



## **Risikoanalyse – ein Element des Küstenzonenmanagements**

### **Risk Analysis applied in Integrated Coastal Zone Management**

Anne Elsner, Stephan Mai & Claus Zimmermann

Franzius-Institute for Hydraulic, Waterways and Coastal Engineering, University of Hannover, Germany

#### **Abstract**

Accelerated sea level rise as a result of the climate change leads to an increasing stress on coastal defence systems and therefore to a higher risk to coastal zones due to the higher failure probability of defence systems. This requires an adjustment to ensure today's and future utilisation of the hinterland. To reduce the costs of this adjustment coastal defence planning should be integrated into the management of the hinterland. Probabilistic risk analysis which combines failure probability of coastal defence systems and expected loss in the hinterland in case of flooding is a suitable technique. Within this concept risk is defined as the product of the probability of failure of the defence system and its consequences, e.g. the expected loss. Applying this definition densely populated and economically valuable urban areas require a higher standard of safety than rural areas. Apart from strengthening existing coastal defence systems a strategy of adaptation introducing secondary defence lines is possible.

Both coastal defence strategies are analysed for the community of Wangerland north of Wilhelmshaven. It is shown that today's system fails with a probability of 1/2500. A rise in water level of 55 cm increases the annual failure probability to approx. 1/500. In case of a dike breach near Minsens the loss, calculated using GIS in order to combine the results of numerical modelling of the flooding and the assets, amounts to 60 million Euro. Today's risk of the coastal zone increases by a factor of 5 in case of the sea level rise.

#### **1 Einführung**

Das integrierte Küstenzonenmanagement (IKZM) zielt auf eine interdisziplinäre Strategieentwicklung für das gesamte Küstengebiet (sowohl marinen als auch terrestrischen Teil) ab. Innerhalb der verschiedenen Fachdisziplinen, wie z.B. Ökologie, Raumplanung und Küsteningenieurwesen, erfolgt schließlich die Umsetzung der Strategie. In Deutschland ist die Umsetzung dieses Konzepts bei der Planung von Küstenschutzanlagen noch nicht sehr weit fortgeschritten. Während in Schleswig-Holstein erste Ansätze umgesetzt werden (Ministerium für Ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein 2001), sind in der niedersächsischen Küstenschutzplanung diese Ansätze nicht erkennbar, wengleich die gesetzlichen Regelungen im Deichgesetz durchaus eine stärkere Integration zu lassen. So kommentieren Lüders und Leis (1964) den §4 Nds. Deichgesetz (1) dahingehend, daß bei der Festlegung der Abmessungen des Küstenschutzsystems durch die obere Deichbehörde „die Struktur des geschützten Gebietes (Höhenlage, Besiedlung, Bewirtschaftung) zu berücksichtigen ist. Methodisch bietet sich zur Integration der Hinterlandstruktur in die Küstenschutzplanung die Risikoanalyse an (CUR 1990, Mai & von Lieberman 1999), welche im Folgenden exemplarisch für das Wangerland nördlich von Wilhelmshaven erläutert wird.

#### **2 Grundlagen der Risikoanalyse**

Die Integration von Hinterlandstruktur und Küstenschutzplanung erfolgt im Rahmen der Risikoanalyse über die vereinfachte Definitionsgleichung (z.B. Probst 1994)

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

Während derzeit der Folgeschaden insbesondere durch die Hinterlandstruktur, d.h. Nutzungstypen und deren Höhenlage, bestimmt wird, ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit des Küstenschutzsystems in Niedersachsen aufgrund der Fokussierung auf eine Schutzlinie aus der Küstenschutzplanung. Die Erweiterung des derzeitigen Küstenschutzkonzepts durch den Ausbau zweiter Deichlinien zu einem gestaffelten Konzept, welches in Schleswig-Holstein teilweise umgesetzt und per Erlaß (Lüders & Leis 1964) seit langem auch bei der niedersächsischen Küstenschutzplanung zu berücksichtigen ist, wird diese scharfe Trennung jedoch in Zukunft aufweichen. Für das Küstenschutzelement „Hauptdeich“, als für das Wangerland maßgebendem Schutzelement, wird in Kapitel 3 unter Berücksichtigung der derzeit verfügbaren Datenbasis ein probabilistisches Konzept zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit dargestellt (Mai & Zimmermann 2003) und zur Beurteilung des heutigen und des bei Klimawandel zu erwartenden Sicherheitsstandards eingesetzt. Das methodische Vorgehen zur Berechnung des Folgeschadens wird in Kapitel 4, welches eine Übersicht über ein Verfahren zur monetären Bewertung der Hinterlandstruktur (Meyer & Mai 2003) gibt, und in Kapitel 5, welches die Ausweisung von Überflutungsflächen mit Hilfe numerischer Simulationen sowie die darauf aufbauende Abschätzung des Schadens erläutert, dargestellt.

### 3 Sicherheit des Hauptdeichs

#### 3.1 Probabilistische Methodik

Während in Deutschland die probabilistische Analyse einzelner Versagensformen des Hauptdeichs noch keinen Einzug in die behördliche Bemessungspraxis gefunden hat, wird diese in den Niederlanden als Standardverfahren in der Bemessung von Deichen eingesetzt (Jorissen 2000). Erste Untersuchungen zur Sicherheit niederländische Deiche finden sich bei Roelse und Bakkar (1986). Als Beurteilungsmaßstab der Deichsicherheit dient in den Niederlanden die Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlauf, wengleich auch die Grundlagen zur probabilistische Behandlung anderer Versagensformen des Hauptdeichs, wie Erosion der Außen- und der Binnenböschung, vorliegen (CUR 1990). Für die niedersächsische Küste ist eine erste probabilistische Analyse der Deichsicherheit auf der Grundlage des Wellenüberlaufs durch Zimmermann und Mai (1998) gegeben. Weitere Versagensformen sind in Kortenhaus (2003) diskutiert.

Die Grundlage der Beurteilung der Überlaufwahrscheinlichkeit eines Hauptdeichs bildet die als Differenz von Deichhöhe ( $h_D$ ) und Wasserstand ( $Thw$ ) sowie Wellenauflauf ( $R_{98}$ ) definierte Zuverlässigkeit ( $Z$ )

$$Z = h_D - Thw - R_{98}(H_s(Thw, u_w, \gamma_w), T_m(Thw, u_w, \gamma_w), \gamma_s(Thw, u_w, \gamma_w))$$

Der Wellenauflauf am 1:n geneigten Deich folgt aus den Seegangsbedingungen am Deichfuß (Ausschuß für Küstenschutzwerke 2003), d.h. der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$ , der mittleren Wellenperiode  $T_m$  und der Seegangsrichtung  $\gamma_s$ , welche ihrerseits von Tidehochwasserstand und Wind ( $u_w, \gamma_w$ ) abhängen:

$$R_{98} = 2,15 \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{H_s} \cdot T_m \cdot 1/n$$

Die Wahrscheinlichkeit  $p_{Z<0}$  des Deichversagens durch Wellenüberlauf folgt mittels Integration der gemeinsamen Eintrittswahrscheinlichkeit  $p_{Thw, u_w, \gamma_w}(\dots)$  von Wasserstand und Wind für negative Zuverlässigkeit:

$$p_{Z<0} = \int_{Z<0} p_{Thw, u_w, \gamma_w}(Thw, u_w, \gamma_w) dThw du_w d\gamma_w$$

Aufgrund der begrenzten Datengrundlage gleichzeitiger Wasserstands- und Windmessungen wird die gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit von Wasserstand und Wind in die Eintrittswahrscheinlichkeit des Wasserstands sowie die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Windgeschwindigkeit und -richtung separiert (Mai & Zimmermann 2003):

$$p_{Thw, u_W, \gamma_W} (Thw, u_W, \gamma_W) = p_{Thw} (Thw) \cdot p_{\gamma_W | Thw} (\gamma_W) \cdot p_{u_W | \gamma_W, Thw} (u_W)$$

Als maximal zulässige jährliche Eintrittswahrscheinlichkeit eines Wellenüberlaufs wird in den Niederlanden 1/1250 (Jorissen 2000), in Belgien 1/1000 (Wolf & Verwaest 1999) und in Dänemark 1/50 (Laustrup 2000) angesehen.

### 3.2 Sicherheit des Hauptdeichs von Wangerland

Die für eine Beurteilung der Sicherheit der Hauptdeiche des Wangerlands notwendigen Statistiken von Wasserstand und Wind sind in den Abbildungen 1 und 2 gegeben. In Abbildung 1 wird dazu die unter Voraussetzung der Log-Pearson 3 Verteilung abgeleitete, jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit des Tidehochwassers (Jensen et al. 2003) an den benachbarten Pegeln Bengersiel und Wangerland für das Bezugsjahr 2000 gegeben. Für das Jahr 2050 wird zudem ein Szenario einer als Folge des Klimawandels geänderten Wasserstandsstatistik gegeben, wobei ein Anstieg des mittleren Tidehochwassers von 0,55 cm in Ansatz gebracht wird. Danach beträgt das einer jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit von 1/1000 zuzuordnende Tidehochwasser bei Bengersiel NN + 5,45 m und am Pegel Wangerland NN + 5,85 m. Die in Abbildung 2 dargestellte während Sturmfluten gültige Windstatistik basiert auf seit 1952 durchgeführten Messungen an der Station Helgoland. Als statistisches Modell der Verteilung der Windrichtungen findet die Normalverteilung Verwendung, als Modell der Geschwindigkeitsverteilung die Weibullverteilung. Für das Jahr 2050 wird von einer klimaänderungsbedingten Erhöhung der Windgeschwindigkeit von 7 % ausgegangen. Dem Wasserstand und Wind werden mit Hilfe des numerischen Modells SWAN die Seegangsbedingungen zugeordnet.

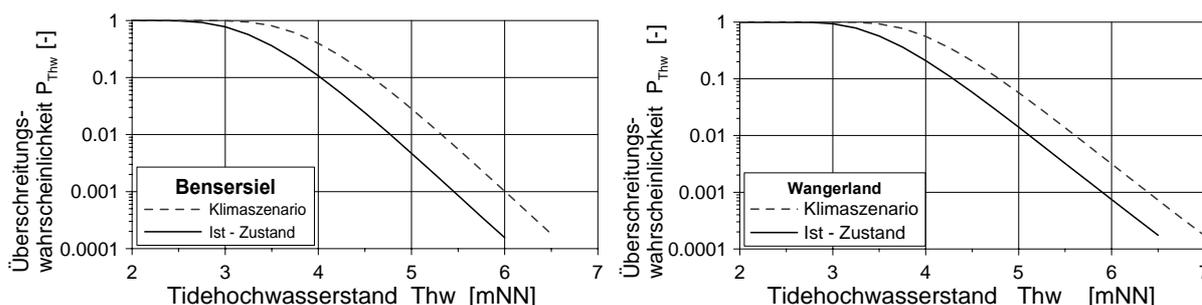


Abb. 1: Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit des Tidehochwasserstands am Pegel Bengersiel (links) und am Pegel Wangerland (rechts) – Ist-Zustand und Klimaszenario

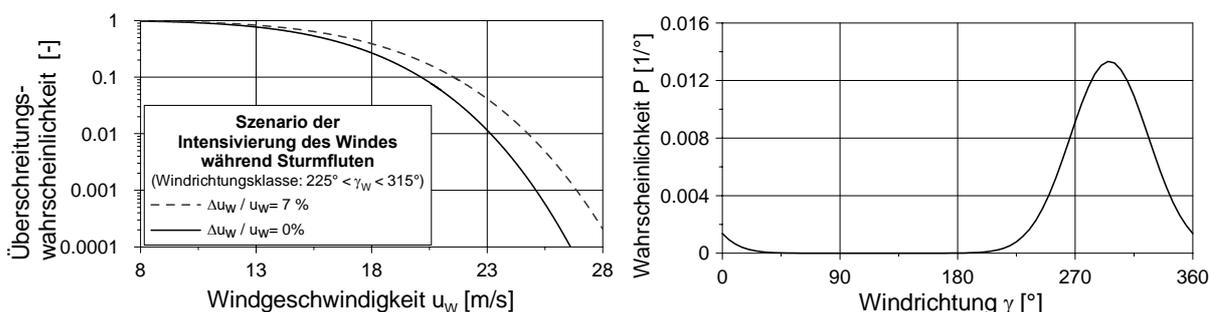


Abb. 2: Wahrscheinlichkeit von Windgeschwindigkeit (links) und -richtung (rechts) während Sturmfluten – Ist-Zustand und Klimaszenario

Die Abbildung 3 zeigt exemplarisch die signifikante Wellenhöhe und die mittlere Wellenperiode im Küstenvorfeld Wangerlands. Die den dargestellten Berechnungen zugrundeliegenden Randbedingungen von Wasserstand und Wind entsprechen etwa denen der Sturmflut des Jahres 1962. Die dem Wangerland vorgelagerten Inseln Spiekeroog und Langeoog wirken, wie Abbildung 3 zeigt, in erheb-

lichem Maße als vorgelagerte Küstenschutzelemente, da sie die Seegangsbelastung im Bereich des Rückseitenwatts reduzieren.

Der Deich hat eine Höhe von ca. NN + 7,88 m sowie eine Deichneigung von ca. 1:6,5 (III. Oldenburgische Deichverband, 1. Deichzug, Querprofil 14,1 km). Die Deiche sind in weiten Teilen scharliegend. Die jährliche Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs beträgt zurzeit weniger als 1:2500. Aufgrund der höheren Seegangsbelastung ist der Bereich bei Minsen am stärksten gefährdet (Abbildung 4). Als Folge des Klimawandels ist mit einer Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeit um den Faktor 5 zu rechnen.

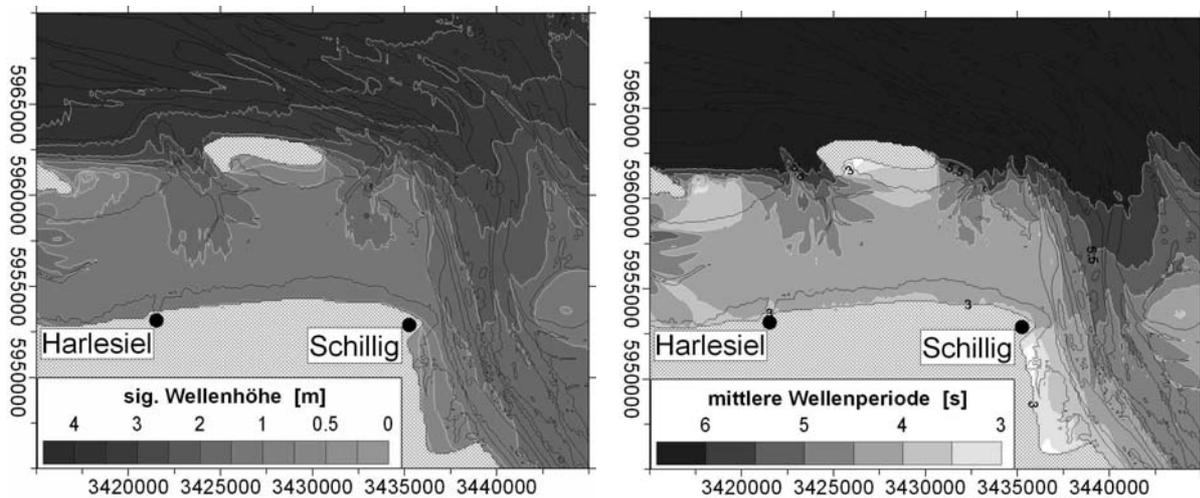


Abb. 3: Seegangsbedingungen im Rückseitenwatt von Wangerooge – signifikante Wellenhöhe (links) und mittlere Wellenperiode (rechts)

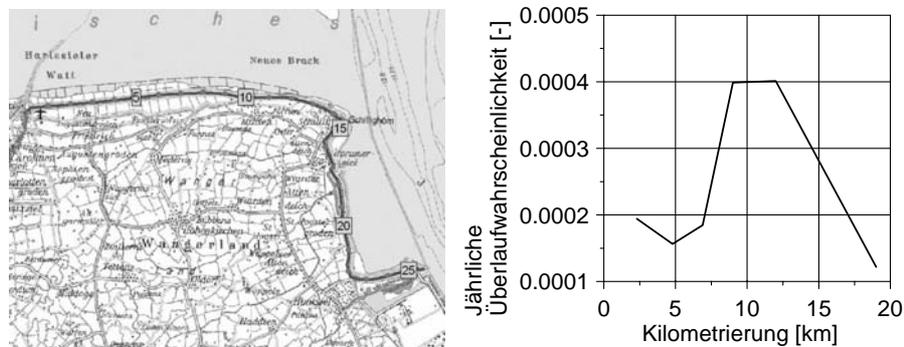


Abb. 4: Wahrscheinlichkeit eines Wellenüberlaufs von mehr als 2 m<sup>3</sup>/h pro lfd. m an den Hauptdeichen Wangerlands

#### 4 Analyse des Wertbestandes im Hinterland

Die Abschätzung des zu erwartenden Schadens im Hinterland bei Versagen des Hauptdeichs erfordert die Kenntnis über die dort bestehenden Wertvermögen und damit des vorhandenen Schadenspotentials. Um auch größere Gebiete praktikabel erfassen können, bietet sich eine Wertermittlung auf mesoskaligem Level an. Mit dieser Methode wurden die einzelnen Wertkategorien (Wohnkapital, Nettoanlagenvermögen, ...) mittels sekundärstatistischer Quellen auf Gemeindeebene (Meyer & Mai 2004) erhoben. In Abbildung 7 sind die ermittelten Vermögenswerte für das Wangerland nach Wertkategorien aufgeteilt tabellarisch dargestellt.

Diese Vermögenswerte geben jedoch nicht deren räumliche Verteilung auf Gemeindeebene wieder. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Wertanhäufung in den städtischen Gebieten höher ist als in den ländlich geprägten. Aus diesem Grund werden die einzelnen Vermögenskategorien der einzelnen

Gemeinden bzw. Städte mit der jeweiligen Flächennutzung verortet, z.B. die Kategorien "Wohnkapital" und "Hausrat" mit der Flächennutzung "Wohnbaufläche". Als Datengrundlage für die Flächen-nutzung bietet sich das Digitale Landschaftsmodell des Amtlichen Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS-Basis-DLM) an. Diese Art der Verschneidung ermöglicht die Darstellung der räumlichen Verteilung von Vermögenswerten. Abbildung 5 zeigt die unterschiedliche Vermögenskonzentration für die Stadt Wilhelmshaven und die Gemeinde Wangerland. Es zeigt sich deutlich die hohe Konzentration von Wertbeständen im Stadtgebiet mit Vermögenswerten von bis zu 500 Euro/m<sup>2</sup>. Im stark ländlich geprägten Wangerland finden sich für die dortigen Siedlungsflächen Vermögenswerte zwischen 50 und 100 Euro/m<sup>2</sup>. Die vorherrschenden Grün- und Ackerflächen haben dagegen mit einem Vermögenswert von unter 2 Euro/m<sup>2</sup> nur ein sehr geringes Schadenspotential.

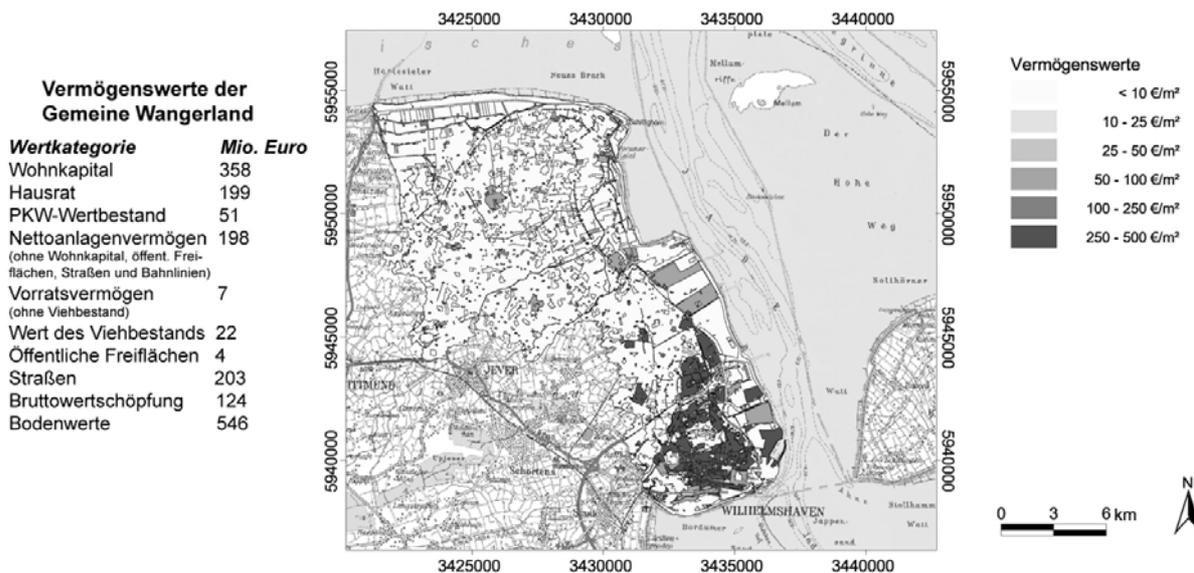


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Vermögenswerte für die Gemeinde Wangerland (mit tabellarischer Differenzierung der Wertkategorien, links) und die Stadt Wilhelmshaven.

## 5 Überflutungsgefährdung des Hinterlandes

### 5.1 Ausweisung überflutungsgefährdeter Flächen

Die Ausweisung der Flächen, die im Falle des Versagens des Hauptdeichs von einer Überflutung betroffen sein können, ist Grundvoraussetzung für die Berechnung des zu erwartenden Schadens. Die Festlegung des Überflutungsbereichs erfolgt mit Hilfe eines zweidimensionalen numerischen Simulationsprogramms. Diese Methode hat - gegenüber der vereinfachten Methode der statischen Verschneidung der Topographie mit dem Tidehochwasserstand bei Sturmflut - den Vorteil, dass der Prozess des Überflutens simuliert wird. Durch die simulierte Strömung des Wassers wird eine höhere Genauigkeit der Ausdehnung der Überflutungsfläche sowie den Überflutungstiefen erreicht. Es wird berücksichtigt, dass das Wasser durch den Tideverlauf nur während eines begrenzten Zeitraums durch die Deichlücke in das Hinterland hineinströmt und sich durch die Ausbreitung des Wassers in der Fläche auch auf gleichen Geländehöhen unterschiedliche Überflutungstiefen einstellen. Eine Auswertung der einzelnen Ausgabezeitschritte der Simulation liefert zudem Informationen über den zeitlichen Verlauf der Überflutungsausdehnung sowie der Verweildauer des Wassers auf den gefluteten Flächen. Die Ausweisung der Überflutungsflächen im Untersuchungsgebiet Wangerland erfolgte mit der Annahme eines Bruchs des Hauptdeichs auf einer Länge von 100 m in der Nähe von Minsin. Die Deichlücke wird dabei auf die Höhe des umgebenden Geländes angeglichen und auf 1 mNN gesetzt. Die Basis der durchgeführten Simulationen ist ein digitales Geländehöhenmodell mit einer 50 m Rasterauflösung, das sowohl die Landhöhen als auch die über Tiefenpeilungen ermittelte Bathymetrieda-

ten enthält. Die Einbindung des sich während des Tideverlaufs ändernden Wasserstands erfolgt über die Einsteuerung der Tidekurvendaten am nördlichen Modellrand (siehe Abbildung 6).

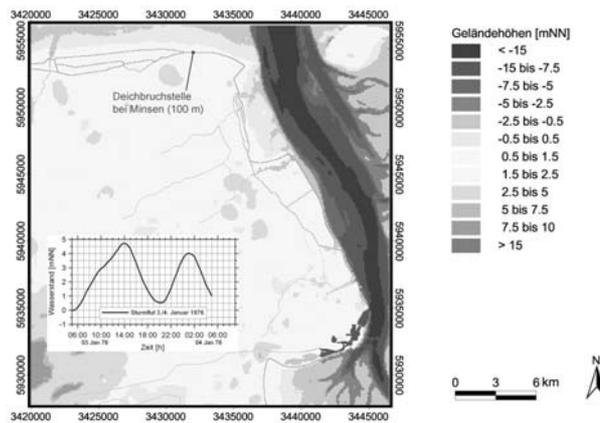


Abb. 6: In der Simulation an der nördlichen Modellgrenze eingesteuerte Tidekurve (Sturmflut 3./4. Januar 1976)

Für die Ermittlung der Überflutungsflächen werden zwei Szenarien aufgestellt. Die Sturmflut vom 3./4. Januar 1976 wird simuliert, um den heutigen Ist-Zustand zu erfassen. Um die Auswirkungen eines ansteigenden Meeresspiegels auf die Überflutungstiefe und -ausdehnung abschätzen zu können wird ein Zukunftsszenario aufgestellt, in dem von einem um 55 cm erhöhtem Wasserstand (Sturmflut 1976 + 55 cm) ausgegangen wird. Abbildung 7 zeigt die jeweiligen Überflutungsausdehnungen mit der maximal erreichten Überflutungstiefe. Dabei zeigt sich, dass bei einer Erhöhung der Tide um 55 cm die Überflutungsausdehnung um 25 % größer ausfällt (11.135 ha) und die maximalen Überflutungstiefen auf den einzelnen Flächen höher sind.

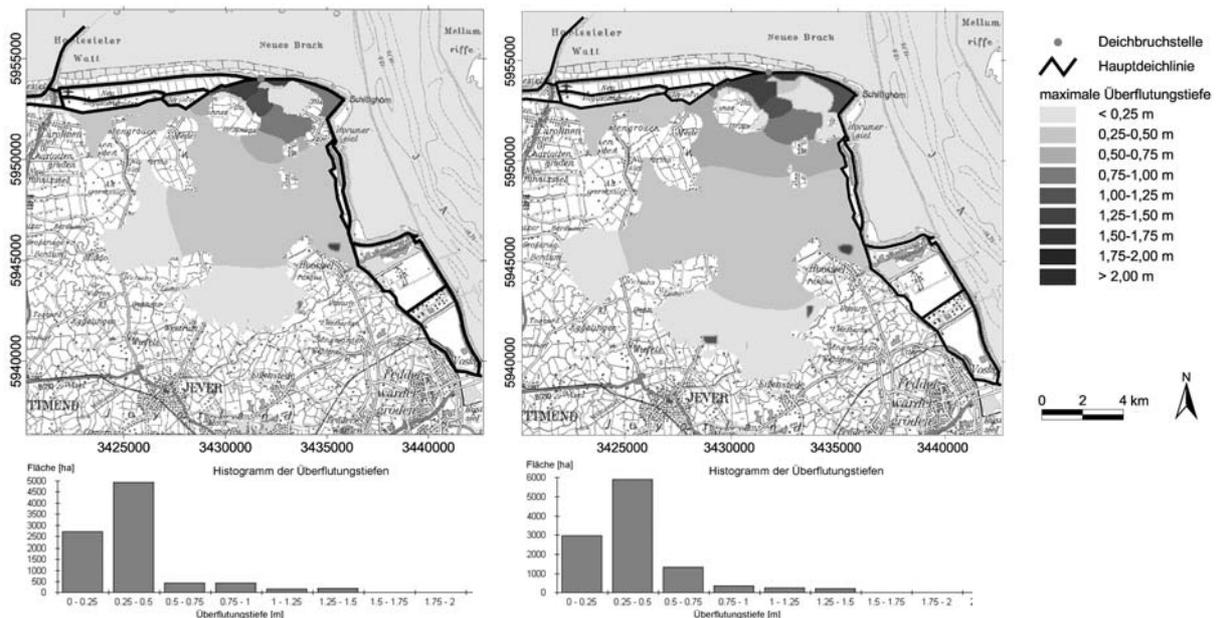


Abb. 7: Überflutungssimulationen für einen Deichbruch bei Minsen für die Sturmflut 3./4. Januar 1976 (links) und für ein Zukunftsszenario mit einer Erhöhung der Sturmfluttide um 55 cm (rechts), Histogramm der maximalen Überflutungstiefen.

### 5.2 Schadensberechnung

Die Berechnung des zu erwartenden Schadens auf den überfluteten Flächen erfolgt auf Grundlage des ausgewiesenen Überflutungsgebietes (Kapitel 5.1) mit den maximal während der Flut erreichten Ü-

berflutungshöhen und den ermittelten Vermögenswerten der Flächen (Kapitel 4). Die maximalen Überflutungshöhen, die sich während des Überflutungsprozesses auf den Flächen einstellen, können aus der Zeitserie der Überflutungssimulation herausgefiltert werden. Der Schädigungsgrad einer überfluteten Fläche ergibt sich maßgeblich durch den maximal erreichten Wasserstand während der Überflutung. Die Beziehung zwischen Wasserstand und Schädigungsgrad lässt sich in sogenannten Wasserstands-Schadensfunktionen ausdrücken. Abbildung 8 zeigt die für vorliegende Schadensberechnung verwendeten Schadensfunktionen unterschiedlicher Vermögenskategorien, die aus empirisch ermittelten Schadendaten erstellt wurden (Klaus / Schmidtke 1990).

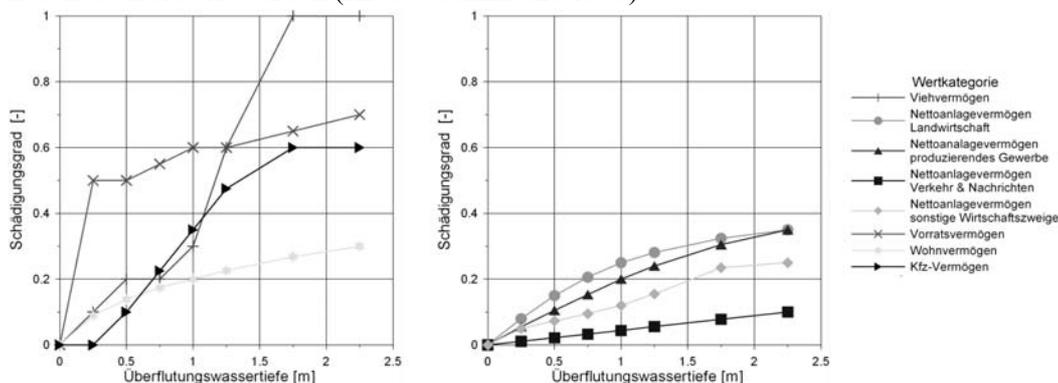


Abb. 8: Schadensfunktionen für verschiedene Vermögenswertkategorien (nach Klaus/Schmidtke 1990)

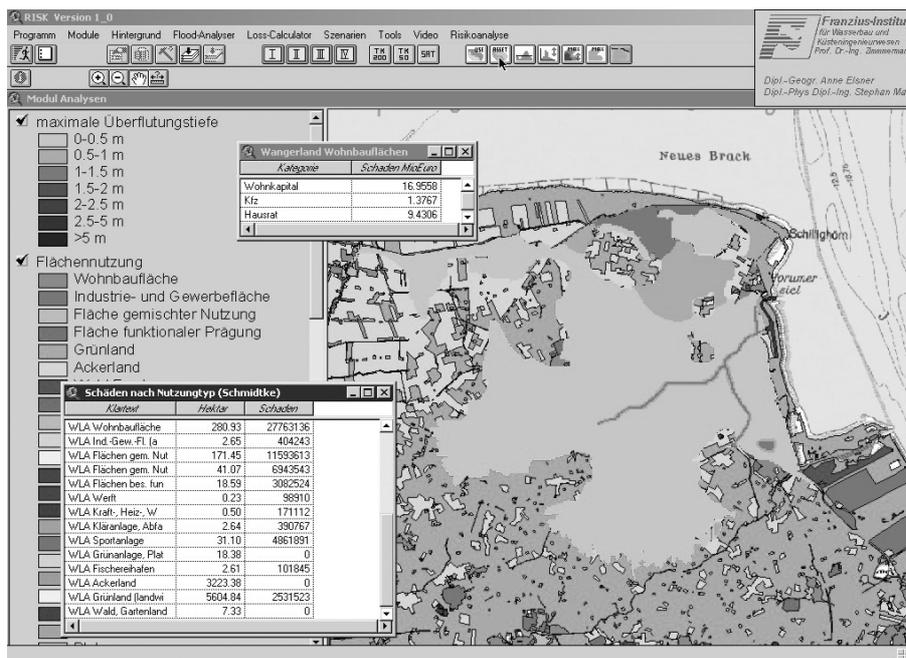


Abb. 9: Schadensanalyse des Überflutungsszenarios für die Sturmflut 3./4. Januar 1976

Die Berechnung des Schadens erfolgt durch die Einbindung der drei Eingangsdaten maximale Überflutungstiefen, Vermögenspotential und Schadensfunktionen in ein Geographisches Informationssystem. Für die Automatisierte Analyse des Schadens wurde das Tool „Loss-Calculator“ (Elsner et al. 2003) entwickelt, in dem die Verschneidung der einzelnen Parameter miteinander durchgeführt wird. Hierbei werden in einem ersten Schritt die Nutzungstypen (z.B. Wohnbauflächen, Grünland) der überfluteten Fläche bestimmt und daran anschließend die Überflutungshöhen auf den einzelnen Flächen ermittelt. In einem Zweiten Schritt erfolgt die Zuordnung der für die einzelnen Nutzungstypen relevanten Vermögenswertkategorien und damit die Festlegung der für die jeweilige Wertkategorie an-

zuwendenden Schadensfunktion. So sind, zum Beispiel, für die Schadensberechnung des Nutzungstyps „Wohnbaufläche“ die Vermögenswertkategorien „Wohnkapital“, „Hausrat“ und „Kfz-Wertbestand“ von Bedeutung. Über die Verschneidung der Überflutungshöhen mit der wertkategorie-spezifischen Schadensfunktion wird der Schädigungsgrad für die jeweilige Wertkategorie eines Nutzungstyps ermittelt. Die Multiplizierung des Schädigungsgrads einer Wertkategorie mit dem dazu gehörigen Vermögenswert ergibt ihren Schaden. Der Gesamtschaden, der sich für einen Nutzungstyp ergibt, folgt aus der Addition der einzelnen für den Nutzungstyp relevanten Schäden der Wertkategorien. Abbildung 9 zeigt einen Screenshot der abgeschlossenen Schadensanalyse für das Simulationsszenario der Sturmflut 1976. Als Analyseergebnis wird der Schaden unterteilt nach Nutzungstypen und ihren jeweilig relevanten Wertkategorien ausgegeben. So ergibt sich für die Wohnbauflächen im Wangerland ein Schaden von 27 Mio. Euro, gesplittet in 16,9 Mio. Euro für „Wohnkapital“, 9,4 Mio. Euro für „Hausrat“ und 1,3 Mio. Euro für „Kfz“. Der Gesamtschaden dieser Überflutung liegt bei 69 Mio. Euro, woraus sich für das Szenario ein Risiko von 27.600 Euro/a ergibt. Im Zukunftsszenario ergibt sich durch den höheren Schaden (91 Mio. Euro) und der höheren Versagenswahrscheinlichkeit ein ca. 6-fach höheres Risiko (175.000 Euro/a).

## 6 Methoden der Risikominderung

### 6.1 Erhöhung der bestehenden Hauptdeichlinie

Traditionell wird der Zunahme des Risikos bei einem mit dem Klimawandel verbundenen Wasserstandsanstieg durch Verstärkung der bestehenden Schutzlinie, z.B. durch Deicherhöhung oder die Anlage flacherer Deichaußenböschungen, begegnet. Zur Kompensation der in Abbildung 6 dargestellten Verminderung der Deichsicherheit ist eine Deicherhöhung im Mittel um 75 cm nötig. Dies entspricht etwa dem 1,1-fachen der durch den Wasserstandsanstieg begründeten Erhöhung. Unter Bezug auf jüngste Deichbauprojekte an der Jade (Blischke 2001) betragen die Kosten ca. 750,- EUR pro lfd. m.

### 6.2 Anlage 2. Deichlinien

Eine Verminderung des Risikos für eine Küstenregion wird zum einen erreicht durch die Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit des Küstenschutzsystems und zum anderen durch die Verringerung des bei einer Überflutung zu erwartenden Schadens (Mai et al. 2004). Im Folgenden wird geprüft inwieweit sich die Anlage von 2. Deichlinien im Hinterland zur zusätzlichen Sicherung von Flächen mit höherem Vermögenswert auf die Schadensgröße im Falle des Versagens der Hauptdeichlinie auswirkt. Die Festlegung der Lage der 2. Deichlinien erfolgt nach drei Kriterien. Wichtigstes Kriterium ist die Flächennutzung mit den sich daraus ergebenden Vermögenswerten, d.h. welche Flächen sind zusätzlich zu schützen? Der genaue Verlauf der Deichlinie ergibt sich aus dem Einbeziehen vorhandener Geländeerhöhungen (über 3 mNN) und den liniehaften Strukturen (z.B. Straßen) vor Ort, entlang derer die Anlage einer neuen Deichlinie leichter realisiert werden kann.

Für das Untersuchungsgebiet Wangerland werden zwei Varianten für die Anlage 2. Deichlinien vorgestellt und diskutiert. Variante I riegelt das Hinterland mit einer 2. Deichlinie, die südlich von Minzen bis südlich von Horumersiel entlang läuft, ab. Die zwischen den beiden Deichlinien liegenden Ortschaften werden dabei von einem Ringdeich um die Ortschaft zusätzlich geschützt. Die zweite Variante riegelt das Hinterland nicht komplett ab, sondern schützt die Ortschaften mit einer sie umgebenden Deichlinie. Bei beiden Varianten bleibt der Hauptdeich in seiner jetzigen Form bestehen.

Die Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Überflutungssimulation der beiden Varianten, beide berechnet für die Sturmflut 3./4. Januar 1976. Es zeigt sich, dass bei Variante I die Überflutungsausdehnung durch die Abriegelung des Hinterlandes um ungefähr 90 % reduziert wird, während bei Variante II fast gleiche Überflutungsausdehnung erreicht wird wie ohne zusätzliche Deichanlage. Die Verringerung der Ausdehnung führt jedoch durch die eingeschränkte Ausbreitungsmöglichkeit des Wassers zu höheren Wasserständen auf den überfluteten Flächen. Während Variante II im Wesentlichen Wasserstände von bis zu 0,5 m Höhe aufweist, treten bei Variante I Wasserstände zwischen 0,5 und 0,75 m bzw. zwischen 1,5 und 1,75 m Höhe auf.

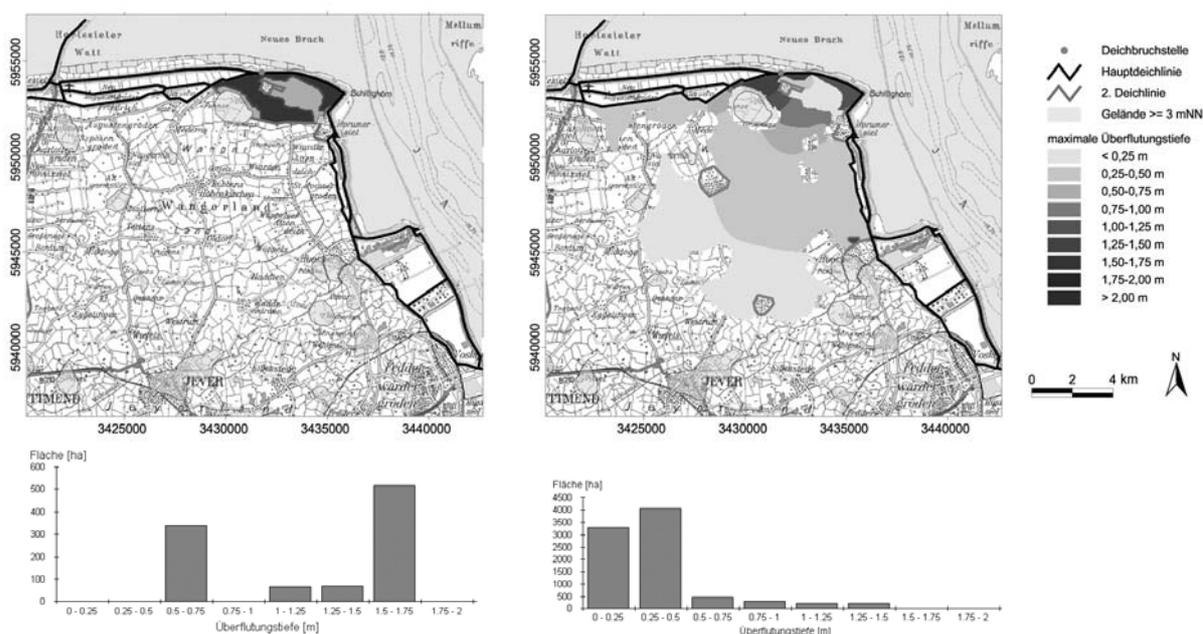


Abb. 10: Überflutungssimulation mit 2. Deichlinie, Variante I (links) und Variante II (rechts) mit jeweiligem Histogramm der maximalen Überflutungstiefen

Die Analyse der zu erwartenden Schäden ergibt für Variante I eine Verringerung des Schadens auf 23 Mio. Euro und damit eine Reduzierung des Risikos um ca. 66%. In Variante II ist ein Schaden von ca. 48 Mio. Euro zu erwarten, wodurch sich eine Risikominderung von ca. 30% ergibt. Diesem reduzierten Risiko stehen jedoch Bau- und Unterhaltungskosten für die zusätzliche Deichlinie gegenüber. Wird als Abschätzung der Deichbaukosten 1.000 Euro je Meter Deichlänge und -höhe veranschlagt, ergeben sich für Variante I Baukosten von 13 Mio. Euro für die etwa 10 km lange neu zu errichtende Deichlinie bzw. 20 Mio. Euro für 17 km Deichlänge in Variante II. Auf die Lebensdauer der Deiche (Abschreibungszeitraum von 100 Jahren) bezogen, ergeben sich somit für Variante I Kosten (ohne Diskontierung) von 130 Tsd Euro/a bzw. 200 Tsd Euro/a für Variante II.

## 7 Zusammenfassung

Die Anwendung der probabilistischen Risikoanalyse auf das Küstenschutzsystem Wangerlands verdeutlicht die Wirkung des Klimawandels auf die Sicherheit der Küstenregion. So wird sich die Wahrscheinlichkeit eines Deichversagens bis zum Jahr 2050 etwa um den Faktor 5 reduzieren. Als Reaktion darauf sind die Küstenschutzstrategien „Erhöhung bestehender Deiche“ und „Anlage einer 2. Deichlinie“ auf ihre Effektivität untersucht worden.

## Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“ ([www.krim.uni-bremen.de](http://www.krim.uni-bremen.de)) durch das Teilprojekt „Klimaänderung und Küstenschutz“ (Projektnr. 01 LD 0014) erarbeitet worden.

## Literatur

- Ausschuß für Küstenschutzwerke (2002): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuß für Küstenschutzwerke, Die Küste, H. 65, 589 S., Heide i. Holstein.
- Blischke, H. (2001): Küstenschutz im II Oldenburgischen Deichband. Hrsg. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz, Betriebsstelle Brake, H. 1, 153 S., Brake.
- Centre for Civil Engineering Research and Codes (1990): Probabilistic Design of Flood Defences, CUR Report 141, 154 S., Gouda, The Netherlands.
- de Wolf, P., Verwaest, T. (1999): European Survey of Risks, Safety Standards and Probabilistic Techniques: Belgium. Kurzbericht der Coastal Waterways Division, Oostende, Belgien.
- Elsner, A., Mai, S., Meyer, V., Zimmermann, C. (2003): Integration of the flood risk in coastal hinterland management. Proc. of the Int. Conf. CoastGis, Genua, Italy.
- Jensen, J., Frank, T., Zimmermann, C., Mai, S., Rosenhauer, W., Meiswinkel, R., Barg, G. (2003): Neue Verfahren zur Abschätzung von seltenen Sturmflutwasserständen. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, H. 11, S.68-78, Hamburg.
- Jorrisen, R.E. (2000): Coastal Flood-Risk Management in the Netherlands. Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 85, S. 77-90, Hannover.
- Kortenhaus, A. (2003): Probabilistische Methoden für Nordseedeiche. Dissertation am Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Braunschweig, 154 S., Braunschweig.
- Lastrup, C. (2000): Probabilistic Design for Coastal Defence in Denmark. Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 85, S. 91-96, Hannover.
- Lüders, K., Leis, G. (1964): Niedersächsisches Deichgesetz, Kommentar. Verlag Wasser und Boden, 196 S., Hamburg.
- Mai, S., Daemrich, K.-F., Zimmermann, C. (2003): Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs an der Kaje eines geplanten Containerterminals. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 89, S. 84-104, Hannover.
- Mai, S., Elsner, A., Meyer, V., Zimmermann, C. (2004): Präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement als Reaktion auf den Klimawandel. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 54. Band, Hamburg.
- Mai, S., von Lieberman, N. (1999): Untersuchungen zum Risikopotential einer Küstenregion. Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 83, S. 292-320, Hannover.
- Mai, S., Zimmermann (2003): Risk Analysis - Tool for Integrated Coastal Planning. Proc. of the 6th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC, CD-ROM, Colombo, Sri Lanka.
- Meyer, V., Mai, S. (2003): Verfahren zur Berechnung der Schäden nach Deichbruch an der niedersächsischen Küste. Tagungsband der 21. Jahrestagung des Arbeitskreises "Geographie der Meere und Küsten" (AMK), Essener Geographische Arbeiten, Band 35, S. 169-178, Essen.
- Meyer, V., Mai, S. (2004): Überflutungsschäden im Küstenhinterland nach Deichbruch. Wasserwirtschaft, Wiesbaden.
- Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein (2001): Generalplan Küstenschutz - Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein, Eigenverlag, S. 76, Kiel
- Probst, B. (1994): Überlegungen für einen Küstenschutz der Zukunft. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 75, S. 52-68, Hannover.
- Zimmermann, C., Mai, S. (1998): Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Nr. 6, S. 67-70, Hamburg.

## **Adresse**

Dipl.-Geogr. Anne Elsner  
Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Stephan Mai  
Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann  
Universität Hannover  
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen  
Nienburger Straße 4  
30167 Hannover

E-mail: [anne.elsner@fi.uni-hannover.de](mailto:anne.elsner@fi.uni-hannover.de), [stephan.mai@fi.uni-hannover.de](mailto:stephan.mai@fi.uni-hannover.de), [zi@fi.uni-hannover.de](mailto:zi@fi.uni-hannover.de)