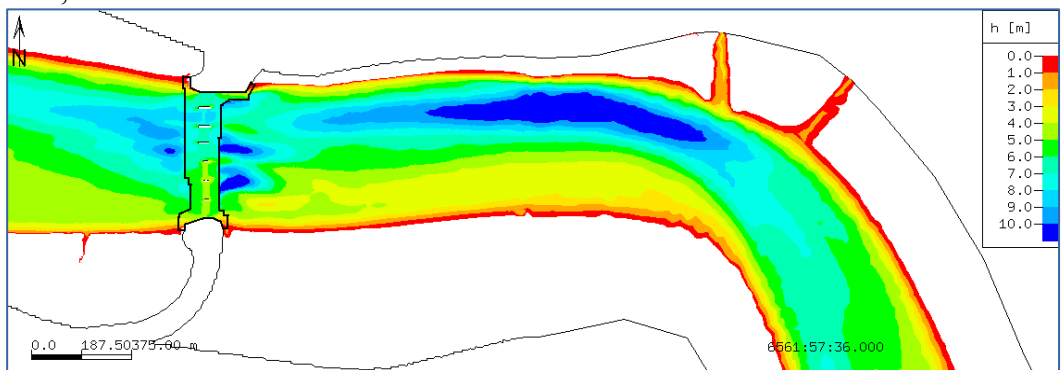
0,25 Jahre



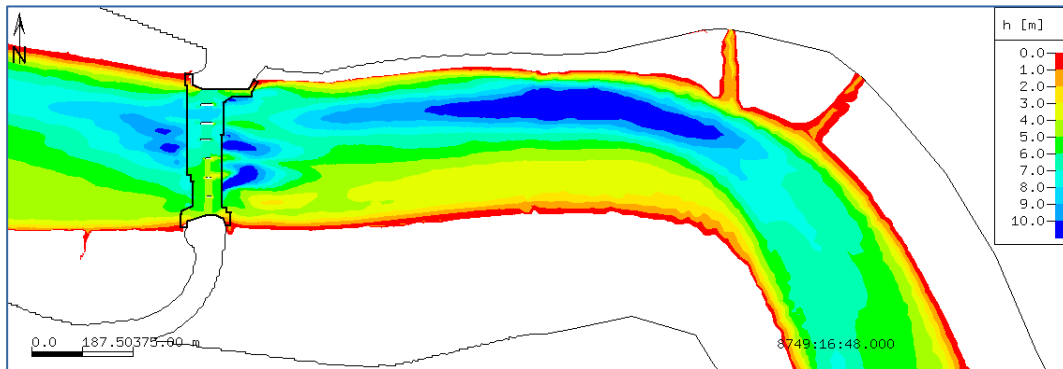
0,5 Jahre



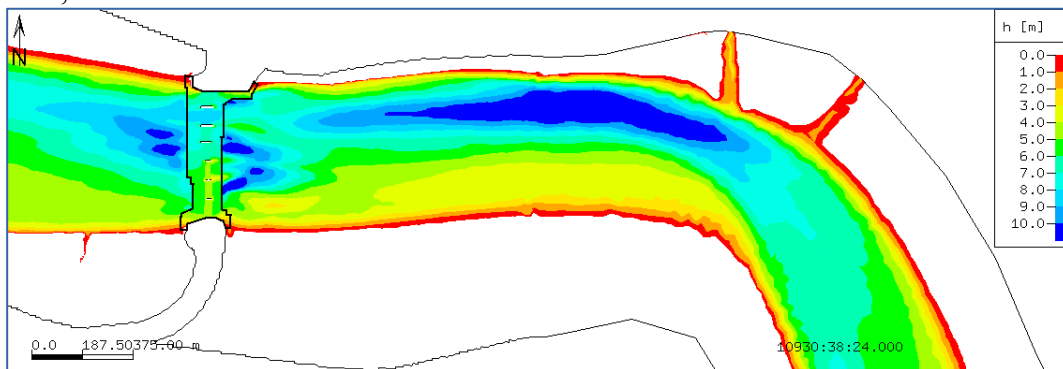
0,75 Jahre



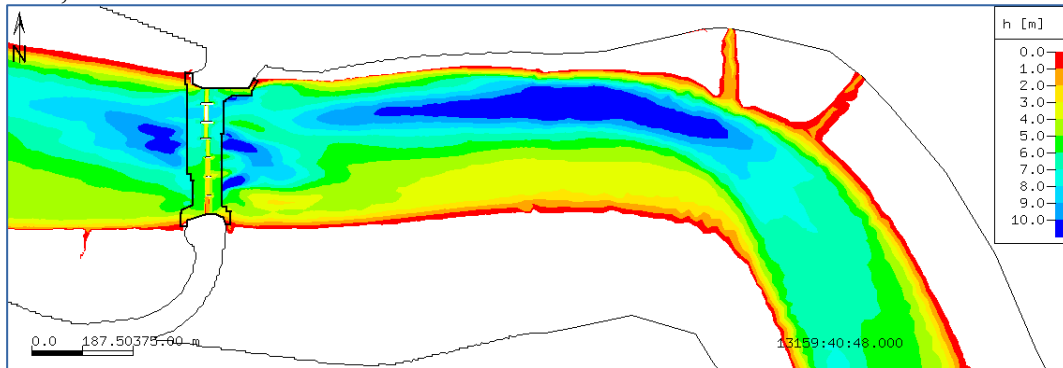
1 Jahr Variante 4a



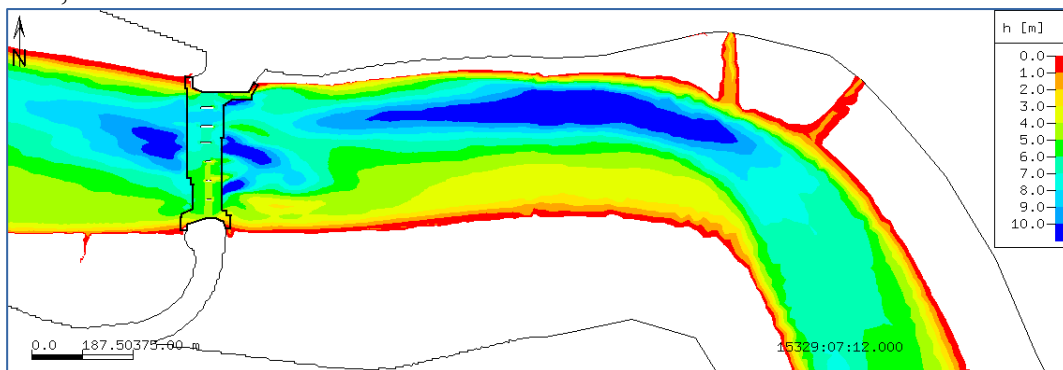
1,25 Jahre



1,5 Jahre



1,75 Jahre



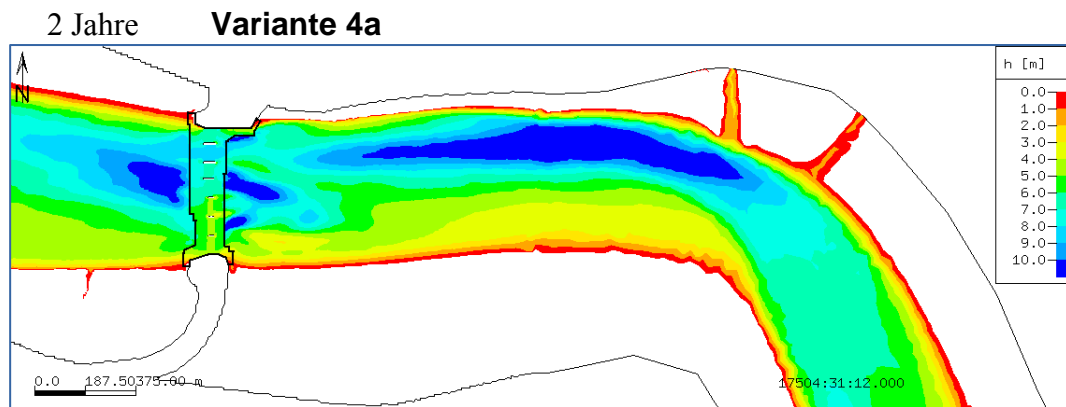
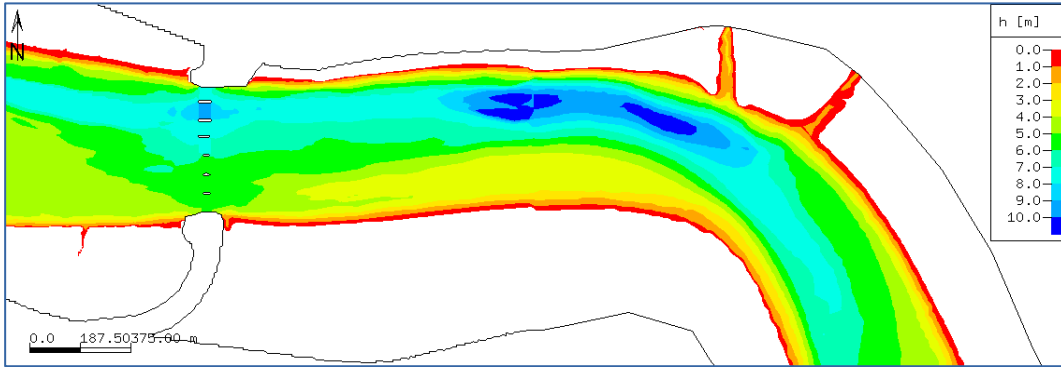
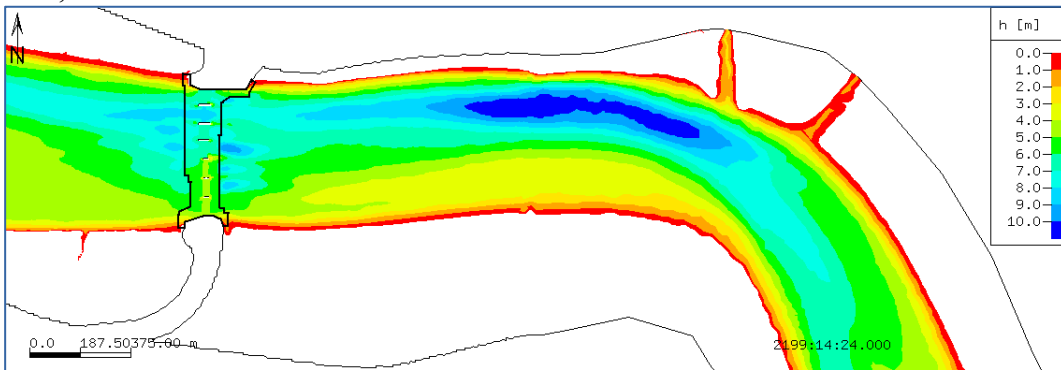


Abb. 54: Berechnete Kolkentwicklung für die Betriebssteuerung zu Variante 4a.

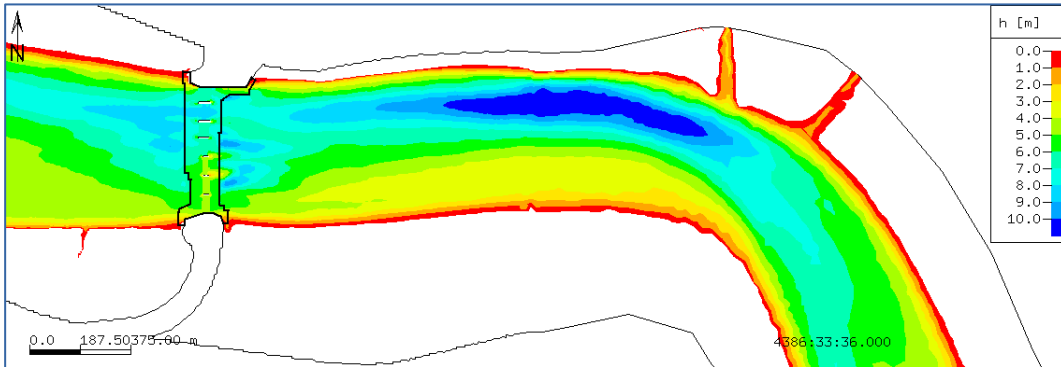
0 Jahre **Variante 4b**



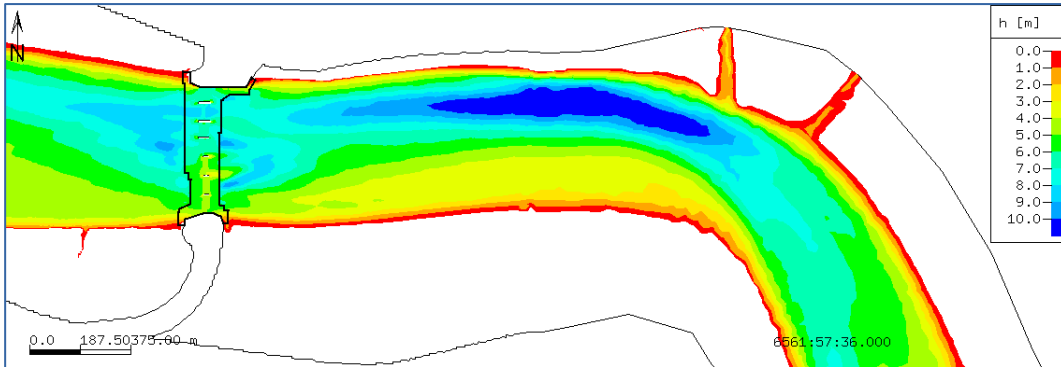
0,25 Jahre



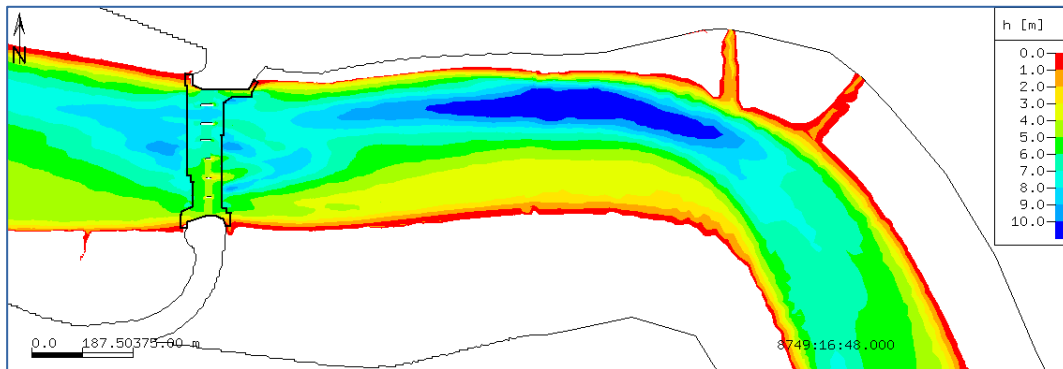
0,5 Jahre



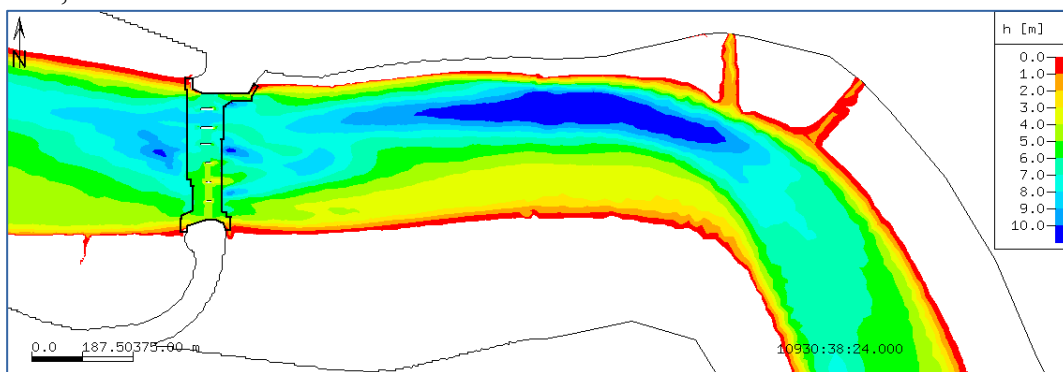
0,75 Jahre



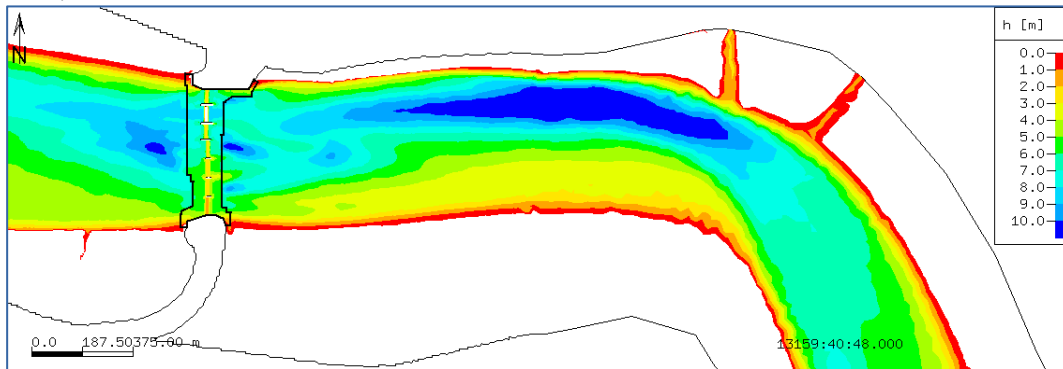
1 Jahr Variante 4b



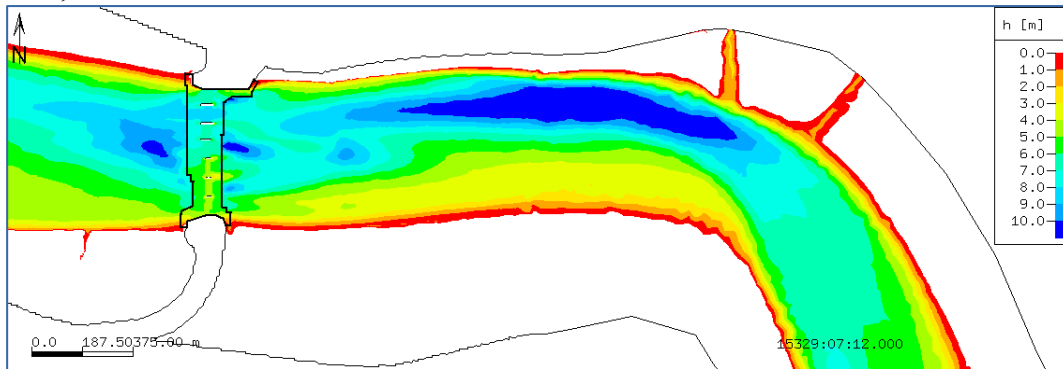
1,25 Jahre



1,5 Jahre



1,75 Jahre



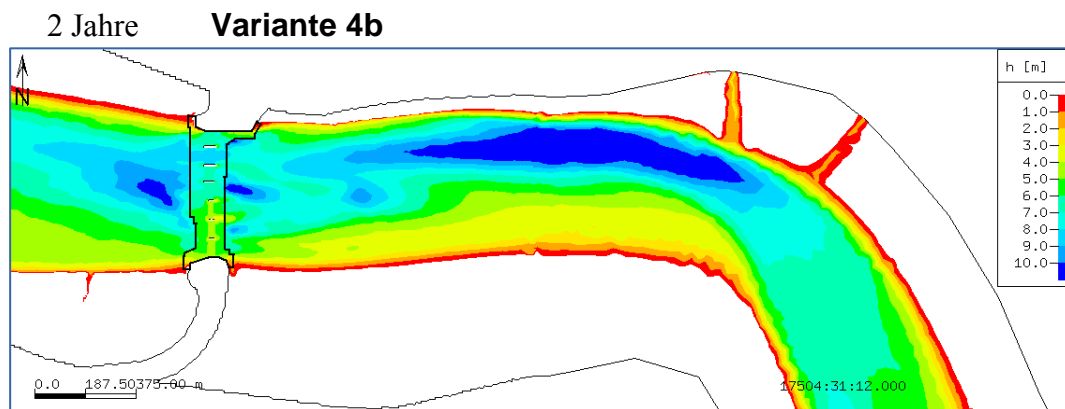


Abb. 55: Berechnete Kolkentwicklung für die Betriebssteuerung zu Variante 4b.

Beurteilung der Ergebnisse zu den Varianten 4a und 4b (nach 2 Jahren Simulationsdauer)

Die Varianten 4a und 4b unterscheiden sich von den Varianten 3 insbesondere dadurch, dass die Durchflüsse gemäß der Kontinuitätsbedingung derart geregelt waren, dass im Anfangszustand ungefähr gleiche Strömungsgeschwindigkeiten im Abstrom der betriebsgesteuerten Sperrwerksöffnungen vorlagen. Mit dieser Steuerung war das Ziel verbunden, die Kolke noch weiter zu reduzieren. Dieses Ziel wurde erreicht, wie die Abbildungen 54/56 für die Variante 4a und die Abbildungen 55/57 für die Variante 4b zeigen. Innerhalb des berechneten Zweijahreszeitraums ergaben sich unter den vorgegebenen Randbedingungen größte Kolkiefen von 9 m (Variante 4a) und von rd. 5 m (Variante 4b).

Weiter ist mit dieser Art der Steuerung erreicht worden, dass die morphologischen Veränderungen am südlichen Ufer wesentlich geringer ausfielen als in den Varianten 1, 2 und 3.

Zusätzlich unterscheiden sich die beiden Varianten durch die Art des Betriebes der NÖ5. Diese war während der Betriebssteuerung bei Variante 4a nicht geöffnet und bei Variante 4b um 1 m geöffnet. Im Fall der geschlossen gehaltenen NÖ5 bildet sich in ihrem Leebereich eine Auflandung, die den Abstrom und auch den Kolk hinter der NÖ4 nach Nordost abdrängt (s. Abb. 54 und 56). Dies trat bei Variante 4b wegen der

um 1 m geöffneten NÖ5 nicht ein. Der Kolk hinter der NÖ5 war vergleichsweise gering. Auf Abb. 57 liegt er im Bereich der Tiefenskala zwischen 0,5 m und 1,5 m. Der Kolk hinter der NÖ4 erreichte durch die leichte Öffnung der NÖ5 nur etwa die Hälfte der Tiefe wie bei Verschluss der NÖ5 (vgl. Abb. 56 und 57). Bei der Steuerungskonfiguration der Varianten 4a und 4b bildete sich ein gemeinsamer Kolk der Abströme aus den Sperrwerksöffnungen NÖ2 und NÖ3 aus.

In der Gesamtbewertung aller untersuchten Varianten ist die Kolksituation im Falle einer Betriebssteuerung wie in Variante 4b am günstigsten.

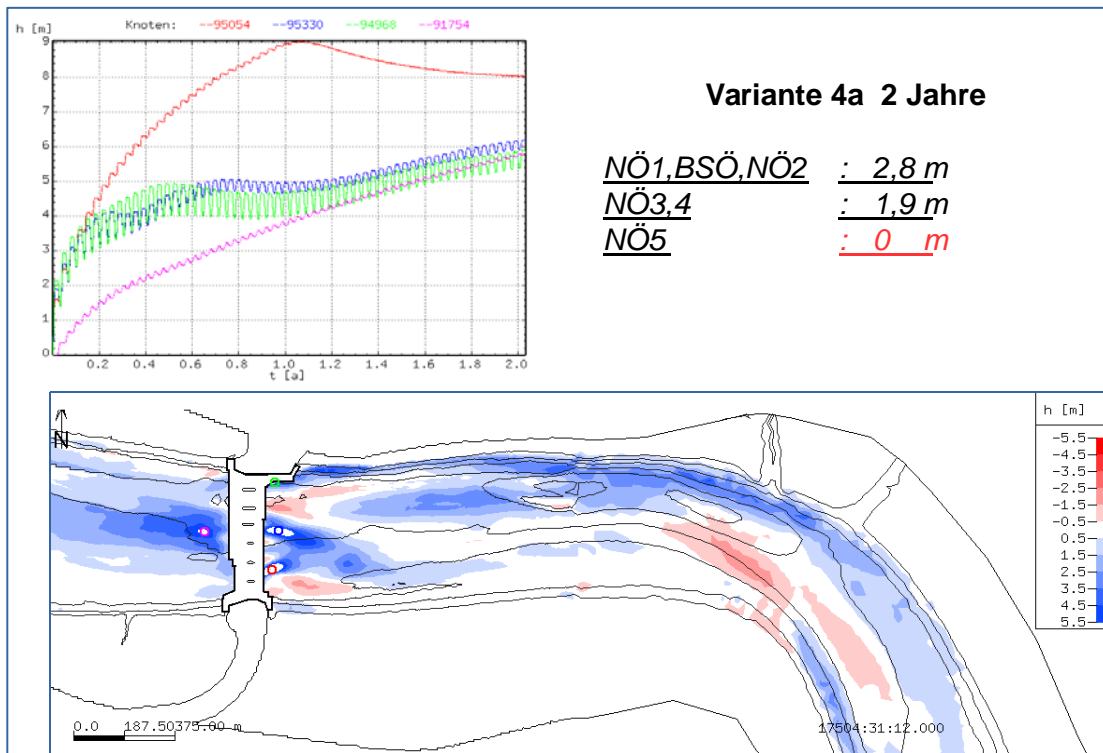


Abb. 56: Berechnete Kolkentwicklung Variante 4a, Oben: Zeitliche Entwicklung an ausgewählten Positionen. Unten: Tiefendifferenzen nach 2 Berechnungsjahren.

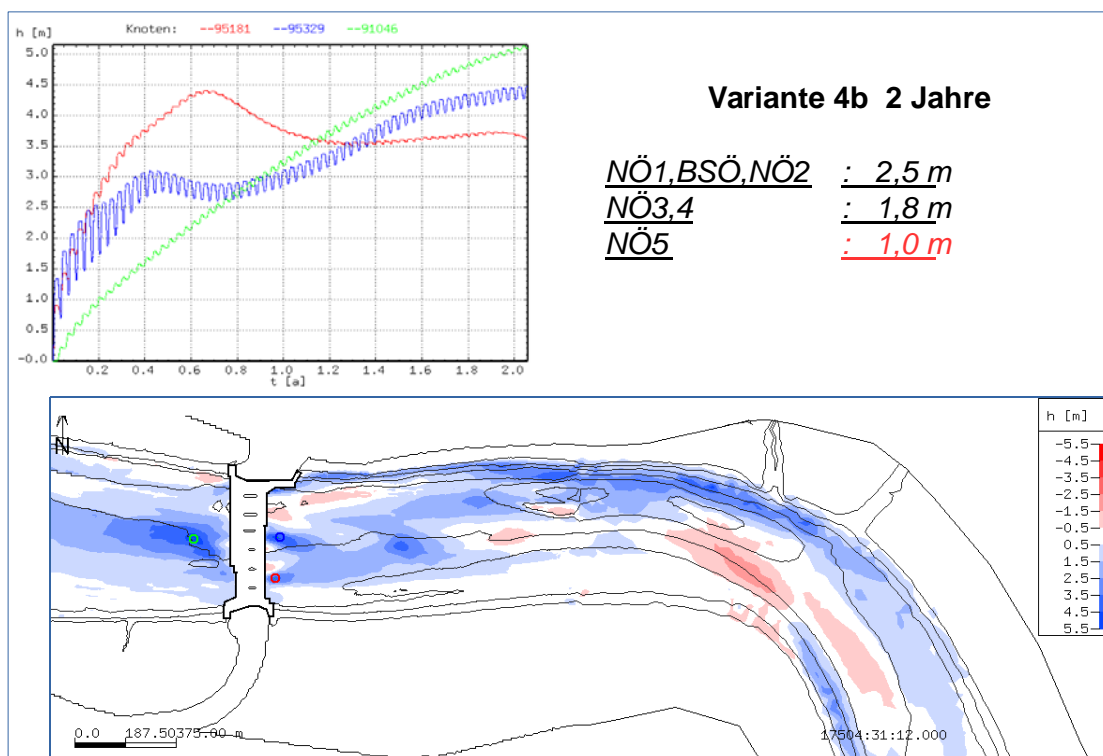


Abb. 57: Berechnete Kolkentwicklung Variante 4b, Oben: Zeitliche Entwicklung an ausgewählten Positionen. Unten: Tiefendifferenzen nach 2 Berechnungsjahren.

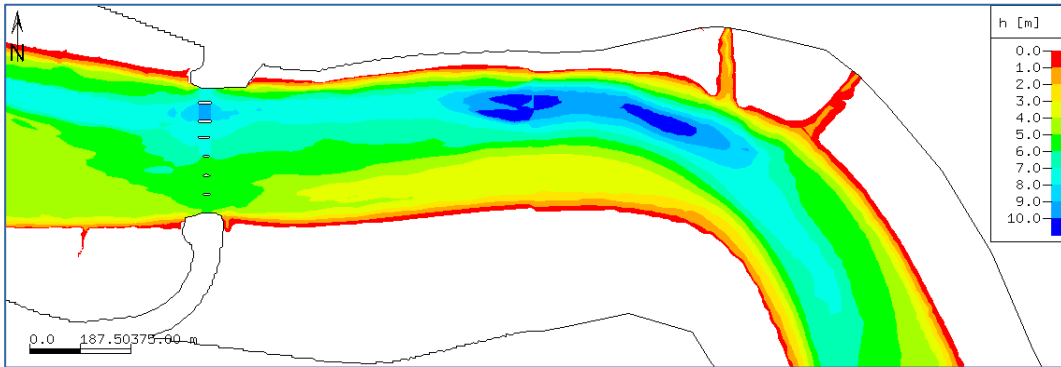
Variante 4c

Unter Umständen, z.B. aus Gründen der Schifffahrt, kann es angezeigt sein, nur jede zweite Tide zu steuern, z.B. die Nachttide. Dieser Fall wurde ergänzend mit Variante 4c untersucht: Alle Randbedingungen wie in Variante 4b, jedoch nur jede 2. Tide gesteuert.

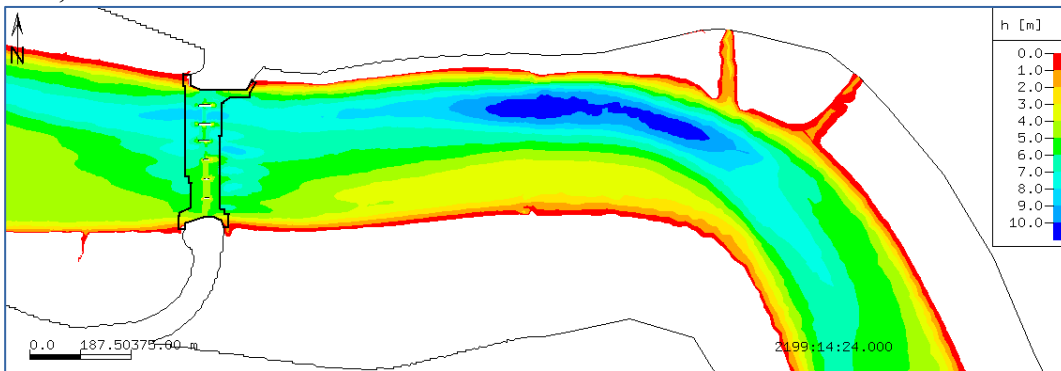
Die Ergebnisse sind auf Abb. 58, 59 und 60 dargestellt. Die Veränderungen der Sohle am Sperrwerk sind insgesamt noch geringer. Auch Verlagerung des Kurvenkolks nach Westen fällt geringer aus, da hier die HSÖ in jeder zweiten Tide offen ist und der Sedimentzustrom in diesen Bereich dann nicht unterbrochen ist.

Im Unterschied zu den Varianten 4a und 4b verlagerte sich bei Variante 4c Sediment vom seeseitigen Teil der Innenkurve bei Oldersum in den binnenseitigen Bereich der Innenkurve. Dadurch vertiefte sich kompensatorisch der dortige Aussenkurvenbereich auf 8 m bis 9 m unter NN. Diese Tiefenwerte liegen noch deutlich unterhalb derer des bestehenden, natürlichen Kurvenkolks. Dieser weist im bestehenden Zustand maximale Tiefenlagen um 11 m bis 12 m unter NN auf.

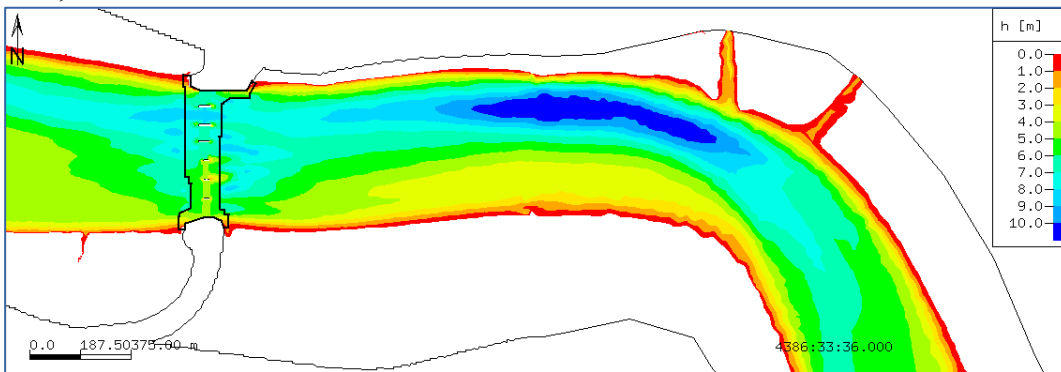
0 Jahre Variante 4c



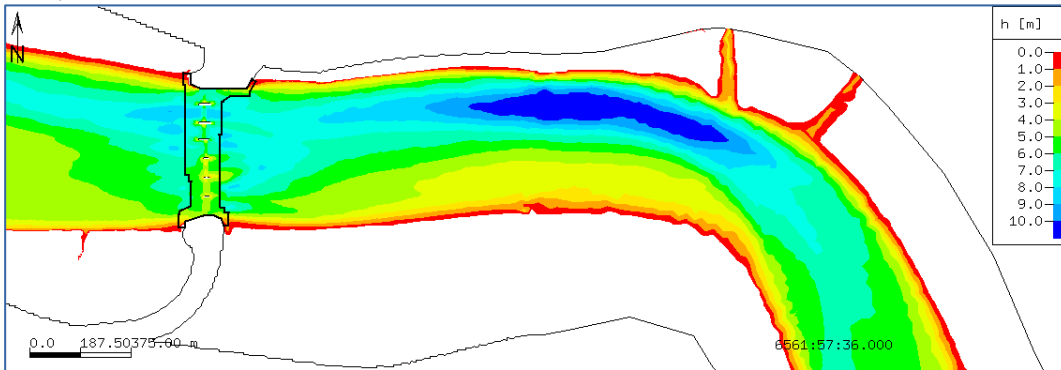
0,25 Jahre



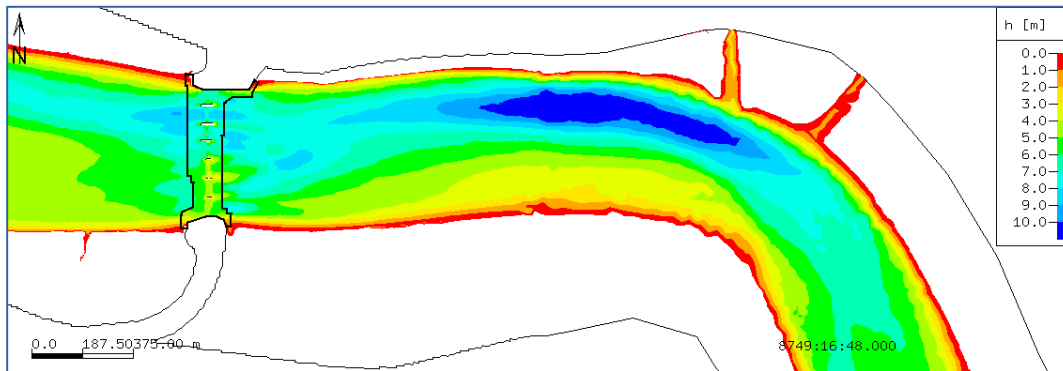
0,5 Jahre



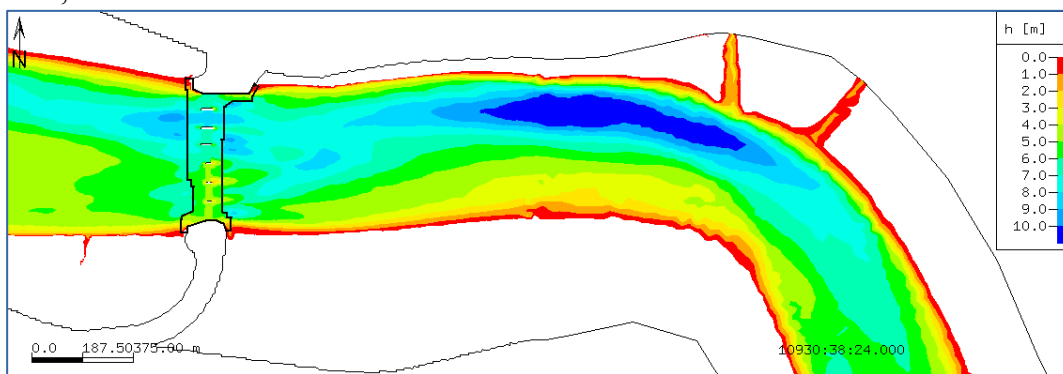
0,75 Jahre



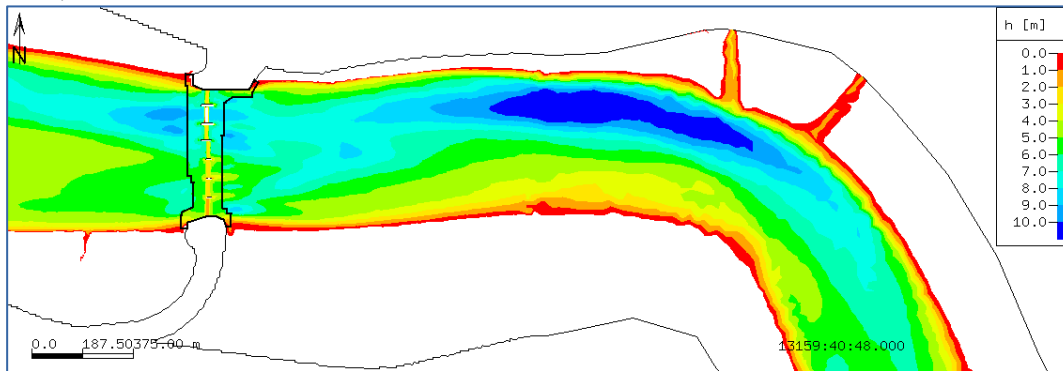
1 Jahr Variante 4c



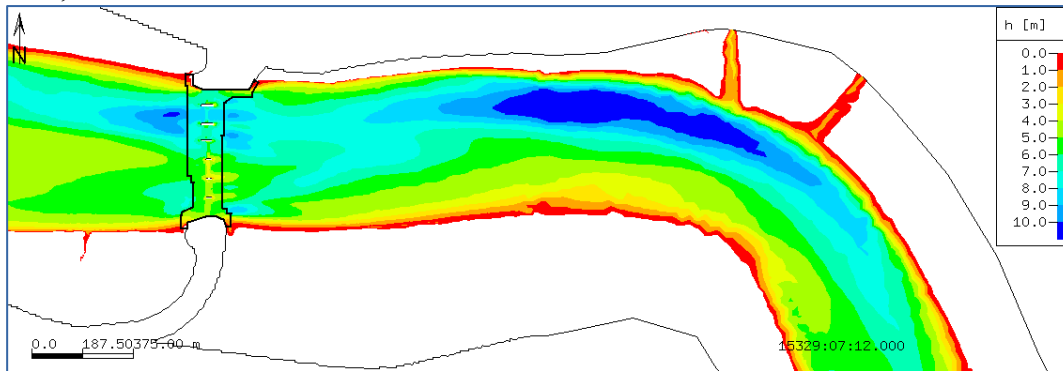
1,25 Jahre



1,5 Jahre



1,75 Jahre



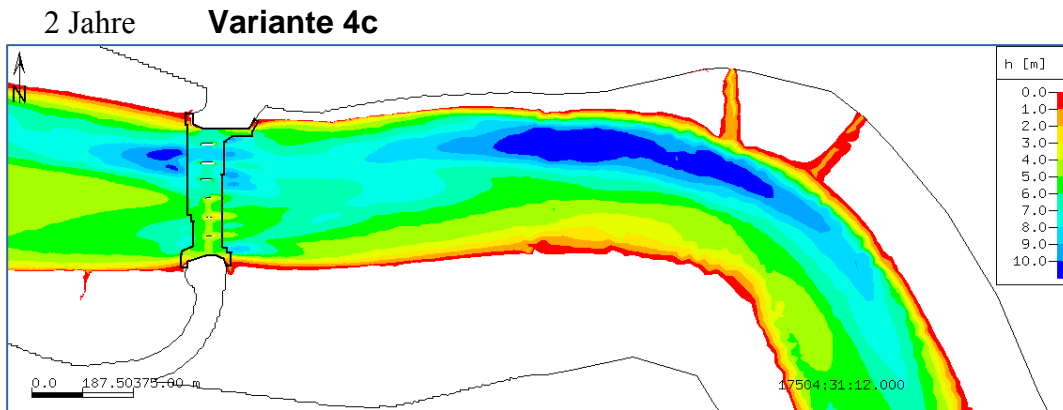


Abb. 58: Berechnete Kolkentwicklung für die Betriebssteuerung zu Variante 4c.

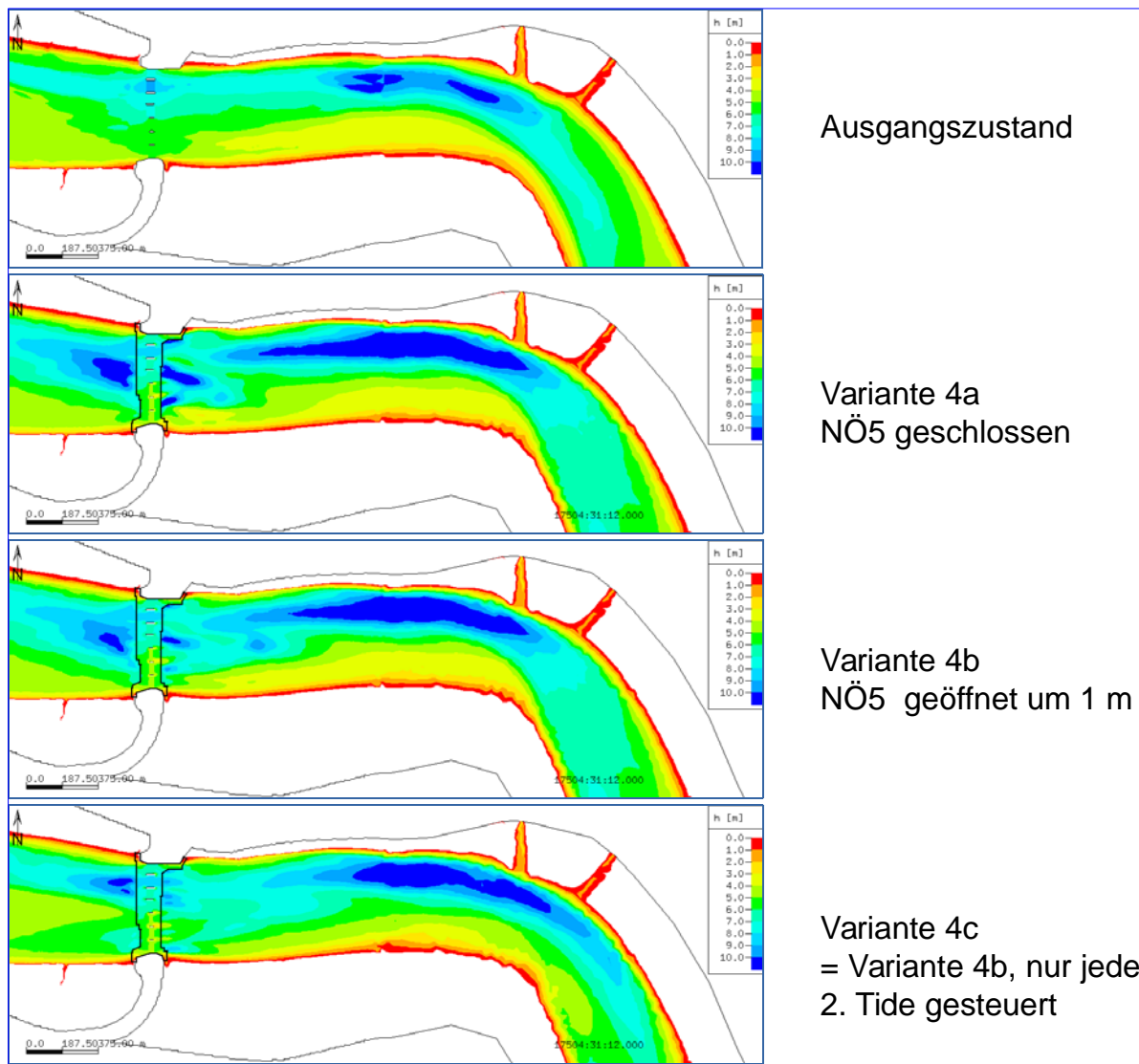


Abb. 59: Berechnete Kolkentwicklung für die Betriebssteuerung zu Variante 4 nach 2 Jahren: Vergleich der Varianten 4a, 4b und 4c.

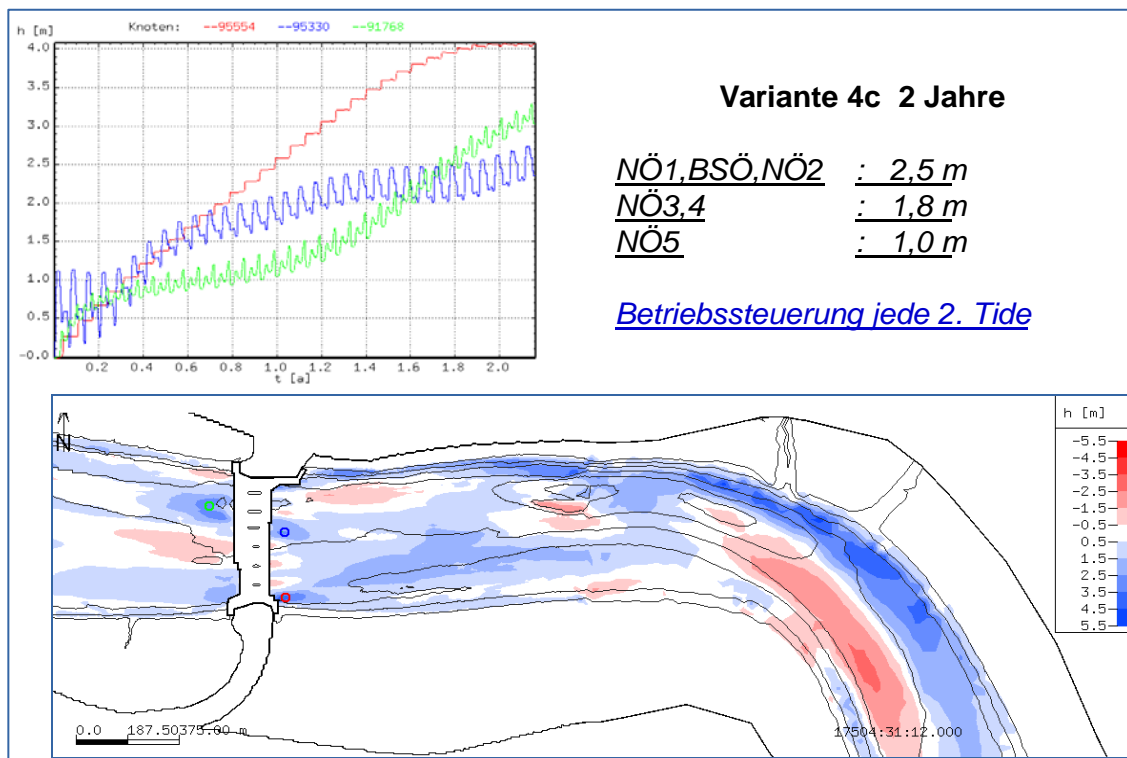


Abb. 60: Berechnete Kolkentwicklung für die Betriebssteuerung zu Variante 4: Tiefenentwicklung an ausgewählten Positionen (oben) und Tiefenänderungen gegenüber dem Ausgangszustand nach 2 Jahren (unten) im Fall der Variante 4c.

6. Auswertung der berechneten maximalen Strömungsgeschwindigkeiten zu Zwecken der Bemessung von Kolkenschutzmaßnahmen bei Variante 4b und Erläuterungen.

Die Entwicklung eines Kolkchutzkonzeptes sowie die Bemessung des Kolksschutzes sind nicht Aufgabe dieses Gutachtens, benötigt als Information jedoch Angaben u.a. über die maximal aufgetretenen Strömungsgeschwindigkeiten, die bei der favorisierten Variante, hier Variante 4b, zu erwarten sind:

Die Kennwerte der Betriebssteuerungsvariante 4b sind:

Betriebssteuerung: Öffnung NÖ1,BSÖ,NÖ2	:	2,5 m
NÖ3,4	:	1,8 m
NÖ5	:	1,0 m

- Schließbeginn der Betriebssteuerung : bei Kenterung zur Flut
- Ende der Betriebssteuerung nach 3 ½ Stunden
- Steuerung jede Tide
- Zugrunde gelegte Strömungssituationen: erhöhte Springtide

Für die Machbarkeitsstudie angenommener Bodenaufbau: Mittelsand, teilverfestigt durch bindige Anteile.

Abb. 61 gibt die Lage der Sohle im Ausgangszustand und nach 2 Berechnungsjahren wieder.

Im bestehenden Zustand haben sich Strömungen und Wassertiefen aufeinander eingestellt. Durch die Betriebssteuerung ist diese Abstimmung gestört und es folgen im Nahfeld des Sperrwerks Umlagerungen der Sohle, insbesondere Auskolkungen. Solche Kolkwirkungen treten nicht nur im Abstrom auf (also binnenseits des Sperrwerks), sondern auch im Anstrom. Dort entstehen kurz vor dem Eintritt in die Sperrwerksöffnungen betriebssteuerungsspezifisch Konzentrationen der Strömung, die dabei be-

schleunigt wird. In Beschleunigungszonen kann an jeder Stelle mehr Sediment abtransportiert werden als antransportiert wird. Ausserdem sind die Transportwege gegenüber dem Ausgangszustand geändert. Sobald die Strömungsgeschwindigkeit über der kritischen Geschwindigkeit liegt, führt das zu Erosionen bis hin zur Ausbildung von Kolken. Die morphodynamischen Berechnungsergebnisse spiegeln diese, sich über die Tide verändernden, Auswirkungen in ihrer Gesamtwirkung wider.

Die absolute Größe der Geschwindigkeiten bestimmt dann die Intensität des Kolkprozesses und die maximale Kolkentiefe. Bei Betriebssteuerung entstehen im Abstrombereich örtlich Kolke durch gegenüber dem ungestörten Zustand erhöhte Transportkapazitäten. Ursache sind u.a. lokal veränderter An- und Abtransport an Sediment und erhöhte Aufwirbelung von Sediment beim Durchtritt durch die teilgeschlossenen Sperrwerksöffnungen im Vergleich zu den Verhältnissen bei voll geöffneten Toren. Dieses Sediment setzt sich erst mit der Zeit wieder ab und bewirkt so streckenweise einen Mangel an Sediment an der Sohle. Alle diese Faktoren zusammen bewirken eine neue Sohlenkonfiguration. Abb. 62 zeigt die Änderungen der Sohlage infolge der Betriebssteuerungsvariante 4b nach 2 Berechnungsjahren als Differenz der beiden Zustände von Abb. 61. Die Kolkbildung über die Zeit an ausgewählten Positionen gibt Abb. 63 wieder.

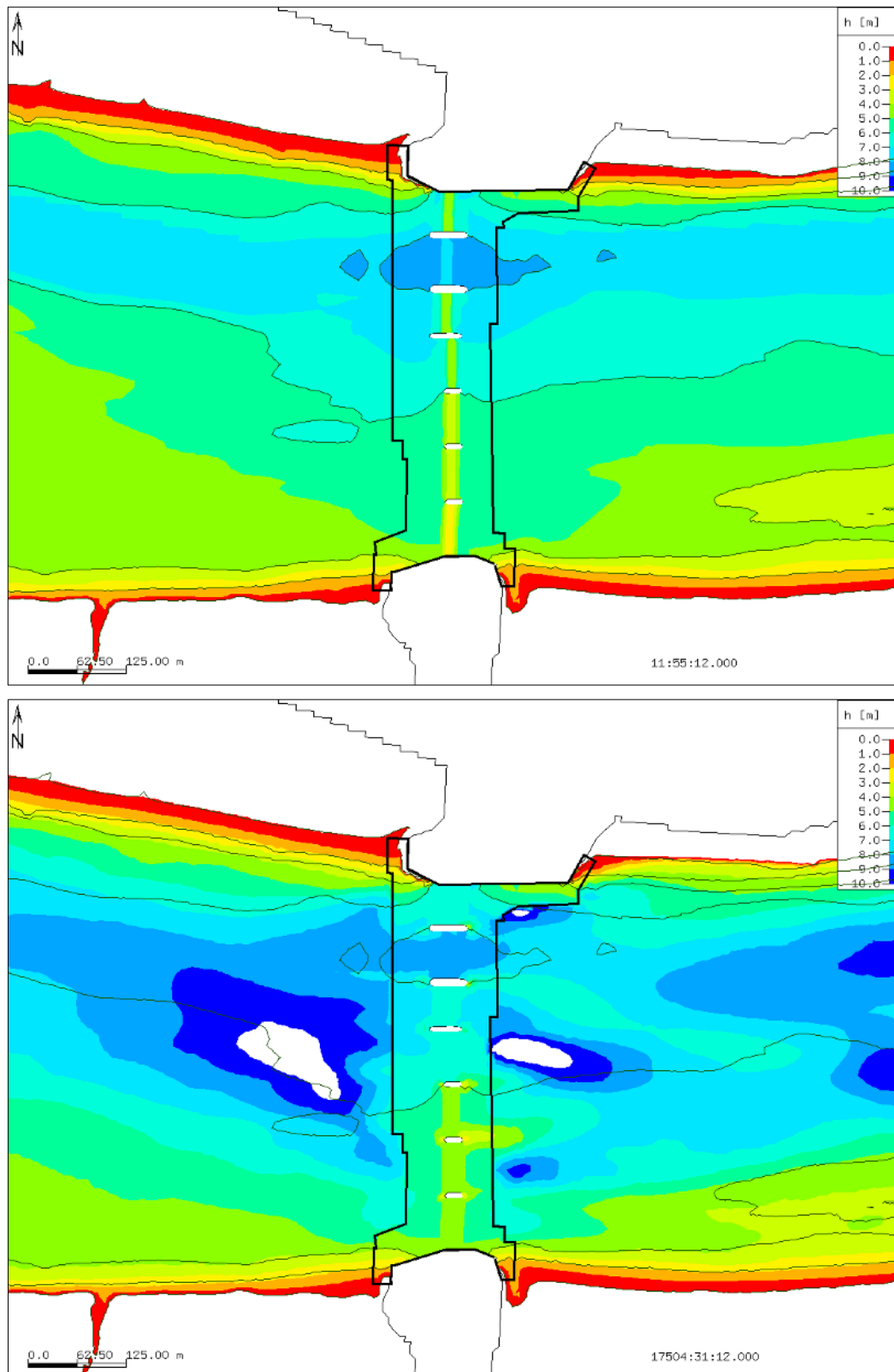


Abb. 61: Sohle der Ems am Sperrwerk Gandersum. Oben: Ausgangszustand, unten berechnete Sohle nach 2 Jahren Betriebssteuerung Variante 4b. Weiße Flächen innerhalb blauer Flächen: Tiefe > 10m unter NN. (beachte: unteres Skalenende anders als in Abb. 55)

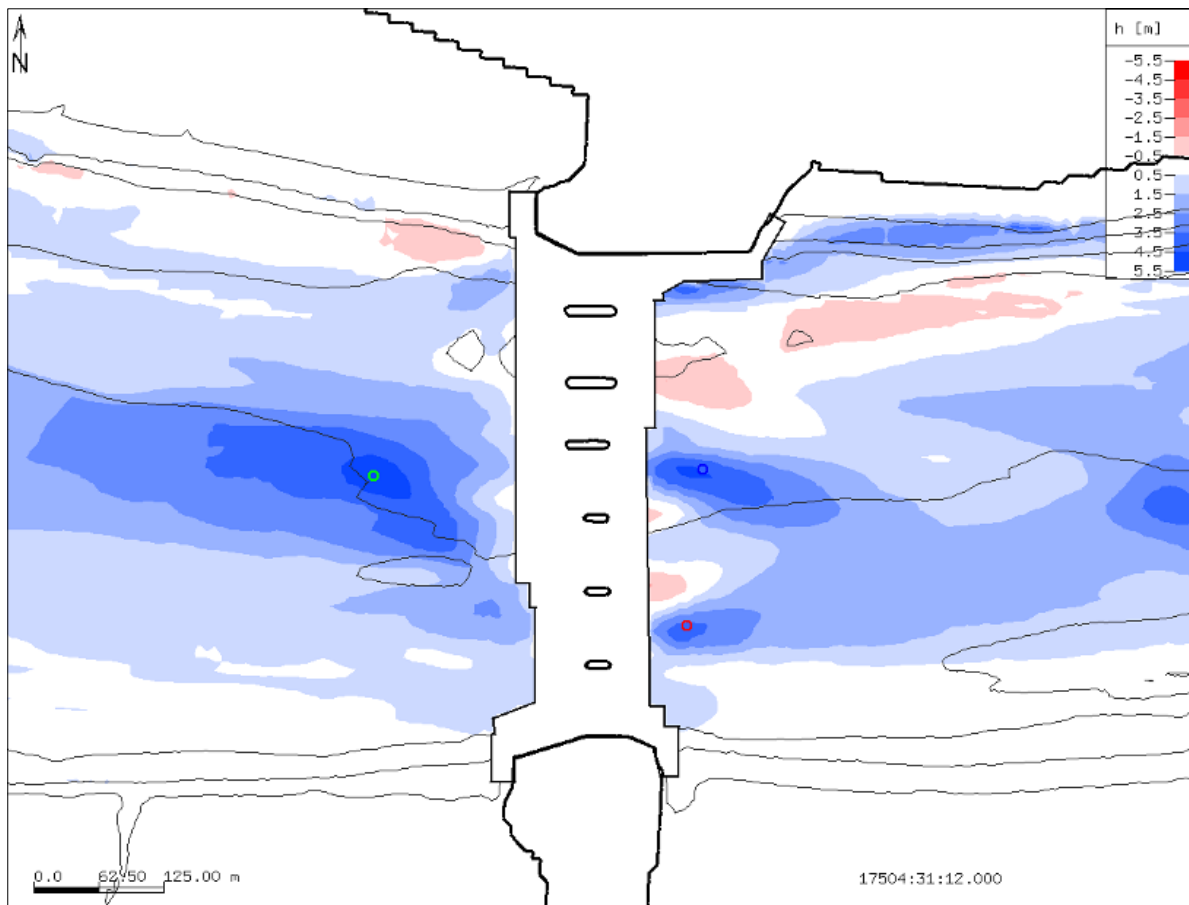


Abb. 62: Differenz zwischen Zustand nach 2 Jahren und Ausgangszustand.
 (Tiefenlinien zur Orientierung 0m, 2m, 4m, 6m, 8m)

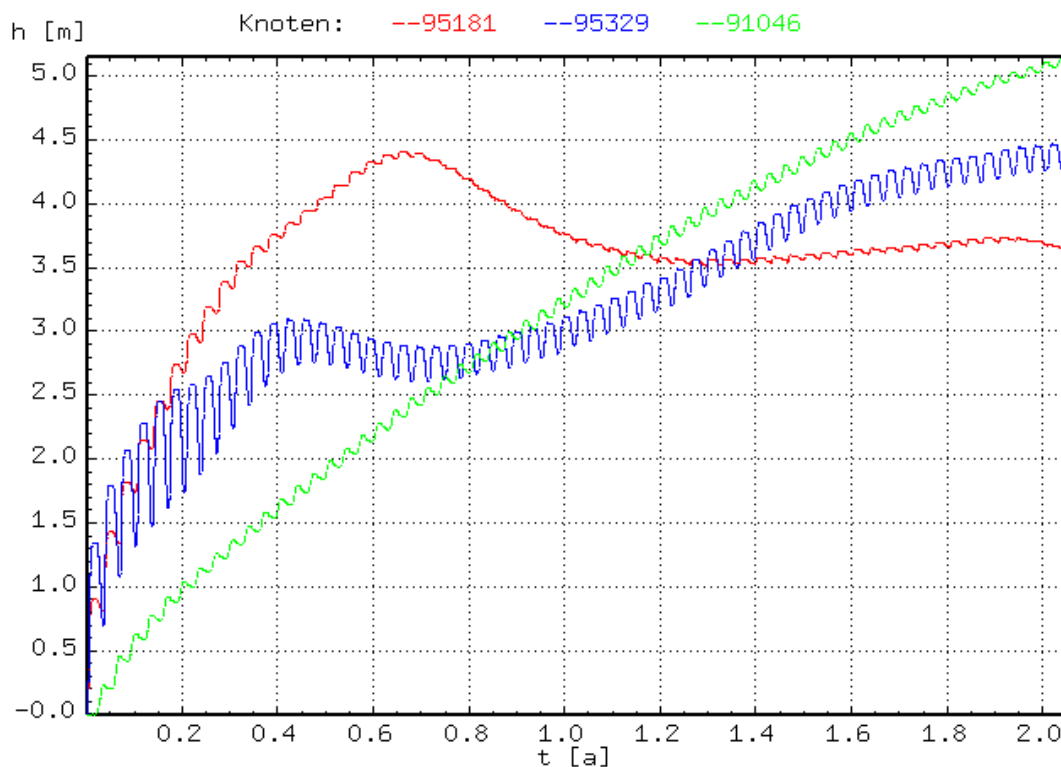


Abb. 63: Berechnete Tiefenentwicklung an ausgewählten Positionen (farbige Kreissymbole auf Abb. 62 geben die Position der jeweiligen, gleichfarbig dargestellten Tiefenentwicklung an). Tiefen in (m) unter jeweiliger Sohle.

Auf Abb. 64 sind die während einer Tide mit Betriebssteuerung aufgetretenen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten jedes Rechenpunktes wiedergegeben. Diese lokal maximalen Werte treten nicht unbedingt zeitgleich an jedem Ort auf. Die Abb. 64 gibt daher keinen Momentanströmungszustand wieder.

Direkt am Übergang des bestehenden Kolkschutzes zur beweglichen Sohle treten maximale mittlere Geschwindigkeiten von rd. 2 m/s auf. In den Fahnen mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit betragen die berechneten Werte $\max_{v_m} = 1,5$ bis 1,6 m/s. Diese Fahnen erstrecken sich über etwa 250 m stromauf.

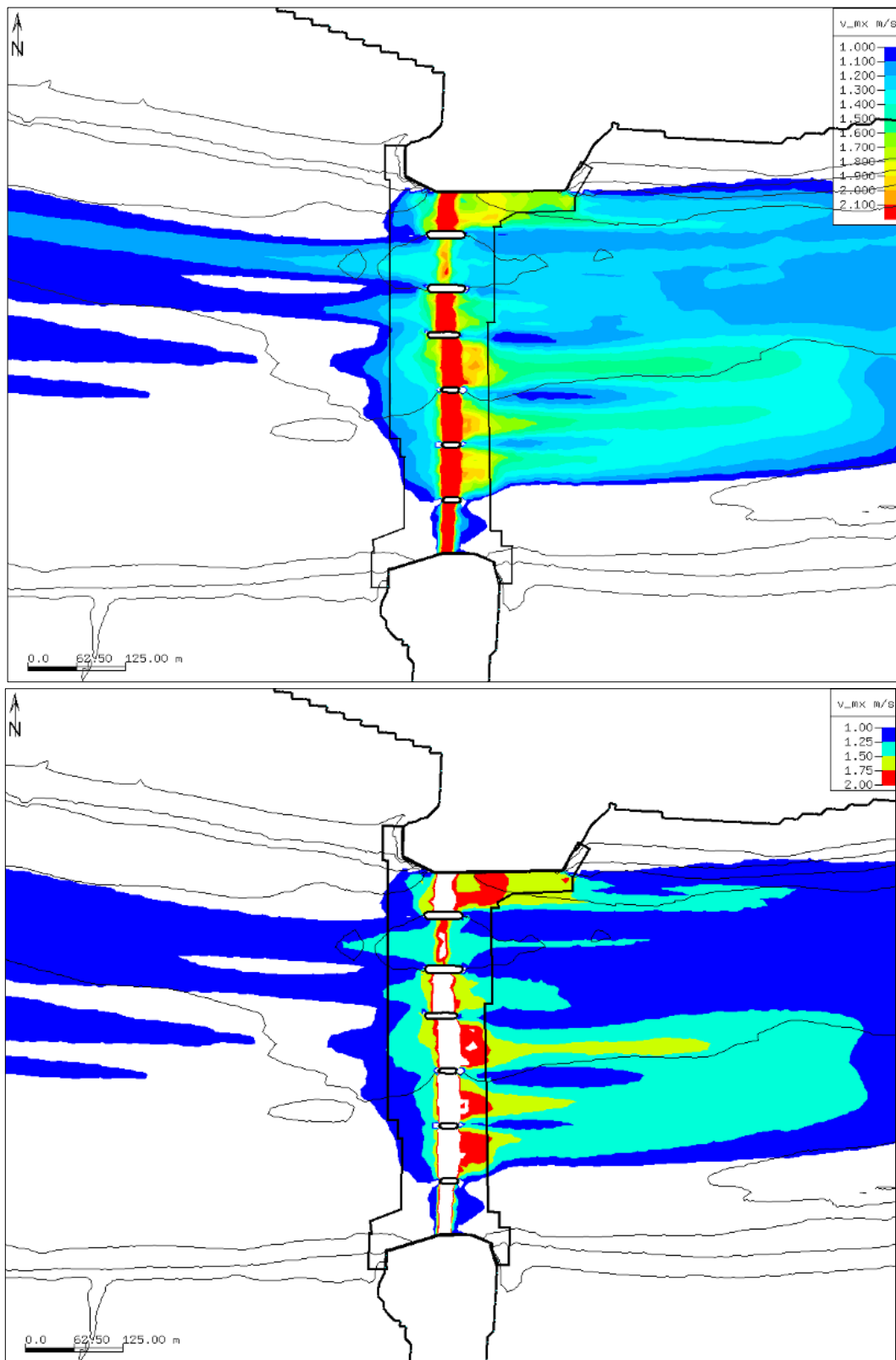


Abb. 64: Maximale (nicht zeitgleich aufgetretene), tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten während Tiden mit Betriebssteuerungsvariante 4b in zwei unterschiedlichen Skalierungen zur besseren Lesbarkeit. Weiss innerhalb rot auf dem unteren Bild: $v > 2\text{m/s}$. Tiefenlinien zur Orientierung 0m, 2m, 4m, 6m, 8m.

Für die Planung von Kolkschutzmaßnahmen wird empfohlen, diese Abstromfahnen als nicht gänzlich lagestabil anzusetzen. Weiterhin wird empfohlen, die Bemessungsgeschwindigkeiten für einen erweiterten Kolkschutz aufgrund bauwerksbedingter Turbulenzen um wenigstens rd. 30% erhöht anzunehmen.

7 Zusammenfassung

Anlass

Im Falle einer Betriebssteuerung des Emssperrwerks bei Gandersum werden während der Flut Teile des Emssperrwerks geschlossen. Dies führt zu einem Aufstau mit der Folge erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten im Abstrom der ganz oder teilgeöffnet bleibenden Tore. Im Einflußbereich der erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten treten Erosionen der Sohle auf: Es bilden sich sogenannte Kolke.

Aufgabe

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zur Betriebssteuerung des Emssperrwerks war zu untersuchen, wo und in welcher Größenordnung Kolke zu erwarten sind. Ausgehend von einem ersten Vorschlag war dann eine Betriebssteuerungsvariante zu ermitteln, die möglichst geringe Kolke nach sich zieht.

Modell

Die Untersuchung wurde im Morphodynamisch-Numerischen Modell TIMOR3 durchgeführt. Das Morphodynamische Modellsystem TIMOR3 ist seit 1993 vielfältig im Auftrag mehrere Bundesländer eingesetzt worden. TIMOR3 arbeitet prozessorientiert, d.h. die einzelnen, in Rückkopplung zwischen Strömung und Veränderung der Sohlengestalt ablaufenden sedimentmechanischen Prozesse werden im Einzelnen nach dem Stand der Forschung nachgestellt.

Randbedingungen

Die Betriebssteuerung soll täglich und bei jeder Tide stattfinden. Die Grundlage der Reaktion der Ems im Sperrwerksnahbereich sind mithin im Wesentlichen mittlere Tiden. Auf der sicheren Seite liegend wurde für die Machbarkeitsstudie eine Springtide mit etwa um 20% erhöhtem Tidehub gegenüber mittleren Tiden vereinbart.

Da zum Zeitpunkt dieser Untersuchung wenig Aufschluss über die Sedimente der Sohle und den darunter liegenden Boden vorlag, wurde exemplarisch ein homogener Boden aus Mittelsand mit bindigen Anteilen zugrunde gelegt. Für ggf. spätere Ausführungsplanungen müsste der Bodenaufschluss ergänzt werden.

Strömungsuntersuchungen

In einem ersten Untersuchungsschritt wurden verschiedene Steuerungsszenarien zunächst ohne bewegliche Sohle untersucht. Wesentliches Ergebnis für die nachfolgenden Kolkuntersuchungen mit beweglicher Sohle war, dass die ursprünglich erwogene Form der Betriebssteuerung, nämlich immer die HSÖ und eine andere Öffnung zu betreiben (und alle anderen Öffnungen geschlossen zu halten), zu sehr starken Strahlströmungen binnenseitig der beiden offenen Tore führt. Dies ließ tiefe Kolke erwarten. Weitere ungünstige Begleiterscheinungen waren große Strömungswalzen und insgesamt navigatorisch ungünstige Verhältnisse.

Diese Erkenntnisse führten zu dem Rückschluss, dass eine breitere Verteilung der Durchflüsse verbessernd wirken müsste und es wurden zwei weitere Varianten mit Teilverschlüssen mehrerer Öffnungen untersucht. Nur die HSÖ blieb stets voll geöffnet. Wie erwartet, traten geringere Maximalgeschwindigkeiten der Strömung auf.

Morphodynamische Kolkuntersuchungen

Im Anschluss an diese Voruntersuchung wurden vier Varianten mit insgesamt 10 Einzeluntersuchungen mit beweglicher Sohle im Modell untersucht. Die beiden ersten Untersuchungsvarianten führten zu dem Ergebnis, dass die starken Strahlströmungen in Verbindung mit den durch diese bewirkten Strömungswalzen zu untragbaren Kolk-tiefen um 30 m unter NN und in ihrer Lage labilen Kolken führt.

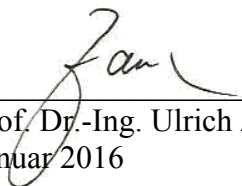
Weiterhin traten im Bereich südlich der tiefen Rinne erhebliche Auflandungen im Nahbereich binnenseits des Sperrwerks ein. Mit einem Leitdamm, dessen Auswirkung exemplarisch untersucht wurde, ließen sich die sehr unterschiedlichen Strömungsklima mit einem starken Strahl aus der HSÖ einerseits und mit einer dadurch angetriebenen Walzenströmung andererseits trennen und einige der negativen Effekte unterdrücken.

Wegen der erheblichen Kosten der Herstellung und Unterhaltung einer derartigen Maßnahme und vor dem Hintergrund dass sich im Modell dennoch Kolk-tiefen von deutlich über 20 m innerhalb eines Jahres ausbildeten, wurde im nächsten Schritt untersucht, welche Auswirkungen es hätte, wenn die HSÖ während der Betriebssteuerung geschlossen würde. Unter dieser Vorgabe wurden vier Einzeluntersuchungen durchgeführt. Ergebnis war, dass bei geschlossener HSÖ vergleichsweise günstige Verhältnisse erreicht werden, wenn alle übrigen Durchlässe mit Teilöffnungen betrie-

ben werden, wobei die Öffnungshöhen so geregelt werden, dass die Abstromgeschwindigkeiten in der Ems hinter allen Öffnungen etwa gleich ist. Nur die NÖ5 am südlichen Ufer wird weniger geöffnet, um einen Angriff auf das dortige Ufer zu vermeiden.

Allgemeine Anmerkungen

Gewässersohlen, die unter den vorherrschenden Strömungen beweglich sind, unterliegen dauerhaft Veränderungen. Solche Veränderungen sind heftig, wenn Strömungsklima und Gewässerform sich nicht aufeinander angepasst sind, wie dies z.B. bei Beginn der Betriebssteuerung der Fall ist. Mit der Zeit werden die Anpassungsraten immer geringer und schließlich bleiben die aus allen Gewässern mit beweglicher Sohle bekannten schleichenden Variationen der Sohlform. Dieser Zustand wird bisweilen als dynamisch stabil bezeichnet.



Prof. Dr.-Ing. Ulrich Zanke
Januar 2016

Literatur

1. d'Angremont, K. (2011): *Review of Scour and Scour Protection at the Storm Surge Barrier in the River Ems near Gandersum*. Gutachten, unveröffentlicht
2. BAW (2010): *Aktionsprogramm des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems*. Hamburg, Juli 2010(Nr. A39550310143)
3. Ettmer, B., Orth, F., and Link, O. (2015). *Live-Bed Scour at Bridge Piers in a Lightweight Polystyrene Bed*. J. Hydraul. Eng., 141(9)
4. Franzius-Institut (2001): *Emssperrwerk bei Gandersum. Teil 2/2- Durchflüsse und Strömungsverhältnisse im Nahbereich des Sperrwerks bei Normaltiden*. Bericht Nr. 621, S. 72-74
5. Latteux, B. (1995): *Techniques for long term morphological simulation under tidal action*. Marine Geology 126
6. Roelvink, D. & Reniers, A.. (2012): *A Guide to Modelling Coastal Morphodynamics*. Advances in Coastal and Ocean Engineering. Volume 12
7. Zanke, U. (1978): *Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport Teil 2: Berechnung des Sedimenttransports hinter befestigten Sohlenstrecken – Sonderfall zweidimensionaler Kolk-*, Mitt. Franzius-Institut Univ. Hannover, Heft 48
8. Zanke, U. (1982): *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York.
9. Zanke, U. (1993): *Sachstandsbericht zur Entwicklung eines Numerischen Modells mit beweglicher Sohle*. (HYDRO-CONSULT-HANNOVER, in beschränkter Anzahl veröffentlicht).
10. Zanke, U. (1994): *Zur Entwicklung eines numerischen Modells mit beweglicher Sohle*. (Wasser und Boden, Heft 12, 1994
11. Zanke, U. (1995): *Sachstandsbericht zur Entwicklung eines Numerischen Modells mit beweglicher Sohle, II - Sohle aus Korngemisch*. (HYDRO-CONSULT-HANNOVER, 1995, in beschränkter Anzahl veröffentlicht).
12. Zanke, U. (2002): *Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer*. Parey-Verlag
13. Zanke, U. (2004): *Kann Hiddensee durchbrechen ? - Morphodynamische Simulationen im Ostseebereich*. Jb. der Hafenbautechnischen Gesellschaft HTG
14. Zanke, U. (2008): *On Applicability of Morphodynamic Acceleration in Morphodynamic Simulations*. Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (JOINT2008). Mitt. des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, Heft 144
15. Zanke, U. (2013): *Scour depth during flow event*. 12. Intern. Symposium on River Sedimentation (ISRS2013), Kyoto, Japan