

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Weichbrodt, Frank; Zarncke, Thomas; Sommermeier, Knut; Klee, Anja; Schlamkow, Christian**

## **Grundlagen für Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in Mecklenburg-Vorpommern**

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105225>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Weichbrodt, Frank; Zarncke, Thomas; Sommermeier, Knut; Klee, Anja; Schlamkow, Christian (2013): Grundlagen für Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in Mecklenburg-Vorpommern. In: Die Küste 80. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 143-162.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Grundlagen für Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in Mecklenburg-Vorpommern

*Frank Weichbrodt, Thomas Zarncke, Knut Sommermeier, Anja Klee und Christian Schlamkow*

## Zusammenfassung

Eine wesentliche Grundlage für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen ist die Kenntnis der örtlichen hydrodynamischen Bedingungen. Für alle Küstenschutzanlagen in Mecklenburg-Vorpommern, die dem Schutz von in Zusammenhang bebauten Gebieten dienen, wird die Ermittlung von hydrodynamischen Eingangsparametern auf Grundlage landeseinheitlicher Verfahren durchgeführt. Die kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Verfahren auf Grundlage von Erfahrungen mit realisierten Küstenschutzanlagen, neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen und die Anpassung der Verfahren an die lokalen natürlichen Verhältnisse sind vor dem Hintergrund des wachsenden Schadenspotentials unverzichtbar.

In diesem Beitrag wird die aktuelle, überarbeitete Konzeption Mecklenburg-Vorpommerns zur Festlegung hydrodynamischer Eingangsparameter und der Sicherheitsüberprüfung bestehender Anlagen vorgestellt. Für drei besonders wichtige Parameter – Bemessungshochwasserstand, Referenzhochwasserstand und Bemessungsseegang – werden bereits durchgeführte Arbeiten zur Anwendung dieser Konzeption, d. h. die Bestimmung der jeweiligen Eingangsparameter, etwas detaillierter dargestellt.

## Schlagwörter

Mecklenburg-Vorpommern, Küstenschutz, Bemessung von Küstenschutzanlagen, Bemessungshochwasserstand, Referenzhochwasserstand, Bemessungswasserstandsganglinie, Bemessungsseegang

## Summary

*The knowledge of local hydrodynamic conditions is an essential basis for the design, dimensioning and safety assessment of coastal protection systems. The hydrodynamic conditions are determined by standardized methods for all coastal structures protecting populated areas in Mecklenburg-West Pomerania. The continual further development of these methods based on experience, additional scientific knowledge and adaption to the local natural conditions is indispensable with regard to the damage potential.*

*This article presents the current adapted concept for the determination of hydrodynamic input parameters and the safety assessment of existing coastal structures. For three particularly important parameters – design water level, design wave parameters and design water level curve – an application of this method is shown in somewhat more detail.*

## Keywords

*Mecklenburg-Western Pomerania, coastal flood defense and protection, design of coastal structures, design water level, reference water level, design wave parameter, design water level curve*

## Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung.....	144
2	Konzeption zur Festlegung hydrodynamischer Eingangsparameter sowie zur Sicherheitsüberprüfung.....	146
2.1	Bemessungshochwasserstand.....	147
2.2	Referenzhochwasserstand.....	150
2.3	Bemessungsseegang.....	151
2.4	Statistische Häufigkeitsverteilung hydrodynamischer Parameter.....	152
2.5	Bemessungswasserstandsganglinie.....	153
2.6	Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen.....	154
3	Bestimmung von Eingangsparametern.....	155
3.1	Bemessungshochwasserstand und Referenzhochwasserstand.....	155
3.2	Bemessungsseegang.....	159
4	Zusammenfassung und Ausblick.....	161
5	Schriftenverzeichnis.....	162

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Mit der zunehmenden Besiedlung des Küstenraumes und seiner verstärkten landwirtschaftlichen, industriellen und touristischen Nutzung stieg der monetäre Wert des Küstenraumes in den letzten Jahrhunderten stetig an. Diese Entwicklung hat sich in Mecklenburg-Vorpommern in den vergangenen Jahrzehnten – insbesondere mit Blick auf die touristische Nutzung – noch beschleunigt. Dabei wuchs auch das Schadenspotential infolge von Sturmfluten, die an der Außenküste und in den inneren Küstengewässern (Bodden) zu hohen Wasserständen mit vergleichsweise langer Verweilzeit führen können. Dies gilt vor allem für die überflutungsgefährdeten Küstenniederungen und erosionsgefährdeten Küstenabschnitte (Abb. 1). Mesoskalige Analysen zum ökonomischen Schadenspotential zeigen, dass in Mecklenburg-Vorpommern bei Eintritt einer sehr schweren Sturmflut Schäden mit einem Wert von ca. 2,9 Mrd. € zu erwarten sind (HKV HYDROKONTOR AACHEN 2013)



Abbildung 1: Potentielle Überflutungsflächen bei Eintritt von sehr schweren Sturmfluten (hellrot, Wasserstand  $>2,00$  m ü. NHN) und erosionsgefährdete Küstenabschnitte mit Angabe der beobachteten mittleren Uferlinienverlagerung in m/100 Jahre (dunkelrot, negative Werte = Küstenrückgang).

Bereits in der Vergangenheit haben Sturmfluten in Mecklenburg-Vorpommern wiederholt zum Verlust von Menschenleben und zu erheblichen Sachschäden geführt. Daher wurden zunächst sehr einfache Bauwerke zum Schutz gegen Überflutungen oder Küstenrückgang errichtet. Die Bauwerke wurden immer vor dem Hintergrund des den Küstenbewohnern zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Wissens sowie der verfügbaren technischen und finanziellen Mittel geplant und gebaut. Um einen möglichst effektiven Küstenschutz zu gewährleisten und unter Berücksichtigung des Schadenspotentials einen möglichst einheitlichen Schutzstatus zu schaffen, wurden Konzeptionen und Entwurfsgrundsätze entwickelt. Diese wurden auf Grundlage von Erfahrungen mit realisierten Küstenschutzbauwerken weiterentwickelt.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Konzeptionen und Entwurfsgrundsätze sowie deren Anpassung an die lokalen natürlichen Gegebenheiten sind für den Küstenschutz – nicht nur in Mecklenburg-Vorpommern – von großer Bedeutung, da an der Küste typischerweise sehr unterschiedliche naturräumliche Bedingungen vorzufinden sind. Für konkrete, in der Küstenschutzverwaltung umsetzbare Festlegungen sind neben dem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand auch die nutzbaren Datengrundlagen sowie die zur Verfügung stehenden Ressourcen zu berücksichtigen.

Vor dem Hintergrund des Bedarfs an Erneuerung bzw. Ertüchtigung von Küstenschutzanlagen und geänderter gesetzlicher Rahmenbedingungen wurde 1995 der Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern entwickelt. Im Generalplan sind neben den genannten Konzeptionen und Entwurfsgrundsätzen auch vorhandene Küstenschutzanlagen beschrieben. Darüber hinaus sind geplante Küstenschutzmaßnahmen inkl. Kostenschätzung und Einstufung der Dringlichkeit abgebildet. Um flexibel auf neue Erkenntnisse, geänderte Anforderungen und die Verfügbarkeit von finanziellen Mitteln reagieren zu können, wird der Generalplan seit 2009 in Form von

themenbezogenen, leicht aktualisierbaren Regelwerken weitergeführt (selbständige Hefte für einzelne Themenkomplexe). Ein wichtiger Teil des Regelwerkes ist die Zusammenstellung der Kenntnisse zu den im jeweiligen Küstenabschnitt zu erwartenden hydrodynamischen Verhältnissen und des Schutzniveaus. Die Regelwerke sind öffentlich zugänglich und dienen somit auch als Grundlage für Planungen von Gemeinden bzw. mit Planungen beauftragten Ingenieurbüros.

Da verbesserte wissenschaftliche Methoden, aktuelle Zeitreihen von hydrodynamischen Messdaten und Erkenntnisse zum Anstieg des relativen Meeresspiegels im Regelwerk berücksichtigt werden sollen, wurden im Rahmen der Weiterentwicklung des Regelwerkes neue einheitliche Festlegungen zur Ermittlung der hydrodynamischen Eingangsparameter für Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen getroffen. Ziel ist es, wesentliche Eingangsdaten für alle Küstenschutzbauwerke/-maßnahmen, die dem Schutz von in Zusammenhang bebauten Gebieten dienen, zu definieren. Im Folgenden wird die in Mecklenburg-Vorpommern angewandte Konzeption zur Festlegung der Eingangsparameter und der Sicherheitsüberprüfung beschrieben. Für ausgewählte Eingangsparameter wird das fachliche Herangehen bei der Bestimmung der konkreten Parameter/Bemessungswerte dargestellt.

## **2 Konzeption zur Festlegung hydrodynamischer Eingangsparameter sowie zur Sicherheitsüberprüfung**

Unterschiedliche Entwurfs- und Bemessungsaufgaben (funktionelle, konstruktive Bemessung) erfordern die Definition unterschiedlicher hydrodynamischer Parameter als Eingangsgröße für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzbauwerken. Dabei sind nicht immer zwangsläufig Extremereignisse wie der höchste zu erwartende Wasserstand oder der höchste gemessene Seegang von Bedeutung, da nicht alle Küstenschutzbauwerke funktionell gegen Extremereignisse bemessen werden müssen (z. B. Bauwerke zur Sicherung gegen Küstenrückgang) oder bei Eintritt von Extremereignissen sogar geringeren Belastungen ausgesetzt sind (z. B. nearshore Wellenbrecher mit geringer Kronenhöhe oder Bühnen bei sehr hohen Wasserständen). Für die Konzeption zur Festlegung hydrodynamischer Eingangsparameter wurde daher zwischen funktioneller und konstruktiver Bemessung unterschieden.

Bei der funktionellen Bemessung von Küstenschutzbauwerken werden im Wesentlichen die Lage, die erforderlichen Dimensionen (Länge, Breite, Höhe) und gegebenenfalls weitere Eigenschaften des Bauwerkes (z. B. Durchlässigkeit) festgelegt. Dabei ist immer die spezielle Funktion, die das Bauwerk erfüllen soll, wie etwa der Schutz vor Überflutung oder die Beeinflussung von Sedimenttransportvorgängen zu beachten. Einige Bauwerke können auch Doppelfunktionen übernehmen. Die für die funktionelle Bemessung erforderlichen hydrodynamischen Eingangsparameter unterscheiden sich für Hochwasserschutzbauwerke und Küstensicherungsbauwerke wie in Abb. 2 dargestellt.

Die konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken dient vor allem der Sicherstellung der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Hier sind nach Analyse der angreifenden hydrodynamischen Kräfte die geeignete Konstruktion und geeignete Baustoffe zu wählen. Des Weiteren sind die Bauteile des Bauwerks so zu dimensionieren, dass eine wirtschaftliche Lebensdauer für das Bauwerk erreicht werden kann. Die für die

konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken festzulegenden hydrodynamischen Eingangsparameter sind ebenfalls in Abb. 2 dargestellt.

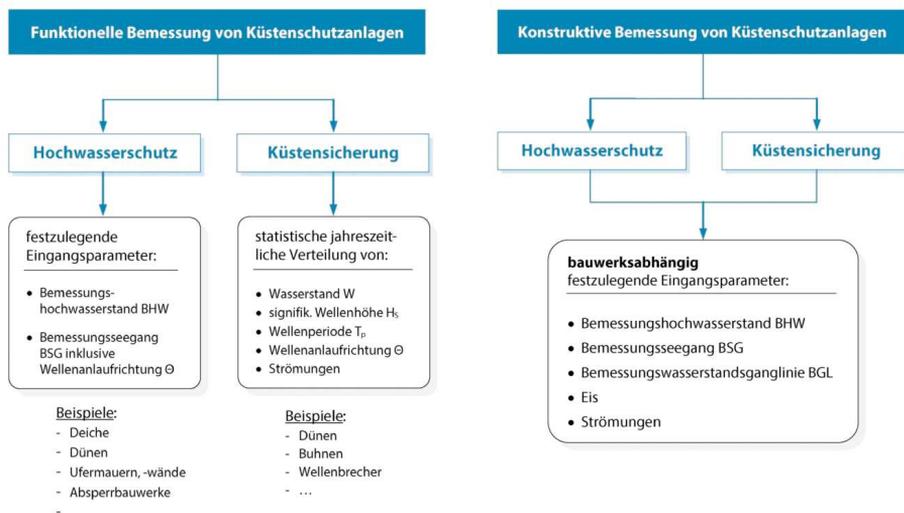


Abbildung 2: Hydrodynamische Eingangsparameter für die funktionelle bzw. konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken.

## 2.1 Bemessungshochwasserstand

Für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzbauwerken kommen, je nach Zielstellung, zwei Bezugsgrößen zum Einsatz:

- Der Bemessungshochwasserstand (BHW) dient dem Entwurf und der Bemessung neuer Küstenschutzbauwerke bzw. dem Ausbau bereits bestehender Anlagen, die den Anforderungen der Sicherheitsüberprüfung nicht entsprechen.
- Der Referenzhochwasserstand (RHW) dient der funktionellen Überprüfung bestehender Küstenschutzbauwerke sowie zur funktionellen Prüfung der Notwendigkeit einer Küstenschutzmaßnahme (abhängig vom Schadenspotential).

Der BHW ist als Ruhewasserstand definiert, der sich ohne Wellenbewegung als Scheitelwasserstand einer Bemessungssturmflut einstellt. Mit Hilfe des BHW wird ein zu bemessendes Bauwerk so dimensioniert, dass der BHW schadlos gekehrt werden kann. Die Ermittlung der Sollhöhe des Bauwerkes erfolgt unter Berücksichtigung des möglicherweise gleichzeitig auftretenden Bemessungsseegangs. Abhängig von den Eigenschaften des Bauwerkes sind die Wellenaufbauhöhe und gegebenenfalls die zulässige Überlaufwassermenge zu ermitteln.

Aufgrund des Schadenspotentials kommt der Weiterentwicklung der Entwurfs- und Bemessungsregeln und damit auch einem einheitlichem Verfahren zur Festlegung des BHW in Mecklenburg-Vorpommern eine besondere Bedeutung zu. Bisher wurde in Mecklenburg-Vorpommern der örtliche BHW auf Grundlage des Vergleichswertverfahrens ermittelt. Der BHW basierte dabei auf dem in der Vergangenheit höchsten, sicher gemessenen Sturmflutereignis an der deutschen Ostseeküste. Er setzte sich aus dem

örtlich gemessenen Scheitelwasserstand des Extremereignisses (1872 bzw. 1913 für einige Binnenküstenstandorte) zuzüglich des seit dem Eintrittsdatum beobachteten und für den Zeitraum von 200 Jahren erwarteten relativen Meeresspiegelanstiegs (0,20–0,30 m) zusammen.

Zukünftig wird der BHW nicht mehr nach dem Vergleichswertverfahren, sondern auf Grundlage statistischer Analysen von zurückliegend erfassten Wasserständen ermittelt. Die dazu erforderlichen gemessenen Zeitreihen liegen heute aufgrund der kontinuierlichen Erfassung hydrodynamischer Größen für einige Messstandorte vor und sind für derartige Analysen geeignet. Das bis zum heutigen Zeitpunkt höchste gemessene Sturmflutereignis von 1872 findet im statistischen Bemessungsverfahren keinen Eingang. Diese Sturmflut stellt ein einmalig gemessenes Ereignis dar und wird als sog. „Ausreißer“ aus den Extremwertanalysen ausgeschlossen.

Zur statistisch basierten Ermittlung des BHW bedarf es neben ausreichend langer Zeitreihen auch der Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeit des für die Bemessung maßgebenden Extremereignisses. Die an der Ostsee liegenden Küstenbundesländer Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern haben sich auf Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse bzgl. der Definition der Eintrittswahrscheinlichkeit abgestimmt. Ziel ist es, eine einheitliche, länderübergreifende Grundlage für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen zu verwenden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des für die Bemessung maßgebenden Hochwasserereignisses wurde mit  $p = 0,005$  bzw. einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren (Kurzbezeichnung  $HW_{200}$ ) festgesetzt (siehe auch MELUR-SH 2013).

Für die Ermittlung des BHW sind neben der Bestimmung möglicher Extremereignisse auch die bisher beobachteten sowie die zukünftig zu erwartenden Änderungen des mittleren Wasserstandes zu berücksichtigen (relativer Meeresspiegelanstieg). Diese Änderungen haben ihre Ursache in:

- Schwankungen des Meeresspiegels durch Veränderung der Gesamtwassermenge (Volumen) der Weltmeere (eustatischer Anteil)
- langfristigen neotektonischen Bewegungen der Erdkruste
- Landhebungen bzw. -senkungen infolge der Belastung der Erdkruste durch die Eismassen der letzten Eiszeit (isostatischer Anteil, Stillstand erst bei Erreichen der Isostasie).

Langjährige Messreihen des Wasserstandes an verschiedenen Orten der Küste Mecklenburg-Vorpommerns zeigen bis heute einen kontinuierlichen relativen Anstieg des mittleren Wasserstandes der Ostsee. Für Warnemünde ist beispielsweise ein Anstieg von 1,2 mm/Jahr (DIETRICH und LIEBSCH 2000) bzw. 1,4 mm/Jahr (JENSEN und MUDERSBACH 2004) dokumentiert. Der Anstieg variiert vergleichsweise stark in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum. Untersuchungen der Universität Rostock ergaben für Warnemünde z. B. einen Anstieg von 2,3 mm/Jahr für einen Untersuchungszeitraum von 1956 bis 2006. Weitere Messungen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns und entsprechende Auswertung der Messdaten werden zeigen, ob sich aus den gewonnenen Daten eine Beschleunigung des relativen Meeresspiegelanstiegs ableiten lässt.

Die neotektonischen und isostatischen Vorgänge stellen langfristige Prozesse dar, die für die Zukunft vergleichsweise gut abschätzbar sind. Der eustatische Anteil des relativen Meeresspiegelanstiegs kann sich aber infolge der klimabedingten Erwärmung der Erde

beschleunigen. Abhängig vom gewählten Klimaszenario ergeben sich unterschiedliche Werte für den globalen Anstieg des Meeresspiegels (siehe 4. IPCC-Sachstandsbericht, 2007; \*1). Mögliche zukünftige Änderungen des Meeresspiegelanstiegs sind derzeit Gegenstand der Forschung, da insbesondere die zukünftigen Veränderungen der Eisbedeckung der Pole der Erde nur mit Unsicherheiten beschrieben werden können\*2; \*3.

Auf Grundlage der 2012 vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse und politischer Festlegungen haben Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern festgelegt, einen Gesamtzuschlag von 0,50 m für den zukünftigen Anstieg des relativen Meeresspiegels für einen Zeitraum von 100 Jahren zu berücksichtigen. Dieser Wert stellt auch das Vorsorgemaß für Küstenschutzmaßnahmen an der deutschen Nordseeküste dar. Da der größte Anteil dieses Gesamtzuschlags auf den angenommenen klimainduzierten Meeresspiegelanstieg (eustatischer Anteil) entfällt, wird dieser Gesamtzuschlag als Klimazuschlag bezeichnet.

Aufgrund sich verändernder mittlerer Wasserstände (relativer Meeresspiegelanstieg) ist ein fest definierter Bemessungswasserstand immer an ein konkretes Bemessungsdatum gebunden. Es wird davon ausgegangen, dass die Funktionalität einer Anlage, die mit dem BHW bemessen wurde, vom Zeitpunkt der Berechnung des BHW bis 100 Jahre in die Zukunft gewährleistet ist. Voraussetzung dafür ist eine entsprechende Unterhaltung der Anlage.

Mit dem in Mecklenburg-Vorpommern festgelegten Verfahren wird der Bemessungshochwasserstand mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von  $p=0,005$  ( $HW_{200}$ ) mit der zum Zeitpunkt der Berechnung zur Verfügung stehenden langjährigen Wasserstandszeitreihe ermittelt. Für die statistische Auswertung sind die Messdaten entsprechend des beobachteten relativen Meeresspiegelanstiegs zu korrigieren (Beschickung). Zur Ermittlung des BHW wird, wie bereits erwähnt, zum ermittelten  $HW_{200}$ -Wert ein Klimazuschlag in Höhe von 0,50 m für 100 Jahre addiert. Die Überprüfung des BHW wird alle 10 Jahre durchgeführt. Unter Berücksichtigung des beobachteten Meeresspiegelanstiegs erfolgt dann die Entscheidung über die Notwendigkeit einer Anpassung des BHW (vgl. Abb. 3).

Mit der statistisch basierten Festlegung des BHW auf Grundlage langjähriger Wasserstandszeitreihen und der Berücksichtigung des Klimazuschlags steht für die Küste

---

\*1 Im 5. Sachstandsbericht des IPCC 2013 wurden aktualisierte modell- und szenariobasierte Simulationsergebnisse veröffentlicht. Bei Annahme des Szenarios RCP8.5, das die höchsten Auswirkungen auf den Meeresspiegelanstieg zeigt (Bevölkerungswachstum auf 12 Mrd. Menschen und Verdreifachung des Primärenergieverbrauchs), wurde bis zum Jahr 2100 ein globaler mittlerer Meeresspiegelanstieg von 0,74 m ermittelt (Median, 0,52 bis 0,98 m für das 5 % bzw. 95 % Perzentil). Die Vereinten Nationen gehen von einem Bevölkerungszuwachs von derzeit ca. 7,5 Mrd. Menschen auf ca. 11 Mrd. Menschen in 2100 aus.

\*2 2015 wurden Untersuchungsergebnisse von GRINSTED et al. zum möglichen Meeresspiegelanstieg für Nordeuropa bei Annahme des o. g. Szenarios RCP8.5 veröffentlicht. In dieser Veröffentlichung wird die im IPCC-Sachstandsbericht veröffentlichte „wahrscheinliche“ Bandbreite des Meeresspiegelanstiegs diskutiert. Darüber hinaus wird auf Unsicherheiten/Risiken (Abschmelzen der antarktischen Eismassen) eingegangen.

Für den Bereich der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns wird ein Meeresspiegelanstieg von ca. 0,70 m für RCP8.5 (Median) ermittelt. Nach den Untersuchungen von GRINSTED et al. ist die Unsicherheit aber größer als im Bericht des IPCC dargestellt. Für das 95 % Perzentil wurde ein gegenüber dem Median zusätzlicher Anstieg des Meeresspiegels von ca. 0,90 m ermittelt.

\*3 Von der LAWA wurde 2017 empfohlen, den für 2019 angekündigten Sonderbericht des IPCC abzuwarten und dann über neue/veränderte Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu entscheiden.

Mecklenburg-Vorpommerns eine einheitliche Konzeption für die Ermittlung dieses wichtigen Eingangsparameters zur Verfügung.

## 2.2 Referenzhochwasserstand

Mit Hilfe des Referenzhochwasserstandes (RHW) wird ermittelt, ob ein bestehendes Hochwasserschutzbauwerk funktionell den Sicherheitsanforderungen entspricht, d. h. ob das Bauwerk ein Sturmflutereignis mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von  $p = 0,005$  (Wiederkehrintervall 200 Jahre) kehren kann. Der RHW ist somit ein wichtiger Parameter bei der regelmäßigen Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzbauwerken. Im Folgenden werden der fachliche Hintergrund und das in Mecklenburg-Vorpommern angewandte Verfahren zur Ermittlung des RHW für einen Gültigkeitszeitraum von 10 Jahren beschrieben.

Da der Anstieg des Meeresspiegels, z. B. für den Zeitraum von 2020 bis 2120, nicht als linear angenommen werden kann, ist bei einer Sicherheitsüberprüfung bestehender Hochwasserschutzbauwerke lediglich der bis zum Beginn des Überprüfungszeitraums beobachtete und der bis zum Ende des Überprüfungszeitraums zu erwartende Meeresspiegelanstieg zu berücksichtigen. Der Zeitraum bis zur erneuten Überprüfung des Referenzwasserstandes wurde in Mecklenburg-Vorpommern mit 10 Jahren festgelegt. Ziel ist es, Veränderungen in der Entwicklung des mittleren relativen Meeresspiegelanstiegs rechtzeitig zu erkennen. Eine jährliche Überprüfung ist vor dem Hintergrund der vergleichsweise langsamen Änderungen nicht zielführend. Dementsprechend ist zur Ermittlung des jeweiligen Referenzhochwasserstandes für den festgelegten 10-jährigen Überprüfungszeitraum der bis zum Berechnungszeitpunkt beobachtete und der im Überprüfungszeitraum zu erwartende relative Meeresspiegelanstieg zu ermitteln (Extrapolation bis zum Ende des Überprüfungszeitraums). Die Abb. 3 verdeutlicht das Verfahren zur Ermittlung des RHW für einen beliebig wählbaren 10-jährigen Überprüfungszeitraum.

Der Referenzhochwasserstand wird unter Berücksichtigung des beobachteten Meeresspiegelanstiegs alle 10 Jahre neu festgelegt. Nach jeweils 20 Jahren ist eine neue statistische Auswertung der gemessenen Zeitreihen geplant (Beschickung von Messdaten). Der Zeitraum, nach dem eine neue statistische Auswertung gemessener Ereignisse vorgenommen wird, kann bei einer Häufung extremer Ereignisse verkürzt oder, sofern wenig Ereignisse eintreten, die die statistische Aussage beeinflussen, auch verlängert werden.

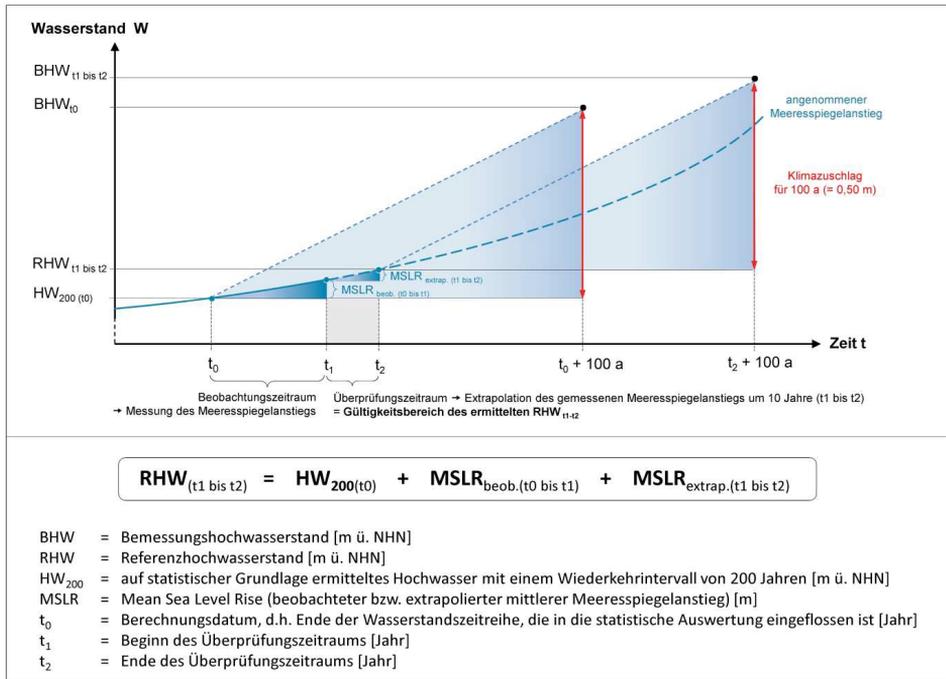


Abbildung 3: Hydrodynamische Eingangsparameter für die funktionelle bzw. konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken.

### 2.3 Bemessungsseegang

Der Bemessungsseegang (BSG) ist der für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung eines Küstenschutzbauwerkes oder einzelner Bauteile maßgebende Seegang und somit eine wichtige Eingangsgröße insbesondere für die konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken in Mecklenburg-Vorpommern.

Für die funktionelle Bemessung von Küstenschutzbauwerken ist die Festlegung eines einzelnen örtlichen Bemessungsseegangs in den meisten Fällen nicht zielführend. Hier ist die statistische Verteilung von Seegangereignissen für entsprechend der Aufgabenstellung zu bestimmende Zeiträume zu ermitteln. Allerdings kann der Bemessungsseegang auch für die funktionelle Bemessung von Küstenschutzbauwerken maßgebend sein, sofern die Einwirkungen des Seegangs die Funktion eines Bauwerkes beeinflussen (z. B. Wellenauf-/überlauf an Hochwasserschutzbauwerken).

Die Festlegung des Bemessungsseegangs für Küstenschutzbauwerke muss unter Berücksichtigung örtlich und zeitlich variabler hydrodynamischer Größen wie Wasserstand, Strömung und Wind sowie der örtlichen Morphologie (Wassertiefe) erfolgen, da diese Größen die signifikanten Seegangsparameter wesentlich beeinflussen.

Die Festlegung des Bemessungsseegangs für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns soll auf Grundlage einer statistischen Analyse möglichst langer Seegangszeitreihen erfolgen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung maßgebenden Bemessungssegangsereignisses wurde – in Übereinstimmung

mit den Festlegungen zum Bemessungshochwasserstand – mit  $p = 0,005$  (Wiederkehrintervall 200 Jahre) festgelegt, da das gleichzeitige Eintreten von Wasserständen und Seegang mit jeweils geringer Eintrittswahrscheinlichkeit nicht ausgeschlossen werden kann. Die statistische Auswertung von Wasstands-/Seegangsmessdaten an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns hat vielmehr gezeigt, dass an exponierten Küstenabschnitten kein statistischer Zusammenhang zwischen den beiden Messgrößen besteht.

Da für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns gemessene langjährige Seegangszeitreihen, die für eine belastbare statistische Auswertung erforderlich sind, nicht vorliegen, sollen die langjährigen Seegangszeitreihen aus vorliegenden Windzeitreihen ermittelt werden. Zur Ermittlung der Seegangszeitreihen aus Windzeitreihen können grundsätzlich numerische Simulationen (stationär, instationär) bzw. empirische Verfahren (SPM, Wind-Wellen-Korrelationen) genutzt werden. Da instationäre Winddaten des Deutschen Wetterdienstes erst seit 1998 vorliegen, werden stationäre Simulationen genutzt. Für Seegebiete, für die bereits Seegangsmessungen vorliegen, sollen die Ergebnisse von Wind-Wellen-Korrelationen einbezogen werden.

Da die naturräumlichen Bedingungen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns sehr unterschiedlich sind, ist der Bemessungsseegang vergleichsweise kleinräumig zu bestimmen. Dabei ist zwischen der Außenküste und den inneren Küstengewässern (Bodden, Haffe) zu unterscheiden.

Da die Seegangparameter u. a. von der Wassertiefe abhängen, ist die Angabe, für welche örtliche Wassertiefe (Tiefwasser, Übergangsbereich oder Flachwasser) der Bemessungsseegang ermittelt wurde, besonders wichtig. Mögliche Wasserstandsänderungen sind zu berücksichtigen. Für die konkrete funktionelle und konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken sind örtliche Flachwassereffekte und Bauwerkseffekte zu berücksichtigen.

## 2.4 Statistische Häufigkeitsverteilung hydrodynamischer Parameter

Für die funktionelle Bemessung bestimmter Küstenschutzbauwerke ist die Kenntnis eines örtlich definierten Bemessungswasserstandes bzw. Bemessungsseegangs nicht ausreichend. Zur funktionellen Bemessung von Bauwerken, die den örtlichen Sedimenttransport beeinflussen (z. B. Wellenbrecher oder Buhnsysteme), sind z. B. Informationen zur Häufigkeitsverteilung von Seegangparametern und Wasserständen erforderlich. Auch für die Bemessung des Volumens von Strandersatzmaßnahmen oder des Volumens von Sedimentfällen entsprechend der örtlichen prognostizierten Sedimenttransportvorgänge ist die Kenntnis der Häufigkeitsverteilung hydrodynamischer Parameter wichtig.

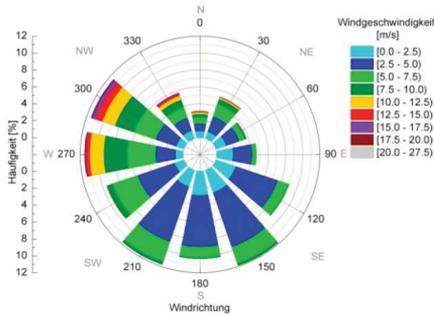
Aufgrund der unterschiedlichen naturräumlichen Bedingungen der verschiedenen Küstenabschnitte variieren die Windwirklänge und die Wassertiefe. Dementsprechend unterliegen die Küstenabschnitte Mecklenburg-Vorpommerns auch einer unterschiedlichen Seegangsbelastung. Diese kann jedoch mit Hilfe der mittleren Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen an der Küste gut abgeschätzt und dargestellt werden. Die daraus gewonnenen Informationen sind für die Bemessung geplanter bzw. die Beurteilung bestehender Bauwerke an der Küste wertvoll.

In Abb. 4 sind die mittlere Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und -stärke sowie die mittlere Häufigkeitsverteilung von Wellenanlaufhöhe und -höhe beispielhaft für den Küstenabschnitt von Warnemünde dargestellt.

Häufigkeitsverteilung Wind (1996-2005)

[%]		Windrichtung [°]												Σ
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
Windgeschwindigkeit [m/s]	1,25	0,77	0,84	1,24	1,87	2,43	2,78	2,85	2,03	1,14	0,86	0,95	0,99	<b>18,75</b>
	3,75	0,89	1,90	1,63	2,22	5,18	6,78	6,11	6,88	4,57	2,32	2,53	1,60	<b>42,61</b>
	6,25	0,72	1,57	0,67	0,51	1,29	2,08	1,28	2,51	3,10	3,34	2,68	1,34	<b>21,07</b>
	8,75	0,40	0,61	0,16	0,01	0,07	0,25	0,12	0,33	0,70	2,73	2,33	0,90	<b>8,62</b>
	11,25	0,24	0,20	0,05		0,01	0,01		0,02	0,05	1,66	1,59	0,53	<b>4,36</b>
	13,75	0,10	0,08	0,02						0,01	0,45	0,85	0,26	<b>1,77</b>
	16,25	0,02	0,02								0,10	0,38	0,10	<b>0,62</b>
	18,75	0,01									0,04	0,14	0,01	<b>0,20</b>
	21,25										0,01	0,03		<b>0,04</b>
	23,75													<b>0,00</b>
	26,25													<b>0,00</b>
Σ	<b>3,15</b>	<b>5,22</b>	<b>3,77</b>	<b>4,61</b>	<b>8,98</b>	<b>11,90</b>	<b>10,35</b>	<b>11,77</b>	<b>9,56</b>	<b>11,50</b>	<b>11,49</b>	<b>5,73</b>	<b>100,00</b>	

Häufigkeitsverteilung Wind (1996-2005)



Häufigkeitsverteilung Seegang (1996-2005)

Seegang stationär berechnet in ca. 10 m Wassertiefe

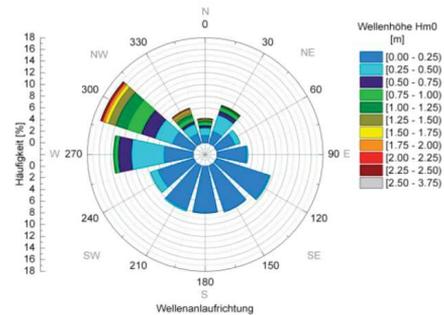


Abbildung 4: Beispiel für die Häufigkeitsverteilung von Wind und Seegang vor Warnemünde (Daten Deutscher Wetterdienst, Universität Rostock).

## 2.5 Bemessungswasserstandsganglinie

Die Bemessungswasserstandsganglinie (BGL) ist die für den Bemessungsfall repräsentative Wasserstandsganglinie. Sie stellt Wasserstände und zugehörige Verweildauern der eingetretenen Wasserstände für ein Ereignis dar, das für die konstruktive Bemessung von Küstenschutzbauwerken gewählt wurde. Dies umfasst die Bemessung von Dünenbauwerken und anderen linienhaften Küstenschutzbauwerken, bei denen auch die Dauer der Belastung oder die Durchsickerung maßgeblich die konstruktive Sicherheit einer Anlage bestimmen. Darüber hinaus dienen die Ganglinien der Bestimmung von realen Überflutungsflächen/-tiefen bei möglichen Durchbruchsszenarien.

BGL können durch die gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit hoher Wasserstände, Verweildauern und Füllen von Sturmfluten beschrieben werden. Dabei stellt die Fülle das Integral der Fläche zwischen Ganglinie und einer Begrenzungslinie dar. Wird für eine Fragestellung zur Bemessung einer Küstenschutzanlage eine einheitliche Eintrittswahrscheinlichkeit gewählt, dann lassen sich dafür die Wasserstände und Füllen frei bestimmen. Beispielhaft sind in Abb. 5 skalierte, d. h. im Wasserstand veränderte, Ganglinien gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit dargestellt. In Abhängigkeit von der

Aufgabenstellung (Bauwerksbemessung, Überflutungssimulation) ist festzulegen, welche der Ganglinien verwendet wird.

Das hohe Maß der Variabilität in der Auswahl der Bemessungsganglinien ist für verschiedene küstenschutztechnische Fragestellungen von Bedeutung. Es ist geplant, Bemessungswasserstandsganglinien für ausgewählte Küstenabschnitte in Mecklenburg-Vorpommern zu ermitteln.

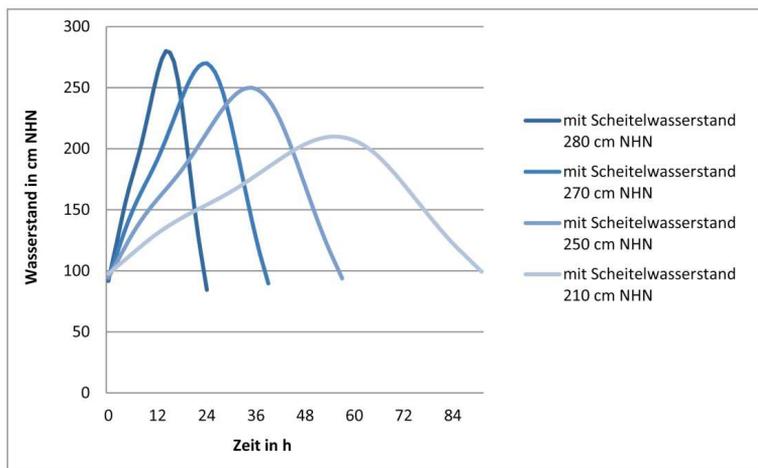


Abbildung 5: Wasserstandganglinien verschiedener Kombinationen von Wasserständen und Füllzeiten mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von  $p = 0,005$  für den Pegel Warnemünde; interne Mitteilung Universität Rostock an StALU MM auf Grundlage von Untersuchungen im Forschungsvorhaben HoRisk – B.

## 2.6 Verfahren zur Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen

Sofern zum Überprüfungszeitpunkt festgestellt wird, dass ein bestehendes Küstenschutzbauwerk die funktionellen Anforderungen nicht mehr erfüllt, d. h. z. B. den Referenzhochwasserstand zzgl. Wellenauflauf nicht mehr kehren kann, wird das Bauwerk entsprechend BHW bemessen (Ausbau bzw. Ersatzneubau). Die Anwendung des Referenzhochwasserstandes bei der Überprüfung bestehender Küstenschutzanlagen bzw. anderer Küstenbauwerke ermöglicht eine variable Anpassung an die zukünftig tatsächlich eintretenden Erhöhungen des Meeresspiegels. Eine Erhöhung aller bestehenden Küstenschutzbauwerke auf ein nach der neuen Ermittlungsmethode gegebenenfalls erhöhten BHW ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht erforderlich. Dies entspricht dem Ansatz der Deutschen Anpassungsstrategie des Bundes an den Klimawandel (DAS).

Zur Sicherstellung der Funktion von Küstenschutzbauwerken kann es aber erforderlich sein, Verstärkungen bzw. Ersatzneubauten vorzunehmen, auch wenn die Höhe des Bauwerks zum Überprüfungszeitraum noch ausreichend bemessen ist. Dies gilt beispielsweise für Küstenschutzdünen, die an sandigen Rückgangsküsten einem permanenten Sedimentverlust unterliegen und in einem diskontinuierlichen Zeitintervall durch Aufspülungen wiederherzustellen sind. Daher ist neben der funktionellen Sicherheitsüberprüfung auch eine Sicherheitsüberprüfung der konstruktiven Eigenschaften durchzu-

führen, um die Standsicherheit des Bauwerks zu gewährleisten. Dies erfolgt auf der Grundlage von Schadensuntersuchungen und unter Berücksichtigung der auf das Bauwerk einwirkenden Lasten (Wasserstand, Seegang, Strömung, Eis). Der schematische Ablauf der in Mecklenburg-Vorpommern geplanten funktionellen und konstruktiven Sicherheitsüberprüfung für Küstenschutzbauwerke in Mecklenburg-Vorpommern ist in Abb. 6. dargestellt.

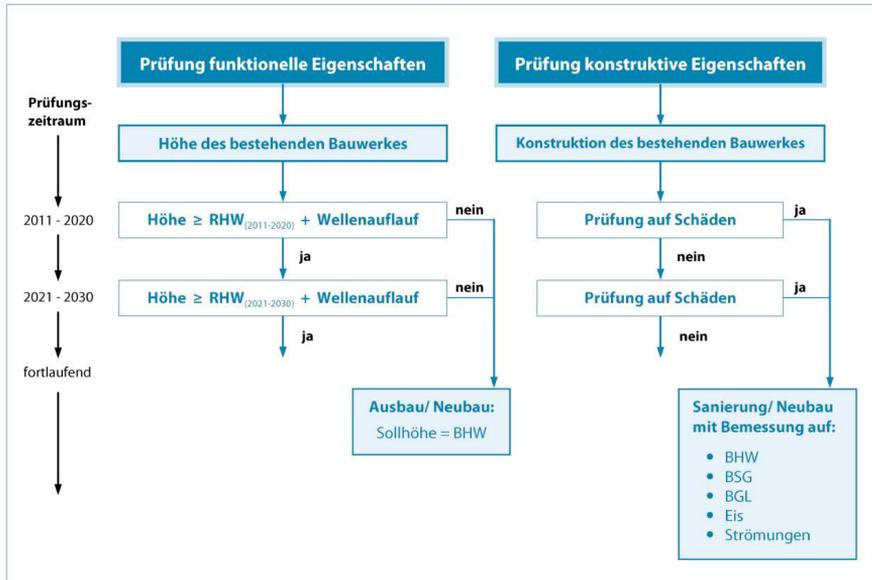


Abbildung 6: Ablaufschema zur funktionellen und konstruktiven Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzbauwerken in Mecklenburg-Vorpommern.

### 3 Bestimmung von Eingangsparametern

#### 3.1 Bemessungshochwasserstand und Referenzhochwasserstand

Grundlage für die Bestimmung des Bemessungshochwasserstandes (BHW) sind Pegelmessreihen über vergleichsweise lange Zeiträume, die statistisch ausgewertet und bewertet wurden. Auf der Grundlage langer Messzeitreihen lassen sich auch über den Messzeitraum hinaus definierte Eintrittswahrscheinlichkeiten mittels statistischer Verteilungsfunktionen ableiten. Hierbei sind die Dauer der am Pegel gemessenen Zeitreihe sowie die Lage des jeweiligen Pegels von Bedeutung.

Als Grundlage für die Ermittlung der ortsspezifischen BHW für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns wurden langjährig gemessene Wasserstandszeitreihen verwendet. Es wurden Messdaten berücksichtigt, die bis 2010 erfasst wurden. In den Abb. 7 und 8 sind die Lage der in die Untersuchungen einbezogenen Pegelstandorte sowie der zeitliche Umfang der berücksichtigten Zeitreihen dargestellt.

Für die statistischen Auswertungen wurden die gemessenen Daten zunächst auf das derzeit gültige Höhenbezugsniveau (NHN) umgerechnet und auf Plausibilität geprüft. Darauf aufbauend sind aus den gemessenen Zeitreihen jeweils geeignete Stichproben

abgeleitet worden. Je gemessener Zeitreihe (Pegelstandorte) wurden jeweils die Jahresmaxima sowie die Maxima von Sturmflutwasserständen, die einen definierten Wert überschreiten, als sogenannte „Peak over Threshold“ Werte für die statistischen Analysen als Stichprobe zugrunde gelegt. Da Trends statistische Auswertungen verfälschen, wurden sie aus den Stichproben eliminiert. Dazu wurde der für die gemessenen Jahresmaxima der Wasserstände ermittelte Wasserstandsanstieg ermittelt (lineare Funktion). Danach wurden die einzelnen Messwerte entsprechend ihres Erfassungsdatums zunächst auf das Jahr 2010 beschickt. Beschickung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der für den Zeitraum zwischen Messdatenerfassung und 2010 ermittelte Anstieg zum gemessenen Wasserstandswert addiert wurde. Um auch die bis 2020 zu erwartenden Änderungen des mittleren Wasserstandes zu berücksichtigen, wurde der im Beobachtungszeitraum an den jeweiligen Pegeln ermittelte Wasserstandsanstieg linear auf das Jahr 2020 extrapoliert. Die Messwerte der Stichprobe wurden wiederum entsprechend ihres Erfassungsdatums auf das Jahr 2020 beschickt.



Abbildung 7: Pegelstandorte mit Langzeitmessungen des Wasserstandes.

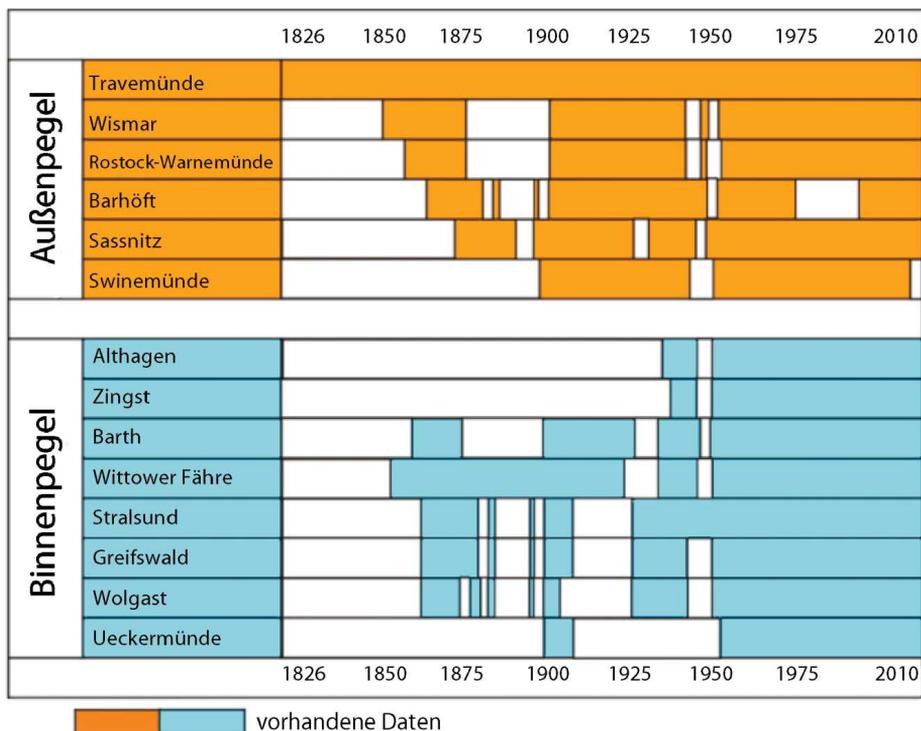


Abbildung 8: Datenumfang der einzelnen Pegelzeitreihen.

Für die Extrapolation auf Ereignisse mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden die verschiedenen extremwertstatistischen Verteilungsfunktionen (generalisierte Extremwertverteilung, Weibull-Verteilung, Extremal-I-Verteilung, Gumbel-Verteilung, Log-Normalverteilung etc.) an die Daten angepasst. Dazu wurde die Maximum-Likelihood-Methode sowie die Methode der L-Momente verwendet. Anschließend wurden die Anpassungen mittels grafischer Methode sowie statistischer Testverfahren bewertet.

Generell ließ sich für die Wasserstandsdaten entlang der Küste von Mecklenburg-Vorpommern die Gumbel-Verteilung am besten an die Daten anpassen. In Abb. 9 sind die Jahresmaxima der gemessenen Wasserstände (Stichprobe) zusammen mit den gewählten Extremwertverteilungsfunktionen exemplarisch für den Standort Warnemünde dargestellt.

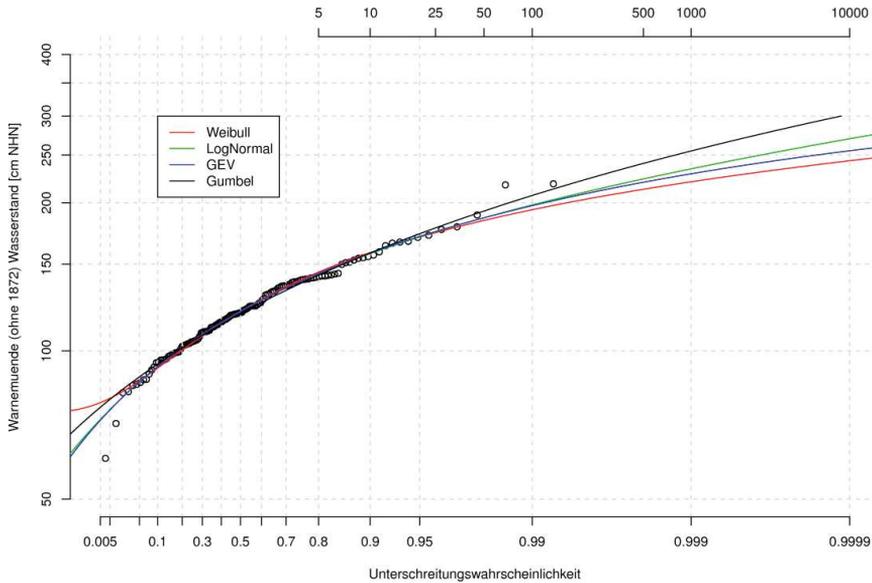


Abbildung 9: Trendbereinigte Jahresmaxima für den Pegel Warnemünde mit angepassten Extremwertverteilungsfunktionen, Universität Rostock.

Mit Hilfe der Verteilungsfunktion kann der zur festgelegten Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $p = 0,005$  bzw. zu einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren zugehörige Hochwasserstand  $HW_{200}$  ermittelt werden. Der regional gültige BHW für den Gültigkeitszeitraum von 2011–2020 berechnet sich anschließend durch Addition des Klimazuschlags, der wie bereits dargestellt, mit einem Pauschalwert von 0,50 m für die kommenden 100 Jahre angesetzt wird.

Der BHW repräsentiert somit einen Wasserstand, der sich aus der Addition eines Hochwassers mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren bezogen auf das Ende des Gültigkeitszeitraumes (MSLR 2011 bis 2020) und dem Klimazuschlag ergibt. Dieses Verfahren wurde sowohl für die Außen- als auch die Binnenküstenstandorte angewandt.

Die Ermittlung des Referenzhochwasserstands (RHW) zur funktionellen Prüfung bestehender Küstenschutzanlagen sowie der Notwendigkeit von Küstenschutzmaßnahmen erfolgt entsprechend des im Abschnitt 2.2 beschriebenen Verfahrens. Der Überprüfungszeitraum für die im aktuellen Regelwerk-Themenheft aufgeführten RHW-Werte umfasst die Dekade von 2011 bis 2020. Damit repräsentiert der RHW den Wasserstand eines Hochwassers mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren, der am Ende des Gültigkeitszeitraumes des Referenzwasserstandes (in diesem Fall 2020) anzunehmen ist.

Die für die verschiedenen Abschnitte der Außenküste sowie der inneren Küstengewässer ermittelten BHW und RHW-Werte sind im Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern tabellarisch zusammengestellt. Da bei den dargestellten Verfahren statistisch ermittelte Werte weniger Pegelstandorte großräumig auf das gesamte Küstengebiet übertragen wurden, wurden alle aufgeführten Bemessungswasserstände auf volle Dezimeter aufgerundet. Ziel dieser Rundung ist es, eine eventuelle Unterschreitung des geforderten Sicherheitsniveaus auszuschließen.

### 3.2 Bemessungsseegang

Auf Grundlage der Ergebnisse eines Forschungsvorhabens zur Bestimmung des Bemessungsseegangs an der Außerküste Mecklenburg-Vorpommerns (FRÖHLE et al. 2006) wurde der für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns bislang geltende Bemessungsseegang aktualisiert. Ziel der Aktualisierung ist die Anpassung der Bemessungswerte an die in Abschnitt 2.3 beschriebene Konzeption (v. A. Eintrittswahrscheinlichkeit  $p = 0,005$ ) und die Berücksichtigung fortgeschriebener Messzeitreihen.

Die Untersuchungen gliedern sich in zwei Teile und sind noch nicht vollständig abgeschlossen. Im ersten Teil der Untersuchungen wird der Bemessungsseegang in einiger Entfernung von der Küste, konkret an der Grenze des Übergangs vom gleichförmigen Seegrund zum Flachwasserbereich (Wassertiefe ca. 10 bis 12 m), ermittelt. Im zweiten Teil soll der Bemessungsseegang auf Grundlage von Festlegungen zum sog. Pessimprofil wassertiefenabhängig über Profile normal zur Uferlinie ermittelt werden, um für Küstenschutzbauwerke wassertiefenabhängige Bemessungswerte zur Verfügung zu stellen (Transformation des Seegangs bis zur Küste). Das Pessimprofil stellt dabei die größten zu erwartenden bzw. akzeptablen Wassertiefen im Küstenvorfeld bis zum Strand dar. Im Folgenden werden die Methodik der Untersuchungen und einzelne Ergebnisse zum Teil 1 kurz dargestellt.

Analog zum bisher genutzten Verfahren wurde ein Verfahren angewendet, bei dem Langzeit-Zeitserien auf der Grundlage von stationären Seegangssimulationen ermittelt wurden. Die Simulationen wurden mit dem Seegangsvorhersagemodell SWAN durchgeführt. Das Verfahren wurde gewählt, weil andere verfügbare Verfahren weniger genaue Ergebnisse liefern (einfache empirische Seegangsvorhersageverfahren), nicht flächendeckend angewendet werden können (direkte Seegangsmessungen und Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen) oder nicht genügend Eingangsdaten zur Verfügung stehen (in-stationäre Seegangssimulationen).

Zunächst wurden 1116 stationäre Simulationsrechnungen für 36 Windrichtungen und 31 Windgeschwindigkeiten ( $U_{\min} = 0 \text{ m/s}$ ,  $U_{\max} = 30 \text{ m/s}$ ,  $d_U = 1 \text{ m/s}$ ) für insgesamt 14 Simulationsgebiete (Küstenabschnitte in Mecklenburg-Vorpommern) durchgeführt. In den stationären Seegangssimulationen wurde jeweils von einem mittleren Wasserstand ausgegangen, da der Einfluss veränderter Wasserstände bei größeren Wassertiefen nur geringe Auswirkungen auf die Wellenhöhen hat. Um Langzeit-Zeitserien der Seegangparameter an einem beliebigen Ort im Simulationsgebiet zu erzeugen, wurden geeignete Winddaten in relativer Nähe der Simulationsgebiete verwendet. Die Winddaten wurden auf eine Höhe von 10 m höhenkorrigiert. Die korrigierte Zeitserie der Windgeschwindigkeiten und die Windrichtungen wurden auf volle m/s bzw. volle  $10^\circ$  gerundet. Für jeden Zeitpunkt, für den Winddaten vorlagen, wurden den Winddaten die Ergebnisse der jeweils entsprechenden stationären Simulationsrechnung zugeordnet. Aus den Berechnungsergebnissen wurden die Wellenhöhen  $H_{m0}$  und die mittleren Wellenanlaufrichtungen für den jeweiligen Berechnungspunkt ermittelt.

Die Wellenhöhen der so gewonnen Zeitserien wurden umfangreich verifiziert und mit richtungs- und lokationsabhängigen Korrekturfaktoren versehen, um die Genauigkeit der Langzeit-Zeitserien zu verbessern. Dazu wurden die Ergebnisse mit Messdaten von Seegangsmessbojen verglichen, die in den vergangenen Jahren an verschiedenen Lokationen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns im Einsatz waren. Erforderliche Korrekturen

wurden richtungsabhängig mit einer Auflösung von  $10^\circ$  für die Windrichtung vorgenommen.

Um den Bemessungsseegang abzuleiten, wurden auf Grundlage der korrigierten Zeitserien für jede Lokation statistische Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde zum einen eine Extremwertstatistik durchgeführt, zum anderen wurden Häufigkeitsverteilungen ermittelt. Die Zeitserien umfassen – je nach Ausgabelokation – Zeiträume von 38 bis 57 Jahren. Zur Ermittlung der Extremwerte konnten daher die Jahresmaxima der Wellenhöhen  $H_{m0}$  ausgewählt und verschiedene Extremwertverteilungen angepasst werden. Im Rahmen der Extremwertanalysen wurden die Generalisierte Extremwertverteilung (GEV), die Weibull-Verteilung, die Log-Normal-Verteilung und die Gumbel-Verteilung an die Zeitreihe der Jahresmaxima der Wellenhöhen angepasst und bewertet. Über alle Berechnungspunkte zeigt die GEV insgesamt die beste Anpassung. Daher wurden die Bemessungswerte für die Wellenhöhen mit festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeiten auf Grundlage der GEV für alle Berechnungspunkte abgeleitet. Analog zur Ermittlung des Bemessungshochwasserstands (BHW) wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Bemessungsseegang (BSG) mit einem Wiederkehrintervall von 200 Jahren (Eintrittswahrscheinlichkeit  $p=0,005$ ) festgelegt. Zusätzlich wurden die Wellenhöhen mit Wiederkehrintervallen von 100, 75 und 50 Jahren ermittelt. Die zusätzlichen Werte können zur Bemessung von Bauwerken mit begrenzter Lebensdauer oder niedrigeren Schutzanforderungen genutzt werden. Zur Einschätzung der möglichen Wellenanaufrichtungen für Bemessungsereignisse wurde der Bereich der möglichen Wellenanaufrichtungen der Jahresmaxima angegeben. Neben den Bemessungswerten wurden auch die Häufigkeitsverteilungen für die Auswertepunkte ermittelt.

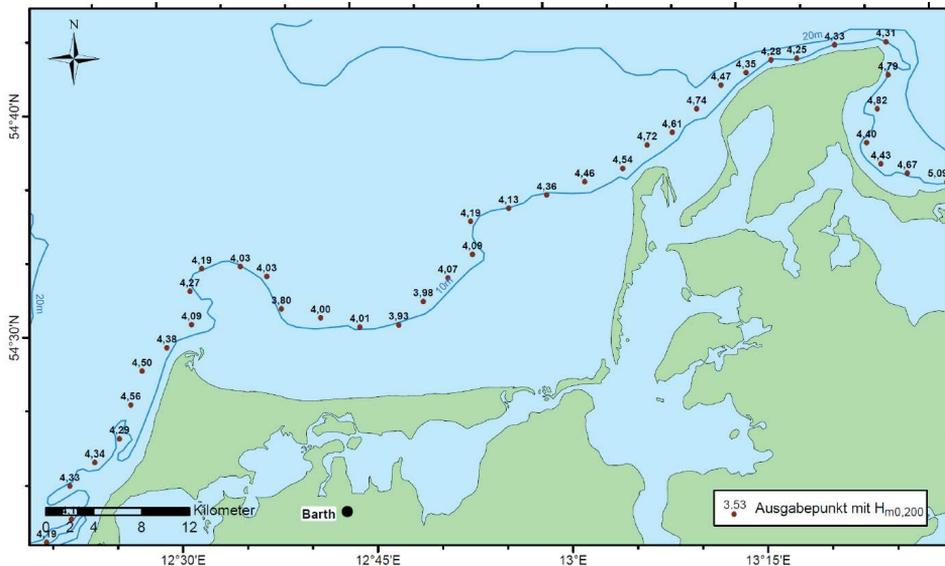


Abbildung 10: Ausgabepunkte und Bemessungsseegang  $H_{m0,200}$  an der generalisierten Tiefenlinie.

Die Auswertepunkte befinden sich auf einer generalisierten Tiefenlinie, die im Übergangsbereich vom schwach geneigten Seegrund in das Küstenvorfeld in einer Wassertiefe

von 10–12 Metern definiert wurde. Jeder Punkt hat feste Koordinaten und eine Wassertiefe. Als Ergebnisse liegen für jeden Punkt:

- die Häufigkeitsverteilungen der Wellenhöhen und Wellenanlaufrichtungen in grafischer und tabellarischer Darstellung
- die im Messzeitraum (Windmessung) höchste aufgetretene berechnete Wellenhöhe
- die Bemessungswellenhöhen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten mit Wiederkehrintervallen von 200, 100, 75 und 50 Jahren sowie die zugehörigen Wellenanlaufrichtungen

vor und ermöglichen eine qualifizierte Einschätzung der Seegangsverhältnisse entlang der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern. Die Ergebnisse sind Grundlage für die Transformation des Seegangs bis an die Küste (Teil 2 der Untersuchungen). In Abb. 10 ist der Bemessungsseegang  $H_{m0}$  für ein Wiederkehrintervall von 200 Jahren beispielhaft für den Küstenabschnitt vom Darß bis West-Rügen dargestellt.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem in diesem Beitrag beschriebenen Konzept wurden die Regeln für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung für Küstenschutzbauwerke in Mecklenburg-Vorpommern weiterentwickelt. Eine wichtige Grundlage war hierbei die länderübergreifende Festlegung zwischen Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern bzgl. einer einheitlichen Eintrittswahrscheinlichkeit für das Bemessungsereignis und einem Sicherheitszuschlag für den Anstieg des relativen Meeresspiegels (sog. Klimazuschlag).

Ein absoluter Schutz vor Überschwemmungen und Küstenrückgang ist auch bei Umsetzung dieses Konzeptes nicht gegeben. Außergewöhnliche Ereignisse mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit  $< p = 0,005$  können bei besonderen meteorologischen und hydrodynamischen Bedingungen auftreten. Darüber hinaus ist bei unvorhersehbaren Belastungssituationen (z. B. Schiffsstoß) bzw. Vorschäden infolge vorangegangener Ereignisse (z. B. Abtrag von Dünen) auch ein Versagen von Küstenschutzbauwerken möglich.

Vor diesem Hintergrund ist es richtig, vom „Sicherheitsversprechen“ zu einer Diskussion und letztendlich Definition des akzeptablen Risikos überzuleiten. Dies bedingt eine gesamtgesellschaftliche Diskussion des Risikos auf Grundlage der identifizierten Gefahren und des Schadenspotentials, das vor allem von der Nutzung der potentiellen Überflutungs- bzw. Rückgangsküsten abhängig ist. Probabilistische Bemessungsansätze, welche z. B. die Versagenswahrscheinlichkeit von Bauwerken einbeziehen, sind derzeit noch Gegenstand von Forschungsarbeiten. Diese komplexen Verfahren bedingen darüber hinaus eine Vielzahl von Eingangsgrößen, die zeitnah nicht für alle Standorte in Mecklenburg-Vorpommern ermittelt werden können.

Das in diesem Beitrag beschriebene Verfahren ist der nächste Schritt in der Weiterentwicklung der Regeln für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzbauwerken in Mecklenburg-Vorpommern. Für Bemessungsaufgaben werden zunehmend auch kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten – also die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Ereignissen – interessant. Zukünftig (bei Vorliegen längerer Zeitreihen) sollten auch kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten der verschiedenen hydrodynamischen Parameter unter genauer Betrachtung der

Unsicherheiten bei Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzbauwerken in Mecklenburg-Vorpommern ermittelt und bei der Bemessung berücksichtigt werden. Untersuchungen zu diesem Thema werden u. a. im KFKI- Forschungsvorhaben HoRisk – B durchgeführt. Abschließende Ergebnisse des Forschungsvorhabens HoRisk – B lagen bei Festlegung der Verfahren für Entwurf, Bemessung und Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in Mecklenburg-Vorpommern im Jahr 2012 noch nicht vor.

## 5 Schriftenverzeichnis

- DIETRICH, R. und LIEBSCH, G.: Zur Variabilität des Meeresspiegels an der Küste Mecklenburg-Vorpommers, Zeitschrift für geologische Wissenschaften 28, 2000.
- FRÖHLE, P.; SCHLAMKOW, C.; HORLACHER, H.-B.; CARSTENSEN, D. und DRÄGERT, S.: Bemessungsseegang Außenküste Mecklenburg-Vorpommern. Abschlussbericht, Uni Rostock, TU Dresden, 2006.
- HKV, HYDROKONTOR AACHEN: Mesoskalige Schadenspotentialanalyse für Mecklenburg-Vorpommern, 2013.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC, WMO/UNEP: Climate Change 2007, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, 2007 (AR4).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC, WMO/UNEP: Climate Change 2013, The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC, 2013.
- JENSEN, J. and MUDERSBACH, C.: Analyses of variations in water level time series at the southern baltic sea coastline, coastline reports 2, 2004.
- MINISTERIUM FÜR BAU, LANDESENTWICKLUNG UND UMWELT M-V: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern, 1995.
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ M-V: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtsheft – Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick, 2009.  
<http://www.stalu-mv.de/mm/Themen/K%C3%BCstenschutz/>
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ M-V: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Hydrodynamische Eingangsparameter für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsprüfung von Küstenschutzanlagen in M-V, 2012.  
<http://www.stalu-mv.de/mm/Themen/K%C3%BCstenschutz/>
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ M-V: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Bemessungshochwasserstand und Referenzhochwasserstand, 2012.  
<http://www.stalu-mv.de/mm/Themen/K%C3%BCstenschutz/>
- MINISTERIUM FÜR ENERGIEWENDE, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME S-H (MELUR-SH): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein, Fortschreibung 2012, 2013.
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG-HARBURG: HoRisk – B Belastungen von Küstenschutzanlagen und Konsequenzen des Versagens im Bereich der Ostseeküste, KFKI-Abschlussbericht, 2014.