

Nicole von Lieberman, Stephan Mai

Entscheidungsunterstützung im Sturmflutschutz durch Risikoanalyse

Decision Support in Coastal Flood Protection using Risk Analysis

Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Sicherheitsniveaus der Küstenschutzbauwerke an der deutschen Nordseeküste wurde die Methode der Risikoanalyse exemplarisch für den Jade-Weser-Raum angewendet. Um die Berücksichtigung der komplexen Methode bei der Auswahl von Küstenschutzstrategien zu ermöglichen, wurde das Bauwerks- und Seegangsinformationssystem BASIS entwickelt. Die Grundlage bildet das Geographische Informationssystem ArcView.

Summary

An analysis of the reliability of coastal defences at the German North-Sea was performed for the estuaries Jade and Weser using risk analysis. The method and also information on waves and coastal defences is implemented in the geographical information system BASIS supporting the decisions on an

1 Entscheidungsunterstützung mittels Risikoanalyse

Deiche als Hauptelement des Küstenschutzes werden an den deutschen Küsten heute noch auf der Grundlage von extremen Einzelereignissen, ohne Zuordnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit, bemessen. In Niedersachsen wird nach dem sogenannten Einzelwert- (Bezirksregierung Weser Ems 1997), in Schleswig-Holstein nach dem modifizierten Vergleichswert-Verfahren (MLR 2001) bemessen.

Durch die Erweiterung der üblichen Standardverfahren zu einem probabilistischen Bemessungsschema unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen ist eine Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit des Küstenschutzsystems möglich (CUR 1990). Neben der Beurteilung der aktuellen Sicherheit eines Küstenabschnitts kann die probabilistische Bemessung eine Grundlage zur Beurteilung des Einflusses geänderter Randbedingungen wie Wasserstände, Wellenhöhen etc. auf die Sicherheit liefern und in einem weiteren Schritt das Risiko eines Schadenseintritts im Hinterland abgeschätzt werden (von Lieberman et al. 2001). Sie liefert somit grundlegende Hilfen zur Entscheidungsfindung.

Die Grundlage einer Risikoanalyse bildet die Ermittlung des maßgeblichen Versagensmechanismus der zu untersuchenden Küstenschutzsysteme. Für Hauptdeich-geschützte Küstenabschnitte wird, wie auch bei dem Vergleichswert- und Einzelwert-Verfahren, als maßgeblicher Versagensmechanismus der Wellenüberlauf über den Deich betrachtet. Die sogenannte Zuverlässigkeitsfunktion Z wird für diesen Fall als Differenz von Deichhöhe h_D und Tidehochwasserstand Thw am Deichfuß sowie dem Wellenauflauf $R_{98\%}$ definiert:

$$Z = h_D - Thw - R_{98\%} \quad (1)$$

Eine Definition der Zuverlässigkeit ist ebenso auf der Basis der Wellenüberlaufmenge, wie z. B. von (Reeve 1998) beschrieben, möglich. Dies erlaubt auch die Berücksichtigung des Sicherheitszuwachses durch Kronenmauern (Pohl 1997). Die zulässige mittlere Überlaufmenge 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). Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde nach (Tautenhain 1981) eine zulässige Überlaufmenge von $5,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ angesetzt.

Die Wahrscheinlichkeit des Versagens berechnet sich aus der Wahrscheinlichkeitsdichte $p_{(Thw, u_w, \gamma_w)}$ der Randbedingungen der offenen Küste aus Tidehochwasserstand Thw , Windgeschwindigkeit u_w und Windrichtung γ_w :

$$P_{Z < 0} = \iiint_{Z < 0} p_{(Thw, u_w, \gamma_w)} dThw du_w d\gamma_w \quad (2)$$

Werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Versagenszustände $p_{Z(Z)}$ mit den Versagensfolgen $C_{(Z)}$, z. B. infolge Deichbruchs, gewichtet, kann das Risiko der betroffenen Region berechnet werden:

$$\text{Risiko} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} \cdot C_{(Z)} dZ \quad (3)$$

Eine Integration der einzelnen, in den Gleichungen 1 bis 3 dargestellten, Teilschritte der Risikoanalyse ist zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen z. B. mit Hilfe eines geographischen Informationssystems (GIS) möglich. Für den

Küstenraum zwischen Jade- und Weserästuar wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens „Risiko einer Küstenregion“, welches von 1998 bis 2000 am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen bearbeitet wurde, das Programmsystem ArcView gewählt, dessen Funktionsumfang unter Verwendung der Programmiersprache Avenue hinsichtlich einer verbesserten Interaktivität und Nutzerführung zum sogenannten Bauwerks- und Seegangsinformationssystem BASIS erweitert wurde (Mai et al. 2001a).

2 Küstenschutz der Jade-Weser-Region

Das gewählte Untersuchungsgebiet erstreckt sich von der Außenweser am Leuchtturm Alte Weser über den Jade- und Außenweserbereich bis in die Unterweser südlich von Bremerhaven.

Ein Fokusstandort der Risikoanalyse wurde auf das Stadtgebiet Bremerhavens gelegt, das durch Deiche, Kaimauern und ein Sperrwerk in der Geestemündung gegen Sturmfluten geschützt wird. Bild 1 zeigt die Implementierung von Informationen zum Küstenschutz in das Informationssystem BASIS. Dort ist die Abfrage von technischen Zeichnungen, Kenndaten der Bauwerke, Satellitenbildern sowie Fotografien der Bauwerke möglich.

Neben den Bauwerksinformationen sind die für die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Versagens des Küstenschutzsystems erforderlichen Belastungsgrößen, i. e. Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und -perioden, für jeden Ort im Modellgebiet aus langjährigen Statistiken bzw. numerischen Simulationen mit dem Seegangmodell SWAN bestimmt worden.

Bild 2 stellt die Verteilung der signifikanten Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet für einen Wasserstand von 1 mNN, einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s aus nordwestlicher Richtung dar. Hier zeigt sich eine Abnahme der signifikanten Wellenhöhe des einlaufenden Seegangs von rd. 3,50 m am nördlichen Modellrand auf etwa 0,50 m in der Fahrrinne vor Bremerhaven. Der Einfluss der Fahrrinne mit erhöhter Wassertiefe führt dort auch zu erhöhtem Seegang. Das Seegangmodell wurde an Bojenmessungen kalibriert (Mai et al. 2000).

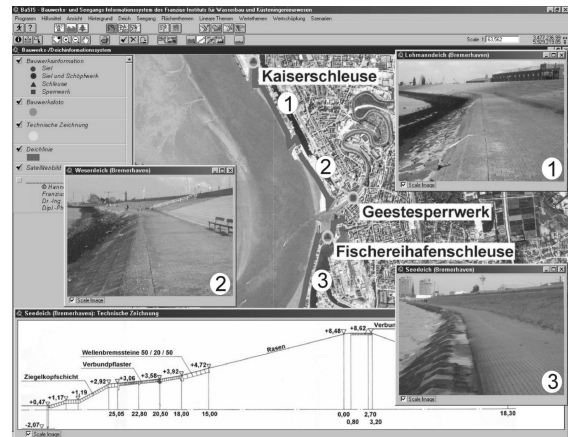


Bild 1 Archiv von Fotografien und Technischen Zeichnungen der Küstenschutzbauwerke, hier: Deiche in Bremerhaven

Figure 1 Archive of coastal defenses, here: dikes in Bremerhaven

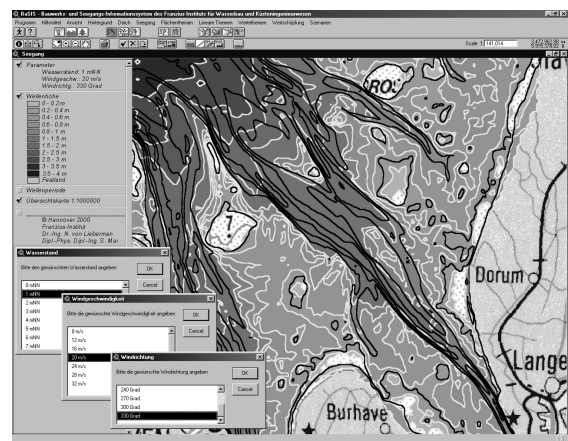


Bild 2 Interaktiver Atlas zur Seegangsvorhersage in Außenweser und Jade, hier: signifikante Wellenhöhe

Figure 2 Interactive Wave Atlas for the estuaries Weser and Jade, here: significant wave height

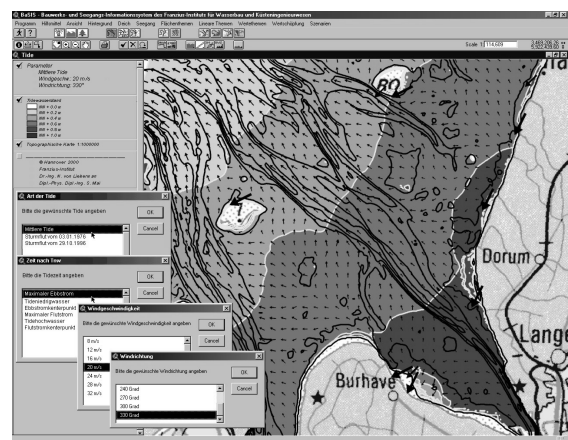


Bild 3 Interaktiver Atlas zur Wasserstands- und Strömungsvorhersage in Außenweser und Jade, hier: mittlere Tideverhältnisse

Figure 3 Atlas of tidal forecasts for the estuaries Weser and Jade, here: mean tidal conditions

In Bild 3 sind Ergebnisse der Wasserstands- und Strömungssimulationen für die Eingangsparameter Tidehochwasserstand am Leuchtturm Alte Weser $Thw = 1,05$ mNN, Tidehub am Leuchtturm Alte Weser $Thb = 2,25$ m, Windgeschwindigkeit $u_w = 20$ m/s und Windrichtung $\gamma_w = 330^\circ$ zum Zeitpunkt des maximalen Ebbstroms am Leuchtturm Alte Weser mit dem Programm MIKE 21 HD dargestellt. Die Wasserstände im Mündungsbereich bei Bremerhaven betragen rd. 0,90 mNN, während der Wasserstand am Leuchtturm Alte Weser bereits auf 0,20 mNN abgesunken ist. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Fahrrinne der Außenweser betragen 0,10 m/s bis 0,20 m/s. Die Kalibrierung des Modells erfolgte an den Pegeln „Spieka-Neufeld“, „Wremertief“, „Bremerhaven Alter Leuchtturm“ und „Fedderwardsiel“ des Untersuchungsgebiets.

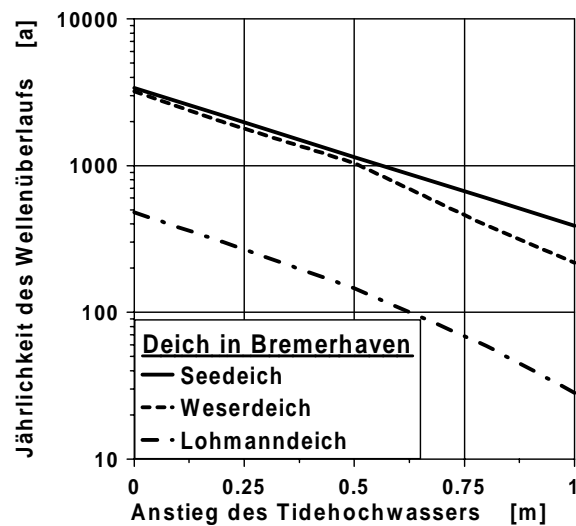


Bild 4 Jährlichkeit des Wellenüberlaufs an ausgewählten Deichabschnitten Bremerhavens bei Anstieg des Tidehochwassers

Figure 4 Recurrence Interval of wave overtopping at different dikes in Bremerhaven in case of rising tidal high water levels

Die aus den Gleichungen 1 und 2 resultierenden Versagenswahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Deichprofile des betrachteten Küstenabschnitts sind ebenso im BASIS abrufbar. Neben den aktuellen meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen wurde auch ein Anstieg des Tidehochwassers zwischen 0 m und 1 m berücksichtigt. In Bild 4 sind exemplarisch die für das Stadtgebiet Bremerhaven resultierenden Jährlichkeiten eines Wellenüberlaufs, d. h. die Kehrwerte der Versagenswahrscheinlichkeiten, dargestellt und den einzelnen in Bild 1 dargestellten Deichabschnitten „Lohmandeich“ (Nr. 1), „Weserdeich“ (Nr. 2) und „Seedeich“ (Nr. 3) zugeordnet. Die Jährlichkeit eines Wellenüberlaufs beträgt derzeit etwa 500 Jahre

(Nr. 1) bis 2.500 Jahre (Nr. 3) und reduziert sich bei einem Anstieg des Thw um 0,5 m auf etwa 200 bis 1.000 Jahre. Ein Anstieg des Thw um 1,0 m würde zu einer Reduzierung auf bis zu 20 Jahre am Lohmandeich führen. Zur Zeit wird daher durch das Hansestadt Bremische Hafenam, Bremerhaven, eine Neubemessung des Lohmandeichs durchgeführt.

3 Überflutung des Hinterlands

Ein Versagen von Küstenschutzbauwerken führt im Allgemeinen zu einer Schädigung des Wertbestands im Küstenhinterland. Um das mögliche Schadenpotenzial eines solchen Versagens zu bestimmen, sind die Überflutungsflächen zu ermitteln.

Für das BASIS wurde die mit einem Deichbruch verbundene Überflutung des Hinterlands an ausgewählten Fokusstandorten im Untersuchungsgebiet mit Hilfe zweidimensionaler numerischer Simulationen unter Verwendung des Programms MIKE 21 HD bestimmt. Die Randbedingungen am Fokusstandort wurden den in Bild 3 dargestellten Ergebnissen der Strömungssimulation entnommen. Bild 5 verdeutlicht die Funktionalität des BASIS, welches sowohl die Darstellung von Standbildern der Überflutung als auch Animationen des Überflutungsvorgangs beinhaltet, am Beispiel eines Versagens des Küstenschutzsystems am Geestesperwerk, Bremerhaven, für das Tidegeschehen der Sturmflut von 29.10.1996 rd. 10 Stunden nach Eintritt des Versagens. Vergleichbare Ergebnisse sind für die übrigen Fokusstandorte im Informationssystem BASIS abrufbar.

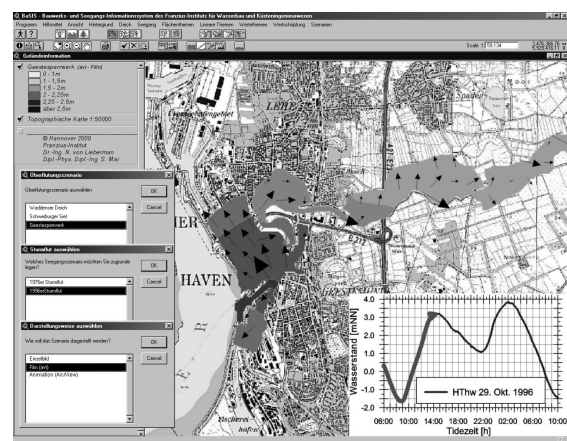


Bild 5 Ergebnis der numerischen Simulation eines Überflutungsvorgangs im Stadtgebiet Bremerhaven mit dem Modell MIKE 21 HD

Figure 5 Results of numerical simulations of the inundation of Bremerhaven using the model MIKE 21 HD

4 Folgen bei Überflutung

Zur Ermittlung des Wertbestands im Untersuchungsgebiet wurde ein analoger Ansatz auf Basis der Deutschen Grundkarten im Maßstab 1:5.000, wie er in Bild 6 dargestellt ist, gewählt. Hierbei wurden flächenhafte Größen, wie Ackerland und Bauflächen, und linienhafte Variablen, wie Straßen und Bahnstrecken, erfasst. Diese Informationen sind im BASIS abrufbar.

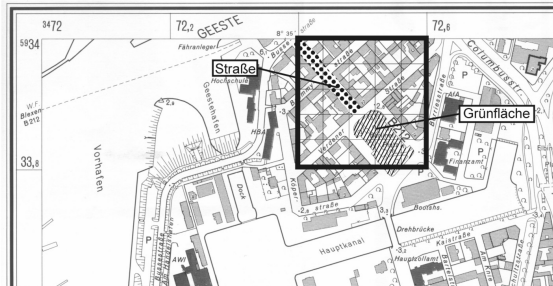


Bild 6 Prinzip des Analoges Vorgehens bei der Erfassung des Wertbestands im Untersuchungsgebiet
Figure 6 Concept of the determination of economic values within the hinterland

Bei Überflutung von Teilen des Hinterlands werden die dort vorhandenen Werte teilweise zerstört. Der Grad der Schädigung ist von den Parametern der Überflutung, wie z. B. Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit und Anstiegsgeschwindigkeit des Wassers, abhängig (Egli 1999). Für die Berechnung des Risikos wurde, wie in Veröffentlichungen des (CUR 1990) und von (Schmidtke 1995) beschrieben, die Wassertiefe als den Schädigungsgrad charakterisierender Parameter gewählt. Bild 7 zeigt die im BASIS implementierte Funktionalität zur Folgeschadensberechnung. Hier erfolgte die Schadensberechnung für den in Bild 5 dargestellten Überflutungsfall nach einem Versagen des Küstenschutzsystems am Geestesperrwerk in Bremerhaven. Der resultierende Schaden am Gesamtvermögen im Innenstadtbereich beträgt rd. 1.000 DM/m², der Gesamtschaden rd. 1 Mrd. DM (Mai et al. 2001b).

Aus dem Produkt der Versagenswahrscheinlichkeiten und der Folgeschäden kann nach Gleichung 3 eine Berechnung und somit eine Zonierung des Risikos vorgenommen werden. Bild 8 zeigt diese Zonierung unter Annahme eines infolge Klimawandels bedingten Anstiegs des mittleren Tidehochwassers von 1 m. Eine Integration des Risikos in den einzelnen Zonen ist in BASIS als Gesamtrisiko abrufbar und beträgt für den in Bild 5 dargestellten Überflutungsfall rd. drei Mio. DM pro Jahr.

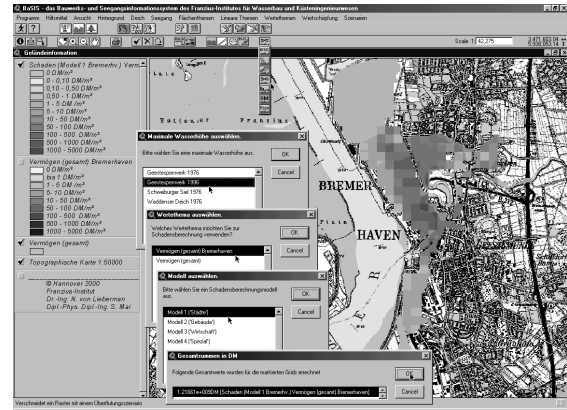


Bild 7 Verteilung des Schadens bei Deichversagen am Geestesperrwerk (Mai et al. 2001b)
Figure 7 Distribution of loss in case of a failure of the dike near the storm surge barrier at the Geeste (Mai et al. 2001b)

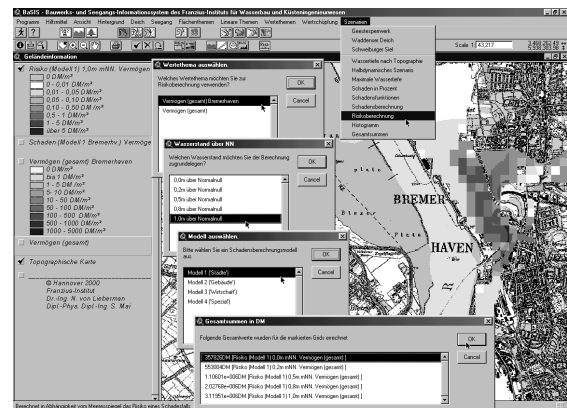


Bild 8 Kartierung des Risikos bei Deichversagen am Geestesperrwerk (Mai et al. 2001b)
Figure 8 Mapping of risk in case of a failure of the dike near storm surge barrier at the river Geeste (Mai et al. 2001b)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methodik der Risikoanalyse erweitert die bislang im Küstenraum praktizierten deterministischen Bemessungsverfahren in der Art, dass Kosten von Schutzsystemen der dadurch erreichten Risikominderung gegenüber gestellt werden können. So können kostenoptimale Schutzsysteme erarbeitet werden. Die Implementierung der Risikoanalyse in ein Geographisches Informationssystem visualisiert die komplexe Struktur der gesamten Risikoanalyse und bietet so Entscheidungsträgern Unterstützung bei der zukünftigen Planung und Unterhaltung von Schutzsystemen im Küstengebiet.

Das hier vorgestellte Informationssystem BASIS wird derzeit im Rahmen des interdisziplinären BMBF-Forschungsvorhabens „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement

an der deutschen Nordseeküste KRIM“ (Förderkennzeichen: 01LD0014) zu einem interaktiven und internet-gestützten Entscheidungshilfesystem (*Decision Support System*) erweitert. Es wird zudem Aspekte der Ökologie, Wirtschaftsgeographie, Risikowahrnehmung und -akzeptanz beinhalten.

Literatur

- Bezirksregierung Weser Ems (1997): Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems, Oldenburg.
- Centre for Civil Engineering Research and Codes (CUR) (1990): Probabilistic Design of Flood Defences, Technical Advisory Committee on Water Defences (TAW), Report 141.
- Egli, T. (1999): Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren, Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St. Gallen.
- Mai, S., von Lieberman, N., Fittschen, T., Bartels, K. (2000): Seegang in der Weser vor Bremerhaven – ein Vergleich von Naturmessung und numerischer Simulation. *Hansa*, Jg. 137, H. 9, S. 278-281.
- Mai, S., von Lieberman, N. (2001): Bauwerks- und Seegangsinformationssystem BaSIS. Tagungsband zum 16. Deutschen Hydrographentag, Potsdam, VI/B/1-15.
- Mai, S., von Lieberman, N. (2001): GIS-unterstützte Risikoanalyse. *HANSA*, Jg. 138, H. 7, S. 63-66.
- Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein (MLR) (2001): Generalplan Küstenschutz – Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein, Entwurf.
- Oumeraci, H., Kohlhase, S., Kunz, H., Weiss, D. (1999): Berechnungsansätze für Wellenauflauf und Wellenüberlauf an Seedeichen. HTG und DGGT Sprechtag.
- Pohl, R. (1997): Überflutungssicherheit von Talsperren. Wasserbauliche Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden, H. 11.
- Reeve, D.E. (1998): Coastal Flood Risk Assessment, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, No. 5.
- Schmidtke, R.F. (1995): Sozio-ökonomische Schäden von Hochwasserkatastrophen, Darmstädter Wasserbau-Mitteilungen, H. 40.
- Tautenhain, E (1981): Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus – Ein Beitrag zur Bemessung –. Mitteilungen des Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 53, S. 1-245.
- von Lieberman, N., Mai, S. (2001): Elemente der Risikoanalyse im Küstenraum Tagungsband zum 31. Wasserbau-Symposium Aachen IWASA.

Anschriften der Verfasser

Wissenschaftliche Assistentin Dr.-Ing. Nicole von Lieberman, e-Mail: nicole@fi.uni-hannover.de
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Stephan Mai, e-Mail: smai@fi.uni-hannover.de
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen,
Nienburger Str. 4, 30167 Hannover