

Verifikation des Extrapolationsverfahrens zur Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus aus der Einmessung von Teekgrenzen

Von HANZ DIETER NIEMEYER¹, RALF KAISER¹,
JOCHEN GÄRTNER², KLAAS.-H. PETERS³ u. OLAF SCHNEIDER¹

Zusammenfassung

Bereits ALBERT BRAHMS hatte die Einmessung von Teek nach Sturmfluten empfohlen, um daraus den Wellenaufbau an See- und Ästuardeichen abschätzen zu können. Eine Umsetzung dieses Vorschlags ist erst seit der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 bekannt. Nach der Sturmflut vom 3. Januar 1976 ist im Zuge von Überprüfungen der Deichsicherheit ein Verfahren zur Extrapolation von Teekmessungen zur Bestimmung des Bemessungswellenaufbaus entwickelt worden: Das Verfahren beruht auf der retrospektiven Ermittlung eines fiktiven Seegangs auf der Grundlage eingeführter Verfahren. Dieser fiktive Seegang kann – wie zumeist an Wattenküsten gegeben – bei Wassertiefenabhängigkeit für den Bemessungsfall extrapoliert werden.

Bisher war das Extrapolationsverfahren nur durch Vergleichsrechnungen mit den für die Ermittlung benutzten Meßdaten auf seine Zuverlässigkeit geprüft worden. Im KFKI-Forschungsvorhaben Bemessung auf Seegang wurden eingehende Untersuchungen vorgenommen, um die Zuverlässigkeit des Verfahrens so weitgehend wie möglich zu ergründen. Hierzu wurden die in den letzten Jahren zunehmend ausgeführten Teekmessungen inventarisiert und auf Plausibilität geprüft. Mit ausgewählten Daten konnte danach erstmals die Zuverlässigkeit des Verfahrens durch Hochrechnung von einer vorgegebenen Sturmflut auf eine andere abgeschätzt werden, deren Daten keinen Eingang in die Rechnung gefunden haben. Die Ergebnisse weisen eine hohe Qualität aus; die Abweichungen liegen unter 10 %.

Summary

A suitable dyke design has to consider both the expected extreme sea level and the accompanying wave run-up. Water-levels have already been measured in the 18th century in single cases. Permanently, and at an increasing number of stations records have been taken at the German North Sea coast since the middle of the last century. These data provided a useful basis for the evaluation of design water-levels which were introduced into the masterplans for coastal protection of the four federal states at the German North Sea coast. However, availability of wave data was extremely poor. The evaluation of a design wave run-up in the currently used masterplans is carried out empirically by local authorities.

The Frisian coastal engineer BRAHMS (1754, 1757), a pioneer of modern coastal engineering at the now German North Sea coast had already recommended to measure the benchmarks of flotsam after storm surges in order to determine the wave run-up. This idea was reintroduced – probably without knowledge of the earlier recommendation of BRAHMS – by a working group which was installed after the occurrence of the catastrophic storm surge in the Netherlands in 1953 (ARBEITSGRUPPE KÜSTENSCHUTZ, 1955). No data of flotsam levels were recorded before the storm surge of February 1962. Even after that event with its numerous dike breaks and damaged sections only few data of elevation and extent of flotsam have been documented INGENIEURKOMMISSION, 1962). In the following years flotsam measurements were carried out in larger numbers

¹ Niedersächsisches Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste –

² Amt für ländliche Räume Husum

³ Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz – Betriebsstelle Brake –

for the comparison of regional variation of wave run-up on sea and estuary dykes (ERCHINGER, 1974; INGENIEURKOMMISSION, 1979; ZITSCHER et al., 1979).

After the storm surges of January 1976 the demand for a simple and immediately available method to determine the design wave run-up for sea dykes was growing more urgent in German coastal engineering. In order to meet these requirements, the Extrapolation Method was developed at the Coastal Research Station using flotsam levels as a basis for the determination of design wave run-up (NIEMEYER, 1976). In addition, a first approach was made to consider an assumed overtopping security (NIEMEYER, 1977). This method has been frequently used for those cases where an empirically evaluated design run-up of the current masterplan of Lower Saxony has been considered questionable. In the following, the extrapolation method and its basics are briefly described and discussed referring to recent experience. Furthermore the Extrapolation-method is verified on the basis of evaluated data of storm surges.

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung	62
2. Das Extrapolationsverfahren	65
2.1 Grundsätze des Verfahrens	65
2.2 Ermittlung und Verifikation fiktiver Seegangparameter	65
2.3 Extrapolation für den Bemessungsfall	66
2.4 Berücksichtigung einer Überlaufsicherheit	67
2.5 Kritische Bewertung der Verfahrensgrundlagen	69
3. Anwendung des Extrapolationsverfahrens	70
3.1 Datensätze und Untersuchungsgebiete	70
3.2 Vergleich berechneter und gemessener Werte	71
4. Verifikation des Extrapolationsverfahrens	75
4.1 Datengrundlage und Verfahrensweise	75
4.2 Implementierung des Ansatzes von HUNT-VINJE	75
4.3 Implementierung des Ansatzes von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND	76
4.4 Implementierung des Ansatzes von VAN DER MEER und DE WAAL	78
4.5 Ergebnis der Verifikationstests	79
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	82
6. Danksagung	83
7. Schriftenverzeichnis	83
8. Symbole	85

1. Einleitung und Problemstellung

Bis in dieses Jahrhundert hinein sind die Deiche an der deutschen Nordseeküste rein empirisch bemessen worden. In Anpassung an Meeresspiegelanstieg, verbesserte technische Möglichkeiten, erhöhtes Sicherheitsbedürfnis und vor allem infolge – wiederholt sogar katastrophaler – Erfahrungen mit Sturmfluten sind ihre Abmessungen im Lauf der Jahrhunderte erheblich gewachsen (Abb. 1). Einen Vorschlag für eine verfahrensmäßige Bemessung für Deiche hatte zwar schon BRAHMS (1754, 1757) vorgeschlagen. Es dauerte aber bis in die Mitte dieses Jahrhunderts, bis aufgrund der katastrophalen Folgewirkungen der Sturmflut von 1953 in den Niederlanden im deutschen Küsteningenieurwesen das Erfordernis einer abgesicherten verfahrensmäßigen Deichbemessung mit besonderer Berücksichtigung der Zukunftsvorsorge erkannt wurde. Die damals insbesondere von HUNDT und LÜDERS initiierte Entwicklung (NIEMEYER et al., 1996) ist bis heute noch nicht vollendet, was überwiegend auf methodische Defizite zurückzuführen ist.

Die sichere und wirtschaftliche Bemessung von See- und Ästuardeichen hat mögliche Extremwasserstände ebenso in Rechnung zu stellen wie den in Verbindung damit möglichen

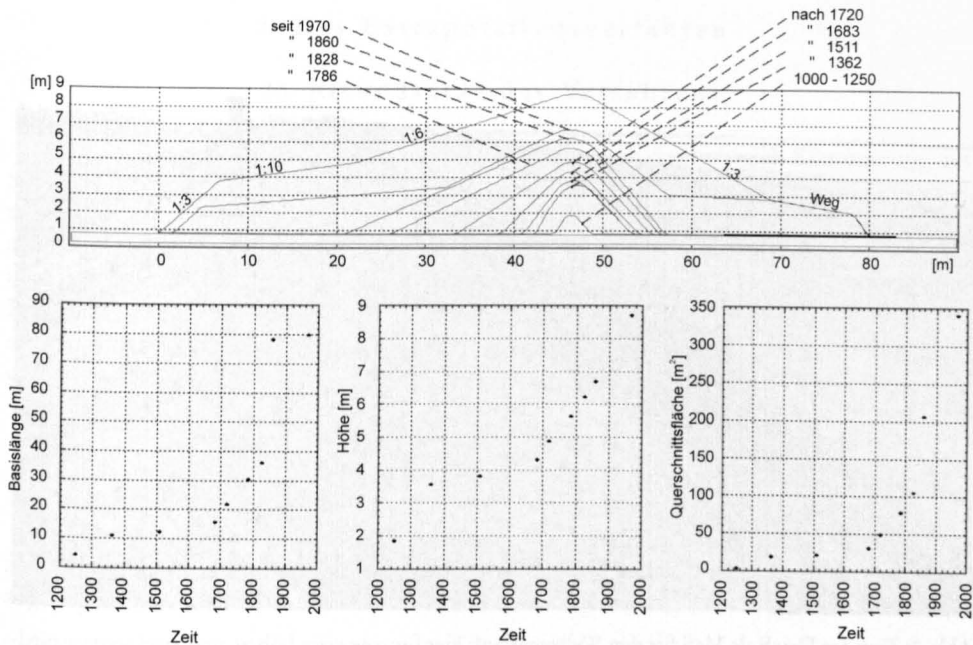


Abb. 1: Entwicklung der Querschnitte (NIEDERSÄCHSISCHE HAUPTDEICHVERBÄNDE, 1988) und Hauptabmessungen von Deichen am Beispiel der Butjadinger Küste (NIEMEYER et al., 1996)

Wellenauflauf. Für deren Ermittlung werden hinreichende Datensätze benötigt. In Einzelfällen sind Wasserstandsmessungen einschließlich der Erfassung von Sturmflutscheiteln schon im 18. Jahrhundert vorgenommen worden (BRAHMS, 1754, 1757; LUCK u. NIEMEYER, 1980; NIEMEYER et al., 1996). Seit der Mitte des letzten Jahrhunderts sind sie dann in immer größer werdender Zahl ausgeführt worden und haben somit eine – zwar aus wissenschaftlicher Sicht noch vielfach unvollkommene – Grundlage für die praxisorientierte Festlegung von als hinreichend sicher anzusehenden Bemessungswasserständen an der deutschen Nordseeküste gebildet. Für Seegang vor und Wellenauflauf an den Deichen ist die Datenlage dagegen wesentlich schlechter. Bereits BRAHMS hatte das Erfordernis derartiger Grundlagen für die Deichbemessung erkannt und zur Behebung des Defizits die Einmessung von Teekgrenzen nach Sturmfluten vorgeschlagen. Hierbei wird die durch den Wellenauflauf auf der Deichaußenböschung gebildete Treibselkante (Teek = Zeichen, Marke) als dessen Maß angesehen (Abb. 2). Es ist nicht bekannt, ob seiner Empfehlung irgendwann von den nachfolgenden Generationen von Küsteningenieuren gefolgt worden ist. Wahrscheinlich ist aber, dass sie – wie viele seiner Erkenntnisse – längere Zeit verschüttet geblieben sind. Die Idee taucht im Fachschrifttum wieder nach der Sturmflut von 1953 in den Niederlanden auf: Die ARBEITSGRUPPE KÜSTENSCHUTZ (1955) empfiehlt, ohne BRAHMS zu erwähnen und wahrscheinlich auch ohne seine Empfehlung zu kennen, durch Teekeinemessungen nach Sturmfluten Erkenntnisse über mögliche Größenordnungen des Wellenaufbaus an Deichen zu gewinnen. Es sind keine derartigen Messungen vor denjenigen nach der Sturmflut von 1962 bekannt. Aber auch in der unmittelbaren Folge dieses Ereignisses mit zahlreichen Deichbrüchen und einer noch größeren Zahl sicherheitsrelevanter Schäden sind nur vereinzelt Einmessungen des Teek vorgenommen worden. Ihr Wert ist zumeist nur begrenzt, da vielfach keine Angaben zur Deichgeometrie mehr verfügbar sind.

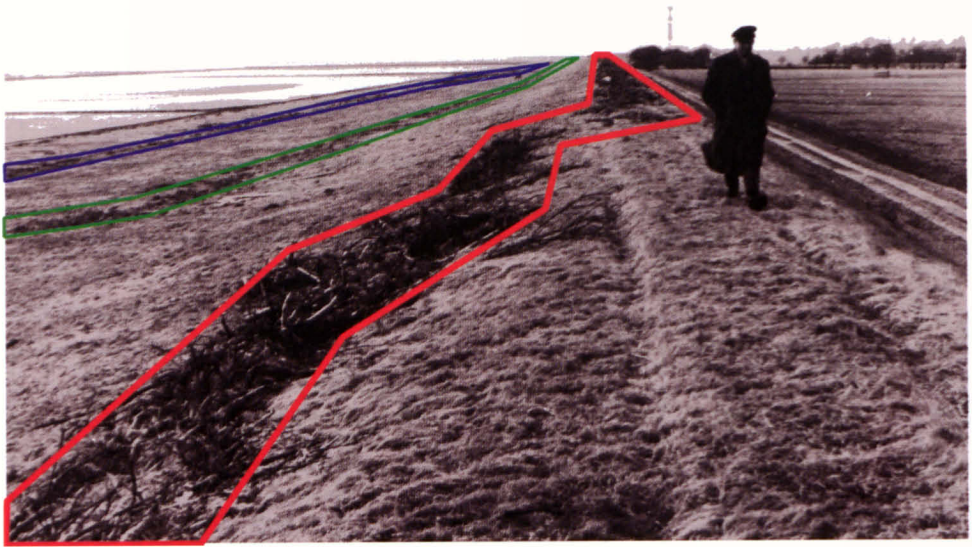


Abb. 2: Teek am Deich als Maß für den Wellenauflauf; hier für eine erste höhere und zwei weitere niedrigere am Seedeich bei Eckwarderhörne, Butjadingen

Erst in den siebziger Jahren mit einer Zahl hoher, aber für die bereits vielfach verstärkten Deiche nicht mehr gefährlichen Sturmfluten werden Einmessungen des Teek in größerer Zahl verfügbar (ERCHINGER, 1974; INGENIEURKOMMISSION, 1979; ZITSCHER et al., 1979). Diese Datensätze bilden die Grundlage für die Entwicklung des Extrapolationsverfahrens (NIEMEYER, 1976) nach den Sturmfluten vom Januar 1976, mit dem eine Hochrechnung der Teekeinmessungen auf den Bemessungsfall möglich wird. Das Verfahren wird dann noch auf der Grundlage von Naturmessungen von Sturmflutseegang dahingehend erweitert, dass die Berücksichtigung einer vorgegebenen Überlaufsicherheit des Deichs beim Bemessungswellenauflauf möglich wird (NIEMEYER, 1977b). Problematisch blieb dabei aber, dass die Verifikation des Verfahrens nicht mit unabhängigen Daten vorgenommen werden konnte, solange nicht dafür hinreichende Datensätze hoher Sturmfluten vorlagen. Eines der Ziele des KFKI-Forschungsvorhabens „Bemessung auf Seegang“ war es, dieses für die Bemessungspraxis im See- und Ästuardeichbau erhebliche Defizit zu beseitigen. Hierzu wurde eine eingehende Inventarisierung verfügbarer Daten an der deutschen Nordseeküste vorgenommen und hieraus geeignete Daten für die Verifikation des Extrapolationsverfahrens ausgewählt.

Im Folgenden werden die Elemente des Extrapolationsverfahrens, seine ursprüngliche Verifikation, seine physikalische Plausibilität vor dem Hintergrund seit seiner Entwicklung gewonnener Erkenntnisse und seine Verifikation mittels neu verfügbarer Datensätze dargestellt. Hieran soll verdeutlicht werden, inwieweit mit Hilfe verfügbarer Teekeinmessungen der Bemessungswellenauflauf verlässlich ermittelt werden kann.

2. Das Extrapolationsverfahren

2.1 Grundsätze des Verfahrens

Die nach Sturmfluten eingemessenen Grenzen des Teek ergeben nach Eliminierung des Sturmflutscheitels den aufgetretenen Wellenauflauf. Hieraus lässt sich über eine Kombination bekannter Verfahren ein zugehöriger fiktiver Seegang ermitteln. Ist dieser Seegang eindeutig an spezifische Randbedingungen gebunden, insbesondere wassertiefenbegrenzt, kann über deren Extrapolation der Seegang für die Bemessungsturmflut und daraus wiederum der Bemessungswellenauflauf ermittelt werden. Die Einzelheiten des Verfahrens sind bereits unmittelbar nach seiner Entwicklung eingehend beschrieben worden (NIEMEYER, 1976, 1977) und werden hier nur zusammenfassend wiederholt.

2.2 Ermittlung und Verifikation fiktiver Seegangsparemeter

Der aus der Einmessung des Teek ermittelte Wellenauflauf wird zur Berechnung einer zugehörigen fiktiven Wellenhöhe durch Inversion der DELFTER Formel (WASSING, 1967) herangezogen:

$$H_f = \frac{A_T}{8 \cdot \tan \alpha} \quad (1)$$

Die dazugehörige Wellenperiode wurde nach den Beziehungen für das PIERSON-MOSKOWITZ-Spektrum berechnet:

$$T_f = \sqrt{\frac{1000}{4,078} \cdot \frac{H_f}{g}} \quad (2)$$

Diese fiktiven Seegangsparemeter werden in die Auflaufformel von HUNT (1959) eingesetzt, wobei diese um den von VINJE (FÜHRBÖTER, 1976) empfohlenen Sicherheitsbeiwert von 1,25 erweitert wird:

$$A_{vH} = 0,5 \cdot \sqrt{g \cdot H_f \cdot T_f \cdot \tan \alpha} \quad (3)$$

Diese Werte werden als Vergleichswellenauflauf denen aus der Einmessung des Teek gegenübergestellt. Hiermit wird eine erste Stufe der Verifikation möglich; sie beruht allerdings allein auf Daten, die auch bei der Berechnung der fiktiven Seegangsparemeter benutzt worden sind.

In diesem Berechnungsgang wird die fiktive Wellenhöhe H_f nicht der signifikanten gleichgesetzt. Die nachträgliche Einsetzung der signifikanten Wellenhöhe H_s in die DELFTER Formel von WASSING (1967) ist bereits von der TAW als fragwürdig bezeichnet worden. Gleiches gilt für die analoge Vorgehensweise von FÜHRBÖTER (1976) bei der Formel von HUNT (1959), die auf der Grundlage von Versuchen mit regelmäßigen Wellen ermittelt worden ist (NIEMEYER, 1976). In beiden Fällen wird beim Extrapolationsverfahren die fiktive Wellenhöhe als Substitution für die maximale Wellenhöhe $H_{\max}$ angesehen.

Diese Betrachtungsweise ist von Bedeutung, wenn der Vergleichswellenauflauf mit Hilfe eines Verfahrens berechnet werden soll, bei dem der Wellenauflauf über Parameter unregel-

mäßigen Seegangs ermittelt wird. Das ist der Fall für die spektrale Auflaufformel von VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND (1968), die als weitere Vergleichsmöglichkeit genutzt wird:

$$A_{\text{VOA}} = c_{\epsilon} \cdot \sqrt{g \cdot H_s} \cdot T_p \cdot \tan \alpha \quad (4)$$

Um dieses Verfahren anwenden zu können, wird im ersten Schritt die signifikante Wellenhöhe nach dem Verfahren von BRETSCHNEIDER (1954) ermittelt, dessen Ergebnisse nach damaligen Erkenntnissen für die Verhältnisse der südlichen Nordsee als zutreffend angesehen wurden (SCHÜTTRUMPF, 1973):

$$\frac{H_{\text{max}}}{H_s} = \sqrt[10]{145 \cdot \frac{g \cdot h}{u^2}} \quad (5)$$

Die Peakperiode wurde ebenfalls über die Beziehungen für das PIERSON-MOSKOWITZ-Spektrum ermittelt:

$$T_p = 13,94 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (6)$$

Der Beiwert für die Wirkung der spektralen Breite ϵ , auf den Wellenaufbau c_{ϵ} , wurde damals mit

$$c_{\epsilon} = 0,75 \quad (7)$$

festgelegt (NIEMEYER, 1976). Dieser Wert liegt etwa in derselben Größenordnung wie eine spätere Anwendungsempfehlung von PILARCZYK (1987) mit einem Wert von $c_{\epsilon} = 0,70$. Im Gegensatz zum Wellenaufbau A_{vH} nach HUNT (1959) berücksichtigt der Wert A_{VOA} nach VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND (1968) einen Überlauf bei 2 % aller Wellen. Die seinerzeit mit den von der Sturmflut vom 3. Januar 1976 zur Verfügung stehenden Daten ausgeführten Vergleichstests zeigten in Bezug hierauf allerdings keine signifikanten Unterschiede (Abb. 3 u. 4). Sie machten aber deutlich, dass mit Hilfe dieses Verfahrens der über den Teek eingemessene Wellenaufbau naturähnlich reproduziert werden kann, wobei die berechneten Werte leicht unterhalb der gemessenen liegen (NIEMEYER, 1976).

2.3 Extrapolation für den Bemessungsfall

Aufbauend auf diesen Ergebnissen und mit der Vorgabe, der Seegang vor Deichen sei wassertiefenbegrenzt, wurde eine einfache Prozedur eingeführt, die zu einer Abschätzung des Bemessungswellenaufbaus führt. Hierbei wird als weitere Voraussetzung unterstellt, dass der intensivste Seegang und damit auch der höchste Wellenaufbau bei der Sturmflut etwa zeitlich mit deren Scheitel korrespondiert. Diese Vorgabe ist bei wassertiefenbegrenztem Seegang wiederum ausgesprochen plausibel. Die für den Wellenaufbau aus dem Teek einer Sturmflut ermittelte fiktive Wellenhöhe, die dazugehörige Wassertiefe und die Wassertiefe für den Bemessungswasserstand werden genutzt, um über eine Extrapolation eine äquivalente fiktive Wellenhöhe für den Bemessungsfall zu ermitteln:

$$H_B = \frac{H_f}{h_m} \cdot h_B \quad (8)$$

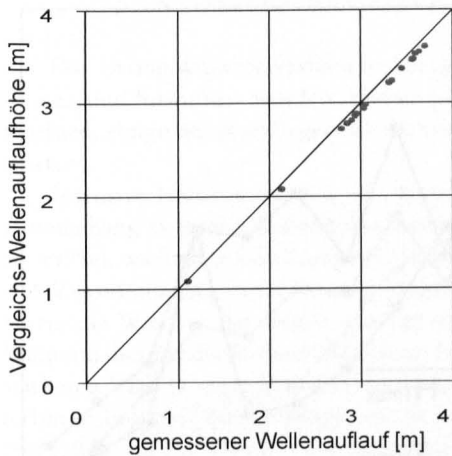


Abb. 3: Test des Extrapolationsverfahrens für Daten von der Butjadinger Küste (Sturmflut vom 3. Januar 1976: Verfahren HUNT-VINJE)

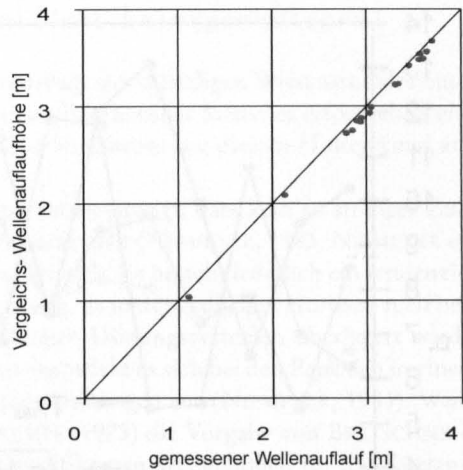


Abb. 4: Test des Extrapolationsverfahrens für Daten von der Butjadinger Küste (Sturmflut vom 3. Januar 1976: Verfahren VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND)

Hierauf aufbauend läßt sich nach den gleichen Prozeduren der Gleichungen (2)–(7) der Bemessungswellenaufschlag sowohl nach HUNT-VINJE als auch nach VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND berechnen.

2.4 Berücksichtigung einer Überlaufsicherheit

Um die statistische Verteilung von Seegang in den Wellenaufschlag quantitativ einbringen zu können, wurde aus dessen Parametern das Aufschlapppotential des Seegangs ermittelt (NIEMEYER, 1977):

$$P_A = \sqrt{g \cdot H_i \cdot T_i} \quad (9)$$

Hierin sind dann aus 17 Sätzen Naturdaten von Sturmflutseegang (NIEMEYER, 1977) die kennzeichnenden Parameter nach verschiedenen statistischen Wichtungen eingesetzt worden. Ein wesentliches Ergebnis war, dass für die meisten Datensätze die längeren Wellen der Zeitreihen das größte Aufschlapppotential beinhalten (Abb. 5): Weiterhin zeigte sich, dass die mittleren Höhen und Perioden der 10 % höchsten und längsten Wellen ein um 8 % beziehungsweise 18 % geringeres Aufschlapppotential hatten als die jeweils höchste beziehungsweise längste Welle jeden Datensatzes (Abb. 6 u. 7). Das um 18 % reduzierte Aufschlapppotential wurde von etwa 3 % der Wellen überschritten, was der seinerzeit vom TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHEN BEIRAT des Küstenausschuss Nord- und Ostsee (TWB, 1967) empfohlenen Überlaftoleranz für See- und Ästuardeiche an der deutschen Nordseeküste mit Binnenneigungen von 1:3 entspricht. Hierauf aufbauend fußt der Vorschlag, den Bemessungswellenaufschlag gegenüber dem rechnerischen Maximalwert mit dem Faktor 0,82 zu reduzieren.

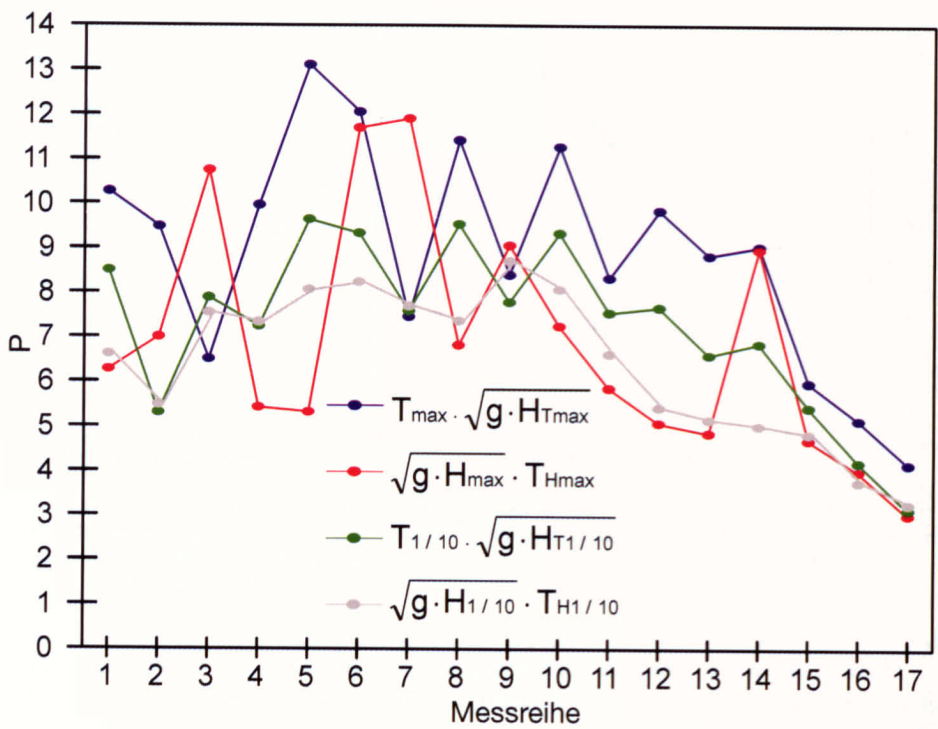


Abb. 5: Auflaufpotentiale der höchsten und längsten Wellen einer Zeitreihe, sowie der Mittelwerte der Höhen und Perioden der 10 % längsten und 10 % höchsten Wellen einer Zeitreihe (NIEMEYER, 1977)

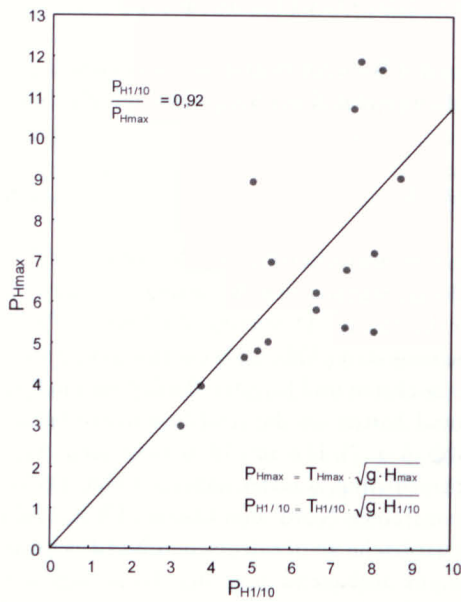


Abb. 6: Reduktion des Auflaufpotentials gegenüber der höchsten Welle einer Zeitreihe bei Verwendung des Mittelwertes der Höhen und Perioden der 10 % höchsten Wellen (NIEMEYER, 1977)

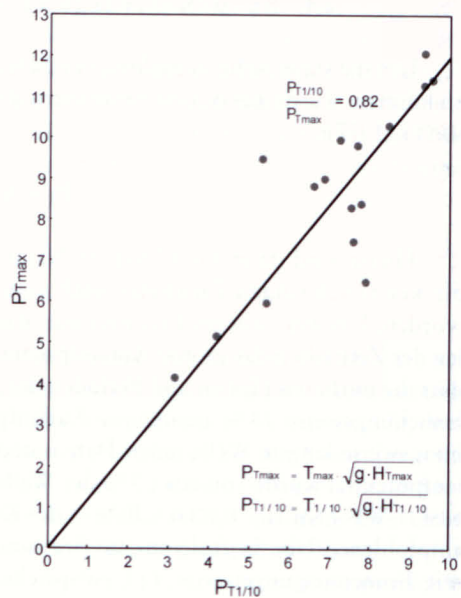


Abb. 7: Reduktion des Auflaufpotentials gegenüber der längsten Welle einer Zeitreihe bei Verwendung des Mittelwertes der Höhen und Perioden der 10 % längsten Wellen (NIEMEYER, 1977)

2.5 Kritische Bewertung der Verfahrensgrundlagen

Das Extrapolationsverfahren ist auf der Grundlage des damaligen Wissensstandes entwickelt und formuliert worden. Seither gewonnene Erkenntnisse lassen es erforderlich erscheinen, einige der grundlegenden Annahmen des Verfahrens vor diesem Hintergrund zu erörtern.

Intensive Naturmessungen von Wattseegang haben gezeigt, dass kein so strenger Zusammenhang zwischen Wellenhöhen und -perioden besteht (NIEMEYER, 1983; NIEMEYER et al., 1995a), wie in den Gleichungen (2) und (6) unterstellt. Es besteht lediglich ein tendenzieller Zusammenhang mit einer ausgeprägten Streuung, da in der südlichen Nordsee auch bei Sturm die Windsee fast immer von unterschiedlichen Dünungssystemen überlagert wird. Während dies auf die Wellenhöhen kaum Einfluss hat, wirkt es sich bei den Perioden in einer stärkeren Varianz gegenüber den mittleren Zusammenhängen aus (NIEMEYER, 1983). Weiterhin ist entgegen den Aussagen von SCHÜTTRUMPF (1973) die Vorgabe von BRETSCHNEIDER (1954) für die Relation von maximalen zu signifikanten Wellenhöhen für das Küstenvorfeld und Küstengebiet der südlichen Nordsee nicht zutreffend (NIEMEYER, 1983).

Obwohl die Auflaufberechnung nach VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND (1968) einen Überlauf bei 2 % der Wellen berücksichtigt, liegen die danach ermittelten Werte nur geringfügig unterhalb der gemessenen. Nach Naturmessungen beträgt der Unterschied zwischen maximalem Wellenauflauf und A_{98} immerhin 15 % (GRÜNE, 1983). Weiterhin wird die Bermenwirkung in den Gleichungen des Extrapolationsverfahrens nicht berücksichtigt.

Trotz dieser Schwachpunkte hat sich bei bisherigen Anwendungen kein Versagen gezeigt. Es lässt sich nur vermuten, dass bei der Anwendung des Verfahrens sich Fehler wechselseitig kompensieren. Die kombinierte Anwendung der Formeln (Abb. 8) wirkt demnach

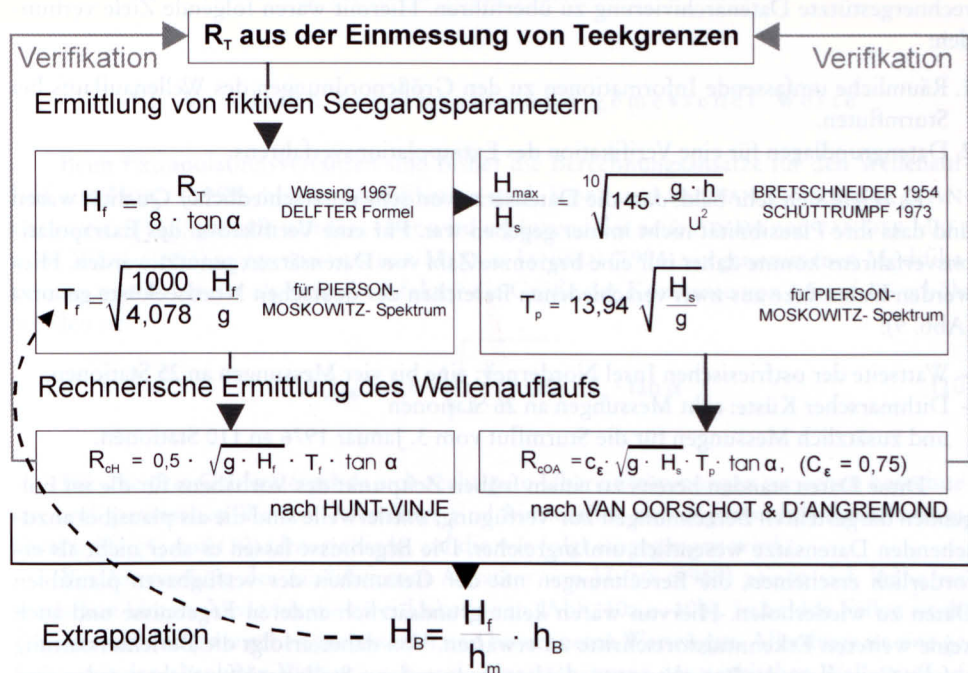


Abb. 8: Formaler Regelkreis des Extrapolationsverfahrens nach NIEMEYER (1976)

wie ein fehlerminimierender Regelkreis. Dieses Ergebnis ist allerdings seinerzeit nicht systematisch erzeugt worden.

Für andere grundsätzliche Annahmen aber haben sich später Bestätigungen gefunden. So ist beispielsweise die Annahme, bei Zulassen von Überlauf bei 3 % der Wellen den maximalen Wellenaufbau um 18 % zu reduzieren, durch Kombination von Ergebnissen aus der Natur (GRÜNE, 1983) und aus Modellversuchen (DHI, 1995) nachhaltig bestätigt worden: der Wert liegt nach diesen Untersuchungen bei 19 %.

Das Extrapolationsverfahren beruht fundamental auf der Existenz wassertiefenbegrenzten Seegangs. Die seither vorgenommenen Naturmessungen an der deutschen Nordseeküste (KAISER et al., 1995; NIEMEYER, 1983, 1991; NIEMEYER et al., 1995a) haben gezeigt, dass diese Annahme für die meisten deichnahen Watten zutreffend ist.

Es besteht aber auch eine Anwendungsmöglichkeit in solchen Fällen, in denen die relative Wellenhöhe zusätzlich von örtlichem Wind abhängt (KAISER et al., 1995; NIEMEYER, 1980, 1997; NIEMEYER et al., 1995a). Hierbei erfolgt entweder eine kombinierte Kopplung an Wassertiefe und Windeinwirkung (NIEMEYER, 1980) oder die Vorgabe der ungünstigsten relativen Wellenhöhe (NIEMEYER, 1997).

3. Anwendung des Extrapolationsverfahrens

3.1 Datensätze und Untersuchungsgebiete

Eines der Ziele des KFKI-Forschungsvorhabens „Bemessung auf Seegang“ war, die bei den verschiedenen im Küstenschutz tätigen Dienststellen verfügbaren Teekeinnmessungen nach Sturmfluten zu sammeln, auf Plausibilität zu prüfen, zu systematisieren und in eine rechnergestützte Datenarchivierung zu überführen. Hiermit waren folgende Ziele verbunden:

1. Räumliche umfassende Informationen zu den Größenordnungen des Wellenaufbaus bei Sturmfluten.
2. Datengrundlagen für eine Verifikation des Extrapolationsverfahrens.

Es zeigte sich sehr bald, dass die Datensätze von sehr unterschiedlicher Qualität waren und dass ihre Plausibilität nicht immer gegeben war. Für eine Verifikation des Extrapolationsverfahrens konnte daher nur eine begrenzte Zahl von Datensätzen genutzt werden. Hier werden Datensätze aus zwei verschiedenen Bereichen der deutschen Nordseeküste genutzt (Abb. 9):

- Wattseite der ostfriesischen Insel Norderney: eine bis vier Messungen an 25 Stationen,
- Dithmarscher Küste: acht Messungen an 26 Stationen
und zusätzlich Messungen für die Sturmflut vom 3. Januar 1976 an 110 Stationen.

Diese Daten standen bereits zu einem frühen Zeitpunkt des Vorhabens für die im Folgenden dargestellten Berechnungen zur Verfügung; mittlerweile sind die als plausibel anzusehenden Datensätze wesentlich umfangreicher. Die Ergebnisse lassen es aber nicht als erforderlich erscheinen, die Berechnungen mit der Gesamtheit der verfügbaren plausiblen Daten zu wiederholen. Hiervon wären keine grundsätzlich anderen Ergebnisse und auch keine weiteren Erkenntnisfortschritte zu erwarten. Von daher erfolgt die Berichterstattung auf der Grundlage der Berechnungen, die bereits an anderer Stelle veröffentlicht worden sind (NIEMEYER et al., 1995b).

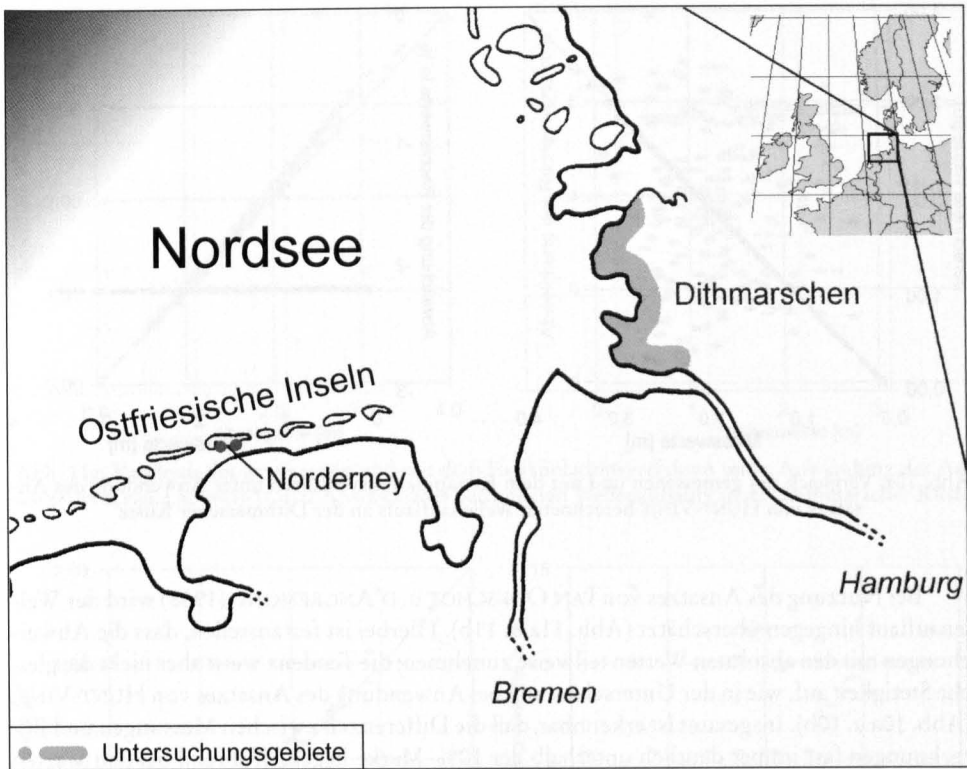


Abb. 9: Lage der Messgebiete an der deutschen Nordseeküste

3.2 Vergleich berechneter und gemessener Werte

Beim Extrapolationsverfahren sind bisher die Berechnungsansätze für den Wellenauf-
lauf von HUNT (1959) mit der Modifikation nach VINJE und von VAN OORSCHOT u. D'AN-
GREMOND (1968) genutzt worden. Hier wird ergänzend der neue Ansatz von VAN DER MEER
u. DE WAAL (1993) in der von VAN DER MEER u. JANSSEN (1994) vorgenommenen Modifika-
tion verwandt, bei der als Sicherheitsfaktor die Größe der Konstante von 1,5 auf 1,6 erhöht
worden ist:

$$A_{vMW} = 1,6 \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi}} \cdot H_s \cdot T_p \cdot \tan \alpha \quad (10)$$

Für alle drei Gebiete ergeben sich recht gute Übereinstimmungen zwischen berechne-
ten und gemessenen Werten. Allerdings sind hinsichtlich der angewandten Berechnungs-
ansätze (3), (4) und (10) Unterschiede, auf die wie folgt eingegangen wird.

Bei Anwendung des modifizierten Ansatzes von HUNT (1959) zeigen sich keine we-
sentlichen Unterschiede für die zwei Lokationen (Abb. 10a u. 10b). In beiden Fällen ist die
Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten gut. Allerdings ist eine ge-
ringe, mit den absoluten Werten wachsende Unterschätzung des wirklichen Wellenaufbaus
festzustellen (Abb. 10a u. 10b).

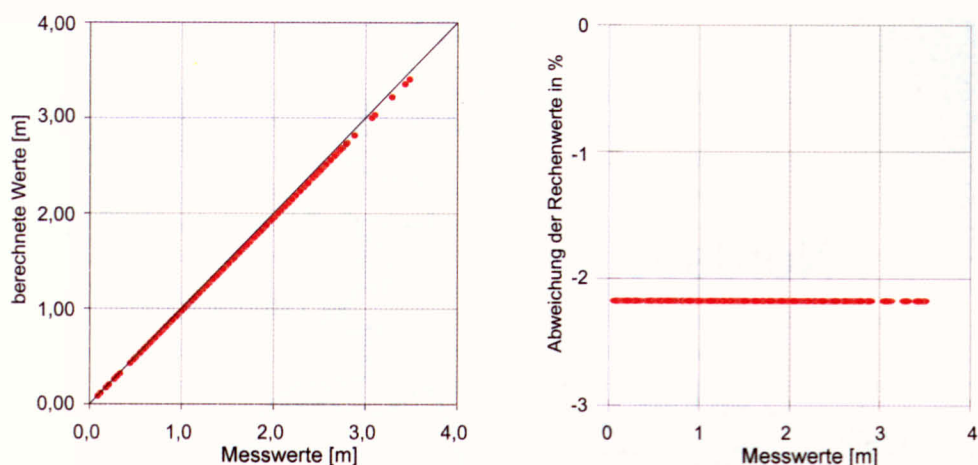


Abb. 10a: Vergleich des gemessenen und mit dem Extrapolationsverfahren unter Anwendung des Ansatzes von HUNT-VINJE berechneten Wellenaufbaus an der Dithmarscher Küste

Bei Nutzung des Ansatzes von VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND (1968) wird der Wellenaufbau hingegen überschätzt (Abb. 11a u. 11b). Hierbei ist festzustellen, dass die Abweichungen mit den absoluten Werten teilweise zunehmen; die Tendenz weist aber nicht die gleiche Stetigkeit auf, wie in der Unterschätzung bei Anwendung des Ansatzes von HUNT-VINJE (Abb. 10a u. 10b). Insgesamt ist erkennbar, daß die Differenzen zwischen Messungen und Berechnungen fast immer deutlich unterhalb der 10%-Marke liegen. Während bei den Werten für Dithmarschen die berechneten Werte in der Tendenz mit zunehmender Größe eindeutig auf der sicheren Seite liegen (Abb. 11a), ist diese Tendenz bei den Werten von Norderney weniger ausgeprägt (Abb. 11b). Hierbei tritt aber keine signifikante Unterschätzung ein, sondern teilweise eine bessere Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten als bei Verwendung des Ansatzes von HUNT-VINJE.

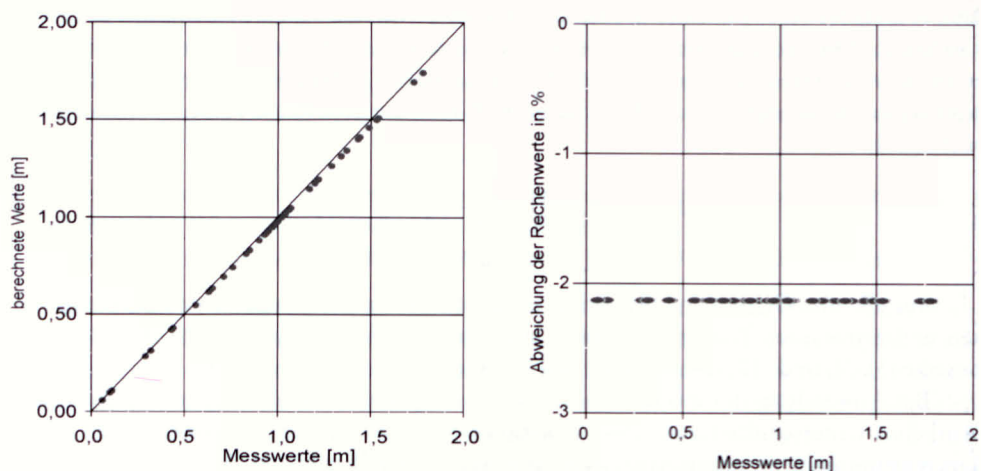


Abb. 10b: Vergleich des gemessenen und mit dem Extrapolationsverfahren unter Anwendung des Ansatzes von HUNT-VINJE berechneten Wellenaufbaus an Norderneyer Inseldeichen

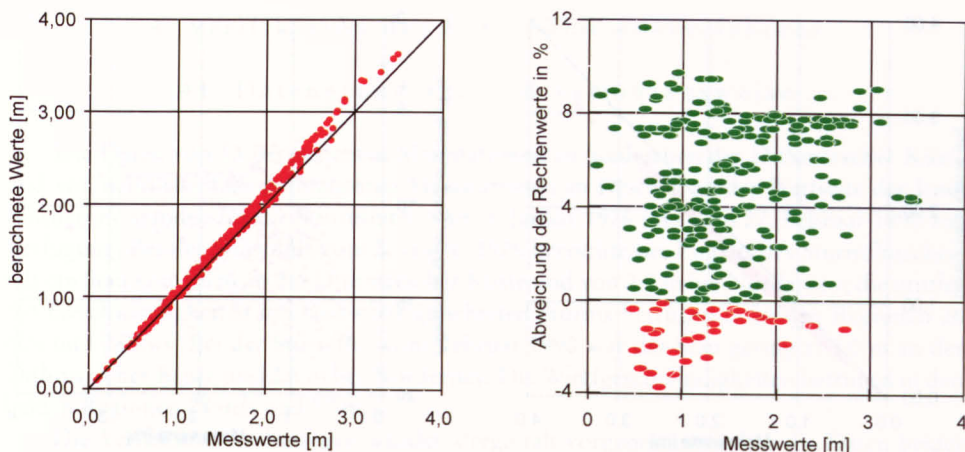


Abb. 11a: Vergleich des gemessenen und mit dem Extrapolationsverfahren unter Anwendung des Ansatzes von VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND berechneten Wellenaufbaus an der Dithmarscher Küste

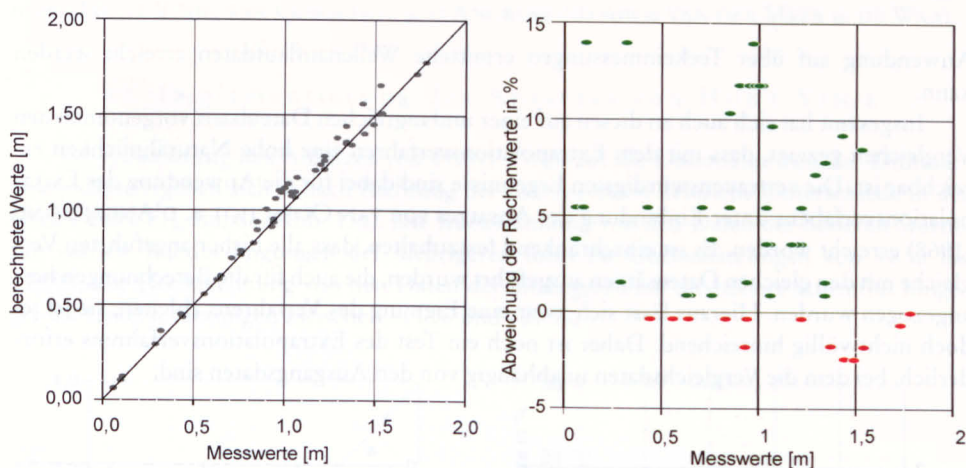


Abb. 11b: Vergleich des gemessenen und mit dem Extrapolationsverfahren unter Anwendung des Ansatzes von VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND berechneten Wellenaufbaus auf Norderney

Die Nutzung des Berechnungsansatzes von VAN DER MEER u. JANSSEN (1994) führt wiederum zu einer Unterschätzung des Wellenaufbaus; allerdings in deutlich stärkerem Maß als bei Verwendung der Formel nach HUNT-VINJE (Abb. 12a u. 12b). Die Abweichungen nehmen tendenziell, aber nicht einheitlich mit den absoluten Werten zu. Bei Verwendung dieses Rechenansatzes ergeben sich für das Extrapolationsverfahren größere Abweichungen (Abb. 12a u. 12b) als bei beiden anderen Verfahren (Abb. 10 u. 11). In beiden Fällen liegen durchgehend Unterschätzungen vor, die bei den Werten von Norderney (Abb. 12b) relativ noch größer sind als bei denen für die Deiche in Dithmarschen (Abb. 12a).

Es muss an dieser Stelle nachdrücklich darauf hingewiesen werden, dass mit den vorstehenden Vergleichen keine übertragbaren Aussagen hinsichtlich der absoluten Naturähnlichkeit der Wellenaufformeln selbst gegeben sind. Die Ergebnisse spiegeln lediglich die Qualität wider, welche mit diesen Ansätzen als Element des Extrapolationsverfahrens bei dessen

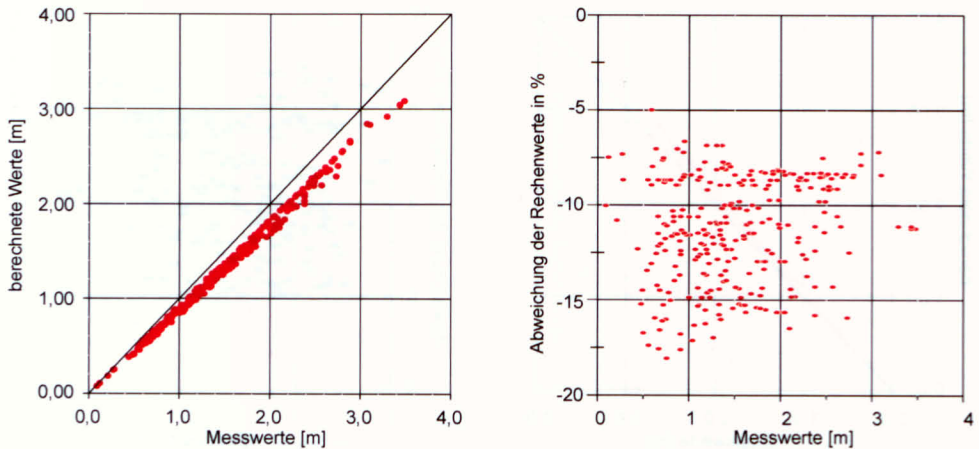


Abb. 12a: Vergleich gemessenen und mit dem Extrapolationsverfahren unter Anwendung des Ansatzes von VAN DER MEER u. JANSSEN berechneten Wellenaufbaus an der Dithmarscher Küste

Anwendung auf über Teekeineinmessungen ermittelte Wellenaufbaudaten erreicht werden kann.

Insgesamt hat sich auch an diesen auf einer umfangreichen Datenbasis vorgenommenen Vergleichen gezeigt, dass mit dem Extrapolationsverfahren eine hohe Naturähnlichkeit erreichbar ist. Die vertrauenswürdigsten Ergebnisse sind dabei für die Anwendung des Extrapolationsverfahrens unter Einbindung des Ansatzes von VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND (1968) erreicht worden. Es ist einschränkend festzuhalten, dass alle bisher angeführten Vergleiche mit den gleichen Datensätzen ausgeführt wurden, die auch für die Berechnungen herangezogen wurden. Hieraus lässt sich zwar eine Eignung des Verfahrens ableiten, sie ist jedoch nicht völlig hinreichend. Daher ist noch ein Test des Extrapolationsverfahrens erforderlich, bei dem die Vergleichsdaten unabhängig von den Ausgangsdaten sind.

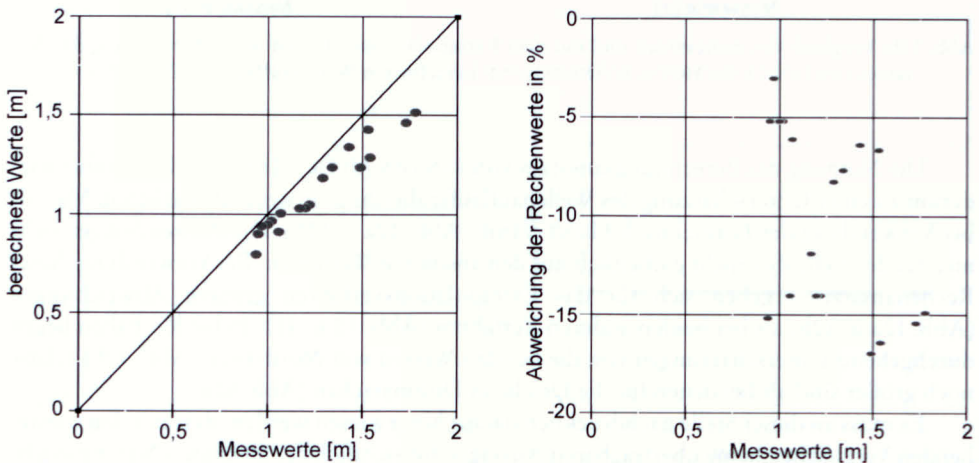


Abb. 12b: Vergleich gemessenen und mit dem Extrapolationsverfahren unter Anwendung des Ansatzes von VAN DER MEER u. JANSSEN berechneten Wellenaufbaus an Norderneyer Inseldeichen

4. Verifikation des Extrapolationsverfahrens

4.1 Datengrundlage und Verfahrensweise

Die Daten von 13 permanenten Messstationen an Seedeichen der Dithmarscher Küste und von neun ebenfalls permanenten Messstationen an Deichen an der Wattseite der Insel Norderney standen für die Sturmfluten vom 3. Januar 1976 und vom 27. Februar 1990 zur Verfügung. Bei der Sturmflut vom 3. Januar 1976 herrschte bei Eintritt des Sturmflutscitels ein Stau von 3,6 m an der Dithmarscher Küste und von 2,8 m bei Norderney; die mittleren Geschwindigkeiten des landwärts gerichteten Sturms betrugen in beiden Regionen 26 m/s und 28 m/s. Bei der Sturmflut vom Februar 1990 war der Stau geringer: 3,0 m an der Dithmarscher Küste und 2,5 m bei Norderney. Die Windgeschwindigkeiten betrugen in den beiden Regionen 28 m/s und 17 m/s.

Die Verifikationsrechnungen wurden dergestalt vorgenommen, dass die Daten beider Sturmfluten als Ausgangsgrundlage der Berechnungen genutzt wurden. Es wurde also sowohl von der höheren Sturmflut auf die niedrigere hochgerechnet, als auch von der niedrigeren auf die höhere. Hierbei wird das Extrapolationsverfahrens mit allen drei Ansätzen getestet: HUNT-VINJE, VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND sowie VAN DER MEER u. DE WAAL.

4.2 Implementierung des Ansatzes von HUNT-VINJE

Bei Anwendung des Ansatzes von HUNT-VINJE auf die Datensätze von der Dithmarscher Küste ergeben sich je nach Richtung der Extrapolation deutliche Unterschiede in der Qualität der Ergebnisse (Abb. 13a): Die Rückrechnung von den Daten der höheren Sturmflut auf die Randbedingungen der niedrigeren führt zu Überschätzungen von +8 % bis +22 %. Die Hochrechnung von den Daten der niedrigeren auf die höhere Sturmflut hingegen zu Unterschätzungen zwischen -11 % und -21 %.

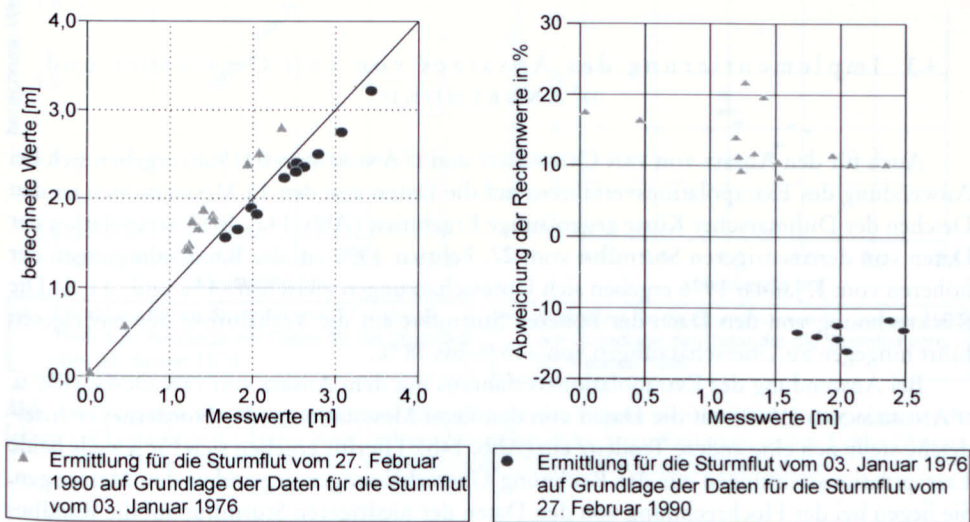


Abb. 13a: Vergleich von Messwerten einer Sturmflut mit den Ergebnissen nach dem Extrapolationsverfahren auf Grundlage der Daten einer anderen Sturmflut; links: Streudiagramm; rechts: Fehler (Ansatz von HUNT-VINJE; Daten der Dithmarscher Küste)

Für die Daten von den Norderneyer Inseldeichen ergibt sich ein tendenziell gleichartiges Bild (Abb. 13b): Für die Hochrechnung von der niedrigeren auf die höhere Sturmflut ergeben sich – im Vergleich zu den Werten der Dithmarscher Küste – allerdings geringere Unterschätzungen von -7% bis -11% . Die Rückrechnung vom Datensatz der höheren Sturmflut auf die Verhältnisse der niedrigeren ergeben auch hier Überschätzungen, die allerdings merklich kleiner sind als bei den Stationen von der Dithmarscher Küste: $+3\%$ bis 7% .

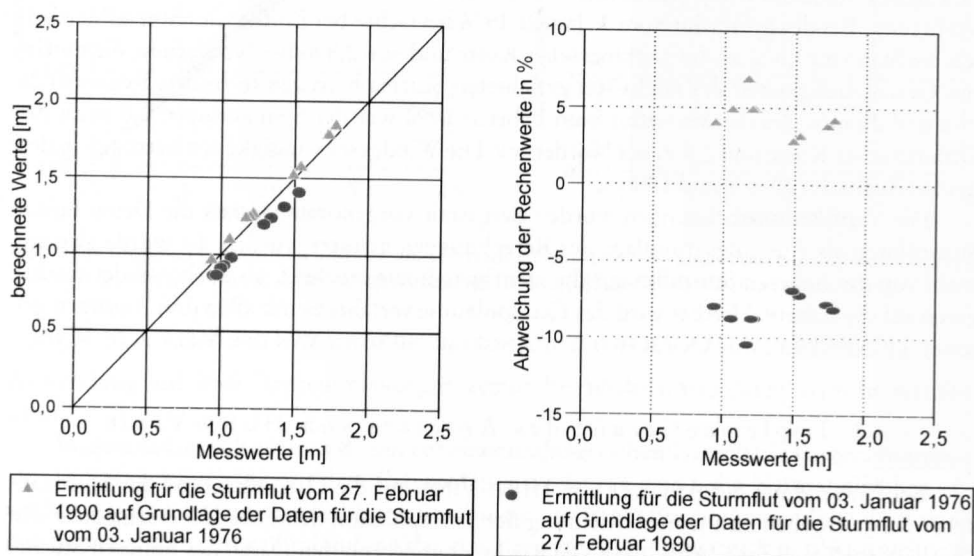
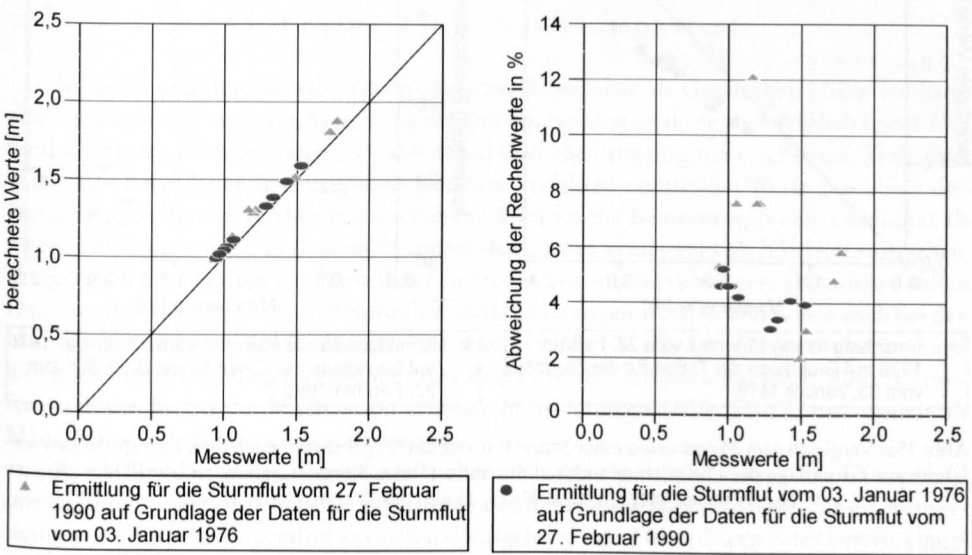
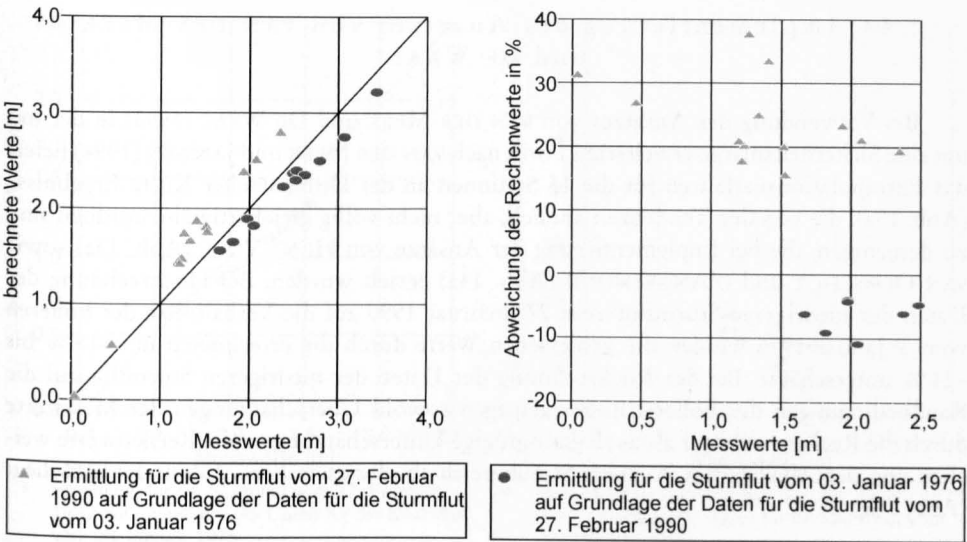


Abb. 13b: Vergleich von Messwerten einer Sturmflut mit den Ergebnissen nach dem Extrapolationsverfahren auf Grundlage der Daten einer anderen Sturmflut; links: Streudiagramm; rechts: Fehler (Ansatz von HUNT-VINJE; Daten der Norderneyer Inseldeiche)

4.3 Implementierung des Ansatzes von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND

Auch für den Ansatz von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) ergeben sich bei Anwendung des Extrapolationsverfahrens auf die Daten von den 13 Messstationen an den Deichen der Dithmarscher Küste gegenläufige Ergebnisse (Abb. 14a). Bei Extrapolation der Daten von der niedrigeren Sturmflut vom 27. Februar 1990 auf die Randbedingungen der höheren vom 3. Januar 1976 ergeben sich Unterschätzungen zwischen -4% und -11% . Die Rückrechnung von den Daten der höheren Sturmflut auf die Verhältnisse der niedrigeren führt hingegen zu Überschätzungen von $+15\%$ bis 38% .

Bei Anwendung des Extrapolationsverfahrens mit dem Ansatz von VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND (1968) auf die Daten von den neun Messstationen der Norderneyer Inseldeiche stellt sich eine andere Tendenz ein (Abb. 14b): Hierfür ergeben sich für jeweils beide Extrapolationsrichtungen aus der Rechnung Überschätzungen gegenüber den Messungen. Sie liegen bei der Hochrechnung von den Daten der niedrigeren Sturmflut auf die Randbedingungen der höheren im Bereich von nur $+3\%$ bis $+5\%$. Bei der Rückrechnung von den Messdaten der höheren Sturmflut auf die Verhältnisse der niedrigeren überschreiten die rechnerischen Werte die Messdaten ebenfalls und zwar zwischen $+2\%$ und $+12\%$.



4.4 Implementierung des Ansatzes von VAN DER MEER und DE WAAL

Bei Verwendung des Ansatzes von VAN DER MEER und DE WAAL (1993) in der mit um eine Sicherheitsmarge erweiterten Form nach VAN DER MEER und JANSSEN (1994) liefert das Extrapolationsverfahren für die 13 Stationen an der Dithmarscher Küste Ergebnisse (Abb. 15a), die von den Tendenzen ähnlich, aber nicht völlig gleichartig einzuordnen sind zu denjenigen, die bei Implementierung der Ansätze von HUNT-VINJE (Abb. 13a) sowie VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (Abb. 14a) erzielt wurden: Bei Hochrechnung der Daten der niedrigeren Sturmflut vom 27. Februar 1990 auf die Verhältnisse der höheren vom 3. Januar 1976 werden die gemessenen Werte durch die errechneten um -18% bis -24% unterschätzt. Bei der Rückrechnung der Daten der niedrigeren Sturmflut auf die Randbedingungen der höheren treten dagegen sowohl Überschätzungen der Messwerte durch die Rechenwerte auf als auch geringfügige Unterschätzungen: die Rechenwerte weichen von den Messwerten in einem Streubereich ab, der zwischen -2% und $+17\%$ liegt (Abb. 15a).

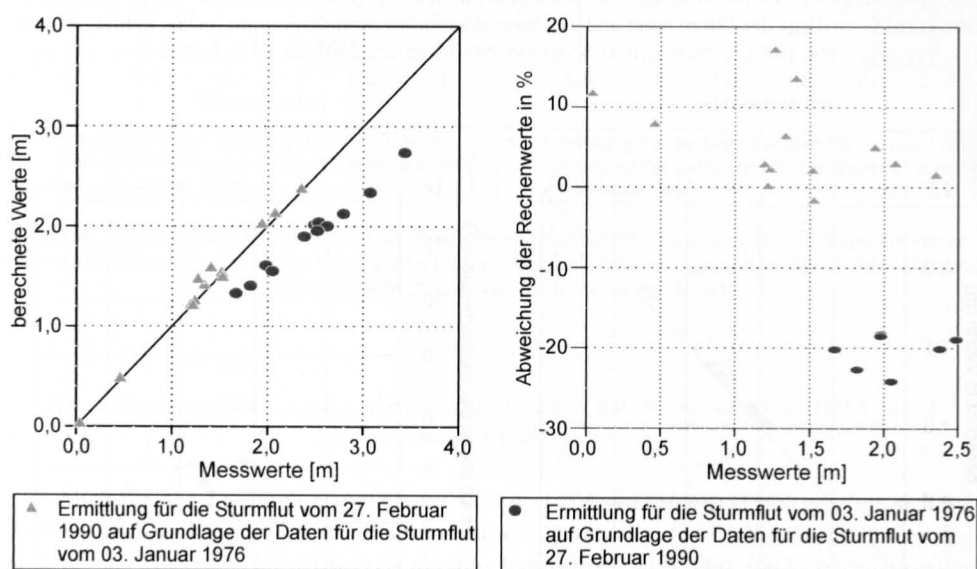


Abb. 15a: Vergleich von Messwerten einer Sturmflut mit den Ergebnissen nach dem Extrapolationsverfahren auf Grundlage der Daten einer anderen Sturmflut; links: Streudiagramm; rechts: Fehler (Ansatz von VAN DER MEER u. DER WAAL; Daten der Dithmarscher Küste)

Für die Datensätze der Norderneyer Inseldeiche ergeben sich für beide Formen der Extrapolation bei Implementierung dieses Ansatzes tendenziell einheitliche Ergebnisse (Abb. 15b): Sowohl bei Hochrechnung der Messdaten der niedrigeren Sturmflut auf die Randbedingungen der höheren als auch bei der Bestimmung der Werte für die niedrigere Sturmflut auf der Grundlage der Messdaten der höheren treten Unterschätzungen der Messwerte durch die Rechenwerte auf. Sie liegen in den Bereichen von -11% bis -13% beziehungsweise zwischen -5% und -13% (Abb. 15b).

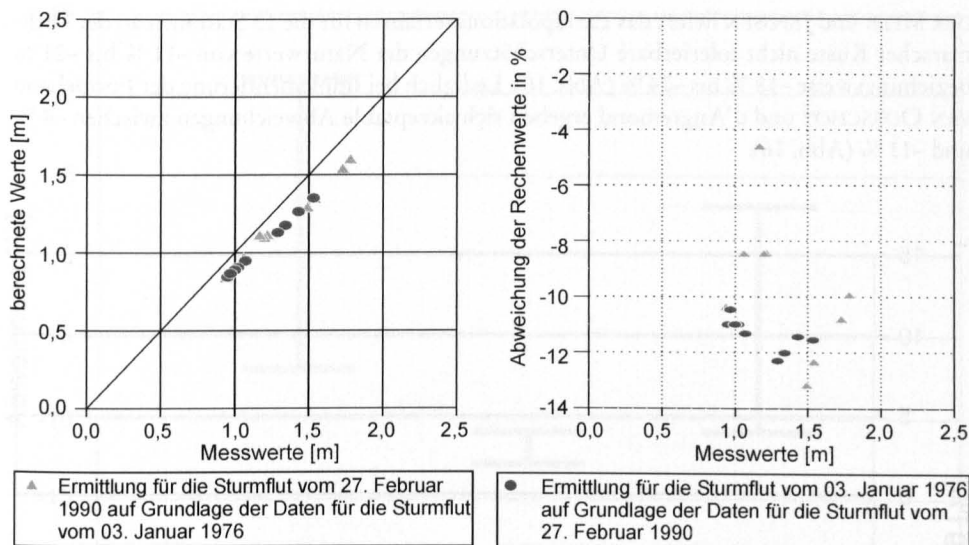


Abb. 15b: Vergleich von Messwerten einer Sturmflut mit den Ergebnissen nach dem Extrapolationsverfahren auf Grundlage der Daten einer anderen Sturmflut; links: Streudiagramm; rechts: Fehler (Ansatz von VAN DER MEER u. DER WAAL; Daten der Norderneyer Inseldeiche)

4.5 Ergebnis der Verifikationstests

Bei einer undifferenzierten Betrachtung der Ergebnisse als Gesamtheit (Abb. 16) kann eine insgesamt eher negative Bewertung des Extrapolationsverfahrens hinsichtlich seiner Naturähnlichkeit und damit auch Zuverlässigkeit durchaus angemessen erscheinen. Zieht man den vollen Bereich der Streuungen der mit dem Verfahren ermittelten Werte gegenüber den Naturdaten in Betracht (Abb. 16), so ist deren Wert für die Bemessungspraxis zumindest als zweifelhaft einzustufen. In diesem Zusammenhang ist es keineswegs als hilfreich anzusehen, Fragen nach der Qualität der Naturdaten in die Diskussion einzubringen. Die ausgewählten Daten sind vorab eingehenden Plausibilitätstests unterzogen worden und haben auch bei den hier vorgenommenen Vergleichstests – zumindest nicht für alle drei Ansätze – keine ungewöhnlichen Abweichungen gegenüber den Rechenwerten aufgewiesen (Abb. 10–12). Insofern müssen die bei der Verifikation ermittelten Streuungen (Abb. 13–15) hier primär als Mängel dieses Verfahrens eingestuft werden.

In die Bewertung der Ergebnisse ist aber auch der eigentliche Zweck des Extrapolationsverfahrens einzubeziehen: die Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus für einen angenommenen höchsten Sturmflutwasserstand ausgehend von Datensätzen einer bereits eingetretenen niedrigeren. Vor diesem Hintergrund verlieren die Ergebnisse der Rückrechnungen auf der Grundlage der Datensätze einer höheren auf die Verhältnisse der niedrigeren an Bedeutung. Zweifellos wäre eine hohe Übereinstimmung für diese Vorgehensweise eine zusätzliche Absicherung des Verfahrens gewesen, sie ist aber keine zwingende Voraussetzung für dessen eigentlichen Nutzungszweck.

Reduziert man die Betrachtung allein auf die Anwendung des Verfahrens als Hochrechnung von den Messdaten einer niedrigeren Sturmflut auf die Randbedingungen einer höheren, so ergeben sich folgende Ergebnisse: Mit den Ansätzen von HUNT-VINJE sowie von VAN

DER MEER und JANSSEN liefert das Extrapolationsverfahren für die 13 Stationen an der Dithmarscher Küste nicht tolerierbare Unterschätzungen der Naturwerte von -11% bis -21% beziehungsweise -18% bis -24% (Abb. 16). Lediglich bei Implementierung der Formel von VAN OORSCHOT und d'Angremond ergeben sich akzeptable Abweichungen zwischen -4% und -11% (Abb. 16).

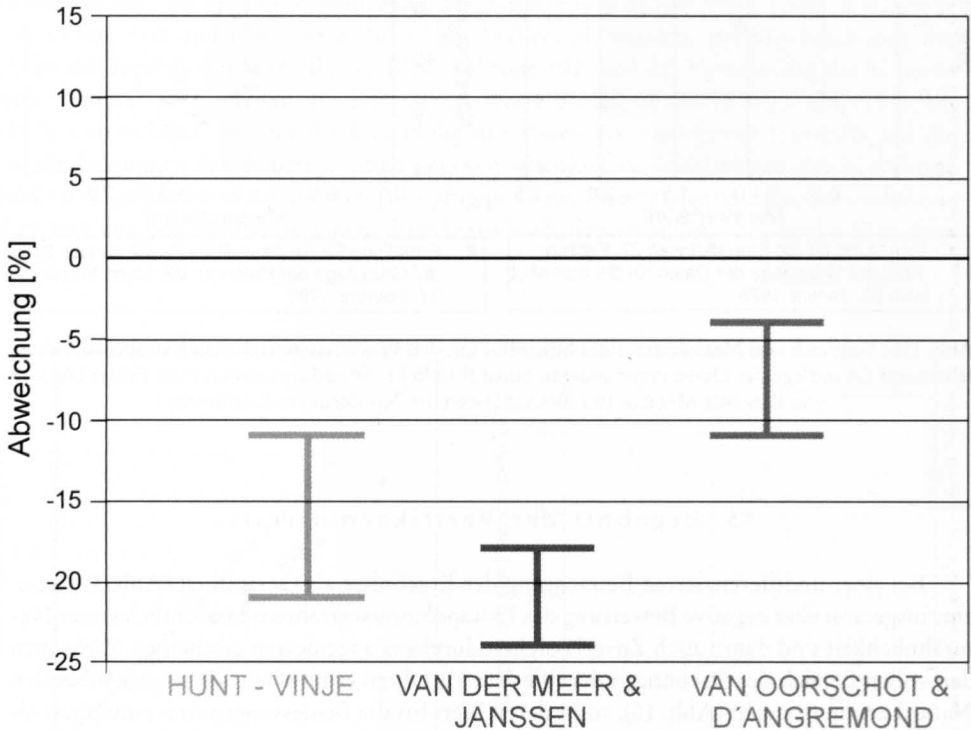


Abb. 16: Streubereiche des Extrapolationsverfahrens für die Daten der Dithmarscher Küste in Abhängigkeit von den implementierten Ansätzen zur Wellenaufreibung

Auch für die entsprechenden Datensätze von den Norderneyer Inseldeichen führen die Berechnungen unter Nutzung der Formeln von HUNT-VINJE sowie von VAN DER MEER und JANSSEN zu Unterschätzungen, wenngleich nicht in so hohem Maße wie bei den Daten der Dithmarscher Küste: sie liegen in Bereichen von -7% bis -11% und -11% bis -13% (Abb. 17). Wendet man das Extrapolationsverfahren für diese Datensätze mit Implementierung des Ansatzes von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND an, so werden die Naturwerte durch die rechnerischen um $+3\%$ bis $+5\%$ (Abb. 17) übertroffen. Angesichts der für die Ermittlung von Wellenaufreibformeln selbst bei Modellversuchen mit hervorragenden technischen Randbedingungen üblichen Toleranzen (VAN DER MEER u. DE WAAL, 1993; VAN DER MEER u. JANSSEN, 1994) kann dieses Ergebnis faktisch als Übereinstimmung angesehen werden.

Es sei hier noch einmal betont, dass aus den Ergebnissen keine Schlüsse auf die Qualität der beim Extrapolationsverfahren implementierten Ansätze selbst zulässig oder sinnvoll

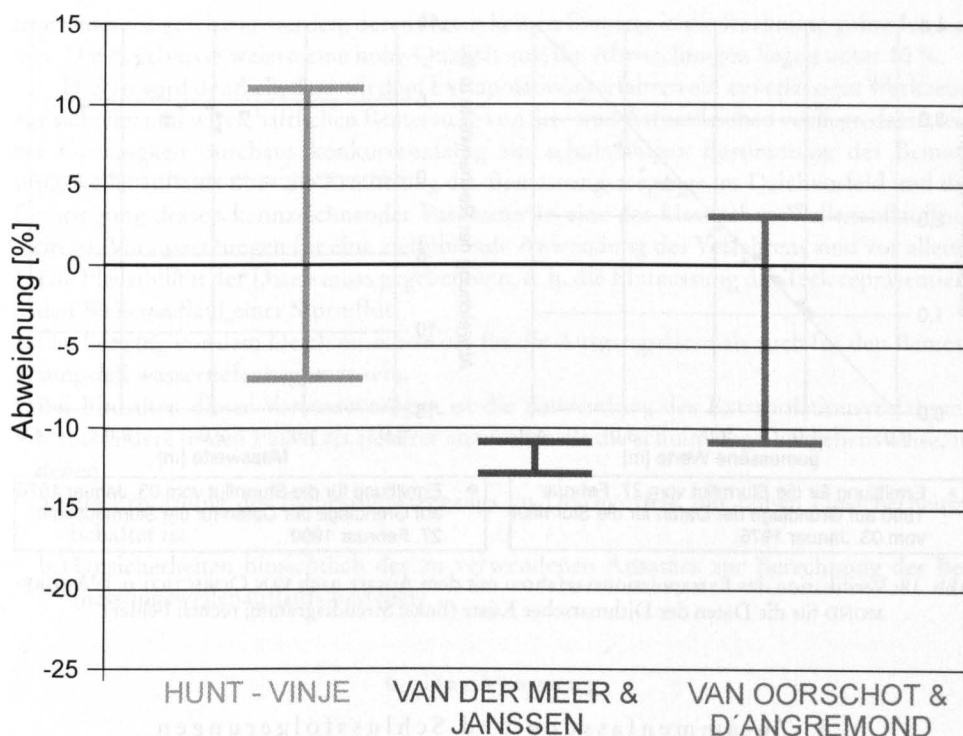


Abb. 17: Streubereiche des Extrapolationsverfahrens für die Daten der Norderneyer Inseldeiche in Abhängigkeit von den implementierten Ansätzen zur Wellenaufbauberechnung

sind. Die Anpassung an die Naturwerte wird primär durch den Regelmechanismus des Extrapolationsverfahrens bestimmt. Die dabei erzielten Ergebnisse sind hinsichtlich der isolierten Nutzung einzelner verwandter Komponenten nicht aussagekräftig, manchmal möglicherweise sogar irreführend.

Fasst man die Ergebnisse aus beiden Regionen zusammen, so ergibt sich ein klares Ergebnis: Bei Implementierung des Ansatzes von VAN OORSCHOT und D'ANGREMOND (1968) lassen sich mit dem Extrapolationsverfahren im Vergleich zu Naturdaten hohe rechnerische Genauigkeiten erzielen (Abb. 18). Mit einer Streuung zwischen -11 % und +5 % bewegen sich die Abweichungen in denselben Größenordnungen, wie sie bei der Ermittlung von Wellenaufbauformeln aus Modelldaten nur unter technisch optimalen Bedingungen in jüngerer Zeit erreicht wurden.

Von daher kann aus den hier analysierten Vergleichen berechtigt der Schluss gezogen werden, mit Hilfe des Extrapolationsverfahrens (NIEMEYER, 1976, 1977) ist eine sowohl sichere als auch wirtschaftliche Bestimmung des Bemessungswellenaufbaus an See- und Ästuardeichen möglich. Die festgestellten Unschärfen des Verfahrens bewegen sich in denselben Größenordnungen wie bei anderen modernen Verfahren zur Ermittlung des Bemessungswellenaufbaus.

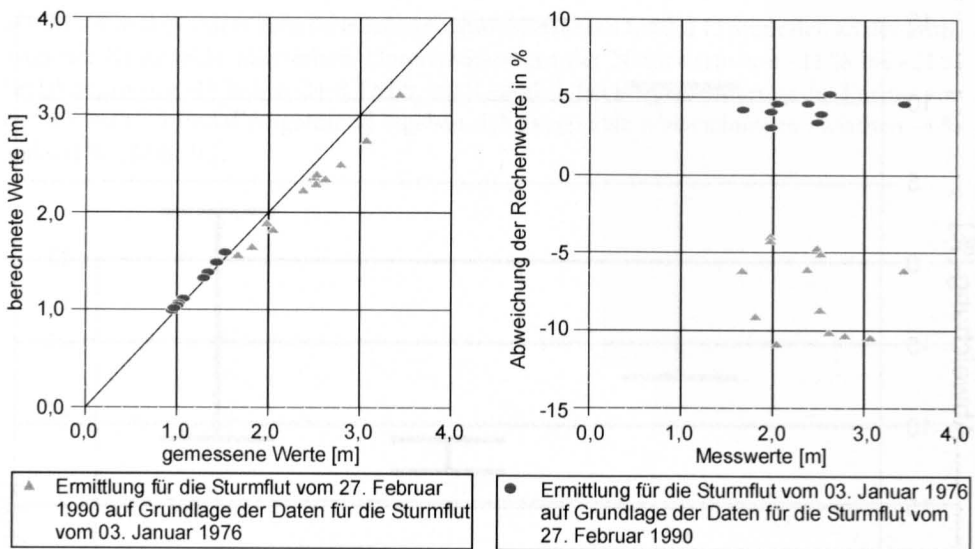


Abb. 18: Verifikation des Extrapolationsverfahren mit dem Ansatz nach VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND für die Daten der Dithmarscher Küste (links: Streudiagramm; rechts: Fehler)

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bereits Albert BRAHMS hatte die Einmessung von Teek nach Sturmfluten empfohlen, um daraus den Wellenaufbau an See- und Ästuardeichen abschätzen zu können. Eine Umsetzung dieses Vorschlags ist erst seit der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 bekannt.

Nach der Sturmflut vom 3. Januar 1976 ist im Zuge von Überprüfungen der Deichsicherheit ein Verfahren zur Extrapolation von Teekineismessungen zur Bestimmung des Bemessungswellenaufbaus entwickelt worden: Das Verfahren beruht auf der retrospektiven Ermittlung eines fiktiven Seegangs auf der Grundlage eingeführter Verfahren. Dieser fiktive Seegang kann – wie zumeist an Wattküsten gegeben – bei Wassertiefenabhängigkeit für den Bemessungsfall extrapoliert werden. Das Verfahren wird in seinen Grundzügen einschließlich möglicher Erweiterungen zusammenfassend dargestellt. Hierbei werden die seinerzeit implementierten Verfahrenskomponenten im Licht seither gewonnener Erkenntnisfortschritte kritisch diskutiert. Wesentliches Ergebnis bleibt aber vor dem Hintergrund erfolgreicher Verifikationen, dass offenbare Widersprüche sich innerhalb des für das Extrapolationsverfahren typischen Regelkreises weitgehend kompensieren. Hieraus muss jedoch auch abgeleitet werden, dass die Zuverlässigkeit des Verfahrens nur für seine geschlossene Anwendung erwartet werden darf; die isolierte Anwendung von Verfahrenskomponenten birgt hingegen ein Fehlerisiko.

Bisher war das Extrapolationsverfahren nur durch Vergleichsrechnungen mit den für die Ermittlung benutzten Messdaten auf seine Zuverlässigkeit geprüft worden. Im KFKI-Forschungsvorhaben Bemessungen auf Seegang wurden eingehende Untersuchungen vorgenommen, um die Zuverlässigkeit des Verfahrens so weitgehend wie möglich zu ergründen. Hierzu wurden die in den letzten Jahren zunehmend ausgeführte Teekineismessungen inventarisiert und auf Plausibilität geprüft. Mit ausgewählten Daten konnte danach erstmals die Zuverlässigkeit des Verfahrens durch Hochrechnung von einer vorgegebenen Sturmflut auf

eine andere abgeschätzt werden, deren Daten keinen Eingang in die Rechnung gefunden haben. Die Ergebnisse weisen eine hohe Qualität aus; die Abweichungen liegen unter 10 %.

Hieran wird deutlich, dass mit dem Extrapolationsverfahren ein zuverlässiges Werkzeug zur sicheren und wirtschaftlichen Bemessung von See- und Ästuardeichen vorliegt, das in seiner Genauigkeit durchaus konkurrenzfähig zur schulmäßigen Bestimmung des Bemessungswellenaufbaus über die Ermittlung des Bemessungsseegangs im Deichvorfeld und die Einbringung dessen kennzeichnender Parameter in eine der klassischen Wellenaufformeln ist. Voraussetzungen für eine zielführende Anwendung des Verfahrens sind vor allem:

1. Die Plausibilität der Daten muss gegeben sein, d. h. die Einmessung des Teek repräsentiert den Wellenaufbau einer Sturmflut.
2. Der Seegang vor dem Deich muss sowohl für die Ausgangsdaten als auch für den Bemessungsfall wassertiefenbegrenzt sein.
3. Bei Einhalten dieser Voraussetzungen ist die Anwendung des Extrapolationsverfahrens insbesondere in den Fällen als sicherer anzusehen als die schulmäßige Vorgehensweise, in denen
 - a.) die Ermittlung des Bemessungsseegangs im Deichvorfeld mit hohen Unsicherheiten behaftet ist,
 - b.) Unsicherheiten hinsichtlich des zu verwendenden Ansatzes zur Berechnung des Bemessungswellenaufbaus bestehen.

6. Danksagung

Diese Arbeit wurde im Forschungsvorhaben „Bemessung auf Seegang“ des KURATORIUMS FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN erstellt, das vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG; WISSENSCHAFT; FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE unter dem Kennzeichen MTK 0561 gefördert worden ist.

Die Autoren sind den Kollegen des Dezernats Hydrographie des Küstengebietes in der Forschungsstelle Küste des NIEDERSÄCHSISCHEN LANDESAMTES FÜR ÖKOLOGIE für die sorgfältige Bearbeitung der Teekdaten und die redaktionelle Endbearbeitung des Berichts zu großem Dank verpflichtet, insbesondere den Herren Detlef Glaser, Thomas Hartkens, Dipl.-Inf. Jochen Fleßner und Georg Münkewarf. Besonders profitiert haben sie weiterhin von der eingehenden Unterstützung durch Bereitstellung von Daten und Mitwirkung bei Plausibilitätsprüfungen durch Kollegen örtlicher Küstenschutzdienststellen, insbesondere durch Herrn Dipl.-Ing. Hans-Gerd Coldewey von der NLWK-Betriebsstelle Norden (damals StAIK) und durch Herrn Dr.-Ing. Peter Wieland vom damaligen ALW Heide.

7. Schriftenverzeichnis

- ARBEITSGRUPPE KÜSTENSCHUTZ: Allgemeine Empfehlungen für den deutschen Küstenschutz. Die Küste, Jg. 4, 1955.
- BRAHMS, A.: Anfangs-Gründe der Deich- und Wasserbaukunst, I. Theil. Verl. H. Tapper, Aurich, 1754.
- BRAHMS, A.: Anfangs-Gründe der Deich- und Wasserbaukunst, Anderer Theil. Verl. H. Tapper, Aurich, 1757.
- BRETSCHEIDER, C. L.: Field investigations of wave energy loss in shallow water ocean Waves. Beach Er. Booard, T. M. 46, 1954.
- DHI (DANISH HYDRAULIC INSTITUTE): Bemessung von Deichen südliches Elbufer, Dkm 0–Dkm 25, Niedersachsen. Autorin: D. Mühlestein, 1995.

- ERCHINGER, H. F.: Küstenschutz durch Vorlandgewinnung, Deichbau und Deichunterhaltung. Die Küste, H. 19, 1970.
- ERCHINGER, H. F.: Wellenaufbau an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. Leichtweiß-Inst., H. 41, 1974.
- ERCHINGER, H. F.: Wave run-up in field measurements with newly developed instruments. Proc. 15th Int. Conf. Coast. Eng. Honolulu/Hi., USA, ASCE, New York, 1977.
- FÜHRBÖTER, A.: Äußere Belastungen von Seedeichen und Deckwerken in Brößkamp et al: Seedeichbau, Theorie und Praxis. Verein. d. Naßbaggeruntern., 1976.
- GRÜNE, J.: Wave run-up caused by natural storm waves. Proc. 18th Int. Conf. Coast. Eng. Capetown, South Africa, ASCE, New York, 1983.
- HUNT, I. A.: Design of Seawalls and Breakers. Proc. ASCE, Vol. 89. WW 3, 1959.
- INGENIEURKOMMISSION: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. Die Küste, Jg. 10, H. 1, 1962.
- INGENIEURKOMMISSION: Erfahrungen und Folgerungen aus den Januar-Sturmfluten 1976 für den Küstenschutz in Niedersachsen. Die Küste, H. 33, 1979.
- KAISER, R.; BRANDT, G.; GÄRTNER, J.; GLASER, D.; GRÜNE, J.; JENSEN, F. u. NIEMEYER, H. D.: Wave climate study in Wadden Sea areas. proc. 24th Int. Conf. Cost. Eng. Kobe Japan, ASCE, New York, 1995.
- KRAMER, J.: Sturmflut 1962. Verl. Spark. Norden, 1967.
- LUCK, G. u. NIEMEYER, H. D.: Albert Brahms und die Sturmflut von 1717. Die Küste, H. 35, 1980.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Abschätzung des maximalen Wellenaufbaus an Seedeichen aus der Einmessung von Teekgrenzen. Die Küste, H. 29, 1976.
- NIEMEYER, H. D.: The estimation of design wave run-up on sea dykes in consideration of overtopping security. Proc. 17th IAHR-Congress Baden-Baden, 1977.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Abschätzung des Sturmflutseegangs im östlichen Jadebusen. Dienstber. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz (unveröff.), 1980.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. Bundesministerium für Forschung u. Technologie, Forschungsber. MF 0203, 1983.
- NIEMEYER, H. D.: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. 3rd Conf. Coast. Port Eng. i. Devel. Countr., Mombasa/Kenya, 1991.
- NIEMEYER, H. D.; BRANDT, G.; GÄRTNER, J.; GLASER, D.; GRÜNE, J.; JENSEN, F. u. KAISER, R.: Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. Ber. Forsch.-Stelle Küste, Bd. 40, 1995a.
- NIEMEYER, H. D.; GÄRTNER, J.; KAISER, R.; PETERS, K.-H. u. SCHNEIDER, O.: Estimation of design wave run-up on sea dykes under consideration of overtopping security by using benchmarks of flotsam. Proc. 4th Conf. o. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Rio de Janeiro/Brazil, 1995.
- NIEMEYER, H. D.: Ermittlung des Deichbesticks vor dem Augustgroden, Jadebusen, Ber. Forsch.-Stelle Küste, Bd. 41, 1997.
- PIERSON, W. J. u. MOSKOWITZ, L.: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodski. J. Geophys. Res., Vol. 69, No. 24, 1964.
- PILARCZYK, K.: Sea Defences. Dutch Ministry of Transp. Publ. Works – Road Hydraul. Eng. Dep., Delft, 1987.
- SCHÜTTRUMPF, R.: Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. Franzius-Inst., H. 39, 1973.
- TAW (TECHNISCHE ADVIESCOMISSIE VOOR DE WATERKERINGEN): Wave run-up and overtopping. Governem. Publ. Office. The Hague, 1974.
- TWB (TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT): Empfehlungen der ehemaligen Arbeitsgruppe „Sturmfluten“ und ihre Nutzenanwendung für den Seedeichbau. Die Küste, H. 17, 1969.
- VAN DER MEER, J. W. u. JANSSEN, J. P. F. M.: Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. Delft Hydr. Pub. No. 485, 1994.
- VAN DER MEER, J. W. u. DE WAAL, J. P.: Waterbeweging op taluds. Delft Hydraul./Waterloopk. Lab. Rapp. H1256, 1993.
- VAN OORSCHOT, J. H. u. D'ANGREMOND, K.: The effect of wave energy spectra on wave run-up. Proc. 11th Int. Coastal Engineering Conference. 1968, 1968.

- WASSING, F.: Model investigations of wave run-up on dikes carried out in the Netherlands in the past twenty years. Proc. 6th Conf. Coast. Eng., ASCE, 1967.
- ZITSCHER, F. F.; SCHERENBERG, R. u. CAROW, U.: Die Sturmflut vom 3. und 21. Januar 1976 an den Küsten Schleswig-Holsteins. Die Küste, H. 33, 1979.

8. Symbole

A_{97}	: Wellenauflauf bei 3 % Überlauf [m]
A_T	: Wellenauflauf nach Teekgrenze [m]
A_v	: Vergleichswellenauflauf (beim Extrapolationsverfahren) [m]
A_{vH}	: Vergleichswellenauflauf nach HUNT-VINJE [m]
A_{vMW}	: Vergleichswellenauflauf nach VAN DER MEER und JANSSEN
A_{vOA}	: Vergleichswellenauflauf nach VAN OORSCHOT u. D'ANGREMOND
BWSt	: Bemessungswasserstand [NN +m]
c_e	: Beiwert zur Wellenauflaufberechnung für die spektrale Breite des Seegangs
g	: Erdbeschleunigungskonstante = $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
h	: Wassertiefe
h_B	: Wassertiefe beim Bemessungswasserstand
h_m	: Wassertiefe vor dem Deich bei der Bezugssturmflut
H_B	: Wellenhöhe bei Eintritt des Bemessungswasserstands [m]
H_f	: fiktive Wellenhöhe (beim Extrapolationsverfahren) [m]
H_i	: kennzeichnende Wellenhöhe einer gewichteten Teilzeitreihe [m]
H_s	: signifikante Wellenhöhe [m]
$H_{\max}$	: maximale Wellenhöhe [m]
M_{Thw}	: mittleres Tidehochwasser einer Zeitreihe [NN +m]
$1:n$	: Neigung der Deichaußenböschung
P_A	: Auflaufpotential gewichteter Seegangsparameter [m]
sA_{MThw}	: säkularer Anstieg des mittleren Tidehochwassers [m/100 a]
$\tan \alpha$	: Neigung der Deichaußenböschung
T_f	: fiktive Wellenperiode (beim Extrapolationsverfahren) [s]
T_i	: kennzeichnende Wellenperiode einer gewichteten Teilzeitreihe [s]
T_P	: mit dem Energiedichtemaximum korrespondierende Periode [s]
u	: Windgeschwindigkeit [m/s]