

Elemente der Risikoanalyse im Küstenraum

von

Nicole von Lieberman

Stephan Mai

Januar 2001

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Risikoanalyse	3
2	Versagen von Küstenschutzbauwerken	4
3	Überflutung des Hinterlands bei Versagen	8
4	Versagensfolgen	10
5	GIS-gestützte Risikoanalyse.....	13
6	Zusammenfassung.....	16
7	Literatur	17
8	Abbildungsverzeichnis	20

1 Grundlagen der Risikoanalyse

Risiko bezeichnet die mit der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagenszustands $p_{Z(Z)}$ gewichteten Versagensfolgen $C_{(Z)}$:

$$\text{Risiko} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} \cdot C_{(Z)} dZ \quad (1)$$

Die Prüfung von Schutzsystemen auf Versagen erfolgt in der Regel für verschiedene Fehlermechanismen, für die jeweils eine Zuverlässigkeitsfunktion Z (auch Sicherheitsabstand) als Differenz von Belastbarkeit R und Belastung S definiert wird (Plate, 2000):

$$Z = R - S \quad (2)$$

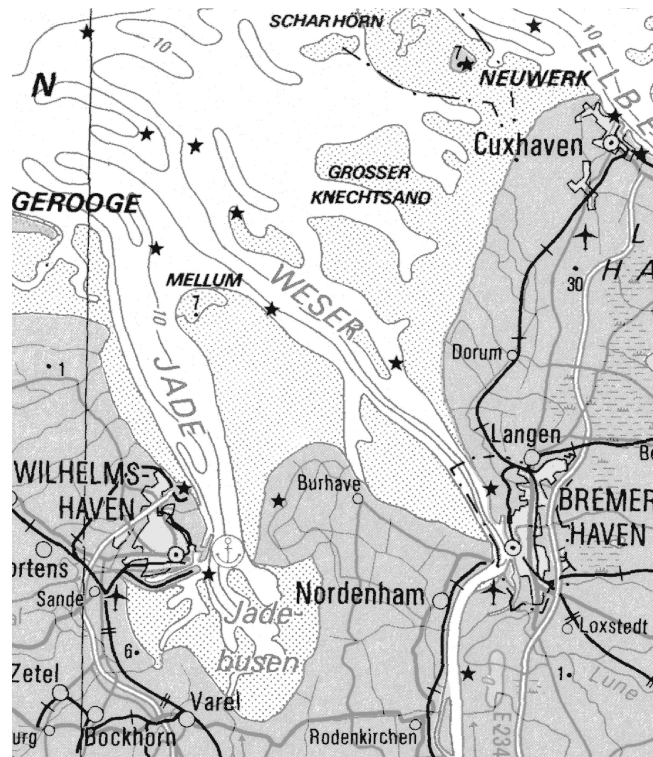


Abb. 1: Untersuchungsgebiet „Region Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten“
(Mai & von Lieberman, 2000)

Wird Z negativ, so tritt Versagen ein. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Sicherheitsabstands $p_{Z(Z)}$ berechnet sich aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten von Belastbarkeit ($p_{R(R)}$) und Belastung ($p_{S(S)}$):

$$p_{Z(Z)} = \int_{-\infty}^{\infty} p_{R(Z+S)} p_{S(S)} dS \quad (3)$$

Durch Integration über den negativen Wertebereich der Eintrittswahrscheinlichkeit des Sicherheitsabstands folgt die Versagenswahrscheinlichkeit $p_{Z<0}$ bzw. deren Inverses, die Wiederkehrzeit des Versagens $T_{Z<0}$:

$$\frac{1}{T_{Z<0}} = p_{Z<0} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} dZ \quad (4)$$

Häufig sind die Kosten des Versagens $C_{(Z)}$ von dem Grad der Funktionseinschränkung, der durch den Sicherheitsabstand quantifiziert wird, abhängig.

Im Folgenden werden die genannten Grundlagen der Risikoanalyse für das Küstenschutzsystem zwischen Jade und Weser konkretisiert. Abbildung 1 gibt einen Überblick über das Untersuchungsgebiet.

2 Versagen von Küstenschutzbauwerken

Küstenschutzsysteme bestehen aus einer Kette einzelner Küstenschutzelemente. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Eine Kategorisierung der einzelnen Küstenschutzelemente ist in Tabelle 1 gegeben. Hier werden Elemente des Erosionsschutzes, des Hochwasserschutzes, der Binnenentwässerung sowie natürliche Küstenschutzelemente unterschieden. Dieser Beitrag behandelt im Weiteren den Hochwasserschutz. Für den betrachteten Küstenabschnitt stellt das in Abbildung 2 dargestellte System, bestehend aus Wattfläche, Vorland, Sommerdeich und -polder sowie Hauptdeich, ein typisches dar.

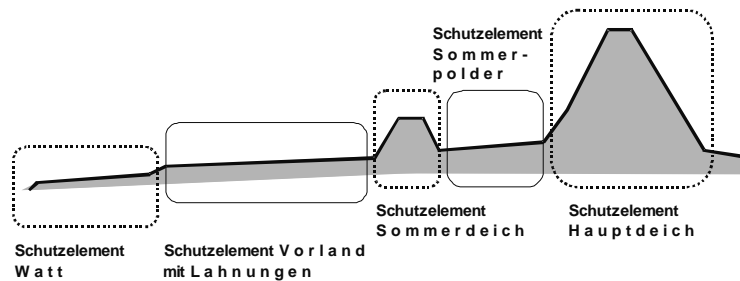


Abb. 2: Charakteristisches Küstenschutzsystem der Nordseeküste (von Lieberman, 1999)

Die wesentliche Versagensform dieses Systems ist mit einem Bruch des Hauptdeichs verbunden. Eine detaillierte Beschreibung des Bruchvorgangs ist zur Zeit nicht möglich. Erste Untersuchungen hierzu laufen im Programm „PRODEICH“ (Kortenhaus und Oumeraci, 2000). Als wesentliche Ursache eines Deichbruchs wird derzeit der Wellenüberlauf am Hauptdeich angenommen. Dies belegen auch die Sturmfluten 1953, 1962 und 1976 an der Nordsee (Kramer et al., 1962 / Traeger, 1962 / Heinsohn et al., 1979 / Zitscher et al., 1979).

Bezeichnung	Elemente
Elemente des Erosionsschutzes	Längs- und Querwerke (Buhnen) Strandauffüllung Lahnung
Elemente des Hochwasserschutzes	Deich Sperrwerk
Elemente der Binnenentwässerung	Siel Schöpfwerk
Natürliche Küstenschutzelemente	Insel Hallig Außensand Wattfläche Vorland Düne Riff

Tab. 1: Übersicht und Einteilung über Küstenschutzelemente (von Lieberman, 1999)

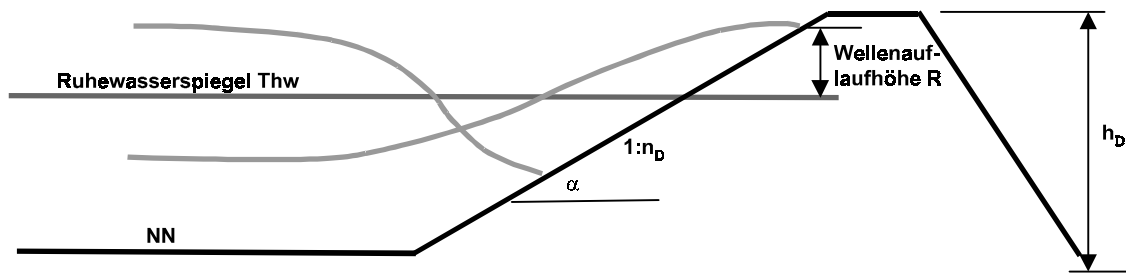


Abb. 3: Wellenaufbau an einem Seedeich (von Lieberman & Mai, 2000a)

Die Beschreibung des Wellenüberlaufs (Abb. 3) erfolgt entweder auf der Basis des Wellenaufbaus (CUR, 1990)

$$Z = h_D - Thw - R_{98\%} \quad (5)$$

$$R_{98\%} = 0.75 \cdot \gamma \cdot \frac{1}{n_D} \sqrt{g \cdot H_s} \cdot T_m \quad (6)$$

oder auf der Basis der Wellenüberlaufmenge (Reeve, 1998)

$$Z = Q_{tol} - Q_{mean} \quad (7)$$

$$Q_{mean} = \gamma_{m,1} \cdot \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot e^{-\frac{1}{\gamma_{m,2}} \cdot \frac{(h_D - Thw)}{H_s}} \quad (8)$$

mit

h_D	Deichhöhe	H_s	signifikante Wellenhöhe
Thw	Tidehochwasserstand	T_m	mittlere Wellenperiode
$R_{98\%}$	Wellenaufbau	Q_{tol}	zul. mittlere
γ	dimensionsloser Parameter		Wellenüberlaufmenge
$1/n_D$	Deichneigung	$\gamma_{m,1}, \gamma_{m,2}$	dimensionslose Parameter
g	Erdbeschleunigung		

Die zulässige mittlere Überlaufmenge Q_{tol} kann in Bezug auf die funktionelle Sicherheit mit $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ und in Bezug auf die strukturelle Sicherheit mit $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ angenommen werden (Oumeraci et al., 1999). Jorissen (2000) gibt zulässige Überlaufmengen in Abhängigkeit von der Deckschicht des Deichs mit $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ bis $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ an.

Auch der auf der Basis des Wellenaufbaus formulierte Ansatz nach Gleichung 5 lässt ebenfalls einen Wellenüberlauf zu, da 2 % der Wellen die nach Gleichung 6 berechnete Auflaufhöhe überschreiten. Dies entspricht etwa einem mittleren Wellenüberlauf von $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ bis $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (Jorissen, 2000). Da ein Schaden am Hauptdeich in der Regel nicht Folge eines kontinuierlichen mittleren Wellenüberlaufs ist, sondern aus dem Wellenüberlauf eines Einzelereignisses resultiert, ist in Gleichung 7 gegebenenfalls der maximale Wellenüberlauf einzusetzen. Für diesen fehlen jedoch Angaben einer zulässigen Überlaufmenge.

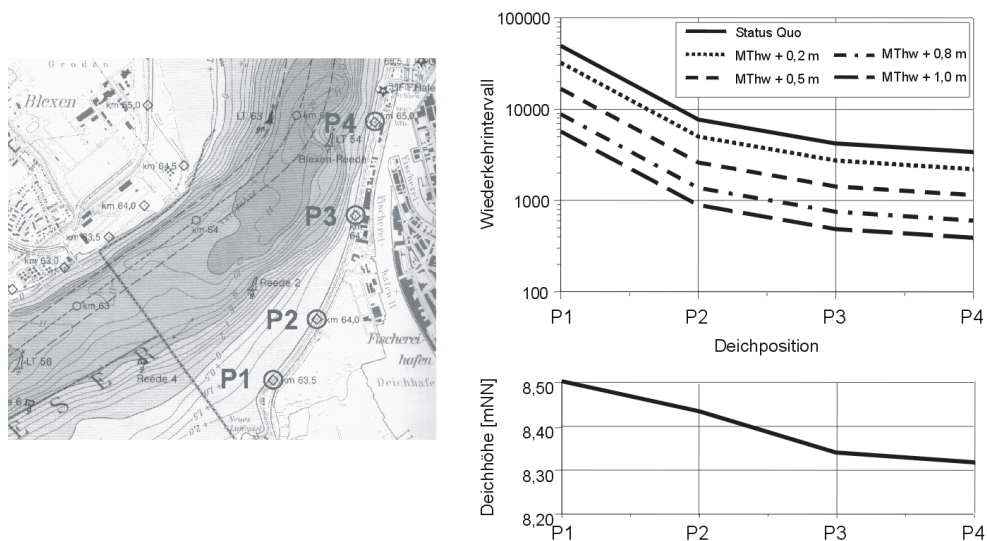


Abb. 4: Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs an Seedeichprofilen Bremerhavens (Mai & von Lieberman, 2001a)

In Gleichung 5 stellen der Wellenaufbau $R_{98\%}$ und der Tidehochwasserstand Thw die statistisch verteilten Belastungsgrößen S und h_D die Belastbarkeit R dar. Die Belastbarkeit wird hier vereinfachend konstant angenommen. Während die Verteilung des

MThw aus langjährigen Pegelaufzeichnungen ermittelt werden kann, wird die statistische Verteilung von $R_{98\%}$ mit Hilfe der in Formel 6 dargestellten Beziehung aus dem Seegang berechnet. Die Seegangsstatistik wird mittels numerischer Simulationen aus der Windstatistik abgeleitet (Mai und von Lieberman, 2001).

Aus den Gleichungen 1 bis 6 folgt so die Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs am See-
deich. Abbildung 4 stellt Wiederkehrintervalle des Überlaufs an ausgewählten Profilen
des „Seedeichs“ in Bremerhaven dar und ordnet diese der Deichhöhe zu. Die Berech-
nung der Wiederkehrzeit erfolgte für die aktuellen hydrologischen und meteorologi-
schen Bedingungen sowie für Szenarien eines erhöhten Tidehochwasserstands. So re-
duziert sich beispielsweise für das Profil P4 die Wiederkehrzeit von 4000 Jahren auf
400 Jahre im Fall eines Anstiegs des MThw um 1 m.

3 Überflutung des Hinterlands bei Versagen

Die mit der wesentlichen Versagensform des Küstenschutzsystems, dem Deichbruch,
verbundene Überflutung des Hinterlands ist mit Hilfe zweidimensionaler numerischer
Simulationen unter Verwendung des Programms MIKE21-HD bestimmt worden. Ab-
bildung 5 zeigt die Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten im Hinterland rd.
10 Stunden nach Deichbruch am Schweiburger Siel. Die Überflutungsfläche beträgt
etwa 25 km². Es ist jedoch festzustellen, dass die Überflutungsfläche Abhängigkeiten
von der Rauheit des Untergrunds aufweist. Untersuchungen von von Lieberman und
Mai (2001) zeigen, dass eine Verringerung der Manning-Zahl um 50 % zu einer Ab-
nahme der Überflutungsfläche um 15 % führt. Im Vergleich zur verhältnismäßig re-
chenzeitintensiven Simulation besteht die Möglichkeit, die Überflutungsfläche durch
Verschneiden von Topographie und Sturmflutwasserstand bzw. durch überschlägige
Berechnung auf der Grundlage der Manning-Strickler- und der Koninuitätsgleichung
unter Annahme einer halbkreisförmigen Ausbreitung um die Deichlücke, zu bestim-
men. Abbildung 6 zeigt diesen Vergleich. Es wird deutlich, dass die statische Betrach-

tung (Verschneiden), wie sie beispielsweise in Schmidtke (1995) und Sterr (1996) dargestellt wird, die Überflutungsfläche deutlich überschätzt. Dies führt zu einer Überschätzung des Folgeschadens und damit des Risikos.

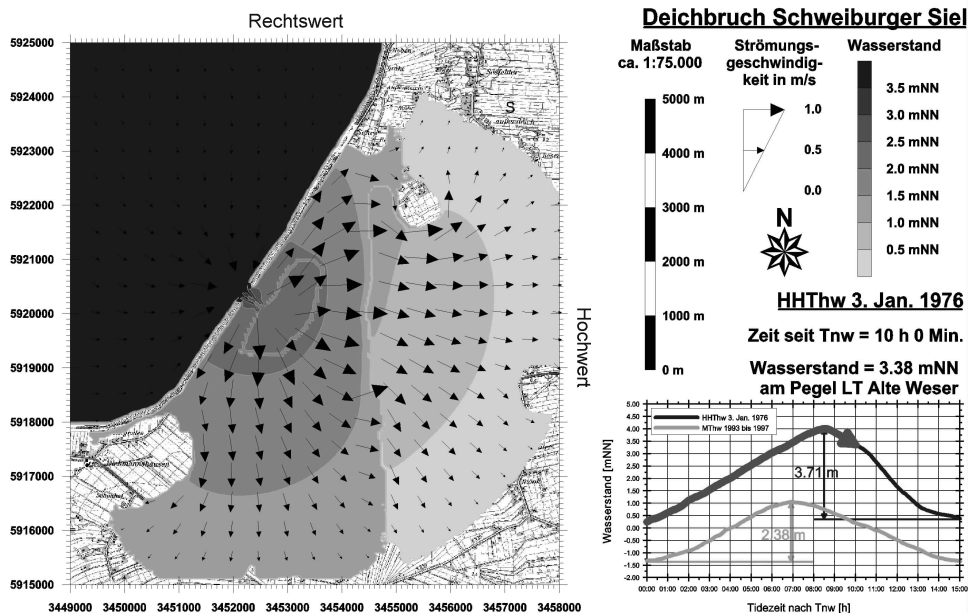


Abb. 5: Überflutungsfläche nach Deichbruch am Schweiburger Siel (von Lieberman und Mai, 2000b)

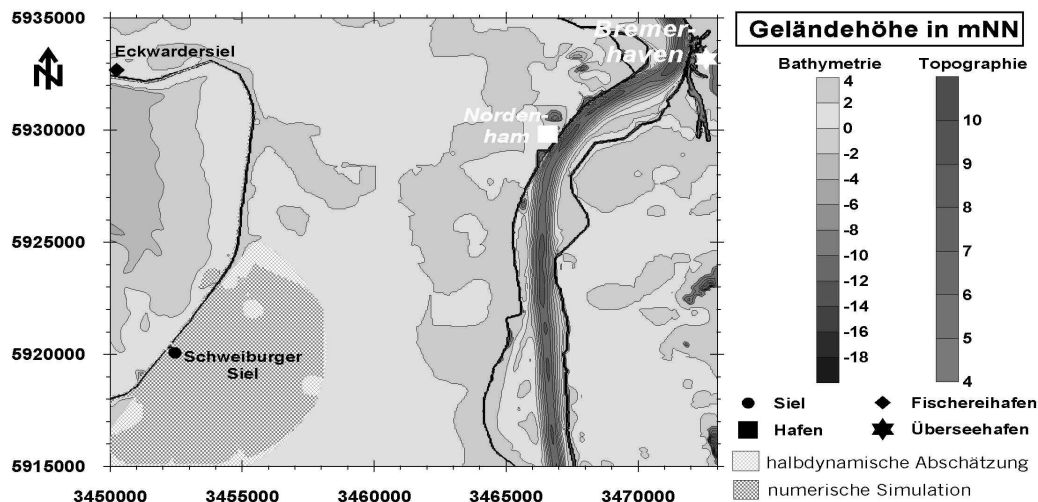


Abb. 6: Ermittlung von Überflutungsflächen – Ein Vergleich von statischer und halbdynamischer Abschätzung sowie numerischer Simulation

4 Versagensfolgen

Die Versagensfolgen ergeben sich aus dem Wertebestand C_{\max} und dem Grad ϕ der bei Überflutung auftretenden Schädigung. Formal lässt sich dieser Zusammenhang darstellen durch

$$C = \phi \cdot C_{\max} \quad (9)$$

Zur Ermittlung des Wertebestands im Untersuchungsgebiet wurde ein mesoskaliger Ansatz gewählt. Hierbei wurden analog zwölf flächenhafte (Ackerland, öffentliche Frei- und Grünflächen, gewerbliche Bauflächen, landwirtschaftliche Flächen, gemischte Bauflächen, Moor, öffentliche Bauflächen, Vordeichsflächen, Wald- und Forstflächen, Wiesen und Weiden, Wohnbauflächen – bebaut und unbebaut) und zwölf linienhafte Variablen (Kreisstraßen, Landstraßen, Bundesstraßen, Bundesautobahnen, untergeordnete Straßen, Bahnstrecken – ein- und zweigleisig, sonstige Bahnstrecken, Flüsse und Wasserstraßen, Deichlinie, Hochspannungsleitungen > 100 kV, Be- und Entwässerungsgräben) auf der Basis von Deutschen Grundkarten im Maßstab 1:5.000 sowie weitere räumlich differenzierte Variablen (z. B. Bodenrichtwerte, Bevölkerung, Gemeindegrenzen) erfasst. Das Prinzip der Erfassung ist in Abbildung 7 dargestellt.

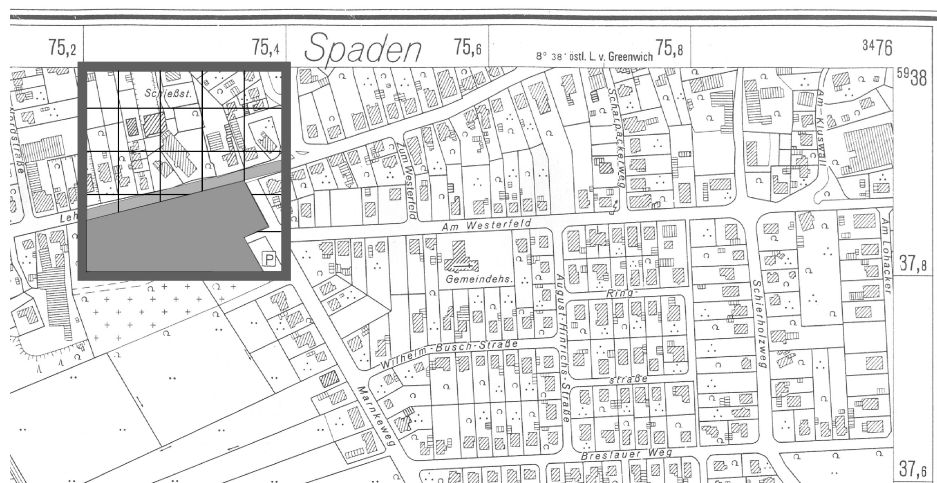


Abb. 7: Prinzip der Werterhebung anhand von DGK5-Karten (von Lieberman & Mai, 2000b)

Die monetäre Bewertung der Variablen erfolgte nicht mikroskalig durch z. B. Schätzung des Gebäudewerts, sondern mesoskalig auf der Grundlage der aus Gemeindestatistiken sowie Ergebnissen der Volkszählung. Mit einem Top down-Ansatz erfolgte eine Disaggregation auf die Fläche. Das bedeutet beispielsweise, dass der für eine Gemeinde ermittelte Gesamtwert der Wohnbebauung der Gesamtfläche der Wohnbebauung zugeordnet wird und keine wertmäßige Unterscheidung einzelner Wohngebiete erfolgt. Im Gegensatz dazu entspräche dem mikroskaligen Vorgehen ein Bottom up-Ansatz, welcher die Werte von Einzelobjekten zu einem Gesamtwert aggregiert. Für Variablen wie Wohnbebauung oder landwirtschaftliche Flächen stellt der Top down-Ansatz in der Regel einen hinreichend genauen dar, während für die Bewertung von Gewerbeflächen Ungenauigkeiten entstehen, was auf den unterschiedlichen Flächenbedarf einzelner Industriezweige zurückzuführen ist. Daher wurde für die Ermittlung des Bruttoanlagevermögens sowie der Bruttowertschöpfung der Top down-Ansatz um Komponenten des Bottom up-Ansatzes zu dem sogenannten Gegenstromprinzip ergänzt. Hier wurden Betriebe mit mehr als 50 Mitarbeitern erfasst und diesen auf der Grundlage der Variablen Bruttoanlagevermögen und Bruttowertschöpfung pro Mitarbeiter ihr Bruttoanlagevermögen und ihre Wertschöpfung zugewiesen. Für Betriebe mit weniger als 50 Mitarbeitern wurde nach dem Top down-Ansatz verfahren.

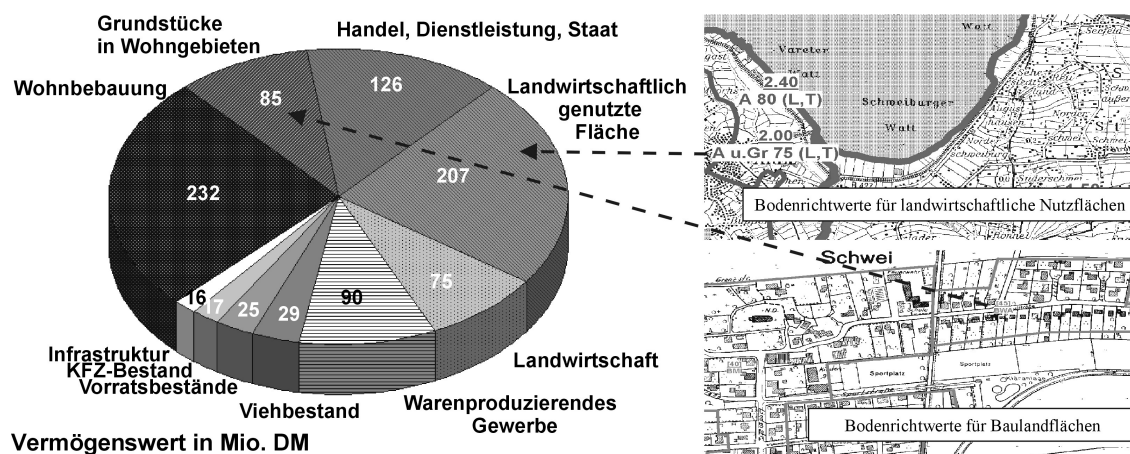


Abb. 8: Sektorale Verteilung der Vermögenswerte im Teilgebiet Butjadingen (von Lieberman & Mai, 2000b)

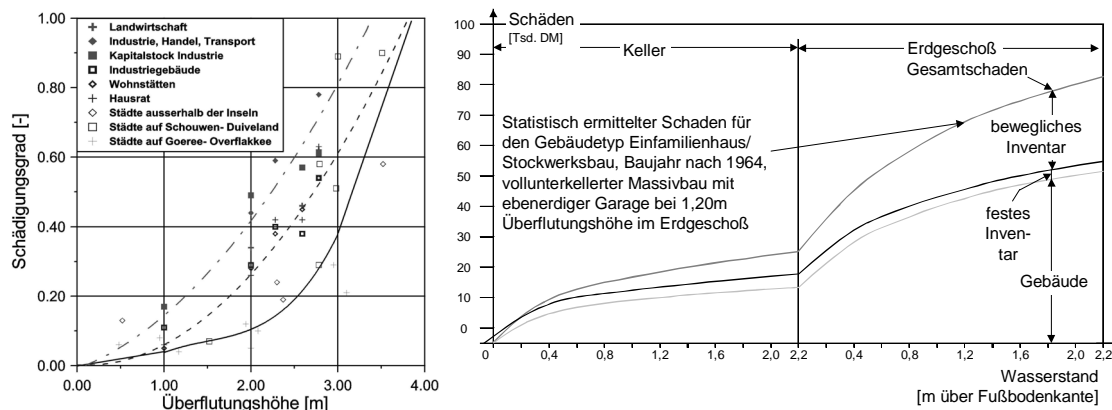


Abb. 9: Abhängigkeit des Schädigungsgrads von der Überflutungshöhe (CUR, 1990 / Schmidtke, 1995)

Der Schädigungsgrad ϕ ist abhängig vom Überflutungsgeschehen. Er lässt sich beispielsweise durch die Überflutungshöhe auf der Grundlage vergangener Überflutungsereignisse, wie sie beispielsweise in CUR (1990) oder Schmidtke (1995) dokumentiert sind, parametrisieren. Abbildung 9 (links) zeigt den funktionalen Zusammenhang von Schädigungsgrad und Überflutungshöhe für verschiedene Sektoren, Abbildung 9 (rechts) konkretisiert den Schädigungsverlauf am Beispiel eines Einfamilienhauses. Aktuellere Informationen zum Schädigungsgrad finden sich in der HOWAS-Datenbank, welche Schäden nach Hochwasserereignissen im Binnenland zusammenfasst. Diese ist jedoch wegen der Salinität des Meerwassers nur bedingt auf Küstengebiete zu übertragen.

Neben den monetär bewertbaren Schäden können außerdem Personenschäden auftreten. Die Schadensfolgen ergeben sich hier analog zu Gleichung (9) aus potenziell betroffener Bevölkerung und dem Betroffenheitsgrad. Die im Untersuchungsgebiet potenziell betroffene Bevölkerung ist in Abbildung 10 (links) dargestellt. Sie konzentriert sich im wesentlichen auf die Städte Bremerhaven und Nordenham. Im Gegensatz zu den Sachwerten ist der Betroffenheitsgrad der Bevölkerung sowie der tolerable Verlust an Menschenleben nur schwer festzulegen.

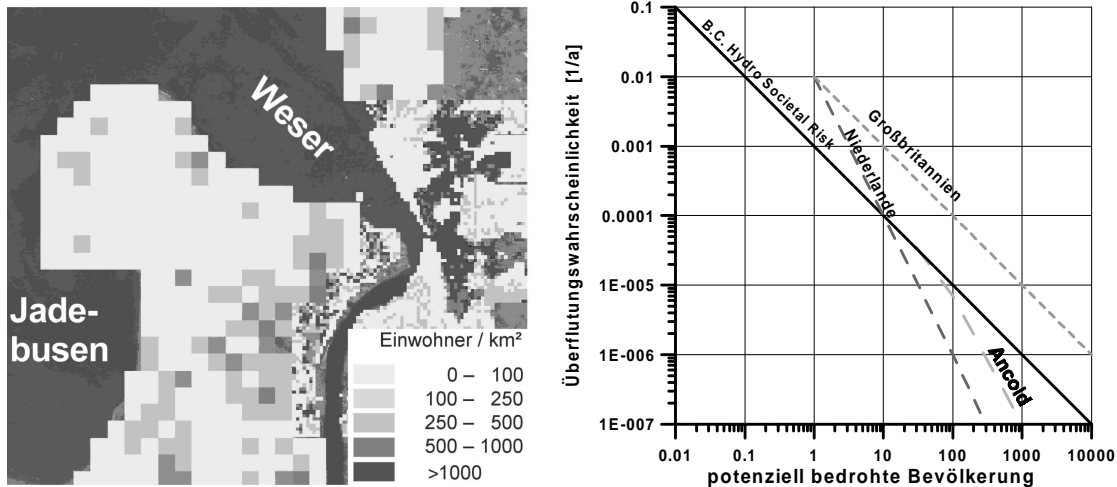


Abb. 10: Potenziell Betroffene im Untersuchungsgebiet (links) und zugeordnete akzeptable Überflutungswahrscheinlichkeit nach Nielson und Hatford, 1994 (rechts)

Der Betroffenheitsgrad hängt neben dem Überflutungsgeschehen auch von der Qualität des Sturmflutwarndienstes und des Katastrophenschutzes ab. Der tolerable Verlust an Menschenleben kann z.B. durch Befragungen ermittelt werden und ist i.d.R. von der Wiederkehrzeit abhängig (Abb. 10, rechts).

5 GIS-gestützte Risikoanalyse

Eine Integration der in den Kapiteln 1 bis 4 dargestellten Teilschritte der Risikoanalyse ist z.B. mit Hilfe eines geographischen Informationssystems (GIS) möglich. Hier wurde das Programmsystem Arcview gewählt, dessen Funktionsumfang unter Verwendung der Programmiersprache Avenue hinsichtlich einer verbesserten Interaktivität und Nutzerführung erweitert wurde (Mai und von Lieberman, 2001b). Neben Informationen zum Küstenschutzsystem, der Darstellung seiner Belastungsparameter – Wasserstand und Seegang – und der daraus abgeleiteten Versagenswahrscheinlichkeiten sind verschiedene Überflutungsszenarien als Folge eines Versagens des Küstenschutzes als ablaufende Videos im GIS abrufbar. Abbildung 11 zeigt die maximale Ausdehnung bei Versagen des Küstenschutzsystems in der Nähe des Geestesperrwerks in Bremerhaven.

Es ist ersichtlich, dass insbesondere der Innenstadtbereich, die stadtbremischen Hafen-gebiete sowie Grünland entlang der Geesteufer betroffen sind. Die Wassertiefe beträgt bis zu 2 m.

Werden die Vermögenswerte im Überflutungsbereich, welche, wie in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt, ermittelt wurden, mit dem sich aus der Wassertiefe nach Abbildung 9, links, ergebenden Schädigungsgrad multipliziert, ergibt sich die in Abbildung 12 dargestellte flächenhafte Schadenverteilung. Für das vorliegende Beispiel ergibt sich der Gesamtschaden durch Integration über die Fläche zu rd. 1,2 Mrd. DM.

Durch Multiplikation des Schadens mit der Eintrittswahrscheinlichkeit des Versagens des Küstenschutzsystems folgt die flächenhafte Verteilung des Risikos, so dass eine Risikozonierung vorgenommen werden kann. Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Risikozonen für ein Sperrwerkversagen in Bremerhaven bei einem Anstieg des mittleren Tidehochwasserstands um 0,50 m. Die Integration über die Fläche führt zu einem Risiko in Höhe von rd. 1,4 Mio. DM pro Jahr.

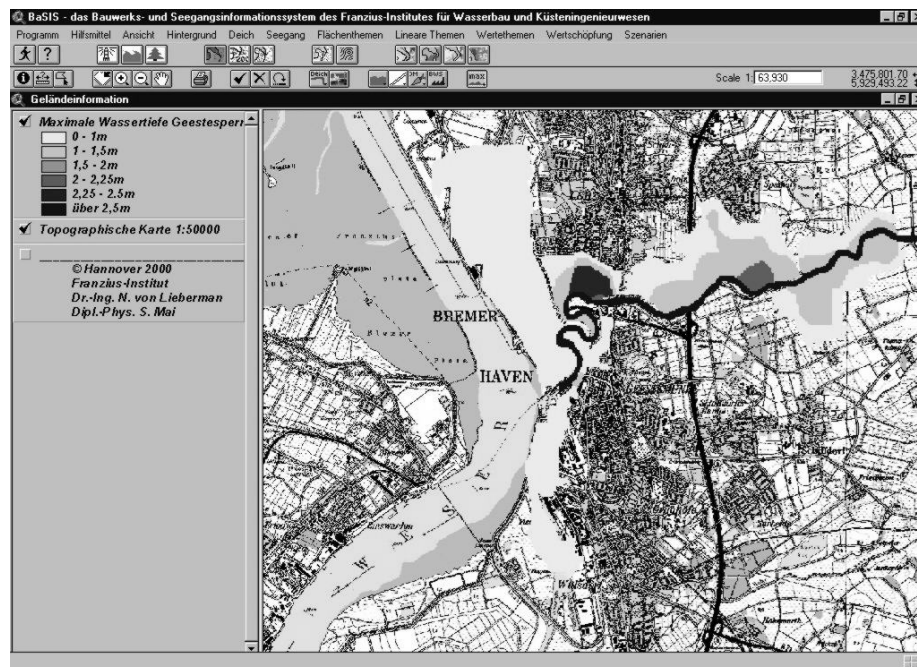


Abb. 11: Maximale Überflutungsfläche bei einem Versagen des Küstenschutzsystems in der Nähe des Geestesperrwerks in Bremerhaven

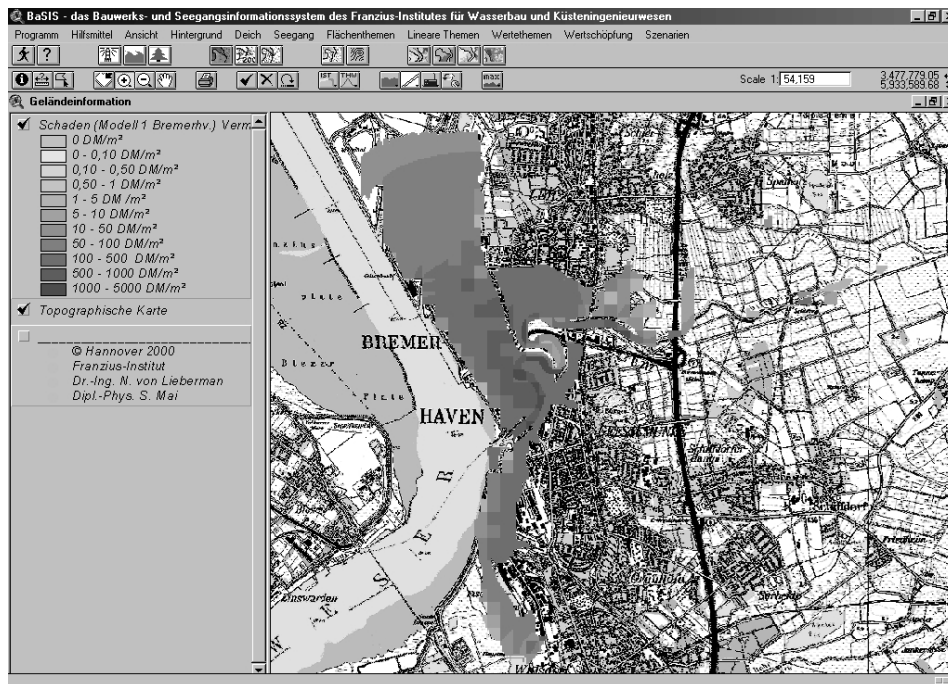


Abb. 12: Schäden bei Überflutung in der Nähe des Geestesperrwerks (Mai und von Lieberman, 2001b)

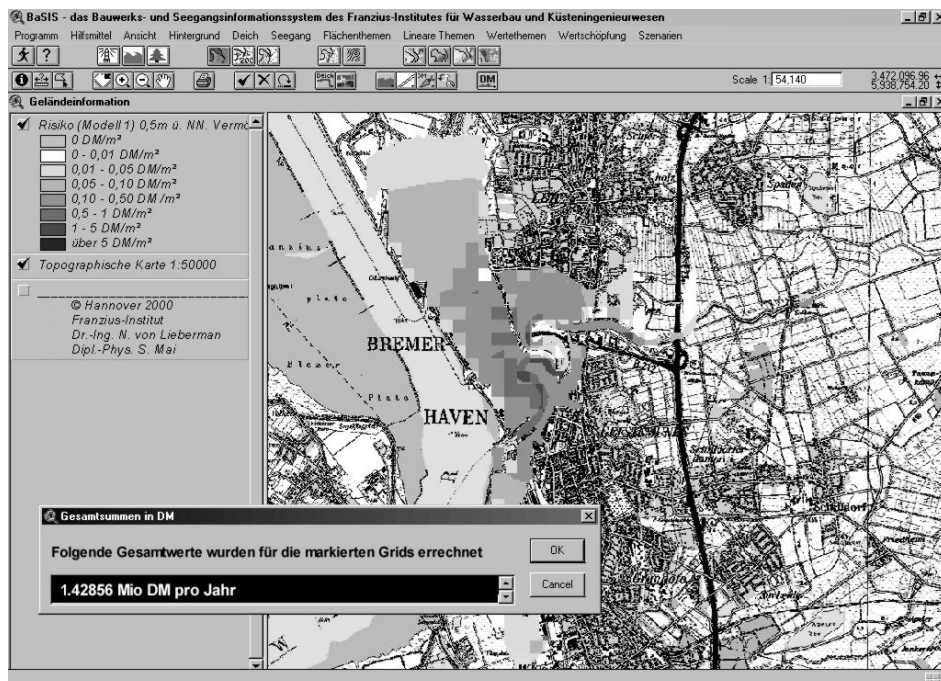


Abb. 13: Ausweisung von Risikozonen (Mai und von Lieberman, 2001b)

6 Zusammenfassung

Die vorgestellte Methodik der Risikoanalyse, wie sie für den Hochwasserschutz im Binnenland bereits weit entwickelt ist, ergänzt die heutigen deterministischen Bemessungsverfahren für Küstenschutzsysteme. Sie bietet erstmals die Möglichkeit, Kosten von Schutzsystemen der dadurch erreichten Risikominderung gegenüber zu stellen. Dadurch wird die Ausarbeitung volkswirtschaftlich kostenoptimaler Schutzsysteme ermöglicht. Auch für die Versicherungswirtschaft wird so eine Konkretisierung des Sturmflutrisikos möglich. Die Implementierung der Risikoanalyse in ein Geographisches Informationssystem verdeutlicht die komplexe Struktur der gesamten Risikoanalyse und kann so auch Entscheidungsträgern Unterstützung bieten. Im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste KRIK“ (Förderkennzeichen: 01LD0014) wird die Implementierung der Risikoanalyse im GIS zu einem interaktiven Entscheidungshilfesystem (*Decision Support System*), welches insbesondere Aspekte der Ökologie, Wirtschaftsgeographie, Risikowahrnehmung und -akzeptanz berücksichtigt, erweitert.

7 Literatur

CENTRE FOR CIVIL ENGINEERING RESEARCH AND CODES (CUR) (1990):

Probabilistic Design of Flood Defences, Technical Advisory Committee on Water Defences (TAW), Report 141

HEINSOHN, KRAMER, KRAUSE, LUCK, MEYER-TOELLE, MÜLLER (1979): Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen, Die Küste, H. 33

JORISSEN, R. E. (2000): Coastal Flood-Risk Management in the Netherlands, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 85

KORTENHAUS, A., OUMERACI, H. (2000): Probabilistische Bemessungsverfahren und Risikoanalysen im Küsteningenieurwesen, Internationales Wasserbau-Symposium, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

KRAMER, J., LIESE, R., LÜDERS, K. (1962): Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet, Die Küste, Jg. 10, H. 1

VON LIEBERMAN, N. (1999): Leitbildmodell für den Küstenschutz der Nordseeküste am Beispiel der Vorländer – Dissertation –, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 83, Hannover, S. 1-291

VON LIEBERMAN, N., MAI, S. (2000a): Sturmflutschutz des Natur- und Wirtschaftsraumes zwischen Jade und Weser – eine Beurteilung der Deichsicherheit, Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, H. 36, S. 159-169

- VON LIEBERMAN, N., MAI, S. (2000b): Risikopotenziale für Nutzflächen und Infrastruktur, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 85, Hannover, S. 97-104
- VON LIEBERMAN, N., MAI, S. (2001): Flood Risk in Coastal Regions, Proceedings of the International Conference "River Basin Management 2001", Cardiff, Wales (accepted paper)
- MAI, S., VON LIEBERMAN, N. (2000): Belastung der Seedeiche durch Wasserstände und Wellen, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 85, Hannover, S. 25-38
- MAI, S., VON LIEBERMAN, N. (2001a): Sturmflutgefährdung der Hafenstadt Bremerhaven - eine Risikoanalyse, Tagungsband zur 18. AMK-Tagung, 31.05. - 03.06.2000 in Vechta
- MAI, S., VON LIEBERMAN, N. (2001b): GIS-unterstützte Risikoanalyse, Hansa (im Druck)
- NIELSON, N.M., HATFORD, D.N.D. (1994): Risk Analysis as an Aid to Engineering Judgement in Dam Safety Evaluations, Proceedings of the 1994 Annual Conference of the Association of Dam Safety Officials, Boston, M.A.
- OUMERACI, H., KOHLHASE, S., KUNZ, H., WEISS, D. (1999): Berechnungsansätze für Wellenauflauf und Wellenüberlauf an Seedeichen, HTG und DGGT Sprechtag
- PLATE, E.J. (2000): Risikoanalyse im Hochwasser- und Küstenschutz, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 85
- SCHMIDTKE, R.F. (1995): Sozio-ökonomische Schäden von Hochwasserkatastrophen, Darmstädter Wasserbau-Mitteilungen, H. 40, 1995

STERR, H. (1996): Zur Frage eines – anthropogen bedingten – Meeresspiegelanstiegs und dessen möglicher Konsequenzen, Beiträge zur Geographie der Meere und Küsten, Hannoversche Geographische Arbeiten, Bd. 52

TRAEGER, G. (1962): Die Sturmflut am 3. und 21. Januar 1976, Die Küste, Jg. 10, H. 1

ZITSCHER, F.-F., SCHERENBERG, R., CAROW, U. (1979): Die Sturmflut am 3. und 21. Januar 1976, Die Küste, H. 33

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Untersuchungsgebiet „Region Butjadingen – Bremerhaven – Land Wursten“
(Mai & von Lieberman, 2000b)

Abb. 2: Charakteristisches Küstenschutzsystem der Nordseeküste (von Lieberman,
1999)

Abb. 3: Wellenauflauf an einem Seedeich (von Lieberman & Mai, 2000a)

Abb. 4: Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs an Seedeichprofilen Bremerha-
vens (Mai & von Lieberman, 2001a)

Abb. 5: Überflutungsfläche nach Deichbruch am Schweiburger Siel (von Lieberman
und Mai, 2000b)

Abb. 6: Ermittlung von Überflutungsflächen – Ein Vergleich von statischer und
halbdynamischer Abschätzung sowie numerischer Simulation

Abb. 7: Prinzip der Werterhebung anhand von DGK5-Karten (von Lieberman & Mai,
2000b)

Abb. 8: Sektorale Verteilung der Vermögenswerte im Teilgebiet Butjadingen (von Lie-
berman & Mai, 2000b)

Abb. 9: Abhängigkeit des Schädigungsgrads von der Überflutungshöhe (CUR, 1990 /
Schmidtke, 1995)

Abb. 10: Potenziell Betroffene im Untersuchungsgebiet (links) und zugeordnete ak-
zeptable Überflutungswahrscheinlichkeit nach Nielson und Hatford, 1994 (rechts)

Abb. 11: Maximale Überflutungsfläche bei einem Versagen des Küstenschutzsystems
in der Nähe des Geestesperrwerks in Bremerhaven

Abb. 12: Schäden bei Überflutung in der Nähe des Geestesperrwerks (Mai und von Lieberman, 2001b)

Abb. 13: Ausweisung von Risikozonen (Mai und von Lieberman, 2001b)

Tab. 1: Übersicht und Einteilung über Küstenschutzelemente (von Lieberman, 1999)