

# **Sturmflutschutz des Natur- und Wirtschaftsraumes zwischen Jade und Weser – Eine Beurteilung der Deichsicherheit –**

**von**

**Nicole von Lieberman und Stephan Mai \***

## **1 Das Untersuchungsgebiet und seine Küstenschutzelemente**

Das gewählte Untersuchungsgebiet erstreckt sich von der Außenweser beim Leuchtturm Alte Weser über den Jade-/Außenweserbereich bis zur Tidegrenze der Weser am Neuen Weserwehr bei Bremen-Hemelingen (Abb. 1). Die Gefährdung dieses Küstenraumes erfolgt durch Sturmtiden, dem damit einhergehenden Extremseegang und teilweise gleichzeitigen Extremabflüssen, hervorgerufen durch Starkregenereignisse im Binnenland.

Als Reaktion auf diese Belastungen werden verschiedene Küstenschutzelemente, wie z.B. Deiche, Sperrwerke, Vorländer, Sommerdeiche, zu Schutzsystemen angeordnet (MAI ET AL., 1996). Der Raum zwischen Jade und Weser wird im seegangsbeeinflussten Bereich, d.h. am Jadebusen und an der Außenweser, im wesentlichen durch Deiche und vorgelagerte Vorländer geschützt. Der aufgrund der geringen Windwirklänge nur schwach seegangsbeeinflusste Unterweserbereich wird durch Sperrwerke und durch Deiche gegen Sturmfluten gesichert. Die charakteristischen Parameter der Küstenschutzbauwerke, wie Technische Daten, Technische Zeichnungen, Fotografien, Statistiken der Tidewasserstände, Abflüsse und des Seegangs, wurden in einem internetbasierten Kataster aufgenommen (Abb. 2)

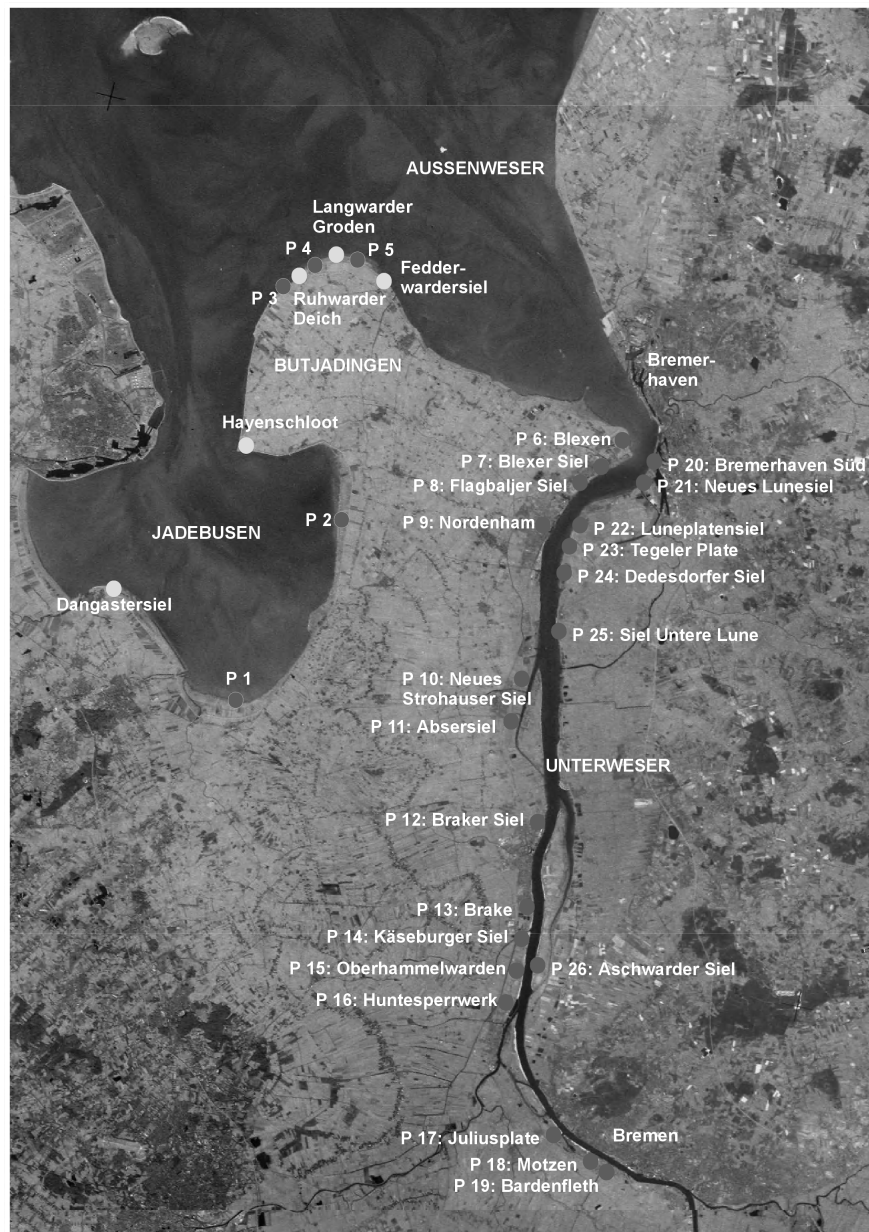
Die Untersuchung der Deichsicherheit im Natur- und Wirtschaftsraum zwischen Jade und Weser erfolgt exemplarisch für ausgewählte Deichprofile im Jadebusen und im Außenwesergebiet (Butjadingen) zwischen dem Jade-Wapeler Siel (Abb. 1, P1) und Fedderwardsiel (Abb. 1, P5) sowie an 14 Profilen des linken und sieben Profilen des rechten Weserufers.

Für den Bereich des Jadebusens und der Außenweser sind in Abbildung 3 charakteristische Deichprofile dargestellt. Das Detailprofil P1 (Abb. 3) zeigt einen Hauptdeich mit einem rd. 1.000 m breiten Vorland, an das sich das Watt mit einer Höhenlage von rd. 2,00 mNN anschließt. Die Vorlandhöhe liegt im seeseitigen Bereich auf etwa 2,20 mNN und steigt zum Deich auf 2,70 mNN an. Vor dem Hauptdeich befindet sich ein Entwässerungsgraben, dessen Sohle auf 1,73 mNN liegt. Die Krone des Hauptdeiches befindet sich auf 7,57 mNN; die Böschungsneigung beträgt 1:4 bzw. 1:10 im Fußbereich.

Das östlich benachbarte Profil P2 (Abb. 3) in Höhe Hobendeich besteht aus einem Hauptdeich mit einem rd. 350 m breiten Vorland. Die Vorlandhöhe liegt im seeseitigen Bereich auf 2,40 mNN und steigt zum Deich auf 2,60 mNN an. Vor dem Hauptdeich ist ein Entwässerungsgraben mit einer Sohlenlage von 1,97 mNN angelegt. Die Höhenlage des Hauptdeiches beträgt 8,04 mNN bei einer Böschungsneigung von 1:4 bzw. 1:10 im Fußbereich. Das dem Vorland vorgelagerte Watt befindet sich auf einer Höhe von rd. 1,90 mNN.

---

\* Dr.-Ing. N. von Lieberman und Dipl.-Phys. S. Mai, Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [e-mail: nicole@fi.uni-hannover.de, smai@fi.uni-hannover.de]

**Abb. 1: Untersuchungsgebiet**

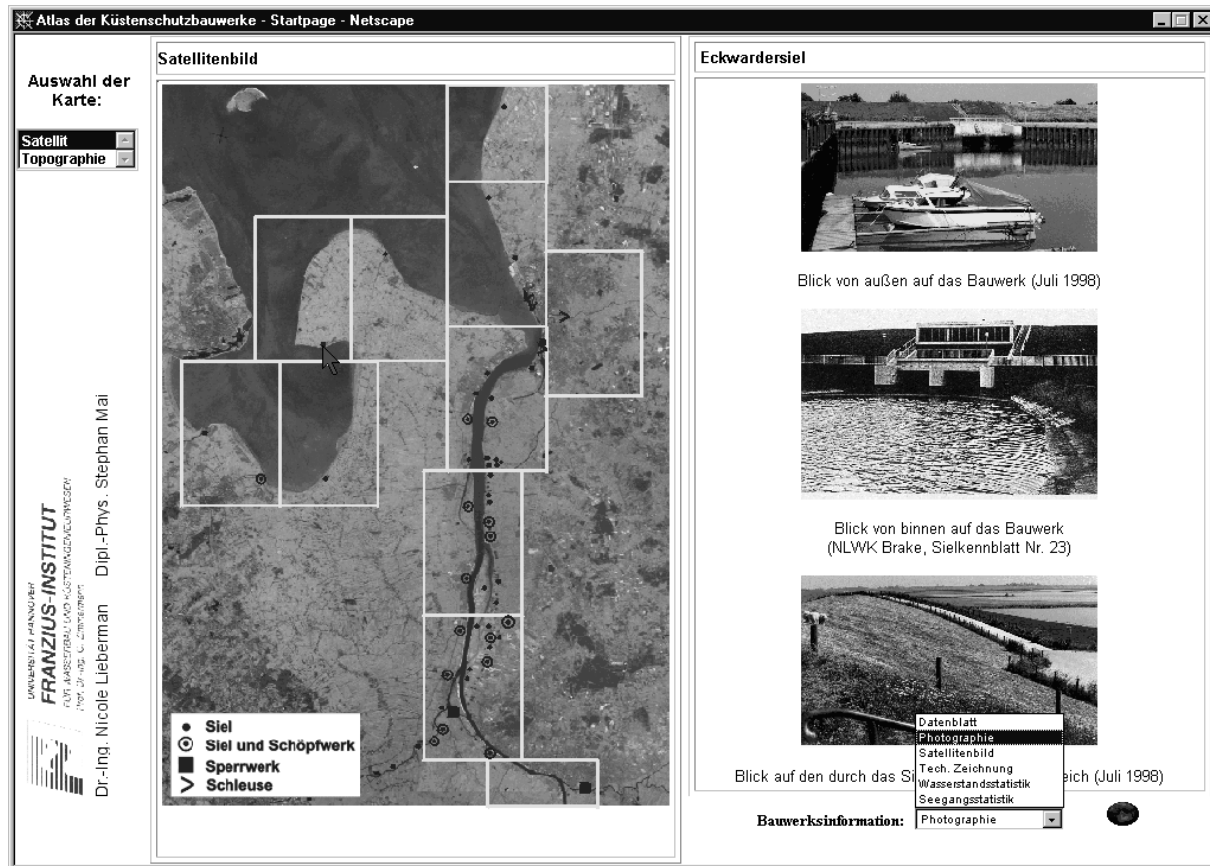
Das Deichprofil P3 (Abb. 3) in Höhe Tossenerdeich zeigt einen scharliegenden Deich, dessen angrenzende Wattfläche auf einer Höhe von rd. 1,00 mNN liegt. Die Höhenlage des Hauptdeiches beträgt 9,75 mNN mit einer Böschungsneigung von 1:5.

Das nordwestlich benachbarte Profil P4 (Abb. 3) in Höhe Ruhwarderdeich wird durch einen Hauptdeich mit 700 m breitem Vorland, dessen Kante mit Deckwerk und Pfahlwand gegen Erosion gesichert ist, gekennzeichnet. Das Watt liegt auf 1,50 mNN, das Vorland auf im seeseitigen Bereich auf 2,00 mNN und steigt zum Deich auf 3,30 mNN an. Die Höhenlage des Hauptdeiches befindet sich auf 9,70 mNN mit einer Böschungsneigung von 1:6.

Weiter östlich liegt das Profil P5 in Höhe Feldhauserdeich, es besteht aus einem Hauptdeich mit Sommerdeich. Die Breite des Sommerpolders beträgt 400 m, die Breite des Vorlandes 350 m. Von 2,00 mNN im seeseitigen Bereich steigt die Lage des Vorlandes und des Polders auf 3,30 mNN am Fuß des Hauptdeiches an. Die Wathöhe liegt bei 1,80 mNN. Der Sommerdeich ist 5,70 m über NN hoch, und die Krone des Hauptdeiches liegt auf 9,45 mNN. Seine Böschungsneigung beträgt 1:6. Vor dem Hauptdeich ist ein Entwässerungsgraben mit einer Sohlenlage auf 2,34 mNN angelegt.

Ein ähnlicher Aufbau der Küstenschutzsysteme liegt auch entlang der Weser vor. Hier ist die Neigung der Außenböschung der Hauptdeiche mit 1:3 bis 1:4 größer als die der Deiche der Profile P1 bis P5.

Abb. 2: Internetbasiertes Kataster der Küstenschutzbauwerke im Untersuchungsgebiet



## 2 Bemessung von Deichen und Analyse der Deichsicherheit

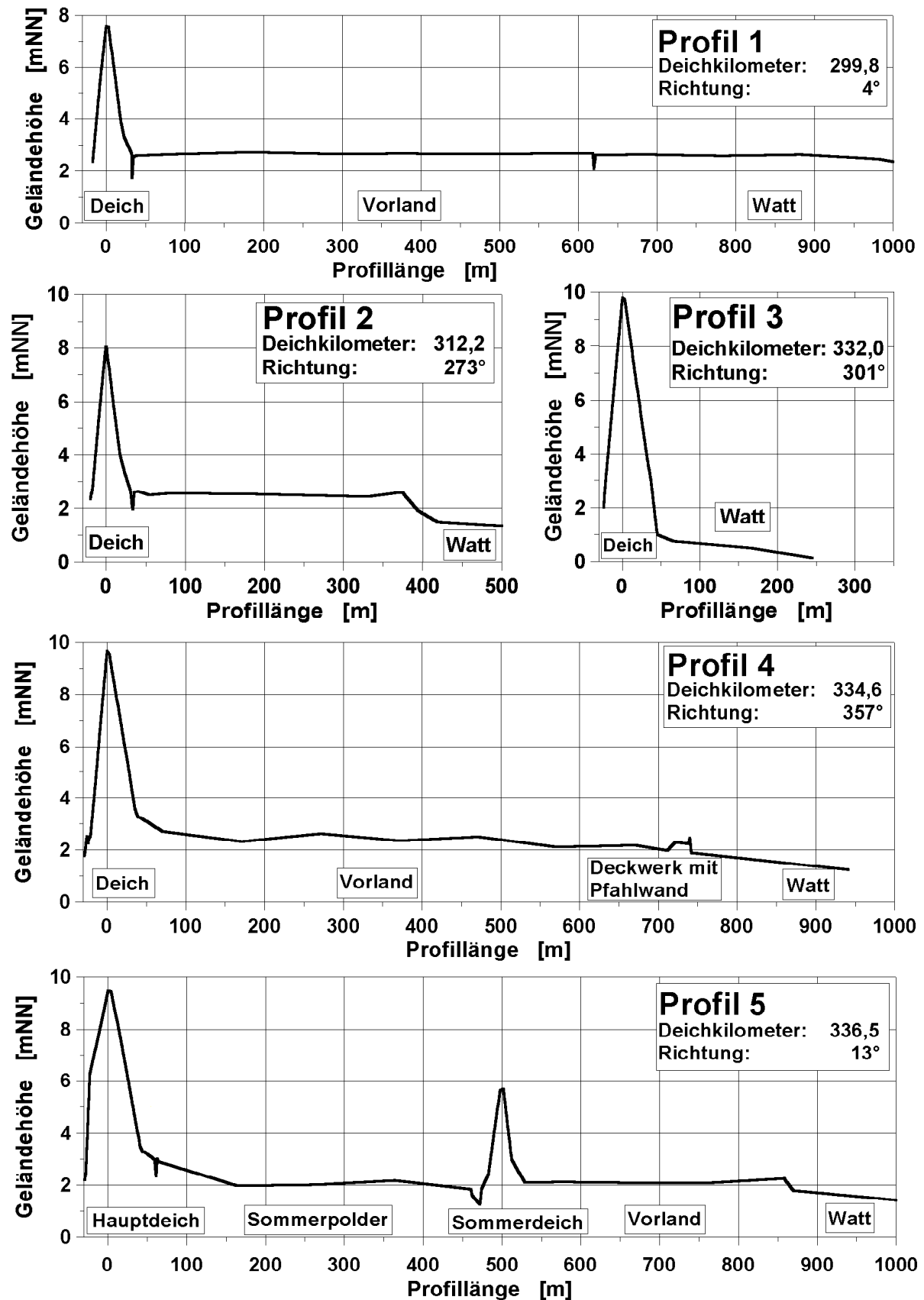
Die charakteristischen Versagensmechanismen, wie Wellenüberlauf, Überströmen, Böschungsbruch und Schiffstoß sind in Abbildung 4 dargestellt und wurden Schadensbildern der Sturmflut 1976 zugeordnet.

Zur Bemessung des Küstenschutzsystems wird in der Regel nur der Versagensmechanismus des Wellenüberlaufs am Hauptdeich berücksichtigt. Bislang erfolgt die Deichbemessung deterministisch, und zwar in Niedersachsen mit Hilfe des Einzelwert-Verfahrens bzw. in Schleswig-Holstein mit dem Vergleichswert-Verfahren (KRAMER, 1993). Zur Ermittlung des Bemessungswasserstands an Tideflüssen, wie der Weser und der Elbe, wird ein verändertes Vergleichswertverfahren angewendet (FREIE HANSESTADT HAMBURG (1998), FREIE HANSESTADT BREMEN (1995), KRAUSE ET AL. (1988)).

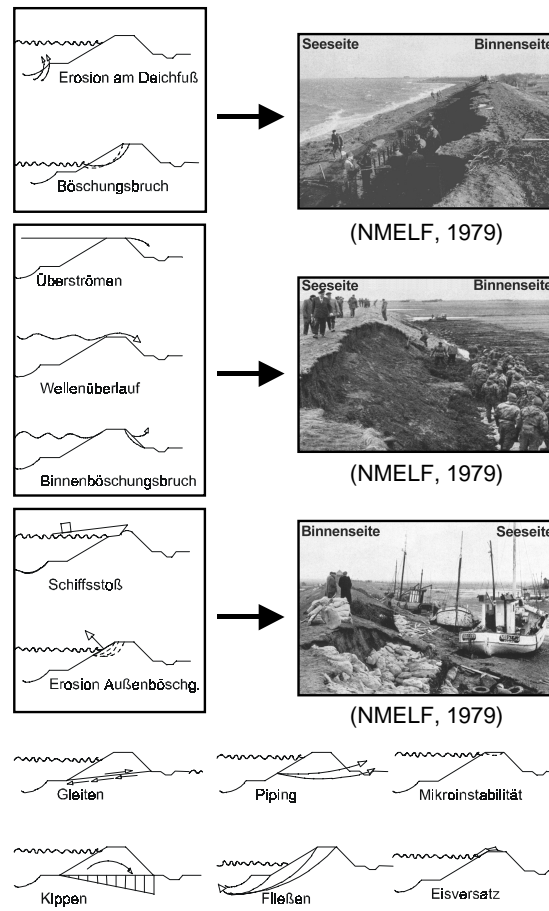
Alle genannten Verfahren fordern, daß die Deichhöhe  $h_D$  größer als die Summe aus dem höchsten Tidehochwasserstand  $Th_w$  und dem maximalen Wellenauflauf  $R$  (Abb. 5) ist, d.h. daß die Zuverlässigkeit  $Z$ , definiert als Differenz von Deichhöhe  $h_D$  und Tidehochwasserstand  $Th_w$  am Deichfuß sowie dem Wellenauflauf  $R$ , positiv ist:

$$Z = h_D - Th_w - R > 0 \tag{1}$$

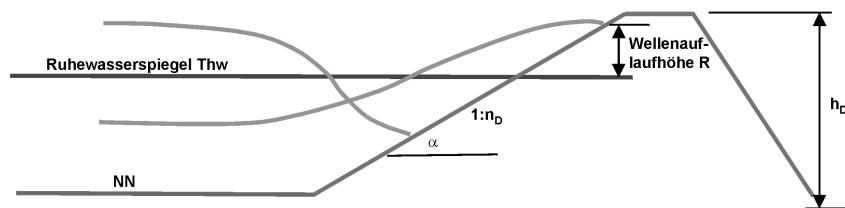
Abb. 3: Ausgewählte Profile P1 bis P5 zwischen Dangast und Fedderwardsiel



**Abb. 4: Schadensmechanismen an Deichen und Beispiele der Sturmflut 1976**



**Abb. 5: Wellenauflauf am Hauptdeich**



Im Vergleich zu den Standardverfahren werden zunehmend probabilistische Bemessungsverfahren eingeführt. Diese berücksichtigen nicht nur Extremereignisse des Wasserstands und des Wellenauf-laufs, sondern die Eintrittswahrscheinlichkeit der genannten Größen. Aus den hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen ist so im Gegensatz zu den Standardverfahren eine Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs  $p_{z < 0}$  bzw. des Wiederkehrintervall  $T_{z < 0}$  am Küstenschutzsystem möglich (CUR, 1990):

$$\frac{1}{T_{Z < 0}} = p_{Z < 0} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} dZ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{h_D - Thw}^{\infty} p_{(Thw, R)} dR dThw \quad (2)$$

mit:

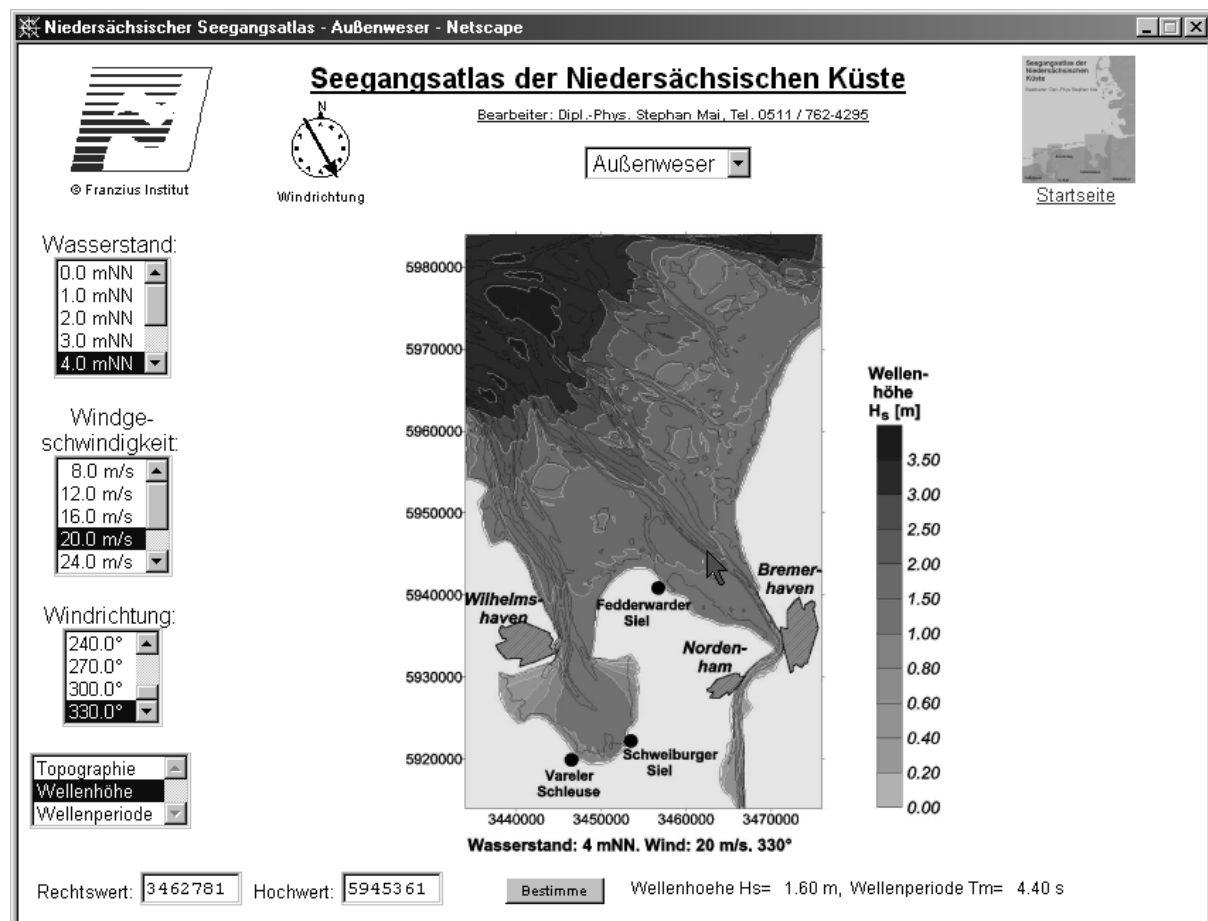
$p_{(Thw, R)}$  gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Tidehochwasser und Wellenauf-lauf

Neben der Beurteilung der aktuellen Sicherheit eines Küstenabschnittes kann die probabilistische Bemessung eine Grundlage zur Beurteilung des Einflusses geänderter Randbedingungen (z.B. klimabedingt), wie Wasserstände, Wellenhöhen etc. auf die Sicherheit liefern (MAI ET AL., 1997), und in einem weiteren Schritt das Risiko eines Schadenseintritts auf das Hinterland abgeschätzt werden (MAI & VON LIEBERMAN, 1999).

### 3. Belastung der Küstenschutzsysteme

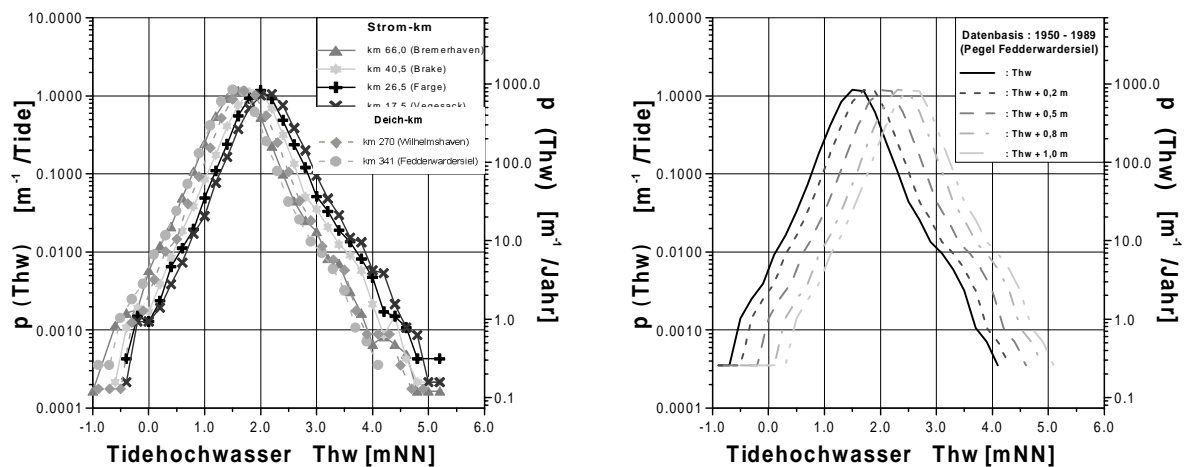
Zur Ermittlung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $p_{(Thw, R)}$  bedarf es Daten langjähriger Meßreihen des Tidehochwasserstands und des Wellenaufbaus. Für Tidehochwasserstände liegen diese Daten für Zeiträume von etwa 100 Jahren vor und sind in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern der Länder dokumentiert. Für den Wellenaufbau liegen derartige Messungen nicht in ausreichendem Umfang vor. Der Wellenaufbau wird daher aus dem Seegang am Deichfuß mittels einer Transferfunktion berechnet (VAN DER MEER & JANSSEN, 1994). Da auch für den Seegang keine Statistik aus Langzeitmessungen vorliegt, erfolgt eine Bestimmung der Seegangsstatistik aus der Statistik von Tidehochwasserstand und Windgeschwindigkeit bzw. -richtung mittels numerischer Simulation. Die für verschiedene Randbedingungen von Wasserstand und Wind gewonnenen Ergebnisse sind in einem internetbasierter Seegangsatlas dokumentiert (Abb. 6).

Abb. 6: Internetbasierter Seegangsatlas der Niedersächsischen Küste



Die in Abbildung 6 dargestellte Seegangsausbreitung in Jade und Außenweser zeigt die Abnahme der signifikanten Wellenhöhe des einlaufenden Seegangs von 3,10 m am nördlichen Modellrand auf etwa 0,60 m bis 0,80 m in der Fahrrinne vor Bremerhaven bzw. im Jadebusen.

**Abb. 7: Aktuelle Eintrittswahrscheinlichkeit von Tidehochwasserständen im Untersuchungsgebiet (links) und Szenarien am Pegel Fedderwardsiel (rechts) (nach: LANU, 1949 bis 1996 bzw. MAI & VON LIEBERMAN, 1999)**



Lokale Unterschiede der Tidehochwasserstände, welchen zu unterschiedlichen Sicherheiten des Küstenschutzsystems führen können, werden durch die Statistiken verschiedener Tidepegel berücksichtigt. So zeigt Abbildung 7, links, daß sich der wahrscheinlichste Tidehochwasserstand von rd. 1,20 mNN am Pegel Leuchtturm Alte Weser in der Außenweser auf rd. 1,95 mNN am Pegel Brake in der Unterweser erhöht.

Zur Untersuchung des Einflusses klimabedingt geänderter Tidehochwasserstände werden mögliche Szenarien eines Anstiegs des Tidehochwassers (Thw +  $\Delta h$ ) unter Voraussetzung einer unveränderten Form der Verteilungsfunktion, wie sie nach VON STORCH & REICHARDT (1996) näherungsweise berechtigt erscheint, zugrunde gelegt (Abb. 7, rechts). Untersuchungen des IPCC (1990) erwarten bis zum Jahr 2100 einen Wasserstandsanstieg um rd.  $0,70 \text{ m} \pm 0,30 \text{ m}$ . Die in Abbildung 7, rechts, für den Pegel Fedderwardsiel dargestellten Szenarien der Tidehochwasserstandsstatistik wurden ebenso für die übrigen Pegel erstellt.

Die ebenfalls in die Vorhersage der Seegangsstatistik eingehende Windstatistik ergibt sich aus Messungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und ist beispielsweise im Europäischen Windatlas dargestellt (vgl. VON LIEBERMAN & MAI, 1999). Neuere Untersuchungen, z.B. von BUSCH (1998), zeigen, daß bei Klimaänderung nicht mit signifikanten Änderungen der Windstatistik zu rechnen ist. Daher wurden derartige Einflüsse bei den vorliegenden Untersuchungen vernachlässigt.

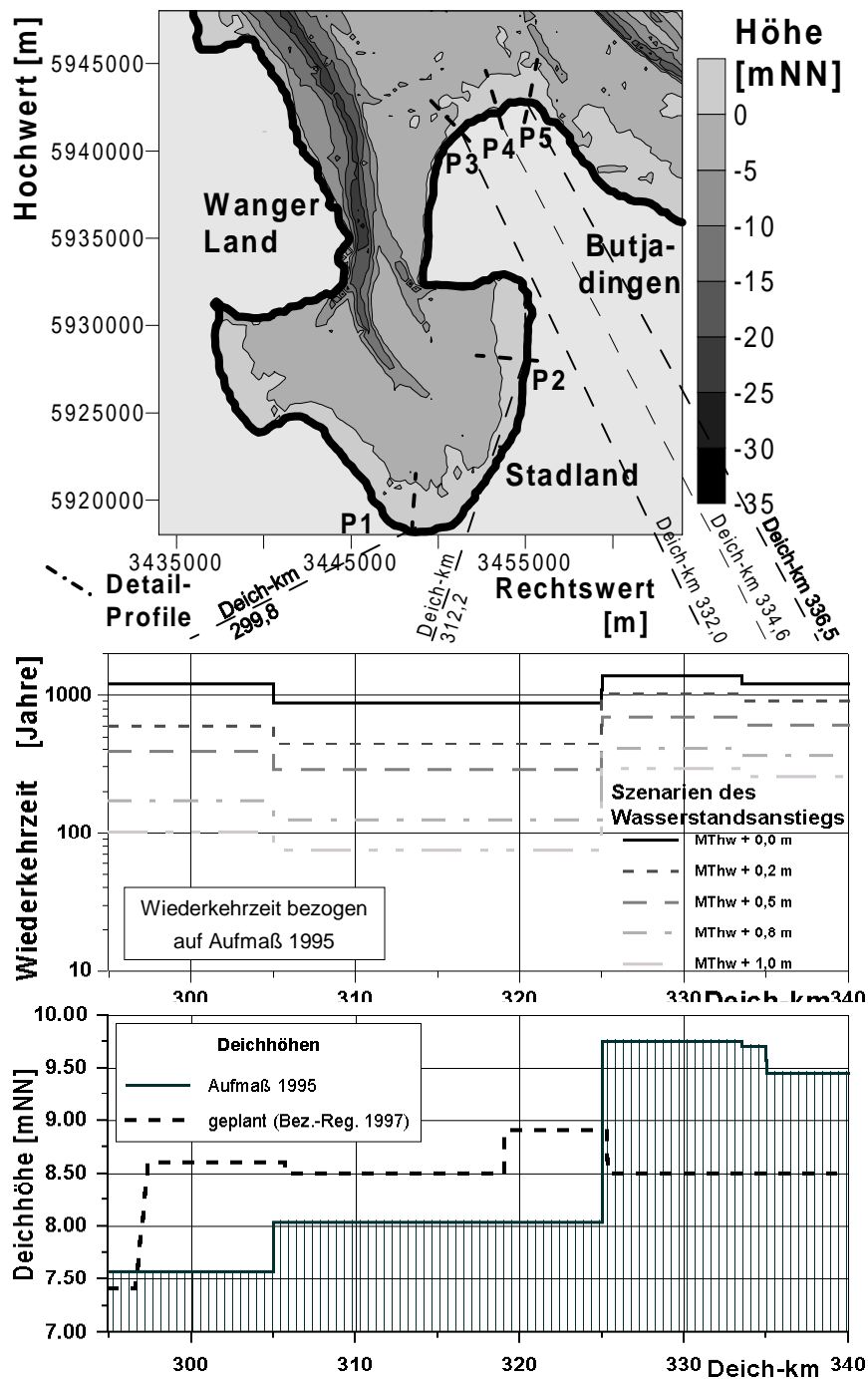
#### 4. Beurteilung der Deichsicherheit

Aus der Statistik der Belastungen  $p_{(\text{Thw}, R)}$  und unter Anwendung von Gleichung 2 folgt die Wiederkehrzeit von Wellenüberlauf am Deich. Diese ist für die fünf verschiedenen Deichprofile P1 und P5 des Küstenabschnitts Butjadingen in Abbildung 8 dargestellt.

Die Wiederkehrzeit von Wellenüberlauf in Butjadingen beträgt derzeit etwa 1.000 bis 1.200 Jahre und reduziert sich bei einem Anstieg des Thw um 0,5 m auf 400 Jahre. Ein Anstieg des Thw um 1,0 m würde zu einer Reduzierung auf 100 Jahre führen. Auffällig ist, daß für den Abschnitt zwischen Jadebusen und Butjadingen die Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs nahezu konstant ist, obwohl sich sowohl die Deichhöhen als auch die Vorlandprofile unterscheiden. Demnach ist das derzeit vorhandene Küstenschutzsystem an der Jade bzw. der Weser auch im Sinn des probabilistischen Bemessungsverfahrens als ausgewogen zu bezeichnen, was jedoch nicht für den gesamten deutschen Küstenraum gilt (ZIMMERMANN & MAI, 1998).

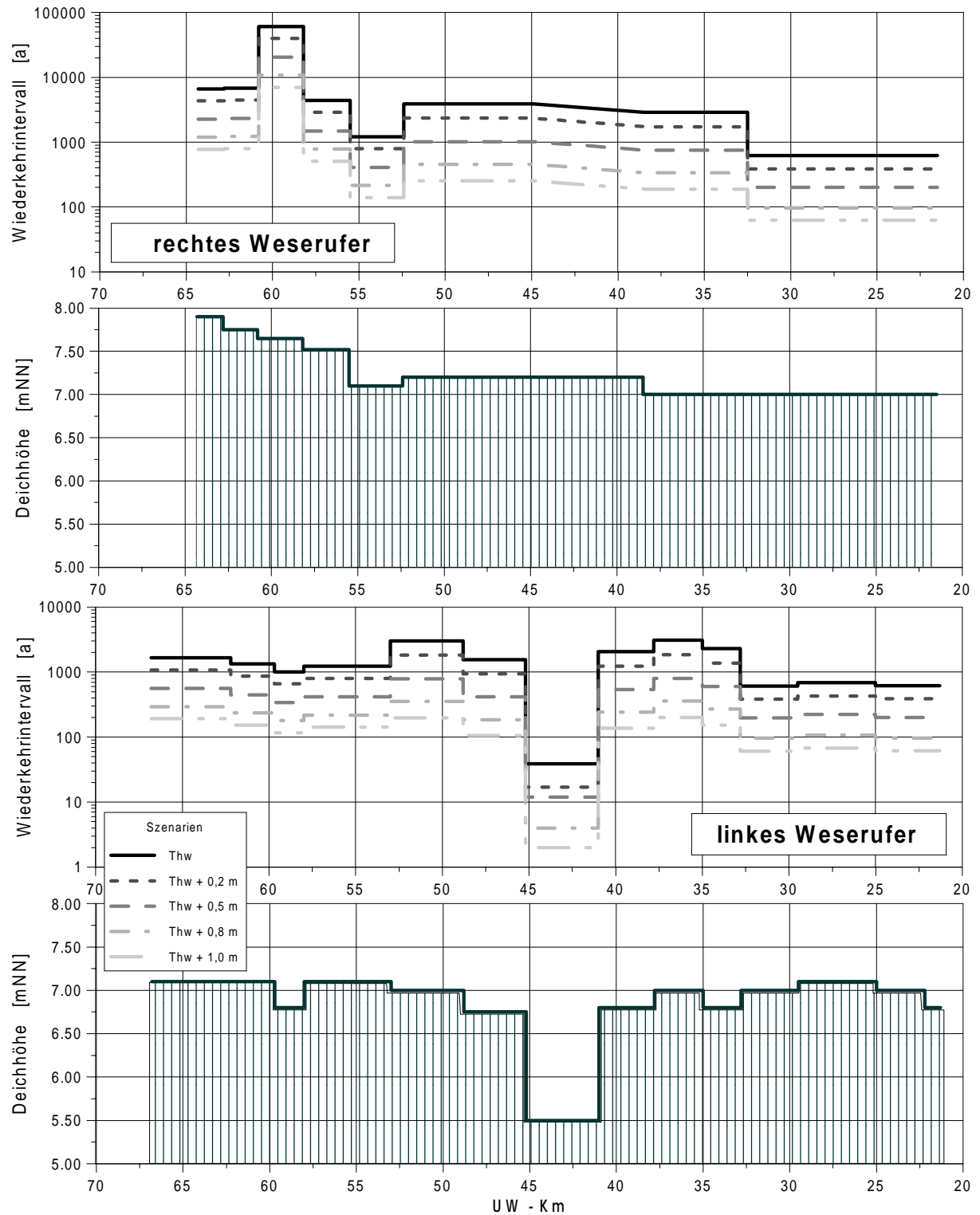
Im Gebiet der Unterweser verschieben sich die Versagenswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Szenarien eines Thw-Anstiegs in ähnlicher Form wie für die Profile P1 bis P5. Es zeigt sich, daß sogar bei einem um 1 m erhöhten Tidehochwassers nahezu überall am rechten und linken Weserufer Wiederkehrintervalle von über 100 Jahren bestimmt werden konnten. Am linken Ufer tritt jedoch im Bereich des Braker Siels bei einem Anstieg des Tidehochwassers um 1 m ein Wiederkehrintervall von weniger als zehn Jahren auf. Diese Deichfehlhöhe ist bereits im Generalplan (BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS, 1997) dokumentiert, und eine Deicherhöhung ist vorgesehen.

**Abb. 8: Wiederkehrzeiten des Wellenüberlaufs an Deichen der Küste Butjadingens bei verschiedenen Szenarien des Thw-Anstiegs**





**Abb. 9: Wiederkehrzeiten des Wellenüberlaufs an Deichen der Unterweser bei verschiedenen Szenarien des Thw-Anstiegs**



## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Hauptschutzelement der Küste im Bereich zwischen Jade und Weser ist der Deich mit und ohne Vorland. In Erweiterung der bisher üblichen und in Kapitel 2 vorgestellten Bemessungspraktiken wurde die Zuverlässigkeit eines Deichs unter probabilistischen Gesichtspunkten untersucht und Ergebnisse für das gewählte Projektgebiet dargestellt. Hierbei wurden u.a. infolge geänderter klimatischer Bedingungen geänderte Randbedingungen (hier: Wasserstand) in die Ermittlungen einbezogen. Am Beispiel ausgewählter Profile der Deichlinien im Jadebusen, im Bereich Butjadingen sowie der Unterweser zeigt sich, daß die derzeitige Sicherheit der Deiche, mit Ausnahme einzelner Profile im Bereich des linken Weseruferes, mit Wiederkehrintervallen eines Wellenüberlaufs größer 100 Jahren als gewährleistet angesehen werden kann. Dies gilt im wesentlichen auch bei einem Anstieg des Tidehochwassers, wengleich die zuvor genannten Profile im Unterwesergebiet bei steigendem Tidehochwasser keinerlei Sicherheitsreserven aufweisen. Wird jedoch beispielsweise eine 500-jährige statt 100-jährige Wiederkehrzeit von den zuständigen Entscheidungsträgern gefordert und festgelegt, so sind bei einem Wasserstandsanstieg von mehr als 0,5 m weite Bereiche des Jadebusens, Butjadingens und der Unterweser als nicht mehr sicher einzustufen. Somit erlauben die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse die Beurteilung der aktuellen und der für Klimaszenarien resultierenden Sicherheiten von Deichen.

Eine Erweiterung des vorgestellten probabilistischen Verfahrens zu einer umfassenden Risikoanalyse für eine Hinterlandregion, welche auch die bei Versagen entstehenden Folgeschäden berücksichtigt, wird derzeit von den Autoren am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens "Risiko einer Küstenregion bei Klimaänderung" umgesetzt.

## Literatur

- BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS (Hrsg.) 1997: Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems. Bezirksregierung Weser-Ems, Oldenburg.
- BUSCH, U. 1998: Eine Parametrisierung zur Erkennung von Starkwind- und Sturmweatherlagen in globalen Klimasimulationen, Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, Bd. 58.
- CENTRE FOR CIVIL ENGINEERING RESEARCH AND CODES (CUR) 1990: Probabilistic Design of Flood Defences, CUR Report 141.
- FREIE HANSESTADT BREMEN 1995: Hochwasserschutzgrundlagen für das Land Bremen.
- FREIE HANSESTADT HAMBURG, BAUBEHÖRDE, AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1998: Hochwasserschutz in Hamburg.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 1990: Climate Change – The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press.
- KRAMER, J. 1993: Äußere Belastung, Planung und Bemessung - Wasserstände und Sturmfluten, in Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutz, EAK 1993, Die Küste, Heft 55.
- KRAUSE, KROKER, PROBST, SCHERENBERG, SIEFERT 1988: Bemessungswasserstände entlang der Elbe, Die Küste, Heft 47.
- LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT (LANU) SCHLESWIG-HOLSTEIN 1949 bis 1996: Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher – Küstengebiet der Nord- und Ostsee –, Abflußjahre 1940 bis 1993.
- VON LIEBERMAN, N. & MAI, S. 1999: Küstenschutz an der Unterweser vor dem Hintergrund von Naturraum und Nutzung, Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung (Veröffentlichung im Druck).

- MAI, S. & VON LIEBERMAN, N. 1999: Untersuchungen zum Risikopotential einer Küstenregion, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Hannover (Veröffentlichung im Druck).
- MAI, S., SCHWARZE, H., ZIMMERMANN, C. 1996: Konzepte und Techniken im Küstenschutz in Niedersachsen unter geänderten Klimabedingungen, in Sterr, H. und Preu, C.: Beiträge zur aktuellen Küstenforschung: Aspekte-Methoden-Perspektiven, Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft.
- MAI, S., SCHWARZE, H. & ZIMMERMANN, C. 1997: Safety of Coastal Defense Systems, Proceedings of the 1-st international Conference PORT COAST ENVIRONMENT, Varna, Bulgarien.
- VAN DER MEER, J.W., JANSSEN, J.P.F.M. 1994: Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes and Revetments, delft hydraulics, pub. no. 485.
- VON STORCH, H. & REICHARDT, H.A 1996: Scenario of Storm Surge Statistics for the German Bight at the Expected Time of Doubled Atmospheric Carbon Dioxide Concentration, GKSS 96/E/18.
- ZIMMERMANN, C. & MAI, S. 1998: Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, H. 6.