

Präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement als Reaktion auf den Klimawandel

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. S. Mai, Dipl.-Geogr. A. Elsner, Dipl.-Geogr. V. Meyer, Dipl.-Ing. N. Ohle, Prof. Dr. Ing. C. Zimmermann

Infolge des anthropogen beschleunigten Klimawandels wird sich der säkulare Meeresspiegelanstieg in den nächsten 100 Jahren etwa verdoppeln. Gleichzeitig ist eine Intensivierung der Nordwestwinde sowie des Seegangs im Bereich der Deutschen Bucht zu erwarten. Dieser Anstieg der Belastungen des Küstenschutzsystems wird zukünftig die Kosten zur Wahrung des bestehenden Sicherheitsniveaus erheblich vergrößern und stellt das Küstenschutzmanagement vor neue Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Allokation begrenzter finanzieller Ressourcen. Um diesem Problem Rechnung zu tragen, muß das heutige Küstenschutzmanagement neben der Betrachtung der Küstenschutzanlagen zukünftig vermehrt auch die Schutzgüter im Hinterland berücksichtigen. Die probabilistische Risikoanalyse bietet sich als Methodik für diese Integrationsaufgabe an. Denn die Risikoanalyse ermöglicht einerseits aufgrund ihrer wahrscheinlichkeitstheoretischen Fundierung die Quantifizierung zukünftiger Klimawirkungen auf die Sicherheit des bestehenden Küstenschutz – sie ist damit Grundlage jeder Prävention – und integriert andererseits auch das geschützte Hinterland. Für die deutsche Nordseeküste im Gebiet der Jade und Weser werden beispielhaft diese Möglichkeiten herausgearbeitet und sowohl die Klimawirkungen als auch Anpassungsmöglichkeiten des Küstenschutzes beleuchtet.

1 Grundlagen der Risikoanalyse

Die zwei wesentlichen Bausteine der Risikoanalyse im Küsteningenieurwesen sind die Wahrscheinlichkeit p_f eines Versagens des Küstenschutzsystems, z. B. das Eintreten eines Deichbruches, auf der einen Seite und der Schaden C als Folge dieses Versagens, z.B. die Zerstörung des Wertbestands im Hinterland infolge Überflutung, auf der anderen Seite. Aus diesen folgt das Risiko R entsprechend folgender Definition [11]:

$$\begin{aligned} \text{Risiko} &= \text{Versagenswahrscheinlichkeit} \cdot \text{Schaden} \\ R &= p_f \cdot C \quad (1) \end{aligned}$$

Neben dieser technisch-naturwissenschaftlichen Definition des Risikos finden in nicht-technischen Fachrichtungen, wie Soziologie und Politologie, teilweise erheblich abweichende Risikodefinitionen Verwendung, was bei der Kommunikation der Ergebnisse der Risikoanalyse zu berücksichtigen ist. Einen Überblick über mögliche Risikodefinitionen und ihre Abstimmung auf die Fragestellung des Küstenschutzes ist in [13] gegeben.

Die Versagensfolgen entsprechen bei konservativer Abschätzung dem Schadenspotential C_{\max} , d.h. dem bei Versagen des Küstenschutzsystems betroffenen Wertbestand im Hinterland. Eine Teilschädigung dieses Wertbestands wird mit Hilfe des Schädigungsgrad ϕ , welcher durch sog.

Due to the acceleration of climate change a doubling of the rate of sea level rise is expected within the next 100 years. At the same time north-westerly winds and waves will intensify in the German Bight. As a consequence hydraulic loads and therefore costs of future coastal defence works in order to secure today's safety standard will increase. This requires new strategies of coastal defence management to guarantee a balance allocating of limited financial resources. In order to cope with this problem coastal defence management has to consider the protected hinterland in addition to today's focus on coastal defence works. Probabilistic risk analysis provides a methodology for this integrating task. Risk analysis allows the quantification of future climate changes on the safety level of the present coastal defence systems because of its probabilistic nature and includes the coastal hinterland with its uses. The feasibility of this method is shown for the Jade and Weser estuary at the German North Sea coast. In addition some response strategies adapting the coastal defence management to climate change are given.

Schadensfunktionen z.B. über die bei Überflutung zu erwartende Wassertiefe parametrisiert werden kann, berücksichtigt. Für den Folgeschaden gilt dann:

$$C = C_{\max} \cdot \varphi \quad (2)$$

Erläuterungen zur Methodik der Abschätzung des Schadenpotentials C_{\max} sind in Kapitel 3 gegeben und werden am Beispiel des Stadtgebiets und Umlands von Bremerhaven illustriert. Der aus diesem bei Versagen des Küstenschutzsystems abzuleitende Schaden wird in Kapitel 4 am Beispiel eines Deich- bzw. Schleusenversagens diskutiert. Dieses behandelt in Kapitel 4.1 die Verfahren zur Ausweisung des zu erwartenden Überflutungsgebiets und gibt in Kapitel 4.2 Beispiele für typische Schadensfunktionen und den sich für diese ergebenden Schäden. Im folgenden Kapitel 2 werden die Vorgehensweise zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von Küstenschutzsystemen sowie die Änderung des Sicherheitsniveaus bei Klimaänderung behandelt. In Kapitel 5 werden auf der Basis des aus Versagenswahrscheinlichkeit und Folgeschaden berechneten Risikos Hinweise auf mögliche Reaktionsstrategien des Küstenschutz-

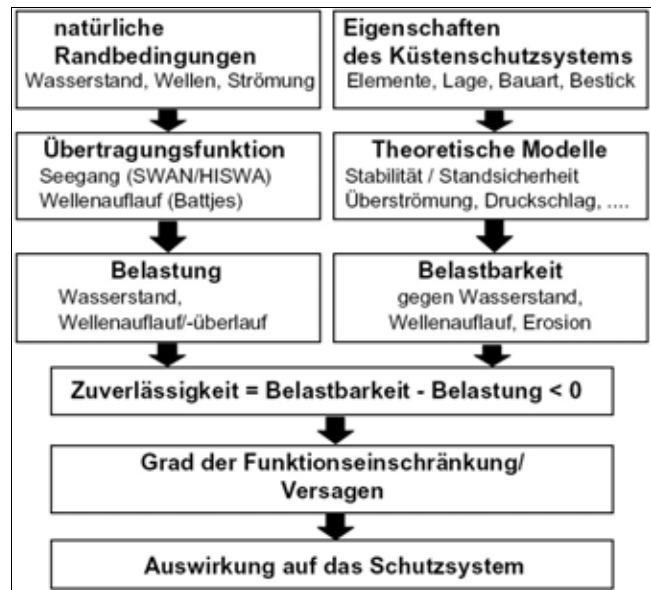


Abb. 1-2: Ablaufdiagramm von Zuverlässigkeitsanalysen im Küstenschutz [16]
flow diagram of a reliability analysis of the coast defence system

management auf den Klimawandel gegeben. Die Abbildung 1-1 verdeutlicht die Arbeitsschritte der Risikoanalyse und ihren Abfolge.

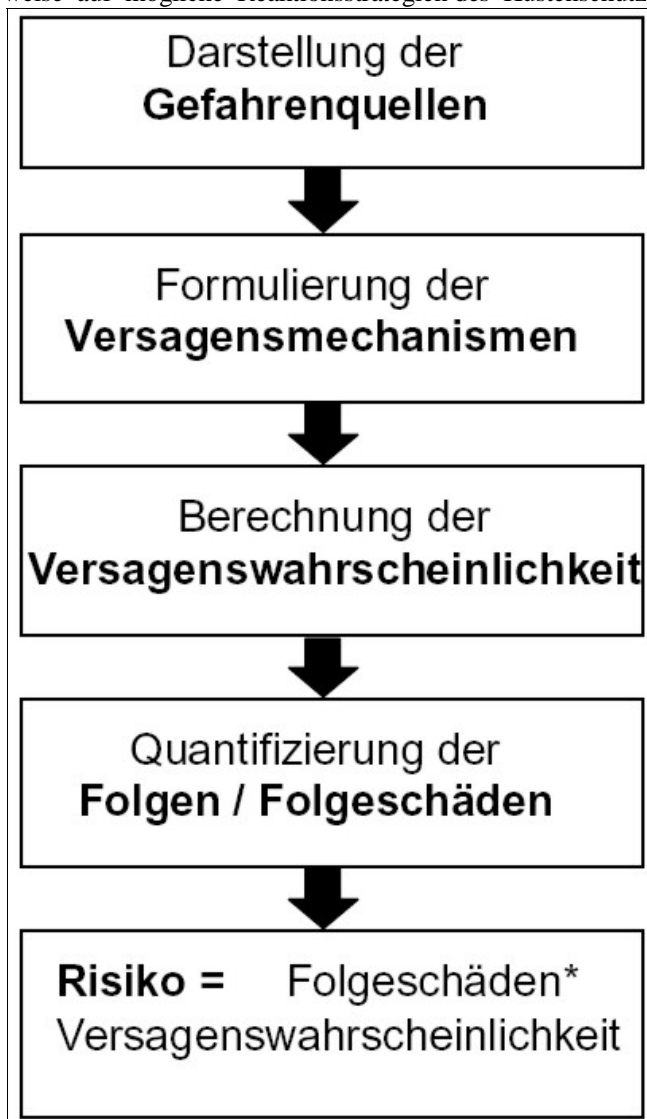


Abb. 1-1: Teilaufgaben der Risikoanalyse [16]/Subtasks of risk analysis

2 Sicherheitsniveau von Küstenschutzsystemen

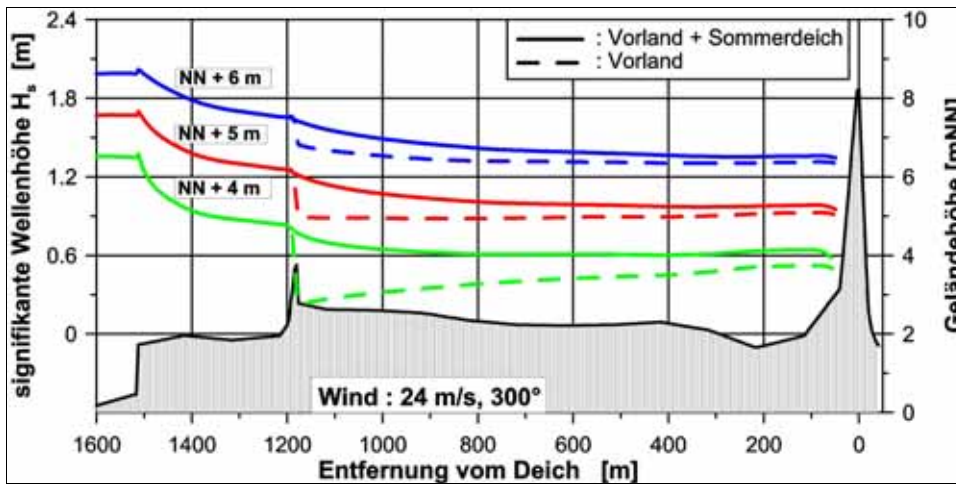
2.1 Methodik der Sicherheitsanalyse

Die Grundlage der Zuverlässigkeitsanalyse von Küstenschutzsystemen bildet die Gegenüberstellung von hydrodynamischer Belastung, welche durch Tidewasserstände und -strömungen sowie Seegang bedingt ist, und funktioneller / struktureller Belastbarkeit des Schutzsystems (Abbildung 2-1). Bestandteile des Küstenschutzsystems sind neben den Hauptschutzelementen, wie Hauptdeich oder Sperrwerk, auch vorgelagerte Schutzelemente, wie Watt, Lahnung, Vorland und Sommerdeich, welche durch Abminderung der hydrodynamischen Belastung auf das Hauptschutzelement die Sicherheit erhöhen. Die Abbildung 2-2 verdeutlicht diese Reduktion der Belastungen beispielhaft für die Schutzelemente Vorland und Sommerdeich.

Der Vergleich von Belastung und Belastbarkeit des Küstenschutzsystems, d.h. des Hauptschutzelements, ist in diesem Zusammenhang auf der Grundlage der traditionellen deterministischen Bemessung möglich. Für den Hauptdeich ergibt sich somit z.B. folgende Grenzzustandsfunktion oder Zuverlässigkeitsfunktion Z

$$Z = h_D - Thw - R_{98\%} = h_D - Thw - 1,95 \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{H_s} \cdot T_m \cdot \tan(\alpha_D)$$

welche Bauwerkseigenschaften – Deichhöhe h_D und –neigung α_D sowie Form (Böschungsrauhheit, Vorhandensein einer Berme, Orientierung des Deichs), berücksichtigt durch den Beiwert γ – den Belastungen – Tidehochwasserstand Thw und Seegang einer signifikanten Wellenhöhe H_s und



links:
Abb. 2-1: Abminderung der hydrodynamischen Belastung durch die dem Hauptdeich vorgelagerten Küstenschutz-elemente Vorland und Sommerdeich [7]

Reduction of wave load on the main dike by coastal defence elements foreland and summer dike

unten:
Abb. 2-2: Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit des Tidehochwassers am Pegel Bremerhaven (Stand 2000 und Projektion auf 2050)

Annual probability of tidal high water levels at the gauge Bremerhaven (status quo and scenario of the year 2005)

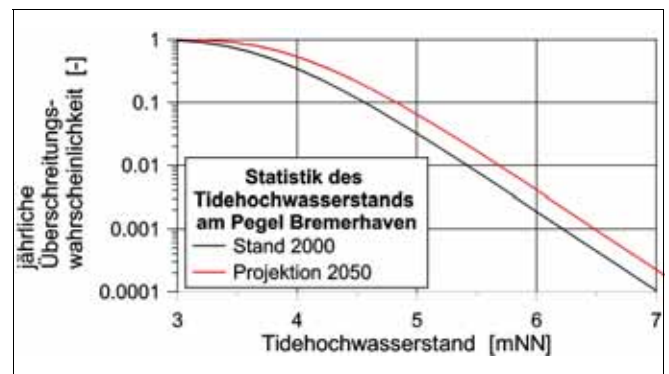
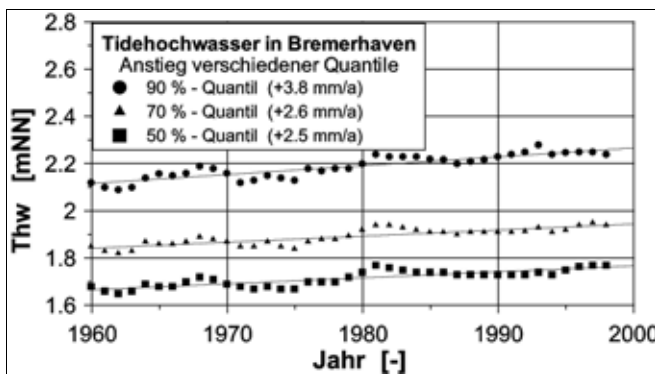


Abb. 2-3: Zeitreihe von 50 %-, 70 %- und 90 %-Quantil des Tidehochwasserstands am Pegel Bremerhaven

Time series of the 50, 70 and 90 percentile of the tidal high water level at the gauge Bremerhaven

einer mittleren Wellenperiode T_m – gegenüberstellt. Ein Versagen des Hauptdeichs, im Sinne einer Überschreitung des Grenzzustands, liegt im Fall negativer Werte $Z < 0$ der Zuverlässigkeitsfunktion vor. Für die Versagenswahrscheinlichkeit $p_{Z < 0}$ folgt somit aus der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Belastungen $p_{Thw, R_{98}}$ und der Belastbarkeit p_{h_D} nach

$$p_{Z < 0} = \iiint p_{Thw, R_{98}}(Thw, R_{98}) \cdot p_{h_D}(h_D) \cdot (1 - H(h_D - Thw - R_{98})) \, dThw \, dR_{98} \, dh_D$$

mit

$$H(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}$$

2.2 Bemessungsgrößen und ihre Änderung bei Klimawandel

Die Belastungen auf das Küstenschutzsystem haben sich infolge des Klimawandels in den letzten Jahrzehnten deutlich erhöht. Für den Tidehochwasserstand ist dies unmittelbar aus den zur Verfügung stehenden langjährigen Pegelmessungen abzuleiten (Abbildung 2-3). Für den Pegel Bremerhaven (Alter Leuchtturm) zeigt sich ein Anstieg des 50 %-Quantils des Thw (entspricht etwa dem MThw) um ca. 2,5 mm/a. Für seltenere Ereignisse ergibt sich im Vergleich

dazu eine größere Erhöhung, so steigt z.B. das 90 %-Quantil des Thw um 3,8 mm/a an. Dieser Anstieg des Tidehochwasserstands wird sich infolge eines sich anthropogen bedingt beschleunigenden Klimawandels weiter erhöhen. Durch Downscaling der Prognosen globaler Klimamodellierungen [14] ergibt sich bis zum Jahr 2050 ein zusätzlicher Anstieg des jährlichen 99 %-Quantils um 7,5 cm. Für die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit, welche durch Anpassung einer Log-Pearson-3-Verteilung an die jährlichen Tidehochwasserstände ermittelt worden ist, ergeben sich so die in Abbildungen 2-4 dargestellten Veränderungen.

Eine Analyse langjähriger Trends für den Seegang an der deutschen Nordseeküste ist aufgrund der geringen Datenbasis ungleich schwieriger. Charakteristisch für die Deutsche Bucht ist ein Anstieg des 99 %-Quantils der signifikanten Wellenhöhe um etwa 1,8 cm/a [15]. Zukünftig wird sich dieser Anstieg der signifikanten Wellenhöhe aufgrund der klimaänderungsbedingten Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit, welche etwa 0,2 m/s beträgt [14], weiter erhöhen. Die Quantifizierung der Änderungen in der küstennahen Seegangstatistik infolge einer geänderten Wasserstands- und Windstatistik ist unter Verwendung zweidimensionaler numerischer Seegangssimulationen möglich [8]. Die Abbildung 2-5 stellt beispielhaft die Seegangsbedingungen im Jade-Weser-Ästuar für eine Sturmflut des Jahres 1999 dar. Für eine Projektion dieser Sturmflut auf das Jahr 2050 werden außerdem die Änderungen in der signifikanten Wellenhöhe zum Zeitpunkt des HThw wiedergegeben. Im Vergleich zur Tidehochwasserstatistik weist die Statistik des küstennahen Seeganges eine nur geringe Veränderung als

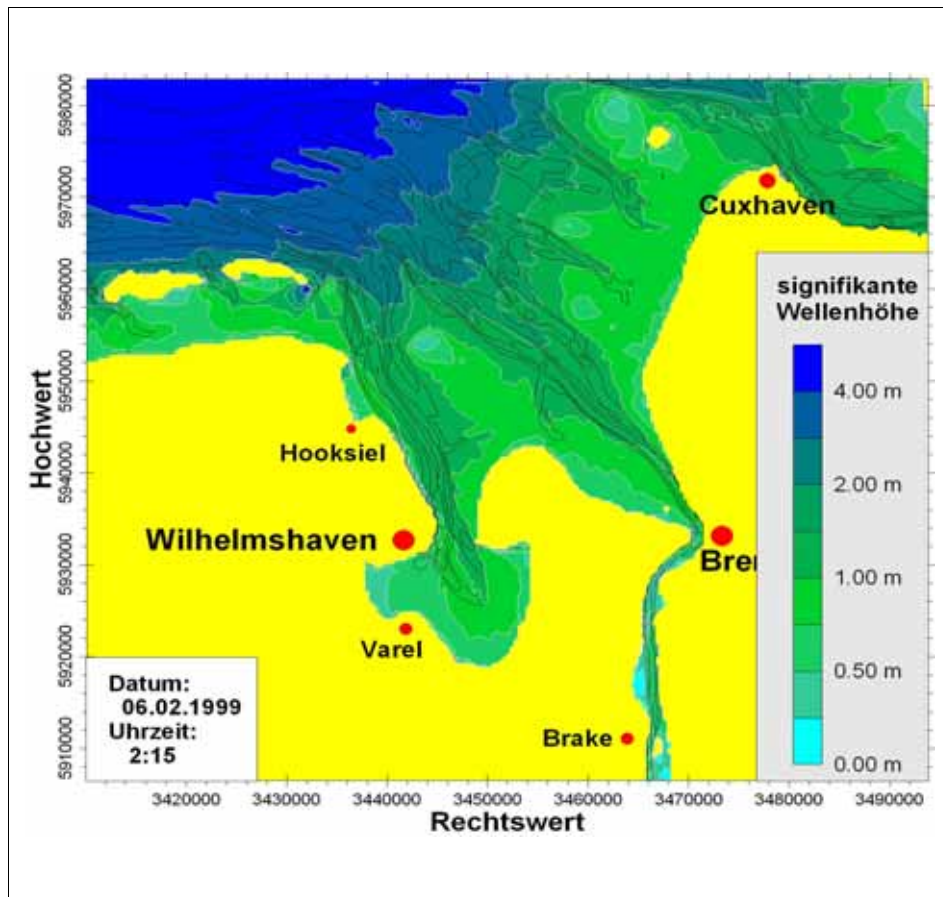


Abb. 2-4: Seegangsbedingungen im Jade-Weser-Ästuar während der Februar-Sturmflut des Jahres 1999 (oben) und Prognose der Änderung bei Projektion auf das Jahr 2050 – Ergebnisse einer numerischen Simulation mit dem Modell SWAN

Wave conditions in the estuary of Jade and Weser during the storm surge in February 1999 and prognoses of the change to be expected in the year 2050 – results of numerical simulations with the model SWAN

Folge der Klimaänderung auf. Die Abbildung 2-6 verdeutlicht dies am Beispiel der Seegangsbelastung des Bremerhavener Lohmanndeichs.

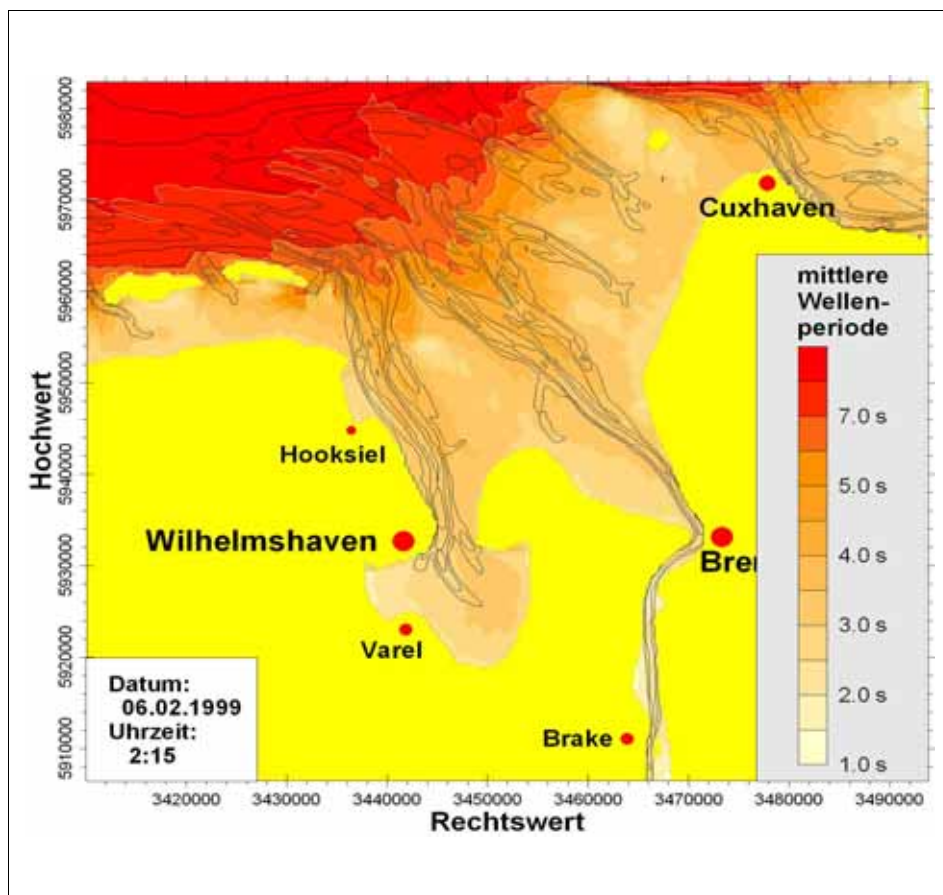
2.3 Sicherheit der Deiche an der Außenweser

Die in Kapitel 2.2 dargestellten, mit dem Klimawandel einhergehenden Änderungen der Belastungen durch Tidehochwasserstand und Seegang führen zu einer erheblichen Verminderung der Sicherheit der bestehenden Küstenschutzsysteme. Die Anwendung der in Kapitel 2.1 erläuterten Methodik der Sicherheitsanalyse auf die Hauptdeiche an der Außenweser zwischen Cuxhaven und Bremerhaven verdeutlicht dies (Abbildung 2-7). Derzeit beträgt die jährliche Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs an dem untersuchten Küstenabschnitt maximal 1/500. Sie erhöht sich unter Voraussetzung eines unveränderten Küstenschutzsystems infolge Klimaänderung bis zum Jahr 2050 um den Faktor 3 bis 3,5.

3 Analyse der geschützten Werte im Hinterland

3.1 Erhebung des Wertbestands der Küstengemeinden an der Außenweser

Mit dem Versagen des Küstenschutzsystems geht eine Gefährdung des gesamten Wertbe-



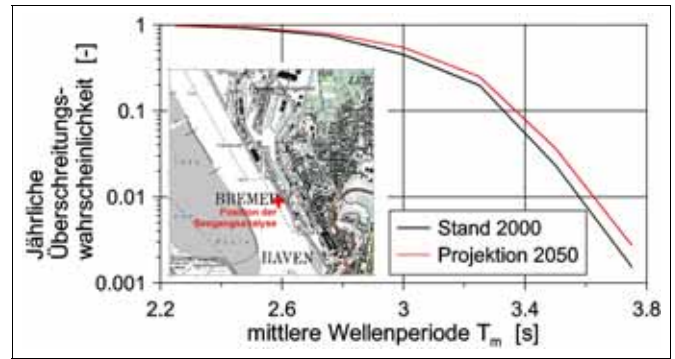
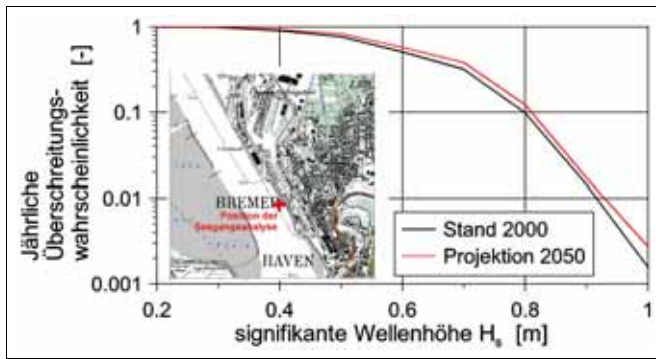


Abb. 3-1: Statistik der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Wellenperiode vor dem Lohmanndiech in Bremerhaven (Stand 2000 und Projektion 2050)
 Statistics of significant wave height and mean period in front of the Lohmanndiech in Bremerhaven (status quo and scenario for the year 2050)

Wertkategorie	Bremerhaven	Wangerland
Einwohner	122741	10071
Vermögenswerte (in Mio €)		
Wohnkapital	4277	358
Hausrat	1710	199
Wert des PKW-Bestandes	454	51
Nettoanlagevermögen ¹	4358	198
Vorratsvermögen ²	494	7
Wert Viehbestand ³	0,3	22
Öffentliche Freiflächen	33	4
Straßen	338	203
Bahnliesen	12	0
Bruttowertschöpfung (in Mio EUR)	3144	124
Bodenwerte (in Mio €)	3269	546

¹ abzüglich Wohnkapital, öffentliche Freiflächen, Straßen und Bahnliesen
² abzüglich Viehbestand
³ 1999

Tabelle 3-1: Schadenspotentiale in der Stadt Bremerhaven und der Gemeinde Wangerland (2000)
 Loss potential of the city of Bremerhaven and the municipal of Wangerland (status quo)

stand in der geschützten Küstenregion einher. Zur Ermittlung dieses Schadenpotentials innerhalb eines größeren Untersuchungsgebiets ist es dabei aufgrund des hohen Aufwands wenig praktikabel, die vorhanden Wertobjekte (Gebäude, PKW etc.) einzeln zu erfassen und zu bewerten. Stattdessen wird eine sogenannte mesoskalige Methodik verwendet, bei der die einzelnen Wertkategorien (vgl. Tab. 3.1) mittels sekundärstatistischer Quellen erhoben werden [9]. Für die meisten Wertkategorien bilden amtliche Statistiken die maßgebliche Quelle für die Quantifizierung. Die kleinste räumliche Ebene, auf der die entsprechenden Werte veröffentlicht werden, sind die Städte bzw. Gemeinden. Mehrere Wertbereiche liegen allerdings in der amtlichen Statistik nicht auf Gemeindeebene vor. So müssen das Anlage- und Vorratsvermögen der unterschiedlichen Wirtschaftsbereiche von der Landesebene über die Beschäftigtenzahl auf die jeweiligen Städte bzw. Gemeinden heruntergebrochen werden. D.h. es wird auf Landesebene eine wirtschaftsbereichspezifische Kapitalintensität pro Beschäftigten berechnet und diese mit der Beschäftigtenzahl des jeweiligen Wirtschaftsbereichs auf



Abb. 3-2: Jährliche Wahrscheinlichkeit eines Wellenüberlauf an den Hauptdeichen zwischen Cuxhaven und Bremerhaven (Stand 2000 und Projektion 2050)
 Annual probability of wave over topping at main dikes between Cuxhaven and Bremerhaven (status quo and scenario for the year 2050)

Stadt- bzw. Gemeindeebene multipliziert.

Neben den amtlichen Statistiken werden z.B. für die Erhebung des Hausratsvermögens Versicherungswerte verwendet, der Wert der im Untersuchungsgebiet liegenden Straßen mittels durchschnittlicher Baukosten des Niedersächsischen Landesamtes für Straßenbau ermittelt oder die Bodenwerte mit Hilfe von Grundstücksmarktberichten erhoben. Die für die Stadt Bremerhaven und die Gemeinde Wangerland ermittelten Schadenspotentiale zeigt Tabelle 3-1.

3.2 Verortung des Wertbestands im Hinterland

Eine Gleichverteilung dieser Werte über die Stadt- bzw. Gemeindefläche wäre jedoch wenig realitätsnah. Vielmehr ist davon auszugehen, daß sich die Schadenspotentiale in den Siedlungen, vor allem den Städten, konzentrieren. Die einzelnen Wertkategorien werden deshalb in einem zweiten Schritt innerhalb der Städte bzw. Gemeinden auf ihnen entsprechenden Flächennutzungen verortet. Dies geschieht mit Hilfe der digitalen Flächennutzungsdaten des Digitalen Landschaftsmodells des Amtlichen Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS-Basis-DLM) unter Verwendung der GIS-Software ArcView. So wird z.B. das Anlagevermögen des produzierenden Gewerbes auf die ATKIS-Flächennutzungskategorie „Industrie- und Gewerbefläche“ verortet, das Wohnkapital auf die Kategorien „Wohnbauflächen“ und „Flächen gemischter Nutzung“ oder das Viehvermögen auf die Kategorie „Grünland“ [10].

Die so entstandenen Karten für jeden Wertbereich lassen sich mittels des GIS überlagern und addieren. Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 zeigen die räumliche Verteilung aller Vermögenswerte für die Stadt Bremerhaven und die Gemeinde Wangerland. Die Heterogenität der Wertkonzentration wird dabei deutlich. So stehen geringen Schadenspotentialen von unter 2 EUR/qm auf Acker- und Grünlandflächen

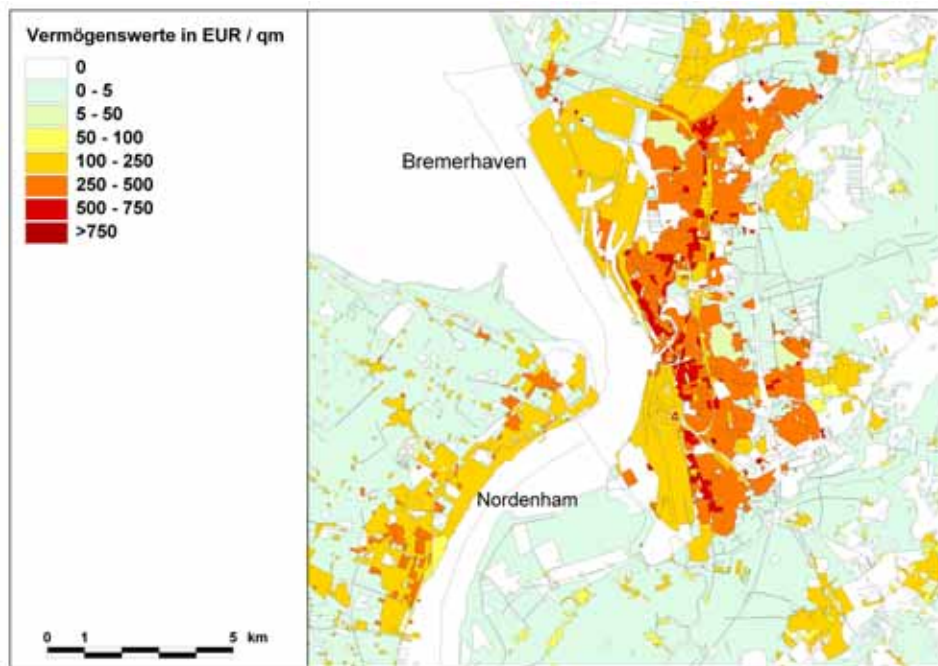


Abb. 3-3: Räumliche Verteilung der Vermögenswerte in Bremerhaven (2000)
Spatial distribution of economic assets in the city of Bremerhaven (status quo)

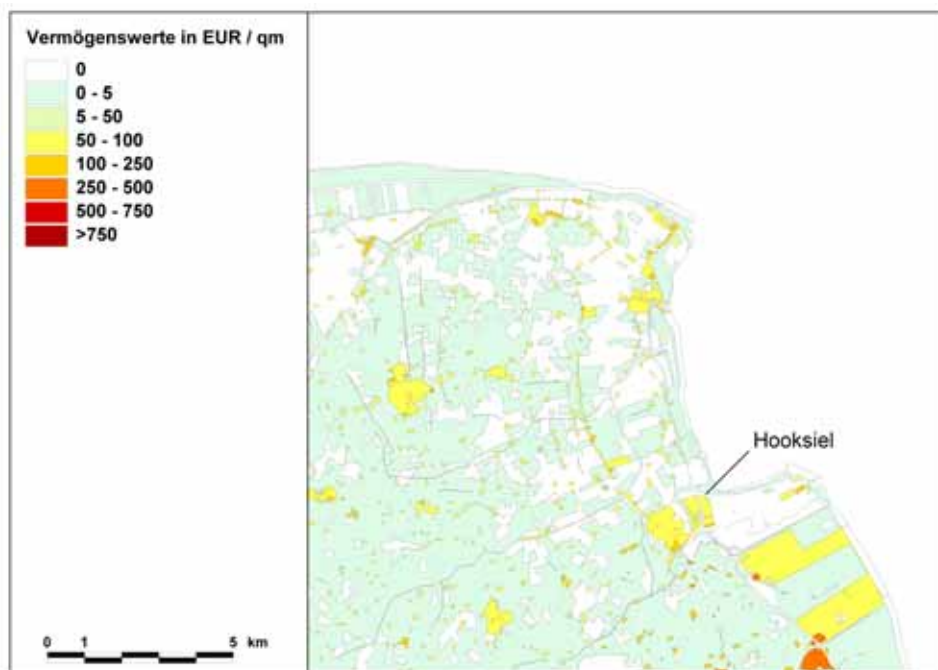


Abb. 3-4: Räumliche Verteilung der Vermögenswert an der Wangerländer Küste (2000)
Spatial distribution of economic assets in the municipality of Wangerland (Status quo)

hohe Wertdichten von über 50 EUR/qm in dörflichen Siedlungen und über 100 EUR/qm in Städten gegenüber. Derzeit wird versucht, die beschriebene Methodik der Verortung des Wertbestandes weiter zu verfeinern. So wird durch die Integration von Geomarketingdaten, die auf einer räumlichen Ebene unterhalb der Städte bzw. Gemeinden Informationen über Einwohnerzahlen, Kaufkraft, Firmen und Gebäude

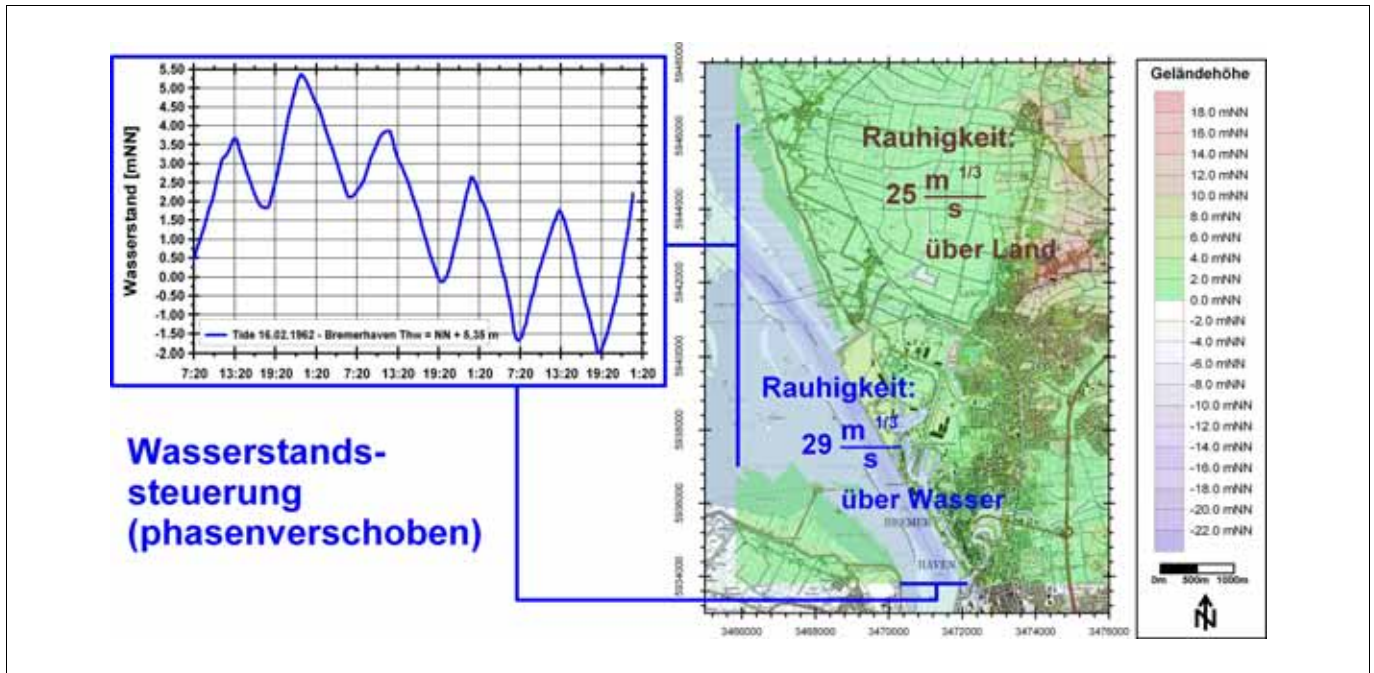


Abb. 3-5: Randbedingungen der numerischen Simulation/Boundary conditions of numerical simulations

liefern, für mehrere Wertkategorien eine differenziertere Verortung möglich. Auf diese Weise können z.B. auch innerhalb der Städte Wohnbauflächen mit hoher Einwohnerdichte von jenen mit geringer Einwohnerdichte unterschieden werden.

4 Überflutungsgefährdung der Küstengemeinden

4.1 Numerische Simulation zur Ausweisung von Überflutungsflächen

Zur Ermittlung möglicher Schäden im Hinterland ist die Ausweisung des bei Versagen des Küstenschutzsystems betroffenen Überflutungsgebiet grundlegende Voraussetzung. Vereinfachend kann die Ausweisung des Überflutungsgebiets durch die statische Verschneidungen zwischen dem maßgebenden Tidehochwasserstand bei Sturmflut und der Geländehöhe im Hinterland erfolgen [5]. Die Methodik des Verschneidens führt jedoch selbst bei einer großräumigen Zerstörung des Küstenschutzsystems zu einer erheblichen Überschätzung des Überflutungsgebiets und der in diesem zu erwartenden Überflutungswassertiefen. Eine realitätsnähere Abgrenzung der mit einem punktuellen Versagen des Küstenschutzsystems – wie es nach Kapitel 2.3 zu erwarten ist – verbundenen Überflutung ist mit Hilfe zweidimensionaler numerischer Simulationen möglich. Diese liefern neben der im Überflutungsgebiet zu erwartenden Wassertiefe auch Informationen über Überflutungsdauer und Vorwarnzeit. Letztere ist besonders für das präventive Risiko- und Katastrophenmanagement von grundlegender Bedeutung.

Für die Stadt Bremerhaven wird im folgenden die dynamische Ausweisung von Überflutungsgebieten bei Versagen einzelner Hauptküstenschutzelemente diskutiert. So werden ausgehend von den Ergebnissen der Ermittlung der

Versagenswahrscheinlichkeit (siehe Kapitel 2.3) folgende Versagensereignisse behandelt:

- Bruch des Lohmandeichs auf einer Breite von 100 m bei einer Bruchtiefe von 0 m über GOK (= 2,9 mNN)
- Vollständige Zerstörung der Toranlage der Nordschleuse, d.h. freies Einströmen durch den Schleusenquerschnitt von 45 m x 12,9 m

Den Ausgangspunkt der Simulation des Überflutungsvorgangs mit Hilfe eines zweidimensionalen Finite-Differenzen-Modell auf der Grundlage der tiefengemittelten Navier-Stokes-Gleichungen bildet das um Strukturelemente, wie Spundwände, ergänzte digitale Geländemodell DGM5 einer horizontalen Auflösung von 12,5 m. Im Bereich von Weser und Hafen ist dies durch Tiefenpeilungen von Wasser- und Schiffsamt sowie Hansestadt Bremischer Hafenamt ergänzt worden. Die Modellsteuerung erfolgt durch Vorgabe von Tidekurven am westlichen und südlichen Modellrand, welche für verschiedene Sturmflutscenarien als Szenarien der Sturmflut vom 16.02.1962 aufgestellt worden sind. Die Bodenreibung wird nach Manning-Strickler im Bereich der Wasserflächen mit einem konstanten Reibungsbeiwert von $M = 29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und im Bereich der Landflächen mit einem Reibungsbeiwert von $M = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ parametrisiert. Einen Überblick über die Randbedingungen der numerischen Simulation gibt Abbildung 4.1.

Exemplarisch zeigt die Abbildungen 4.2 die Ergebnisse der Überflutungssimulationen zu verschiedenen Zeitpunkten der Sturmflut. Im oberen Teil der Abbildung 4.2.1 ist die Strömungssituation bei Vorliegen eines Bruchs im Lohmandeich dargestellt. Infolge des großen Retentionsvermögens der hinter dem Deich liegenden abgeschleusten Hafenbecken (Alter Hafen, Neuer Hafen, Kaiserhafen, Nord- und Osthafen) und der mit NN + 2,9 m hohen, bei Deichbruch verbleibenden Restschwelle kommt es zu keiner größeren Überflutung der Flächen im Hinterland. Im Gegensatz dazu führt die im unteren Teil der Abb. 4-2.2 dargestellte Versagensszenario der Nordschleuse bereits zum Zeitpunkt des Tide-

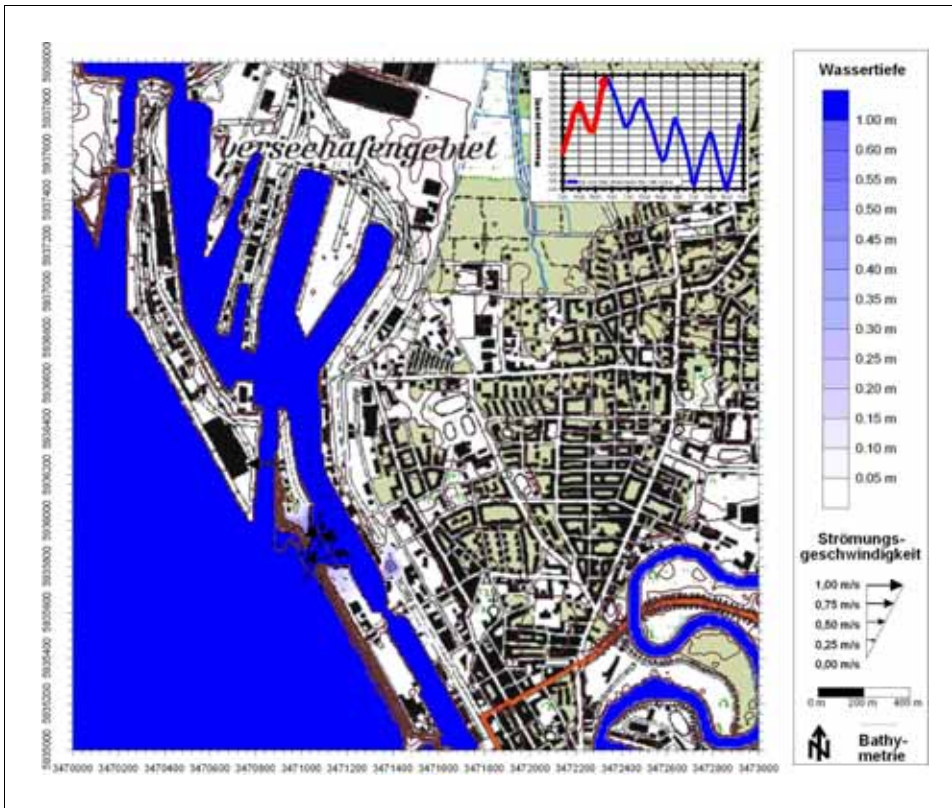


Abb. 4-2.1: Simulation der Überflutung für das Bruchscenario des Lohmanndei
Simulation of flooding after a dike breach at Lohmanndei

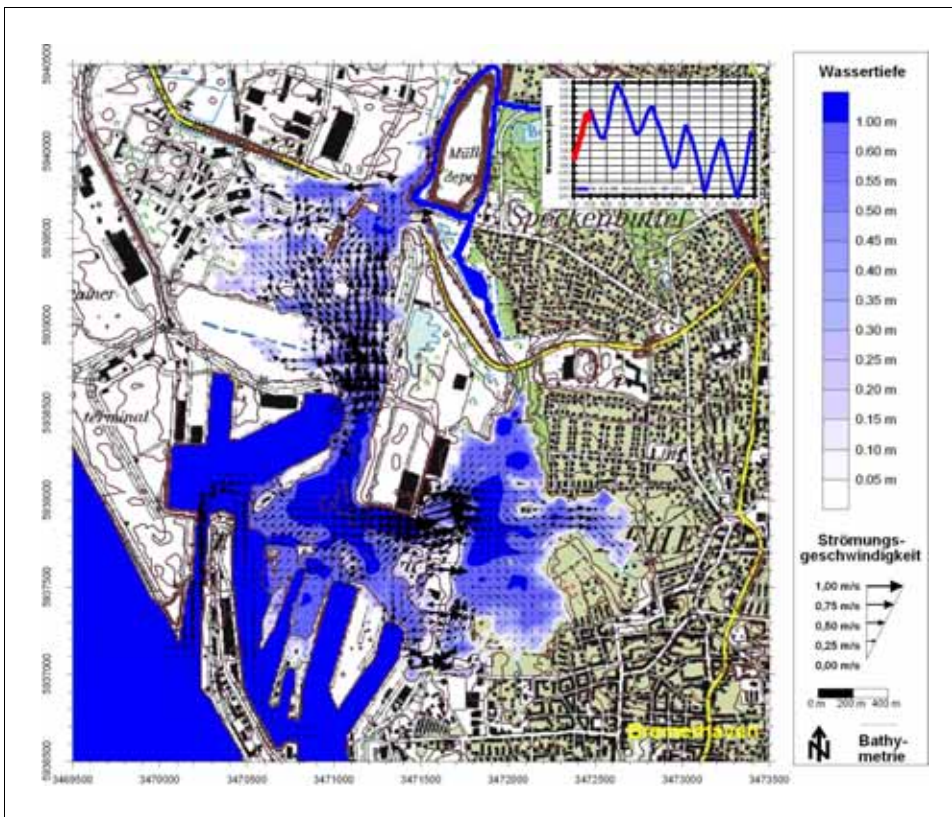


Abb. 4-1.2: Simulation der Überflutung für das Bruchscenario der Nordschleuse
Simulation of flooding in case of failure of the lock Nordschleuse

hochwassers der Vortide der 62'er Sturmflut zu einer erheblichen Überflutung des Hinterlands, da infolge des größeren Einströmquerschnitts das Retentionsvolumen der Häfen nicht mehr ausreicht. Zur im folgenden Kapitel dargestellten Ermittlung des Überflutungsschadens werden die Simulationsergebnisse zu flächenhaften Darstellungen der während der Überflutung maximal vorliegenden Wassertiefe bzw. Strömungsgeschwindigkeit zusammengefasst.

4.2 Schaden infolge Überflutung

Der Überflutungsschaden folgt aus den nach Kapitel 3 im Überflutungsgebiet vorhandenen Vermögenswerten und der nach Kapitel 4.1 ermittelten maximalen Überflutungshöhe, welche den Schädigungsgrad der Fläche bestimmt. Die Beziehung zwischen Überflutungshöhe und Schädigungsgrad wird in sogenannten Wasserstand-Schadensfunktionen angegeben, die aus empirisch gewonnenen Sachdaten abgeleitet werden. Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft die im folgenden verwendeten Schadensfunktionen [4].

Für die Berechnung des Schädigungsgrades der einzelnen Flächen sind die maximal während des Flutungsprozesses erreichten Überflutungshöhen von Bedeutung. Diese maximalen Überflutungshöhen können aus den Einzelreihen der Überflutungszeitserie herausgefiltert werden. Das gewonnene Raster enthält damit die maximale Überflutungshöhe und bildet neben den Vermögenswerten und den Schadensfunktionen die Basis der Schadensanalyse. Mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) ist eine Integration der flächenhaften Informationen über Vermögensbestand und maximale Überflutungswassertiefe sowie der Schadensfunktio-

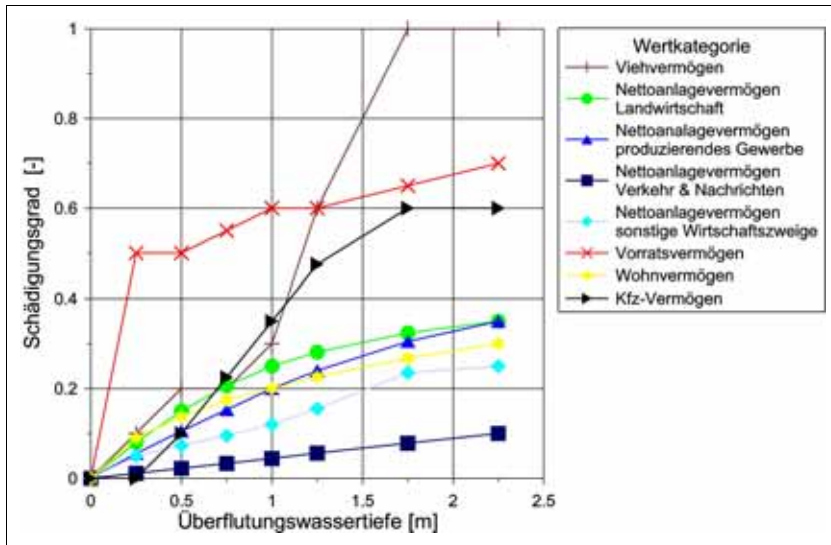


Abb. 4-3: Schadensfunktionen für verschiedene Vermögensarten ([10] nach [4])
Loss functions for different assets categories

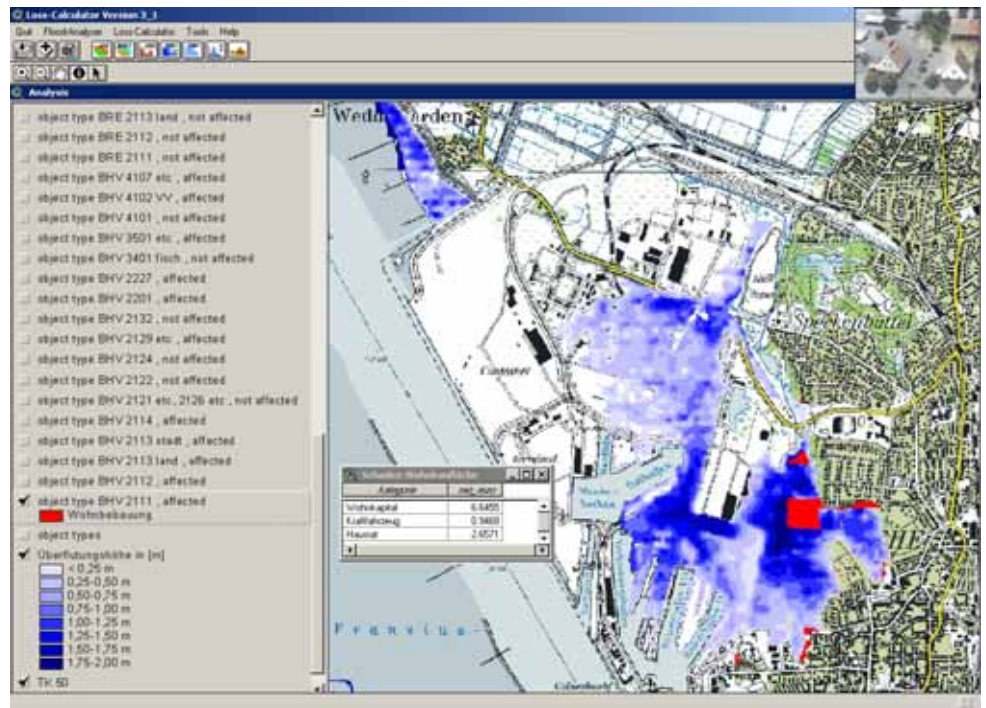
onen möglich. Zur Automatisierung der Analyse wurden die Tools "Flood-Analyser" [1] und "Loss-Calculator" [2, 3] entwickelt, in denen eine Verschneidung der einzelnen Parameter miteinander durchgeführt wird. Hierzu erfolgt eine Analyse des Nutzungstyps der überfluteten Fläche und daran anschließend eine Bestimmung der maximalen Überflutungshöhe auf dieser. Darauf aufbauende erfolgt eine Zuordnung der für die jeweilige Nutzungstypen relevanten Vermögenswertkategorien z.B. Hausrat, Wohnkapital, und damit die Festlegung der in Abhängigkeit



Abb. 5-1: Risiko aus Deichversagen für das Küstenhinterland an der Außenweser
Risk of dike failure for the coastal hinterland

von der Wertkategorie anzuwendenden Schadensfunktionen. Mit dieser wird der Schadensgrad für die einzelnen nutzungstyp-spezifischen Wertkategorien ermittelt. Durch Multiplikation des Schadensgrads mit dem Vermögenswert (vgl. Gl. (2)) der Kategorie ergibt sich schließlich der Schaden für die einzelne Wertkategorie. Die Addition aller relevanten Wertkategorie ergibt den Gesamtschaden des Nutzungstyps. Abbildung 4-4 zeigt die abgeschlossene Analyse der Schadensberechnung der in Kapitel 4.1 dargestellten Überflutungssimu-

Abb. 4-2: Schadensanalyse der simulierten Überflutung in Bremerhaven am Beispiel der Wohnbauflächen (Screenshot)
Loss analysis for a flooding in Bremerhaven, example of housing areas)



	Risiko eines Deichabschnitts [in €/a]	
	2000	Projektion 2050
Spieka-Neufeld	20.000,-	80.000,-
Wremen	86.000,-	380.000,-
Bremerhaven (Position 1)	112.000,-	452.000,-
Bremerhaven (Position 2)	247.000,-	980.000,-

lation in Bremerhaven. Die Analyse des Nutzungstyps "Wohnbaufläche" ergibt, dass sich der zu erwartende Schaden auf 10,2 Mio EUR belaufen würde. Dieser Wert setzt sich zusammen aus 6,6 Mio EUR für Wohnkapital, 2,6 Mio EUR für Hausrat und 0,9 Mio EUR für Kraftfahrzeuge. Der für alle Nutzungstypen berechnete Gesamtschaden der Überflutung beträgt als Ergebnis etwa 56,1 Mio EUR. Dieser Wert ist eher als Untergrenze des zu erwartenden Schadens anzusehen, da besonders in dem von Überflutung betroffenen Überseehafen kleinräumig mit überdurchschnittlicher Wertkonzentration (PKW-Import und -export) zu rechnen ist, welche in der verwendeten mesoskaligen Wertermittlung nicht erfasst wird.

5 Risiko- management

5.1 Sturmflutrisiko der Küstengemeinden an der Außenweser

Die Analyse des Überflutungs-
schadens für andere Orte eines
Versagens ermöglicht die Zu-
ordnung einer Schadensprognose
zu der gesamten Küstelinie
[10]. In Kombination mit der
in Kapitel 2.3, ebenfalls längs
der Küste, dargestellten
Versagenswahrscheinlichkeiten
folgt so nach Gleichung (1) das
Risikoprofil der Küstelinie.
Die Abbildung 5-1 stellt dieses
Risikoprofil beispielhaft für die
bereits in Abbildung 2-7 be-
handelte Region dar. Es zeigt
sich, daß derzeit das Küsten-
schutzsystem weder eine ein-
heitliche Versagenswahrschein-
lichkeit aufweist noch ein ein-
heitliches Sturmflutrisiko ge-
währleistet. Infolge des in Ka-
pitel 2.2 dargestellten bis 2050
zu erwartenden Klimawandels
ist unter Voraussetzung unver-
änderter Küstenschutzanlagen
und Hinterlandnutzungen mit
einem Anstieg des Risikos um
den Faktor 4 bis 4,5 zu rechnen,
da infolge des steigenden Was-
serspiegels neben dem Anstieg
der Versagenswahrscheinlich-
keit auch eine Vergrößerung
des Überflutungsgebiets [6]
und Überflutungsschadens zu
erwarten ist.

5.2 Methoden der Risikominderung

Der in Kapitel 5.1 dargestellten, als Folge des Klimawandels
zu erwartenden Erhöhung des Sturmflutrisikos für das Kü-
stenhinterland ist durch geeignete Methoden der Risikomini-
mierung zu begegnen. Dies wird zukünftig neben der zur
Zeit favorisierten Küstenschutzstrategie der Verteidigung
auch alternative Schutzstrategien [12], wie die des Vordrin-
gens und der Anpassung sowie ggf. auch des Rückzugs er-
fordern. Von letzteren ist für die Strategie der Anpassung
unter der Bevölkerung und den Interessengruppen die größte
Akzeptanz zu erwarten, da sie die bestehenden Haupts-
schutzelemente in ihrem Zustand beläßt und das Küsten-
schutzsystem lediglich ergänzt. Eine Möglichkeit zur Anpas-
sung des Küstenschutzsystems in Niedersachsen besteht in
der Anlage zweiter Deichlinien hinter der Hauptdeichlinie,

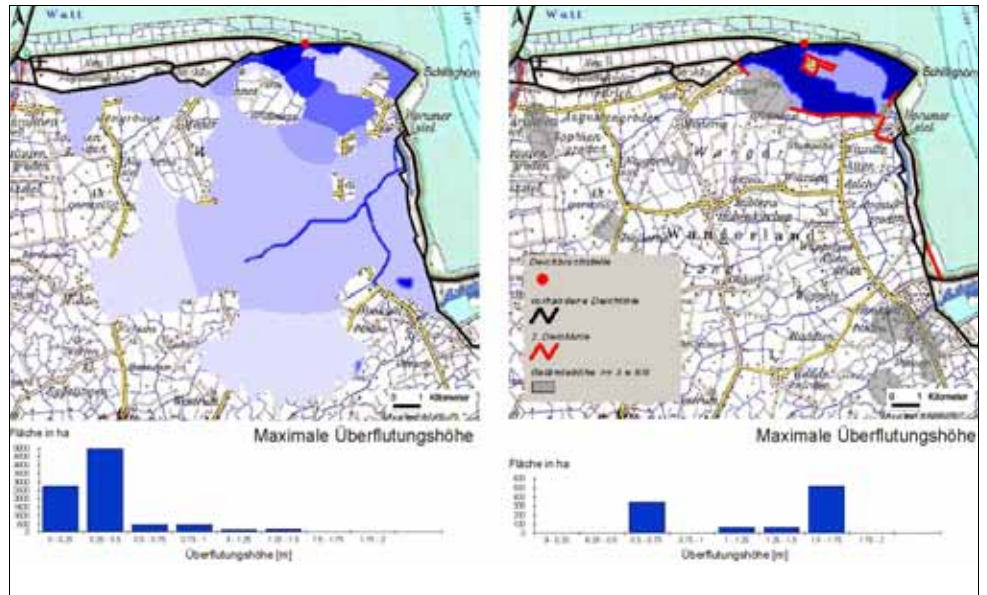


Abb. 5-2: Ausdehnung des Überflutungsgebiets und maximale Überflutungshöhen nach Deichbruch bei Minsen, Wangerland, für ein Szenario der Sturmflut vom 3. Januar 1976 (links) und Ergebnis der gleichen Simulation unter Berücksichtigung einer 2. Deichlinie (rechts)
Zone of flooding after dike breach near Minsen (Wangerland) with and without an additional dike in hinterland (scenario of the storm surge of January the 3rd 1976)

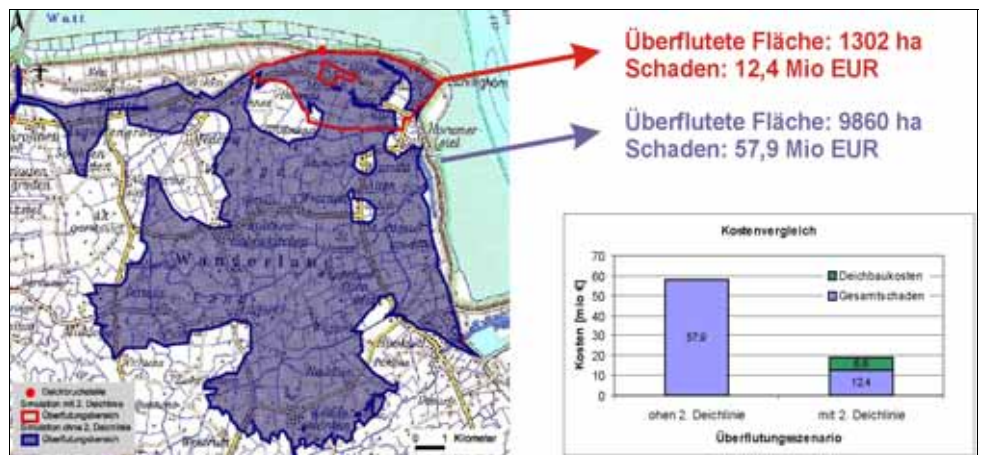


Abb. 5-3: Schadensanalyse und Vergleich der beiden Überflutungsszenarien (mit und ohne 2. Deichlinie)
Loss analysis and comparison of both scenarios (with and without an additional dike)

wie sie in Schleswig-Holstein weit verbreitet sind. Durch die rückwärtigen Deiche wird die bei Versagen der Hauptdeichlinie überflutungsgefährdete Fläche stark reduziert und so der zu erwartende Überflutungsschaden sowie das Überflutungsrisiko vermindert. Am Beispiel des Küstengebiets Wangerland wird im folgenden die Anlage einer zweiten Deichlinie zur Risikominderung diskutiert. Die Festlegung der Linienführung der zweiten Deichlinien erfolgt hierbei mit dem Ziel der Gewährleistung eines maximalen Schutz des Wertbestands im Hinterland bei möglichst geringen Herstellungs- und Unterhaltungskosten der neuen Deichlinie. Dazu erfolgt zunächst auf der Grundlage der Flächennutzung bzw. der Vermögenswerte die Ausweisung besonders zu schützender Hinterlandflächen. Beim Linienentwurf der diese Flächen schützenden zweiten Deichlinie ist dann die Topographie des Hinterlands zu berücksichtigen, um ggf. hochliegende ($> NN + 3\text{ m}$) Gebiet in die Deichanlage ein-

zubeziehen. Weiterhin ist die Linienführung zweiter Deichlinien an vorhandene linienhafte Strukturelemente, wie Straßen, Wege, Gräben, anzupassen. Für Wangerland zeigt die Abbildung 5-2 (rechts) eine mögliche, unter Berücksichtigung der drei genannten Kriterien festgelegte Linienführung einer zweiten Deichlinie. Die Wirksamkeit der zweiten Deichlinie wird durch Vergleich des nach Versagen des Hauptdeichs zu erwartenden Überflutungsschadens, welcher sich bei vorhandener bzw. fehlender zweiter Deichlinie ergibt, quantifiziert. Der Schadensberechnung liegt ein simulierter Deichbruch bei Minsen (Wangerland) während der Sturmflut vom 3. Januar 1976 zugrunde. Wie Abbildung 5-2 zeigt, wird die Ausdehnung des Überflutungsgebiets durch die Anlage einer zweiten Deichlinie wesentlich reduziert. Während jedoch ohne zusätzliche rückwärtige Deiche im Hinterland (mit Ausnahme des Nahbereichs des Deichbruchs) die Überflutungshöhe (siehe Histogramm der Abbildung 5-2, links) 0,5 m nicht überschreiten, ergeben sich nach Anlage einer zweiten Deichlinie erheblich größere Überflutungshöhen von bis zu 1,75 m (siehe Histogramm der Abbildung 5-2, rechts). Die Ortschaft Minsen ist daher durch einen eigenen Deichring gesondert geschützt worden.

Die Schadensanalysen zeigen, dass ohne zweite Deichlinie in Wangerland ein Überflutungsschaden von 57,9 Mio. EUR (überflutete Fläche 9860 ha) zu erwarten ist. Die Anlage zusätzlicher rückwärtiger Deiche führt zu einer Reduzierung der Überflutungsfläche auf 1300 ha und des zu erwartenden Schadens auf 12,4 Mio. EUR (Abbildung 5-3). Dem auf 75 % reduzierten Überflutungsschaden stehen Bau- und Unterhaltungskosten entgegen. Für die in Abbildung 5-3 dargestellte etwa 10 km lange zweite Deichlinie ergeben sich Kosten von ungefähr 6,6 Mio. EUR, sofern die Einheitskosten des Deichbaus mit 500 EUR je Meter Länge und Höhe veranschlagt werden. Wird der Abschreibungszeitraum für die rückwärtigen Deiche auf 100 Jahre festgelegt, so ergeben sich (ohne Diskontierung) jährliche Baukosten von 66 Tsd. EUR. Im Sinne der Gesamtkosten (Risiko + jährliche Baukosten) ist die Anlage der zweiten Deichlinie genau dann sinnvoll, wenn die Versagenswahrscheinlichkeit der Hauptdeichlinie ca. 1/690 nicht unterschreitet.

6 Zusammenfassung

Die Anwendung der probabilistischen Risikoanalyse zeigt beispielhaft für das Jade-Weser-Ästuar, dass sowohl Versagenswahrscheinlichkeit als auch Sturmflutrisiko bestehender Küstenschutzanlagen starke räumliche Variabilität aufweisen. Das heutige Küstenschutzmanagement ist daher auf diesem Hintergrund als nicht ausgewogen zu betrachten. Zukünftig sollte daher die deterministische Bemessungspraxis im Küsteningenieurwesen zu einer probabilistischen erweitert werden. Dies scheint insbesondere als Reaktion auf einen anthropogen beschleunigten Klimawandel zur Gewährleistung der Sicherheit, welche sich ohne Anpassung des Küstenschutzsystems bis zum Jahr 2050 um etwa den Faktor 3 bis 4 vermindert, erforderlich. Neben der Küstenschutzstrategie der Verteidigung sollte auch die Strategie der Anpassung, z.B. durch zweite Deichlinien bzw. Sturmflutentlastungspoldern an den Tideflüssen, stärkere Berücksichtigung finden.

Danksagung

Die vorangegangenen Ausführungen sind Ergebnisse der Arbeiten der Gruppe „Küstenschutz“ zu dem seit April 2000 laufenden Verbundforschungsprojekt „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM)“ (siehe auch www.krim.uni-bremen.de), welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter der Förderkennziffer 01 LD 0014 im Rahmen des Deutschen Klimaforschungsprogramms DEKLIM (siehe auch www.deklim.de) gefördert wird. Für diese Unterstützung danken die Autoren.

Schrifttum

- [1] Elsner, A. (2002): GIS-gestützte Analyse von Überschwemmungsszenarien im Einflussbereich des Lesumsperrwerks (Bremen) mit Ermittlung der betroffenen Hauptnutzung. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Hannover, Abt. Physische Geographie und Landschaftsökologie.
- [2] Elsner, A., Meyer, V., Mai, S., Zimmermann, C. (2003): GIS-gestützte Analyse von Überflutungsschäden als Teil des Küstenzonenmanagements, Unimagazin, H.3/4, Hannover.
- [3] Elsner, A., Mai, S., Meyer, V., Zimmermann, C. (2003): Integration of the flood risk in coastal hinterland management, Proc. of the Int. Conf. CoastGis, Genoa, Italy (im Druck).
- [4] Klaus, J., Schmidtke, R.F. (1990): Bewertungsgutachten für Deichbauvorhaben an der Festlandsküste - Modellgebiet Wesermarsch. Untersuchungsbericht an den Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn.
- [5] Mai, S., v. Lieberman, N. (2002): RISK - Risikoinformationssystem Küste. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 53. Band, S. 44 - 56, Hamburg.
- [6] Mai, S., Zimmermann, C. (2003): Vulnerabilität des Küstenhinterlands an Jade und Weser bei Klimaänderung, Tagungsband des 4. FZK-Kolloquiums "Küsten - Morphodynamik und Küstenschutzwerke", S. 75 - 79, Hannover.
- [7] Mai, S., Zimmermann, C. (2002): Diked Forelands and their Importance in Coastal Zone Management, Proc. of the Hydro 2002 Conference, S.222 - 235, Kiel.
- [8] Mai, S., Zimmermann, C. (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.
- [9] Meyer, V., Mai, S. (2004): Überflutungsschäden im Küstenhinterland nach Deichbruch. Wasserwirtschaft, Wiesbaden. (zur Veröffentlichung angenommen)
- [10] Meyer, V., Mai, S. (2003): Verfahren zur Berechnung der Schäden nach Deichbruch an der deut-

- schen Nordseeküste. Essener Geographische Arbeiten, Band 35, S. 169-178, Essen.
- [11] Plate, D., Duckstein, L. (1988): Reliability-Based Design Concepts in Hydraulic Engineering. Water Resources Bulletin, Vol. 24, No. 2, Herndon, Virginia, USA.
- [12] Probst, B. (1994): Überlegungen für einen Küstenschutz der Zukunft, Mitteilungen des Franzius-Instituts, H. 75, S. 52 – 68, Hannover.
- [13] Schuchard, B., Schirmer, M. (2002): Climate Change, Risk Constructs and Coastal Protection: Aim and Approach of the interdisciplinary Project KRIM, Proc. of the 12th SRA Europe Annual Meeting “Integrated Risk Management – Strategic, Technical, and Organizational Perspectives”, S. 31, Berlin.
- [14] von Storch, H., Schnur, R., Zorita, E. (1998): Anwenderorientierte Szenarien für den norddeutschen Küstenbereich, Abschlußbericht des BMBF-Projekts 01 LK 9510/0, 31 S., Geesthacht.
- [15] Weiße, R., Feser, F., Günther, H. (2003): Wind- und Seegangsklimatologie 1958 – 2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. GKSS-Report, 32. S, Geesthacht.
- [16] Zimmermann, C., Mai, S (1998): Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Nr. 6, S. 67 – 70, Hamburg.
- Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Stephan Mai,
Dipl.-Geogr. Anne Elsner und
Dipl.-Ing. Nino Ohle,
Prof. Dr.-Ing. Claus Zimmermann,
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen,
Universität Hannover, Nienburger Str. 4, 30167 Hannover*
- Dipl.-Geogr. Volker Meyer, Geographisches Institut,
Abt. Wirtschaftsgeographie, Universität Hannover,
Schneiderberg 50, 30167 Hannover*