

# **Bericht**

Dipl.-Ing.  
Reinhard Lutz  
Kowalski  
**valitec**<sup>®</sup>

## **Projekttitlel**

Erweiterung des Hafens Emmelsum

## **Auftraggeber**

Delta Port GmbH & Co. KG, Wesel.

## **Dienstleistung**

Hydraulische Begutachtung des geplanten Bauvorhabens hinsichtlich seiner Auswirkungen auf Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserspiegellagen und Sohlschubspannungen im Rhein und in der Rheinaue sowie auf das Retentionsvermögens der Rheinaue.

# Inhalt

<b>INHALT .....</b>	<b>2</b>
<b>TABELLEN.....</b>	<b>3</b>
<b>ABBILDUNGEN .....</b>	<b>3</b>
<b>AUFGABENSTELLUNG UND VORGEHEN .....</b>	<b>4</b>
<b>VERWENDETE UNTERLAGEN.....</b>	<b>6</b>
<b>DIGITALES STRÖMUNGSMODELL.....</b>	<b>7</b>
WAHL DES UNTERSUCHUNGSRAUMES.....	8
STRÖMUNGSMODELL IST .....	9
RAUHEITEN .....	10
STRÖMUNGSMODELL PLAN1 .....	11
STRÖMUNGSMODELL PLAN2.....	12
STRÖMUNGSMODELL PLAN3.....	12
<b>ABFLUSSSIMULATIONEN .....</b>	<b>13</b>
RANDBEDINGUNGEN.....	14
MODELLKALIBRIERUNG .....	14
<b>IST-ZUSTAND.....</b>	<b>15</b>
<b>PLANUNGSZUSTAND 1 .....</b>	<b>16</b>
<b>PLANUNGSZUSTAND 2 .....</b>	<b>17</b>
BEPFLANZUNG DER AUFSCHÜTTUNGSBÖSCHUNG – PLAN2.....	18
<b>PLANUNGSZUSTAND 3 .....</b>	<b>22</b>
ERGEBNIS FÜR HOCHWASSER MHQ – PLAN3 .....	22
ERGEBNIS FÜR HOCHWASSER HHQ – PLAN3 .....	24
<b>RETENTIONSOLUMEN.....</b>	<b>25</b>
STATISCHES VOLUMEN .....	25
STRÖMUNGSDYNAMIK.....	27
<b>AUSWIRKUNGEN AUF ANDERE ANLIEGER.....</b>	<b>27</b>
RETENTIONSRAUM .....	27
WASSERSPIEGEL.....	28
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>29</b>
<b>ANLAGEN - FLÄCHIGE DARSTELLUNGEN.....</b>	<b>30</b>

## Tabellen

Tabella 1:	Berechnungsvarianten;.....	5
Tabella 2:	Bewuchsvarianten der Böschung;.....	12
Tabella 3:	Randbedingungen der Abflusssimulationen;.....	14
Tabella 4:	Wasserspiegel bei $BHQ_{2004}$ [mNN];.....	26
Tabella 5:	Retentionsvolumina [ $m^3$ ];.....	27

## Abbildungen

Abbildung 1:	Übersicht über das Untersuchungsgebiet; Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;.....	4
Abbildung 2:	BAW-Modell mit markiertem Modellausschnitt; Ohne Maßstab;.....	7
Abbildung 3:	Modelauslauftrand des digitalen Strömungsmodells; Kartengrundlage DOP © Geobasis NRW 2011;.....	8
Abbildung 4:	Ausschnitt des Untersuchungsraumes im BAW-Modell und im aktualisierten Strömungsmodell IST;.....	9
Abbildung 5:	Bewuchszonen zur Detaillierung der Rauheiten auf dem Vorland; Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;.....	10
Abbildung 6:	Rechtes Rheinufer mit Bewuchs bei Rhein-km 812; Blickrichtung stromauf;.....	10
Abbildung 7:	Baumriegel vor dem Hafen Emmelsum; Blickrichtung stromab auf den Hafen Emmelsum;.....	11
Abbildung 8:	PLAN1-Modell; PLAN2-Modell und PLAN3-Modell;.....	11
Abbildung 9:	Böschung des PLAN3-Modells (Orange) im Vergleich zu PLAN1 (Grau) und PLAN2 (Blau); Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;.....	13
Abbildung 10:	Überprüfung des kalibrierten Modells;.....	15
Abbildung 11:	Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Rheinachse; PLAN1 minus IST;.....	16
Abbildung 12:	Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Rheinachse; PLAN2 minus IST;.....	17
Abbildung 13:	Achsen der Graphen entlang der Aufschüttungsböschung quer zur Böschung und mit Stationen [m]; Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;.....	18
Abbildung 14:	Wasserspiegel entlang der Aufschüttungsböschung;.....	19
Abbildung 15:	Einfluss der Böschungsbepflanzung auf die Vorlandströmung bei $MHQ_{AMW+4}$ ;.....	20
Abbildung 16:	Einfluss der Böschungsbepflanzung auf die Vorlandströmung bei $HHQ_{1926}$ ;.....	21
Abbildung 17:	Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Rheinachse; PLAN3 minus IST;.....	22
Abbildung 18:	Schnitt durch die Hafenerweiterung; a – Bemessungswasserspiegel; b – Aufschüttung; c – ursprüngliches Gelände; d – durch die Aufschüttung verlorener Retentionsraum;.....	25
Abbildung 19:	Ausgleich des Retentionsvolumens entlang des Rheins;.....	28
Abbildung 20:	Schematische Darstellung der Wasserspiegelveränderung eines Fließgewässers durch eine Engstelle;.....	28

Verschiedene Abbildungen sind zur besseren Orientierung mit topografischen Karten als Hintergrund versehen.

Verbunden mit den Karten ist der Copyright-Vermerk:

Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW ©Geobasis NRW 2011

## Aufgabenstellung und Vorgehen

Für den Hafen Emmelsum bei Wesel ist eine Erweiterung geplant. Dazu soll die Hafensfläche am Westkai des vorhandenen Hafens durch eine Aufschüttung auf den Rheinvorländern erweitert werden. Diese geplante Aufschüttung verengt den Abflussquerschnitt des Rheins bei Hochwasser.

Im Rahmen des wasserrechtlichen Planfeststellungsverfahrens soll mit einem zweidimensionalen-tiefengemittelten hydraulisch-numerischen Modell der Einfluss der Baumaßnahme auf den Hochwasserabfluss des Rheins untersucht werden.



Abbildung 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet; Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;

Ergänzend zu der Begutachtung des geplanten Bauvorhabens hinsichtlich seiner Auswirkungen auf Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserspiegellagen und Sohlschubspannungen im Rhein und in der Rheinaue, soll auch das Retentionsvolumen ermittelt und dem geplanten Ausgleichsvolumen der Emschermündung gegenübergestellt werden. Die Gegenüberstellung soll quantitativ und funktional beurteilt werden.

Des Weiteren soll eine Beurteilung der möglichen Auswirkungen auf andere Rheinanlieger erstellt werden. Besonders werden die Auswirkungen im Hochwassergebiet des Rheins stromauf und stromab des Hafens Emmelsum sowie im Rückstaugebietes der Lippe beurteilt.

Im Einzelnen sind folgende Ziele festgelegt:

- Aufstellung eines 2D-Modells für das Untersuchungsgebiet zwischen Rhein-km 808,0 und 815,0 für den jetzigen und zukünftigen Zustand (IST und PLAN).
- Ermittlung der Wasserspiegellagen, der Strömungsverhältnisse und der Sohlschubspannungen bei mittlerem sowie bei höchstem Hochwasser (MHQ und HHQ).
- Untersuchung von möglichen Planungsanpassungen und Bewuchsvarianten an den Aufschüttungsböschungen.
- Ermittlung des Retentionsvolumens und Beurteilung gegenüber des Ausgleichsvolumens.
- Beurteilung der Auswirkungen auf andere Anlieger.

Die geplante Stromaufteilung und der Hochwasserabfluss im Untersuchungsraum sind stark von zweidimensionalen Strömungen gekennzeichnet. Hier lassen sich nur mit zweidimensionalen Ansätzen zuverlässige und belastbare Aussagen über die sich einstellenden Strömungsverhältnisse und Wasserspiegellagen berechnen.

Die Auswirkungen der Baumaßnahmen auf den Rhein sollen mit einem zweidimensional-tiefengemittelten hydrodynamisch-numerischen Modell überprüft werden. Dazu werden mit einem kalibrierten Modell stationäre Wasserspiegellagen für den jetzigen Zustand und für den geplanten Zustand berechnet. Die Tabelle 1 fasst alle durchgeführten Berechnungen zusammen.

Tabelle 1: Berechnungsvarianten;

<i>Untersuchung</i>	<i>Bewuchs</i>	<i>Modell</i>	<i>MHQ<sub>2007</sub></i>	<i>HHQ<sub>1995</sub></i>	<i>MHQ<sub>AMW+4</sub></i>	<i>HHQ<sub>1926</sub></i>
<i>Kalibrierung</i>		<i>IST</i>	<i>X</i>	<i>X</i>		
<i>Referenz</i>		<i>IST</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>		<i>PLAN1</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>		<i>PLAN2</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>	<i>VAR1</i>	<i>PLAN2</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>	<i>VAR2</i>	<i>PLAN2</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>	<i>VAR3</i>	<i>PLAN2</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>	<i>VAR4</i>	<i>PLAN2</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>		<i>PLAN3</i>			<i>X</i>	<i>X</i>
<i>Nachweis</i>		<i>PLAN3</i>			<i>X</i>	<i>X</i>

Dazu soll ein vorhandenes kalibriertes digitales Strömungsmodell angepasst und die geplanten Veränderungen eingearbeitet werden. Mit dem kalibrierten Modell werden dann die geforderten Berechnungen durchgeführt.

## Verwendete Unterlagen

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) stellte für diese Untersuchung ein Modell des Rheins zur Verfügung. Das Modell (Niederrheinmodell NRM4) umfasste:

- DSM von Rhein-km 805,0 bis Rhein-km 852,9; Digital; BAW Karlsruhe.

Von der WSA Duisburg-Rhein wurden Hydrologische Daten und Geländedaten aus aktuellen Befliegungen zur Verfügung gestellt:

- Aktuelle Laser-Scan-Daten (x,y,z) im 1x1 m Raster; Digital.
- Abflusstafeln der Pegel Ruhrort, Wesel und Rees; Gültig ab 01.04.1993 bis 31.10.2002; Digital.
- Abflusstafeln der Pegel Ruhrort, Wesel und Rees; Gültig ab 01.11.2002; Digital.
- Wasserspiegel der Rheinachse von Rhein-km 780,0 bis 838,0 für die Wasserstände AMW1990, HW1993, HW1995, HHW1926 sowie eine Wasserspiegelfixierung vom 06.03.2007 bei MHW; Digital.
- Korrekturwerte der Höhen der Rheinachse von Rhein-km 638,0 bis 865,5 für die Umrechnung vom Höhensystem DHHN12 (NN-Höhen) nach DHHN92 (NHN-Höhen); Digital.

Vom Auftraggeber wurden ebenfalls Unterlagen und Daten für die Bearbeitung zur Verfügung gestellt und mit eigenen Recherchen und Besorgungen ergänzt. Im Einzelnen wurden folgende Unterlagen verwendet.

Vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden:

- DGK5, DLM, DOP, TK10 und TK25 vom Untersuchungsgebiet; Digital.
- Artenschutzprüfung; Bericht mit Anlagen; Institut für Landschaftsentwicklung und Stadtplanung; Essen; Juli 2011; Digital.
- Umweltverträglichkeitsstudie mit Landschaftspflegerischem Begleitplan; Bericht mit Anlagen; Institut für Landschaftsentwicklung und Stadtplanung; Essen; Juli 2011; Digital.
- Genehmigungsplanung; Pläne und Erläuterungsbericht zur Entwurfsplanung; Digital; Ingenieurbüro R. A. Patt GmbH; Voerde; Juni 2011; Digital.
- Genehmigungsplanung; Pläne und Erläuterungsbericht; Ingenieurbüro R. A. Patt GmbH; Voerde; März 2014; Digital.
- Ergänzung des Antrags der Emscher Genossenschaft vom 18.08.2008 auf Planfeststellung nach § 68 WHG zum Umbau der Emschermündung km 0,0 bis 1,6; Blatt 32; Ingenieurgemeinschaft Umbau Emschermündung; Essen; Februar 2013; Digital.
- Zusammenstellung Wasserspiegellagen des Rheins im Regierungsbezirk Düsseldorf; Festgelegt durch Be-

zirksregierung Düsseldorf mit Verfügung vom 24.05.2004, Aktenzeichen 54.12.00, veröffentlicht im Amtsblatt Nr.26 vom 24.06.2004; Staatliches Umweltamt Krefeld; Krefeld; Dezember 2004; Digital.

Aus eigener Recherche:

- Fotografien von der Ortsbegehung im August 2011.

## Digitales Strömungsmodell

Zur Erstellung eines digitalen Strömungsmodells wird ein sogenanntes DGMW, ein digitales Geländemodell mit Unterwasserstrukturen und Bruchkanten eingesetzt. Da das aktuelle DGMW der BfG (2011) zum Beginn der Arbeiten noch nicht vorlag, wurde, in Abstimmung mit dem WSA Duisburg-Rhein, auf ein älteres Niederrheinmodell (2001) der BAW zurückgegriffen. Die zwischenzeitlich veränderte Situation im Vorlandbereich vor dem Hafen Emmelsum wurde mit aktuellen Geländedaten im Modell berücksichtigt.

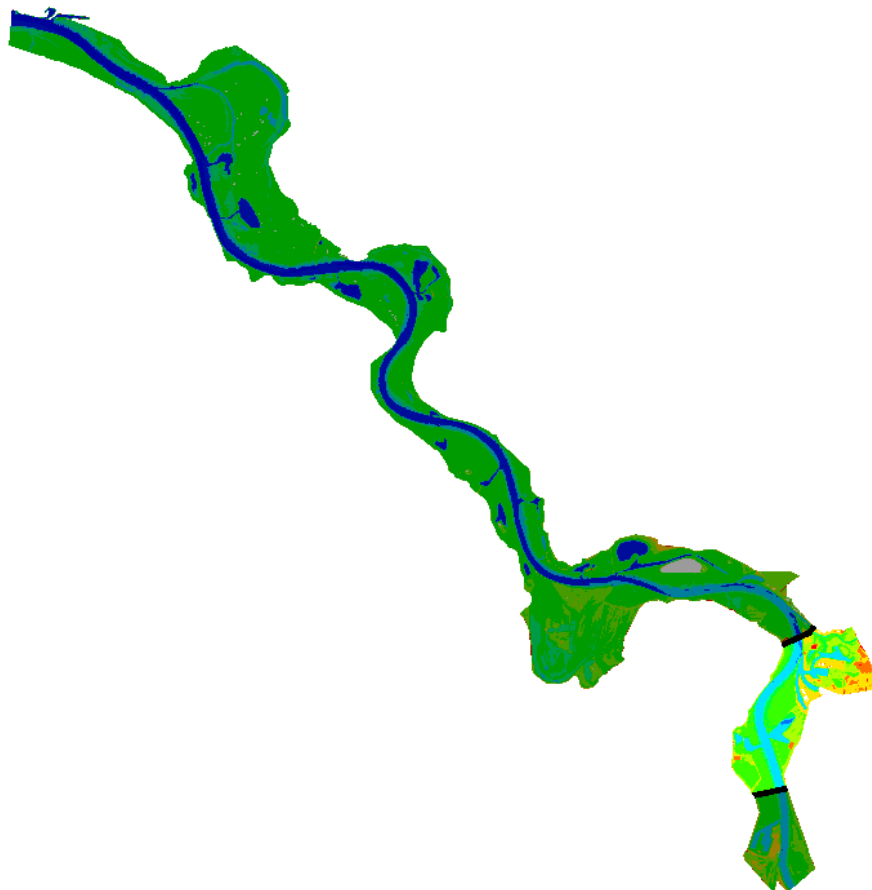


Abbildung 2: BAW-Modell mit markiertem Modellausschnitt; Ohne Maßstab;

## Wahl des Untersuchungsraumes

Aus dem Niederrheinmodell NRM4 (993.866 Elemente) der BAW wurde ein Modellausschnitt von Rhein-km 808,3 bis 813,761 herausgetrennt (vgl. Abbildung 2). Damit wurde das Ausgangsmodell auf ca. 120.000 Elemente reduziert. Die Schnitte sind so gewählt, dass die Schnittkanten nicht durch Rückströmzonen verlaufen.

Die Lage des Unterwasserrandes (Abbildung 3) des Modells wurde stromauf der Rheinbrücke bei Wesel gewählt. Damit ist das Modell unabhängig gegenüber zukünftigen Veränderungen am linken Rheinufer (Rückbau der alten Brückenrampe). Es ergibt sich ein zweigeteilter Auslauftrand. Im Westen wird der Hauptstrom in einem Winkel von ca.  $65^\circ$  geschnitten und im Nordosten die Lippe am Brückendurchlass orthogonal. Dazwischen bildet das rechtsrheinische Brückenwiderlager eine Trennung, die nicht überströmt wird.

Das eingesetzte Verfahren RISMO2D erlaubt, neben einer unbestimmten Zahl von Aus- und Einlaufrändern auch den nichtrechtwinkligen Modellauslauf. Lediglich die Wasserspiegelerhöhung an der Kurvenaußenseite kann am Auslauftrand nicht vorgegeben werden. Es wird eine einheitliche (mittlere) Wasserspiegellage als Randbedingung angesetzt. Das Modell bildet diese Kurvenüberhöhung des Wasserspiegels aber schon ca. 200 m stromauf vollständig aus. Mit ca. 1,4 km Abstand zu der untersuchten Engstelle am Hafen Emmelsum ist eine Beeinflussung durch den horizontalen Auslauftrand ausgeschlossen.



Abbildung 3: Modelauslauftrand des digitalen Strömungsmodells; Kartengrundlage DOP © Geobasis NRW 2011;

Der Oberwasserrand des Modells wird an der Engstelle der Rheinvorländer zwischen dem linksrheinischen Wallach und dem rechtsrheinischen Kolkshof (Rhein-km 808,3) gewählt. Zur Verringerung möglicher Einlaufstörungen aus der orthogonalen Einlauftrandbedingung wird das Modell ins Oberwasser um 855,0 m verlängert. Dazu wurde das letzte Querprofil im Abstand von 15,0 m 57 mal wiederholt.



## Strömungsmodell IST

In dem hier eingesetzten BAW-Modell sind die Vorlandgeometrien im Bereich des Emmelsumer Hafens nicht mehr aktuell. Großflächige Renaturierungen und neu angelegte Flutgräben im Vorland sowie das Nordkai Terminal am Emmelsumer Hafen sind die wesentlichen Veränderungen. Gerade die neue Vorlandgeometrie beeinflusst die Anströmung zu der Engstelle am Emmelsumer Hafen und damit auch die Anströmung zu der geplanten Aufschüttung. Dementsprechend musste das BAW-Modell in diesem Bereich aktualisiert werden. Die Abbildung 4 zeigt die Korrekturen im Vergleich. So wurden die umfangreichen Geländeänderungen aus den aktuellen Laser-Scan-Daten ermittelt. Um eine konsistente Abbildungsqualität zu erreichen wurden die fehlenden Bruchkanten durch eine höhere Netzauflösung in diesen Bereichen kompensiert.

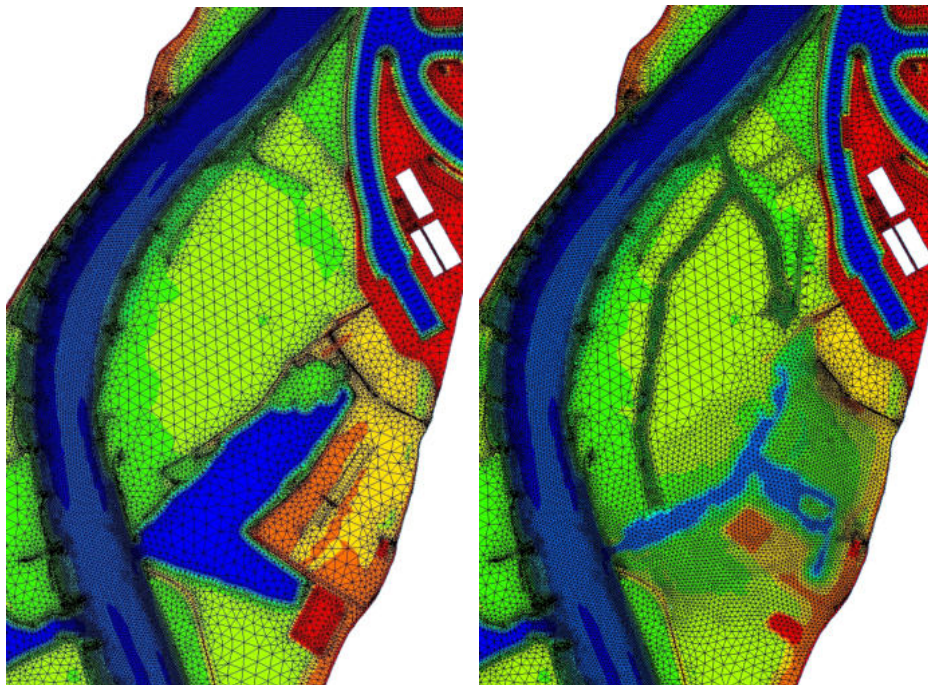


Abbildung 4: Ausschnitt des Untersuchungsraumes im BAW-Modell und im aktualisierten Strömungsmodell IST;

Zudem wurden Strukturkanten von markanten Baumreihen im Vorland in das Rechenetz eingearbeitet. Die geometrischen Daten dazu wurden aus vorliegenden Biotopkartierungen entnommen.

Die abschließende Auflösung des IST-Modells beträgt 134.103 Elemente, 202.118 Elementkanten und 207.110 Knoten. Die kleinste Elementseite beträgt 0,90 m und die größte 76,71 m (Bereich BAW-Modell). Der kleinste Innenwinkel beträgt  $5,44^\circ$  und der größte  $156,15^\circ$ . Das Flächenverhältnis zwischen benachbarten Elementen liegt bei maximal 14,8. Bei 180.814 von 200.181 Elementnachbarschaften ist das Flächenverhältnis kleiner als 2,0. Dies entspricht einem Anteil von 90,33 %. Minimal sollten es zwischen 80 % und 90 % sein.

## Rauheiten

Die Rauheitsmodelle der Kalibrierungen der BAW wurden übernommen (Rhein-km 803,8 – 852,7). Jeder Kilometerabschnitt hat eigene Material-Nummern für die Sohle, für den linken Uferbereich und für den rechten Uferbereich und für die Vorländer. Besondere Bereiche wie einzelne Buhnen, Häfen und Bewuchszonen haben ebenso eigene Material-Nummern. Insgesamt sind 520 unterschiedliche Bereiche angesprochen.

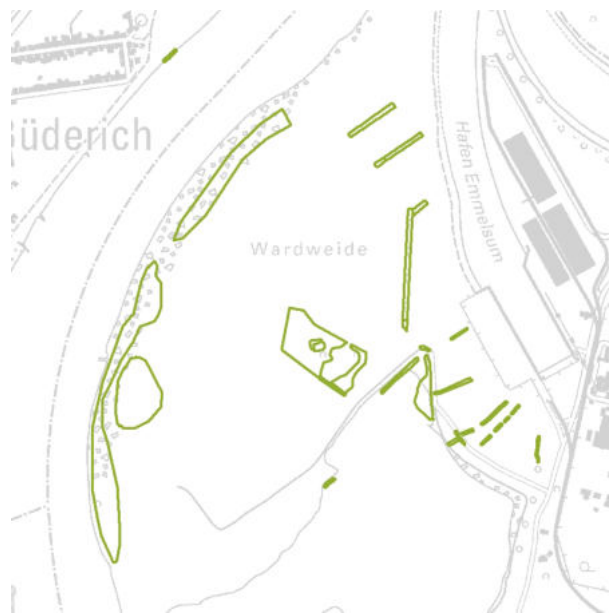


Abbildung 5: Bewuchszonen zur Detaillierung der Rauheiten auf dem Vorland; Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;

Dieser, für großflächige Modelle ausreichende Detaillierungsgrad musste im vorliegenden Fall weiter verfeinert werden (Abbildung 5). Besonders die Anströmung zur Engstelle am Emmelsumer Hafen wird auch durch Rauheiten beeinflusst. So sind in den letzten Jahren am rechten Rand des Hauptgerinnes großflächige Auenvegetationen entstanden (vgl. Abbildung 6), die das Strömungsbild wesentlich verändern können. Diese, bis zu 4,0 m hohen Pflanzen sind in der Biotopkartierung erfasst und bilden einen erheblichen Fließwiderstand.



Abbildung 6: Rechtes Rheinufer mit Bewuchs bei Rhein-km 812; Blickrichtung stromauf;

Im unmittelbar an den Emmelsumer Hafen angrenzenden Bereich des Vorlandes sind drei größere Baum- und Ge-

büschreihen vorhanden (vgl. Abbildung 7). Die Ausrichtung dieser Riegel ist bei Hochwasser z. T. quer zur Strömungsrichtung. So bilden diese relativ kleinen Bewuchsflächen bei Hochwasser relevante Strömungshindernisse. Die geometrischen Formen dieser Flächen (Strukturkanten) wurden bereits in das Strömungsmodell eingebaut.



Abbildung 7: Baumriegel vor dem Hafen Emmelsum; Blickrichtung stromab auf den Hafen Emmelsum;

Die Berechnung der Vegetationsrauheiten erfolgt in RISMO2D mit den Ansätzen von Lindner/Pasche für den durchströmten Bewuchs und nach Van Velsen für den überströmten Bewuchs. Dementsprechend wurden die Bewuchszonen auf dem Vorland mit mittleren Baumabständen, mittleren Durchmessern und Pflanzenhöhen parametrisiert.

## Strömungsmodell PLAN1

In das Strömungsmodell IST wurden die Planungen zur Hafenerweiterung eingearbeitet und damit das Strömungsmodell PLAN1 aufgebaut. Die geplanten Aufschüttungsböschungen standen als Bruchkanten zur Verfügung. Die Böschungen wurden mit dem vorhandenen Gelände verschnitten. Die Abbildung 8 zeigt links einen Ausschnitt aus dem PLAN1-Modell. Im Bereich des nordwestlichen Knickes der Böschung wurde, in Erwartung von großen Strömungsgradienten, das Netz verfeinert.

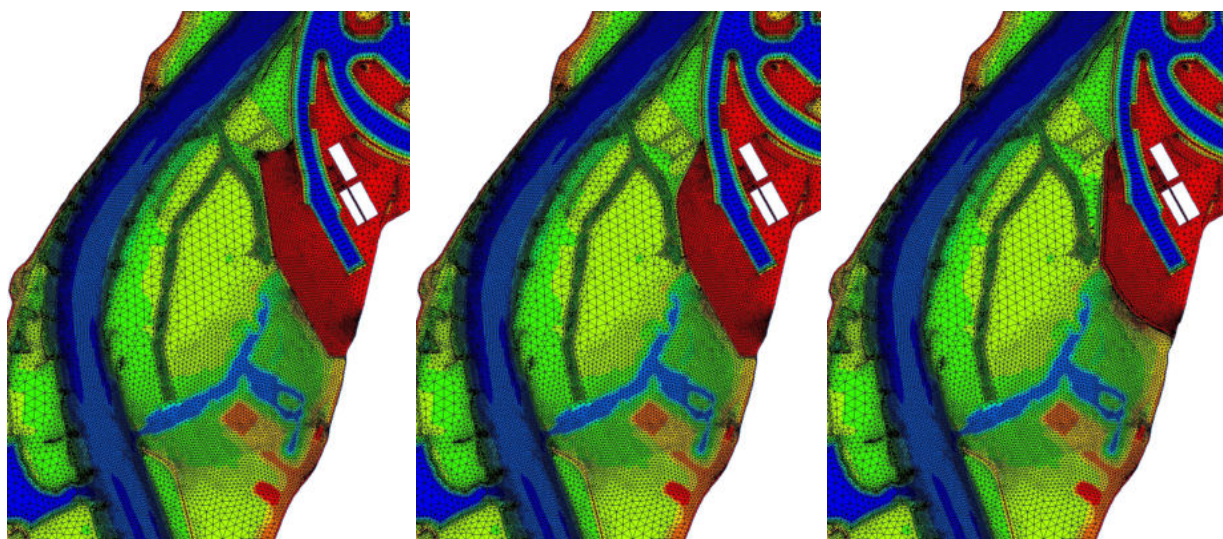


Abbildung 8: PLAN1-Modell; PLAN2-Modell und PLAN3-Modell;

Die Auflösung des PLAN1-Modells betrug 136.376 Elemente, 205.532 Elementkanten und 274.668 Knoten. Die kleinste Elementseite beträgt 0,82 m und die größte 76,71 m. Der kleinste Innenwinkel beträgt  $4,19^\circ$  und der größte  $147,07^\circ$ . Das Flächenverhältnis zwischen benachbarten Elementen liegt bei maximal 14,88. Bei 184.323 von 203.595 Elementnachschaften ist das Flächenverhältnis kleiner als 2,0. Dies entspricht einem Anteil von 90,05 %.

## Strömungsmodell PLAN2

Mit der Optimierung des Entwurfs wurde ein Strömungsmodell PLAN2 aufgebaut (Abbildung 8 Mitte). Im Wesentlichen wurde die nordwestliche Ecke der Böschung durch eine Ausrundung und durch eine strömungsgünstige Abflachung ersetzt.

Die Auflösung des PLAN2-Modells betrug 136.456 Elemente, 205.649 Elementkanten und 274.819 Knoten. Die kleinste Elementseite beträgt 0,72 m und die größte 76,71 m. Der kleinste Innenwinkel beträgt 3,61° und der größte 151,41°. Das Flächenverhältnis zwischen benachbarten Elementen liegt bei maximal 16,86. Bei 184.151 von 203.707 Elementnachbarschaften ist das Flächenverhältnis kleiner als 2,0. Dies entspricht einem Anteil von 90,04 %.

### Bewuchsvarianten

Zur Beurteilung, wie sich eine Bepflanzung der Aufschüttungsböschung auf das Abflussverhalten des Rheins und auf die Standsicherheit der Böschung auswirkt wurden vier Bewuchsvarianten am Modell PLAN2 untersucht (Tabelle 2). Dazu wurden die Böschungselemente mit eigenen Materialkennziffern belegt und die Bewuchsparameter der Böschungselemente entsprechend geändert.

Tabelle 2: Bewuchsvarianten der Böschung;

	<i>Beschreibung</i>
<i>VAR0</i>	<i>Grasdeckung</i>
<i>VAR1</i>	<i>Bäume und Sträucher auf der gesamten Böschung</i>
<i>VAR2</i>	<i>Truppweise Bäume und Sträucher auf der Böschung</i>
<i>VAR3</i>	<i>Bäume am Böschungsfuß</i>
<i>VAR4</i>	<i>Sträucher am Böschungsfuß</i>

Für die Variante VAR2 wurden die Elemente der Böschung abwechselnd mit den Bewuchsparametern des umgebenden Vorlandes und der Variante VAR1 belegt. Daraus resultiert eine Deckung für die Variante von ca. 50 %.

Für die Varianten VAR3 und VAR4 wurden die an den Böschungsfuß angrenzende Elemente geteilt, so dass ein 6,0 m breiter Streifen mit eigenen Bewuchsparametern belegt werden konnte. Der Streifen wurde 2,0 m in den Bereich der Böschung und 4,0 m in den Bereich des Vorlandes gelegt.

## Strömungsmodell PLAN3

Durch die Ausweisung von Vogelschutzgebieten auf dem rechten Rheinvorland musste die Planung der Hafenerweiterung verändert werden. Die Abbildung 9 zeigt die Planungen im Vergleich. Die Aufschüttungsböschung wird im Westen hinter den Baumriegel des Rheinvorlandes (vgl. Abbildung 7 rechts) verlegt und im Süden an die vorhandene Straße angepasst. Damit ist ein weiteres Untersuchungsmodell notwendig. Mit den vorliegenden Böschungen



wurde das Modell PLAN3 aufgebaut (Abbildung 8 rechts).



Abbildung 9: Böschung des PLAN3-Modells (Orange) im Vergleich zu PLAN1 (Grau) und PLAN2 (Blau);  
Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;

Die Auflösung des PLAN2-Modells betrug 136.077 Elemente, 205.078 Elementkanten und 274.056 Knoten. Die kleinste Elementseite beträgt 0,88 m und die größte 76,71 m. Der kleinste Innenwinkel beträgt  $3,45^\circ$  und der größte  $162,93^\circ$ . Das Flächenverhältnis zwischen benachbarten Elementen liegt bei maximal 18,38. Bei 183.425 von 203.152 Elementnachbarschaften ist das Flächenverhältnis kleiner als 2,0. Dies entspricht einem Anteil von 90,29 %.

## Abflusssimulationen

Die Abflusssimulationen (Tabelle 1) wurden an den gekürzten und verbesserten Modellen (IST, PLAN1, PLAN2 und PLAN3) durchgeführt. Es wurde ein stationäres Strömungsmodell mit quadratischen Ansatzfunktionen für die Strömung und linearen Ansatzfunktionen für den Wasserspiegel gewählt. Zur Iteration wurde ein Zeitschritt-Relaxations-Verfahren mit einer Zeitschrittlänge von 24h angewandt. Die Turbulenzmodellierung erfolgte mit einem anisotropen Schubspannungsmodell nach Elder.

Bei allen Berechnungen konnte ein stationäres Ergebnis erreicht werden. Als das Kriterium des Erreichens des stationären Zustandes wurden die Konvergenzen der Varianzen der Geschwindigkeiten bzw. der Fließtiefen gegen Null benutzt. Bei ausreichend kleinen Varianzen von ca.  $10^{-8}$  war eine stationäre Strömung erreicht.

## Randbedingungen

Die Zuflüsse zum Modellgebiet, und damit auch der jeweilige Anteil der Lippe, wurden aus den Pegeldata der Pegel Ruhrort und Wesel bestimmt.

$$Q_{Lippe} = \left( 1 - \frac{Q_{Pegel\ Ruhrort}}{Q_{Pegel\ Wesel}} \right) * Q_{Pegel\ Wesel} \quad \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Im Mittel betrug der Lippe-Anteil 2,92 % vom Rheinabfluss am Pegel Wesel. Um diesen Anteil reduziert ergab sich der Zufluss zum Modellgebiet.

$$Q_{Modell} = Q_{Pegel\ Wesel} - Q_{Pegel\ Lippe} \quad \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Zusammen mit den Wasserständen am Modellauslauf waren damit die Randbedingungen festgelegt. Die Tabelle 3 zeigt alle eingesetzten Randbedingungen.

Tabelle 3: Randbedingungen der Abflusssimulationen;

		<i>Zufluss Rhein-km 808,3</i> [m <sup>3</sup> /s]	<i>Zufluss Lippe</i> [m <sup>3</sup> /s]	<i>Wasserspiegel Rhein-km 813,8</i> [mNN]
<i>Kalibrierung</i>	<i>MHQ<sub>Fix. 06.03.2007</sub></i>	5923	178	19,42
	<i>HQ<sub>1995</sub></i>	11515	347	22,37
<i>Referenz</i>	<i>MHQ<sub>AMW1990+4,0 m</sub></i>	5194	156	18,80
	<i>HHQ<sub>1926</sub></i>	14470	436	23,57

## Modellkalibrierung

Ausgang der Berechnungen war das Niederrheinmodell NRM4 der BAW. Die Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen der einzelnen NRM4-Berechnungen wurden auf das IST-Modell als Initialisierung übertragen. Mit den Randbedingungen der Tabelle 3 wurden dann für das IST-Modell die zwei Abflusssituationen der Kalibrierung berechnet.

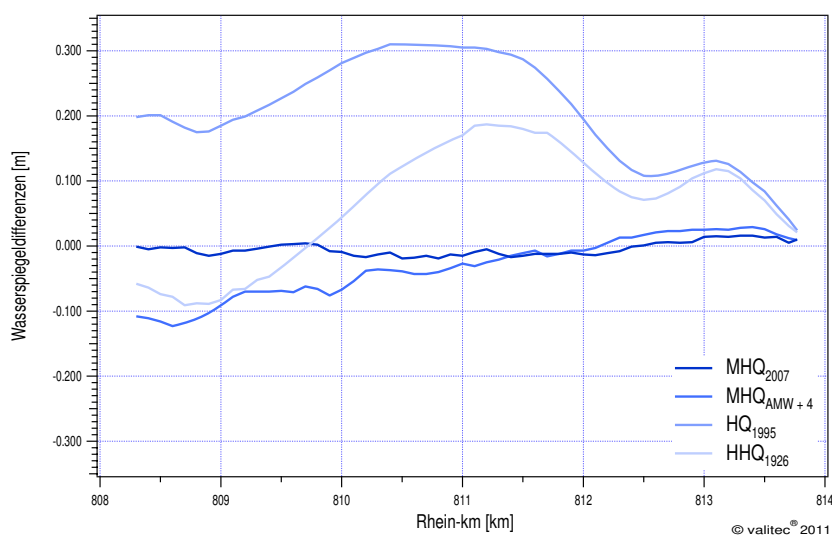


Abbildung 10: Überprüfung des kalibrierten Modells;

Die Berechnungen wurden anhand von Wasserspiegelfixierungen, passend zu den jeweiligen Abflüssen, überprüft. In der Abbildung 10 sind die Differenzen zu den Fixierungen dargestellt (IST minus Fixierung). Insgesamt liegen alle Abweichungen im Rahmen der Ausgangskalibrierung der BAW.

Die Wasserspiegel des Kalibrierungs-Abflusses MHQ<sub>2007</sub> sind mit den maximalen Abweichungen von +0,016 m und -0,019 m sehr gut getroffen. Das Modell bildet die Situation vom Jahr 2007 besonders gut ab.

Für den Kalibrierungs-Abfluss HQ<sub>1995</sub> werden die Wasserspiegel nur schlecht wiedergegeben und erreichen Höchstwerte von 0,310 m. Mit dem Verlauf des Hochwassers von 1995 hat sich die Flusssohle vermutlich durch Riffelbildung und Materialumlagerungen stark verändert. Auch sind in den betrachteten Vorlandbereichen seit 1995 umfangreiche Umbauten, Renaturierungen und Kiesbaggerungen durchgeführt worden.

Mit einem speziellen „Hochwasser 1995 Modell“ ließe sich vermutlich ein besseres Kalibrierungsergebnis erzielen, aber dies würde auch die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Abflüssen reduzieren.

Letztlich beruht die vorliegende Untersuchung auf dem Vergleich zwischen der jetzigen Situation und einem zukünftigen (geplanten) Zustand. Für diesen Zweck sind die Wasserstände für den Kalibrierungs-Abfluss HQ<sub>1995</sub> ausreichend gut getroffen.

## IST-Zustand

Mit den Randbedingungen (Tabelle 3) für die Referenzrechnung wurden die Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen für den IST-Zustand berechnet. In der Abbildung 10 sind die Ergebnisse für die Stromachse dargestellt.

Beide Abflüsse sind ausreichend gut getroffen. Der Abfluss MHQ<sub>AMW+4</sub> zeigt mit der gleichmäßigen Neigung der Wasserspiegeldifferenzen ein zu geringes Gefälle der Wasseroberfläche bis Rhein-km 812,5. Dies kann durch die

Stromeinengung im Bereich des Emmelsumer Hafens begründet werden. Mit dieser Stromeinengung ist eine pauschale Anhebung des Wasserspiegels um 4,0 m ( $AMW_{1990}+4,0$  m) nur eingeschränkt gültig.

Für den Abfluss  $HHQ_{1926}$  werden die vorgegebenen Wasserstände besser wiedergegeben als für den vergleichbaren Abfluss  $HQ_{1995}$ . Offensichtlich entspricht das Modell eher der Situation von 1926.

In den Anlagen A sind die Berechnungsergebnisse für den Ist-Zustand flächig dargestellt.

## Planungszustand 1

Mit den Ergebnissen des IST-Zustandes wurde das PLAN1-Modell initialisiert. Mit den identischen Randbedingungen wie zum IST-Zustand wurden die Berechnungen für den Planungszustand 1 durchgeführt. In der Abbildung 11 ist als Ergebnis die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Hauptstromachse dargestellt.

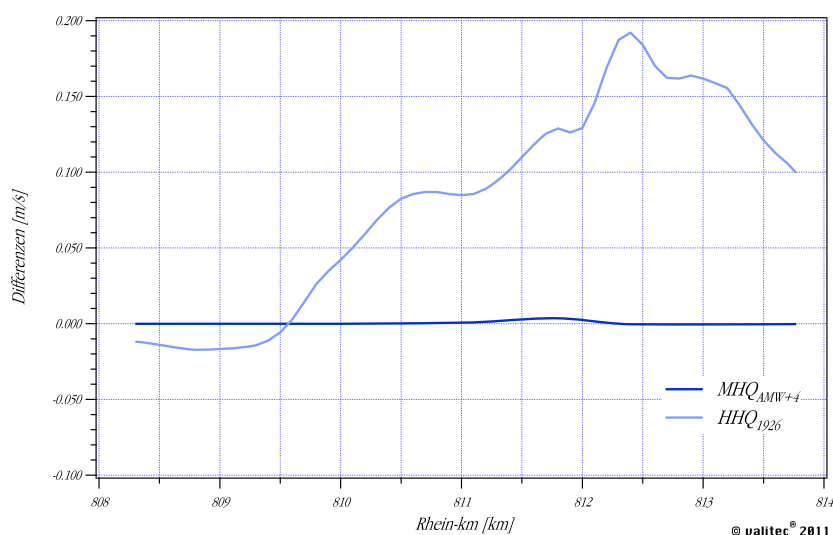


Abbildung 11: Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Rheinachse; PLAN1 minus IST;

Für den Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  ist der Einfluss der Hafenerweiterung auf den Hauptstrom sehr gering. Die Differenzen zwischen den Simulationen IST und PLAN1 liegen im Bereich der Rechengenauigkeiten.

Für den Abfluss  $HHQ_{1926}$  beträgt die maximale Geschwindigkeitserhöhung in der Hauptstromachse 0,19 m/s. Das Maximum der Erhöhung liegt in der nördlichen Hälfte des Hauptstroms (Kurvenaußenseite) und beträgt 0,22 m/s. Die Sohlschubspannungen werden im Hauptstrom deutlich und großflächig erhöht. Das Maximum der Erhöhung beträgt  $1,6 \text{ N/m}^2$  bzw. 18 %. Damit wurde eine hydraulische Verbesserung der Planung notwendig.

In den Anlagen B sind die Berechnungsergebnisse für den Planungszustand 1 flächig dargestellt.



## Planungszustand 2

Zur Verbesserung der Planung bestand die Möglichkeit die nordwestliche Ecke der Aufschüttung abzuflachen. Ein strömungsgünstiger Winkel ist die Hauptströmungsrichtung bei Rhein-km 812,5. Hier geht der Budericher Rheinbogen über in den Weseler Rheinbogen. Die Stromkrümmung ändert sich von einem Rechtsbogen zu einem Linksbogen. Zugleich wird der Strom bei Hochwasser durch die Mole zwischen den Einfahrten zu dem Wesel-Datteln-Kanal und zum Hafen Emmelsum eingeengt. Eine stromauf liegende Anpassung der Vorlandströmung an diese Engstelle soll die gesamte Strömungssituation harmonisieren.

Für den Übergang zur neuen Böschungsrichtung wurde anstelle einer Ecke eine gestreckte Ausrundung gewählt. Damit werden Strömungsablösungen vermieden. Die Vorlandströmung erhält damit auch mehr Raum sich zu beschleunigen.

Mit den Ergebnissen des IST-Zustandes wurde das PLAN2-Modell initialisiert. Mit den identischen Randbedingungen wie zum IST-Zustand wurden die Berechnungen für den Planungszustand 2 durchgeführt.

Die Abbildung 12 zeigt die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Hauptstromachse. Die Wirksamkeit der gewählten Verbesserung ist deutlich zu erkennen. Für ein  $HHQ_{1926}$  beträgt die maximale Geschwindigkeits-erhöhung nur noch 0,11 m/s. Auch ist der Einfluss auf den stromab liegenden Teil ab Rhein-km 812,5 weitgehend aufgehoben.

Für den Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  ist ein Einfluss der Hafenerweiterung sehr gering. Die Differenzen zwischen den Simulationen IST und PLAN2 liegen im Bereich der Rechengenauigkeiten.

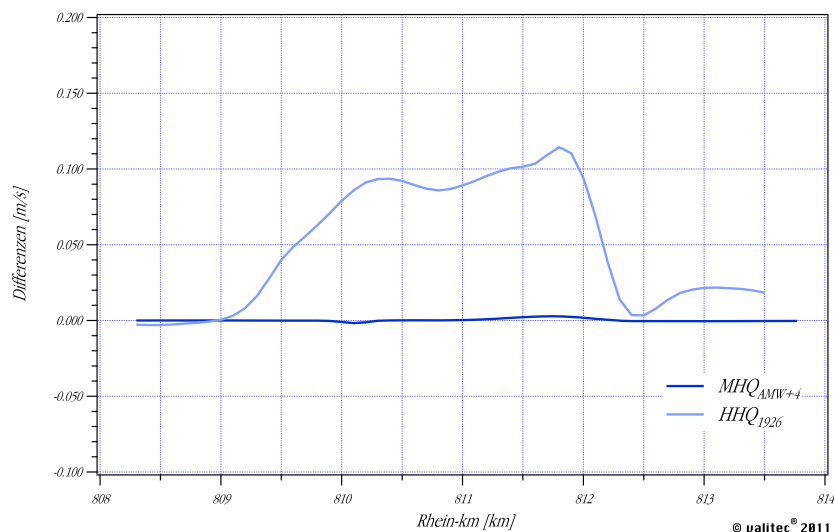


Abbildung 12: Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Rheinachse; PLAN2 minus IST;

In den Anlagen C sind die Berechnungsergebnisse für den Planungszustand 2 flächig dargestellt.

## Bepflanzung der Aufschüttungsböschung - PLAN2

Es ist angestrebt die Aufschüttungsböschung zu bepflanzen. Neben einer Grasdeckung sollen auch Sträucher und Bäume eingesetzt werden. Damit wird die hydraulische Rauheit der Böschung erhöht. Im Hochwasserfall, bei einer Überflutung des Vorlandes, stellt sich ein höherer Fließwiderstand ein und die Strömungsgeschwindigkeiten werden lokal vermindert. Die Leistungsfähigkeit des Querschnitts sinkt.

Im Hochwasserfall wird der Bewuchs wasserstandabhängig durch- und überströmt. Davon abhängig ändert sich der Fließwiderstand. Bei überströmtem Bewuchs sinkt der Fließwiderstand mit steigendem Wasserstand mit der Funktion  $1/H$ . Dagegen steigt der Fließwiderstand bei durchströmtem Bewuchs linear mit der Fließtiefe.

Im vorliegenden Fall kann die Böschung am Fuß mit durchschnittlich 1,5 m ( $MHQ_{AMW+4}$ ) bis 6,2 m ( $HHQ_{1926}$ ) überströmt werden (vgl. Abbildung 14 unten). Abhängig von der Bewuchsart und -höhe treten die Formen Durch- und Überströmen auf.

Mit den in der Tabelle 2 aufgeführten Bewuchsvarianten wurden Simulationen für  $MHQ_{AMW+4}$  und  $HHQ_{1926}$  mit dem PLAN2-Modell durchgeführt. Der Einfluss der verschiedenen Bewuchsvarianten auf den Hauptstrom und auf die Böschung selbst wurde untersucht.

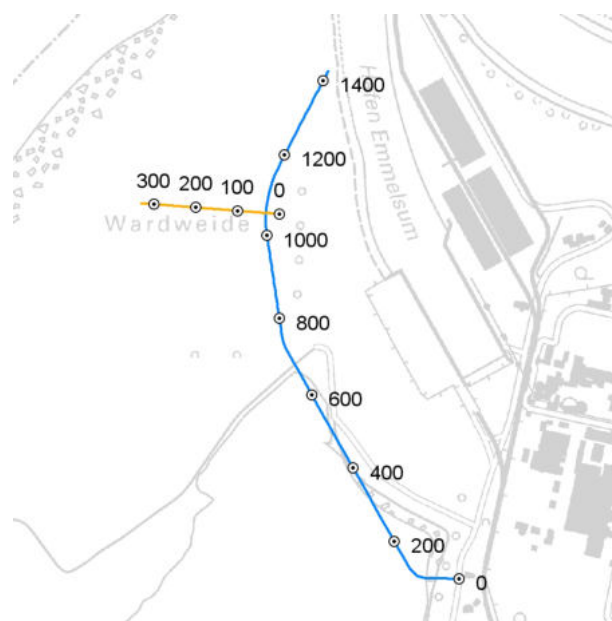


Abbildung 13: Achsen der Graphen entlang der Aufschüttungsböschung quer zur Böschung und mit Stationen [m];  
Kartengrundlage TK25 © Geobasis NRW 2011;

Zur besseren Orientierung sind in der Abbildung 13 die im Weiteren benutzten Achsen dargestellt. Entlang den Achsen werden die Auswirkungen auf die Böschung und deren unmittelbaren Umgebung gezeigt.

Für alle, das Vorland überströmende Abflüsse stellt sich ein Fließen entlang der Böschung ein. Mit Ausnahme des ca. 100 m langen, südlichen, in Ost-West-Richtung verlaufenden, Teils der Böschung ist die Strömungsrichtung nördlich. An dem angesprochenen südlichen Teil liegt eine Rückströmzone.

Die Strömung beschleunigt sich am Übergang vom ehemaligen Baggersee zum Vorland. Hier beginnt auch eine Flutmulde (Station 0<sup>+650</sup>). Mit der Beschleunigung ist ein Absenken des Wasserspiegels verbunden. In der Abbildung 14 sind die Wasserspiegelveränderungen durch die Aufschüttung dargestellt.

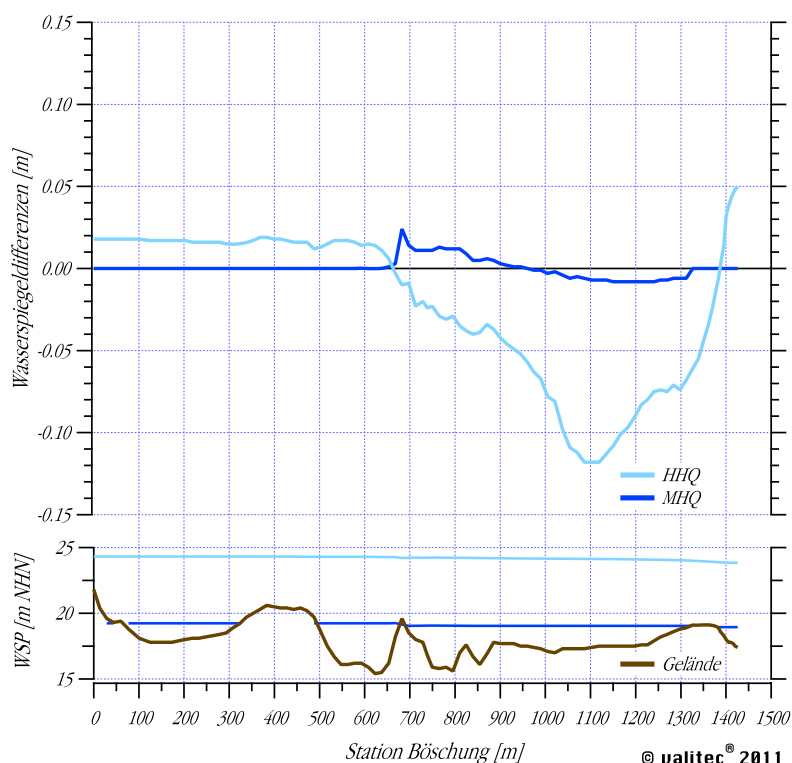


Abbildung 14: Wasserspiegel entlang der Aufschüttungsböschung;

Für den Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  kommt es an dem Übergangsbereich zu einem geringen Aufstau, da hier der Querschnitt nicht vollständig benetzt ist (lokale Einschnürung). Bei höheren Abflüssen tritt dies nicht auf.

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten liegen am Böschungsfuß bei dem Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  um 0,28 m/s und bei dem Abfluss  $HHQ_{1926}$  um 1,80 m/s (Station 1<sup>+100</sup>). Auch mit einer dichten Grasdeckung ist der Böschungsfuß bei einem  $HHQ_{1926}$  nicht ausreichend gegen Erosion gesichert. Alternativ zu einer Deckung mit Wasserbausteinen oder ähnlichem kann hier auch die Strömungsgeschwindigkeit verringert werden. Dazu sind Bepflanzungen sehr gut geeignet.

In der Abbildung 15 und in der Abbildung 16 sind die Strömungsgeschwindigkeiten für die Abflüsse  $MHQ_{AMW+4}$  und  $HHQ_{1926}$  bei den einzelnen Bewuchsvarianten am Böschungsfuß dargestellt. Bei dem Abfluss  $HHQ_{1926}$  sind alle Bewuchsvarianten in der Lage die Strömungsgeschwindigkeiten zu reduzieren.

Auch für den Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  werden die Strömungsgeschwindigkeiten reduziert. Einzig der Bewuchs von Bäumen allein am Böschungsfuß (Variante 3) zeigt keine Wirkung. Für diese Form des durchströmten Bewuchs sind die Fließtiefen bei dem  $MHQ_{AMW+4}$  nicht ausreichend für einen höheren Strömungswiderstand. Insgesamt sind die Fließgeschwindigkeiten am Böschungsfuß für die niedrigen Hochwasser aber auch so gering, dass eine Reduzierung nicht notwendig wäre.

Beim Abfluss  $HHQ_{1926}$  unterscheiden sich die Varianten 1 und 2 von den Varianten 3 und 4 deutlich. Während die vollständige Bepflanzung der Böschung die Fließgeschwindigkeiten gleichmäßig reduziert, erlauben die Bepflanzungen am Böschungsfuß der Strömung noch eine Geschwindigkeit von ca. 1,2 m/s. Die Schutzwirkung der Bepflanzung nur am Böschungsfuß ist nicht ausreichend (Variante 3 und 4).

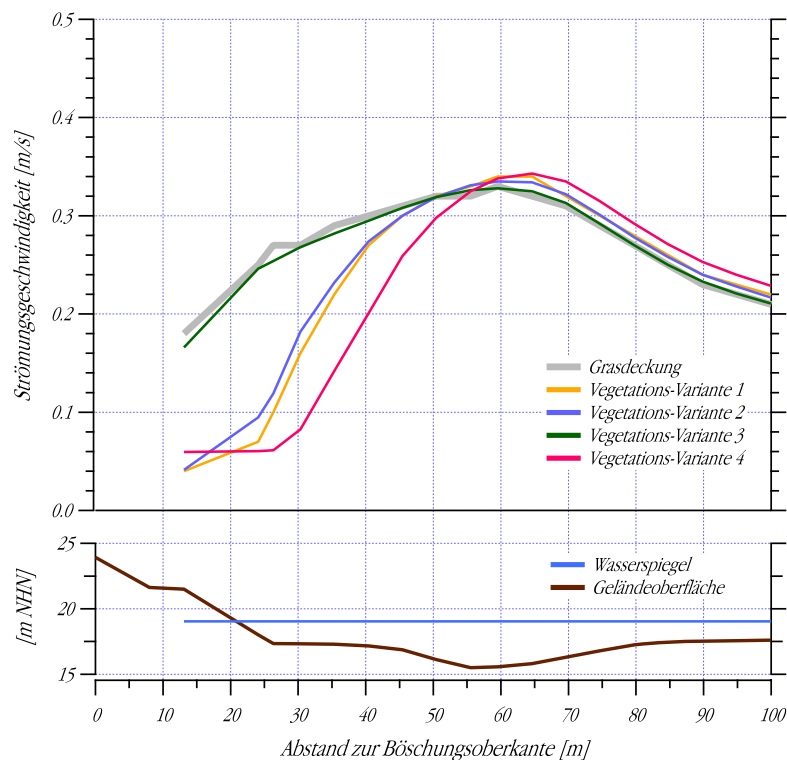


Abbildung 15: Einfluss der Böschungsbepflanzung auf die Vorlandströmung bei  $MHQ_{AMW+4}$

Die Variante 2 unterscheidet sich durch eine aufgelockerte Bepflanzung (truppweise) von der Variante 1. In beiden Fällen wurden Bäume und Sträucher eingesetzt. Durch den geringeren Einsatz von Vegetation in der Variante 2 ist der Strömungswiderstand geringer und die Strömungsgeschwindigkeiten sind etwas höher.

Um eine möglichst große Strömungsreduzierung mit dem geringeren Pflanzeneinsatz zu erhalten, wurden die Pflanzeninseln (Trupps) schachbrettartig auf der Böschung eingesetzt. In Strömungsrichtung (entlang der Böschung) sollten keine größeren Lücken auftreten (Kanalbildung).

Die Strömungsreduzierung an der Aufschüttungsböschung reduziert ihrerseits auch die Leistungsfähigkeit des gesamten Querschnitts. Vergleichbar bei einer Querschnittsminderung wird die Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt erhöht. Ab ca. 50,0 m Abstand zur Böschungsoberkante geht die Geschwindigkeitsreduzierung in eine geringe Geschwindigkeitserhöhung über. Damit wird ein geringer Teil der durch die Optimierung (PLAN1 zu PLAN2) erreichten Verbesserungen wieder zurückgenommen.

Der Einsatz einer truppweisen Bepflanzung mit Bäumen und Sträuchern auf der gesamten Böschung lässt die Geschwindigkeitserhöhung von 0,11 m/s auf 0,13 m/s und die Erhöhung der Sohlschubspannungen im Bereich der Stromachse von  $0,69 \text{ N/m}^2$  auf  $0,76 \text{ N/m}^2$  steigen. Damit bleibt der Einfluss der Baumaßnahme aber immer noch in

einem geringen Bereich.

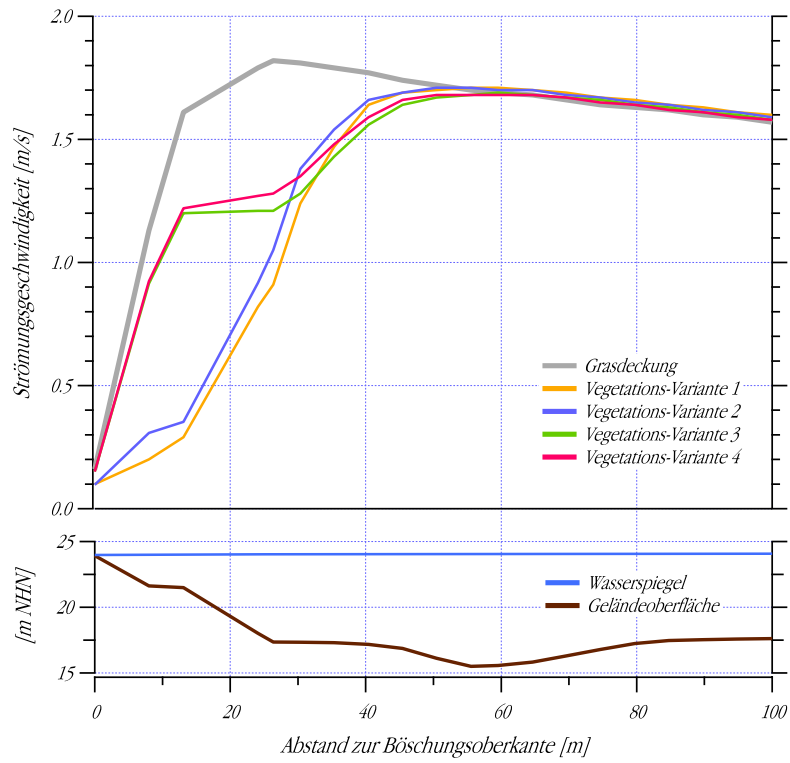


Abbildung 16: Einfluss der Böschungsbepflanzung auf die Vorlandströmung bei HHQ<sub>1926</sub>

## Planungszustand 3

Mit den Ergebnissen des IST-Zustandes wurde das PLAN3-Modell initialisiert. Mit den identischen Randbedingungen wie zum IST-Zustand wurden die Berechnungen für den Planungszustand 3 durchgeführt.

Die Abbildung 17 zeigt die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Hauptstromachse. Gegenüber dem bereits optimierten Planungszustand 2 ist hier der Einfluss auf den Hochwasserabfluss geringer (vgl. Abbildung 12). Für ein HHQ<sub>1926</sub> beträgt die maximale Geschwindigkeitserhöhung nur noch 0,08 m/s und beschränkt sich auf den Bereich zwischen Rhein-km 809,5 und 812,7.

Für den Abfluss MHQ<sub>AMW+4</sub> ist der Einfluss der Hafenerweiterung, wie auch in den Planungen 1 und 2, sehr gering. Die Differenzen zwischen den Simulationen IST und PLAN3 liegen im Bereich der Rechengenauigkeiten.

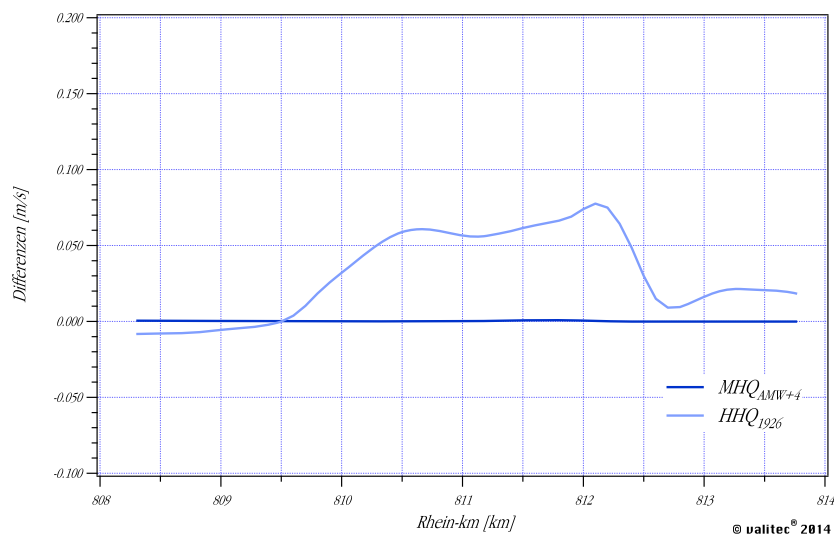


Abbildung 17: Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Rheinachse; PLAN3 minus IST;

## Ergebnis für Hochwasser MHQ - PLAN3

Die Ergebnisse der Simulation für ein Hochwasser MHQ sind in den Anlagen D-02, D-03, D-04 für den Planungszustand 3 dargestellt. In den Anlagen D-08, D-09 und D-10 sind die Differenzen von PLAN3 minus IST abgebildet.

### Wasserspiegel – MHQ – PLAN3

Im IST-Zustand wird bei dem Abfluss MHQ<sub>AMW+4</sub> das rechtsrheinische Vorland am Budericher Rheinbogen zu größten Teilen überflutet. Die Fließtiefen liegen bei ca. 1,5 m. Einzelne höher liegende Bereiche sind noch trocken und werden umströmt. So bleiben die an den jetzigen Hafen angrenzenden Teile wie Abrahamsward (teilweise), Lack-

mannshuck (teilweise), Kopersweide und Grinden fast vollständig trocken.

Mit dem Hafenausbau sind die Bereiche Kopersweide und Grinden überbaut. Die am nördlichen Ende liegende Abrahamsward und Lackmannshuck sind weiterhin nur teilweise überströmt.

Die Wasserspiegeldifferenzen zwischen dem IST-Zustand und dem Planungszustand 3 (Anlage D-8) liegen im Millimeterbereich. Im Bereich des Hauptstrom sind keine Veränderungen des Wasserspiegels nachweisbar (maximal 0,2 mm).

### Strömungsgeschwindigkeiten – MHQ – PLAN3

Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen im Bereich der Einengung (Rhein-km 812,0 bis 812,5) beim Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  im Hauptstrom bis zu 2,15 m/s. Auf den Vorländern sind Geschwindigkeiten zwischen 0,10 m/s und 0,30 m/s berechnet worden.

Durch den Bau der Hafenerweiterung sind nur sehr geringe Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten zu erwarten. Die Anlage D-09 zeigt die Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem IST-Zustand und dem Planungszustand 3.

Hauptsächlich wird die Vorlandströmung durch die Aufschüttung leicht nach Westen verlagert. So ergeben sich geringe Veränderungen der Strömung vor der Hafenerweiterung. Hier finden geringe Umlagerungen der Geschwindigkeiten in den Flutmulden statt ( $\pm 0,02$  m/s).

Im Bereich des Hauptstrom sind keine Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeit nachweisbar (maximal 0,0008 m/s).

### Sohlschubspannungen – MHQ – PLAN3

Die Sohlschubspannungen im Hauptgerinne sind im Bereich zwischen Rhein-km 811,5 und 812,0 am größten und betragen dort maximal  $6,4 \text{ N/m}^2$ . Die Veränderungen durch den Bau der Hafenerweiterung erstrecken sich auf denselben Bereich und betragen maximal eine Zunahme von  $0,004 \text{ N/m}^2$  (0,08 %). Eine signifikante Erhöhung der Geschiebefracht kann nicht erwartet werden.

Auf den Vorländern sind nur geringe Spannungen zwischen 0,5 und  $0,01 \text{ N/m}^2$  berechnet worden. Die Veränderungen liegen im Mittel bei  $\pm 0,03 \text{ N/m}^2$  mit größten Werten von  $+ 0,1 \text{ N/m}^2$  im Nahbereich der Böschung. Die resultierenden Werte bleiben aber sehr gering, so dass beim Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  keine Erosionen auf dem grasgedeckten Vorland auftreten.

Insgesamt ist die Beeinflussung des Strömungsverhalten im Rhein bei einem Hochwasser MHQ durch die Erweiterung des Hafens sehr gering.

## Ergebnis für Hochwasser HHQ - PLAN3

Die Ergebnisse der Simulation sind in den Anlagen A-05, A-06 und A-07 für den IST-Zustand, und in den Anlagen D-05, D-06, D-07 für den Planungszustand 3 dargestellt. In den Anlagen D-11, D-12 und D-13 sind die Differenzen von PLAN3 minus IST abgebildet.

### Wasserspiegel – HHQ – PLAN3

Beim Abfluss HHQ<sub>1926</sub> wird der gesamte Querschnitt zwischen den Hochwasserschutzdeichen überströmt. Die mittlere Fließtiefe auf dem Vorland beträgt ca. 6,20 m. Der Bau der Hafenerweiterung vergrößert die Engstelle bei Rhein-km 812,0 stromauf. So wird der Wasserspiegel am Böschungsknick großflächig abgesenkt (Mittelwert 0,03 m). Die maximale Absenkung beträgt ca. 0,10 m unmittelbar am Böschungsfuß (vgl. Anhang C-11).

Stromauf erfährt der Rhein eine Wasserspiegelanhebung um ca. 0,008 m, die sich ca. 6,0 km ins Oberwasser fortsetzt (Schätzung).

Die Wasserspiegelanhebung im Hafen Emmelsum beträgt ca. 0,02 m und wird durch die Richtungsänderung der Strömung am Leitdamm hervorgerufen. Die Vorlandströmung erreicht die Hafeneinfahrt im Planungsfall 2 etwas früher stromauf.

### Strömungsgeschwindigkeiten – HHQ – PLAN3

Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen im Bereich der Einengung (Rhein-km 812,0 bis 812,5) beim Abfluss HHQ<sub>1926</sub> im Hauptstrom ca. 2,80 m/s. Weiter stromab beschleunigt sich die Strömung auf bis zu 3,20 m/s.

Auf den Vorländern liegen die Geschwindigkeiten im Mittel bei ca. 1,00 m/s und in den etwas höher gelegenen Bereichen Abrahamsward und Lackmannshuck sind Geschwindigkeit bis 1,80 m/s berechnet worden. Die Vorlandströmung wird hier auch durch die zwei vorhandenen Baumriegel verstärkt (Verengung des Fließquerschnittes).

Durch den Bau der Hafenerweiterung wird die Strömung im Hauptstrom erhöht und auf dem Vorland findet eine Umlagerung statt. So erhöhen sich die Geschwindigkeiten im Hauptstrom zwischen Rhein-km 811,0 und 812,0 um ca. 0,10 m/s während sich auf dem Vorland Veränderungen  $\pm 0,50$  m/s einstellen. Die größten Veränderungen sind am Böschungsknick zu erwarten. Hier konzentrieren sich die Geschwindigkeitserhöhungen (vg. Anlage D-12). Die Bereiche Abrahamsward und Lackmannshuck werden dagegen mit geringeren Geschwindigkeiten etwas entspannt. Größere Umlagerungen finden auch am Leitdamm zur Hafeneinfahrt statt. Hier trifft die Vorlandströmung mit einem etwas steileren Winkel in den Hafenzulaufkanal.



### Sohlschubspannungen – HHQ – PLAN3

Die Sohlschubspannungen betragen im Bereich der Einengung (Rhein-km 812,0) beim Abfluss HHQ<sub>1926</sub> im Hauptstrom ca.  $7,7 \text{ N/m}^2$  und nehmen stromab weiter deutlich zu. Am Modellauslauf bei Rhein-km 813,75 wurden  $13,0 \text{ N/m}^2$  berechnet.

Mit dem Bau der Hafenerweiterung werden die Sohlschubspannungen im Hauptstrom maximal um  $0,5 \text{ N/m}^2$  auf  $7,9 \text{ N/m}^2$  erhöht. Der Bereich der Erhöhungen ist begrenzt und die Erhöhungen verringern sich um ca. 50 % pro Fluss-km (vgl. Anhang C-13). Insgesamt liegen die zu erwartenden Erhöhungen der Sohlschubspannungen in unkritischen Bereichen des Hauptstroms.

Auf dem Vorland treten die Änderungen der Sohlschubspannungen analog zu den Änderungen der Geschwindigkeiten auf. Am Böschungsbogen findet eine Zunahme bis zu  $2,3 \text{ N/m}^2$  statt. Insgesamt beschränkt sich die Sohlschubspannung in diesem Bereich auf maximal  $4,5 \text{ N/m}^2$  im Planungszustand 3.

Im Strömungsschatten der Baumriegel verringern sich die Sohlschubspannungen durch die Hafenerweiterung um bis zu  $1,2 \text{ N/m}^2$  auf ca.  $0,9 \text{ N/m}^2$ . Hier können sich mit großen Hochwassern Anlandungen aufbauen. Dies kann durch den Geschwemmselgang der Baumreihen noch verstärkt werden.

## Retentionsvolumen

### Statisches Volumen

Zur Ermittlung des Retentionsvolumens wurde das Aufschüttungsvolumen der Hafenerweiterung bis zum Wasserspiegel des Bemessungshochwasser (BHQ) berechnet (vgl. Abbildung 18). Das darüber hinaus gehende Aufschüttungsvolumen bis zur Geländeoberkante verdrängt kein Wasser und damit auch keinen Retentionsraum.

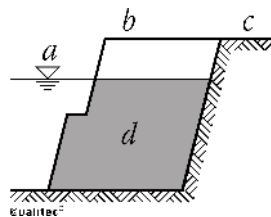


Abbildung 18: Schnitt durch die Hafenerweiterung; a – Bemessungswasserspiegel; b – Aufschüttung;  
c – ursprüngliches Gelände; d – durch die Aufschüttung verlorener Retentionsraum;

Zur Berechnung wurden die in der Strömungsberechnung eingesetzten Digitalen-Gelände-Modelle IST und PLAN benutzt. Die Geländeoberfläche PLAN3 wurde mit dem Wasserspiegel des Bemessungshochwasser verschnitten und die ursprüngliche Geländeoberfläche IST davon abgezogen. Das verbleibende Volumen ist der durch die Hafenerweiterung verlorene Retentionsraum.

Tabelle 4: Wasserspiegel bei BHQ<sub>2004</sub> [mNN];

<i>Rhein-km</i>	<i>Wasserspiegellagen Rechtes Ufer</i>
<i>810,0</i>	<i>23,89</i>
<i>810,5</i>	<i>23,82</i>
<i>811,0</i>	<i>23,79</i>
<i>811,5</i>	<i>23,73</i>
<i>812,0</i>	<i>23,69</i>
<i>812,5</i>	<i>23,65</i>

Die Wasseroberfläche des Bemessungshochwassers ist für alle 500 m durch die Bezirksregierung Düsseldorf festgelegt (Krefeld 2004). Durch die Ausdehnung der Hafenerweiterung in Fließrichtung mussten hier die Wasserspiegel zwischen Rhein-km 810,0 und Rhein-km 812,5 berücksichtigt werden. In der Tabelle 4 sind die Wasserspiegel wiedergegeben.

Neben der Aufschüttung auf dem Rheinvorland ist auch eine Kaimauerverlängerung um ca. 135 m im Hafenbereich geplant. Auch hier wird Retentionsraum verbaut. Die Volumenberechnung erfolgt zwischen dem Ausbau-Mittelwasser (AMW90) und der Wasserspiegellage des BHQ<sub>2004</sub> und berücksichtigt die jetzige Böschung.

Der Umbau der Emschermündung erfolgt wesentlich durch eine Verlegung der Emscher um 500 Meter nach Norden und durch die Schaffung eines großflächigen Auenbereiches. Dieser Auenbereich ist zum Rhein hin offen und zum Hinterland hin eingedeicht. So wird mit dem Umbau neuer Retentionsraum geschaffen. Abzüglich des Retentionsraumverlustes der alten Emschermündung ergibt sich ein Gewinn für den Emscherumbau von 1.222.400 m<sup>3</sup>.

Die Volumina der beiden Maßnahmen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Hier wird deutlich, dass das gewonnene Volumen an der Emschermündung in einer Größe von 1.222.400 m<sup>3</sup> das durch die Hafenerweiterung verlorene Volumen von 693.820 m<sup>3</sup> deutlich überschreitet. Lediglich 57 % des Volumens „Emschermündung“ wird zur Kompensation des statischen Retentionsraums, der bei der Westerweiterung des Hafens Emmelsum verloren geht, benötigt.

Damit ist der Nachweis der Retentionsraumerhaltung für die Hafenerweiterung Emmelsum erbracht.

Tabelle 5: Retentionsvolumina [m<sup>3</sup>];

	<i>Volumen bei BHQ<sub>2004</sub> [m<sup>3</sup>]</i>
<i>Aufschüttung Vorland</i>	<i>662.050</i>
<i>Verlängerung Kaimauer</i>	<i>31.770</i>
<i>Summe</i>	<i>693.820</i>
<i>Neue Emschermündung</i>	<i>1.332.400</i>
<i>Alte Emschermündung</i>	<i>110.000</i>
<i>Retentionsraumgewinn</i>	<i>1.222.400</i>

## Strömungsdynamik

Die hydraulische Begutachtung des geplanten Bauvorhabens hinsichtlich seiner Auswirkungen auf Strömungsgeschwindigkeiten, Wasserspiegellagen und Sohlschubspannungen im Rhein und in der Rheinaue zeigt, dass die Aufschüttung durch die Querschnittsverengung Einfluss auf den Hochwasserabfluss des Rheins haben kann. Dieser Einfluss wurde mit einer optimierten Gestaltung der Aufschüttung weitgehend minimiert. Es konnten sogar geringe Verbesserung an vereinzelt Stellen erzielt werden. Insgesamt wurde der Einfluss auf die Hochwasserdynamik nahezu verhindert (Nachweisgrenze des numerischen Verfahrens). Im Wesentlichen wird hier ein Bereich mit sehr geringer Durchströmung zur Hafenerweiterung genutzt.

Die neugestaltete Emschermündung ist durch den Leitdeich zum Hauptstrom hin von der Rheinströmung weitgehend abgedeckt. Es findet keine oder eine nur sehr geringe Durchströmung des Gebietes statt. Ein Einfluss auf die Hochwasserdynamik ist nahezu nicht vorhanden. Damit sind die betrachteten Gebiete hinsichtlich ihrer Strömungsdynamik identisch.

## Auswirkungen auf andere Anlieger

Die Veränderung der Wassermassen im Hochwasserfall durch die Hafenerweiterung betrifft andere Anlieger. Besonders wird der Retentionsraum durch die Aufschüttung und die Wasserspiegel durch die Querschnittsverengung beeinflusst.

## Retentionsraum

Die Verkleinerung des Retentionsraumes wird durch die Schaffung eines neuen Retentionsraumes kompensiert. Der dafür vorgesehene Raum liegt ca. 15,0 Rhein-km stromoberhalb. Die linksrheinische Emschermündung wird mit

ihrer Neugestaltung neuen Retentionsraum bei Rhein-km 798,0 als Ausgleich zur Verfügung stellen. Die Ähnlichkeit der Räume in Größe und Funktion ist in dem Kapitel Retention dargestellt worden.

Durch die Wahl eines Ausgleichsraumes stromauf ist gewährleistet, dass eine mögliche Hochwasserrückhaltung für stromunterhalb liegende Beteiligte wirksam bleibt. Dies wird mit der Abbildung 19 verdeutlicht.

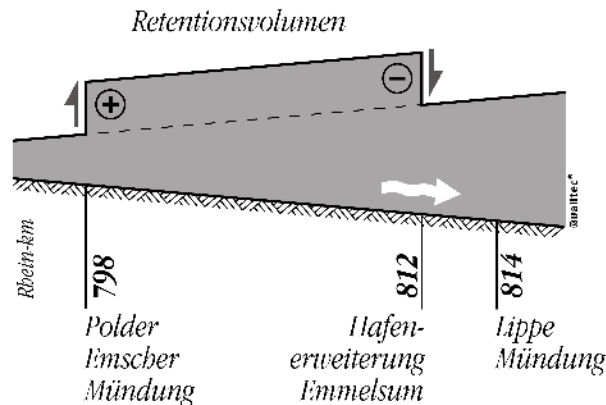


Abbildung 19: Ausgleich des Retentionsvolumens entlang des Rheins;

## Wasserspiegel

In den Kapiteln „Ergebnis für Hochwasser“ wurde die Beeinflussung der Hafenerweiterung auf die Hochwassersituation untersucht. Mit den Modellrechnungen zu den Abflüssen MHQ und HHQ sind alle relevanten Einflussgrößen für Beteiligte stromauf und stromab der Hafenerweiterung ermittelt worden. Besonders die Veränderungen der Wasserspiegellagen sind für alle andere Anlieger von Interesse. Hier sind keine Wasserspiegelerhöhungen im Rhein stromab der Hafenerweiterung festgestellt worden. Es sind lediglich geringfügige Wasserspiegelabsenkungen im unmittelbaren Bereich der Hafenerweiterung, sowie Wasserspiegelerhöhungen stromauf zu erwarten. Die Anlieger stromab bleiben unbeeinflusst. Die nachstehende Skizze soll dies illustrieren.

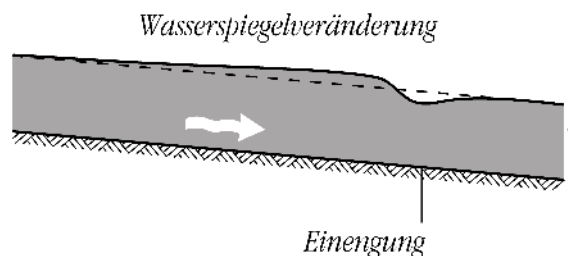


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Wasserspiegelveränderung eines Fließgewässers durch eine Engstelle;

Damit wurde belegt, dass ein Einfluss der Hafenerweiterung Emmelsum auf den Wasserspiegel der Lippe nicht vorhanden ist.

## Zusammenfassung

Zur Überprüfung der hydraulischen Auswirkungen der geplanten Erweiterung des Hafens Emmelsum am Niederrhein bei Wesel wurden mit dem zweidimensional-tiefengemittelten hydrodynamisch-numerischen Verfahren RISO2D Strömungen berechnet. Dazu wurde ein digitales, kalibriertes Strömungsmodell eingesetzt und dies anhand vorliegender Planungen angepasst.

Mit dem kalibrierten Modell wurden Strömungsberechnungen für die Abflüsse  $MHQ_{AMW+4}$  und  $HHQ_{1926}$  jeweils für den aktuellen Zustand des Untersuchungsraums und für den zukünftigen Planungszustand durchgeführt. Die Veränderungen der Wasserspiegel, Fließgeschwindigkeiten und Sohlschubspannungen durch den Bau der Hafenerweiterung wurden ermittelt und dargestellt.

Bei dem Abfluss  $MHQ_{AMW+4}$  erfährt der Hauptstrom eine sehr geringe Wasserspiegelabsenkung an der Engstelle von 0,2 mm, eine Geschwindigkeitserhöhung von 0,0008 m/s und eine Erhöhung der Sohlschubspannung um  $0,0045 \text{ N/m}^2$  (ca. 0,08 %) im Bereich der Stromachse. Mit höheren Abflüssen bis  $HHQ_{1926}$  verringert sich der relative Abflussquerschnitt und dementsprechend erhöht sich auch der Einfluss auf die Wasserspiegellagen, die Strömungsgeschwindigkeiten und die Sohlschubspannungen im Rhein.

Mit einer verkleinerten Planung und strömungsgünstigen Anpassung der Aufschüttung konnte der Einfluss auf den Hauptstrom minimiert werden, so dass die Geschwindigkeitserhöhung auf 0,08 m/s begrenzt werden kann. Damit erhöht sich die Sohlschubspannung durch die Hafenerweiterung beim Abfluss  $HHQ_{1926}$  um  $0,46 \text{ N/m}^2$  auf  $7,5 \text{ N/m}^2$  im Bereich der Stromachse. Es sind keine kritischen Bereiche betroffen.

Zusätzlich wurden verschiedene Bewuchsvarianten an der Böschung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass ein Bewuchs mit Bäumen und Sträuchern auf der gesamten Böschung die Strömungsgeschwindigkeiten im Nahbereich deutlich reduziert. Damit kann die Böschung gut gegen Erosion geschützt werden. Die mit der Geschwindigkeitsminderung verbundene höhere Beeinflussung des Hauptstroms kann durch eine aufgelockerte, truppweise Bepflanzung minimiert werden.

Durch den Bau der Aufschüttung kann eine geringfügig erhöhte Treibgutmenge im Vorlandbereich südlich der Aufschüttung erwartet werden. Für höchste Hochwasser wird durch die strömungsgünstige Anpassung die Hafeneinfahrt zum Hafen Emmelsum von Ablagerungen weitgehend freigehalten.

Für die letzte Planung wurde der Verlust des Retentionsvolumen berechnet. Dazu wurden die Digitalen-Gelände-Modelle der Strömungsberechnungen eingesetzt. Es wurde gezeigt, dass der Retentionsraumverlust durch die Hafenerweiterung mit dem Retentionsraumgewinn durch die Neugestaltung der Emschermündung ausgeglichen werden kann. Lediglich 57 % des statischen Volumen ist für den Ausgleich notwendig. Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Strömungsdynamik sind die betrachteten Gebiete identisch.

Aachen im Oktober 2014

## Anlagen - Flächige Darstellungen

Anlage A-01: IST-Modell

Anlage A-02: IST-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Wasserspiegel

Anlage A-03: IST-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Strömungsgeschwindigkeiten

Anlage A-04: IST-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Sohlschubspannungen

Anlage A-05: IST-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Wasserspiegel

Anlage A-06: IST-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Strömungsgeschwindigkeiten

Anlage A-07: IST-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Sohlschubspannungen

- Anlage B-01: PLAN1-Modell
- Anlage B-02: PLAN1-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Wasserspiegel
- Anlage B-03: PLAN1-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage B-04: PLAN1-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Sohlschubspannungen
- Anlage B-05: PLAN1-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Wasserspiegel
- Anlage B-06: PLAN1-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage B-07: PLAN1-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Sohlschubspannungen
- Anlage B-08: PLAN1-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Wasserspiegel
- Anlage B-09: PLAN1-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage B-10: PLAN1-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Sohlschubspannungen
- Anlage B-11: PLAN1-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Wasserspiegel
- Anlage B-12: PLAN1-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage B-13: PLAN1-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Sohlschubspannungen

- Anlage C-01: PLAN2-Modell
- Anlage C-02: PLAN2-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Wasserspiegel
- Anlage C-03: PLAN2-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage C-04: PLAN2-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Sohlschubspannungen
- Anlage C-05: PLAN2-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Wasserspiegel
- Anlage C-06: PLAN2-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage C-07: PLAN2-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Sohlschubspannungen
- Anlage C-08: PLAN2-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Wasserspiegel
- Anlage C-09: PLAN2-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage C-10: PLAN2-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Sohlschubspannungen
- Anlage C-11: PLAN2-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Wasserspiegel
- Anlage C-12: PLAN2-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten
- Anlage C-13: PLAN2-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Sohlschubspannungen



Anlage D-01: PLAN3-Modell

Anlage D-02: PLAN3-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Wasserspiegel

Anlage D-03: PLAN3-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Strömungsgeschwindigkeiten

Anlage D-04: PLAN3-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Sohlschubspannungen

Anlage D-05: PLAN3-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Wasserspiegel

Anlage D-06: PLAN3-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Strömungsgeschwindigkeiten

Anlage D-07: PLAN3-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Sohlschubspannungen

Anlage D-08: PLAN3-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Wasserspiegel

Anlage D-09: PLAN3-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten

Anlage D-10: PLAN3-Modell -  $MHQ_{AMW+4}$  - Differenzen der Sohlschubspannungen

Anlage D-11: PLAN3-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Wasserspiegel

Anlage D-12: PLAN3-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten

Anlage D-13: PLAN3-Modell -  $HHQ_{1926}$  - Differenzen der Sohlschubspannungen