



## **Steuerung von Küstenschutzelementen an Tideflüssen als Grundlage für ein Risikomanagement**

Heiko Spekker

INROS LACKNER AG, Bremen, Germany

### **Abstract**

Control of coastal protection elements along tidal rivers as basis for flood and risk management.

Located below mean sea level large parts of coastal hinterlands, especially along tidal rivers, are endangered from inundations during storm surges and extreme floods. Coastal hinterlands are commonly protected by a system of coastal protection elements, e.g. levees or storm surge barriers. Increasing crest heights of these coastal structures is the traditional strategy of coastal defence using deterministic methodologies.

Efficient flood and risk management should reduce risk and mitigate effects of hazards caused by increased water levels due to higher sea level, changes in storm surge frequencies and stronger floods. Apart from sea and river dykes as well as storm surge barriers as major flood protection elements, a variety of additional structures like controllable flood- and spillways or polder areas are feasible structural elements to be established along estuaries and deltas. In combination with innovative control strategies these measures extend the flood storage.

Main objective of the thesis is the analysis of new measures and innovative coastal protection strategies at tidal rivers. In addition to modified regulations of control structures mentioned above, another important focal point is to evaluate the effects of connected polder areas and floodways in order to reduce high water levels and flood risk in the coastal hinterland. Tested on the basis of an idealised estuary the methodology is subsequently applied to real estuaries (Weser River estuary and Mississippi River delta). A high risk potential exists in both regions due to densely populated cities, e. g. Bremen and New Orleans, as well as important businesses and industries along these rivers. This paper presents the results for the Weser River estuary.

Hydrodynamic-numerical models using combinations of characteristic flood and storm surge scenarios are established in order to obtain critical configurations of the hydrodynamic system. Based on that, the probability of failure and the related damage due to flooding of the coastal defence system are calculated for one focal area. Linked models are applied to simulate the process of flooding as a result of failure scenarios of the coastal protection system. Subsequently the risk of the hinterland is calculated as a product of the probability of failure and the flood loss.

Variations of risk control strategies clearly indicate that polder areas as well as artificial floodways along estuaries with controllable inlets are capable to reduce the tidal high water level in estuaries and deltas. Thus, these measures minimise the probability of failure of the coastal protection system also during extreme events. In comparison, changed control strategies of storm surge barriers reduce the tidal high water level only to a limited extent. The results provide a basis for discussion addressing all parties involved within the integrated flood and risk management and may help to find solutions and possible ways for a better communication of risk and the effects of risk mitigation measures.

### **1 Einleitung**

Das Küstenhinterland wird heute zumeist durch ein System von Küstenschutzelementen, z. B. durch Deiche oder Sturmflutsperrwerke, geschützt. Traditionelle Küstenschutzstrategien setzen dabei auf eine Erhöhung bzw. Verstärkung der Schutzelemente unter Verwendung deterministischer Bemessungsmethoden. Ein wirksames Hochwasser- und Risikomanagement sollte Hochwasserrisiken reduzieren und die Auswirkungen einer Gefährdung durch erhöhte Wasserstände aufgrund des Meeresspiegelanstiegs, geänderter Sturmflutwahrscheinlichkeiten oder erhöhter Abflüsse mindern.

Neben See- und Flussdeichen sowie Sturmflutsperrwerken als primäre Schutzelemente stellen steuerbare Flutrinnen sowie Entlastungspolder potentielle technische Schutzmaßnahmen entlang von Ästuaren dar. Kombiniert mit innovativen Kontrollstrategien dienen diese Maßnahmen einer Flutraumerweiterung bzw. -änderung.

Ziel der Arbeit ist die Untersuchung von neuen und innovativen Küstenschutzstrategien an Tideflüssen und Auswirkungen gesteuerter Küstenschutzelemente. Gekoppelte, hydrodynamisch-numerische Modelle werden eingesetzt, um die sich bei Überlagerung von Tide und Oberwasserzufluss ergebenden kritischen Scheitelwasserstände zu ermitteln, wobei charakteristische Hochwasser- und Sturmflutscenarien betrachtet werden. Auf dieser Grundlage werden im Rahmen einer probabilistischen Risikoanalyse die Versagenswahrscheinlichkeit und der zu erwartende Überflutungsschaden ermittelt. Der Überflutungsprozess aufgrund eines Deichbruchszenarios wird unter Anwendung gekoppelter Modelle simuliert und das Risiko für das Hinterland anschließend als Produkt der Versagenswahrscheinlichkeit und des Überflutungsschadens berechnet.

## 2 Ziele einer Steuerung von Schutzelementen an Tideflüssen

Im Küsteningenieurwesen kann das Risiko in erster Näherung als Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit eines möglichen Versagens eines Küstenschutzsystems sowie dem daraus zu erwartenden Folgeschaden in der betroffenen Region definiert werden:

$$\text{Risiko} = \text{Versagenswahrscheinlichkeit} * \text{Folgeschaden}$$

Der planvolle Umgang mit solchen Risiken wird heute unter dem Begriff des Risikomanagements abgehandelt. Ein integriertes Hochwassermanagement zielt darauf ab, das Hochwasserrisiko zu mindern und das Risiko auf einen wirtschaftlich, politisch bzw. gesellschaftlich zu definierenden Wert zu begrenzen.

Gegen Risiko erhöhende Wasserstände in Ästuaren kommen technische, aber auch gesellschaftliche Risikosteuerungsstrategien in Betracht, z. B. die Risikovermeidung durch Umsiedlung, die Risikoverminderung, die Risikobeseitigung und schließlich die Risikoakzeptanz. Eine Risikominderung kann durch eine Verminderung der Versagenswahrscheinlichkeit von Hochwasserschutzanlagen, z. B. durch eine Senkung der Tidehochwasserstände und/oder durch eine Verminderung des Folgeschadens, erfolgen.

Bisher erfolgt an Tideflüssen im Regelfall eine Verminderung der Versagenswahrscheinlichkeit durch eine mit hohen Investitionskosten verbundene Erhöhung und Verstärkung der Schutzelemente. Bei den Flutraum schaffenden Maßnahmen ist eine Änderung der Sperrwerkssteuerung eine denkbare und ohne großen Kostenaufwand durchführbare Strategie. Schäden durch Hochwasser lassen sich im Allgemeinen durch Hochwasserrückhalt, technischen Hochwasserschutz und verbesserte Hochwasservorsorge verringern. Eine Nutzungsänderung und eine verbesserte private Vorsorge als Bestandteil eines integrierten Hochwasserrisikomanagements zur Verminderung des Schadenspotentials im Hinterland sind denkbar, wobei ein permanenter Rückzug aus potentiell überflutungsgefährdeten Gebieten gerade für dicht besiedelte Regionen mit großem Risikopotential nicht durchführbar ist.

Zusammengefasst ergeben sich folgende zu beantwortende Leitfragen:

- Welche Küstenschutzstrategien sind, auch vor dem Hintergrund des steigenden Meeresspiegelanstiegs, geänderter Sturmflutintensität sowie der Anpassung der Fahrrinnen in den Tideflüssen und damit geänderter Tidedynamik, denkbar?
- Besteht die Möglichkeit einer modellgestützten Steuerung von Küstenschutzbauwerken in Form von Poldern, Sperrwerken und Flutrinnen?
- Welche Effizienz weisen die Strategien auf? Führt eine Änderung der Betriebs- und Steuervorschriften der Küstenschutzelemente zu geringeren Scheitelwasserständen und kann das bestehende Restrisiko gemindert werden?

### 3 Methodik

Es werden instationäre, hydrodynamisch-numerische Strömungsmodelle mit vollständiger Implementierung der de Saint-Venant'schen-Gleichungen erstellt. In betrachteten Polderflächen und in ausgewählten potentiellen Überschwemmungsgebieten werden die Fließprozesse mit einem strukturierten Finite-Differenzen-Verfahren zweidimensional abgebildet. Die Modelle werden über Kopplungsansätze verbunden.

Wesentlich ist die Implementierung der regel- bzw. steuerbaren Küstenschutzelemente als kontrollierbare Strukturen im numerischen Modell. Damit besteht die Möglichkeit, die Auswirkungen von variablen Kontrollstrategien an den Sperrwerken, im Bereich der Wehre und unterschiedliche Füllungs- und Entleerungsprozesse an Poldern für definierte Flutungsoptionen auf Wasserstand und Abfluss berechnen zu können. Instationäre Prognoserechnungen, die Angaben über die Auswirkungen geänderter Betriebsweisen bzw. Steuerungen der Strukturen ermöglichen, werden für bekannte sowie statistische Ereignisse mit verschiedenen Jährlichkeiten vorgenommen.

## 4 Hochwasser- und Risikosteuerung am Beispiel der Unterweser

### 4.1 Aufbau eines numerischen Modells der Unterweser

#### 4.1.1 Modellgebiet

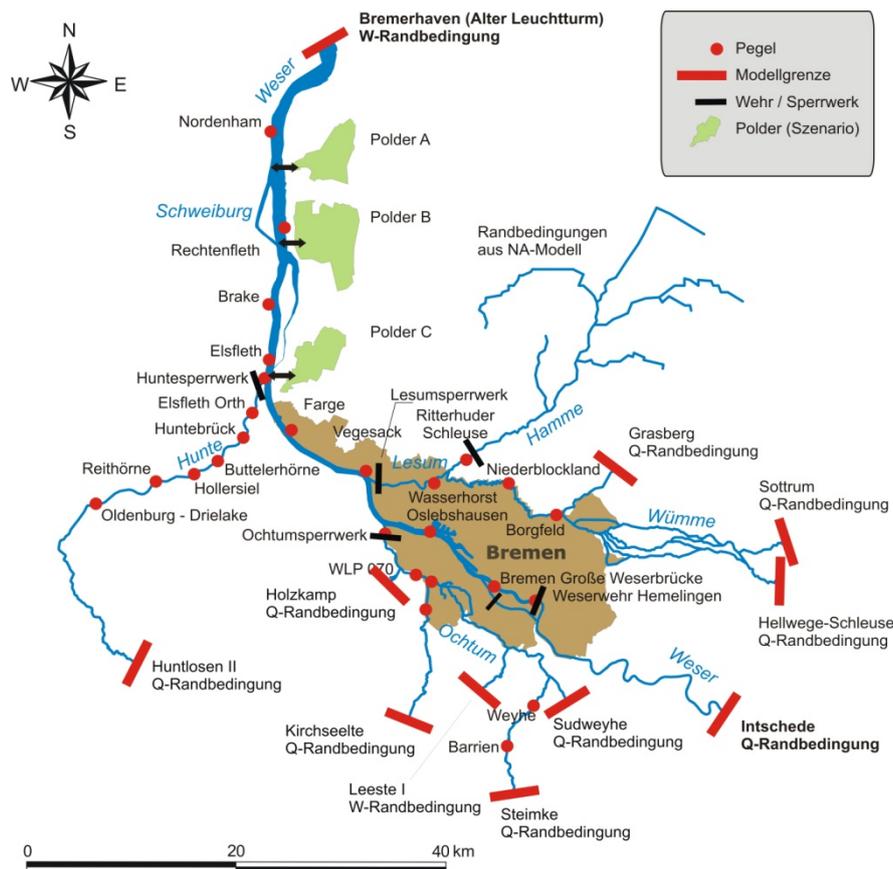


Abb. 1: Simuliertes Gewässernetz einschließlich Lage der Modellgrenzen, Kontrollpegel, Sperrwerke und potentieller Sturmflutentlastungspolder im Unterweserraum (Spekker 2008)

Für die Betrachtung der Zustandsgrößen wurde ein Flussgebietsmodell der Unterweser auf Basis digitaler Geländemodelle erstellt, welches instationär betrieben wird. Das verzweigte Gewässernetz einschließlich der Modellgrenzen und Lage der Wehre, Sperrwerke und Sturmflutentlastungspolder

geht aus Abb. 1 hervor. Der Abfluss aus der Mittelweser wird über das Wehr Hemelingen gesteuert. Grundlage des erstellten Geländehöhenmodells für das Einzugsgebiet der Weser sind der Höhendatensatz DGM 5 des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS). Die Unterwassertopographie der Unterweser basiert auf Fächerecholotpeilungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung aus dem Jahr 2003.

#### 4.1.2 Erfassung der Sturmflutentlastungspolder zur Flutraumerweiterung

Zur Abschätzung der Wirksamkeit von Sturmflutentlastungspoldern ist eine zweidimensionale, numerische Simulation der Flutungs- und Entleerungsprozesse nötig. In den zu den Poldern führenden Zulaufgerinnen sind steuerbare, unterströmte Wehre angeordnet, welche eine zeitlich flexible Steuerung der Flutung in Abhängigkeit der Kontrollwasserstände ermöglichen.

Bei Betrachtung des digitalen Geländemodells im Hinblick auf Poldervolumina und flutungsrelevante Geländecharakteristika bieten sich drei Bereiche rechtsseitig der Unterweser zwischen Bremen und Bremerhaven als potentielle Polderflächen an (Abb. 1), welche größtenteils zur Grünlandbewirtschaftung genutzt werden. Anhand digitaler Geländemodelle der Polderflächen wurde die Modellbathymetrie mit einer horizontalen Auflösung von  $\Delta x = \Delta y = 10$  m erstellt (Abb. 2).

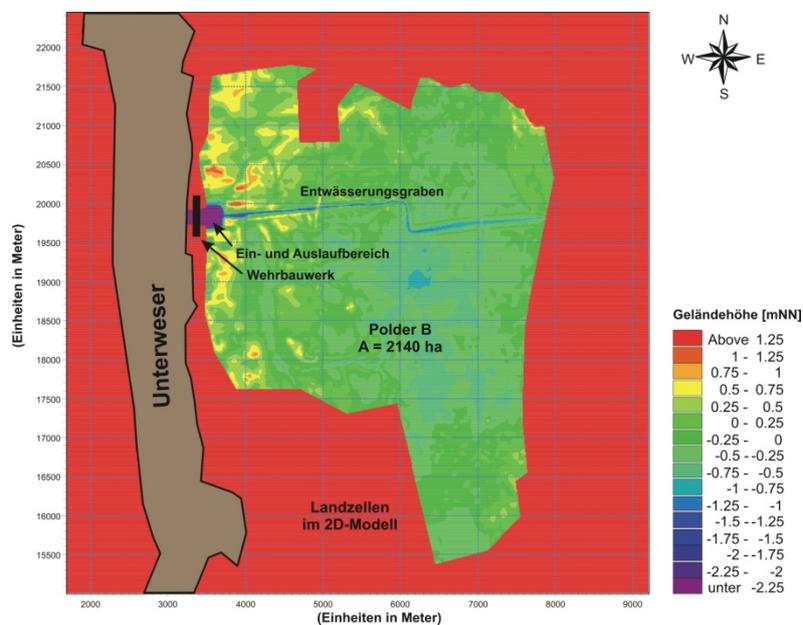


Abb. 2: Bathymetrie des Sturmflutentlastungspolders B im 2D-Modell (Spekker 2008)

Durch die im HN-Modell implementierten steuerbaren Elemente wird eine gezielte und weitgehende Entleerung der Polder während der Tideniedrigwasserzeiten auch im Fall von Kettentiden angestrebt. Das Einströmen von Wassermengen erfolgt ab einem definierten, als Kontrollwasserstand bezeichneten Wasserstand. Tab. 1 stellt Fläche, Geländehöhen und Lage der Polder dar.

Tab. 1: Speichervolumen, Größe und Geländehöhen der modellierten Sturmflutentlastungspolder

Polder	UW-km	Fläche [ha]	Geländehöhe [mNN]	Flutungswasserstand [mNN]	Speichervolumen [Mio. m <sup>3</sup> ]
A	53,9	950	-0,8 bis +0,8	5	45
B	48,9	2.140	-0,1 bis 0,8	5	100
C	34,3	1.900	-0,2 bis 1,1	5	94

### 4.1.3 Erfassung der Sperrwerkssteuerung

Das Abflussgeschehen in der Unterweser wird insbesondere bei extremen Tidehochwasserständen maßgeblich durch die Weserwehre Hemelingen sowie das Lesum-, Ochtum- und Huntesperrwerk beeinflusst, so dass die entsprechenden Steuerungen im Modell zu berücksichtigen sind. Im Modell erfolgt eine iterative oder direkte Steuerung der beweglichen Elemente anhand von Stauzielen, Kontrollwasserständen oder Betriebsaufzeichnungen.

Es bietet sich an, den vorhandenen Retentionsraum der Nebenflüsse Hunte, Ochtum und Lesum durch ein geeignetes Management der Verschlusseinrichtungen im Sturmflutfall besser zu nutzen. Durch ein späteres Schließen der Sperrwerkstore wird der aus der Weser einströmende Flutstrom mit zeitlicher Verzögerung gekehrt, wodurch gegebenenfalls eine Minimierung der Scheitelwasserstände in der Weser erreicht wird. Die für die Simulationen gewählten Szenarien beschreiben zum Teil extreme und damit seltene Ereignisse, die ein zeitgleiches Eintreffen einer Hochwasserwelle (HQ<sub>100</sub>) in der Mittelweser und eines Sturmflutereignisses (Thw<sub>100</sub>) in der Außenweser voraussetzen.

### 4.1.4 Randbedingungen

Beispielhaft werden die am unteren Modellrand eingesteuerten Randbedingungen beschrieben. Für die Kalibrierung des Flussgebietsmodells wird das am 05. Februar 1999 aufgezeichnete Sturmflutereignis mit einem Scheitelwert in Höhe von Thw = 4,47 mNN und einem Wiederkehrintervall von T = 10 Jahren mit ausreichender Vor- und Nachlaufzeit herangezogen (Abb. 3)

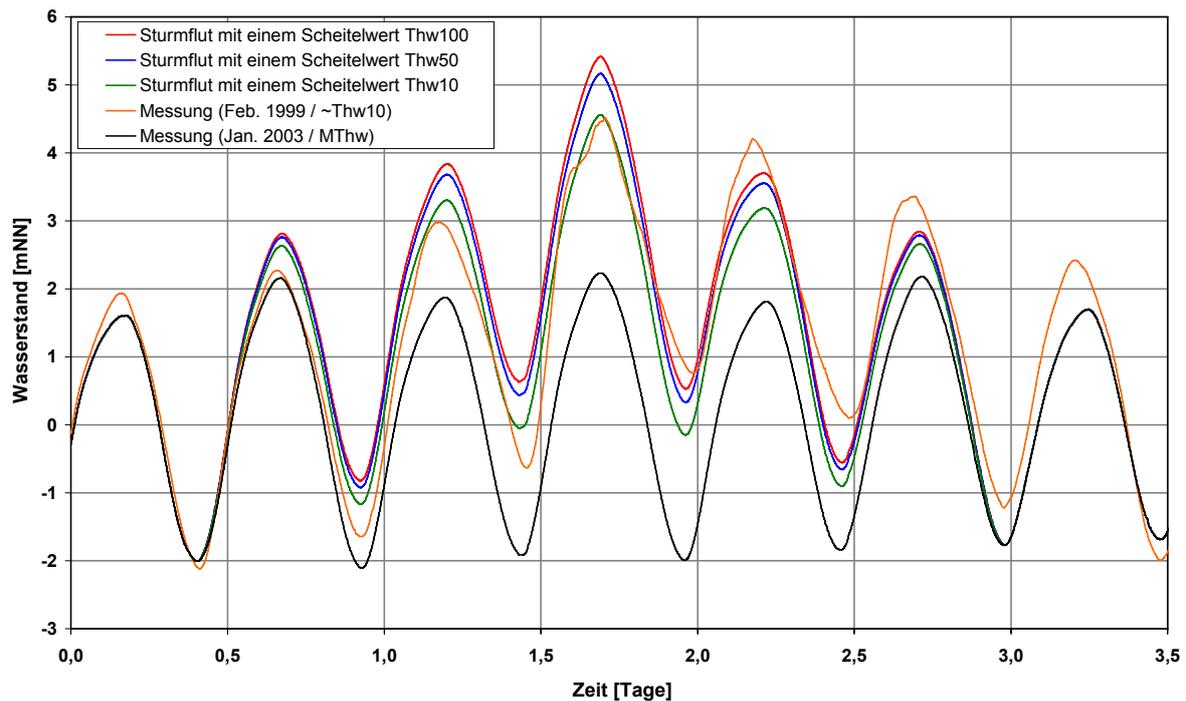


Abb. 3: Wasserstandsganglinien für Windstauereignisse verschiedener Wiederkehrintervalle am unteren Modellrand (Pegel Bremerhaven, Alter Leuchtturm; Spekker 2008)

Zur Simulation von Kettentiden wurde ein im Januar 2003 gemessener Wasserstandsverlauf (schwarze Kurve) auf den entsprechenden Sturmflutscheitel erhöht. Bei der Generierung der Wasserstandsganglinien wurden für verschiedene Wiederkehrzeiten auch die beiden Tidehochwasser sowohl vor als auch nach dem eigentlichen Sturmflutereignis berücksichtigt, so dass sich ein über fünf Tiden andauerndes Windstauereignis ergibt.

### 4.1.5 Untersuchungsprogramm

Die Überlagerung von verschiedenen Tidewasserständen am Pegel Bremerhaven und Oberwasserabflüssen am Pegel Intschede wird für 16 repräsentative Hochwasser- bzw. Sturmflutszenarien untersucht (Tab. 2). Die Rauheitsbeiwerte für die Vorländer im Bereich der Unterweser werden entsprechend der Landnutzung (ATKIS-Katalog) abgeleitet.

Tab. 2: Betrachtete Lastfälle bzw. Hochwasser- und Sturmflutszenarien

	MQ <sub>Feb. 1999</sub> (~800 m <sup>3</sup> /s)	MQ (325 m <sup>3</sup> /s)	HQ <sub>10</sub> (1.890 m <sup>3</sup> /s)	HQ <sub>50</sub> (2.550 m <sup>3</sup> /s)	HQ <sub>100</sub> (2.830 m <sup>3</sup> /s)
Thw <sub>1999</sub> = 4,47 mNN	Kalibrierung	---	---	---	---
MThw = 1,82 mNN	---	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Thw <sub>10</sub> = 4,56 mNN	---	Szenario 5	Szenario 6	Szenario 7	Szenario 8
Thw <sub>50</sub> = 5,17 mNN	---	Szenario 9	Szenario 10	Szenario 11	Szenario 12
Thw <sub>100</sub> = 5,42 mNN	---	Szenario 13	Szenario 14	Szenario 15	Szenario 16

## 4.2 Schadenshöhen durch Versagen und Risikobetrachtung am Beispiel Werderland

### 4.2.1 Flächennutzung und Vermögenswerte

Das für eine Hochwasserrisikoanalyse ausgewählte Gebiet Werderland mit einer Ausdehnung von rund 5 mal 3 km weist Geländehöhen von größtenteils unter 1 mNN auf (Abb. 4).

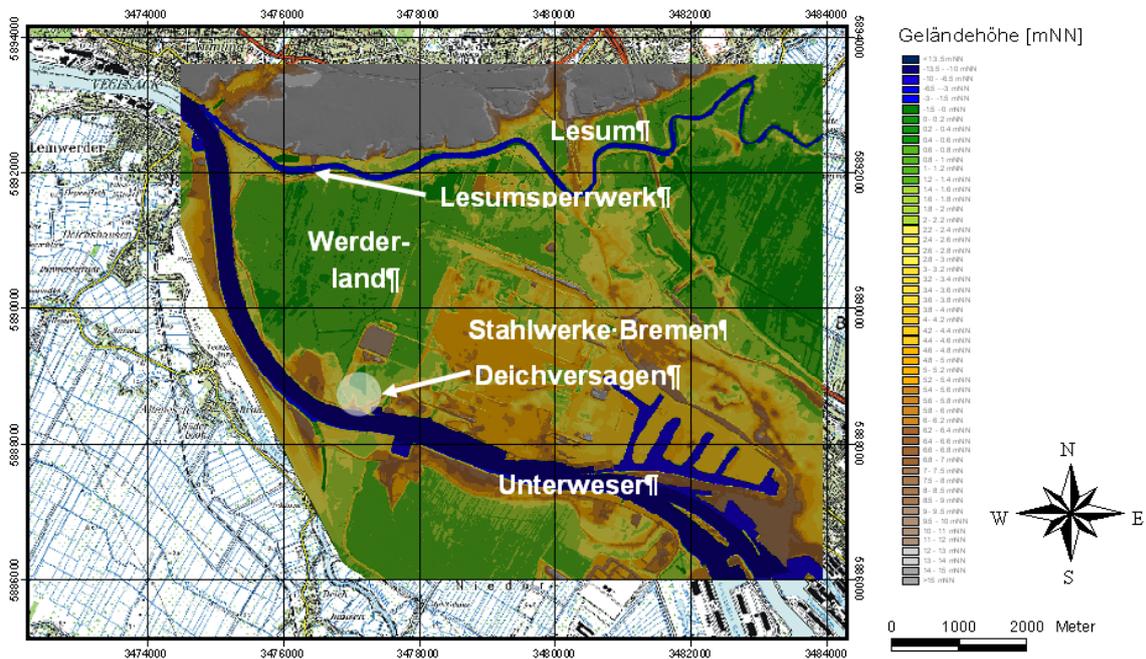


Abb. 4: Digitales Geländemodell des Werderlands (Spekker 2008)

Zur Ermittlung der infolge Überflutung resultierenden Schadenshöhen wird ein Versagen des Deiches als Folge eines Wellenüberlaufs und anschließender, binnenseitiger Erosionen auf Höhe der Mündung der Ochtum bei UW-km 13 angenommen. Für das Deichbruchszenario wird eine Bresche von 45 m sowie eine Schwellenhöhe von rund 2,5 mNN angenommen. Die Flächennutzung im Werderland zeigt Abb. 5.

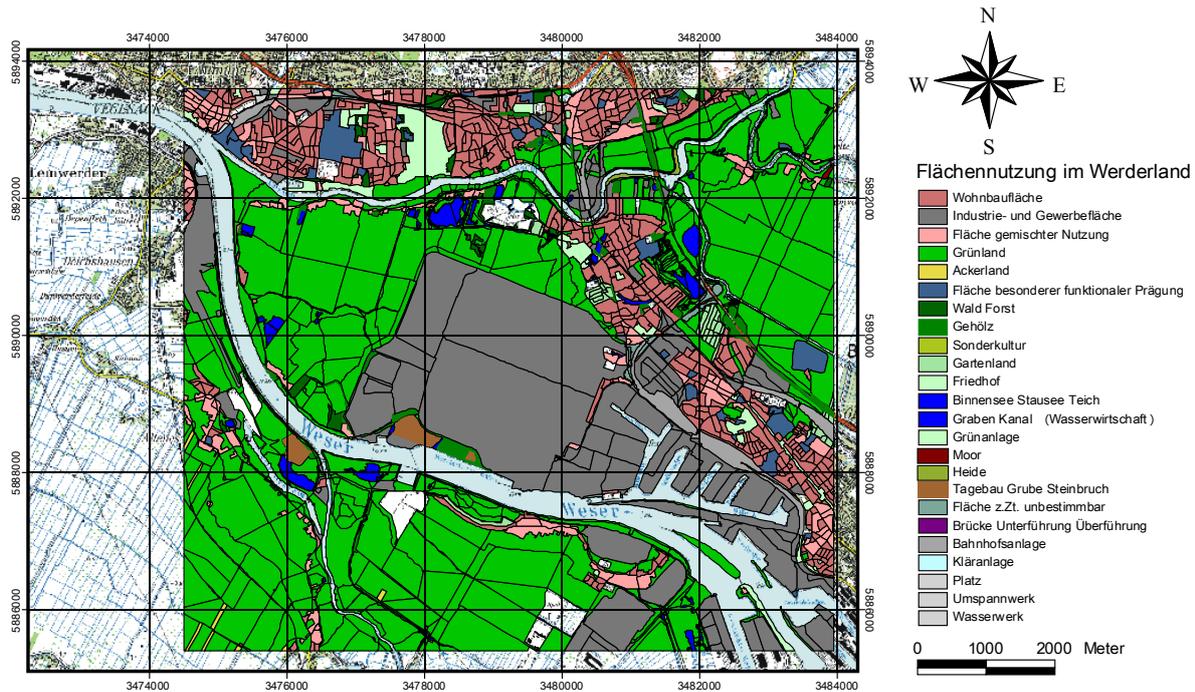


Abb. 5: Flächennutzung auf Grundlage des digitalen Landschaftsmodells (Franzius-Institut 2007)

#### 4.2.2 Überflutungsflächen, Schadenshöhen und Risiko

Der zeitliche Verlauf der Überflutung und die Schadenshöhen sind in Abb. 6 und Abb. 7 dargestellt. Beim Deichbruchszenario werden rund 872 ha überflutet. Die Wassertiefen liegen zwischen 0,1 m und 3,25 m im Bereich von Gräben und Geländesenken. Die Laufzeit zwischen dem Deichversagen und dem Überfluten einer bestimmten Fläche ist für eine Schadenskalkulation und insbesondere für Sicherungsmaßnahmen im Risikomanagement von Bedeutung.

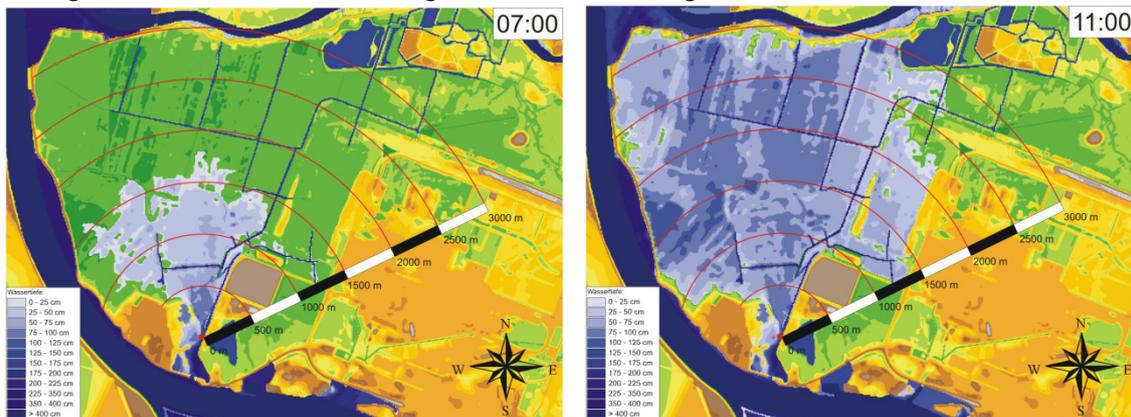


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der Überflutung aufgrund des Deichbruchszenarios (Spekker 2008)

Zur Bestimmung der zu erwartenden Schadenshöhe erfolgte eine automatisierte Analyse mit Hilfe des am Franzius-Institut entwickelten Tools „Loss-Calculator“ (Franzius-Institut 2004), wobei als Eingangsdaten die maximale Überflutungstiefe, das Vermögenspotential und Schadensfunktionen verschnitten werden. Bei diesem Verfahren erfolgt eine Zuordnung der für die einzelnen Nutzungstypen relevanten Vermögenswertkategorien und damit die Festlegung der anzuwendenden Schadensfunktion. In Abhängigkeit von der Einstauhöhe wird der Grad der Schädigung anhand von Schadensfunktionen ermittelt. Der Schaden ergibt sich anschließend aus dem Produkt des Schädigungsgrads und den Vermögenswerten.

Überflutet werden hauptsächlich die Grünlandflächen (82 % der Fläche). Industrieflächen sind mit 109,5 ha zu 13 % betroffen. Die resultierenden Schadenshöhen stellt Abb. 7 dar.

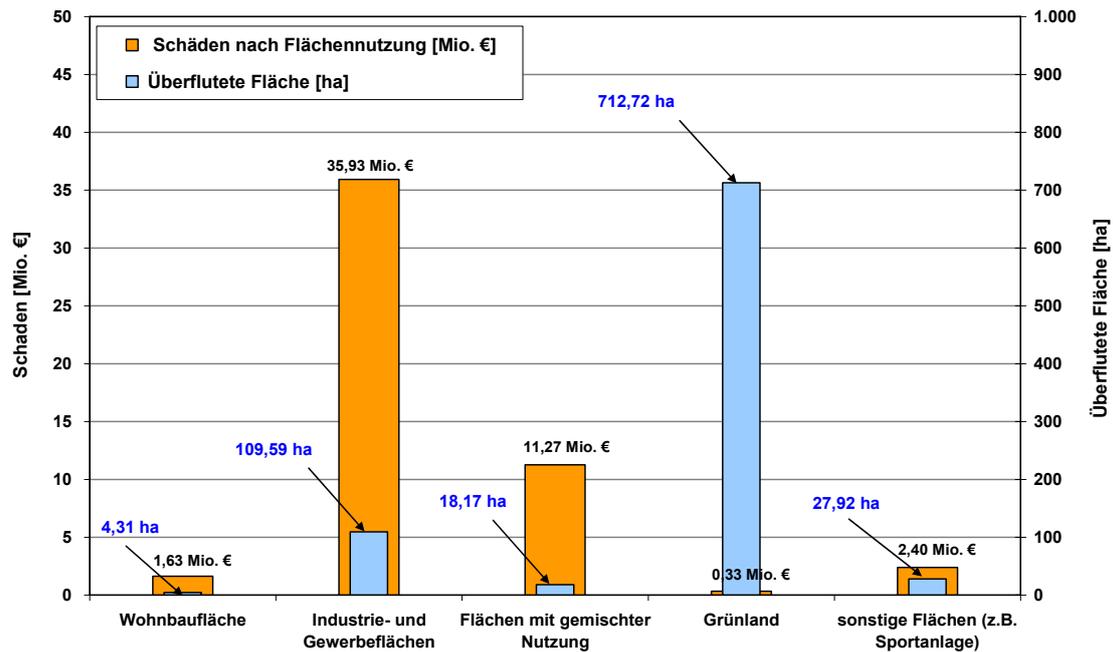


Abb. 7: Flächenanteil und Schaden nach Deichbruch im Bereich Werderland beim Szenario 16 (Spekker 2008)

Anhand der Versagenswahrscheinlichkeiten des Schutzelements Deich und des ermittelten zu erwartenden Schadens aufgrund Überflutung beim betrachteten Deichbruchszenario wurde das Risiko probabilistisch für das Gebiet Werderland bestimmt. Das Risiko berechnet sich bei einer Versagenswahrscheinlichkeit von  $1/6.150$  [ $1/a$ ] und einem resultierenden Schaden infolge des Versagens in Höhe von 51,56 Mio. € wie folgt:

$$\text{Risiko} = 1/6.150 [1/a] * 51,56 \text{ Mio. €} = 8.384 \text{ €/Jahr.}$$

Das Risiko für das betrachtete Gebiet ist damit vergleichsweise gering. Im Folgenden soll geprüft werden, inwieweit Risikosteuerungsmaßnahmen einen Beitrag zur Verringerung des Risikos leisten können.

### 4.3 Steuerung und Management von Schutzelementen

#### 4.3.1 Simulierte Steuerungsmaßnahmen

Es werden als potentielle Küstenschutzstrategien Flutraumerweiterungen durch eine geänderte Steuerung der Sturmflutsperrwerke sowie durch gesteuerte Sturmflutentlastungspolder betrachtet (Tab. 3). Für folgende betrachtete Maßnahmen werden die Ergebnisse beschrieben.

Tab. 3: Betrachtete Maßnahmen zur Flutraumerweiterung/Risikosteuerung

Variante 0	Ausgangszustand / keine Flutraumänderung
Variante 3	Flutraumerweiterung durch geänderte Sperrwerkssteuerung (1,0 m höhere Kontrollwasserstände und verzögerte Öffnung)
Variante 7	Flutraumerweiterung durch Polder (Verbundbewirtschaftung der Polder A, B und C und Breite der Einlaufbauwerke 200 m)
Variante 9	Flutraumerweiterung durch geänderte Sperrwerkssteuerung (Ausfall der Steuerung, Verschlussstore offen)

Für die (Risiko-)Steuerungsvarianten wird das Szenario 16 (UMR:  $Thw_{100}$  und OMR:  $HQ_{100}$ ) als maßgeblicher Lastfall betrachtet. Für Aussagen zur Wirksamkeit der Flutraumerweiterung bei Lastfällen mit geringerem Wiederkehrintervall erfolgen weitergehende Simulationen mit dem Szenario 6 (UMR:  $Thw_{10}$  und OMR:  $HQ_{10}$ ). Ziel ist eine Entlastung der vorhandenen Küstenschutzelemente bei Sturmfluten durch eine Kappung der Scheitelwasserstände. Die Steuerung der Sturmflutsperrwerke erfolgt grundsätzlich in Abhängigkeit von erreichten Tidehochwasserständen an unterstrom gelegenen Kontrollpunkten. Bei der Flutraumerweiterung durch geänderte Sperrwerkssteuerung wird angenommen, dass vom gültigen Betriebsplan abgewichen wird und die Sperrwerkstore bei Erreichen von höherliegenden Kontrollwasserständen geschlossen sind. Die definierten Kontrollwasserstände sind in Tab. 4 zusammengefasst. Zur Abminderung der Wasserstandserhöhungen in der Weser wird anhand Variante 3 („optimierte“ Steuerung) geprüft, ob eine verzögerte Öffnung der Tore zweckmäßig ist.

Tab. 4: Kontrollwasserstände bei einer Flutraumerweiterung durch Sperrwerkssteuerung

Steuerungsmaßnahme	Huntesperrwerk	Lesumsperrwerk	Ochtumsperrwerk
Variante 0: keine Flutraumänderung	Thw = 2,9 mNN	Thw = 2,7 mNN	Thw = 2,8 mNN
Variante 3: „optimierte“ Steuerung	Thw = 3,9 mNN / Thw = 2,9 mNN	Thw = 3,7 mNN / Thw = 2,7 mNN	Thw = 3,8 mNN / Thw = 2,8 mNN

Eine Flutraumerweiterung durch Entlastungspolder bzw. eine gesteuerte Deichöffnung setzt dann ein, wenn Tidewasserstände von  $Thw > 3,5$  mNN in der Unterweser im Bereich des jeweiligen Zulaufgerinnes erreicht werden. Im Gegensatz zum tidefreien Fluss, bei welchem in der Regel nur eine lang anhaltende Hochwasserwelle abläuft, besteht in Tideflüssen die Möglichkeit, dass während langanhaltender Sturmfluten erhöhte Wasserstände begrenzter Dauer ( $< 6$  h) in nahezu gleicher Größenordnung in kurzen zeitlichen Abständen (Tideperiode) auftreten, sogenannte Kettentiden. Bei der Flutraumerweiterung durch Polder wird daher untersucht, ob die betrachteten Fluträume bei aufeinanderfolgenden extremen Tidehochwasserständen wirksam sind.

#### 4.3.2 Flutraumerweiterung durch geänderte Sperrwerkssteuerung

Abb. 8 zeigt die Wasserstandsänderungen entlang der Unterweser bei Variante 3 („optimierte“ Steuerung) und dem Szenario 6 (UMR:  $Thw_{10}$  und OMR:  $HQ_{10}$ ). Dieses Szenario ( $Thw_{10} = 4,56$  mNN) entspricht nahezu dem zur Kalibrierung herangezogenen Sturmflutereignis von 1999 ( $Thw_{1999} = 4,47$  mNN).

Bei geringeren Wiederkehrzeiten werden leicht erhöhte Wasserstandsänderungen bzw. Absenkungen erreicht. Aufgetragen ist das Verhältnis des Wasserstands bei Flutraumerweiterung zum Wasserstand im Ausgangszustand. Die Wasserstände im Sturmflutscheitel betragen im Bereich der Sperrwerke rund das 0,99-fache von denen im Ausgangszustand. In blau sind die Absenkungen für den Fall, dass die Sperrwerke während des Sturmflutscheitels bei diesem Szenario nicht schließen (Variante 9), dargestellt. Es ergeben sich deutliche Absenkungen, welche im Stadtgebiet von Bremen und im Bereich Werderland rund 24 cm betragen, was etwa dem 0,95-fachen Wert, bezogen auf die lokalen Ausgangswasserstände, entspricht.

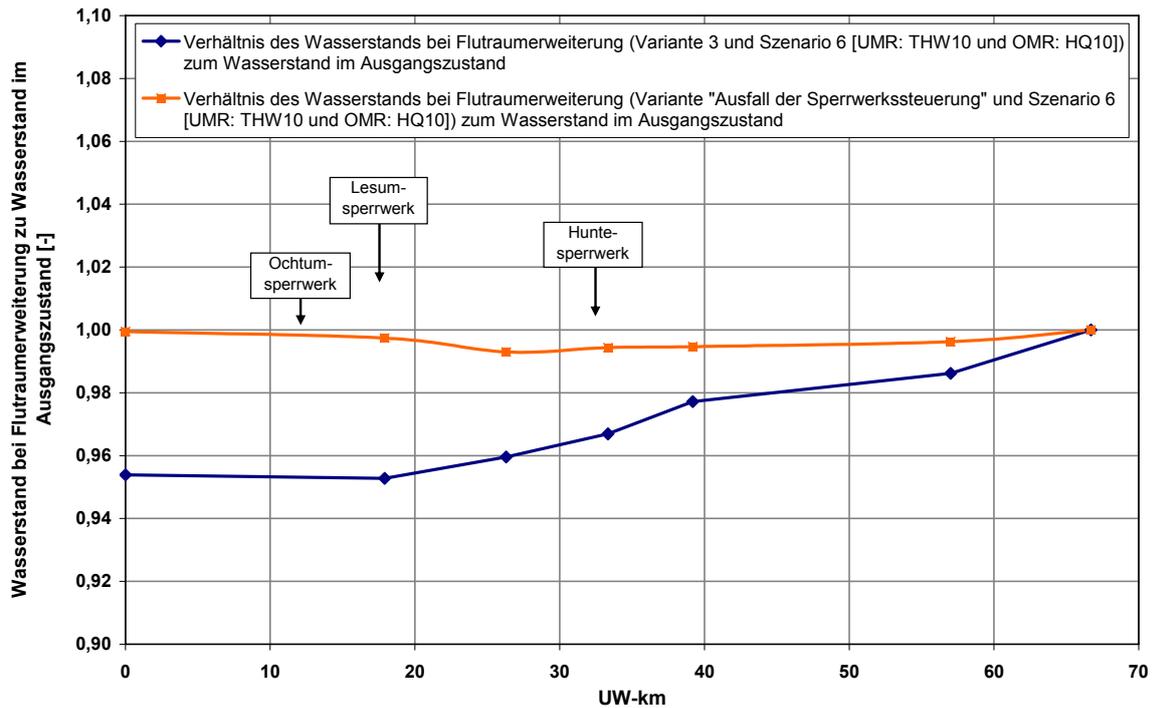


Abb. 8: Verhältnis des Wasserstands bei einer Flutraumerweiterung durch geänderte Sperrwerkssteuerung (Variante 3) sowie beim Lastfall „Ausfall der Sperrwerkssteuerung“ (Variante 9) zum Wasserstand im Ausgangszustand bei Einsteuerung eines Thw<sub>10</sub> (Spekker 2008)

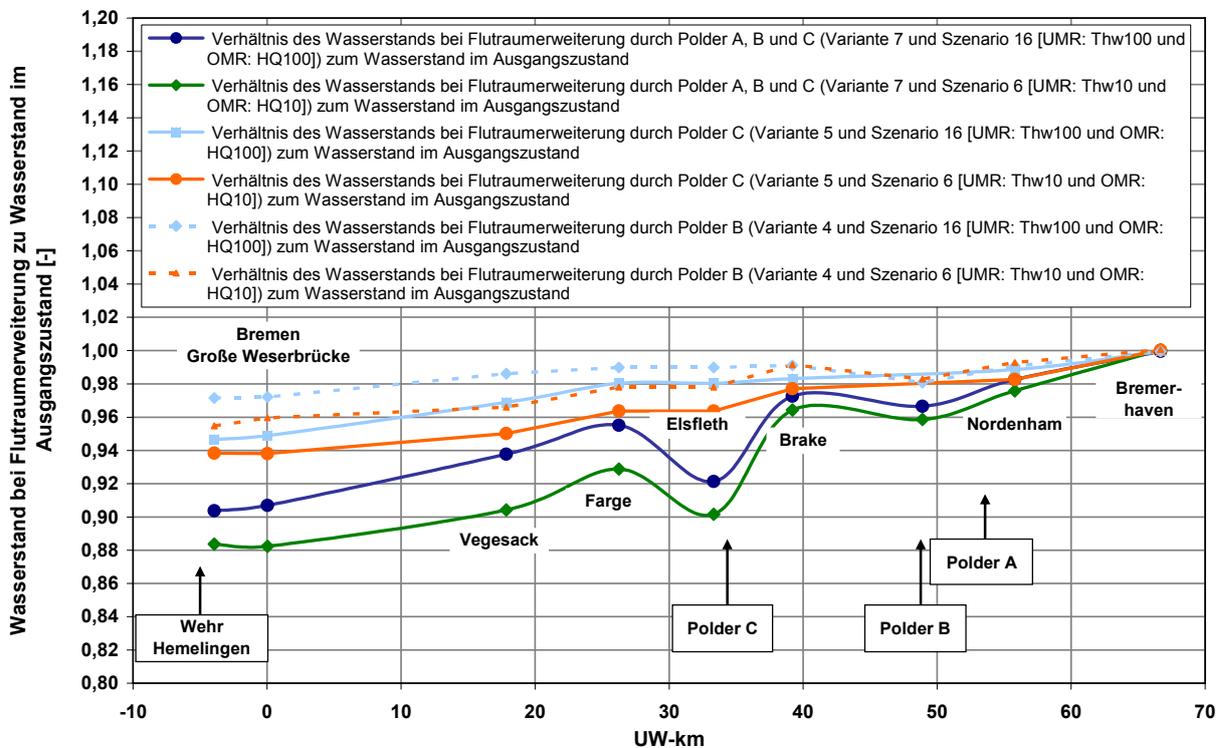


Abb. 9: Verhältnis des Wasserstands bei einer Flutraumerweiterung durch Polder A, B bzw. C (Variante 7) zum Wasserstand im Ausgangszustand (H/H<sub>0</sub>) bei Einsteuerung eines Thw<sub>100</sub> bzw. Thw<sub>10</sub> am unteren Modellrand (Spekker 2008)

### 4.3.3 Flutraumerweiterung durch Sturmflutentlastungspolder

#### Flutraumerweiterung durch Entlastungspolder A, B und C

Die Auswirkungen einer Verbundbewirtschaftung der Sturmflutentlastungspolder (Variante 7) auf die Tidewasserstände entlang der Unterweser sind in Abb. 9 dargestellt. Dabei werden bei Darstellung von Längsschnitten jeweils die Auswirkungen im Sturmflutscheitel betrachtet.

Die Wasserstände im Sturmflutscheitel betragen im Stadtgebiet von Bremen beim Szenario 16 (UMR: Thw<sub>100</sub> und OMR: HQ<sub>100</sub>) und bei einer Flutung der Polder A, B und C (Variante 7) rund das 0,91-fache von denen im Ausgangszustand (Absenkung von bis zu 64 cm).

Entlang der Unterweser ergeben sich Verhältnisse des Scheitelwasserstands bei Flutraumerweiterung zum Scheitelwasserstand ohne Maßnahme zwischen 0,90 (-62 cm) am Pegel Weserwehr und 0,98 (-9 cm) am Pegel Nordenham (Abb. 9). Daraus lässt sich schließen, dass sich die maximalen Absenkungen oberstrom der Zulaufgerinne mit der einlaufenden Tidewelle fortsetzen. Zum Vergleich sind die Wasserstandsänderungen bei Einzelbewirtschaftung der Polder B und C dargestellt.

#### Flutungs- und Entleerungsverlauf in den Entlastungspoldern A, B und C (Variante 7)

Abb. 10 zeigt die Wasserspiegellage im Entlastungspolder C sowie die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen während des Füllvorgangs rund 2 Stunden nach Beginn der Flutung bei der Vortide. Die Höhe der Wasserstände sinkt von rund 2,7 mNN im Bereich des Einlaufbauwerks auf unter 0 mNN ab.

Der Flutungsprozess ist von der Geländegeometrie abhängig und setzt zunächst in tiefergelegenen Rinnen und Geländemulden ein. In Polder C wird die Ausbreitung durch erhöhte Flächen teilweise verhindert bzw. verzögert. Die Strömungsgeschwindigkeiten betragen zu diesem Zeitpunkt in Poldermitte zwischen 0,85 m/s und 0,95 m/s und im Bereich des Zulaufgerinnes bis zu 2,5 m/s.

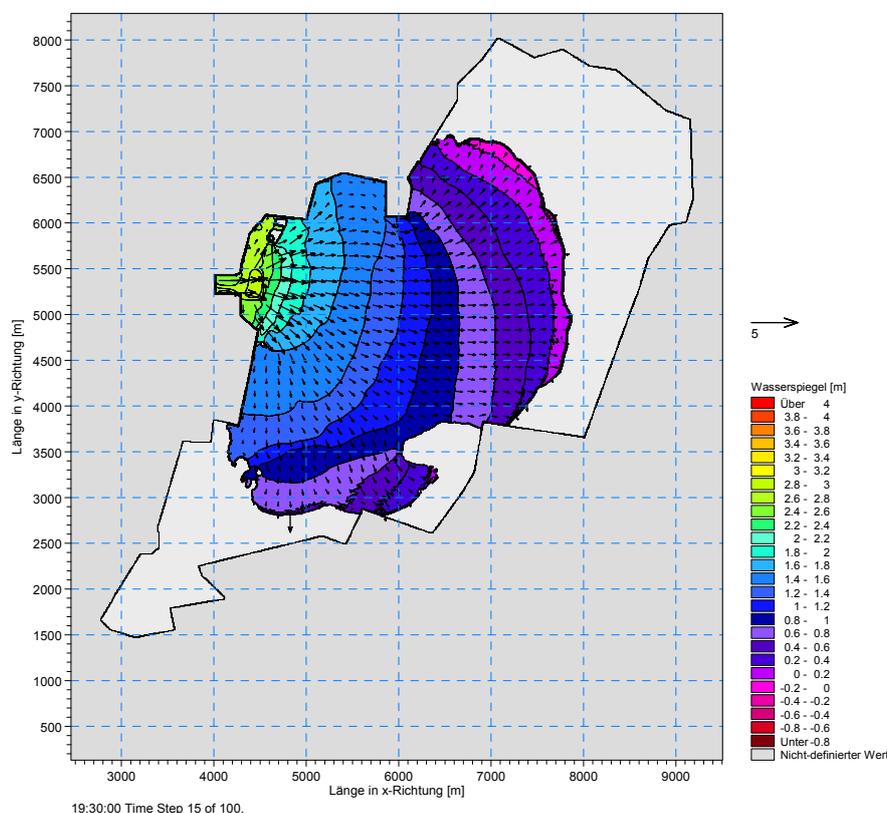


Abb. 10: Wasserspiegelloberfläche und Strömungsverhältnisse während der Flutung des Entlastungspolders C (rund 2 Stunden nach Flutungsbeginn; Spekker 2008)

Tab. 5 bilanziert die in die Polder strömenden Wassermengen und gibt den sich jeweils ergebenden maximalen Wasserspiegel an. Das Tidevolumen beträgt beim Szenario 16 während der Vortide rund 259,1 Mio. m<sup>3</sup>, während der Haupttide rund 388,1 Mio. m<sup>3</sup> und während der Nachtide rund 163,0 Mio. m<sup>3</sup>.

Tab. 5: Wasserstände in den Entlastungspoldern A, B und C (Variante 8) im Verlauf der Kettentide und Zuflussmengen beim Szenario 16 (UMR: Thw<sub>100</sub> und OMR: HQ<sub>100</sub>)

	Zufluss (Vortide) [Mio. m <sup>3</sup> ]	Zufluss (Sturmflut- tide) [Mio. m <sup>3</sup> ]	maximaler Wasserstand [mNN]	Rückfluss (nach Sturm- fluttide) [Mio. m <sup>3</sup> ]	Zufluss (Nachtide) [Mio. m <sup>3</sup> ]	Wasserstand (nach Nachtide) [mNN]
Polder A	13,3	30,9	4,80	-23,7	10,5	3,38
Polder B	38,9	68,5	4,85	-59,5	31,4	3,42
Polder C	39,1	62,3	4,90	-53,8	30,2	3,67
<b>Summe</b>	91,3	161,7	--	-137,4	72,1	--

Bei Erreichen des MTnw (rund 1,5 Tage nach dem Sturmflutscheitel) befinden sich noch rund 13,0 Mio. m<sup>3</sup> (Polder A), 21,3 Mio. m<sup>3</sup> (Polder B) und 25,3 Mio. m<sup>3</sup> (Polder C) in den Fluträumen bei Wasserständen von 1,60 mNN im Polder A, 0,98 mNN im Polder B sowie 1,35 mNN im Polder C.

#### 4.3.4 Ergebnisse der Steuerungsmaßnahmen

Zur Analyse der Wirksamkeit gesteuerter Schutzelemente wurden die resultierenden Tidewasserstände bei geänderter Sperrwerkssteuerung sowie bei Einzelbewirtschaftung und bei Verbundbewirtschaftung von Sturmflutentlastungspoldern im Bereich der Unterweser ermittelt. Tab. 6 fasst die maximalen Wasserstandsänderungen im Sturmflutscheitel zusammen.

Bei einer Flutraumerweiterung durch ausreichend dimensionierte Entlastungspolder können die Sturmflutscheitel im Gegensatz zu einer Flutraumerweiterung durch eine geänderte Sperrwerkssteuerung merklich gekappt werden, insbesondere im Stadtgebiet von Bremen.

Tab. 6: Relative und absolute Wasserstandsänderungen im Sturmflutscheitel bei Maßnahmen zur Flutraumerweiterung bzw. Risikosteuerung

	Wasserstandsänderung bei Szenario 16 (UMR: Thw <sub>100</sub> und OMR: HQ <sub>100</sub> )		Wasserstandsänderung bei Szenario 6 (UMR: Thw <sub>10</sub> und OMR: HQ <sub>10</sub> )	
	H/H <sub>0</sub> [-]	absolut [cm]	H/H <sub>0</sub> [-]	absolut [cm]
Variante 3: Sperrwerk: "optimierte" Steuerung	0,994	-1,9	0,993	-3,4
Variante 7: Polder A, B und C	0,9	-64	0,88	-67
Variante 9: Ausfall der Sperrwerkssteuerung	--	--	0,95	-24,1

Für das Unterweserästuar zeigt eine Verbundbewirtschaftung der Polder eine hohe Wirksamkeit. Auch die Scheitel des Tidehochwassers im Anschluss an den Sturmflutscheitel können entlang des oberen Weserästuars um rund das 0,9-fache der Ausgangswerte gesenkt werden. Bei Kettentiden ist die

grundsätzliche Wirksamkeit von Sturmflutentlastungspoldern damit gegeben. Es zeigte sich, dass bei Kettentiden rund die Hälfte des in den Fluträumen gespeicherten Wassers in Tideniedrigphasen wieder abgeschlagen werden muss, um bei folgenden extremen Tidewasserständen erneut eine signifikante Kappung der Scheitel erzielen zu können.

Es konnte nachgewiesen werden, dass ausreichend dimensionierte und topographisch vorteilhaft gelegene Sturmflutentlastungspolder in ihrer Wirkung eine Alternative zu einer Deicherhöhung darstellen können. Eine merkliche Beeinflussung der Sturmflutscheitelwasserstände erfolgt nur dann, wenn aus dem Tidefluss sehr große Wassermengen abgeschlagen und zwischengespeichert werden, was sich auch bei vergangenen Deichbrüchen während Sturmfluten im Bereich der Tideästuare zeigte.

Eine geänderte Sperrwerkssteuerung (kürzere Schließzeiten) unter Ausnutzung des oberhalb liegenden Retentionsraums führt zu minimalen Wasserstandsänderungen im Sturmflutscheitel und ist für das Unterweserästuar als Risikosteuerungsmaßnahme nicht geeignet. Mit dem gewählten Modellverfahren können die Berechnungen in Echtzeit erfolgen, so dass ein Einsatz nicht nur zu Planungszwecken, sondern auch operationell erfolgen kann

#### 4.4 Risikominderung am Beispiel Werderland

Die sich durch die Risikosteuerungsmaßnahmen ergebenden neuen Randbedingungen im Unterweserästuar werden für eine erneute Simulation des Überflutungsvorgangs nach Deichversagen im Bereich des Werderlands angesetzt, um die sich möglicherweise ergebenden verringerten Schadenshöhen zu bestimmen. Da sich bei einer Flutraumerweiterung durch Kombination der Risikosteuerungsmaßnahmen keine bedeutenden Änderungen im Vergleich zur Flutraumerweiterung durch Entlastungspolder ergeben haben, wird die Variante 7 (Verbundbewirtschaftung der Polder A, B und C) für die Simulation herangezogen. Abb. 11 zeigt die resultierenden neuen Überflutungsflächen sowie die, bezogen auf die Fläche, neu berechneten Schadenshöhen.

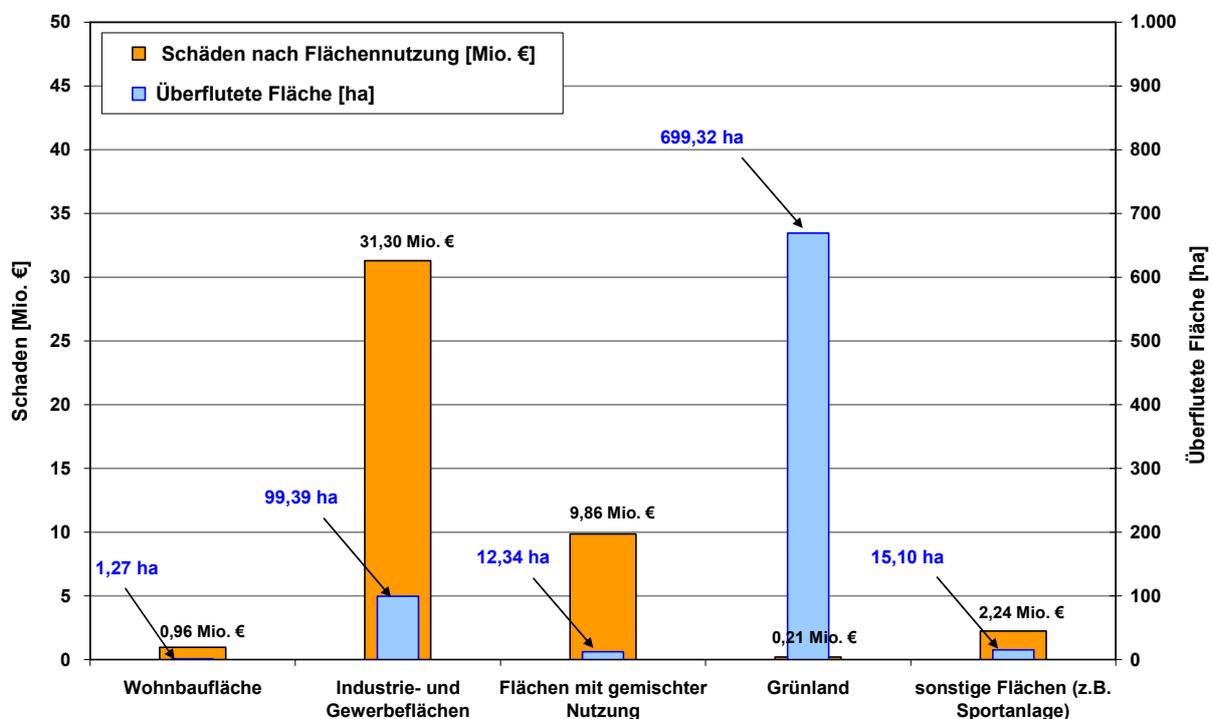


Abb. 11: Flächenanteil und Schaden aufgrund des Deichbruchszenarios im Bereich Werderland bei Szenario 16 und unter Berücksichtigung der Flutraumerweiterung durch Entlastungspolder A, B und C (Spekker 2008)

Durch die Minderung der Wasserstände in der Unterweser aufgrund einer Flutraumerweiterung durch Sturmflutentlastungspolder (Variante 7) werden die Überflutungsflächen in der Fokusfläche Werderland von 872 ha auf 797 ha vermindert. Der Schaden verringert sich von 51,56 Mio. € auf 47,0 Mio. € und das Risiko ergibt sich wie folgt:

$$\text{Risiko} = 1/6.150 [1/a] * 47,0 \text{ Mio. €} = 7.642 \text{ €/Jahr.}$$

Abb. 12 zeigt die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit der Wasserstände (schwarze Kurve) am Pegel Bremen (Große Weserbrücke) und die durch die untersuchten (Risiko-)Steuerungsmaßnahmen erzielten Minderungen des Wasserstands. Betrachtet werden die simulierten Scheitelwasserstände in Abhängigkeit der Hochwasser- und Sturmflutszenarien.

Während der Sturmflutscheitel in Bremen bei Szenario 16 (UMR:  $\text{Thw}_{100}$  und OMR:  $\text{HQ}_{100}$ ) im Ausgangszustand noch oberhalb der Höhe einiger Abschnitte im Schutzsystem liegt, ergibt sich durch eine Flutraumerweiterung durch Sturmflutentlastungspolder eine deutliche Minderung der Scheitelwasserstände. Dies führt zu geringeren Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Versagens der Schutzelemente und damit des Risikos insbesondere im Stadtgebiet von Bremen.

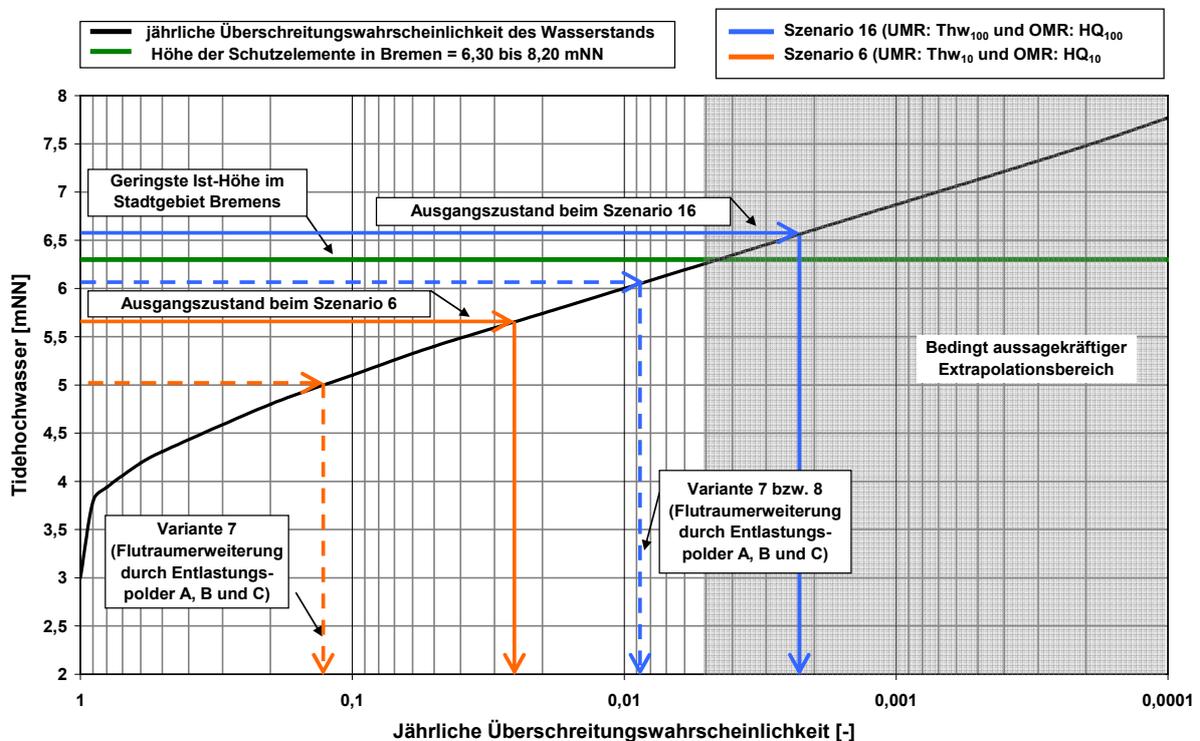


Abb. 12: Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit des Wasserstands am Pegel Bremen (Große Weserbrücke) und Darstellung der Minderung der Wasserstände aufgrund einer Flutraumerweiterung durch Polder A, B und C (Spekker 2008)

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurden Methoden zur Risikominderung in tidebeeinflussten Flüssen durch gesteuerte Hochwasser- bzw. Küstenschutzbauwerke untersucht. Als vorsorgende und nachhaltige neue Küstenschutzstrategien wurden der Anschluss von Sturmflutentlastungspoldern und eine geänderte Steuerung von Sturmflutsperrwerken betrachtet. Für das weit verzweigte, tidebeeinflusste Gewässernetz der Unterweser liegt hiermit erstmals ein gekoppeltes, instationär betriebenes Modell unter Berücksichtigung iterativer Steuerungen regel- bzw. steuerbarer Schutzelemente vor, mit welchen Aussagen zu den betrachteten Risikominderungsmaßnahmen möglich sind.

Für das im Stadtgebiet von Bremen gelegene Gebiet Werderland wurden die Versagensfolgen aufgrund definierter Deichbruchszenarien mit einer instationären, zweidimensionalen Überflutungsschadensberechnung sowie Nutzungsanalyse der von Überflutung betroffenen Flächen berechnet und mit der Versagenswahrscheinlichkeit im Rahmen einer probabilistischen Risikoanalyse zum Risiko zusammengefasst. Um die Effektivität der Steuerungsmaßnahmen beurteilen bzw. bewerten zu können, wurden Hochwasser- und Sturmflutszenarien mit unterschiedlichen Wiederkehrintervallen, insbesondere extremen und damit seltenen Ereignissen (z. B.  $T = 100$  Jahre), betrachtet. Zusammengefasst können die in dieser Arbeit untersuchten Fragen wie folgt beantwortet werden:

- Für die Unterweser lassen sich die Scheitelwasserstände durch den Anschluss von Sturmflutentlastungspoldern auch für extreme Szenarien (Zusammentreffen einer Hochwasser- und Sturmflutwelle mit einem Wiederkehrintervall von jeweils 100 Jahren) um rund 10 % im Stadtgebiet von Bremen verringern. Eine Einzelbewirtschaftung führt je nach Lokation der Entlastungsmaßnahmen maximal zu 5 % geringeren Scheitelwasserständen, während eine Änderung der Sperrwerkssteuerungen die Scheitelwasserstände nur um maximal 1 % beeinflusst. Der Einfluss einer geänderten Sperrwerkssteuerung ist bei extremen Szenarien begrenzt bzw. ohne Nutzen. Darüber hinaus zeigt sich, dass Sturmflutentlastungspolder auch bei Kettentiden eine vergleichbare Wirksamkeit aufweisen.
- Die erstellten gekoppelten, hydrodynamisch-numerischen Modelle ermöglichen bei hoher räumlicher Auflösung eine modellgestützte und iterative Steuerung von bestehenden und potentiellen Küstenschutzelementen wie Entlastungspolder und Sperrwerke. Eine aufeinander abgestimmte, iterative Steuerung anhand von Kontrollwasserständen ist effektiv und notwendig.
- Die Modelle sind sowohl für Planungen als auch operationell unter Berücksichtigung adaptiver Steuerungen der Fluträume einsetzbar, das heißt auch eine Echtzeitsteuerung im Sturmflut- bzw. Hochwasserfall ist möglich. Damit steht ein Werkzeug zur Analyse von technischen Risikominderungsmethoden als Basis für einen gesellschaftlichen Diskurs über den Umgang mit den Folgen von Extremhochwasser zur Verfügung.

Das Risiko im Bereich des an der Unterweser betrachteten, zumeist landwirtschaftlich aber auch industriell genutzten Gebiets Werderland ist aktuell mit rund 8.400 €/Jahr gering. Die monetär bewertbaren Schäden bei Deichbruchversagen sind in diesem Gebiet überschaubar. Durch die Steuerungsmaßnahmen ergab sich eine Minderung des Risikos bei gleichem Deichbruchszenario um rund 9 %. Eine Bewertung für das gesamte Stadtgebiet von Bremen mit deutlich höherem Risikopotential steht aus.

Eine Steigerung des Bewusstseins der Bevölkerung vor dem bestehenden Restrisiko trotz Hochwasserschutzmaßnahmen durch vermehrte und angepasste Kommunikation der verbleibenden Risiken bleibt essentiell. Dazu stehen anhand der hier dargestellten Vorgehensweisen unter Anwendung der Modelltechnik zur Bestimmung des Risikos und der Auswirkungen von Risikominderungsmaßnahmen wesentliche Grundlagen aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht bereit.

## Literatur

- CUR – Centre for Civil Engineering Research and Codes (1990): Probabilistic design of flood defences. CUR Report, 141. TAW, Gouda.
- Franzius-Institut (2007): Integriertes Hochwasserrisikomanagement in einer individualisierten Gesellschaft (INNIG). BMBF-Teilprojekt 1. Risikoanalyse und -steuerung. Schlussbericht. Hannover.
- Plate, E.J. & L. Duckstein (1988): Reliability based Design Concepts in Hydraulic Engineering. In: Water Resources Bulletin 24: 234-245.
- Spekker, H. (2008): Steuerung von Küstenschutzelementen an Tideflüssen als Grundlage für ein Hochwasser- und Risikomanagement. Dissertation. Mitteilungen des Franzius-Instituts der Leibniz Universität Hannover, Heft 96.

**Hinweis und Danksagung**

Die Arbeit wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover erstellt. Allen Mittelgebern (u.a. BMBF, DAAD) und Unterstützern sei an dieser Stelle gedankt.

**Adresse**

Dr.-Ing. Heiko Spekker  
INROS LACKNER AG  
Lindenstrasse 1A  
28755 Bremen, Germany

Heiko.Spekker@inros-lackner.de