

Untersuchungen zur Überflutungsausbreitung im Fall von Deichbrüchen

Frank Thorens, Hans-Jörg Lambrecht und Holger Blum

Zusammenfassung

Das Versagen von Küstenschutzanlagen im Sturmflutfall kann erhebliche Konsequenzen für das geschützte Hinterland zur Folge haben. Im Rahmen des KFKI/BMBF-Forschungsverbundprojekts HoRisk „Hochwasserrisikomanagement für den Küstenraum“ wurden Versagensszenarien von für die Nordseeküste typischen Küstenschutzsystemen im Hinblick auf deren Konsequenzen untersucht. Als Grundlage hierfür diente eine Analyse der topografischen Verhältnisse der Küstengebiete Niedersachsens und Schleswig-Holsteins. Allein in Niedersachsen liegen circa 60 % des deichgeschützten Gebietes unterhalb des MThw, wodurch die Notwendigkeit des Hochwasserschutzes schon für reguläre Tideverhältnisse deutlich wird. Als prägend für die gesamte Nordseeküste zeigen sich Küstenschutzsysteme mit Deichvorland, während eine zweite Deichlinie nur in Schleswig-Holstein fast durchgehend vorhanden ist.

Hydronumerische Überflutungssimulationen wurden zunächst für vereinfachte synthetische Modellgebiete erstellt, um die Wirkung unterschiedlicher Typen von Küstenschutzsystemen sowie weiterer Einflussgrößen im Fall des Versagens der ersten Deichlinie systematisch zu untersuchen. Es konnte eine signifikante Reduzierung der Überflutung durch Deichvorländer, Sommerdeiche und zweite Deichlinien im Vergleich zu einer scharliegenden ersten Deichlinie festgestellt werden, wodurch die Relevanz dieser Küstenschutzelemente unterstrichen wird. Auch die Höhenlage des geschützten Gebietes, das Vorhandensein von Gewässerstrukturen sowie dessen Rauigkeit beeinflussen die Überflutungscharakteristik deutlich.

Für ausgewählte Konstellationen von Küstenschutzsystemen und Randbedingungen wurden ergänzend szenarienbasierte Überflutungsmodellierungen für das Projektgebiet Norden durchgeführt. Es bestätigte sich der bereits in den synthetischen Modellen festgestellte, erheblich reduzierende Einfluss von Deichvorländern und Sommerdeichen auf die Überflutungsausbreitung. Von erheblicher Relevanz für die Überflutungscharakteristik erwiesen sich weiterhin die Anzahl und Lage der Deichbruchstellen, die Breite des Deichbruches und die Ganglinien der untersuchten Sturmtidekurven.

Schlagwörter

Hochwasserrisikomanagement, Küstenschutz, Deichvorland, Salzwiesen, zweite Deichlinie, Deichbruch, Überflutungsmodellierung, Küstengebiete

Summary

The failure of coastal protection structures during storm surges can cause significant consequences for the protected hinterland. Within the framework of the KFKI/BMBF research project HoRisk "Flood Risk

Management for Coastal Areas” scenario-based flooding of the hinterland, which could result from the failure of coastal protection systems typical for the North Sea coast, were investigated. As a basis, the topographical conditions of the coastal areas in the German federal states of Lower Saxony and Schleswig-Holstein were investigated. In Lower Saxony, about 60 % of the flood-protected area lies below the mean high tide level. This indicates that the need for flood protection is already evident for regular tidal conditions.

Dominant for the entire North Sea coast are coastal protection systems with dike foreland. A second dike line, however, is almost always present only in Schleswig-Holstein. Hydronumeric flooding simulations were firstly established for simplified, synthetic modeling areas, in order to investigate systematically the effects of different types of coastal defense systems and other factors in case of failure of the first dike line. A significant reduction of flooding by dike forelands, summer dikes and second dike lines compared to a single first dike line was found. This underlines the relevance of these coastal protection elements. The altitude of the protected area, the presence of water structures as well as the roughness influence the flooding characteristics significantly.

For selected variations of coastal protection systems and boundary conditions, scenario-based flooding modeling for the project area in northwestern Germany was carried out. The high influence of dike foreland and summer dikes on flood propagation was confirmed. Of considerable relevance to the flooding characteristics, the number and location of dike breach locations, the breach width and the hydrographs of the investigated storm tide curves were found.

Keywords

Coastal flood risk management, coastal protection, dike foreland, salt marshes, second dike line, dike breach, flood modeling, coastal areas

Inhalt

1	Einleitung.....	185
2	Methodisches Vorgehen.....	186
3	Beschreibung und Analyse des Küstenraums.....	186
3.1	Datengrundlagen.....	186
3.2	Der Nordseeküstenraum Niedersachsens und Schleswig-Holsteins.....	187
3.3	Analyse der Verteilung der Geländehöhen in den niedersächsischen Deichverbandsgebieten.....	190
3.4	Analyse vorhandener Küstenschutzsysteme.....	193
3.4.1	Anteile von Deichlinien und Vorländern.....	193
3.4.2	Kennwerte für Polder und Köge.....	195
4	Konsequenzen des Versagens von Küstenschutzanlagen.....	197
4.1	Methodik.....	197
4.2	Untersuchungen für synthetische Modellgebiete.....	197
4.2.1	Variation der Geländehöhe im deichgeschützten Gebiet.....	199
4.2.2	Auswirkung von Deichvorland.....	200
4.2.3	Einfluss von Sommerdeichen.....	202

4.2.4	Einfluss von zweiten Deichlinien.....	203
4.2.5	Einfluss von Gewässersystemen.....	204
4.2.6	Einfluss von Wind.....	208
4.2.7	Variation der Sturmflutszenarien.....	209
4.3	Zusammenfassende Betrachtung zum Einfluss der untersuchten Parameter.....	209
4.4	Untersuchungen für das Projektgebiet nordwestliches Ostfriesland.....	210
4.4.1	Methodik.....	212
4.4.2	Einfluss von Vorland und Sommerdeichen.....	213
4.4.3	Einfluss von linienhaften Strukturen, Oberflächenrauigkeiten und Gewässernetzen.....	214
4.4.4	Einfluss unterschiedlicher Tidekurven.....	217
4.4.5	Einfluss von Deichbruchbreiten und Deichbruchanzahl.....	219
4.5	Zusammenfassende Betrachtung zum Einfluss der untersuchten Parameter.....	220
5	Schriftenverzeichnis.....	221

1 Einleitung

Der Schutz der sturmflutgefährdeten Küstengebiete an der deutschen Nord- und Ostseeküste gegen Überflutung durch Sturmfluten ist für diesen wichtigen Lebens-, Wirtschafts- und Kulturraum von existentieller Bedeutung. An den deutschen Küsten werden circa 12.000 km² niedrig liegende Küstengebiete mit fast 2,4 Mio. Einwohnern durch Küstenschutzanlagen vor Sturmfluten geschützt. Allein an der niedersächsischen Nordseeküste befinden sich circa 6.500 km² durch Küstenschutzanlagen sturmflutgeschützte, öffentlich-rechtlich definierte Bereiche, in denen circa 1,1 Millionen Menschen leben.

Sturmflutkehrende Hauptelemente bilden an der offenen Festlandsküste Niedersachsens und Schleswig-Holsteins erste Deichlinien. Diese wirken in Abhängigkeit von den jeweiligen Rahmenbedingungen oft mit anderen Küstenschutzelementen wie Deichvorländern oder zweiten Deichlinien zusammen und bilden mit diesen ein System aus Küstenschutzelementen, welches einen wesentlichen Baustein des Hochwasserrisikomanagements im Kontext der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EU-HWRM-RL 2007) darstellt. Die Untersuchungen zu Küstenschutzsystemen fokussierten vor allem auf das Zusammenwirken dieser Elemente für den Bemessungsfall, d. h. dem Eintreten des Bemessungswasserstandes und des zugehörigen Seegangs. Hierdurch wird gemäß dem Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen ein definiertes Schutzniveau, aber keine absolute Sicherheit gewährleistet (NLWKN 2007). Das niedersächsische Deichgesetz (NDG 2004) und der Generalplan Küstenschutz sprechen zusätzlich in sehr genereller Form die Funktionen des Deichvorlandes und der zweiten Deichlinien im Falle eines Versagens der ersten Deichlinie an, indem sie deren Schutzfunktion und überflutungsreduzierende Wirkung thematisieren.

Die Konsequenzen eines Versagens der ersten Deichlinie und die Wirkung zusätzlicher Elemente eines Küstenschutzsystems wurden deshalb im Rahmen des von 2009 bis 2013 durchgeführten BMBF geförderten KFKI-Forschungsverbundprojekts HoRisk „Hochwasserrisikomanagement für den Küstenraum“ im Teilprojekt HoRisk-C „Konsequenzen des Versagens im Bereich der Nordseeküste und Schadensminimierung“

mittels szenarienbasierter Überflutungssimulationen mithilfe hydronumerischer Modelle weitergehend untersucht. Der räumliche Schwerpunkt lag auf dem Bereich der offenen Festlandsküste.

2 Methodisches Vorgehen

Als Grundlage weiterer Untersuchungen wird eine generelle Betrachtung der Charakteristika der sturmflutgeschützten Gebiete entlang der Deutschen Nordseeküste vorgenommen und zusätzlich eine Analyse der Höhenverteilung in den deichgeschützten Gebieten Niedersachsens durchgeführt.

Die überflutungsgefährdeten Gebiete der Deutschen Nordseeküste sind durch unterschiedliche Küstenschutzsysteme vor Überflutung geschützt. Deshalb erfolgt eine Erhebung und Klassifizierung der bestehenden Systeme an der Nordseeküste. Weiterhin werden binnenseitig an die erste Deichlinie angrenzende Polder- bzw. Koogtopografien als Basis für die späteren szenarienbasierten Überflutungssimulationen analysiert.

Küstenschutzsysteme und Hinterlandtopografien können im Küstenraum stark variieren. Um die Wirkung dieser auf das Überflutungsgeschehen im Fall eines Deichbruchs untersuchen zu können, erfolgte eine systematische vergleichende Betrachtung und Bewertung der Auswirkungen einzelner Elemente eines Küstenschutzsystems wie z. B. eines Deichvorlands oder einer zweiten Deichlinie bzw. von topografischen Elementen wie Geländehöhen und Gewässersystemen im deichgeschützten Gebiet für Deichbruchszenarien. Hierzu wurde ein synthetisches Modellgebiet definiert, in welches einzelne Küstenschutzelemente bzw. Topografien zusätzlich zu einer ersten Deichlinie implementiert wurden. Die Überflutungssimulationen wurden mit einem hydronumerischen Modell mit 1D/2D-Kopplung durchgeführt. Ergänzend wurden verschiedene Konstellationen für ein reales Projektgebiet untersucht und mit den Ergebnissen aus dem synthetischen Modellgebiet verglichen.

3 Beschreibung und Analyse des Küstenraums

3.1 Datengrundlagen

Für die Charakterisierung des Küstenraums – mit dem Ziel, Überflutungssimulationen durchzuführen – sind Höheninformationen möglichst hoher Güte in der räumlichen Auflösung und Höhengenaugigkeit erforderlich. Im Allgemeinen liegen die für derartige Untersuchungen verwendbaren Daten in Form von digitalen Geländehöhen-Modellen (DGM) vor. Zudem bilden DGM für die numerische Überflutungsmodellierung die Grundlage für den Aufbau von Modelltopografien der zu untersuchenden Gebiete.

Für Niedersachsen liegen DGM flächendeckend in unterschiedlichen Auflösungen vor. Sie werden durch das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (LGLN) zur Verfügung gestellt. Die Rasterzellengröße der feinsten Auflösung des DGM betrug zum Zeitpunkt der Untersuchungen 12,5 m für das DGM 5. Die Höhendaten für die schleswig-holsteinische Nordseeküste sind im Rahmen des Küsteninformationssystems (KIS) als DGM beim Landesbetrieb für Küsten-, Natur- und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) verfügbar. Die Auflösung der Rasterdaten liegt bei 1 m.

Neben diesen Höheninformationen sind für die numerische Modellierung in Abhängigkeit der vorliegenden Rasterauflösung ggf. weitere topografische Informationen zu deren Detaillierung erforderlich. Besonders von Bedeutung sind die Informationen über linienhafte Elemente, welche Strukturen wie Hauptdeiche, Straßendämme, Bahndämme und sonstige Deiche (Sommerdeiche, zweite Deichlinien, Hochwasserschutzdeiche) repräsentieren, da diese einen direkten Einfluss auf mögliche Fließwege und damit die Überflutungsausbreitung haben können (Thorenz et al. 2008, Burg et al. 2008). Linienhafte Strukturen sind für Niedersachsen über das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) verfügbar. Für Schleswig-Holstein werden die Linienelemente durch die hohe Auflösung des DGM von 1 m durch dieses überwiegend direkt abgebildet. Darüber hinaus sind Informationen über die vorherrschenden Abmessungen oder repräsentative Regelquerschnitte der jeweiligen Gewässerquerschnitte erforderlich.

3.2 Der Nordseeküstenraum Niedersachsens und Schleswig-Holsteins

Im deichgeschützten Bereich der niedersächsischen Festlandsküste ist die Topografie vorwiegend durch tiefliegende Marsch- und Moorbereiche geprägt, die über Jahrhunderte durch holozäne Sedimentablagerungen entstanden sind. Diese Gebiete erstrecken sich bis zur Geest, die pleistozänen Ursprungs ist. Entlang der tidebeeinflussten Flüsse Ems, Weser und Elbe erstrecken sich diese Gebiete bis weit ins Binnenland. Vor der Küstenlinie des Festlandes erstreckt sich über weite Teile das Wattenmeer mit den vorgelagerten Ostfriesischen Inseln als sandige Barriereinseln.

In Abb. 1 sind die tiefliegenden Marsch- und Mooregebiete überwiegend durch hellgrüne bis blaue Farbtöne charakterisiert. Die Geländehöhen liegen hier vorwiegend zwischen 1,4 m über und 0,5 m unter NHN. Zum Teil liegen küstenferne Binnenbereiche auf Höhenlage um NHN -2 m wie z. B. im Moormeerland östlich von Emden oder im Jader Marschmoor nordöstlich von Oldenburg. Die höherliegenden Gebiete der Geest sind durch einen Farbbereich von Gelb bis Braun gekennzeichnet. Ohne das bestehende Küstenschutzsystem würde bereits bei normalem Tidehochwasser, welches in den Tideflüssen mehr als 2 m über NHN erreichen kann, ein großer Teil des küstennahen Binnenlandes überflutet werden.

Gemäß jüngster Überprüfungen beträgt die Länge der ersten Deichlinie (Hauptdeichlinie) an der niedersächsischen Nordseeküste insgesamt circa 603 km. Auf weniger als 20 % der gesamten Deichlinie ist eine zweite Deichlinie angeordnet. Das geschützte Gebiet umfasst eine Fläche von rund 6.500 km². Dieses entspricht circa 14 % der Gesamtfläche Niedersachsens. Hier leben circa 1,1 Millionen Einwohner bzw. 14 % der Gesamtbevölkerung Niedersachsens. Das Gesamtschadenspotential beträgt für direkte, tangible Schäden circa 129 Mrd. Euro (NLWKN 2018). In Abb. 1 sind die Höhenabstufungen in 1-m-Schritten für den Bereich bis NHN +10 m zusammen mit der Hauptdeichlinie abgebildet.

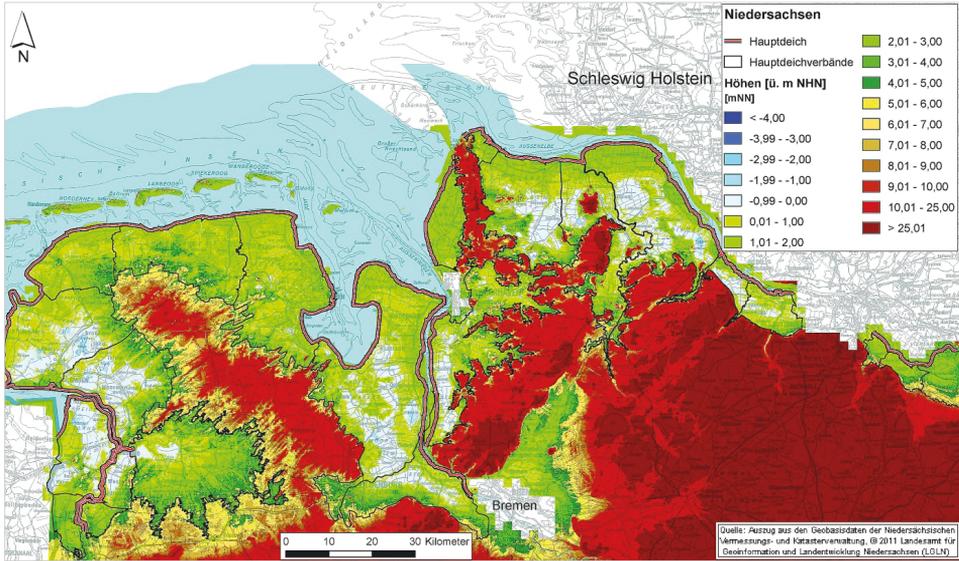


Abbildung 1: Geländehöhen, Deichverbandsgebiete und Hauptdeichlinie in den Küstengebieten Niedersachsens.

Die Nordseeküste Schleswig-Holsteins ist durch eingedeichte, tiefliegende Marsch und Moorgebiete sowie das davorliegende Wattenmeer geprägt. Im Wattenmeer liegen die Nordfriesischen Inseln, die Halligen sowie die Nordfriesischen Außensände.

In Abb. 2 ist eine Übersicht über die Nordseeküste Schleswig-Holsteins mit Höhenabstufungen von 1 m für den Bereich bis NHN + 10 m dargestellt.

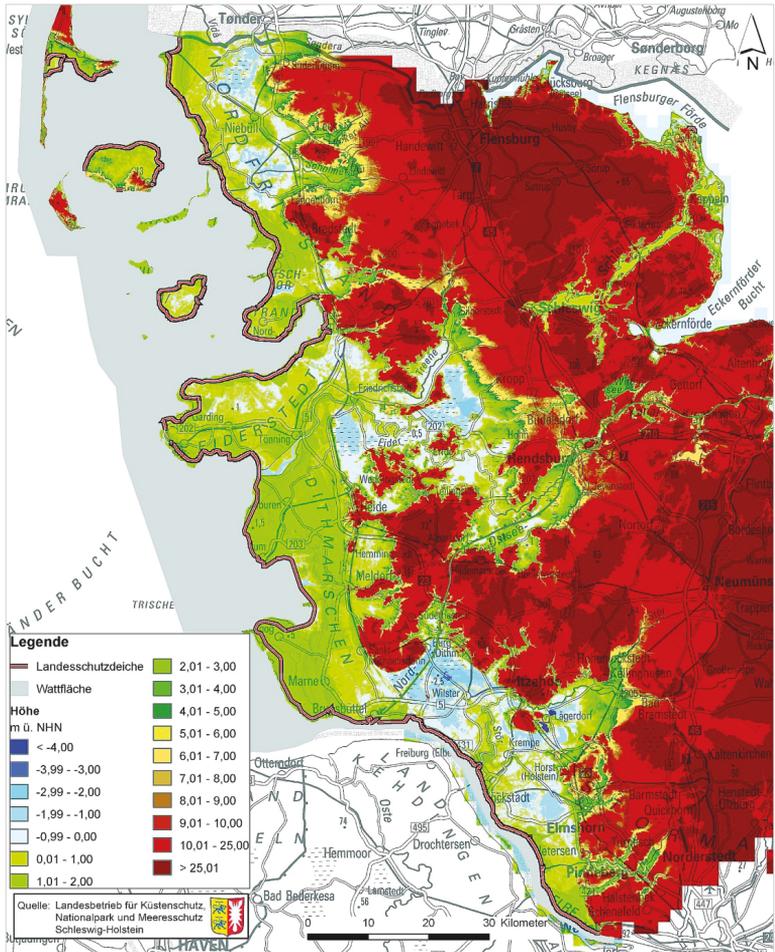


Abbildung 2: Geländehöhen und Landesschutzdeiche an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste.

Die Höhenlagen weisen ähnliche Wertebereiche wie im Küstengebiet Niedersachsens auf. Auch hier sind küstenferne Bereiche im Binnenland vorhanden, die deutlich unter NHN liegen.

Die Höhenlinie von über NHN + 5 m begrenzt landseitig das zu schützende Gebiet an der Westküste Schleswig-Holsteins (MELUR 2012). Es ergibt sich dadurch eine geschützte Fläche von 3.404 km² (entspricht circa 22 % der Gesamtfläche Schleswig-Holsteins) mit einer Einwohnerzahl von rund 253.000 (entspricht circa 9 % der Gesamtbevölkerung Schleswig-Holsteins). Die in diesem Gebiet verorteten Sachwerte belaufen sich auf circa 32 Milliarden Euro (MELUR 2012). Den Sturmflutschutz an der Festlandsküste gewährleistet eine circa 293 km lange Landesschutzdeichlinie.

3.3 Analyse der Verteilung der Geländehöhen in den niedersächsischen Deichverbandsgebieten

Im Niedersächsischen Deichgesetz (NDG 2004) sind insgesamt 22 Hauptdeichverbände aufgeführt. Für diese Verbände sind die landseitigen Grenzen des jeweils sturmflutgeschützten Gebietes durch Angabe eines Höhenniveaus in Metern über NHN definiert. Die das Gebiet begrenzende Höhenlinie der Deichverbände variiert dabei zwischen NHN +5,0 m an der offenen Küste, z. B. im Bereich der Rheider Deichacht oder der Deichacht Norden in Ostfriesland, und NHN +8,0 m im oberen Bereich der Tideelbe im Artlenburger Deichverband. Die Höhe des mittleren Tidehochwassers beträgt für die Jahresreihe 2006 bis 2010 zwischen NHN +1,28 m als geringstem Wert für die Norder Deichacht und NHN +2,77 m als höchstem Wert für den Artlenburger Deichverband (Westphal et al. 2013). Die geschützte Fläche der einzelnen Deichverbände reicht von circa 3.168 ha für den Cuxhavener Deichverband bis circa 84.300 ha für den II. Oldenburgischen Deichband (NLWKN 2007).

Um einen deichverbandsbezogenen Überblick zu gewinnen und eine Bewertung vornehmen zu können, welcher Anteil des jeweiligen Verbandsgebietes aufgrund seiner Höhenlage besonders gefährdet ist, wird eine verbandsgebietsbezogene Analyse der Geländehöhen durchgeführt. Hierzu werden mithilfe der GIS-Software ArcGIS Höheninformationen aus dem vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen herausgegebenen Digitalen Geländemodell DGM 5 für Niedersachsen extrahiert und klassifiziert. Die Klassifizierung der Geländehöhen erfolgt in 25-cm-Schritten in Höhenschichten als Höhe über NHN. Diese Darstellung wird durch eine Summenkurve der Flächenanteile ergänzt, sodass der unterhalb eines Höhenniveaus liegende Flächenanteil bezogen auf die Gesamtfläche des Verbandsgebietes ermittelt werden kann.

Für Fragestellungen des Küstenschutzes wird zusätzlich eine Betrachtung der Lage der Höhenschichten in Bezug zum mittleren Tidehochwasser im Bereich des jeweiligen Deichverbandsgebietes vorgenommen. Hieraus kann u. a. ermittelt werden, welche Flächenanteile eines Verbandes unterhalb des mittleren Tidehochwassers gelegen sind und damit bereits im Falle von regulären Tideverhältnissen überflutungsgefährdet wären. Da aufgrund der teilweise erheblichen Ausdehnung der Verbandsgebiete die Höhe des MThw nicht konstant ist, werden für die Verbandsgebiete jeweils die minimalen und maximalen MThw-Werte bezogen auf die Jahresreihe 2006 bis 2010 angegeben.

Die Ergebnisse der Klassifizierung werden exemplarisch anhand der Deichverbände gezeigt, deren Höhenverteilung typische Verläufe zeigen. Im Verbandsgebiet der Deichacht Norden, die im nordwestlichen Ostfriesland gelegen ist, befinden sich große Flächenanteile in einem Wertebereich zwischen 0,75 m und 2,00 m oberhalb NHN (Abb. 3). Ein vergleichsweise großer Teil des Verbandsgebietes liegt damit innerhalb eines Schwankungsbereiches von nur 1,25 m. Die Spannweite des mittleren Tidehochwassers für die Jahresreihe 2006 bis 2010 beträgt zwischen NHN +1,27 m und NHN +1,37 m. Im Bereich des Verbandsgebietes liegen circa 43 % der Gesamtfläche unterhalb des minimalen MThw.

Die Höhenverteilung für den II. Oldenburgischen Deichband, der zwischen Jadebusen und Weser gelegen ist, ist in Abb. 4 dargestellt. Hier liegen überwiegende Flächenanteile zwischen 0,50 m unterhalb bis 2,00 m oberhalb NHN. Damit ist die Schwankungs-

breite der Hauptflächenanteile mit 2,50 m deutlich größer als im Bereich der Deichacht Norden. Der Wertebereich des MThw (Jahresreihe 2006 bis 2010) ist hier mit Werten zwischen NHN + 1,70 m und NHN + 2,22 m ebenfalls größer als der im Bereich der Deichacht Norden, weil die Küstenlinie im Verbandsgebiet deutlich länger ist und zudem die Weser einer stärkeren Gezeitendynamik unterliegt. Bezogen auf das minimale MThw im Verbandsgebiet liegen circa 82 % der Fläche, bezogen auf das maximale MThw circa 90 % der Fläche des II. Oldenburgischen Deichbands unterhalb des MThw.

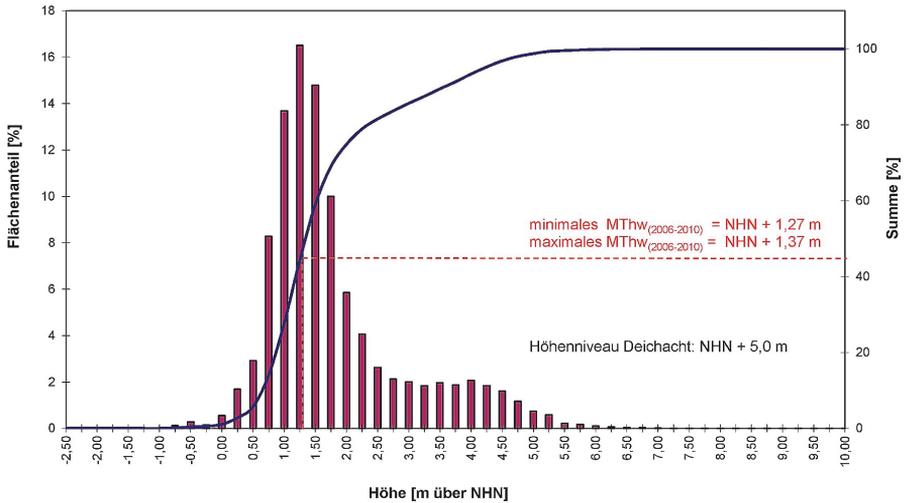


Abbildung 3: Klassifizierte Höhenverteilung der Geländehöhen im Verbandsgebiet der Deichacht Norden.

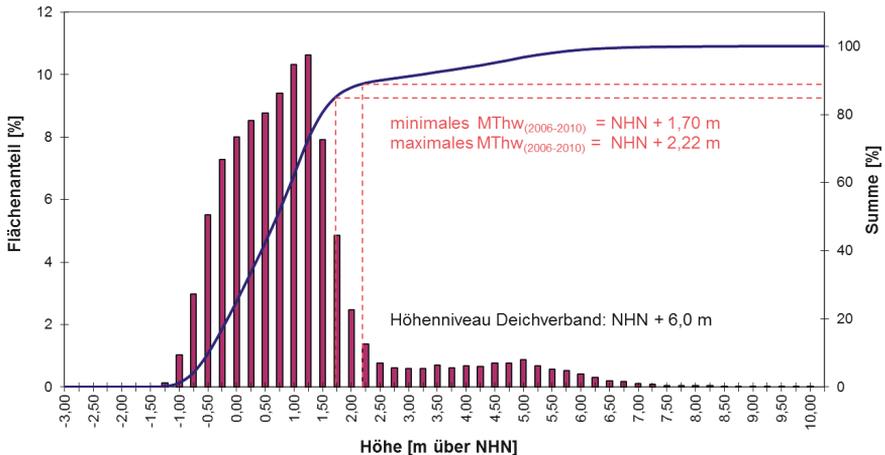


Abbildung 4: Klassifizierte Höhenverteilung der Geländehöhen im Verbandsgebiet des II. Oldenburgischen Deichbands.

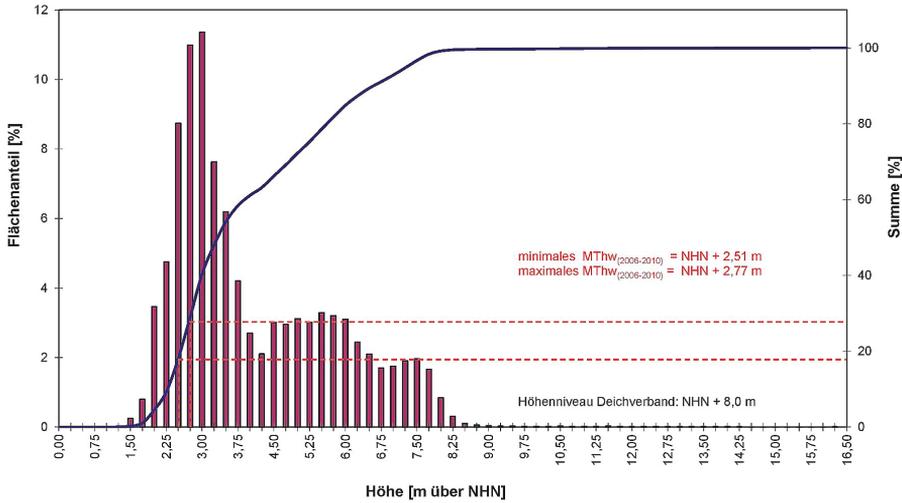


Abbildung 5: Klassifizierte Höhenverteilung der Geländeoberfläche des Artlenburger Deichverbands.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Verbandsgebieten ist für das Gebiet des Artlenburger Deichverbands an der Tideelbe oberhalb Hamburgs die Verteilung der Geländehöhen in Höhenstufen gleichmäßiger ausgeprägt (Abb. 5). Ein relativ großer Teil der Höhenstufen liegt in dem relativ schmalen Wertebereich zwischen NHN +2,75 m und NHN +3,50 m. Die darüberliegenden Höhenlagen sind relativ gleichmäßig über den Bereich von NHN +3,50 m bis über NHN +7,50 m verteilt. Minimales und maximales MThw weisen mit NHN +2,51 m und NHN +2,77 m wegen der beschränkten Größe des Verbandsgebietes an der Elbe vergleichsweise geringe Unterschiede auf. Im Artlenburger Deichverband liegen nur circa 18 % bzw. circa 29 % der Gesamtfläche unterhalb des minimalen bzw. maximalen MThw.

Aus dem Vergleich der Höhenverteilungen wird deutlich, dass große Unterschiede zwischen den deichgeschützten Gebieten der einzelnen Verbände bestehen. In Abb. 6 sind die relativen Höhenverteilungen und in Abb. 7 deren Summenlinien für alle Deichverbände in Niedersachsen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mehrere Gruppen mit jeweils ähnlichen Höhenverteilungen der betreffenden Deichverbände gebildet werden können.

Bei einem Großteil der Verbände liegen erhebliche Teile der Verbandsgebiete unterhalb des mittleren Tidehochwassers. Mit einem Anstieg des Meeresspiegels werden sich insbesondere in den Verbandsgebieten, in denen steile Summenlinien der Höhenverteilungen vorliegen, die unterhalb des MThw liegenden Flächenanteile deutlich vergrößern.

In Summe liegen in Niedersachsen derzeit circa 60 % der Gesamtfläche der Hauptdeichverbände unterhalb des im jeweiligen Verbandsgebiet vorhandenen minimalen MThw. Dieses unterstreicht die Gefährdungssituation und Erfordernis von Küstenschutzanlagen schon für reguläre Verhältnisse.

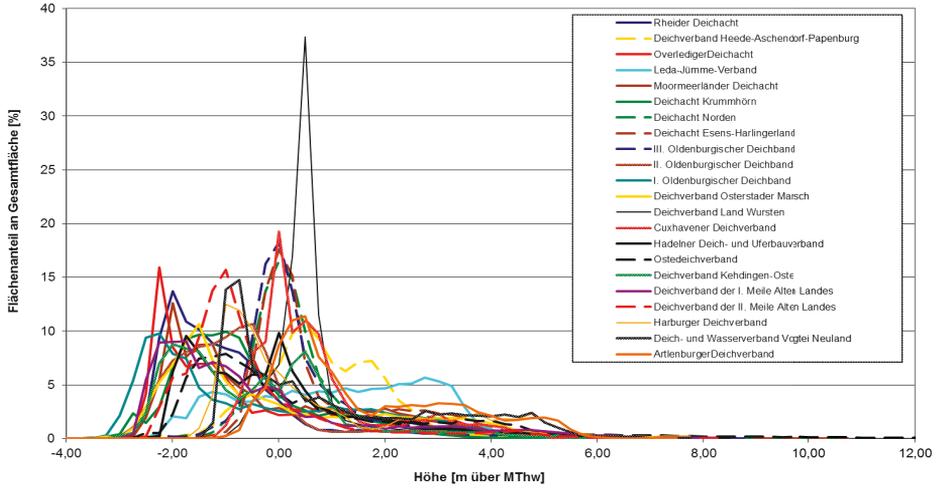


Abbildung 6: Höhenverteilungen in den 22 Hauptdeichverbänden in Niedersachsen.

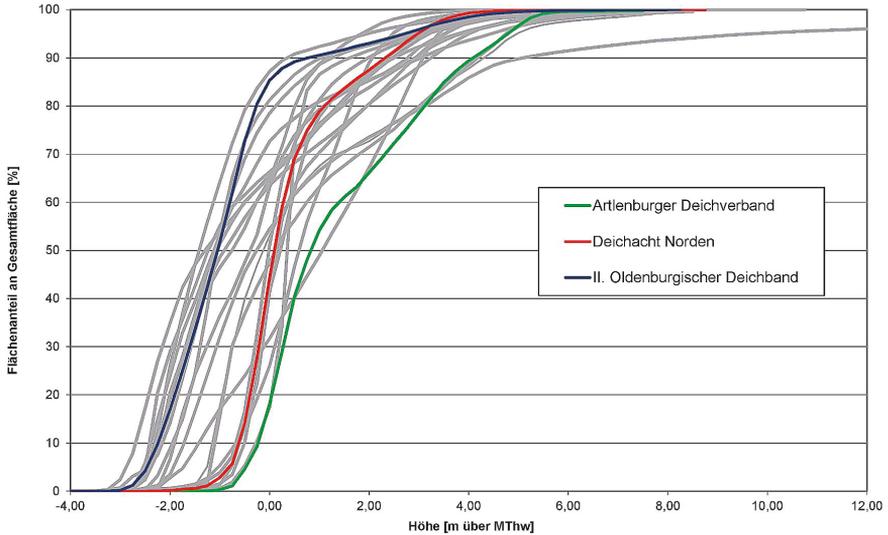


Abbildung 7: Summenlinien der Höhenverteilungen der Hauptdeichverbände in Niedersachsen.

3.4 Analyse vorhandener Küstenschutzsysteme

3.4.1 Anteile von Deichlinien und Vorländern

Mithilfe einer numerischen Überflutungsmodellierung soll die Wirkung unterschiedlicher Küstenschutzsysteme – gebildet aus Kombinationen von sturmflutkehrenden Deichen mit ergänzenden Schutzelementen wie Deichvorländern oder zweiten Deichlinien – auf die Überflutungsausbreitung untersucht werden. Dazu wird zunächst eine Einteilung der Küstenschutzsysteme an der Festlandsküste der Nordsee in Niedersachsen und Schleswig-

Holstein vorgenommen. Sperrwerke und andere konstruktive Bauwerke in der ersten Deichlinie sind nicht Gegenstand der Betrachtung.

Als Vorland wird im Rahmen dieser Untersuchungen der seeseitige Bereich vor dem Deich mit einer Geländehöhe über MThw berücksichtigt, der eine Mindestbreite von 50 m besitzt. Diese Breite wird auch deshalb gewählt, weil ein Vorland in Abhängigkeit von seiner Höhe im Falle eines Deichbruchs die in das Hinterland fließenden Wassermengen beeinflussen kann und ein durchgängiges, hydraulisch wirksames Vorland vorhanden sein muss.

Im Rahmen der Untersuchungen werden folgende Küstenschutzsysteme unterschieden:

- Variante 1a: Als Schardeich ausgeprägte 1. Deichlinie ohne weitere Schutzelemente
- Variante 1b: Als Schardeich ausgeprägte 1. Deichlinie in Kombination mit landwärts angeordneter 2. Deichlinie
- Variante 2a: Einzelne 1. Deichlinie ohne (ausgeprägte) Fußsicherung mit Vorland
- Variante 2b: 1. Deichlinie mit Vorland und 2. Deichlinie
- Variante 2c: 1. Deichlinie mit Vorland, 2. und 3. Deichlinie
- Variante 2d: 1. Deichlinie mit Vorland und Sommerdeich
- Variante 2e: Hauptdeich mit Vorland und Sommerdeich und 2. Deichlinie

Für die niedersächsische Nordseeküste sind die Anteile der einzelnen Küstenschutzvarianten an der gesamten Küstenlänge der niedersächsischen Festlandsküste inklusive der Tidebereiche von Ems, Weser und Elbe in Abb. 8 dargestellt.

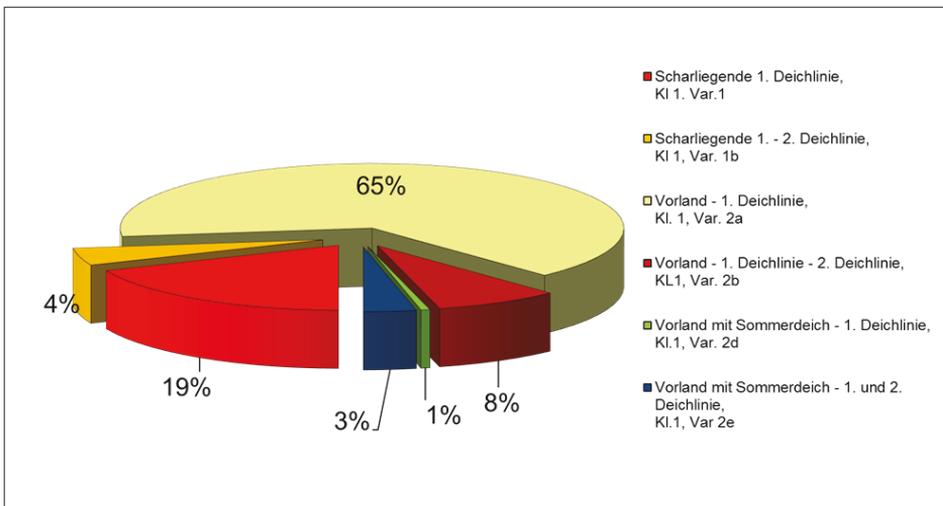


Abbildung 8: Anteile der klassifizierten Küstenschutzsysteme an der Festlandsküste Niedersachsens.

Mit 65 % wird mehr als die Hälfte der Festlandsküste Niedersachsens durch eine erste Deichlinie mit Vorland gegen Sturmfluten geschützt. Den zweitgrößten Anteil an den Küstenschutzsystemen bildet mit 19 % die scharliegende erste Deichlinie. 8 % der Küstenlinie wird durch eine Kombination aus Vorland, erster und zweiter Deichlinie geschützt. Alle anderen Varianten haben mit je unter 5 % nur einen deutlich geringen Anteil

am gesamten Küstenschutzsystem bzw. kommen nicht vor, wie z. B. die Variante 2c (Vorland – 1. Deichlinie – 2. Deichlinie – 3. Deichlinie). Hieraus wird die große Bedeutung der Deichvorländer mit einem Anteil von 77 % für das Küstenschutzsystem in Niedersachsen deutlich. Auf insgesamt 85 % der Deichlinie ist nur eine erste Deichlinie vorhanden.

Die Küstenschutzsysteme an der schleswig-holsteinischen Festlandsküste an der Nordsee sind in Abb. 9 dargestellt. Dabei erfolgte die Analyse für den Bereich der Landesschutzdeichlinie bis zur südlichen Landesgrenze zu Hamburg bei Haseldorf/Wedel.

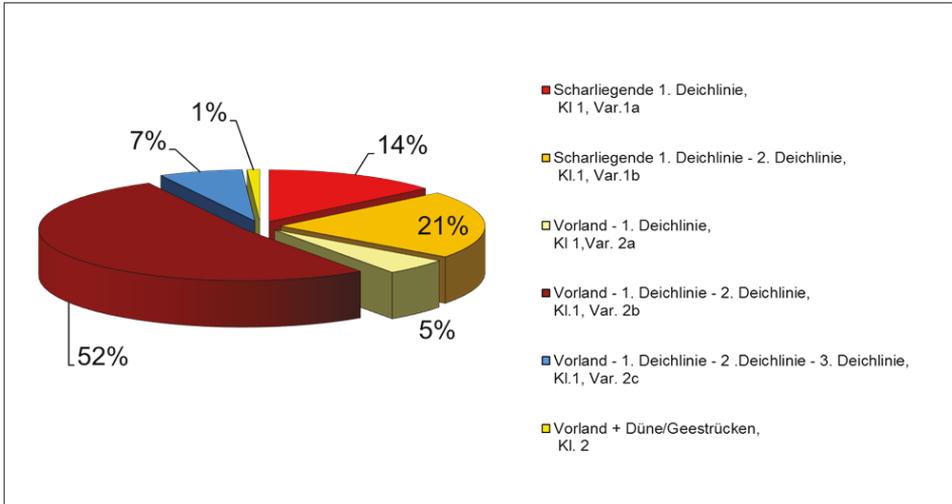


Abbildung 9: Klassifizierung der Küstenschutzsysteme an der Nordsee-Festlandsküste Schleswig-Holsteins.

Circa 52 % der Küstenlinie an der offenen Festlandküste, d. h. an den Küstenabschnitten mit Landesschutzdeichlinie bzw. Dünen, sind durch eine Kombination aus Vorland, erster Deichlinie und zweiter Deichlinie geschützt. Weitere 21 % des Küstenschutzsystems bestehen aus einer scharliegenden ersten und einer zweiten Deichlinie. Weitere circa 7 % sind mit einer zusätzlichen dritten Deichlinie ausgebildet. Die Varianten mit nur einer Deichlinie machen hingegen nur einen Anteil von insgesamt circa 19 % aus und befinden sich überwiegend im Bereich der Elbe.

Der Vergleich der Küstenschutzsysteme an der niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Nordseeküste zeigt wesentliche Unterschiede auf: In Schleswig-Holstein sind circa 80 % der betrachteten Strecken durch ein System mit mehr als einer Deichlinie geschützt. In Niedersachsen liegt der Anteil dieser Küstenschutzvarianten mit circa 15 % deutlich niedriger.

3.4.2 Kennwerte für Polder und Köge

Polder, die in Schleswig-Holstein als Köge bezeichnet werden, sind vollständig von Deichlinien umschlossene Bereiche. Im Fall des Versagens der ersten Deichlinie stellen sie abgegrenzte Fluträume dar. In Abhängigkeit von ihrer Speicherkapazität können diese

Polder die in das weitere Hinterland einströmende Wassermenge reduzieren oder bei entsprechendem Poldervolumen bzw. Höhe der binnenseitigen Deichlinie vollständig aufnehmen und somit eine ergänzende Schutzfunktion für das binnenseits der zweiten Deichlinie liegende Hinterland aufweisen. Demgegenüber können für das Poldergebiet selbst nachteilige Folgen entstehen, da die größeren Wassertiefen zu einer größeren Gefährdung von Schutzgütern im Polder führen können.

Für die Charakterisierung von Poldern bildet das absolute maximale Speichervolumen eines Polders eine wesentliche Größe. Dieses wird von der Fläche des Polders und der geringsten Höhe der den Polder abgrenzenden Deichlinien bestimmt. Um die Wirkung von Poldern mit unterschiedlicher Form und Lage hinter der ersten Deichlinie vergleichen zu können, wird ein spezifisches Speichervolumen $V_{\text{spezifisch}}$, bezogen auf die erste Deichlinie, definiert. Dieses ergibt sich als Quotient aus dem maximalen Speichervolumen V_{max} des jeweiligen Polders und der Länge der entsprechenden ersten Deichlinie L_D zu:

$$V_{\text{spezifisch}} = \frac{V}{L_{\text{Deichabschnitt 1. Deichlinie}}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}} \right] \quad (1)$$

In Abb. 10 sind die spezifischen Speichervolumina in Relation zu den absoluten Speichervolumina für die Polder des niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Küstenraums aufgetragen. Die Ermittlung der Polderkenngrößen für die Köge in Schleswig-Holstein wurde durch den LKN Schleswig-Holstein durchgeführt. Das geringste Speichervolumen aller untersuchten Polder in Niedersachsen beträgt circa 1 Mio. m^3 und das größte circa 28 Mio. m^3 . Die Bandbreite für die spezifischen Speichervolumina reicht von circa 500 m^3 bis circa 2.400 m^3 pro laufenden Meter erster Deichlinie, wobei insbesondere für kleinere Polder eine große Variationsbreite, bedingt durch die örtlich stark variierenden Geometrien, festzustellen ist.

Durch den großen Anteil an zweiten Deichlinien an der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste existiert hier eine deutlich höhere Anzahl von Kögen als Poldern in Niedersachsen. Das maximale Speichervolumen der Köge an der Schleswig-Holsteinischen Nordseeküste erreicht circa 176 Mio. m^3 bei einem zugehörigen spezifischen Speichervolumen von circa 23.000 m^3 pro laufenden Meter der ersten Deichlinie.

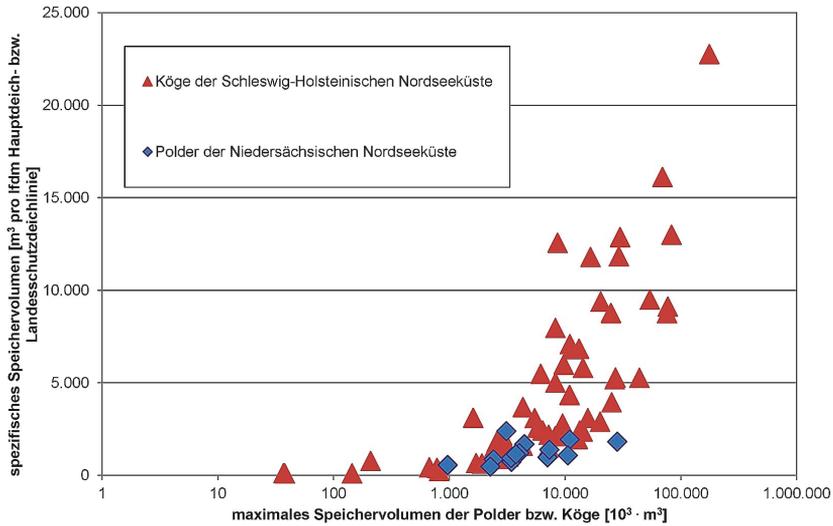


Abbildung 10: Vergleich der Kenngrößen für Polder in Niedersachsen und Köge in Schleswig-Holstein.

Insgesamt liegen die Kennwerte für die Köge in Schleswig-Holstein deutlich über den Werten der Polder an der niedersächsischen Nordseeküste und zeigen damit eine höhere Aufnahmekapazität für einströmendes Wasser im Fall eines Deichbruchs.

4 Konsequenzen des Versagens von Küstenschutzanlagen

4.1 Methodik

Die Konsequenzen eines Versagens des Küstenschutzsystems bestehen neben Schäden am Küstenschutzsystem selbst vor allem in der Überflutung sturmflutgeschützter Küstenniederungen und damit verursachter negativer Auswirkungen. Ziel war es, den Einfluss verschiedener Küstenschutzsysteme, der Topografie der überflutungsgefährdeten Gebiete sowie der meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen auf die Überflutungscharakteristik zu untersuchen. Hierzu wurden Deichbruchszenarien für typische Konstellationen von Küstenschutzsystemen und Topografien hydronumerisch simuliert.

Zunächst wurden vereinfachte synthetische Modellgebiete definiert, die sich aus den vorangehenden Analysen als typische Fälle ergeben haben. In einem zweiten Schritt wurden die Untersuchungen auf ein Küstengebiet im nordwestlichen Ostfriesland erweitert. Für die Simulation der Überflutungen wird die Simulationssoftware SOBEK 1D2D des niederländischen Instituts Deltares verwendet (Delft Hydraulics 2004, Vanderkimpfen et al. 2009).

4.2 Untersuchungen für synthetische Modellgebiete

Für die Untersuchung des Einflusses verschiedener Modellparameter wurde zunächst ein Basismodell mit einer Ausdehnung von 20 x 20 km erstellt, auf dem alle im Weiteren zu

untersuchenden Modellvarianten basieren. Die gewählte Gitterauflösung von 50 x 50 m basiert auf Ergebnissen von Voruntersuchungen, die zeigen, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen eine feinere Auflösung nur zu unwesentlich veränderten Berechnungsergebnissen führt.

Es wurde eine einheitliche Geländehöhe von NHN +0,0 m, einem für den Küstenraum typischen Höhenniveau im Binnenland, angesetzt. Für die Oberflächenrauigkeit des Geländes wird ein einheitlicher Rauheitsfaktor mit einem Stricklerbeiwert von $k_{st} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ verwendet (Thorenz et al. 2008).

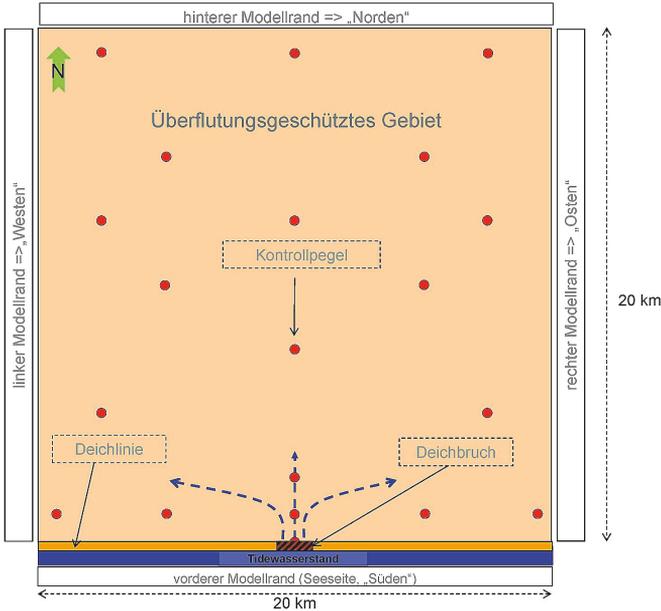


Abbildung 11: Grundmodell für die Überflutungssimulationen – schematische Darstellung.

Das Überflutungsgebiet ist über die gesamte Breite seeseitig durch eine Deichlinie mit der Höhe von NHN +8,0 m begrenzt (Abb. 11). In die Mitte der Deichlinie ist eine Bruchstelle implementiert. Der seeseitige Wasserstand wird in Form eines Tidewasserstandes über die Zeit als linienhafte Randbedingung am südlichen Modellrand eingesteuert.

Der simulierte Zeitraum beträgt 78 Stunden mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Minute. Als Randbedingung wird der Wasserstand am südlichen Modellrand als szenarienbasierte Sturmdeganglinie vorgegeben. Um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt SAFECOAST (Thorenz et al. 2008) zu ermöglichen, wird zunächst eine der für den Bereich der Deichacht Norden seinerzeit verwendeten Tideganglinien angesetzt (Abb. 12).

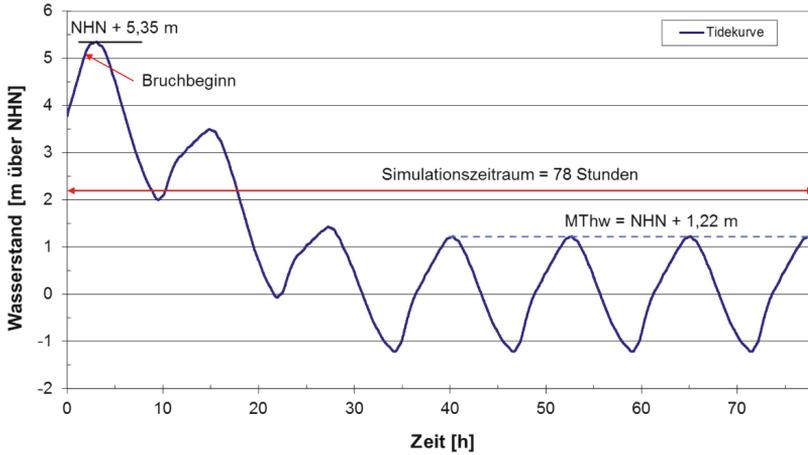


Abbildung 12: Eingesteuerte Tideganglinie für das Grundmodell.

Um in den Modellvarianten eine einheitliche Deichbruchentwicklung zu gewährleisten, wird für die Untersuchungen das in die Simulationssoftware implementierte Breschenbildungsmodell von van der Knaap (Delft Hydraulics 2004) verwendet. Die Gesamtbreite des Bruchs beträgt 150 m. Die Bruchentwicklung wird zeitlich mit 2 Stunden vorgegeben. Die Geländehöhe in der Bresche befindet sich dann auf dem Niveau des Hinterlandes. Über das gesamte potentielle Überflutungsgebiet sind virtuelle Kontrollpegel angeordnet, um Wasserstände bzw. Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten über die Dauer der Überflutungssimulation analysieren zu können.

4.2.1 Variation der Geländehöhe im deichgeschützten Gebiet

Um die Größe des Einflusses unterschiedlicher Geländehöhen zu untersuchen, wurde das Grundmodell mit einheitlichen Geländehöhen von NHN +0 m und NHN +1,22 m entsprechend dem Niveau des mittleren Tidehochwassers im Modellgebiet versehen. In Abb. 13 sind die simulierten Einstauvolumina für die Modelle mit einer Geländehöhe von NHN +1,22 m bzw. NHN +0,00 m dargestellt.

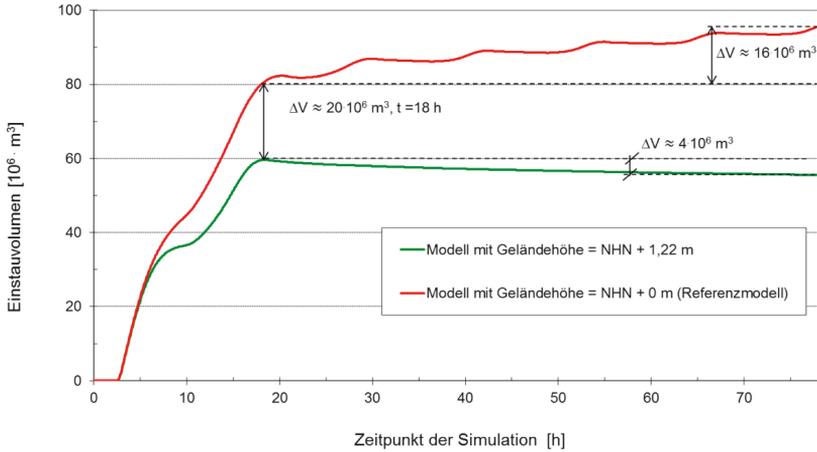


Abbildung 13: Einfluss der Geländehöhe des Überflutungsgebietes auf das Einstauvolumen.

Innerhalb der ersten circa 16 Stunden nach dem Bruchbeginn (18 h nach Simulationsbeginn) ist ein erheblicher Anstieg des einströmenden Wassers für beide Modellvarianten bedingt durch die beiden ersten erhöhten Tiden zu erkennen. Nach Ende dieser Phase liegt das simulierte Einstauvolumen für das Modell mit einer Geländehöhe von NHN +1,22 m bereits um circa 20 Millionen m³ niedriger als bei dem Referenzmodell mit einer Geländehöhe NHN +0 m. Die nachlaufenden regulären Tiden bewirken bei dem Modell mit einer Geländehöhe mit NHN +0 m eine deutliche Erhöhung des Einstauvolumens unter der Maßgabe, dass die Bruchstelle nicht geschlossen werden kann. Bei dem Modell mit einer Geländehöhe von NHN +1,22 m reduziert sich hingegen das simulierte eingestaute Volumen durch Ausströmen von Wasser durch die Bruchstelle. Am Ende des Simulationszeitraums ist bei dem Modell mit einer Geländehöhe von NHN +0 m mit circa 96 Millionen m³ erheblich mehr Wasser in dem Modell gespeichert als bei dem Modell mit einer Geländehöhe von NHN +1,22 m mit circa 56 Millionen m³. Die durchschnittlichen maximalen Überflutungstiefen für das Betrachtungsgebiet betragen 0,27 m bzw. 0,35 m bei Geländehöhen von NHN +1,22 m bzw. NHN +0 m.

4.2.2 Auswirkung von Deichvorland

Die Geländehöhe und die Ausdehnung von Deichvorländern vor einem Deich können unterschiedlich ausgeprägt sein. Für die Analyse der Wirkung von Vorland auf die Überflutung des Modellgebietes werden in dem Überflutungsmodell Vorlandbreiten von 50 m bis 200 m mit Höhen von NHN +1,75 m (entsprechend circa 0,5 m über dem angesetzten MThw) bis über NHN +2,25 m untersucht (Tab. 1).

Die simulierten Einstauvolumina weisen über die Simulationsdauer eine Spannweite von 58 Mio. m³ für eine Vorlandbreite von 50 m und eine Vorlandhöhe von NHN +1,75 m bis hin zu 31 Mio. m³ bei 200 m Breite und einer Vorlandhöhe von 2,25 m NHN auf (Abb. 14). Damit reduziert das Deichvorland die simulierten Einstauvolumina auf 60 % bzw. 32 % des Ausgangswertes. Das Untersuchungsgebiet wird für alle betrachteten Fälle vollständig oder nahezu vollständig geflutet.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse für die Modellvarianten mit Vorland.

Variante	Vorlandhöhe [m ü. NHN]	Vorlandbreite [m]	Simuliertes Einstauvolumen nach 78 h [10^6 m^3]	Durchschn. max. Überflutungstiefe [m]
ohne Vorland	---	---	96	0,36
Vorland	2,25	50	44	0,24
		100	35	0,21
		150	32	0,20
		200	31	0,20
Vorland	2,00	50	51	0,25
		100	42	0,23
		200	38	0,22
Vorland	1,75	50	58	0,27
		100	49	0,25
		200	45	0,24

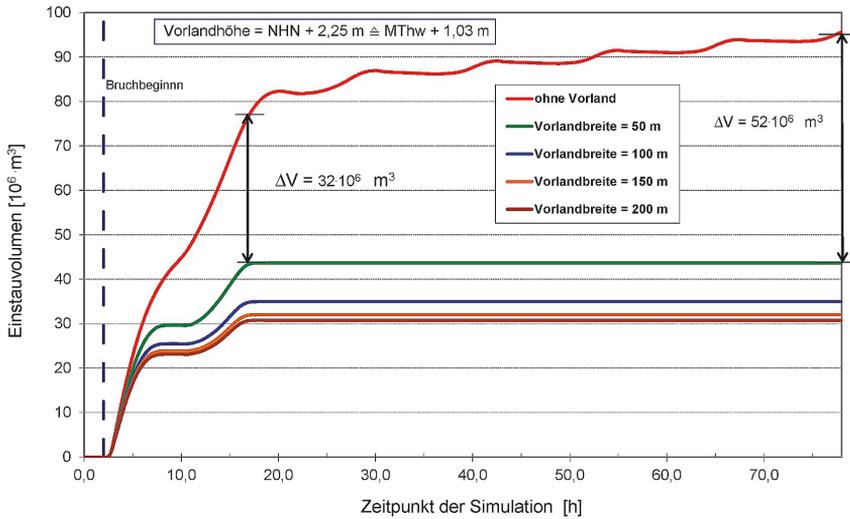


Abbildung 14: Einstauvolumina für Modellvarianten mit unterschiedlichen Vorlandbreiten und eine Vorlandhöhe von NHN +2,25 m.

Nach den beiden ersten erhöhten Tiden sind bereits erhebliche Differenzen der Einstauvolumina der Vorlandvarianten im Vergleich zum Referenzfall zu erkennen. Das Vorland verhindert im weiteren Verlauf, d. h. während der nachfolgenden Normaltiden, den Zufluss von Wasser in das geschützte Gebiet.

Die Wirkung des Vorlandes nimmt mit zunehmender Breite zu, wobei die zusätzliche Reduktion abnimmt. Eine Verbreiterung des Vorlandes von 50 m auf 200 m bewirkt in Abhängigkeit von dessen Höhenlage eine Verringerung des Einstauvolumens zwischen 22 % und 30 %. Die Erhöhung des Vorlandes um 50 cm von 1,75 m über NHN auf 2,25 m über NHN reduziert in Abhängigkeit von der Breite das Einstauvolumen um 24 % bis 31 % (Tab. 1).

Die Ergebnisse der Überflutungssimulation zeigen zusammenfassend eine deutlich reduzierende Wirkung der Vorländer auf das Einstauvolumen und die durchschnittliche maximale Überflutungstiefe. Hierbei wird jeweils die Stabilität des Vorlandes vorausgesetzt.

4.2.3 Einfluss von Sommerdeichen

Auf Teilstrecken der Küstenlinie sind neben einem Deichvorland zusätzlich Sommerdeiche vorhanden. Diese wurden ursprünglich errichtet, um im Sommer erhöhte Tidewasserstände von landwirtschaftlichen Nutzflächen im Deichvorland fernzuhalten. Sie weisen oft Geländehöhen von bis zu zwei Metern über dem MThw auf und werden im Fall von schweren Sturmfluten in der Regel überflutet.

Für die Untersuchungen wurden die Kronenhöhen für den Sommerdeich von $\text{NHN} + 2,75 \text{ m}$ und $\text{NHN} + 3,25 \text{ m}$ sowie Vorlandhöhen von $\text{NHN} + 1,75 \text{ m}$, $\text{NHN} + 2,00 \text{ m}$ und $\text{NHN} + 2,25 \text{ m}$ jeweils für eine Vorlandbreite von 200 m betrachtet (Abb. 15).

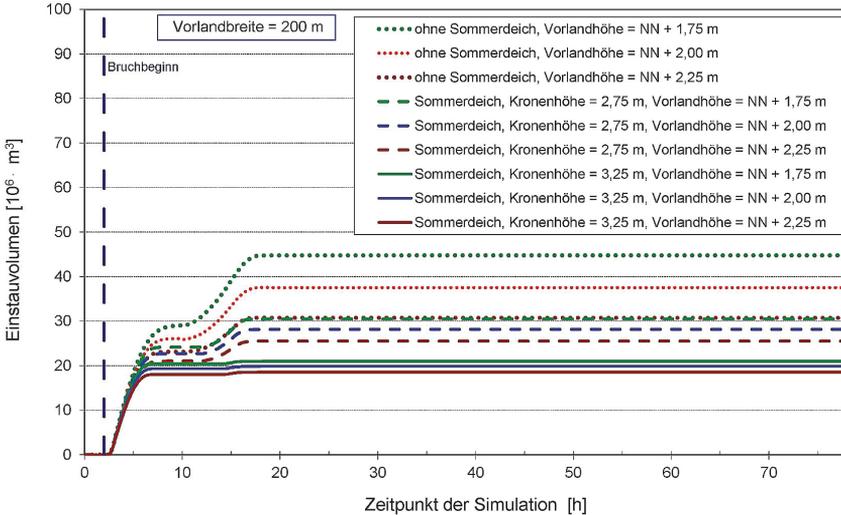


Abbildung 15: Einstauvolumina für Modellvarianten mit Vorland und mit Sommerdeichen.

Durch eine zunehmende Kronenhöhe des Sommerdeiches werden die Einstauvolumina reduziert. Bei einer Vorlandhöhe von $\text{NHN} + 1,75 \text{ m}$ und einem Sommerdeich mit einer Kronenhöhe von $\text{NHN} + 2,75 \text{ m}$ reduziert sich das Einstauvolumen am Ende der Simulation im Vergleich zu einem reinen Vorland von circa 45 Mio. m^3 auf circa $30,5 \text{ Mio. m}^3$. Eine Erhöhung des Sommerdeichs um $0,50 \text{ m}$ auf $\text{NHN} + 3,25 \text{ m}$ bewirkt eine weitere Reduktion des Einstauvolumens von circa 21 Mio. m^3 .

Mit zunehmender Höhe des Vorlandes ist eine weitere Reduzierung des in das Hinterland einströmenden Wasservolumens verbunden. Für einen Sommerdeich mit einer Kronenhöhe von $\text{NHN} + 3,25 \text{ m}$ und einer Erhöhung des Vorlandes um $0,50 \text{ m}$ auf $\text{NHN} + 2,25 \text{ m}$ ergibt sich eine weitere Verringerung des Einstauvolumens von circa

21 Mio. m³ auf circa 18,5 Mio. m³. Es wird deutlich, dass der Effekt der Vorlanderhöhung deutlich geringer ist als der größerer Kronenhöhen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bereits ein relativ niedriger Sommerdeich, der vor dem versagenden Hauptdeichabschnitt liegt, die in das Hinterland einströmenden Wassermengen im Vergleich zu den Vorlandvarianten ohne Sommerdeich erheblich reduzieren kann.

4.2.4 Einfluss von zweiten Deichlinien

Entlang der niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Nordseeküste existieren auf größeren Strecken hinter der ersten Deichlinie zweite Deichlinien. Die erste und zweite Deichlinie bilden in Kombination Polder bzw. Köge.

Aufgrund der in Abschnitt 3.4.2 durchgeführten Analyse werden typische Größenordnungen spezifischer Speichervolumina von 500 m³/m bis 10.000 m³/m bezogen auf die erste Deichlinie ausgewählt, um deren Auswirkungen für den Fall eines Deichbruchs auf einen einheitlich definierten Deichabschnitt zu untersuchen. Weiterhin wird die Höhe der zweiten Deichlinie in Bezug auf den Scheitelwasserstand der eingesteuerten Tidekurve variiert und Höhen in 50-cm-Schritten ab dem Scheitelwasserstand von NHN +5,35 m, NHN +4,85 m, NHN +4,35 m sowie NHN +3,85 m gewählt. Es wird vorausgesetzt, dass kein Bruch der zweiten Deichlinie stattfindet.

In Abb. 16 sind die Einstauvolumina für alle Kombinationen aus Speichervolumen, Kronenhöhen der zweiten Deichlinie des Überflutungsgebietes und des Polders zusammengefasst. Im Vergleich zum Referenzmodell ohne Polder wird bereits bei dem Modell mit einer Höhe der zweiten Deichlinie von NHN +3,85 m und einem spezifischen Speichervolumen von 500 m³/lfd. m Hauptdeichlinie und Geländehöhen im Polder von NHN +0 m eine Reduktion des simulierten Einstauvolumens auf circa 17 % (16,2 Mio. m³) erreicht. Ab einem spezifischen Speichervolumen von 5.000 m³ pro laufenden Meter Hauptdeichlinie findet nur noch für Höhen der zweiten Deichlinie von NHN +3,85 m (Restmenge circa 6,8 % bzw. 6,5 Mio. m³) und NHN +4,35 m (Restmenge circa 1,6 % bzw. 1,5 Mio. m³) eine Überflutung des Geländes hinter der zweiten Deichlinie statt. Bei einem spezifischen Speichervolumen von 10.000 m³ pro laufenden Meter Hauptdeichlinie gelangt auch bei den Varianten mit den beiden niedrigsten Höhen der zweiten Deichlinie kein Wasser mehr in das Hinterland.

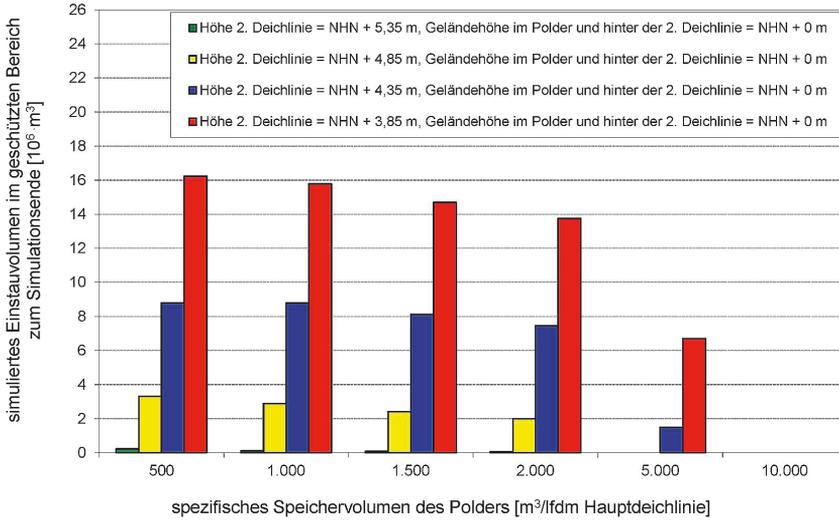


Abbildung 16: Einstauvolumina zum Ende der Simulation im Überflutungsgebiet für Variationen der Speichervolumina und Kronenhöhen der zweiten Deichlinie für Geländehöhen von NHN +0 m.

Zusammenfassend zeigt die Analyse der Ergebnisse dieser Variantenbetrachtungen, dass die Höhe der zweiten Deichlinie einen wesentlichen Einfluss auf das Einstauvolumen im hinter der zweiten Deichlinie liegenden Modellgebiet hat. Für Polder mit in Niedersachsen überwiegend auftretenden Größen bis 2.000 m³/m besitzt die Höhe der zweiten Deichlinie einen erheblich größeren Einfluss auf die Flutung des binnenliegenden Bereichs als das spezifische Speichervolumen.

4.2.5 Einfluss von Gewässersystemen

Zur Entwässerung der deichgeschützten Gebiete entlang der Nordseeküste dienen oft künstliche Gewässersysteme. Diese können allerdings im Fall eines Versagens des Küstenschutzsystems die Ausbreitung des Wassers in das Hinterland beeinflussen und begünstigen (Burg et al. 2008, Thorenz et al. 2008).

Für eine weitergehende Untersuchung des Einflusses werden Gewässersysteme mit unterschiedlicher Anzahl der Gewässerelemente und räumlicher Verteilung implementiert. Weiterhin werden teilvolle und bordvolle Vorfüllung unterschieden.

Eine Übersicht der untersuchten Modellvarianten einschließlich virtueller Kontrollpegelstandorte ist in Abb. 17 dargestellt.

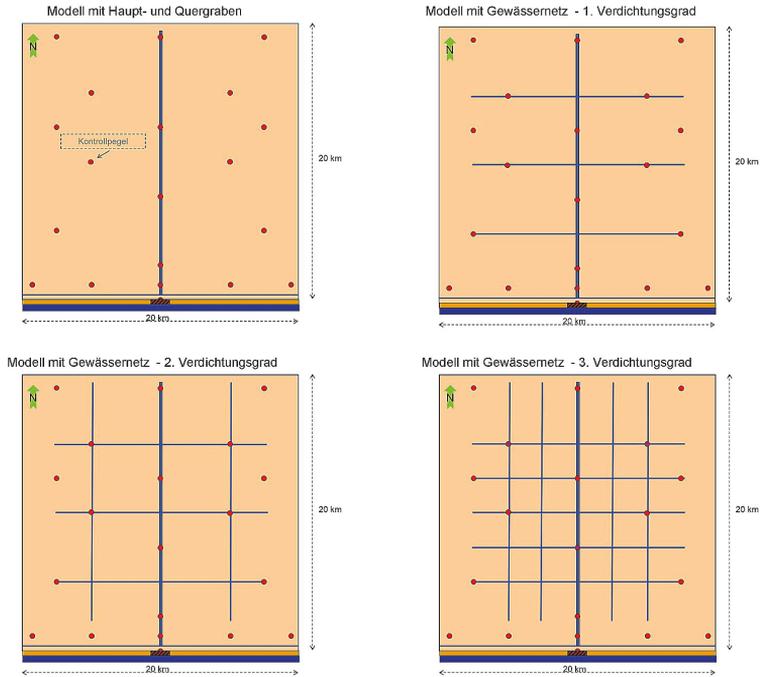


Abbildung 17: Modellvarianten mit Gewässersystemen.

Als Modellvariante 1 wird ein Gewässersystem, bestehend aus einem Hauptgraben und einem Deichfußgraben, gewählt. Der Hauptgraben besitzt ein Rechteckprofil mit 20 m Breite und 3 m Tiefe. Der Deichfußgraben weist ein trapezförmiges Profil auf und ist 2 m tief. Die Breite des Gewässers beträgt 2,0 m.

Als weitere Varianten werden Gewässersysteme mit unterschiedlicher räumlicher Verdichtung untersucht. Zusätzlich zu dem Hauptgraben und dem Deichfußgraben aus Modellvariante 1 werden weitere Gewässerelemente bzw. Gewässerabschnitte, die orthogonal und parallel zum Hauptgraben verlaufen, hinzugefügt und deren Abstand und Anzahl variiert.

Die simulierten Einstauvolumina liegen für alle untersuchten Gewässervarianten wie bei dem Referenzmodell mit einer Geländehöhe von NHN +1,22 m bei circa 56 Millionen m³, da der Überflutungsraum voll ausgefüllt wird. Die durchschnittlichen maximalen Überflutungstiefen für die Varianten mit Gewässersystemen ergeben Werte von 0,26 m bis 0,27 m.

Unterschiede ergeben sich in der lokalen Wasserstandsentwicklung in Teilbereichen des Modellgebietes. Der nördliche Bereich des Modellgebietes wird bei allen Modellen mit Gewässernetz, insbesondere in der Nähe der Gewässersysteme, erheblich schneller überflutet als bei dem Referenzmodell, wie in Abb. 18 für Kontrollpegel 18 exemplarisch dargestellt.

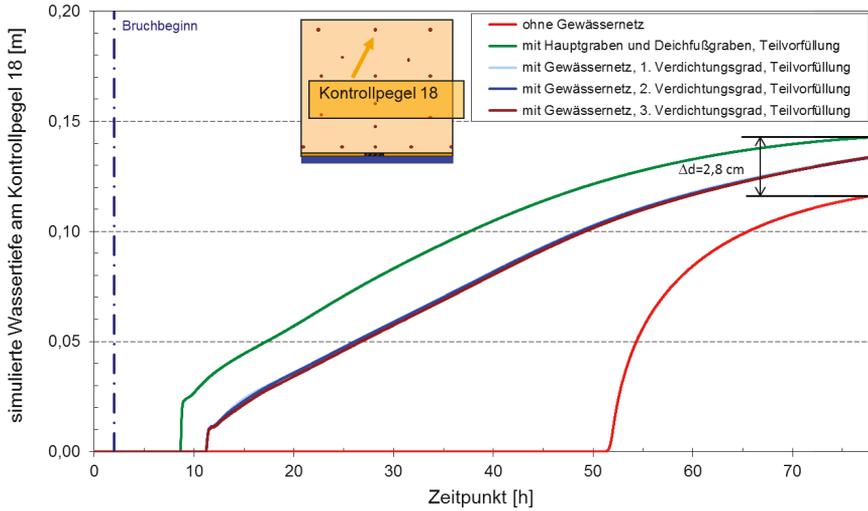


Abbildung 18: Simulierte Wassertiefe am Kontrollpegel 18 für Modelle mit und ohne Gewässersysteme/n bei Teilvorfüllung.

Der Kontrollpegel 18 wird beim Modell ohne Gewässer circa 50 Stunden nach Bruchbeginn von der Überflutung erreicht. Beim Modell mit Hauptgraben und Deichfußgraben ist dieses bereits 6 Stunden nach Bruchbeginn der Fall. Bei den Modellen mit Gewässernetz mit den Verdichtungsgraden 1 bis 3 wird der Bereich in der Nähe des Kontrollpegels circa 10 Stunden nach Bruchbeginn vom Wasser erreicht.

Bei bordvoller Vorfüllung der Gewässer wird dieser Effekt noch deutlicher, weil bei nahezu bordvoller Füllung das Speichervolumen des Gewässersystems erheblich reduziert ist (Abb. 19).

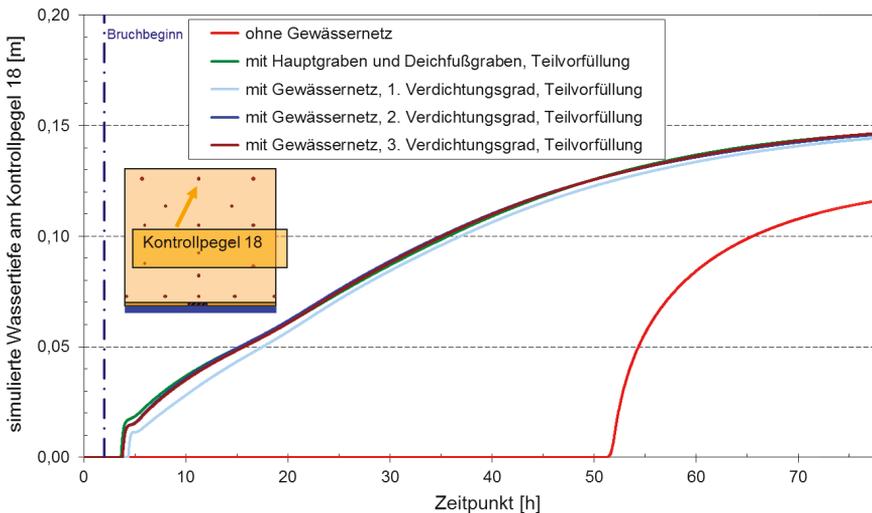


Abbildung 19: Simulierte Wassertiefe am Kontrollpegel 18 für Modelle mit und ohne Gewässer, bordvolle Vorfüllung.

Mit zunehmender Entfernung vom Hauptvorfluter reduziert sich der Einfluss des Gewässernetzes wie exemplarisch für Kontrollpegel 16 dargestellt (Abb. 20).

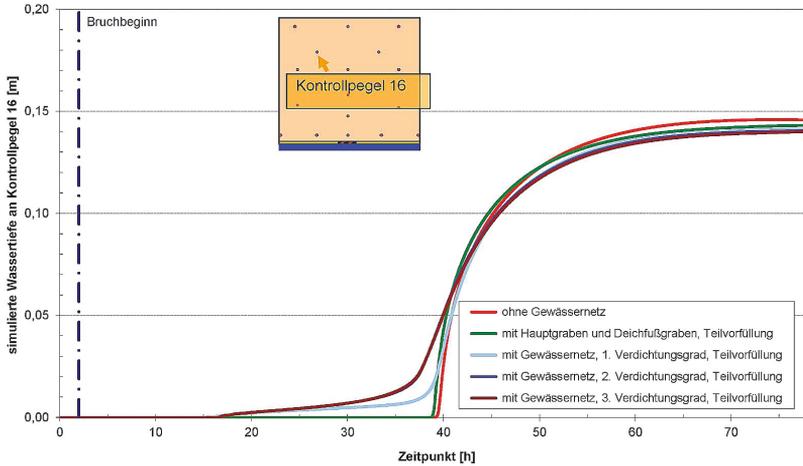


Abbildung 20: Simulierte Wassertiefe am Kontrollpegel 16 für Modelle mit und ohne Gewässer, Teilverfüllung.

In dem Bereich der Modellränder ist der Einfluss z. B. am Kontrollpegel 20 des Gewässersystems nur noch sehr gering (Abb. 21). Gleiches gilt für den Nahbereich der Deichbruchstelle.

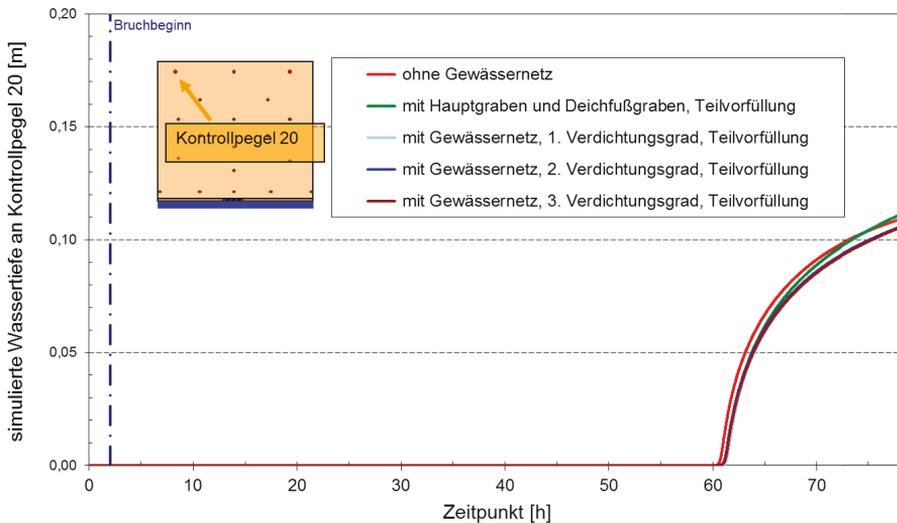


Abbildung 21: Simulierte Wassertiefe am Kontrollpegel 20 für Modelle mit und ohne Gewässer, Teilverfüllung.

4.2.6 Einfluss von Wind

Um potentielle Auswirkungen von Windeinfluss auf die Ausbreitung des in das geschützte Gebiet einfließenden Wassers zu untersuchen, wurde exemplarisch eine erste Deichlinie mit einer Vorlandbreite von 200 m, einer Vorlandhöhe von NHN + 2,25 m und ein konstanter, orthogonal zur Deichlinie wehender Wind mit Windgeschwindigkeiten von 10 m/s, 15 m/s und 20 m/s angesetzt. Die Windwirkdauer beträgt beginnend mit Simulationsbeginn insgesamt 10 Stunden.

Tabelle 2: Ergebnisse der Simulationen der Modelle mit Windansatz im Vergleich mit dem Referenzmodell.

Windgeschwindigkeit [m/s]	Höhe Vorland [m NHN]	Breite Vorland [m]	Simuliertes Einstauvolumen nach 78 h [10 ⁶ m ³]	Maximal überflutete Fläche [km ²]	Durchschn. max. Überflutungstiefe [m]
ohne Wind	2,25	200	30,7	297	0,20
10			30,8	301	0,20
15			30,9	305	0,20
20			31,0	315	0,20

Für Windgeschwindigkeiten von 10 m/s bzw. 15 m/s ergeben sich für die Einstauvolumina und die maximal überflutete Fläche Abweichungen, die im Bereich von maximal circa 1 % liegen (Tab. 2). Bei der Analyse der Überflutungsfläche ergibt sich für das Modell mit Windeinfluss eine maximale Erhöhung von circa 6 %. Deshalb wird zusätzlich die Verteilung der Überflutungstiefen unter Windeinfluss betrachtet (Abb. 22).

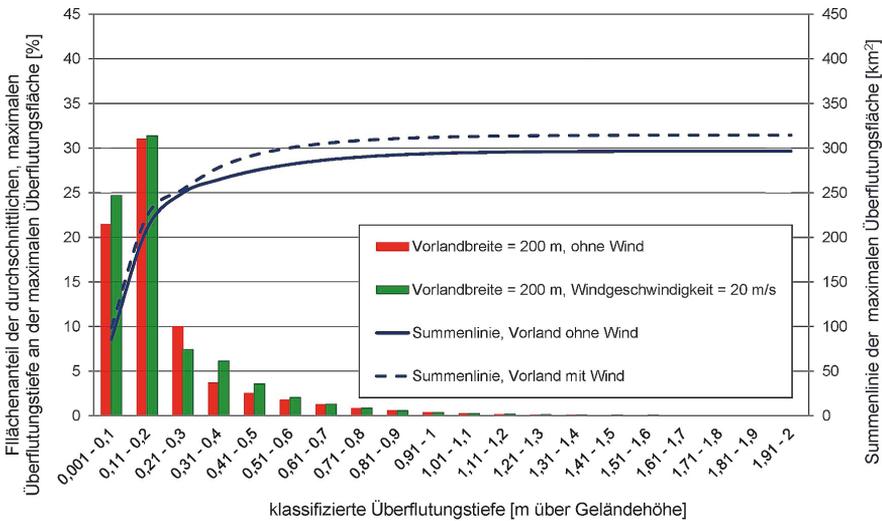


Abbildung 22: Klassifizierte Überflutungstiefen für die Modelle mit und ohne Windeinfluss.

Für die Modellvariante mit Windeinfluss im Bereich von 0,1 m bis 0,6 m sind – die Klasse der Überflutungstiefen von 0,20 m bis 0,30 m ausgenommen – die Überflutungstiefen geringfügig größer als beim Modell ohne Wind. Die durchschnittlichen maximalen Überflutungstiefen für beide Varianten sind hingegen mit 0,20 m nahezu gleich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit zunehmender Windstärke nur eine geringfügige Zunahme der maximalen Überflutungsfläche und der Einstauvolumina für das untersuchte Modellgebiet einhergeht. Gegenüber den in den vorangehenden Kapiteln untersuchten Einflussgrößen ist der Wind eher von untergeordneter Bedeutung.

4.2.7 Variation der Sturmflutszenarien

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Untersuchungen zur Erfassung der Wirkung ausgewählter Parameter auf die Überflutung von deichgeschützten Gebieten basieren auf einem einheitlichen Sturmflutszenario, welches bereits im Projekt SAFE-COAST verwendet worden ist (Burg et al. 2008). Um die Sensitivität gegenüber anderen Sturmflutszenarien zu untersuchen, wird dieses Szenario für ausgewählte Konstellationen des Küstenschutzsystems im Hinblick auf die Sturmflutscheitelhöhe und den Bruchzeitpunkt variiert, da diese Parameter wesentlichen Einfluss auf die Überflutungsausbreitung im Versagensfall haben können (siehe z. B. Kortenhaus 2003, Thorenz et al. 2008). Der Sturmflutscheitel wird um 25 cm auf NHN +5,60 m erhöht. Dieser Wert ergibt sich ungefähr durch die Ermittlung des Bemessungswasserstands für den Bereich des Pilotgebietes Norden unter Berücksichtigung eines Vorsorgemaßes von 50 cm für den säkularen Meeresspiegelanstieg und zukünftiger Auswirkungen des Klimawandels.

Der Verlauf der Windstaukurve wird auf Grundlage des Windstauverlaufes von Gönnert (2003) angepasst. Zusätzlich wird unter Ansatz des Sturmflutscheitelwertes von NHN +5,35 m der Beginn des Bruchs um eine Stunde bzw. zwei Stunden später angesetzt. Die Dauer und die räumliche Entwicklung der Bruchentwicklung bleiben unverändert.

Für eine scharliegende erste Deichlinie erhöht sich das Einstauvolumen bei Ansatz eines um 25 cm höheren Wasserstandes um circa 14 %. Bei um eine Stunde später einsetzendem Bruchbeginn reduziert sich das Volumen hingegen um 6 % und bei zwei Stunden um 20 % gegenüber dem Ausgangswert von 96 Mio. m³.

Für ein Vorland mit einer Höhe von 2,25 m über NHN und einer Breite von 50 m steigt das Einstauvolumen um 11 % bzw. reduziert sich um 20 % im Vergleich zu ursprünglich 44 Mio. m³.

Für das Modell mit einer zweiten Deichlinie in Höhe von NHN +3,85 m und einem spezifischen Speichervolumen von 500 m³/lfd. m erster Deichlinie beträgt die Erhöhung 6 % bzw. die Reduzierung 25 % bei einem Ausgangswert von 17 Mio. m³.

4.3 Zusammenfassende Betrachtung zum Einfluss der untersuchten Parameter

Die Überflutungssimulationen wurden szenarienbasiert für vereinfachte synthetische Modellgebiete durchgeführt, um die Wirkung veränderter Eingangsparameter und Randbedingungen auf das Überflutungsergebnis im Fall des Versagens des Küstenschutzsystems systematisch untersuchen zu können.

Generell kann festgestellt werden, dass das Vorhandensein ergänzender Elemente in einem Küstenschutzsystem zur ersten Deichlinie im Fall eines Deichbruchs einen großen Einfluss auf die Überflutungstiefen und maximalen Überflutungsflächen im geschützten Gebiet haben kann.

Das an der Nordseeküste auf großen Strecken der ersten Deichlinien vorhandene Deichvorland einschließlich Sommerdeichen besitzt hier bereits ab einer Geländehöhe von circa 50 cm über dem mittleren Tidehochwasser einen erheblichen Einfluss. Dieser nimmt mit zunehmender Höhe der Elemente zu und reduziert Überflutungstiefen sowie maximal überflutete Flächen im geschützten Gebiet deutlich. Diese Schutzwirkung unterstreicht neben der schützenden Wirkung des Hauptdeiches selbst die Bedeutung funktional intakter Deichvorländer für den Küstenschutz.

Zweite Deichlinien, die auf großen Strecken in Schleswig-Holstein und in Teilen in Niedersachsen vorhanden sind, schränken die Überflutung des Hinterlandes auch bei Kronenhöhen deutlich unterhalb des Bemessungswasserstandes und kleinen Poldervolumina erheblich ein und führen bei großen spezifischen Speicherkapazitäten zur Verhinderung einer weitergehenden Überflutung.

Einen weiteren wichtigen Faktor stellt die Topografie des Hinterlandes dar. Bei einer Geländehöhe im geschützten Gebiet über dem MThw sinken die maximalen Überflutungsflächen sowie die Überflutungstiefen deutlich, weil die nach Ende des Windstauinflusses folgenden regulären Tiden nicht mehr durch eine noch offene Deichbruchstelle in das Hinterland einströmen können. Ein ausgeprägtes Gewässernetz hingegen kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Überflutung in das weiter im Hinterland liegende Gebiet in Abhängigkeit von dessen Lage und hydraulischer Leistungsfähigkeit erhöhen. Dieses kann im Hinblick auf die Vorwarnzeit im Falle einer Überflutung von erheblicher Bedeutung sein. Zusätzlich ist eine geringe Zunahme der maximal überfluteten Fläche festzustellen.

Unterschiedliche meteorologische und hydrologische Randbedingungen wurden mithilfe einer Variation der Windfelder über dem Untersuchungsgebiet sowie der Tidekurven und Bruchzeitpunkte untersucht. Der Einfluss eines konstanten Windfeldes mit Windgeschwindigkeiten bis zu 20 m/s und einer Dauer von 10 Stunden auf die Überflutungsausbreitung ist gering. Hingegen führt ein um 25 cm höherer Sturmflutwasserstand zu einem deutlichen Anstieg der maßgebenden Überflutungsparameter, d. h. der maximal überfluteten Fläche sowie der durchschnittlichen maximalen Überflutungstiefe. Der Beginn des Deichbruchs wurde für alle Modellvarianten eine Stunde vor Eintritt des Sturmflutwasserstands angesetzt. Bei einem mit Eintritt des Scheitelwasserstands zeitgleich beginnendem Bruch ist eine Reduzierung der maßgebenden Überflutungsparameter festzustellen. Beginnt der Bruch eine Stunde nach Eintritt des Scheitelwasserstands, werden die Werte für die maximal überfluteten Flächen und die Überflutungstiefen weiter vermindert.

4.4 Untersuchungen für das Projektgebiet nordwestliches Ostfriesland

Neben den Untersuchungen der synthetischen Modellgebiete soll ein Vergleich mit Simulationen in einem realen Küstengebiet erfolgen, welches möglichst viele Charakteristika des Küstenraums wie verschiedene Küstenschutzsysteme und typische Höhenverhältnisse aufweist. Im Bereich der Deichacht Norden im nordwestlichen Ostfriesland sind diese Rahmenbedingungen gegeben (Abb. 24). Zudem sind für die Modellierung topografische Begrenzungen durch Geländeformen oder Bauwerke vorhanden, die eine plausible Abgrenzung des Modellgebietes ermöglichen.

Eine wesentliche Basis für die Untersuchungen bildet das Vorhandensein von für die Anwendung der Methoden notwendigen Datengrundlagen. Dies sind unter anderem die Höheninformationen als DGM sowie das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS).

Das Projektgebiet Norden liegt im nordwestlichen Teil der Region Ostfriesland und umfasst eine Fläche von circa 55.000 Hektar. Die Lage des Untersuchungsgebietes und die Höhenstufen aus dem digitalen Geländemodell DGM 5 sind in Abb. 23 dargestellt.

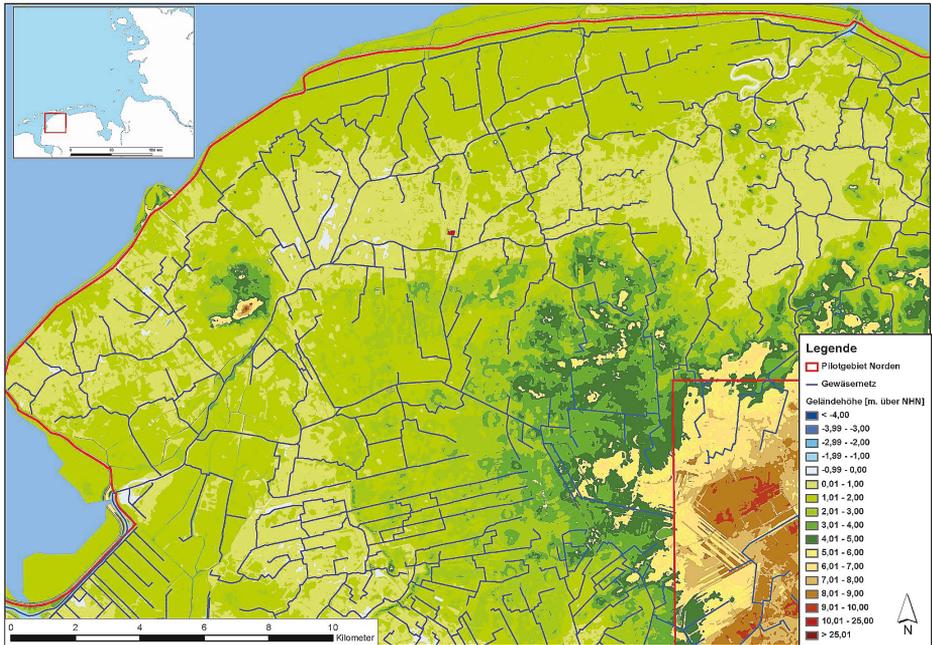


Abbildung 23: Lage des Untersuchungsgebietes nordwestliches Ostfriesland mit Geländehöhen und Gewässernetz 2. Ordnung.

Die maximale Ost-West-Ausdehnung des Gebietes beträgt circa 37 km und die maximale Nord-Süd-Ausdehnung circa 23 km. Die nördliche und westliche Grenze des Pilotgebietes wird durch die Hauptdeichlinie gebildet. Das Gebiet erstreckt sich im südlichen Bereich bis zur Ortschaft Georgsheil und im östlichen Bereich bis Bensorsiel.

Den größten Siedlungsbereich mit circa 25.000 Einwohnern bildet die Stadt Norden mit dem circa 5 km von der Küste entfernt im Landesinneren liegenden Stadtgebiet und dem Stadtteil Norddeich unmittelbar an der Nordseeküste. Weite Bereiche des Pilotgebietes sind durch Marschgebiete geprägt. Diese liegen in den niedrigsten Bereichen bei bis zu NNH -2 m. Im Innenstadtbereich von Norden dagegen befindet sich ein Geestkern mit einer Höhe von bis zu NNH +9 m.

Das Pilotgebiet ist mit einem weit verzweigten Gewässernetz durchzogen. Dieses dient in Kombination mit Sielen und Schöpfwerken zur Entwässerung des tiefliegenden Marschlandes. Das in dem Pilotgebiet vorhandene Gewässernetz 2. Ordnung ist in Abb. 23 dargestellt.

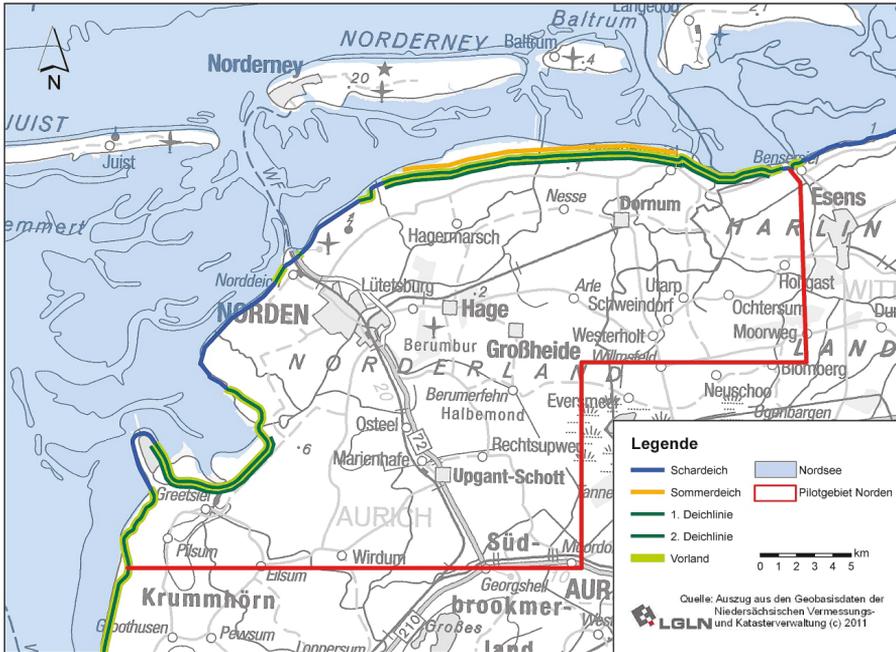


Abbildung 24: Küstenschutzsysteme im Untersuchungsgebiet.

Nordwestlich der Stadt Norden ist eine scharliegende erste Deichlinie vorhanden, auf welche sich die Untersuchungen konzentrieren (Abb. 24). Hierzu wird das vorhandene Küstenschutzsystem durch zusätzliche Elemente modifiziert, um deren Wirkung vergleichend zu den an den vorher untersuchten synthetischen Modellen für verschiedenen Szenarien quantifizieren zu können.

4.4.1 Methodik

Für die Überflutungssimulation wird – wie für die synthetischen Modellgebiete – die Modellssoftware SOBEK genutzt. Die für die Modelltopografie verwendeten Geländehöhen werden als lineares Gitternetz auf Grundlage des DGM 5 der niedersächsischen Landesvermessung generiert. Für das Untersuchungsgebiet Norden wird eine Gitternetzweite von 50 m gewählt, die hinsichtlich der zu erwartenden Genauigkeit der Ergebnisse und der Rechenzeit auf Basis vorheriger Untersuchungen als geeignet angesehen werden kann.

Um das Pilotgebiet möglichst wirklichkeitsnah abbilden zu können, werden zusätzlich zum DGM die im Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) enthaltenen Linieninformationen in das Modell implementiert und die Rasterzellenhöhe entsprechend angepasst. Für die Oberflächenrauheit wird analog zu den vorstehenden Untersuchungen ein einheitlicher Rauheitsfaktor von $k_{st} = 25 \text{ m}^{1/3}$ verwendet. Das Gewässernetz des Untersuchungsgebietes wird über die im ATKIS enthaltenen Informationen berücksichtigt. In Ermangelung von Messdaten wird vereinfachend ein idealisierter Regelquerschnitt für alle Gewässerabschnitte angenommen. Als Tidekurve wird zunächst die in Abschnitt 4.2.7 beschriebene Tidekurve mit einem Scheitelwasser-

stand von NHN + 5,60 m verwendet. Die Berechnung der hydraulischen Zustände erfolgt innerhalb der Gewässernetze eindimensional.

Szenarienbasiert werden Deichbrüche an definierten Lokationen der ersten Deichlinie festgelegt. Es wird dabei angenommen, dass die Bruchstellen während des Simulationszeitraumes nicht geschlossen werden.

Als fiktiver Bruchort wird zunächst der Bereich des Itzendorfer Zugschlots westlich von Norddeich angesetzt. Hier ist eine scharliegende erste Deichlinie vorhanden. Die Bruchbreite und Bruchentwicklung entsprechen den in Abschnitt 4.2 beschriebenen. Zudem verläuft ein Zuggraben senkrecht zur Deichlinie in das Hinterland hinein und kommt damit den in synthetischen Modelltopografien untersuchten Verhältnissen nahe.

Ausgehend von dem Basisszenario eines Deichbruchs an dieser Stelle werden die Randbedingungen wie das Küstenschutzsystem, die Bruchszenerarien und die Sturmflurkurve variiert, um als Sensitivitätsstudien deren Auswirkung auf die maximal überfluteten Flächen sowie die durchschnittlichen maximalen Überflutungstiefen zu quantifizieren.

4.4.2 Einfluss von Vorland und Sommerdeichen

In dem Bereich des angenommenen Bruchortes besteht das Küstenschutzsystem aus einem scharliegenden Deich. Um bei gleichen sonstigen Rahmenbedingungen die Auswirkungen eines Vorlandes als zusätzliches Element des Küstenschutzsystems untersuchen zu können, wird dieses mit einer Breite von 100 m und einer Höhe von NHN + 2,22 m, d. h. 0,75 m über dem MThw, angenommen.

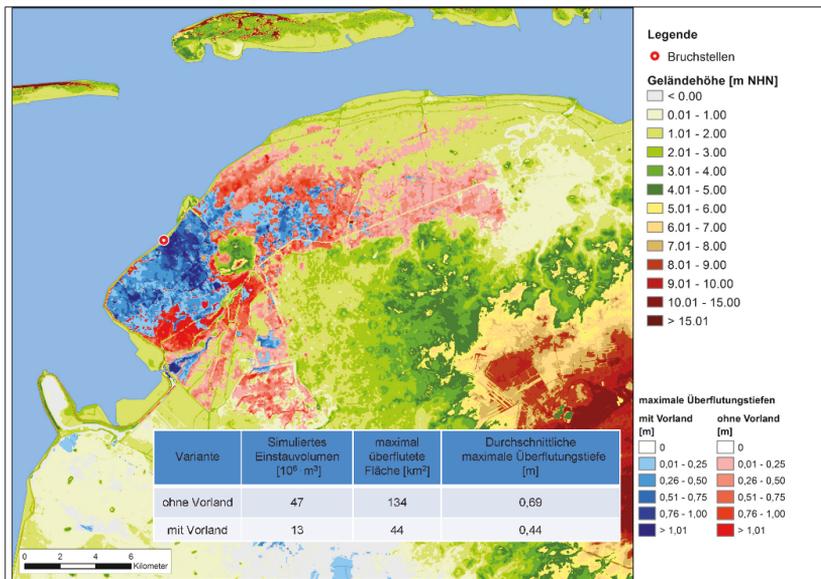


Abbildung 25: Darstellung der Ergebnisse der Überflutungssimulation für Deich mit und ohne Vorland.

Durch das Vorland wird eine erhebliche Verringerung der Auswirkungen des simulierten Deichbruches erreicht (Abb. 25). Das Einstauvolumen im Untersuchungsgebiet reduziert

sich von ursprünglich 47 Mio. m³ auf 13 Mio. m³ entsprechend 28 % des Ausgangswertes. Die maximal überflutete Fläche wird auf 33 % des Ausgangswertes von 134 km² verringert. Die durchschnittliche maximale Überflutungstiefe reduziert sich um circa 36 % gegenüber dem Szenario ohne Vorland. Die reduzierende Wirkung des Deichvorlandes übersteigt damit diejenige im synthetischen Modellgebiet.

Die Untersuchungen für synthetische Modelltopografien in Abschnitt 4.2.3 haben gezeigt, dass Sommerdeiche im Vorland das Einstauvolumen im betroffenen Gebiet und die überflutete Fläche noch weiter reduzieren. Auch wenn es in der Gegenwart, insbesondere aus naturschutzfachlichen Gründen, kein Ziel mehr ist, Sommerdeiche neu zu errichten, wird die zusätzliche Wirkung eines Sommerdeiches exemplarisch für eine Sommerdeichhöhe von NHN + 3,0 m untersucht (Abb. 26).

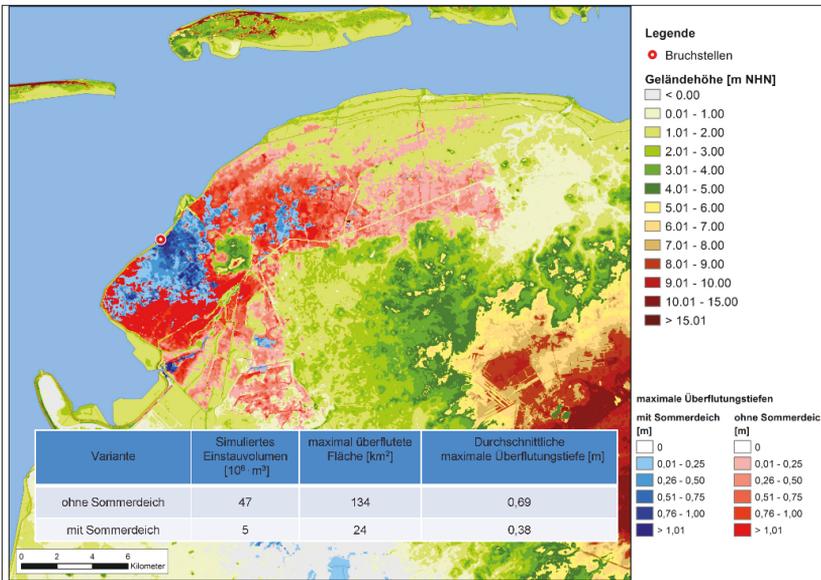


Abbildung 26: Vergleich der Ergebnisse der Überflutungssimulation für Szenarien mit und ohne Sommerdeich.

Das simulierte Einstauvolumen wird für den untersuchten Fall auf 5 Mio. m³ reduziert, entsprechend 11 % des Referenzfalles. Die überflutete Fläche beträgt 24 km², was einer Reduzierung auf 18 % des Referenzfalles entspricht. Es wird deutlich, dass die Existenz eines Sommerdeiches die positive Wirkung des Deichvorlandes noch erheblich erhöht.

4.4.3 Einfluss von linienhaften Strukturen, Oberflächenrauigkeiten und Gewässernetzen

Im Untersuchungsgebiet sind zahlreiche Dammstrukturen verschiedener Art vorhanden, die in das Basismodell zusätzlich auf Basis der im ATKIS enthaltenen Informationen als linienhafte Strukturen implementiert wurden. Für die Untersuchung von deren Einwirkungen werden diese aus dem Modell entfernt.

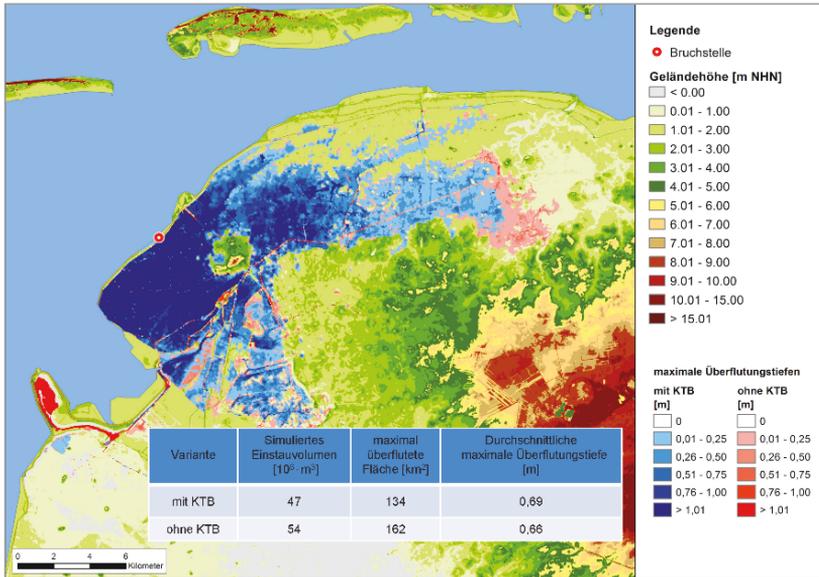


Abbildung 27: Darstellung der Ergebnisse der Überflutungssimulation mit und ohne linienhafte Strukturen.

Das simulierte Einstauvolumen und die überflutete Fläche erhöhen sich auf 115 % bzw. auf 110 % der Ausgangswerte (Abb. 27). Bei der durchschnittlichen maximalen Überflutungstiefe tritt eine geringe Erhöhung ein. Es wird deutlich, dass linienhafte Strukturen die Überflutungsmodellierung deutlich beeinflussen können und deshalb bei der Überflutungsmodellierung eine Berücksichtigung in Abhängigkeit von deren Umfang erfolgen sollte.

Bedingt durch die wechselnde Oberflächenstruktur sind im Modellgebiet unterschiedliche Rauigkeiten in der Natur vorhanden. Die von Überflutung betroffenen Flächen sind außerhalb der Siedlungsgebiete überwiegend landwirtschaftlichen Nutzungen zuzuordnen. Da eine detaillierte Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Rauigkeiten auf die Überflutungsausbreitung nicht das Hauptziel der Untersuchungen im Projekt darstellt, wird der Einfluss dieser durch Parametervariationen untersucht. Es werden Stricklerbeiwerte k_{st} von $k_{st} = 20 \text{ m}^{1/3}$ bzw. $30 \text{ m}^{1/3}$ gegenüber dem Ausgangsrauigkeitsbeiwert von $k_{st} = 25 \text{ m}^{1/3}$ untersucht. Durch eine Reduzierung des Stricklerbeiwertes wird eine Abnahme der überfluteten Fläche auf 83 % und durch eine Erhöhung eine Zunahme auf 127 % des Ausgangswertes erreicht (Abb. 28). Der Ansatz der Größe und gegebenenfalls auch der räumlichen Verteilung des Stricklerbeiwertes ist deshalb für die Überflutungssimulation von Bedeutung.

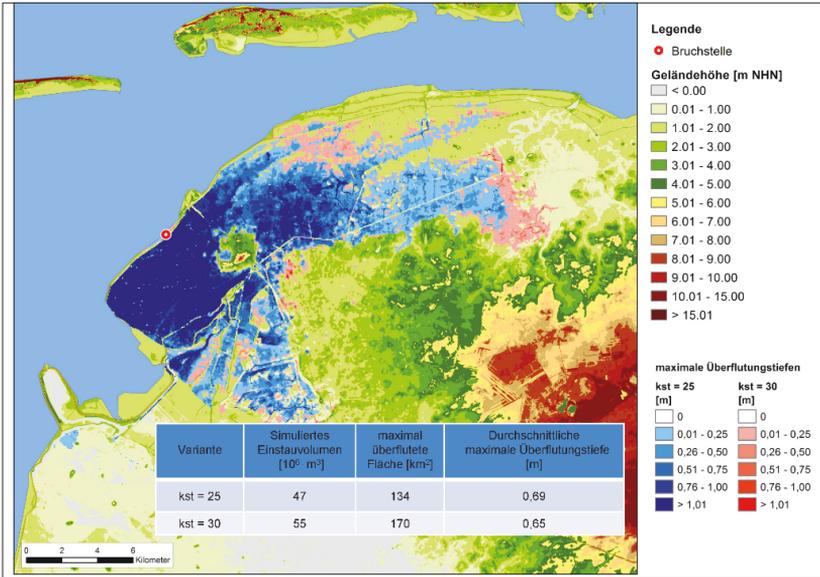


Abbildung 28: Darstellung der Ergebnisse der Überflutungssimulationen für unterschiedliche Rauigkeiten.

Für die Analyse der Auswirkungen von Gewässersystemen auf das Pilotgebiet Norden wird eine Überflutungssimulation ohne das Gewässersystem durchgeführt.

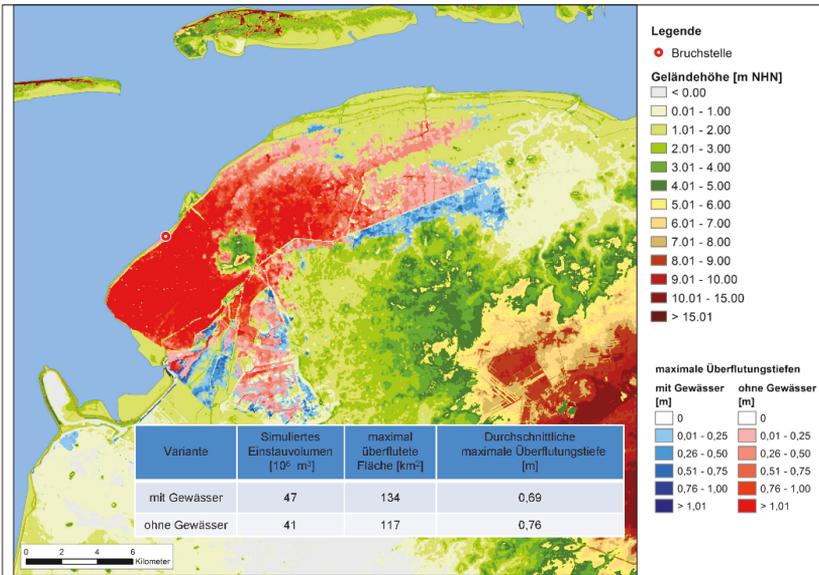


Abbildung 29: Vergleich der Ergebnisse der Überflutungssimulationen mit und ohne Gewässersystem.

Das Einstauvolumen und die maximal überflutete Fläche nehmen bei Nichtberücksichtigung des Gewässernetzes jeweils auf 87 % des Ausgangswertes ab, während die durchschnittliche maximale Überflutungstiefe um circa 9 % steigt (Abb. 29). Es wird deutlich, dass die im Modell implementierten Gewässersysteme die Überflutungsausbreitung deutlich beeinflussen.

4.4.4 Einfluss unterschiedlicher Tidekurven

Im Rahmen der voranstehenden Untersuchungen ist eine einheitliche Sturmidekurve verwendet worden. Da der Verlauf einer Sturmide bei gleichem Scheitelwasserstand unterschiedlich füllig ausgeprägt sein kann, wird der Einfluss unterschiedlicher Sturmideganglinien mit gleichem Scheitelwasserstand auf die Überflutungsausbreitung untersucht. Hierzu werden Ergebnisse des im Rahmen des Projektteils HoRisk B der TU Hamburg-Harburg (Referenz) entwickelten Sturmflutgenerators verwendet. Dieser ermöglicht es, für Pegelstandorte in der Nord- und Ostsee auf Basis langjähriger Aufzeichnungen synthetische Sturmflutverläufe zu erzeugen, die dann z. B. im Rahmen einer Überflutungsmodellierung verwendet werden können.

Der dem Projektgebiet räumlich am nächsten gelegene geeignete Tidepegel, für den der Sturmflutgenerator angewendet werden kann, ist der Pegel Norderney Riffgat. Für diesen wurden durch die TU Hamburg-Harburg sechs Ganglinien mit einem einheitlichen Scheitelwasserstand von NHN + 5,25 m für unterschiedliche Fülligkeiten erzeugt. Der Scheitelwasserstand entspricht dem Bemessungswasserstand für die Insel Norderney aus dem Generalplan Küstenschutz Niedersachsen – Ostfriesische Inseln (NLWKN 2010). Als Vergleichsvariante wird eine Tidekurve in Anlehnung an das Verfahren nach Gönnert (2003) für denselben Scheitelwasserstand von NHN + 5,25 m bestimmt. Alle Tidekurven umfassen einen Zeitraum von 78 Stunden (Abb. 30).

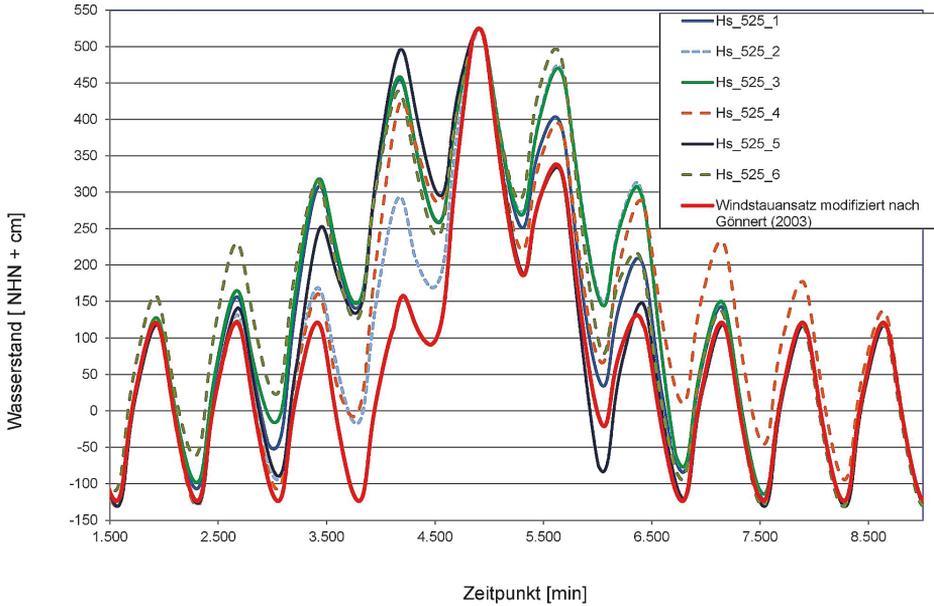


Abbildung 30: Sturmflutidekurven aus dem Sturmflutgenerator der TU Hamburg-Harburg und nach dem modifizierten Windstauansatz nach Gönner (2003) für den Pegel Norderney Riffgat.

Die mit dem Sturmflutgenerator erzeugten Tidekurven weisen vor und nach der Haupttide im Vergleich zu dem Ansatz von Gönner (2003) teilweise deutlich unterschiedliche Wasserstandsverläufe auf. Für alle in Abb. 30 dargestellten Tidekurven werden Überflutungssimulationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst. Deutlich wird, dass hohe Nachtiden einen erheblichen Einfluss auf die Überflutungsausdehnung haben können, wenn der Deichbruch nicht geschlossen wird.

Tabelle 3: Ergebnisse der Überflutungssimulationen für das Pilotgebiet Norden unter Ansatz unterschiedlicher Sturmflutkurven mit einem Scheitelwasserstand von NHN + 5,25 m.

Tidekurve [-]	max. überfl. Fläche [km ²]	Durchschn. max. Überflutungstiefe [m]
mod. Windstauansatz nach Gönner (2003)	103	0,66
„Hs_525_1“ (aus Sturmflutgenerator)	146	0,71
„Hs_525_2“ (aus Sturmflutgenerator)	202	0,75
„Hs_525_3“ (aus Sturmflutgenerator)	200	0,74
„Hs_525_4“ (aus Sturmflutgenerator)	152	0,67
„Hs_525_5“ (aus Sturmflutgenerator)	102	0,66
„Hs_525_6“ (aus Sturmflutgenerator)	195	0,77

4.4.5 Einfluss von Deichbruchbreiten und Deichbruchanzahl

Im Ausgangsszenario wird eine maximale Breschenbreite des Deichbruchs von 150 m angesetzt. Die Bruchentwicklung von Deichbrüchen hängt von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab und ist unter anderem stark abhängig vom jeweiligen örtlichen Zustand des Deiches (z. B. Kortenhaus 2003). Für den Versagensfall kann wegen einer Vielzahl von Kenntnisdefiziten nicht verlässlich vorausgesagt werden, wie breit sich die Bresche ausbildet. Um den Einfluss unterschiedlicher Deichbruchbreiten zu ermitteln, werden in weiteren Szenarien Breschenbreiten von 25 m, 50 m, 100 m, 200 m und 250 m angenommen. Diese Breiten liegen im Wertebereich von in der Vergangenheit aufgetretenen und dokumentierten Breschen an Küstendeichen (Grimm et al. 2013), wengleich auch die dokumentierten Deichquerschnitte sehr unterschiedlich sind. Die Bruchentwicklung beginnt für alle Szenarien mit Eintritt des Scheitelwasserstandes der Tidekurve und ist nach einer Stunde mit Erreichen der binnenseitigen Geländehöhe abgeschlossen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Überflutungssimulationen für unterschiedliche Breschenbreiten.

Breschenbreite [m]	Einstauvol. zum Ende der Simulation [10^6 m^3]	max. überflutete Fläche [km^2]	Durchschn. max. Überflutungstiefe [m]
25	17	53	0,48
50	24	72	0,57
100	33	95	0,64
150	47	134	0,69
200	50	137	0,70
250	54	151	0,70

Mit zunehmender Bruchbreite steigen das simulierte Einstauvolumen sowie die maximal überflutete Fläche und die durchschnittliche maximale Überflutungstiefe an. Der Anstieg verläuft allerdings nicht proportional zur Erhöhung der Breschenbreite (Tab. 4). Die durchschnittliche maximale Überflutungstiefe steigt dabei noch weniger stark an. Insgesamt besitzt die Breschenweite einen großen Einfluss auf die Überflutungscharakteristik.

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen ist es nur schwer möglich vorherzusagen, an welcher Lokalität und an wie vielen Stellen ein Versagen der Deichlinie eintreten wird. Um neben dem betrachteten einzelnen Deichbruch die Auswirkung mehrerer Deichbrüche exemplarisch zu untersuchen, wird als weiteres Szenario beispielhaft ein zeitgleicher Deichbruch an vier Lokationen simuliert. Die Breschenbreiten werden jeweils mit 150 m angesetzt.

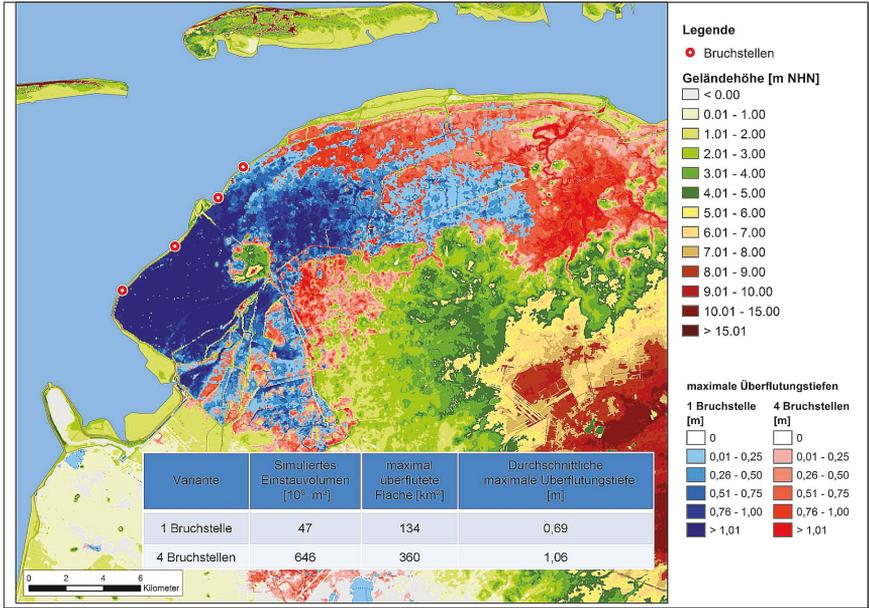


Abbildung 31: Ergebnisse der Überflutungssimulationen für einen und vier Bruchorte.

Es tritt in diesem Szenario nahezu eine Verdopplung der maximal überfluteten Fläche, d. h. von 134 km² auf 360 km², auf. Die durchschnittliche maximale Überflutungstiefe steigt von 0,69 m auf 1,06 m (Abb. 31).

4.5 Zusammenfassende Betrachtung zum Einfluss der untersuchten Parameter

Die Ergebnisse der szenarienbasierten Überflutungssimulationen mit einer einheitlichen Tidekurve für das Pilotgebiet zeigen deutliche Übereinstimmungen mit den Ergebnissen des synthetischen Modellgebietes.

Auch für das Pilotgebiet wird deutlich, dass Deichvorländer als Teile des Küstenschutzsystems und Sommerdeiche einen erheblichen reduzierenden Einfluss auf die Einstauvolumina und die überflutete Fläche besitzen. Dieser übersteigt zudem den für die synthetischen Modellgebiete ermittelten Einfluss. Die Relevanz von Deichvorländern für die Wirkung von Küstenschutzsystemen wird hierdurch unterstrichen.

Ebenfalls zeigt sich, dass eine Berücksichtigung wesentlicher Elemente der Geländetopografie wie linienhafte Strukturen, Rauigkeiten und Gewässersysteme nicht vernachlässigt werden kann, auch wenn deren Wirkung bei weitem nicht die von zusätzlichen Küstenschutzelementen erreicht.

Maßgeblich sind zusätzlich die angesetzten Randbedingungen wie die Bruchbreitenentwicklung und die Anzahl der Bruchstellen, welche die Überflutungscharakteristik mit zunehmender Anzahl deutlich negativ verändern. Große Bedeutung kommt zudem der Höhe und Fülligkeit der Sturmidekurve zu, die in dem Modell als Randbedingungen angesetzt werden. Insbesondere hoch auflaufende Nachtiden können die Überflutung im Bruchfall deutlich negativ beeinflussen.

5 Schriftenverzeichnis

- Burg, S.; Thorenz, F.; Blum, H.: Coastal Flood Inundation Modelling for North Sea Lowlands. In: Proceedings of the FLOODrisk 2008 Conference September 30 – October 2nd, Oxford, 2008.
- Delft Hydraulics: Aanpassen van het bresgroeimodel in HIS-OM. Bureau studie. Niederländisch/Englisch. Delft, Niederlande, 2003.
- Delft Hydraulics: SOBEK Rural – Managing your Flow. Software Manual, WL/Delft Hydraulics. Delft, Niederlande, 2004.
- EU-HWRM-RL: Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken – (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 288/27 vom 06.11.2007) – EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, 2007.
- Gönnert, G.: Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht – Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. In: Die Küste, 67, 2003.
- Grimm, C.; Klopries, E.; Schüttrumpf, H.: Deichbruchweiten und -tiefen an Fluss- und Ästuardeichen. In: Schüttrumpf, H. (Hrsg.): Hochwasser – eine Daueraufgabe, 42. IWASA, Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2012. Mitteilungen/Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 166, Aachen, 187–199, 2013.
- Kortenhaus, A.: Probabilistische Methoden für Nordseedeiche. Dissertation. Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, 2003.
- MELUR: Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2012.
- NDG: Niedersächsisches Deichgesetz i. d. F. vom 23. Februar 2004 (Nds. GVBl. S. 83), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 19. Februar 2010 (Nds. GVBl. S. 64), 2004.
- NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2007.
- NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen – Ostfriesische Inseln. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2010.
- NLWKN: Jahresbericht 2017/2018. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden, 2018.
- Thorenz, F.; Blum, H.; Burg, S.: Flood Risk Assessment at two Pilot Sites – Methods and Measures, SAFECOAST Project, Action 5B – Final Report, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz – Betriebsstelle Norden-Norderney, Norden, 2008.
- Vanderkimpfen, P.; Melger, E.; Peeters, P.: Flood modeling for risk evaluation – a MIKE FLOOD vs. SOBEK 1D2D benchmark study. In: Flood Risk Management: Research and Practice – Samuels et al. (Hrsg.) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4, 2009.
- Westphal, H.; Berkenbrink, C.; Wurpts, A.: Bestimmung der mittleren Tidehochwasserlinie für Niedersachsen und Bremen. Unveröffentlichter Forschungsbericht 01/2013. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Betriebsstelle Norden-Norderney – Forschungsstelle Küste, 2013.