



# Verfahren zur Fortschreibung von Sturmflutbemessungswasserständen

Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Nr. 13/2012



LSBG  
Landesbetrieb Straßen,  
Brücken und Gewässer  
Hamburg



Hamburg



# Verfahren zur Fortschreibung von Sturmflutbemessungswasserständen

Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Nr. 13/2012



LSBG  
Landesbetrieb Straßen,  
Brücken und Gewässer  
Hamburg



Hamburg

## VORWORT



Die Ermittlung von Sturmflutbemessungswasserständen und der Sturmflutschutz selbst basierten bis zur Sturmflutkatastrophe 1962 ausschließlich auf Erfahrungswissen. Hochwasserschutzanlagen wurden ausge-

hend von gemessenen Sturmflutwasserständen und entsprechenden Sicherheitszuschlägen bemessen. Heute ist es möglich, die sich unterschiedlich überlagernden Ursachen von hohen Sturmflutwasserständen zu untersuchen und getrennt voneinander zu prognostizieren. Es ist eine Vielzahl von Verfahren zur Sturmflutbemessung entwickelt worden.

Die vorliegende Kurzbeschreibung der Verfahren gibt einen vollständigen Überblick und fasst alle Methoden für die Ermittlung von Sturmflutbemessungswasserständen mit Vor- und Nachteilen zusammen. Ein Verfahren für sich allein bietet weder vollständige Sicherheit gegen Sturmflutgefahren noch kann es alle physikalischen, technischen und finanziellen Randbedingungen oder Hintergründe erfassen.

Der Sturmflutschutz ist eine gesellschaftliche Aufgabe, deren Finanzierung sogar im Grundgesetz verankert ist. Die Küstenbewohner werden nicht allein gelassen. Hamburg beschreitet im Hochwasserschutz einen konsequent sicheren Weg. Die vorliegende Fachschrift zeigt, dass die hierzu getroffenen Entscheidungen mit weitreichenden Auswirkungen auf die Sicherheit der Stadt fachlich sorgfältig und fundiert bearbeitet wurden und werden.



Hans-Jochen Hinz

Geschäftsführer  
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer  
Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation  
Freie und Hansestadt Hamburg

## EINLEITUNG

Sehr geehrte Damen und Herren,  
liebe Leserinnen und Leser!

Obwohl der Schutz vor Sturmfluten seit Jahrhunderten eine generationenübergreifende Daueraufgabe ist, ist die Sturmflutforschung eine verhältnismäßig junge Fachdisziplin. Das Forschungsgebiet wird von einem überschaubaren Kreis von Fachleuten bearbeitet. Insbesondere für die Bemessung von Schutzbauwerken wurden in der jüngsten Vergangenheit verschiedene Verfahren weiterentwickelt. Wegen der länderspezifischen Verantwortlichkeiten im Sturmflutschutz sind übersichtliche Zusammenfassungen bisher jedoch ausgeblieben.

Die Zusammenstellung in dieser Fachschrift vermittelt eine Übersicht über die unterschiedlichsten Verfahren und listet die Ansätze in den Küstenländern Niederlande, Belgien, Vereinigtes Königreich und Dänemark vergleichend auf. Die Verfahren sind verschieden. Im Ergebnis führt dies zu unterschiedlichen Bauwerkshöhen der Küsten- und Hochwasserschutzanlagen. Sofern ein identisches oder vergleichbares Risiko in den jeweiligen Regionen vorliegt, kann ein solches Ergebnis daher nicht zufriedenstellen.

Hamburg hat mit der Festlegung eines neuen Bemessungswasserstandes 2012 konsequent alle bekannten Verfahren ausgewertet. Mit einem Multimethodenansatz lässt sich ein Sturmflutbemessungswasserstand fundiert ermitteln, der nachhaltig begründbar ist und lediglich ein begrenztes Restrisiko zulässt.



Dr.-Ing. Olaf Müller

Geschäftsbereichsleitung  
Gewässer und Hochwasserschutz  
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer  
Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation  
Freie und Hansestadt Hamburg

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>1. Veranlassung</b>	<b>5</b>
<b>2. Bemessungsverfahren</b>	<b>6</b>
2.1 Deterministische Verfahren und Modelle	7
2.2 Stochastische Verfahren	16
<b>3. Internationale Anwendung von Bemessungsverfahren</b>	<b>27</b>
<b>4. Der Multiverfahrensprozess</b>	<b>28</b>
<b>5. Ergebnisse des Multiverfahrensprozesses</b>	<b>30</b>
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>31</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>32</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>33</b>
<b>Impressum</b>	<b>35</b>

# 1. VERANLASSUNG

Die Freie und Hansestadt Hamburg liegt im Tidegebiet der Elbe und ist deshalb der Gefahr durch Sturmfluten in der Nordsee ausgesetzt. Um den Schutz der Bevölkerung vor Überschwemmungen entlang der Tideelbe zu gewährleisten, hält die Stadt Hamburg eine Vielzahl von Flutschutzbauwerken (Hochwasserschutzanlagen) zwischen Cranz und Altengamme vor.

Die Höhen dieser Bauwerke werden maßgeblich durch die Bemessungswasserstände infolge einer Sturmflut und den lokal zu erwartenden Seegang bestimmt. Sturmflut- und Hochwasserschutz sind generationenübergreifende Daueraufgaben. Regelmäßige Überprüfungen erfolgen alle 10 Jahre. Bei entsprechendem Bedarf gilt es jedoch darüber hinaus, die Gültigkeit der angesetzten Randbedingungen wie auch das verwendete Verfahren zusätzlich zu analysieren. Hierbei kommen neueste wissenschaftliche Erkenntnisse zur Anwendung.

Die Bemessungswasserstände für die Tideelbe wurden seit ihrer erstmaligen Veröffentlichung am 10.05.1991 im Amtlichen Anzeiger zweimal (1996 und 2007) durch eine Arbeitsgruppe von Fachleuten aus den Ländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg überprüft. In ihrem letzten Abschlussbericht kommt die Arbeitsgruppe u.a. zu dem Ergebnis, dass das Verfahren aufgrund der zwischenzeitlich vorliegenden Erkenntnisse fortzuschreiben ist (Gönnert et al., 2007).

Die Untersuchungen zur Neubemessung wurden im Rahmen regelmäßiger Werkstattgespräche zwischen verschiedenen Aufgabenträgern in der Freien und Hansestadt Hamburg diskutiert. Die vorliegende Fachschrift stellt die derzeit gültigen Verfahren prägnant vor, fasst die Ergebnisse der Werkstattgespräche zu den Verfahren zusammen und veranschaulicht die Bandbreite der berechneten Ergebnisse.

## 2. BEMESSUNGSVERFAHREN

Als Ausgangswert zur Bestimmung der Sturmflutbemessungswasserstände (BHWSturmflut) in Hamburg wird der Pegel Cuxhaven herangezogen, da er Wasserstände weitgehend unbeeinflusst von menschlichen Veränderungen registriert. Für diesen Pegel liegt eine homogene Wasserstandszeitreihe vor, die bis ins Jahr 1901 zurückreicht; Einzelereignisse sind bis 1788 erfasst.

Sturmflutbemessungswasserstände für Hochwasserschutzanlagen ergeben sich aus dem höchsten Wasserstand, der für einen vorgegebenen Zeitraum zu erwarten ist. Er ist der entscheidende Wert für die Sollhöhe bzw. für Abmessungen von Hochwasserschutzanlagen. In Ästuaren

wird zu diesem Wert die Wasserspiegelerhöhung infolge des Oberwasserzuflusses berücksichtigt, die von Blankenese (7 cm/1000 m<sup>3</sup>/s) bis Altengamme (25 cm/1000 m<sup>3</sup>/s) ansteigt. Um die Klimaänderung zu berücksichtigen, erfolgt ein Zuschlag für die zukünftige Meeresspiegelentwicklung innerhalb eines definierten Zeitraumes. Für die Sollhöhenermittlung (abschließende Höhe) der Hochwasserschutzanlagen wird zudem der örtliche Wellenauflauf berücksichtigt (Freibord).

Bemessungsverfahren für Sturmflutwasserstände werden in deterministische Verfahren bzw. Modelle und stochastische Verfahren gegliedert (Abb. 2-1).

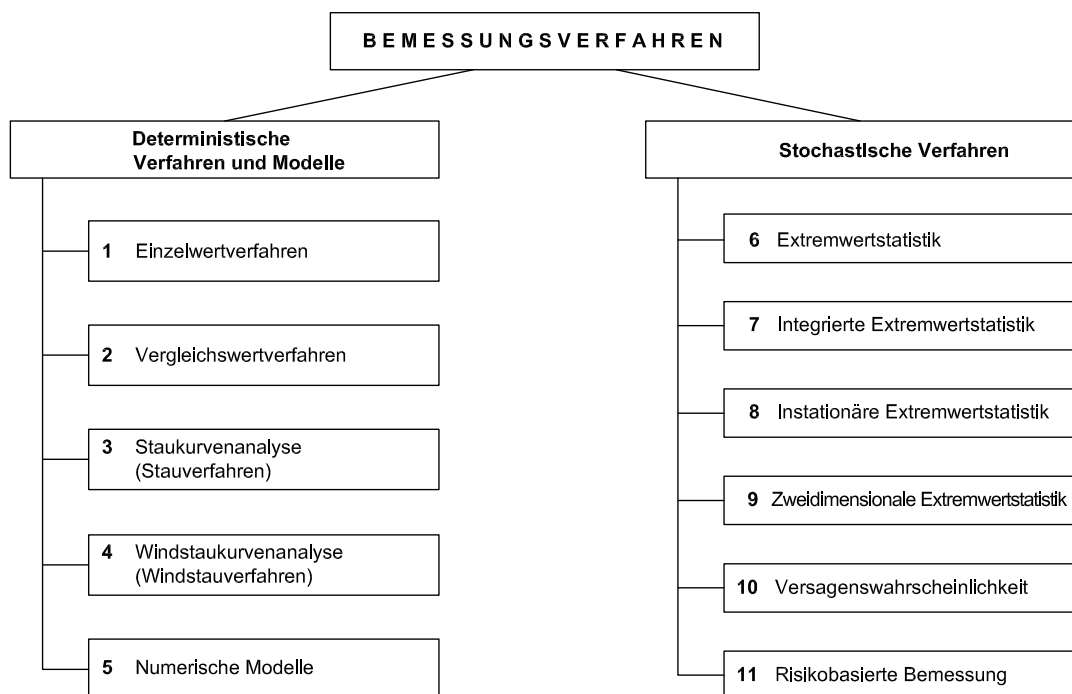


Abb. 2-1: Bemessungsverfahren



Deterministische Verfahren und Modelle beschreiben die Ursache-Wirkungs-Beziehung einer Sturmflut mithilfe von ungünstigen Einzelwerten oder geeigneten Algorithmen (numerische Modelle). Stochastische Verfahren berechnen unter Berücksichtigung des Zeit- und Zufallseinflusses Sturmflutbemessungswasserstände mittels statistischer Ansätze.

Wegen der Bedeutung des Sturmflutschutzes für Menschen und Sachwerte als generationenübergreifende Daueraufgabe werden die Verfahren einzeln und kombiniert belastbar ausgewertet (Multimethodenansatz).

Darüber hinaus gelten für Hamburg besondere Bedingungen. Ein Bemessungsverfahren für Hamburg hat weitere Kriterien zu erfüllen:

- Der berechnete Bemessungswert darf nicht niedriger sein als der eingetretene höchste Windstau über Tidehochwasser Thw (höchstes eingetretenes Tidehochwasser, HHThw).
- Der Sturmflutbemessungswasserstand darf ein definiertes Mindestwiederkehrintervall nicht unterschreiten.
- Der Ausbau von Hochwasserschutzanlagen greift häufig in die Rechtsverhältnisse Dritter ein. Ein Bemessungsverfahren, das transparent erklärbar die physikalischen Eingangsgrößen, Überlagerungen und Wechselwirkungen bei der Entstehung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Tideelbe berücksichtigt, erfährt maximale Anerkennung.
- Die Erkenntnisse und Szenarien zum Klimawandel und Meeresspiegelanstieg und deren Folgewirkungen auf die Sturmflutwasserstände müssen berücksichtigt werden können.

- Die Ergebnisse sind in einem internationalen Vergleich der Küstenschutzstrategien mit anderen europäischen Ländern zu bewerten.
- Der Küstenschutz der Länder Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen an der Tideelbe ist untereinander abzustimmen.
- Den besonderen Anforderungen an den Schutz der Metropole Hamburg vor Sturmfluten ist Rechnung zu tragen.

Die Qualität der Bemessungsverfahren wird begrenzt durch die Homogenität der Daten. Die Berechnung eines Sturmflutbemessungswasserstandes im Ästuar bedarf deshalb der Anwendung eines numerischen Modells (Abb. 2-2).

## 2.1 Deterministische Verfahren und Modelle

Bei den deterministischen Verfahren und Modellen handelt es sich um Verfahren, die bei jeder Neuberechnung einen eindeutigen Wert ermitteln. Deterministische Verfahren überlagern Komponenten (Einzelwerte) einer Sturmflut, wie das mittlere Tidehochwasser MThw, die Windstauhöhe, das Springtidehochwasser SpThw und Fernwellenhöhen (Superpositionsprinzip). Die weiteren Komponenten, wie der statische Luftdruck, zeitliche Änderungen des Luftdrucks, die Wassertemperatur und die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser, sind bisher nicht quantifizierbar und im Windstau enthalten (Abb. 2.1-1). Weiterhin wird eine Landsenkung nicht erfasst.

Numerische Modelle ermitteln insbesondere auf Grundlage von meteorologischen Daten im hydrodynamischen Modell entsprechende Sturmflutwasserstände.

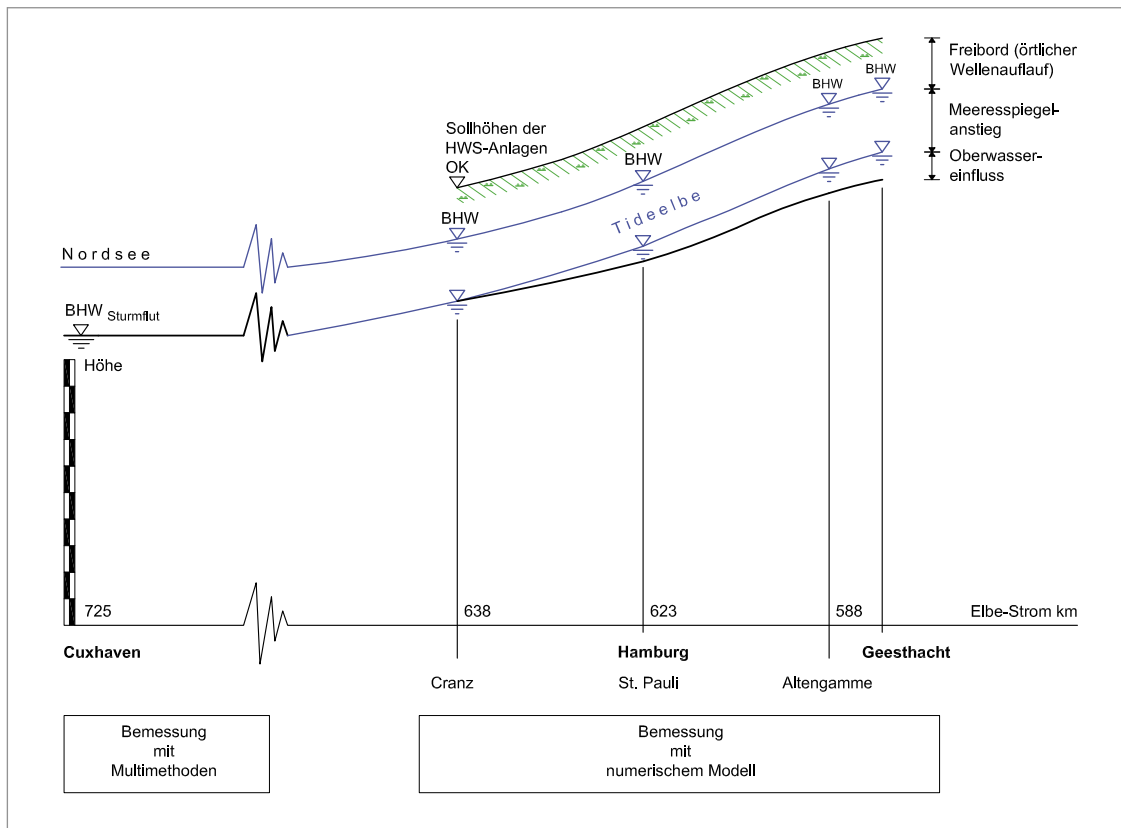


Abb. 2-2: Bemessung in der Tideelbe

Die Vor- und Nachteile lassen sich zusammenfassen:

#### Vorteile

- Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist stets gegeben.
- Als Basis dienen Einzelkomponenten, deren Größen bekannt sind.
- Der höchste Wert eines festgelegten Betrachtungszeitraumes wird berücksichtigt.
- Eine Verwendung von historischen Einzeldaten ist möglich.

#### Nachteile

- In den drei erstgenannten Verfahren (Abb. 2-1) erfolgt keine Differenzierung in Fernwellenhöhe, Astronomie (Springtideeinfluss) und reinen Windstau (siehe Abb. 2.1-1). Eine Fernwelle kann eine Größenordnung von bis zu 60 % des Staus einnehmen und ist demzufolge als relevant einzustufen.
- Es wird nur die Belastungsseite berücksichtigt; es erfolgt im ersten Schritt keine Risikobetrachtung, die den möglichen Schaden mit einbezieht.

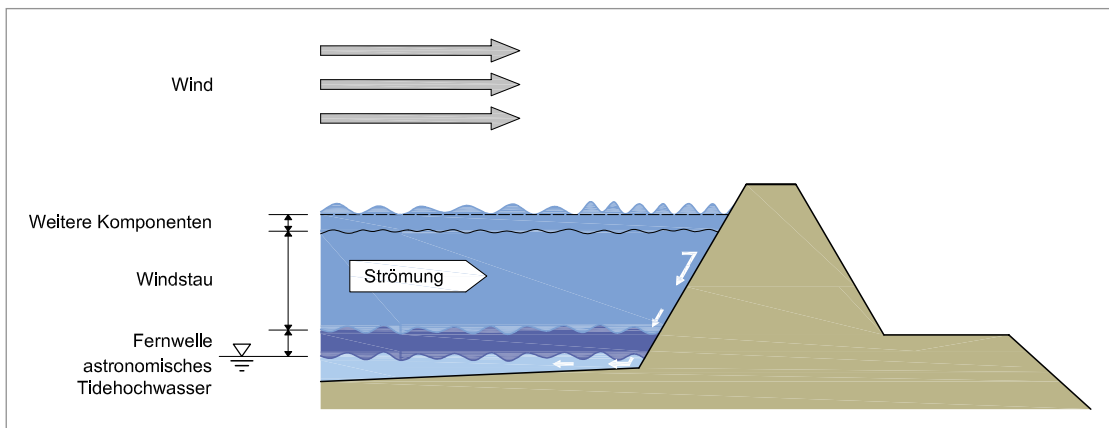


Abb. 2.1-1: Komponenten einer Sturmflut

## Verfahren 1: Einzelwertverfahren

### Beschreibung

Mithilfe des Einzelwertverfahrens wird der Sturmflutbemessungswasserstand aus der Summe bestimmter höchster eingetretener Einzelfaktoren bestimmt (siehe Abb. 2.1-2). Diese sind:

1. Höhe des MThw.
2. Größte Springerhöhung (HSpThw – MThw) in einem gewählten Zeitraum.

Die periodischen täglichen Ungleichheiten der Tide haben ihr Maximum in der Springtide. Diese kann in der Deutschen Bucht Größenordnungen von + 60 cm Höhe oberhalb des mittleren Tidehochwassers erreichen, in Niedersachsen werden 55 cm Höhe angesetzt.

3. Größter Stau (HHThw – MThw)

Der höchste beobachtete Stau beinhaltet alle Faktoren einer Sturmflut, wie beispielsweise

Wind, Fernwelle oder Eigenschwingung der Nordsee. Bei Berechnung des Staus über MThw sind zudem astronomische Anteile (Springerhöhungen) im Stau enthalten.

### Vorteile

- Das Verfahren und die Ergebnisse können jederzeit reproduziert werden.
- Das Verfahren ist leicht verständlich.

### Nachteile

- Der größte Stau wird mittels Auswertung des MThw berechnet. Er enthält astronomische Anteile wie die Springtidenerhöhung. Die Springtidenerhöhung wird bei gesonderter Addition somit doppelt berücksichtigt.
- Die Überlagerung erfolgt linear, was nicht den Bedingungen in der Natur entspricht. Die hydrodynamischen Gesetzmäßigkeiten werden nicht berücksichtigt. Mindestens die Einzelwerte selbst können in ihrem Betrag überschätzt werden.
- Im Stau sind weitere beschreibbare Komponenten einer Sturmflut enthalten. Es ist möglich, dass die Einzelkomponenten höher

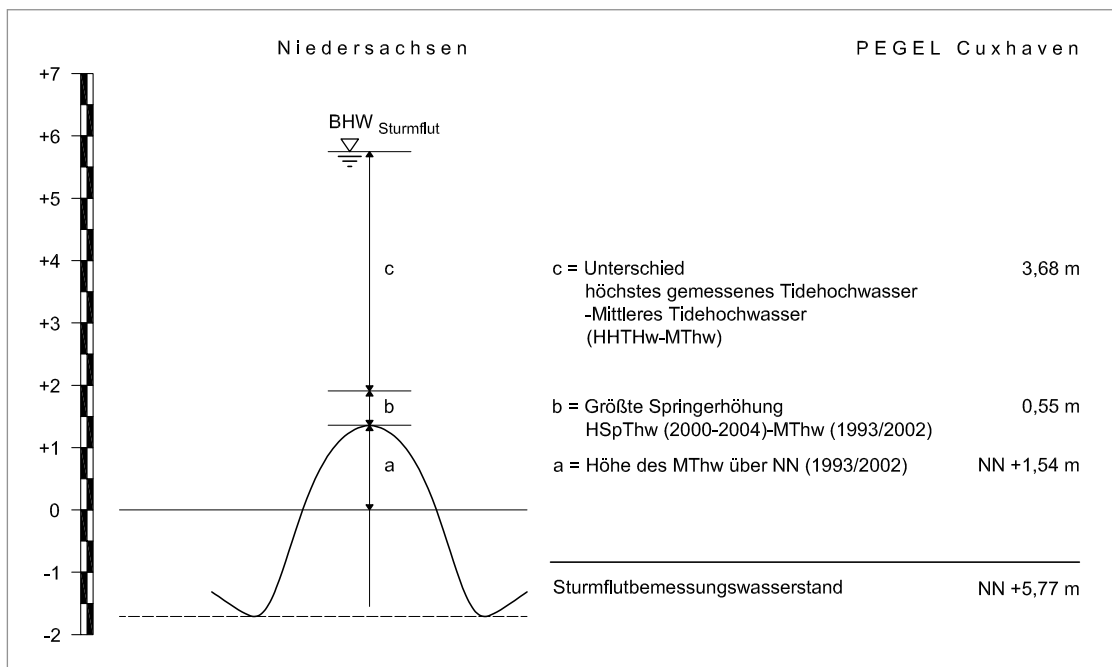


Abb. 2.1-2: Das in Niedersachsen und in der Hansestadt Bremen verwendete Einzelwertverfahren

werden können als in dieser zufälligen Kombination oder aber einzelne Faktoren gar nicht im Stau enthalten sind. Da in dem in Niedersachsen und der Hansestadt Bremen verwendeten Stau keine Fernwelle enthalten ist, wird diese nicht gesondert berücksichtigt.

Ausweisung einer Fernwellenhöhe entspricht es nicht dem Stand von Wissenschaft und Forschung.

**Ergebnis**

Für den Pegel Cuxhaven werden für alle Methoden die jeweiligen Sturmflutbemessungswasserstände ermittelt. Das Ergebnis beträgt:

$$\text{Sturmflutbemessungswasserstand} = \text{NN} + 5,77 \text{ m (ohne Meeresspiegelzuschlag)}$$

**Schlussfolgerung**

Das Verfahren schätzt die Einzelwerte aufgrund der linearen Überlagerung der Sturmflutkomponenten als zu hoch. Wegen der fehlenden

**Verfahren 2:  
Vergleichswertverfahren**

**Beschreibung**

Das Vergleichswertverfahren richtet sich ausschließlich nach dem bisher höchsten aufgetretenen Sturmflutwasserstand. Es entspricht dem Lernen aus Erfahrung, d.h. die Höhe von Schutzanlagen bemisst sich nach den jeweiligen tatsächlichen Ereignissen.

Vergleichswertverfahren am Pegel Cuxhaven	
HHThw (3.01.1976)	NN + 5,10 m
MThw-Anstieg (1976 – 2010)	+ 0,11 m
Sturmflutbemessungswasserstand	NN + 5,21 m

Tabelle 1: Bestimmung des maßgeblichen Sturmflutwasserstandes

### Vorteile

- Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist jederzeit gegeben.
- Die Überlagerung von maximalem Stau bei Thw und MThw entspricht den hydrodynamischen Verhältnissen in der Natur.
- Das Verfahren ist leicht verständlich.

### Nachteile

- Eine Trennung der Komponenten MThw, Windstauhöhe, SpThw und Fernwellenhöhen findet nicht statt.
- Die ausschließliche Anwendung eines empirischen Verfahrens macht Ergebnisse unsicher.

### Ergebnis

*Sturmflutbemessungswasserstand =  
NN + 5,21 m (ohne Meeresspiegelzuschlag)*

### Schlussfolgerung

Das Verfahren entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Forschung. Es ist zur Plausibilitätsprüfung geeignet.

### Verfahren 3:

#### Staukurvenanalyse (deterministisches Stauverfahren)

#### Beschreibung

Das Verfahren der Staukurvenanalyse, oder auch deterministisches Stauverfahren, basiert auf der Berücksichtigung des Verlaufs der Bemessungssturmflut (maßgebliche Sturmdekurve) für die Elbmündung (Pegel Cuxhaven), deren Höchstwert den Sturmflutbemessungswasserstand ergibt (Siefert, 1998; Gönnert et al., 2007).

Die Staukurvenanalyse ist eine Weiterentwicklung des Einzelwertverfahrens (siehe Abb. 2.1-3). Der entscheidende Unterschied liegt darin, dass der höchste Windstau zu allen Tidephasen berücksichtigt wird. Der bei Niedrigwasser aufgetretene maximale Stau wird von Niedrigwasser zu Hochwasser verschoben und dabei um 10 % reduziert. Die Überlagerung des Staus mit dem MThw entspricht physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Die Bemessungssturmflut (siehe Abb. 2.1-3) setzt sich zusammen aus:

- den aktuellen Tideverhältnissen (beschrieben durch die mittlere Tidekurve) ergänzt durch den Säkularzuschlag.
- den meteorologischen Einflüssen, im Wesentlichen dem Stau.

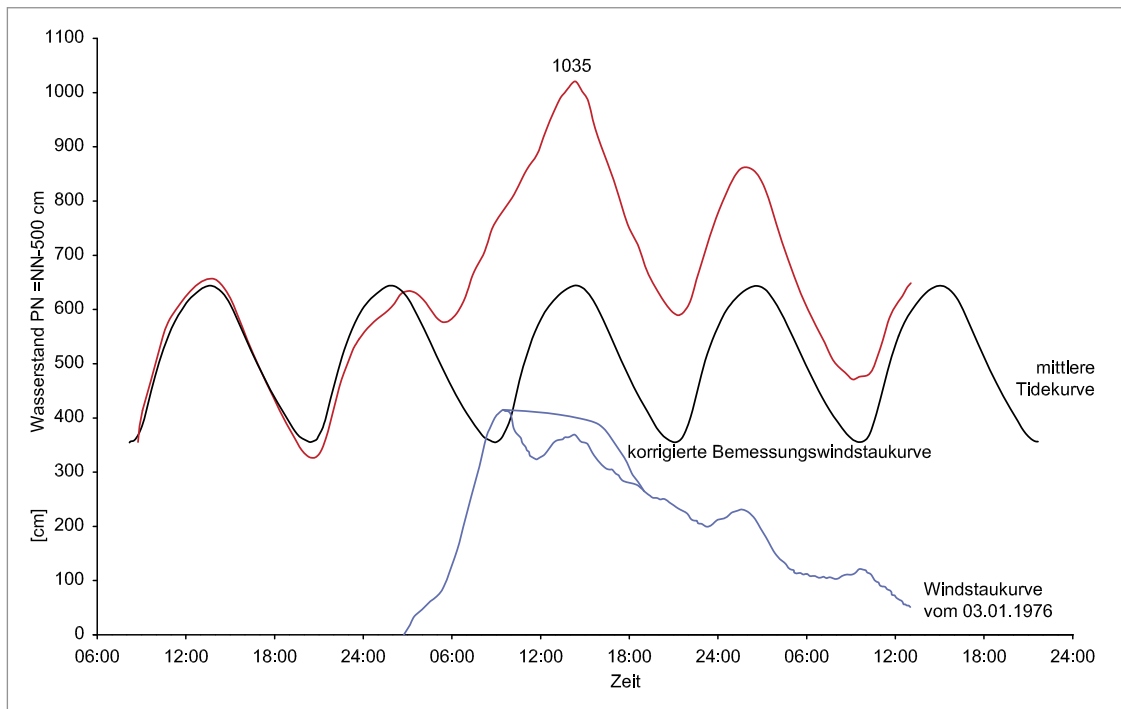


Abb. 2.1-3: Staukurvenanalyse am Pegel Cuxhaven

**Vorteile**

- Die Staukurvenanalyse ist gekennzeichnet durch die Betrachtung der maßgebenden Wasserstandshöhe und den dazugehörigen Sturmflutverlauf. Hierdurch werden die Bedingungen oberhalb des Ausgangspegels Cuxhaven im Ästuar besonders berücksichtigt. Der Verlauf einer Sturmflut ist maßgebend für die Höhenentwicklung in der Elbe von Cuxhaven bis Hamburg.
- Es werden die ungünstigsten Wechselwirkungen zwischen Tide und Stau erfasst.
- Zusätzliche Aussagen über die Verweildauer und den zeitlichen Ablauf der Sturmflut in der Elbe sind möglich.
- Die Analyse des Staus zu allen Tidephasen bildet die natürlichen Windbedingungen ab, die zu einer Sturmflut führen können.

- Das Ergebnis kann jederzeit reproduziert werden.
- Die Überlagerung von maximalem Stau und mittlerer Tide entspricht den hydrodynamischen Verhältnissen in der Natur.
- Die Verwendung von historischen Daten auch bei unvollständigen Zeitreihen ist möglich.

**Nachteile**

- Eine Trennung des stochastischen Effekts vom deterministischen erfolgt über die mittlere Tide nicht sorgfältig.
- Eine Aufgliederung des Staus in seine Einzelkomponenten erfolgt nicht.
- Die astronomische Ungleichheit, ausgedrückt als Springtidenhöhe, wird in ihrer maximalen Ausprägung nicht berücksichtigt.
- Die Fernwellen in ihrer maximalen Auslen-

kung werden nicht im Detail, sondern als zufällige, nicht maximale Komponente berücksichtigt.

### **Ergebnis**

*Sturmflutbemessungswasserstand =  
NN + 5,35 m (ohne Meeresspiegelzuschlag)*

### **Schlussfolgerung**

Die in Hamburg verwendete Staukurvenanalyse bildet die Sturmflutverläufe zuverlässig ab. Dies entspricht physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Die Weiterentwicklung auf Grundlage von neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen ist möglich und erforderlich. Eine statistische Einordnung der Ergebnisse ist anzustreben.

## **Verfahren 4: Windstaukurvenanalyse (deterministisches Windstauverfahren)**

### **Beschreibung**

Die Überprüfung der bis hier aufgezeigten deterministischen Verfahren zeigt, dass diese Vorteile in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und der Verwendung auch von Einzelereignissen älteren Ursprungs haben. Ihre Plausibilität wird durch die Verwendung von beobachteten Daten, also ohne Extrapolation, deutlich.

Ein Nachteil ist, dass die Sturmflut in den bisherigen Verfahren nicht vollständig in ihren Einzelkomponenten und deren hydrodynamischen Wechselwirkungen erfasst wird. Zudem werden beim Einzelwertverfahren die bisher bekannten maximal aufgetretenen Komponenten der Sturmflut linear addiert. Die Fernwelle aus dem

Atlantik findet hierbei keine Berücksichtigung, obwohl sie gesondert zu ermitteln ist.

Weiterhin zeigt sich, dass die Staukurvenanalyse (deterministisches Stauverfahren) die hydrodynamischen Verhältnisse eines Ästuars am besten erfasst, was u.a. mit der Berücksichtigung des Sturmflutverlaufes im Zusammenhang steht. Der heute weiterentwickelte Kenntnisstand bietet die Möglichkeit, das Verfahren zu verbessern und den Windstau stärker in seine Komponenten reiner Windstau, Fernwelle und astronomische Ungleichheit zu zergliedern (siehe Abb. 2.1-4).

Sturmflutwasserstände erreichen an jedem Pegel unterschiedliche Höhen. Dementsprechend sind die Bemessungswasserstände für jeden Standort unterschiedlich. Um eine Vergleichbarkeit zu erreichen, bedarf es ergänzender statistischer Verfahren, die über die Überschreitungswahrscheinlichkeit Angaben zum Sicherheitsniveau des Bemessungswasserstandes ermöglichen.

Die Vorteile der Staukurvenanalyse lassen es sinnvoll erscheinen, bei diesem Verfahren zu verbleiben und es den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen anzupassen. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, empfiehlt es sich, eine Kombination mit statistischen Verfahren vorzusehen.

Die Grundlage des Verfahrens der Windstaukurvenanalyse ist die Aufgliederung der Sturmflut in ihre Komponenten Windstau, periodische Anteile durch die Astronomie (Springtide) und Fernwelle. Bei der Bemessung gilt, dass zunächst

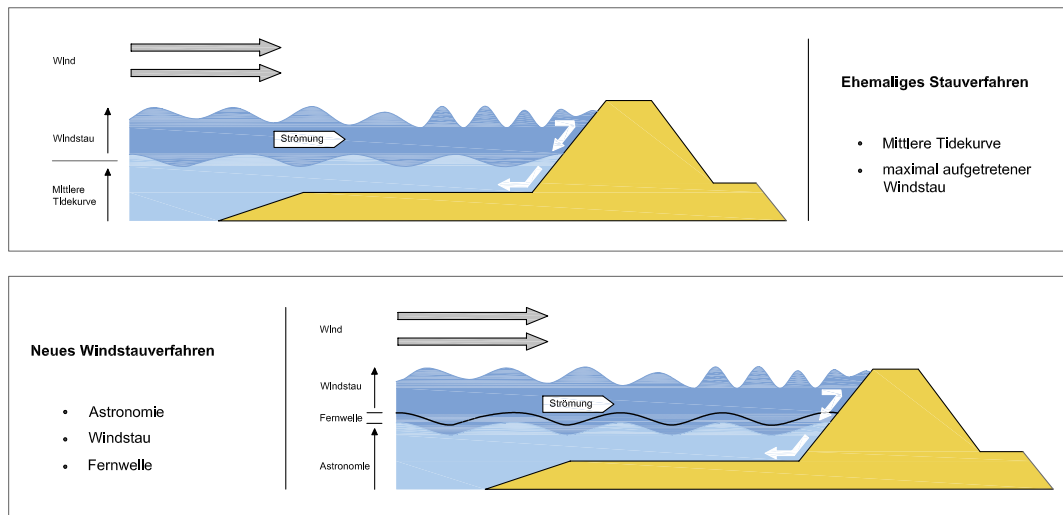


Abb. 2.1-4: Vergleich der Staukurvenanalyse und der Windstaukurvenanalyse

die bislang höchsten aufgetretenen Komponenten berücksichtigt werden müssen. Es werden daher die folgenden Komponenten physikalisch, d.h. nicht-linear überlagert (Abb. 2.1-5):

1. Die aktuellen Tideverhältnisse, abgebildet durch das maximale Springtidehochwasser in Cuxhaven, entsprechend + 60 cm oberhalb des MThw.
2. Die meteorologischen Verhältnisse, beschrieben durch den Windstau (höchster bisher eingetretener Windstau um Thw seit 1788).
3. Eingetretene höchste gemessene Fernwelle in Cuxhaven mit 1,09 m Höhe.
4. Verlauf einer sehr schweren Sturmflut aus einer Zeitreihe seit 1901.

Die genannten Faktoren werden nicht-linear überlagert. Eine umfassende Analyse der nicht-

linearen Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten erfolgt über einen empirischen und einen numerischen Ansatz (Zwei-Methodenkonzept), die in einer abschließenden Bewertung zusammengeführt werden.

#### Vorteile

- Das Verfahren berücksichtigt die hydrodynamischen Interaktionen der einzelnen Faktoren der Bemessungsturmflut sowie deren meteorologische Zusammenhänge.
- Es werden alle zu einer Sturmflut führenden Windereignisse erfasst. So werden auch Ereignisse berücksichtigt, die bei Niedrigwasser auftraten, da diese auch bei Hochwasser auftreten könnten. Es erfolgt die Berücksichtigung der Nichtlinearität bei Verschiebung des Windstaus von Niedrig- zu Hochwasser.
- Die Sturmflut wird in ihre verursachenden Faktoren getrennt, sodass alle bisher eingetretenen Höhen der Einzelkomponenten berücksichtigt werden.



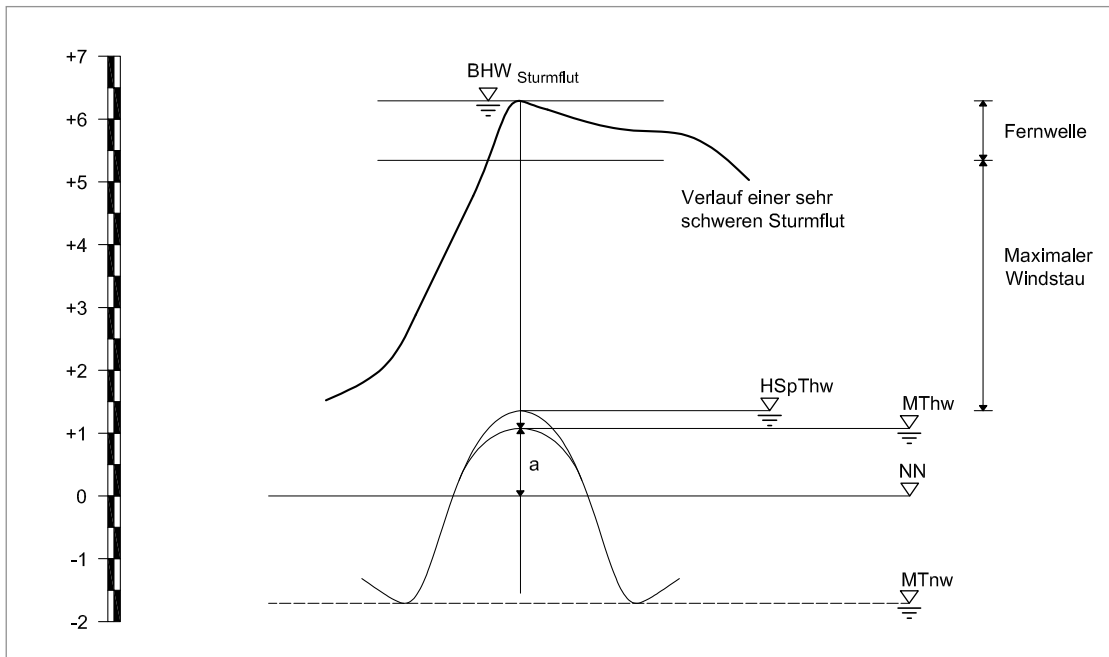


Abb. 2.1-5: Die Bemessungsturmflut unter Berücksichtigung nicht-linearer Effekte (Windstaukurvenanalyse)

- Die Hydrodynamik einer Sturmflut und damit die Verhältnisse im Ästuar werden berücksichtigt (Sturmflutverlauf; nicht-lineare Überlagerung).
- Es werden nur eingetretene Faktoren berücksichtigt. Ihre Überlagerung ist physikalisch plausibel, überdimensionierte Höhen wie bei sehr kleinen Extrapolationen werden vermieden.
- Durch numerische und empirische Vorgehensweise wird das Verfahren zweifach geprüft. Der Vergleich von numerisch-empirischen Methoden stellt die Verlässlichkeit der Ergebnisse sicher.

#### Nachteile

- Methodisch beinhaltet die Windstaukurvenanalyse eine sehr komplexe Vorgehensweise.
- Überlagerung von Maxima kann zu sehr großen Höhen führen, weshalb zur Bewertung eine statistische Einordnung dieses Wertes erfolgen sollte.

#### Ergebnis

*Sturmflutbemessungswasserstand = NN + 6,10 m (ohne Meeresspiegelzuschlag).*

#### Schlussfolgerung

Die Windstaukurvenanalyse berücksichtigt alle bisherigen Erkenntnisse aus der Sturmflutforschung. Sie bildet die Faktoren einer Sturmflut zuverlässig ab und liefert belastbare Ergebnisse für den Sturmflutbemessungswasserstand.

## Verfahren 5: Numerische Modelle

### Beschreibung

Numerische Modelle beschreiben die physikalischen Gesetzmäßigkeiten mittels mathematischer Gleichungen. Verbreitet ist beispielsweise das Modell Delft3D (Delft Hydraulics, 2003). Als Datensätze werden Aufzeichnungen für Wind, Wasserstände und Strömungen eingesetzt.

Arbeitstechnisch sind Gitter- und Modellstrukturen vom Nordost-Atlantik über die Nordsee bis zur Deutschen Bucht zu verfeinern.

### Vorteile

- Das Verfahren entspricht den physikalischen Verhältnissen einer Sturmflut.

### Nachteile

- Die Datensätze müssen lange Zeiträume aufweisen, um absolute Genauigkeit zu erzielen.
- Das Aufstellen und Betreiben von numerischen Modellen ist sehr zeitaufwendig.
- Die Ergebnisse müssen mit anderen Verfahren verifiziert werden.

### Ergebnis

*Sturmflutbemessungswasserstand =  
NN + 6,30 m (ohne Meeresspiegelzuschlag)*

### Schlussfolgerung

Numerische Modelle sind für die Ermittlung von Sturmflutbemessungswasserständen nicht verzichtbar. Eine ausschließliche Anwendung für den Ausgangswasserstand in Cuxhaven ist nicht zuverlässig belastbar.

## 2.2 Stochastische Verfahren

Stochastische Verfahren befassen sich allgemein mit der Analyse von Zufallsprozessen aller Art (Plate, 1993). Die Statistik als Teilgebiet der Stochastik stellt Methoden zur Verfügung.

Der Sturmflutbemessungswasserstand wird beim statistischen Verfahren über die Überschreitung- oder Eintrittswahrscheinlichkeit definiert. Dabei wird der Wasserstand oder der Windstau als Ganzes betrachtet, unabhängig davon, wie groß die Einzelkomponenten sind, aus denen er sich zusammensetzt.

Statistik ist die Gesamtheit der Methoden, mit denen quantitative Daten komprimiert werden, um Gesetzmäßigkeiten und Strukturen sichtbar zu machen. Dabei wird folgende Unterteilung vorgenommen:

1. Deskriptive (empirische) Statistik.  
Phänomene werden untersucht und die Daten werden geordnet.

2. Induktive (analytische, auch: schließende) Statistik.

Aus beobachteten Phänomenen werden beispielsweise Aussagen zu Ereignissen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit (Extrapolation) getroffen. Grundlage hierfür ist die Wahrscheinlichkeitstheorie (Mudersbach, 2009).

### Vorteile

- Mit den Verfahren der schließenden Statistik können Bemessungsparameter mit sehr geringen Überschreitungswahrscheinlichkeiten ermittelt werden, die deutlich höher als bisher eingetretene Ereignisse sein können; dieses

Vorgehen erlaubt theoretisch den Verzicht auf zusätzliche Sicherheitszuschläge.

- Durch die Angabe von Konfidenzbereichen kann die Genauigkeit des Ergebnisses abgeschätzt werden.

### **Nachteile**

- Die Werte variieren bei sehr kleinen Überschreitungshäufigkeiten stark in Abhängigkeit von den gewählten Verteilungsfunktionen. Zusätzlich entstehen weitere Unsicherheiten durch unterschiedliche Methoden zur Parameterschätzung der Verteilungen.
- Bei geringen Überschreitungshäufigkeiten entstehen große Unschärfen; beispielsweise treten bei Überschreitungshäufigkeiten von  $2,5 \cdot 10^{-4}$  für Cuxhaven zwischen den Extremwertverteilungen Unterschiede von deutlich mehr als 1 m auf; für unterschiedliche Datensätze je Verteilung gibt es Abweichungen von deutlich mehr als 0,5 m und Konfidenzintervalle je Verteilung von mehreren Dezimetern.
- Die Sicherheit vor Überschreitung ist nur in Bezug auf berücksichtigte Extreme gegeben (es werden nur extreme Gesamtwasserstände, keine Einzelkomponenten betrachtet).
- Die Verfügbarkeit homogener und stationärer Zeitreihen ist nur eingeschränkt gegeben.
- Die methodisch erforderliche Homogenität bzw. Stationarität der Datensätze wird bei Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs oder veränderter Stau- und Seegangsausbildung noch stärker beeinträchtigt als bisher.
- Die wahrscheinlichkeitstheoretische Bemessung wird zur Absicherung oder zur Herstellung räumlicher Bezüge teilweise durch deterministische Elemente ergänzt (z.B. Niederlande, Belgien).

- Bei sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten kann nicht sichergestellt werden, ob der dazu ermittelte Wasserstand physikalisch möglich ist.

Bei den statistischen Ansätzen sind vom Grundsatz her fünf Verfahren, die wiederum durch unterschiedliche Vorgehensweisen gekennzeichnet sind, zu unterscheiden.

### **Verfahren 6: Extremwertstatistik**

#### **Beschreibung**

Als Datengrundlage dienen Messdaten (z.B. HThw) an einem Pegel. An diese Daten werden Extremwertverteilungen angepasst. Die Extrapolation von Verteilungsfunktionen ermöglicht es, Sturmflutwasserstände mit bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. Jährlichkeiten anzugeben.

Bei den zu verwendenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind sehr viele Möglichkeiten (Extrapolationsfunktionen) vorhanden (z.B. Gumbel (GUM): Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV), Lognormal3 (GNO), Pearson 3 (PE3), Verallgemeinerte Logistische (GLO), Verallgemeinerte Pareto (GPD), Kappa (KAP), Jenkinson (JEN)). Die Auswahl erfolgt auf Basis der geringsten Abweichung von der Grundgesamtheit der Daten.

Das Verfahren wird ausführlich bei Mudersbach (2011) vorgestellt.

### **Vorteile**

- Die Anwendung der Extremwertstatistik ist leicht möglich und liefert schnelle Ergebnisse.
- Eine Vergleichbarkeit mit vorhandenen Ergebnissen ist gegeben.

### **Nachteile**

- Das Verfahren liefert nur bei langen Zeitreihen belastbare Ergebnisse.
- Einzelne Extremereignisse führen zu starken Änderungen der Ergebnisse.
- Die Kollektive ändern sich je nach verwendeter Auswahlmethode und bewirken unterschiedliche Ergebnisse.
- Der Sturmflutverlauf wird nicht berücksichtigt.
- Klimaänderungen können nur bedingt berücksichtigt werden.
- Je länger der Extrapolationszeitraum, desto größer sind die Unsicherheiten der Ergebnisse. Extrapolationen müssen auf das Drei- bis Vierfache der Ausgangszeitreihe beschränkt werden, da sonst die Unsicherheiten zu groß werden.

Im Zuge der Erarbeitung einheitlicher Maßstäbe für die Bemessung von Küstenschutzanlagen untersucht Schuldt (2009) nach diesem Verfahren die Wahrscheinlichkeit bestimmter Wasserstände und die Unsicherheiten, die sich im Zusammenhang mit der Datenauswertung und der Modellbildung ergeben. Die Auswertung erfolgte mittels langjähriger Messungen jeweils anhand der jährlichen Wasserhöchststände (HThw) und der tagesbezogenen Sturmflutereignisse (Schwellenwertdefinition, Höhe über MThw). Im Vergleich ergab die Verwendung der HThw-Daten als Wasserstände bezogen auf 2010 höhere

Werte als die Verwendung der tagesbezogenen Sturmflutdaten:

- Auswertung von HThw-Daten:
  - Lage-, Skalen- und Formparameter wurden mit der Maximum-Likelihood-Methode (MLE) geschätzt.
  - Die Wahrscheinlichkeit wurde über die verallgemeinerte Extremwertverteilung analysiert.
  - Es muss berücksichtigt werden, dass erhebliche Unsicherheiten bei Extrapolationen von seltenen Ereignissen angenommen werden müssen. Dies gilt erst recht für die formale Maximalhöhe, deren Wert  $H_{\infty} = 789$  cm beträgt.
- Auswertung von Schwellenwerten (tagesbezogene Sturmflutdaten):
  - Die Analyse erfolgte auf Grundlage der verallgemeinerten Pareto-Verteilung (GPD).
- Auswertung von Windstaudaten:
  - Die Analyse erfolgte über ausgewählte Extremwertverteilungen, womit Bemessungswindstauereignisse mit bestimmten Jährlichkeiten angegeben werden können.

### **Ergebnis**

In Abhängigkeit der gewählten Verteilungsfunktion und der gewählten Eintrittswahrscheinlichkeit werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt (Tab. 2.2-1).

Die Niederlande wenden zur Berechnung ihres Bemessungswasserstandes ebenfalls ein statistisches Verfahren basierend auf Beobachtungsdaten an, die Wasserstände notieren, die einen

Verteilungsfunktion	Eintrittswahrscheinlichkeit		
	1 : 100	1 : 250	1 : 1000
GEV (BHWSturmflut)	NN + 5,11 m	NN + 5,36 m	NN + 5,69 m
GPD (BHWSturmflut)	NN + 4,85 m	NN + 5,02 m	NN + 5,23 m

Tab. 2.2-1: Sturmflutbemessungswasserstände auf Basis von Beobachtungsdaten (Schuldt, 2009)

Verteilungsfunktion	BHWSturmflut	Eintrittswahrscheinlichkeit
GPD (1985)	NN + 5,35 m	1 : 270
GPD (2012)	NN + 6,10 m	1 : 6700

Tab. 2.2-2: Vergleich der Eintrittswahrscheinlichkeiten nach GPD-Analysen für Bemessungswasserstände am Pegel Cuxhaven (Mudersbach, 2011)

bestimmten Schwellenwert überschreiten. Die Grundlage bildet ein definierter Sicherheitsstandard, dargestellt in einer vorgegebenen Eintrittswahrscheinlichkeit. Das Kollektiv der Daten wird hier zusammengestellt aus Wasserständen, die über einem bestimmten Schwellenwert liegen (Peak-over-Threshold (POT)) (siehe auch Schuldt, 2009).

Mudersbach (2011) berechnet mit der Vorgehensweise der Niederländer einen Schwellenwert von PN + 800 cm am Pegel Cuxhaven. Aus der Extremwertanalyse mittels der allgemeinen Pareto-Verteilung (GPD) ergeben sich die in Tab. 2.2-2 aufgeführten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Bemessungswerte 1985 und den Bemessungswert 2012.

Nach dem in den Niederlanden verwendeten Verfahren weist der Bemessungswasserstand somit eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 : 6700 auf.

### Schlussfolgerung

Die Spannweite der verschiedenen Ergebnisse muss dargestellt werden.

### Auswertung von Windstaudaten

#### Beschreibung

Die erweiterte Extremwertstatistik basiert auf Windstauberechnungen, ermittelt aus Beobachtungsdaten.

Die Datengrundlage bilden Sturmflutverläufe und astronomische Tidedaten. Über die Windstaukurve (Differenz aus Sturmflutwasserstandsverlauf und mittlerem Tidewasserstandsverlauf oder astronomischer Tide) wird der höchste Stau unabhängig von der Tidephase berechnet. Die Windstau maxima werden nach Hoch- und Niedrigwasserereignissen sortiert und getrennt statistisch analysiert.

An diese Daten werden Extremwertverteilungen angepasst, womit Bemessungswindstauergebnisse mit bestimmten Jährlichkeiten angegeben werden können (Jensen und Mudersbach, 2006).

	Eintrittswahrscheinlichkeit				
	1 : 100	1 : 200	1 : 500	1 : 1000	1 : 10 000
Windstau (bei Thw)	346 cm	365 cm	389 cm	407 cm	465 cm

Tab. 2.2-3: Extremwertverteilung auf Basis von Beobachtungsdaten (Windstau) aus dem Zeitraum 1849 -2007 am Pegel Cuxhaven (Mudersbach, 2011)

	Windstau bzw. (BHWSturmflut)	Eintrittswahrscheinlichkeit
GEV (1985)	385 cm (NN + 5,05 m)	1 : 435
GEV (2012)	457 cm (NN + 6,10 m)	1 : 7200

Tab. 2.2-4: Vergleich der Eintrittswahrscheinlichkeiten nach GEV für Bemessungswerte des Windstaus (Mudersbach, 2011).

#### Vorteile

- Bei Verwendung der astronomischen Tidekurve zur Berechnung des Windstaus entsteht mathematisch eine korrekte Trennung des deterministischen und stochastischen Anteils der Sturmflut.
- In der Regel erhält man ein größeres Datenkollektiv, da auch extreme Windstauereignisse bei Tnw berücksichtigt werden.
- Der maximale Windeinfluss auf das Tidegeschehen wird berücksichtigt.
- Das Verfahren wurde wiederholt zur Einordnung der Sturmflutwasserstände an der Elbe angewandt.

#### Nachteile

- Die Zusammenführung von Windstau und Astronomie ist komplex.
- Hohe Anforderungen an die Datenverfügbarkeit und -aufbereitung (z. B. Astronomie-Zeitreihe) erfordern entsprechenden Zeitaufwand.

#### Beispiel:

Die Analyse von Beobachtungsdaten aus dem Zeitraum 1849 – 2007 mit der Allgemeinen Extremwertverteilung ergibt die Werte aus Tabelle 2.2-3.

Mit diesem Verfahren wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit des Bemessungswasserstandes bei der Überprüfung des Bemessungswasserstandes 1985 im Jahr 2007 berechnet. Um den Sicherheitsstandard des Sturmflutbemessungswasserstandes 1985 mit dem Sturmflutbemessungswasserstand 2012 zu vergleichen, wurde die Jährlichkeit des neu ermittelten Wasserstandes nach demselben Verfahren berechnet (Tab. 2.2-4).

#### Ergebnis

Zu den Ergebnissen der Auswertung der Windstaudaten müssen MThw und SpThw addiert werden.

*Sturmflutbemessungswasserstand =  
NN + 6,10 m (ohne Meeresspiegelzuschlag).*

### Schlussfolgerung

Je nach Homogenisierung der Daten und Auswahl der Verteilungsfunktionen variiert die Spannweite der Ergebnisse. Eine sorgfältige Prüfung ist notwendig.

## Verfahren 7: Integrierte Extremwertstatistik

### Beschreibung

Datengrundlage sind gemessene Extremereignisse (z.B. HThw) an einem Pegel und historische Einzelereignisse (vor Beginn der regelmäßigen Aufzeichnung) sowie numerische Modellergebnisse. An diese Daten werden Extremwertverteilungen angepasst, womit Bemessungswasserstände mit bestimmten Jährlichkeiten bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten angegeben werden können.

Das Verfahren der integrierten Extremwertstatistik wurde insbesondere bei den Projekten MUSE (Jensen et al., 2005) und MUSTOK (Mudersbach und Jensen, 2009) angewendet. Die Verwendung historischer Daten erfolgte vorwiegend für die Ostsee (MUSTOK).

### Vorteile

- Es werden mehr Informationen in die Datenreihe integriert und berücksichtigt.
- Physikalische Maximalwasserstände können berücksichtigt werden.

### Nachteile

- Ein erhöhter Rechenaufwand für die Integration der Informationen wird benötigt.
- Historische Ereignisse müssen aufwendig recherchiert werden.
- Numerische Modellergebnisse liegen nicht immer vor.
- Der Sturmflutverlauf wird nicht berücksichtigt.
- Klimaänderungen können nur bedingt berücksichtigt werden.

### Ergebnis

Das Verfahren wurde am Pegel Cuxhaven im Rahmen des Projektes MUSE entwickelt (Abb. 2.2.-1 und Tab. 2.2-5). Als Grundlage der Parameterschätzung der Verteilungsfunktionen wurden hierbei die Methoden der Probability Weighted Moments (PWM) und der Maximum-Likelihood-Estimation (MLE) verwendet. Die Abbildung 2.2-1 zeigt den vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) modellierten extremen Wert von NN+ 6,51 m.

Verteilungsfunktion	BHWSturmflut	Eintrittswahrscheinlichkeit
GEV (PWM)	NN + 6,06 m	1 : 10 000
GPD (MLE)	NN + 6,15 m	1 : 10 000

Tab. 2.2-5: Ergebnis der statistisch-probabilistischen Analyse der HThw-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven unter Integration von modellierten Werten.

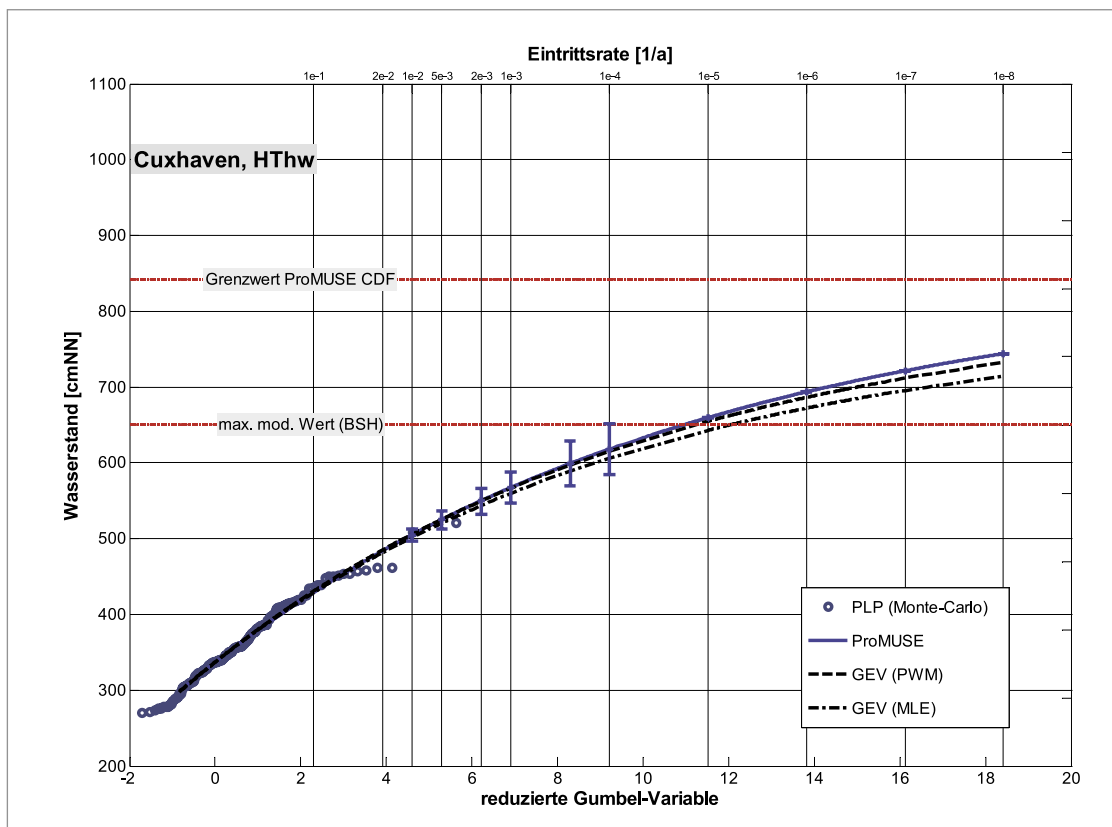


Abb. 2.2-1: Prinzipskizze der integrierten Extremwertverteilung mit beobachteten und modellierten Daten am Beispiel der Cuxhaven (Jensen et al., 2005)

### Schlussfolgerung

Das Verfahren gelangte bisher nur für Forschungsprojekte zur Anwendung.

Als Datengrundlage werden gemessene Extremereignisse (HThw) an einem Pegel benutzt. Die Änderungen von Parametern einer Datenreihe über die Zeit werden berücksichtigt.

### Verfahren 8: Instationäre Extremwertstatistik

#### Beschreibung

Die instationäre Extremwertstatistik integriert im Datensatz säkulare Veränderungen und wurde besonders von Mudersbach (2009) gewürdigt.

#### Vorteile

- Klimaänderungen (Trends) können berücksichtigt werden.
- Das direkte Ablesen des Bemessungswasserstandes, beispielsweise für ein gewähltes Jahr, ist leicht möglich.



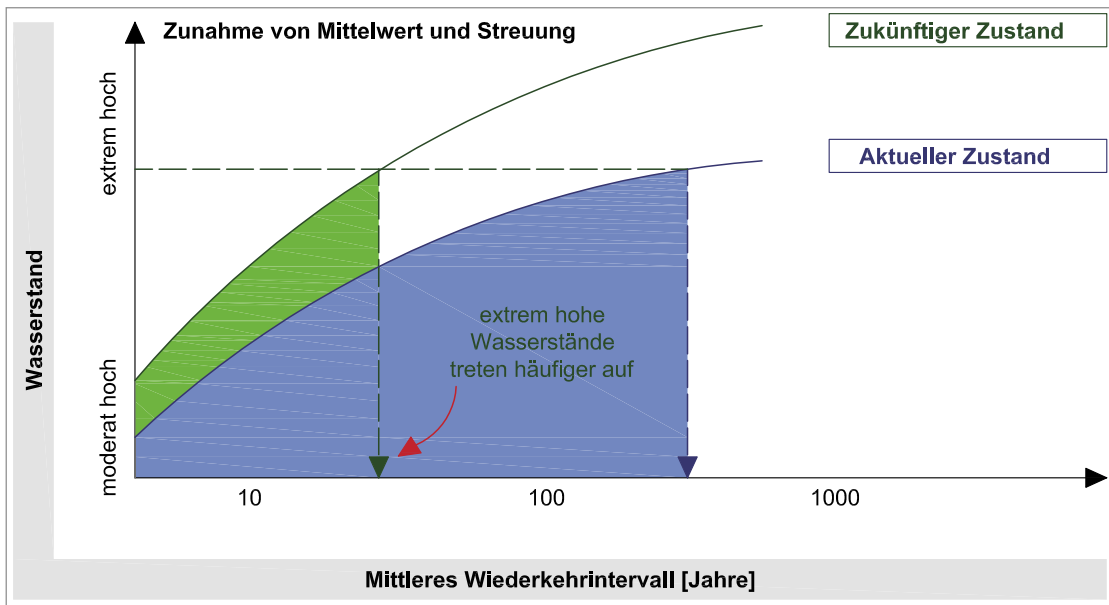


Abb. 2.2-2: Instationäre Extremwertstatistik (Mudersbach , 2009)

### Nachteile

- Der Rechenaufwand ist erhöht.
- Die Bemessungswerte ändern sich in Abhängigkeit vom säkularen Anstieg (Abb. 2.2-2).

### Ergebnis

Willems (2010) hat mithilfe eines modifizierten instationären Verfahrens für den Pegel Cuxhaven für eine vorgegebene Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 : 1000 eine Wasserstandshöhe errechnet:

*Sturmflutbemessungswasserstand = NN + 6,19 m (ohne Meeresspiegelanstieg).*

### Schlussfolgerung

Die Anwendung für die Bemessung ist bisher auf Einzelfälle begrenzt.

### Verfahren 9:

### Zweidimensionale Extremwertstatistik

#### Beschreibung

Als Datengrundlage werden ganze Sturmflutverläufe herangezogen. Aus den Verläufen werden die Parameter Scheitelwasserstand und Fülle/ Intensität der Sturmflutereignisse berechnet.

Die Anwendung der Zweidimensionalen Extremwertstatistik wurde erstmals im Projekt XtremRisk (Wahl et al., 2012) eingesetzt.

#### Vorteile

- Der gesamte Sturmflutverlauf wird berücksichtigt.
- Insbesondere für Risikoanalysen und Überschwemmungssimulationen können die Ergebnisse herangezogen werden.

### Nachteile

- Die Anforderungen an die Datengrundlagen (z.B. vollständige Sturmflutverläufe) sind umfangreich.
- Der Rechenaufwand ist beispielsweise wegen der Berechnung der astronomischen Tidekurven umfangreich.

### Ergebnis

Im Projekt XtremRisk wurden für die dort verwendeten Sturmfluten Jährlichkeiten berechnet. Für einen Sturmflutbemessungswasserstand 2012 = NN + 6,10 m (ohne Meeresspiegelanstieg) und einen Verlauf entsprechend der Sturmflut von 1976 wird eine Jährlichkeit von 1 : 3200 berechnet, siehe Abbildung 2.2-3 (Wahl et al., 2012).

### Schlussfolgerung

Das Verfahren wurde bislang ausschließlich zu Forschungszwecken entwickelt.

### Verfahren 10: Versagenswahrscheinlichkeit

### Beschreibung

Bei diesem Verfahren wird der Versagensfall des Küstenschutzbauwerkes ausgewertet. Unter Versagen des Deiches versteht man zum Beispiel das Überströmen und den möglichen Bruch eines Küstenschutzbauwerkes. Die vielseitigen Ursachen eines Deichversagens sind in Abbildung 2.2-4 zusammengefasst.

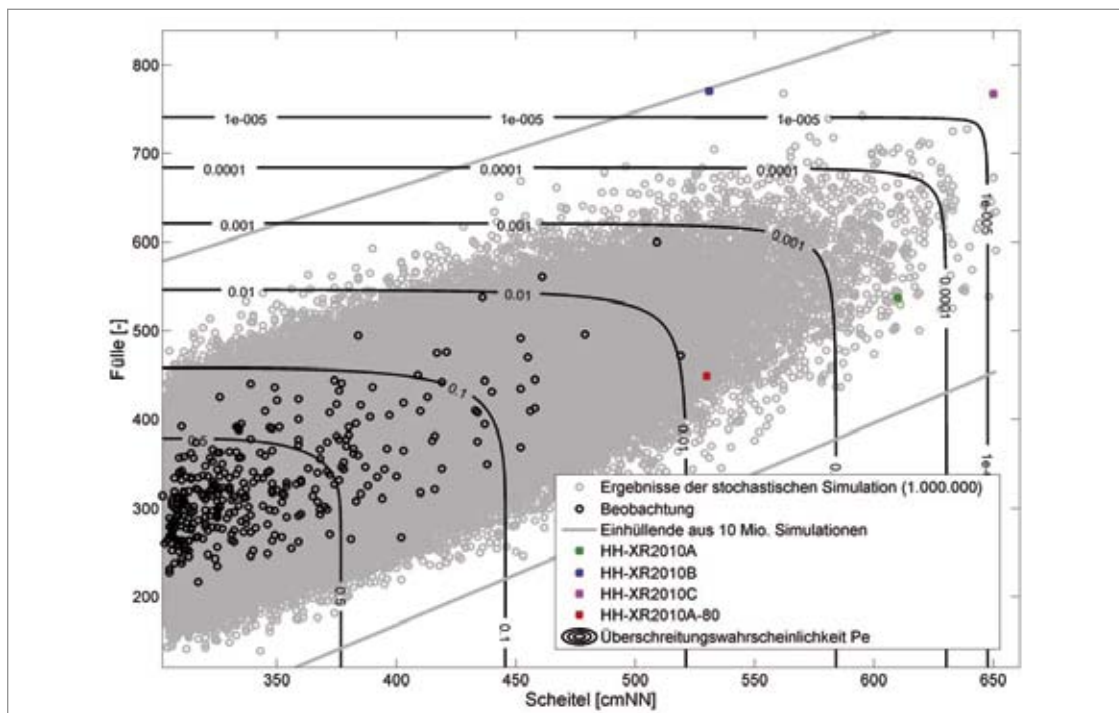


Abb. 2.2-3: Zweidimensionale Extremwertstatistik (Wahl et al., 2012)

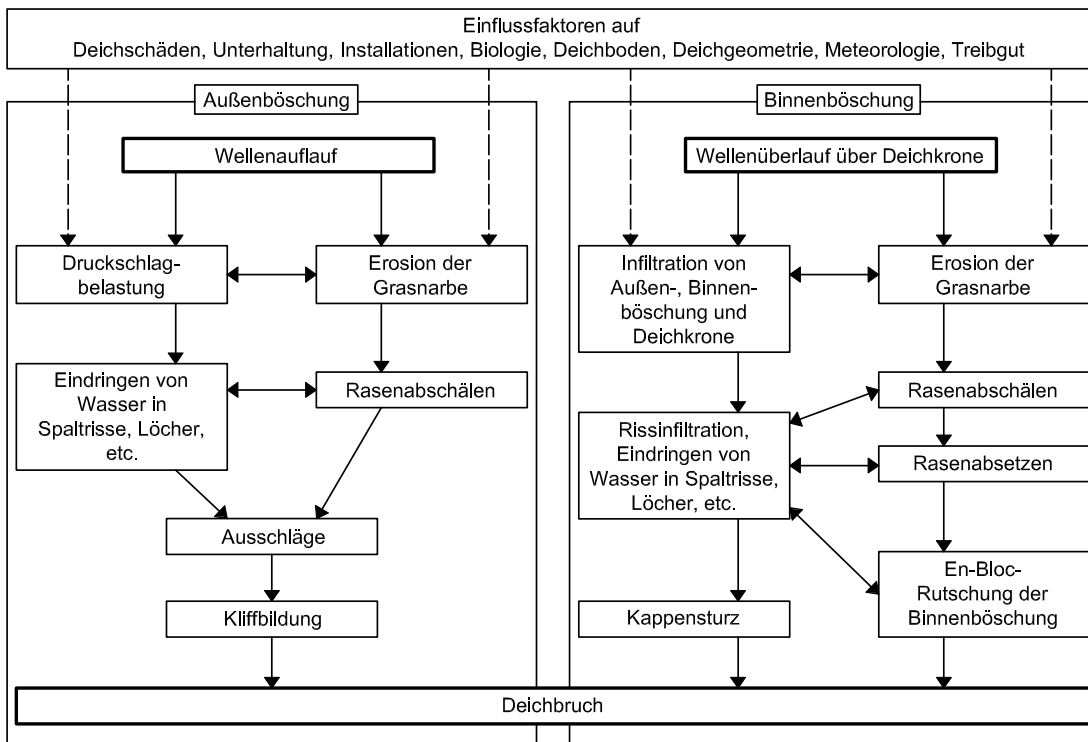


Abb. 2.2-4: Ursachen eines Deichbruches durch Versagensmechanismen auf der Außen- und Binnenböschung von Deichen (Oumeraci und Schüttrumpf, 1997)

Die Verteilung der Eingangsparameter wird in der Regel über eine Normalverteilung beschrieben (siehe Verfahren 6). Zielsetzung ist es, über diese Parameter einen Sicherheitsindex zu ermitteln, der ein Maß für die Zuverlässigkeit eines Bauwerkes unter vorhandener Belastung bietet (Plate, 1993).

Die Belastungs- und Widerstandsparameter werden über eine Dichtefunktion, für die eine Fehlerbaumanalyse notwendig ist, erstellt. Die Erstellung eines Fehlerbaums erfordert eine komplexe Analyse der Versagensmechanismen (Kortenhaus, 2003).

### Schlussfolgerung

Dieser Ansatz der Bemessung ist von Bedeutung, um etwaige Schwachstellen im Vergleich nachweislich zu identifizieren und Prioritäten bei der Umsetzung von Schutzmaßnahmen treffen zu können. Bei einer Verbindung von Bemessungswasserstand und Versagenswahrscheinlichkeit kann die Ausweisung des Sicherheitsstandards optimiert werden.

## **Verfahren 11: Risikobasierte Bemessung**

### **Beschreibung**

Bei einer risikobasierten Bemessung wird im Fall eines Versagens der Küstenschutzbauwerke der mögliche Schaden mit einbezogen und in der Formel

$$\text{Risiko} = \text{Versagenswahrscheinlichkeit} * \text{Folgeschäden}$$

definiert. Bei diesem Verfahren erfolgt die Erfassung der im Überflutungsgebiet möglichen Schäden in Abhängigkeit vom Wasserstand, um sogenannte Schadensfunktionen ermitteln zu können. Die Ausbreitung des Wassers nach einem Versagen und somit der Wasserstand im Gelände wird mithilfe von Überflutungsmodellen untersucht. Ein wichtiger Faktor bei diesem Verfahren ist die Berücksichtigung der Ungenauigkeiten, die durch die Vielzahl an Eingangsparametern sehr umfassend sind.

Zu beachten ist, dass durch eine Überflutung neben den Schäden, die unmittelbar durch die Einwirkung des Wassers entstehen (direkte Schäden) auch weitere (indirekte) Schäden entstehen können, die räumlich oder zeitlich getrennt von der Überflutung auftreten – wie Betriebsunterbrechungen, Verkehrsstörungen etc. ebenso wie psychische Erkrankungen von betroffenen Menschen, Migration etc. Während die Schäden, die monetär zu erfassen sind, als tangible Schäden zu bezeichnen sind, sind Schäden, die nicht direkt monetär zu erfassen sind, den intangiblen Schäden zuzuordnen.

### **Vorteile**

- Das sehr komplexe und umfassende Verfahren erzielt große Genauigkeit in der Bewertung eines Risikos.
- Unterschiedliche Risikogebiete können ausgewiesen werden.

### **Nachteile**

- Der Untersuchungsaufwand ist sehr umfassend.
- Die Vielzahl an Eingangsparametern führt zu einer sehr großen Ungenauigkeitsspanne.
- Die Bemessung erfasst derzeit noch nicht die für eine Sicherheitsentscheidung notwendigen indirekten Folgen, die Erfahrungen der Menschen und die jeweilige gesellschaftlich-emotionale Ausgangssituation.

### **Schlussfolgerung**

Wegen des beträchtlichen Untersuchungsumfanges sind derartige Ansätze bisher wenig verbreitet. Generalisierte Ansätze sind beispielsweise gegeben, wenn zwischen öffentlichem (Schutz von Menschenleben und Sachgütern) und privatem (Schutz nur von Sachgütern) Hochwasserschutz unterschieden wird. Bei einer Verbindung von Bemessungswasserstand und risikobasierter Bemessung kann die Ausweisung des Sicherheitsstandards monetär bewertet werden.

### 3. INTERNATIONALE ANWENDUNG VON BEMESSUNGSVERFAHREN

In den Nordseeanrainerstaaten Niederlande, Belgien, Großbritannien und Dänemark wird unterschiedlich bemessen. Dabei sind auch hier statistische, deterministische und risiko-basierte Verfahren zu unterscheiden. Die Verfahren werden häufig kombiniert und durch numerische Modellierung ergänzt.

In England und Dänemark werden ausschließlich statistische Verfahren herangezogen. Die komplexesten Untersuchungen werden in Belgien und den Niederlanden vorgenommen, wo kombinierte deterministisch-statistische Verfahren verwendet und mit numerischen Modellrechnungen ergänzt werden. In den Niederlanden existiert ein Küstenschutzgesetz, in dem explizite Sicherheitsstandards formuliert werden, wohingegen in Belgien bislang nur für die Schelde konkrete Schutzniveaus definiert wurden. Im Folgenden werden die Verfahren und die gewählten Sicherheitsstandards der Bemessung in den einzelnen Ländern gegenübergestellt (Gönert et al., 2012):

#### Belgien

- kombiniertes statistisch-deterministisches Verfahren (Sturmfluten werden numerisch nachmodelliert)
- Sicherheitsstandard (Schelde):  
1 : 1000 bis 1 : 4000
- Sicherheitsstandard (Flandrische Küste):  
1 : 1000

#### Niederlande

- Statistisch-deterministische Berechnungen
- Sicherheitsstandard: 1 : 10 000 für die Metropolstädte
- Sicherheitsstandard (für zukünftige Bemessung vorgeschlagen): 1 : 100 000 für die Metropolstädte

#### England/ London

- Statistischer Ansatz für London
- in den übrigen von Überflutungen bedrohten Küstenregionen erfolgt die Festlegung von Bemessungswasserständen uneinheitlich
- Sicherheitsstandard für London: 1 : 1000 im Jahre 2030

#### Dänemark

- Statistisches Verfahren für das Küstenschutzkonzept eines 110 km langen Abschnitts entlang der Westküste
- Sicherheitsstandard: 1 : 1000 für die Städte.

#### Schlussfolgerung

Mit keinem Bemessungsverfahren können die potenziellen Folgen einer Sturmflut verhindert werden. Ein Restrisiko bleibt stets erhalten. Über die Größenordnung des Restrisikos kann nur in einem ausgewogenen Multimethodenansatz sicher entschieden werden.

## 4. DER MULTIVERFAHRENSPROZESS

Aufgrund der weitreichenden Folgen, die die Festsetzung von Bemessungswasserständen nach sich zieht, muss möglichst umfassend geprüft werden, welche Verfahren besonders geeignet sind und welche Ergebnisse sie produzieren. Die Darstellung aller Verfahren im Vergleich macht deutlich, dass zur Ermittlung von Sturmflutwasserständen nicht nur ein Verfahren allein herangezogen werden sollte. Die Ergebnisse der einzelnen Verfahren weisen nämlich eine Spannweite von bis zu 1,45 m aus. Aus fachlicher Betrachtung ist ein Bemessungswert zwischen Mindestsicherheit und maximaler Risikominimierung gefordert.

Mithilfe einer Statistik über Beobachtungsdaten lassen sich mit geringem Aufwand stabile Ergebnisse erzielen. Weiterentwickelte statistische Methoden, wie instationäre Verfahren oder die Berücksichtigung der Verläufe, erfordern eine recht aufwendige Aufbereitung der Grunddaten.

Bei der Verwendung statistischer Verfahren wird davon ausgegangen, dass sich die Komponenten einer Sturmflut zufällig überlagern und dies auch bei einer Extrapolation tun. Dabei ist die Größe der Einzelfaktoren nicht bekannt, sodass die Plausibilität ihres Eintretens nicht geklärt ist. Zudem ist nicht bekannt, in welcher Größenordnung die Kombination der einzelnen Komponenten vorkommt und ob sie physikalisch möglich ist. Zu beachten ist, dass bei kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten die Ungenauigkeiten sehr hoch werden. Die zuverlässige Anwendung eines statistischen Verfahrens erfordert eine lange homogene Beobachtungszeitreihe für die betreffenden Pegel. Für den Pegel Cuxhaven liegt eine homogene Zeitreihe von Wasserstandsaufzeichnungen seit 1901 vor.

Über die Statistik sind Extrapolationen möglich, wodurch ein zusätzlicher Sicherheitszuschlag unnötig wird. Nach DVWK (1999) ist eine zuverlässige Extrapolation bis zur drei- bzw. vierfachen Länge des Beobachtungszeitraums möglich. Für Hamburg wäre damit die Berechnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 : 300 bis 1 : 400 möglich.

Für eine Metropolstadt wie Hamburg sind Sturmflutereignisse mit sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Bedeutung. Die Ermittlung dieser sehr seltenen Sturmflutwasserstände ist jedoch mit einer großen Ungenauigkeit verbunden. Es ist daher notwendig, über ein deterministisches Verfahren einen eindeutigen und physikalisch plausiblen Wert zu ermitteln, für den anschließend eine Eintrittswahrscheinlichkeit zur Überprüfung des Sicherheitsstandards bestimmt wird (Multiverfahrensprozess).

Die deterministischen Verfahren haben den Vorteil, dass Ergebnisse reproduzierbar sind und auch Einzelereignisse älteren Ursprungs verwendet werden können. Die bisherigen deterministischen Verfahren erlauben es jedoch nicht, die Sturmflut vollständig in ihre Einzelkomponenten zu zerlegen und die hydrodynamischen Wechselwirkungen zu erfassen. So werden z. B. beim Einzelwertverfahren die bisher bekannten maximal aufgetretenen Komponenten der Sturmflut linear addiert.

Die Staukurvenanalyse bzw. das deterministische Stauverfahren, das für die Ermittlung der Sturmflutbemessungswasserstände in Hamburg 1990 eingeführt wurde, erfasst die hydrody-

namischen Besonderheiten eines Ästuars. Wie in allen bisherigen deterministischen Verfahren sind auch bei diesem Verfahren im Stau weitere Komponenten wie Astronomie und Fernwellen enthalten. Demzufolge werden diese nicht separat und differenziert betrachtet.

Neue und belastbarere Erkenntnisse bietet das Verfahren der Windstaukurvenanalyse, bei dem der Stau in den rein windverursachten Windstau, die astronomischen Einflüsse und die Fernwellenanteile zergliedert wird und die hydrodynamischen nicht-linearen Effekte bei einer Sturmflut berücksichtigt werden. Die Berechnung erfolgt über mathematisch-empirische Verfahren und über numerische Modellierung (Multiverfahrensprozess). Die Windstaukurvenanalyse bietet zudem dem interessierten Bürger Transparenz, um die physikalischen Zusammenhänge einer Sturmflut zu verstehen.

Die Anwendung eines statistischen Verfahrens ist für die Einordnung des Sicherheitsstandards in Hamburg im nationalen und internationalen Vergleich sicherlich von Bedeutung. Als alleiniges Bemessungsverfahren ist ein statistisches Vorgehen für Hamburg allerdings nicht zu empfehlen, da bei der Ermittlung von Wasserständen mit kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten die Unsicherheiten zu groß sind, wenn nur statistische Verfahren angewendet werden.

Die Analyse der internationalen Verfahren zeigt, dass die Ermittlung der Belastung durch statistische und deterministische/numerische Verfahren erfolgt. Hierbei wird deutlich, dass Belgien und die Niederlande mit kombinierten Verfahren den größten Aufwand betreiben. So wird in den

Niederlanden die maßgebliche Sturmfluthöhe ermittelt, indem aus den Zeitreihen von neun „Basis“-Pegeln statistisch Wasserstände mit der als Sicherheitsstandard festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Mithilfe von numerischen Modellen werden für alle Orte Bemessungswasserstände bestimmt. In Belgien wird die Bemessungshöhe festgelegt, indem synthetische Sturmfluten aus Einzelkomponenten zusammengesetzt werden. Numerische Simulationen, die die Bestimmung der Bemessungshöhe an verschiedenen Orten erlauben, werden mit einer statistischen Einordnung der sich ergebenden Wasserstände kombiniert. Dänemark und England dagegen verwenden rein statistische Verfahren.

Die Überprüfung einer Vielzahl von Verfahren und ihre Einordnung in den internationalen Vergleich führt in Hamburg zu der Entscheidung, dass ein Schwerpunkt auf das deterministische Windstauanalyseverfahren gelegt wird. Zur Einordnung des hieraus berechneten Sturmflutbemessungswasserstandes in einen Sicherheitsstandard wird es mit statistischen Verfahren kombiniert. Über die Anwendung einer Vielzahl statistischer Verfahren kann die Spannweite der Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnet werden.

Eine vollständige Einordnung des Sturmflutbemessungswasserstandes setzt den Vergleich mit anderen voraus. So werden zur Analyse des Sicherheitsstandards in Hamburg u. a. internationale Standards von Metropolen ähnlicher Größenordnung verwendet, um eine Einordnung zu erhalten.

## 5. ERGEBNISSE DES MULTIVERFAHRENSPROZESSES

Die Ergebnisse des Sturmflutbemessungswasserstandes am Pegel Cuxhaven betragen zwischen NN + 5,21 m beim Vergleichsverfahren und NN + 6,30 m. Das vorgestellte Windstaukurvenanalyseverfahren berechnet mithilfe des numerischen Modells Delft3D einen Wert von NN + 6,30 m (Mayerle et al., 2010). Bei Anwendung mathematisch-empirischer Verfahren ergibt sich eine Sturmflutbemessungshöhe von NN + 6,10 m.

Für NN + 6,10 m lässt sich mit einem instationären statistischen Verfahren eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 : 1000 (Willems, 2010), bei Anwendung der Extremwertstatistik bis 1 : 7200 (Mudersbach, 2011) ermitteln. Diese Eintrittswahrscheinlichkeit entspricht den Sicherheitsstandards von Metropolen in Europa.

Zum Sturmflutbemessungswasserstand ist der Meeresspiegelanstieg zu addieren. Für den langfristigen Hochwasserschutz sind die Auswirkungen künftiger Klimaveränderungen auf den Meeresspiegelanstieg und das Sturmflutgeschehen (Häufigkeit und Intensität) von großer Bedeutung. Im Rahmen einer Untersuchung wurde die seit dem Jahr 2000 erschienene Literatur zum Thema Meeresspiegelentwicklung aufgrund von Klimaänderung ausgewertet. Es zeigte sich eine Spannweite von -5 bis 115 cm für den erwarteten regionalen Meeresspiegelanstieg an der Nordseeküste bis 2100. Untersuchungen zum möglichen globalen Meeresspiegelanstieg kommen zu noch höheren Werten (Gönnert et al., 2009). Die Szenarien weisen bislang noch große Unsicherheiten auf. Die bisher beobachtete regionale Meeresspiegelentwicklung erreicht nicht die bis 2100 mögliche Größenordnung. So stieg das mittlere Tidehochwasser in Cuxhaven

im Zeitraum 1850 bis 2005 um 25 cm/Jahrhundert (Gönnert et al., 2007).

Der hohe Realisierungsaufwand von Küstenschutzmaßnahmen und die angestrebte lange Nutzungsdauer erfordern die Einbeziehung langfristiger Entwicklungen in die Entscheidungen zum Hochwasserschutz. Die Küstenländer haben sich auf einen Klimazuschlag bis Ende dieses Jahrhunderts von mindestens 50 cm verständigt. Einigkeit besteht darüber, dass die Entwicklung bis Mitte des Jahrhunderts relativ stabil verlaufen wird. Der Bemessungszeitraum sollte also nicht mehr hundert Jahre betragen, sondern auf 2050 begrenzt werden. Der für Hamburg vorgeschlagene Klimazuschlag von 20 cm bis 2050 berücksichtigt denselben Trend wie die Nachbarländer Schleswig-Holstein und Niedersachsen.

Dieser Zeithorizont ist sinnvoll, um umfassende Konzepte für den Umgang mit beschleunigter Klimaänderung entwerfen zu können. Gleichzeitig ist bereits heute ein guter Sicherheitsstandard zu entwickeln, um dauerhaft Vorsorge zu treffen.

Unter Berücksichtigung aller Faktoren und Gegebenheiten erhält man als Ausgangswert NN + 6,30 m in Cuxhaven. Mit diesem Ausgangswert ermitteln sich für Hamburg folgende Bemessungswasserstände:

Ham- burg St. Pauli	NN + 8,10 m	(bisher NN + 7,30 m)
Zollen- speiker	NN + 8,35 m	(bisher NN + 7,70 m)
Alten- gamme	NN + 8,60 m	(bisher NN + 7,80 m)



## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für die Bestimmung von Sturmflutbemessungswasserständen gibt es verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen Ansätzen. Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung liegt in der Darstellung der Ansätze zur Ermittlung der Belastung bzw. Beanspruchung von Hochwasser- und Küstenschutzanlagen. Hierfür stehen deterministische, numerische und stochastische Verfahren bzw. Modelle zur Verfügung. Die einzelnen Verfahren und ihre Ergebnisse für den Pegel Cuxhaven werden dargestellt.

Die Analyse der derzeit bekannten Verfahren zeigt, dass ein kombiniertes Verfahren zu empfehlen ist, das die Bemessungshöhe zunächst deterministisch berechnet und sie dann statistisch einordnet. Die deterministische Bemessung selbst sollte empirisch und numerisch erfolgen.

Die Berechnung von Sturmflutscheitelwasserständen mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit über rein statistische Verfahren führt zu der Angabe eines Wasserstandes mit

einer Streubreite. Das heißt, es lässt sich mit statistischen Verfahren kein eindeutiger Wert ermitteln. Die Bandbreite an Ergebnissen variiert je nach dem gewählten Verfahren.

Mit dem Windstaukurvenanalyseverfahren ergibt sich ein Sturmflutbemessungswasserstand von NN + 6,10 m am Pegel Cuxhaven. Nach dem statistischen Verfahren, das auch für die Einordnung des bisherigen Bemessungswertes verwendet wurde, entspricht dies einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1 : 7200.

Die Anstrengungen im Hochwasserschutz müssen fortgesetzt werden, um das Risiko für Bewohnerinnen und Bewohner in tiefliegenden Gebieten zu reduzieren. Die Daueraufgabe Hochwasserschutz wird flexible Antworten bei der Bestimmung von Sturmflutbemessungswasserständen für die jeweiligen Gegebenheiten erfordern, was nur mit einem übergreifenden Multimethodenansatz bewältigt werden kann.

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahre
BHW	Bemessungshochwasser
BHW <sub>Sturmflut</sub>	Sturmflutbemessungswasserstand
HHThw	höchster bekannter Tidewasserstand
HSpThw	Höchster Springtidehochwasserstand
HThw	höchster Wert des Tidehochwassers eines bestimmten Zeitraums
MThw	mittleres Tidehochwasser eines bestimmten Zeitraumes
NN	Normalnull
T	Zeit
Thw	Tidehochwasser (oberer Scheitel der Tidekurve)
Tnw	Tideniedrigwasser (unterer Scheitel der Tidekurve)

## LITERATURVERZEICHNIS

- Delft Hydraulics, 2003. User manual of Delft3D-Flow: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, S. 497ff.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau), 1999. Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, Heft 215, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Gönnert, G., 2003. Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, Heft 67, Boysens & Co, Heide in Holstein, S. 185-365.
- Gönnert, G., 2012: Internationaler Vergleich der Bemessungsverfahren in Hamburg. Bericht des Landesbetriebes für Straßen, Brücken und Gewässer, Nr. 11.
- Gönnert, G., Niemeyer, H., Probst, H., Buß, T., Schaller, D. und Strotmann, T., 2007. Bemessungssturmflut 2085A an der Elbe, Überprüfung nach 10 Jahren. (unveröffentlicht)
- Gönnert, G., Jensen, J., von Storch, H., Thumm, S., Wahl, T. und Weisse, R., 2009. Der Meeresspiegelanstieg – Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. In: Die Küste, Heft 76.
- Jensen, J., Mudersbach, C., Bork, I., Müller-Navarra, S.H., Koziar, C. und Renner, V., 2005. Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE) – Abschlussbericht zum bmbf-Forschungsvorhaben 03KIS039 (KFKI Fördernummer 78), Universität Siegen, Siegen.
- Jensen, J. und Mudersbach, C., 2006. Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit des maximalen Windstauwertes um Thw am Pegel Cuxhaven im Rahmen der Überprüfung der Bemessungswasserstände 2085 der Tideelbe. (unveröffentlicht)
- Kortenhaus, A., 2003. Probabilistische Methoden für Nordseedeiche, Braunschweig.
- Mayerle, R., Bruss, G. und Osinski, R., 2010. Sensitivitätsstudien zur Physik von Sturmfluten in der Deutschen Bucht. Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Christian-Albrecht-Universität zu Kiel. (unveröffentlicht)
- Mudersbach, C., 2009. Untersuchungen zur Ermittlung von hydrologischen Bemessungsgrößen mit Verfahren der instationären Extremwertstatistik, Siegen.
- Mudersbach, C. und Jensen, J., 2009. Extremwertstatistische Analyse von historischen, beobachteten und modellierten Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste. In: Die Küste, Heft 75, Sonderheft MUSTOK, Boyens Medien GmbH, Heide i. Holstein, S. 131-162.
- Mudersbach, C., 2011. Statistische Extremwertanalysen von Wasserständen und Windstauwerten am Pegel Cuxhaven, wbu consulting Ingenieurgesellschaft mbH. (unveröffentlicht)
- Oumeraci, H. und Schüttrumpf, H., 1997. Hydrodynamische Belastung der Binnenböschung von Seedeichen durch Wellenüberlauf. Zwischenbericht DFG-Projekt (DFG OU ½-1), Nr. 3: Deichschäden an der Binnenböschung von Seedeichen. Braunschweig, 40 S., 4 Anlagen.

Plate, E., 1993. Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure, Ernst & Sohn, Berlin.

Schuldt, M., 2009. Sturmflutstatistik Cuxhaven. (unveröffentlicht)

Siefert, W., 1998. Bemessungswasserstände 2085A entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren (1995/1996). In: Die Küste, Heft 60, Boyesen & Co, Heide.

Wahl, T., Mudersbach, C., Gröschel, M. und Jensen, J., 2010. Entwicklung eines stochastischen Sturmflutgenerators und die multivariate statistische Einordnung der Simulationsergebnisse. Entwurf des Zwischenberichts Teilprojekt 1b zum Forschungsvorhaben XtremRisk des bmbf Förderkennzeichen 03F0483A. (unveröffentlicht)

Wahl, T., Mudersbach, C. und Jensen, J., 2012. Statistical assessment of storm surge scenarios within integrated risk analyses – Results of the XtremRisk project, Proceedings of the 2nd European Conference on FLOODrisk Management, Rotterdam, Niederlande, 2012.

Willems, W., 2010. Ermittlung von statistischen Sturmflutwasserständen an der West- und Ostküste Schleswig-Holsteins sowie für die Pegel Cuxhaven und Wismar. (unveröffentlicht)

# IMPRESSUM

## **Herausgeber und Vertrieb:**

Freie und Hansestadt Hamburg  
Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer  
(LSBG)  
Sachsenfeld 3 – 5  
20097 Hamburg

im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung  
und Umwelt (BSU)/Amt für Umweltschutz

V.i.S.d.P:  
Helga Lemcke-Knoll

Verfasser:  
Olaf Müller und Gabriele Gönnert

Auflage: 200 Stück  
Gedruckt auf 80 % Recyclingpapier

Stand: Dezember 2012

Gestaltung:  
Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung

Titelbild:  
Hochwasserschutzanlage „Am Zollhafen“, 2006  
Urbano López

ISSN 1867-7959 (Print)

## **Anmerkungen zur Verteilung:**

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Senats der Freien und Hansestadt Hamburg herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während des Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Europa-, Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel.

Untersagt ist ebenfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl dem Empfänger diese Schrift zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es jedoch gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung der eigenen Mitglieder zu verwenden.

**Bisher erschienene Berichte:**

- Nr. 1/2009 Hochwasserschutz in Hamburg,  
Baumaßnahmen 2009
- Nr. 2/2009 Sturmfluten zur Bemessung von  
Hochwasserschutzanlagen
- Nr. 3/2009 Hochwasserschutz für die Hambur-  
ger Binnengewässer
- Nr. 4/2009 Hochwasserschutz  
in Hamburg, SchulungsZentrum  
Deichverteidigung 2009
- Nr. 5/2009 Proceedings of the SAWA-Mid-  
term, Conference in Gothenburg
- Nr. 6/2011 Hochwasser an Hamburgs  
Binnengewässern  
am 6. und 7. Februar 2011
- Nr. 7/2011 Hochwasserschutz in Hamburg,  
Anleitung Deichverteidigung
- Nr. 8/2011 Planungswerkstatt Lichtsignal-  
anlagen am 17. 09. 2011 –  
Dokumentation
- Nr. 9/2012 Proceedings of the Flood Risk  
Management Conference –  
North Sea Region. SAWA Final  
Conference, Hamburg,  
17–18 November 2011
- Nr. 10/2012 Sturmflutschutz in Hamburg  
gestern – heute – morgen
- Nr. 11/2012 Internationaler Vergleich  
der Bemessungsverfahren im  
Küstenschutz
- Nr. 12/2012 Ermittlung des Sturmflut-  
bemessungswasserstandes für  
den öffentlichen Hochwasserschutz  
in Hamburg