

7 Die Auswirkungen einer Klimaänderung auf das Küstenschutzsystem an der Unterweser

Claus Zimmermann, Nicole von Lieberman u. Stephan Mai

7.1 Einleitung

Die Region der Unterweser (s. Abb. 2.1. im Tafelteil) wird heute durch Maßnahmen des Küstenschutzes vor hohen Wasserständen während Sturmfluten sowie gegen hohe Abflüsse aus dem Binnenland geschützt. Neben zahlreichen Sielen und Schöpfwerken, die die Entwässerung des Binnenlandes regulieren, sowie Sturmflutsperrwerken an den Nebenflüssen Hunte, Lesum und Ochtum und an der Geeste, stellen die Schar- und Vorlanddeiche rechts und links der Weser das wesentliche Küstenschutzelement der Region dar. Die Schar- und Vorlanddeiche entlang des linken (westlichen) Weserufer erreichen heute nahezu durchgehend die im Generalplan Küstenschutz (Bezirksregierung Weser-Ems 1997) ausgewiesene Sollhöhe von +6,80 m NN bis +7,10 m NN. In unmittelbarer Nähe des Braker Siels liegt mit +5,50 m NN eine Fehlhöhe des Deichs vor. Die Höhen der Deiche am rechten (östlichen) Weserufer betragen +7,10 m NN bis +7,90 m NN, Fehlhöhen treten nicht auf.

Im Falle einer raschen klimatischen Änderung, verbunden mit einem Meeresspiegelanstieg, einem Anstieg der Tidehochwasserstände und einer Zunahme des Windes (formuliert als Klimaszenario, s. Schirmer Kap. 3), stellt sich die Frage der Sensitivität und Zuverlässigkeit des vorhandenen Schutzsystems. Daher wurden im interdisziplinären Projektverbund „Klimaänderung und Unterweserregion“ (KLIMU, vgl. Schuchardt u. Schirmer Kap. 1) mit einer probabilistischen Methode einerseits die Zuverlässigkeit des heutigen Schutzsystems und andererseits die im Falle der angenommenen Klimaänderung erforderlichen Anpassungen des Schutzsystems bestimmt.

So wurden im Untersuchungsgebiet zunächst die vorhandenen Küstenschutzelemente umfassend aufgenommen und die Ergebnisse in Form eines html-basierten „Bauwerksatlasses“ dokumentiert (Abb. 7.1., www.fi.uni-hannover.de/~material/arbeitsgebiete/bauatlas.pdf). Dort können neben technischen Informationen, Fotografien und Zeichnungen zum Bauwerk, Satellitenbilder und erarbeitete Statistiken über Tidehoch- und Tideniedrigwasserstände der jeweils zugehörigen Tidepegel abgerufen werden.

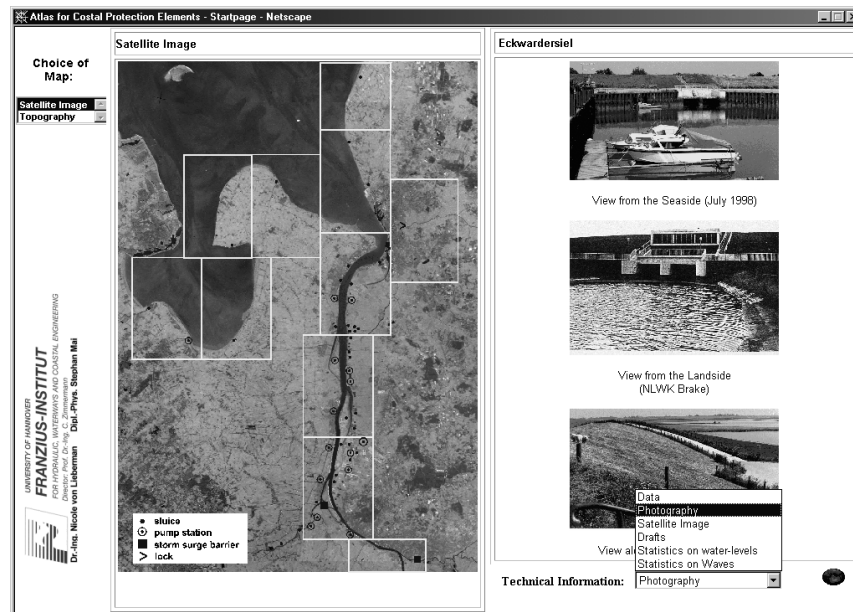


Abb. 7.1. Screenshot aus dem „Atlas der Küstenschutzbauwerke“. Beispiel: Eckwardersiel am Jadebusen

7.2 Methode zur Ermittlung der Sicherheit von Küstenschutzsystemen

An der gesamten deutschen Nordsee werden, wie auch in der Unterweserregion, die Küsten und Ästuarbereiche hauptsächlich durch das Element Deich geschützt. Den Deichen entlang der Unterweser ist teilweise ein Vorland mit einer Breite bis rd. 1.250 m vorgelagert, welches i.d.R. den von See einlaufenden Seegang reduziert, so dass er geringer an den Deichen aufläuft. Die heutige Praxis zur Festlegung des Deichbesticks, d.h. der Höhe und der Gestaltung des bedeutendsten Elements im Küstenschutzsystem, orientiert sich im Wesentlichen an einem Bemessungswasserstand und dem Wellenauflauf. Dennoch ist die Bemessung von Deichhöhen in den Küstenländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein und in der Freien und Hansestadt Hamburg unterschiedlich geregelt. Gemäß dem aktuell gültigen „Generalplan Küstenschutz“ (Bezirksregierung Weser-Ems 1997) wird in Niedersachsen zur Bemessung von Deichhöhen das Einzelwert-Verfahren angewendet, bei dem die Addition des mittleren Tidehochwassers (MThw), des Höhenunterschieds zwischen dem höchsten Springtide-Hochwasser im Winterhalbjahr (HSpThw) und dem MThw, des Windstaus (= Höhenunterschied zwischen dem höchsten eingetretenen Tidehochwasser (HHThw) und dem zugehörigen, vorausgerechneten astronomischen Tidehochwasser (Thw_v) und eines Sicherheits-

zuschlags für das säkulare Steigen des MThw (rd. 0,30 m/Jhrdt.) zur Deichsollhöhe führt. An der schleswig-holsteinischen Küste hingegen wird entsprechend dem aktuellen Generalplan Küstenschutz für Schleswig-Holstein (MLR 2001) nach dem Vergleichswert-Verfahren bemessen. Es bezieht sich auf die sog. „maßgebende Sturmfluthöhe“, die sich aus der Summe des maßgebenden Sturmflutwasserstands und des maßgebenden Wellenaufbaus zusammensetzt. Der maßgebende Sturmflutwasserstand ist im Durchschnitt nicht häufiger als einmal pro Jahrhundert zu erwarten und unterschreitet die auf die Gegenwart umgerechneten Sturmflutwasserstände vom 03./04. Februar 1825 nicht. Zudem ist er nicht niedriger als die Summe des größten beobachteten Windstaus und des möglichen höchsten Springtide-Hochwassers und entspricht mit Rücksicht auf den voraussichtlich säkularen und raumbedingten Wasserstandsanstieg den genannten Bedingungen bis zum Jahr 2000.

Die Überschreitungshäufigkeit des Bemessungswasserstandes wird allgemein als ein Maß für den Sicherheitsstandard angesehen, wenngleich bei Überschreiten dieses Wasserstandes eine Sicherheitsreserve vorhanden sein kann, bevor es zu einem Versagen bzw. einer vollständigen Zerstörung des Deichs kommt. Eine Quantifizierung der Überschreitungshäufigkeiten ist mit den bislang üblichen Bemessungspraktiken jedoch nicht möglich (v. Lieberman u. Mai 2001).

Die Standardverfahren der Deichbemessung können unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen zu einem probabilistischen Bemessungsschema erweitert werden, welches eine Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Versagens eines Küstenschutzelements ermöglicht (CUR 1990). Versagen bedeutet im Falle des Deichs die Nichterfüllung seiner Funktion als Schutz des Hinterlandes gegen Überflutung, z. B. bei Überströmen bzw. Wellenüberlauf (Pilarczyk 1998). Die Grundlage dieser sog. probabilistischen Analyse bildet die Ermittlung des maßgeblichen Versagensmechanismus des zu untersuchenden Küstenschutzelements. So wurde für das Versagen der Deiche in der Unterweserregion aufbauend auf der Auswertung bisheriger Sturmflutschäden als maßgeblicher Versagensmechanismus der Wellenüberlauf identifiziert (NMELF 1979; Zitscher 1978; o. V. 1976). Die mathematische Prüfung auf Versagen erfolgt mit Hilfe einer Zuverlässigkeitsfunktion Z , welche als Differenz von Belastbarkeit R und Belastung S definiert ist (Plate u. Duckstein 1988), d.h.

$$Z = R - S \quad (7.1)$$

Überschreitet die Belastung die Belastbarkeit, wird Z negativ ($Z < 0$) und ein Versagen des Deichs tritt ein. Somit ergibt sich für die Deiche die Zuverlässigkeitsfunktion Z als Differenz von Deichhöhe h_D und Tidehochwasserstand Thw am Deichfuß sowie Wellenaufbau $R_{98\%}$:

$$Z = h_D - Thw - R_{98\%} \quad (7.2)$$

Die Belastung ist aufgrund ihrer Abhängigkeit von stochastischen, hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen eine wahrscheinlichkeitsverteilte Größe, und auch die Belastbarkeit ist aufgrund unterschiedlicher Materialien von Deichen wahrscheinlichkeitsverteilt. Damit ist die Zuverlässigkeit ebenfalls eine stochastische Variable. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zuverlässigkeit kann - resultierend aus Gl. (7.1) - durch die Integration der Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Belastbarkeit $p_{R(R)}$ und Belastung $p_{S(S)}$ beschrieben werden (Mai u. v. Lieberman 1999). Die Versagenswahrscheinlichkeit $p_{Z < 0}$ bzw. der reziproken Wiederkehrzeit $T_{Z < 0}$ des Versagens entspricht so

$$\frac{1}{T_{Z < 0}} = p_{Z < 0} = \int_{-\infty}^0 p_{Z(Z)} dZ = \int_{-\infty}^{\infty} p_{R(R)} dR = \int_R^{\infty} p_{S(S)} dS = \iint_{R-S < 0} p_{R(R)} \cdot p_{S(S)} dR dS \quad (7.3)$$

Die Belastung sowie die Belastbarkeit lassen sich aus den hydrologischen und meteorologischen Bedingungen am seeseitigen Rand des Schutzelements Deich bzw. aus den Eigenschaften des Deichs bestimmen. Für den Versagensmechanismus Wellenüberlauf wird die Belastung am Deich, d.h. Wasserstand, Seegang und Wellenauflauf, z.B. aus dem numerischen Modell SWAN (*Simulation Waves Nearshore*) der Technischen Universität Delft (Ris 1998) zur Simulation des Seegangs sowie Berechnungen des Wellenaufbaus bestimmt. Der Wellenaufbau auf einen Deich ergibt sich für eine bestimmte Deichneigung 1:n aus den Seegangsparemtern „signifikante Wellenhöhe“ und „mittlere Wellenperiode“ am Deichfuß. Die Berechnung erfolgt z. B. nach Battjes (1971):

$$R_{98\%} = \gamma \cdot 0,75 \cdot \frac{1}{n} \cdot T_m \cdot \sqrt{g \cdot H_s} \quad (7.4)$$

mit:

- γ Beiwert [-]
- 1:n Deichneigung [-]
- T_m mittlere Wellenperiode [s]
- g Erdbeschleunigung [m/s²]
- H_s signifikante Wellenhöhe [m]

Der Beiwert γ berücksichtigt hierbei die Oberflächenbeschaffenheit des Deichs, den Einfluss der Wellenangriffsrichtung und den Einfluss einer Berme (de Waal u. van der Meer 1992).

Im Projekt KLIMU wurden für die probabilistische Analyse als Randbedingungen der Tidehochwasserstand (s. diesbezüglich auch Grabemann et al. Kap. 4), die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung als unabhängige Größen angenommen. Die Windgeschwindigkeiten und -richtungen wurden zur Parametrisierung des Spektrums eines Eingangsseegangs an einem für das ausgewählte Projekt gebiet definierten Modellrand verwendet, die Hauptanlaufrichtung des Seegangs

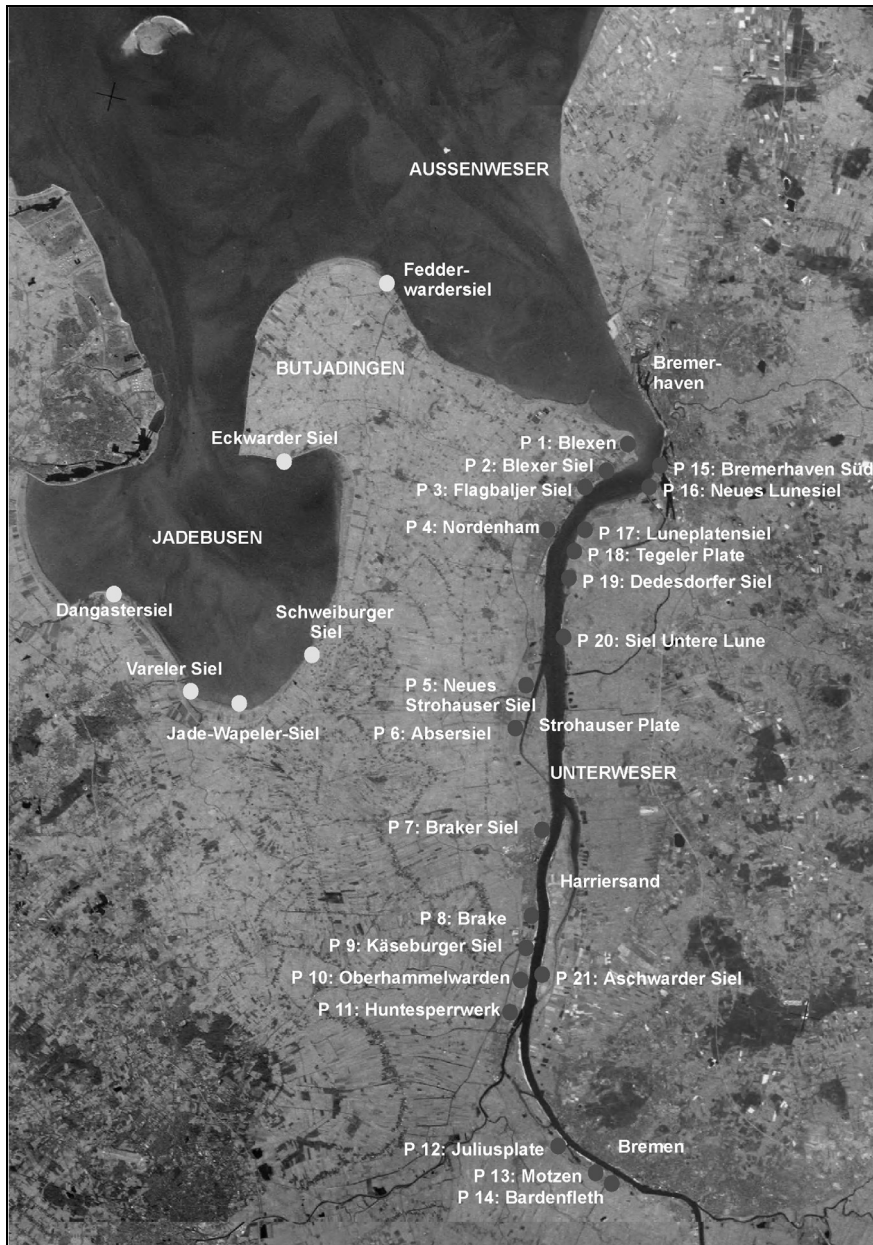


Abb. 7.2. Ausgewählte Deichprofile P1 bis P21 im Untersuchungsgebiet, für die eine Analyse der Wiederkehrzeiten eines Wellenüberlaufs berechnet wurden; Kartengrundlage nach Scout Systems (1996)

wurde der Windrichtung gleichgesetzt. Die signifikante Wellenhöhe H_s und die Peak-Periode T_p wurden nach CERC (1984) aus der Windgeschwindigkeit ermittelt. Hierzu wurden das Frequenzspektrum als JONSWAP-Spektrum angenommen und die Richtungsverteilung nach Mitsuyasu (1975) angenähert. Die erforderlichen Seegangsgößen wurden in zwei Teilgebietsmodellen - für den Bereich Jade und Außenweser und für das Gebiet der Unterweser - mit dem Programm SWAN ermittelt (Mai et al. 2000). Die Simulationen für den Jade-Außenweser-Bereich waren erforderlich, um die Seegangsgößen im Mündungsbereich der Unterweser zu bestimmen. Die Auflösung des zur Simulation eingesetzten zweidimensionalen Seegangmodells betrug 50 m x 50 m. Für die Erstellung der Bathymetrie im Jade-Außenweser-Gebiet wurden Peildaten des Außenweserbereichs aus den Jahren 1993 bis 1995 vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) zur Verfügung gestellt, für den Flussschlauch der Unterweser lagen entsprechende Peildaten durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven vor. Für den Bereich der Deichvorländer standen keine digitalen Daten zur Verfügung, so dass die fehlenden Werte aus den Deutschen Grundkarten (DGK 5 N, Maßstab 1:5.000) digitalisiert wurden.

Für die hier dargestellte Untersuchung der Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs an insgesamt 21 ausgewählten Deichprofilen entlang der beiden Ufer der Unterweser (Abb. 7.2.; v. Lieberman u. Zimmermann 2001) wurden statistische Verteilungen der Tidehochwasserstände aus Messungen der Küstenpegel in Bremerhaven, Brake, Farge und Vegesack zugrundegelegt. Die Windstatistik wurde auf der Basis der im Europäischen Windatlas (Troen u. Petersen 1990) verzeichneten Daten erstellt.

7.3 Konsequenzen einer Klimaänderung für den Küstenschutz

Aus den Ergebnissen der Seegangssimulationen und unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Winden und Wasserständen wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit der Wellenhöhen im deichnahen Bereich bzw. am Deichfuß bestimmt. Diese Größen bilden die Basis zur Ermittlung des Wellenaufbaus und seines Eintretens. In den Abb. 7.3. und 7.4. (Abb. 7.3.-7.7. aus v. Lieberman u. Zimmermann 2001) sind die nach Gl. (7.3) bestimmten rechnerischen Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs für die heutige Situation und bei Eintreten des KLIMU-Klimaszenarios (= Tidehochwasserstand +0,70 m; Windintensität +3,8%; s. Schirmer Kap. 3) dargestellt.

Im Gebiet der Unterweser (UW) weisen die einzelnen, als charakteristisch ausgewählten Schar- und Vorlanddeichprofile P1 bis P14 am linken Ufer (s. Abb. 7.2.) im Status quo ein rechnerisches Wiederkehrintervall eines Wellenüberlaufs von mindestens 1.000 Jahren, die Profile P15 bis P21 am rechten Ufer im Mittel von rd. 3.000 Jahren auf. Während für das Profil bei UW-km 59,5 am rechten Weserufer (P17, Luneplate) ein extrem hohes Wiederkehrintervall von rd. 60.000

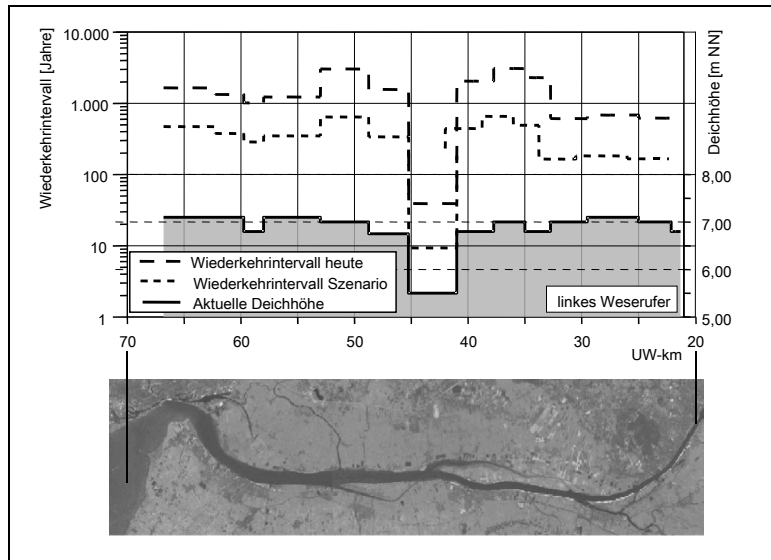


Abb. 7.3. Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs am linken Weserufer für die heutige Situation und das Klimaszenario (= Tidehochwasserstand +0,70 m; Windintensität +3,8%)

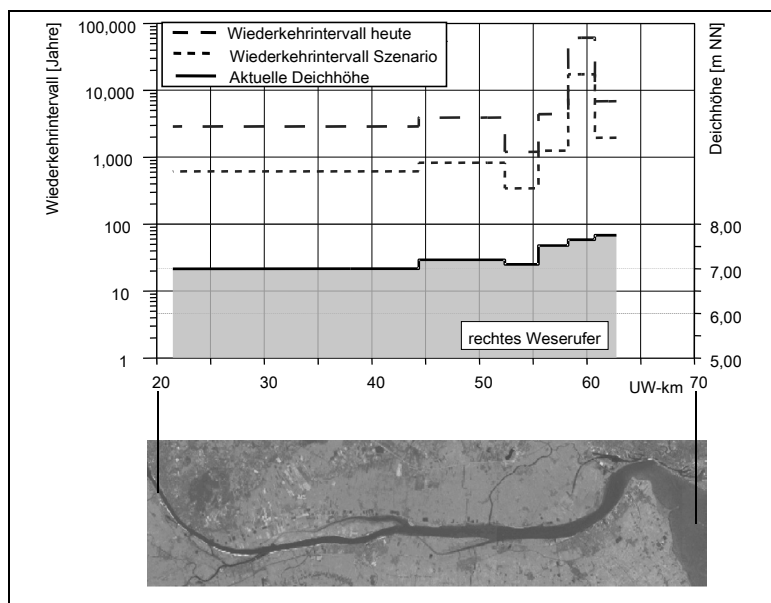


Abb. 7.4. Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs am rechten Weserufer für die heutige Situation und das Klimaszenario (= Tidehochwasserstand +0,70 m; Windintensität +3,8%)

Jahren ermittelt wurde, weist das Profil P7 am linken Weserufer im Bereich des Braker Siels bei etwa UW-km 42,5 ein Wiederkehrintervall von weniger als 40 Jahren auf (v. Lieberman u. Mai 1999).

Für das Klimaszenario mit einem um 0,70 m erhöhten Tidehochwasserstand und einer Zunahme der Windintensität von 3,8% verringern sich die Wiederkehrintervalle eines Wellenaufbaus für die Profile P1 bis P14 etwa um den Faktor 5-10, für die Profile P15 bis P21 etwa um den Faktor 5-8. An den Weserufern liegen dann Wiederkehrintervalle eines Wellenüberlaufs zwischen rd. 130 und 14.000 Jahren vor. Allerdings tritt am linken Ufer im Bereich des Braker Siels bei etwa UW-km 42,5 (P7) bei Klimaänderung ein Wiederkehrintervall von weniger als zehn Jahren auf (v. Lieberman u. Zimmermann 2001).

Das in Kap. 7.2 beschriebene probabilistische Verfahren zur Ermittlung der Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs wurde zudem zur Überprüfung der bei Klimaänderung zur Sicherung der Küstenregion erforderlichen Deichhöhe angewandt. Abb. 7.5. zeigt am Beispiel des Profils P20 (Siel Untere Lune) die Abhängigkeit der Wiederkehrzeit eines Wellenüberlaufs von der Deichhöhe für den Ist-Zustand und das definierte Klimaszenario. So kann durch Festlegung einer zulässigen Wiederkehrzeit des Wellenüberlaufs die erforderliche Deichhöhe bestimmt werden. Für das Profil P20 führt die heutige Deichhöhe zu einem Wiederkehrintervall des Wellenüberlaufs von rd. 3.900 Jahren. Für das Klimaszenario und für eine definierte Wiederkehrzeit von 1.000 Jahre wäre der Deich am Profil P20 auf 7,45 m NN zu erhöhen. Wie in den Abb. 7.6. und 7.7. für alle ausgewählten Profile der beiden Unterweserufer dargestellt, ergeben sich für das Klimaszenario

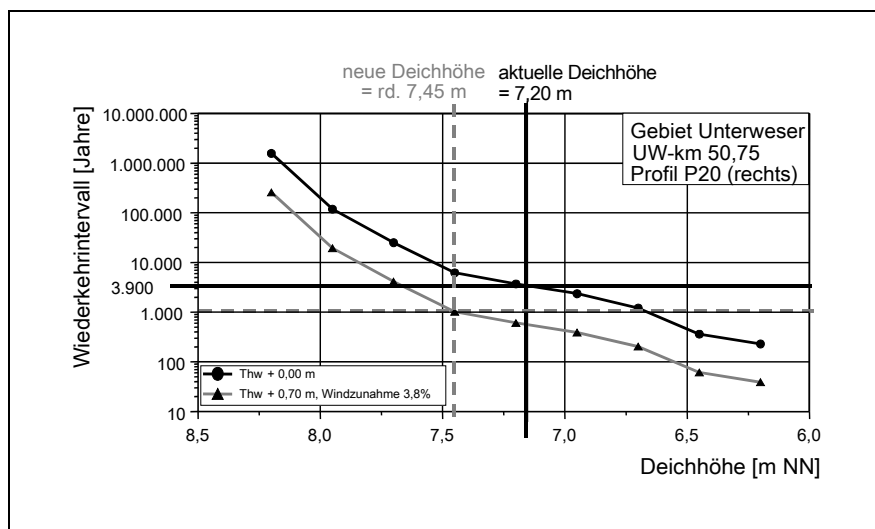


Abb. 7.5. Beispiel für die Ermittlung der erforderlichen Deichhöhe bei Ansatz des Klimaszenarios (= Tidehochwasserstand +0,70 m; Windintensität +3,8%) und Annahme einer gewünschten Wiederkehrzeit von 1.000 Jahren

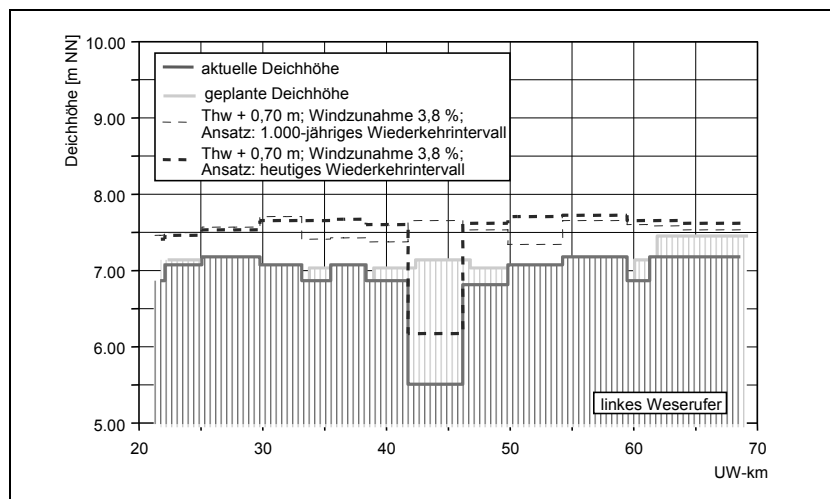


Abb. 7.6. Erforderliche Deichhöhen zur Anpassung an das Klimaszenario (= Tidehochwasserstand +0,70 m; Windintensität +3,8%) bei Annahme einer gewünschten Wiederkehrzeit von 1.000 Jahren bzw. bei Erhaltung der aktuellen Wiederkehrzeit am linken Weserufer

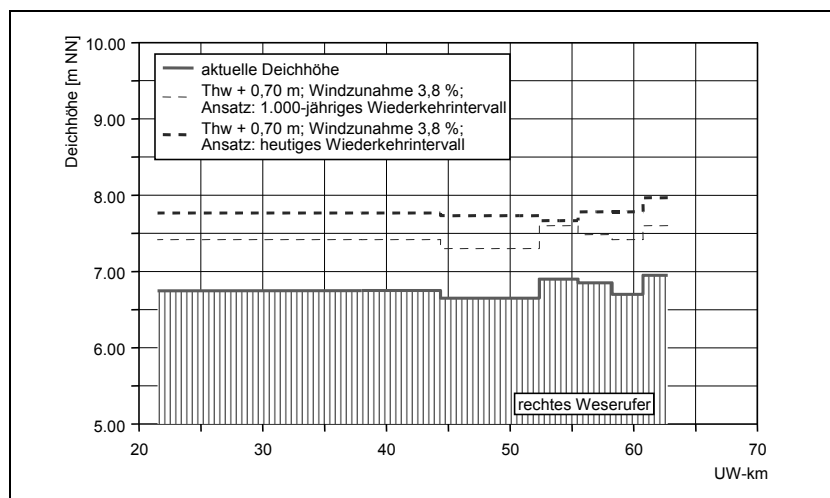


Abb. 7.7. Erforderliche Deichhöhen zur Anpassung an das Klimaszenario (= Tidehochwasserstand +0,70 m; Windintensität +3,8%) bei Annahme einer gewünschten Wiederkehrzeit von 1.000 Jahren bzw. bei Erhaltung der aktuellen Wiederkehrzeit am rechten Weserufer

und bei einem über die gesamte Deichlänge einheitlichen Wiederkehrintervall von 1.000 Jahren bzw. für den Fall, dass der heutige Sicherheitsstandard gewahrt werden soll, Erhöhungen der vorhandenen Deiche zwischen rd. 0,20 m und rd. 2,30 m.

Die Anwendung der probabilistischen Analyse, die bislang in Deutschland keine Bemessungsgrundlage darstellt, auf die Deiche der Unterweser zeigt, dass die aktuellen Deichhöhen, die auf deterministische Weise ermittelt wurden, zu sehr unterschiedlichen Zuverlässigkeiten führen. Im Fall der angenommenen Klimaänderung sind die Deiche daher, je nach zu definierendem Schutzstandard, zu erhöhen bzw. örtlich immer noch ausreichend hoch. Für die Annahme eines einheitlichen Wiederkehrintervalls des Versagens von 1.000 Jahren an beiden Seiten der Unterweser im Projekt KLIMU wären die Deiche des rechten Ufers auf der gesamten Länge zu erhöhen, während die Deichhöhen in einigen Bereichen des linken Ufers auch für das in KLIMU zugrundegelegte Klimaszenario noch ausreichend hoch sind. Hier stellt sich die Frage, welcher Schutzstandard in welchen Bereichen in Deutschland zukünftig gewährleistet werden soll? Während die bundesdeutschen Seedeiche bislang nicht auf eine bestimmte Wiederkehrzeit bemessen werden, liegt der Bemessung der dänischen Nordsee-Deiche eine Wiederkehrzeit von 200 Jahren (Laustrup 2000) und der niederländischen Deiche - je nach örtlicher Lage und zu schützenden Werten - eine Wiederkehrzeit von 4.000 bis 10.000 Jahren zugrunde (Jorissen 2000).

Mögliche Anpassungsoptionen des Küstenschutzsystems werden in v. Lieberman et al. Kap. 12 dargestellt.

7.4 Fazit

Das Hauptschutzelement des Küstenschutzes im Unterwesergebiet ist der Deich mit und ohne Vorland. In Erweiterung der bisher üblichen Bemessungspraktiken wurden das Versagen eines Deichs durch Wellenüberlauf unter probabilistischen Gesichtspunkten vor dem Hintergrund eines Klimaszenarios untersucht. Hierbei wurden infolge geänderter klimatischer Bedingungen geänderte Wasserstände und Windintensitäten in die Untersuchungen einbezogen. Am Beispiel ausgewählter Profile der Deichlinien der Unterweser konnte gezeigt werden, dass die Deichhöhe, mit Ausnahme einzelner Profile im Bereich des linken Weserufer, mit Wiederkehrintervallen eines Wellenüberlaufs, die größer als 1.000 Jahre sind, ausreichende Sicherheit bietet. Es zeigt sich jedoch, dass die Sicherheit entlang der Weserufer schwankt.

Bei einem Anstieg des Tidehochwassers um 0,70 m und bei einer Zunahme der Windintensität von 3,8% (Klimaszenario, s. Schirmer Kap. 3) zeigt die Anwendung der probabilistischen Bemessungsmethode, dass die ursprünglichen Versagenssicherheiten der Deiche gegen Wellenüberlauf reduziert werden. Einige Profile am linken Ufer weisen dann Wiederkehrintervalle von rd. 200 Jahren oder sogar weniger auf. Würde für die zukünftige Überlaufsicherheit beispielsweise eine 1.000-jährige Wiederkehrzeit von den zuständigen Entscheidungsträgern gefordert und festgelegt, so wären die Deichlinien nach den vorliegenden Berechnungen und angewandte Klimaszenarien an beiden Weserufern um Größen zwischen rd. 0,20 m und rd. 2,30 m zu erhöhen.

Literatur zu Kapitel 7

Battjes, J.A. (1971): Run-up Distributions of Waves Breaking on Slopes. - Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering.

Bezirksregierung Weser Ems (1997): Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems, Oldenburg.

CUR (Centre for Civil Engineering Research and Codes) (1990): Probabilistic Design of Flood Defences. - CUR-report, 141.

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

Lastrup, C. (2000): Probabilistic Design for Coastal Defence in Denmark. - Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 85.

von Lieberman, N. & S. Mai (1999): Küstenschutz an der Unterweser vor dem Hintergrund von Naturraum und Nutzung. - Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung: 109-127.

von Lieberman, N. & C. Zimmermann (2001): Folgen von klimabedingten Wasserstands- und Windänderungen für den Küstenschutz an der Unterweser. - Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 86: 57-100.

von Lieberman, N. & S. Mai (2001): Entscheidungsunterstützung im Sturmflutschutz durch Risikoanalyse. - Wasser und Boden, Jg. 53, H. 12: 11-16.

Mai, S. & N. von Lieberman (1999): Untersuchungen zum Risikopotential einer Küstenregion. - Mitteilungen des Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Hannover, H. 83: 292-320.

Mai, S., v. Lieberman, N., Fittschen, T., Bartels, K. (2000): Seegang in der Weser vor Bremerhaven - Ein Vergleich von Naturmessung und numerischer Simulation. - HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Jg. 137, H. 9: 278 - 281.

Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein (MLR) (2001): Generalplan Küstenschutz, Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein. - Kiel.

Literatur zu Kapitel 7

Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, NMELF (1979): Erfahrungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen, Bericht des Niedersächsischen Ministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. - Die Küste, H. 33: 1-70.

Pilarczyk, K.W. (1998): Dykes and Revetments: Design, Maintenance and Safety Assessment. - A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

Plate, E.J. & L. Duckstein (1988): Reliability-based Design Concepts in Hydraulic Engineering - Water Resources Bulletin, Nr. 2.

Ris, R.C. (1998): Spectral Modelling of Wind Waves in Coastal Areas. - Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report, Nr. 97-4.

Schirmer, M. (2003): Das KLIMU-Szeanrion: Hintergrund, Herleitung und Übersicht. - Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer-Verlag (in diesem Band).

Schirmer, M. & B. Schuchardt (2003): Die interdisziplinäre Fallstudie Klimaänderung und Unterweserregion (KLIMU): ein Überblick über Konzept, Struktur und Forschungsprozess. - Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer-Verlag (in diesem Band).

Scout Systems (1996): D-SAT 2, Satellitenatlas für Deutschland.

Troen, I. & E.L. Petersen (1990): Europäischer Windatlas.

de Waal, J.P. & J.W. van der Meer (1992): Wave Run-up and Overtopping on Coastal Structures. - Proc. ICCE, Venedig.

Zittscher, F.-F. (1978): Schadensursachen an Küstenschutzanlagen herkömmlicher Art während der Sturmflut vom 03.01.1976 an der schleswig-holsteinischen Westküste. - Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 47: 180-195.

o.V. (1976): Erfahrungen aus den Sturmfluten vom November/Dezember 1973 und Folgerungen für die niedersächsischen Küstenschutzwerke, Bericht der vom Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten eingesetzten Ingenieur-Kommission. - Die Küste, H. 29: 96-121.