

# Aktuelle Entwicklungen im Hamburger Küstenschutz

*Jan-Moritz Müller und Gabriele Gönnert*

## Zusammenfassung

Im Jahr 2012 hat der Senat der Freien und Hansestadt Hamburg die Bemessungswasserstände für den Hochwasserschutz in der Stadt angehoben. Grundlage dafür war die Ermittlung der neuen Bemessungswasserstände unter Anwendung des hierfür entwickelten Multimethodenansatzes. Deiche und Hochwasserschutzwände werden aktuell um durchschnittlich 0,80 m erhöht, um in Hamburg langfristig einen sicheren Schutz vor Sturmfluten zu gewährleisten. Vorab sind jedoch umfangreiche Arbeiten zur Ermittlung der neuen Ausbauhöhen des Küstenschutzes in Hamburg nötig.

## Schlagwörter

Hochwasserschutz in Hamburg, hydrodynamische Belastung, mathematische Modellierung, EurOtop, SWAN, Bemessungswasserstände

## Summary

*In 2012 Hamburg's government decided to raise the design water levels of the tidal River Elbe in the Hamburg region by about 0.80 m. As a consequence, the primary flood defences in the city have to be reinforced and heightened during the next years. Prior to implementing the strengthening program for the dikes and sea walls, extensive design work has to be carried out, including assessment of the design water level and wave simulations, resulting in new crest levels for the various coastal flood protection facilities in the city.*

## Keywords

*flood protection in Hamburg, hydrodynamic loads, mathematical modelling, EurOtop, SWAN, design water levels*

## Inhalt

1	Einleitung.....	514
2	Strategien für Hauptdeichlinie & HafenCity.....	514
3	Ermittlung der Bemessungswasserstände nach Multimethodenansatz.....	515
4	Seegangmodellierung.....	517
5	Wellenüberlauf und Deichquerschnitt.....	518
6	Umsetzung der Verstärkungsmaßnahmen.....	519
7	Schriftenverzeichnis.....	519

## 1 Einleitung

Küstenschutzanlagen werden seit Generationen kontinuierlich erhöht und verstärkt. Ursache hierfür sind erhöhte Sturmflutwasserstände bedingt durch Klimaänderung und menschliche Eingriffe sowie erhöhte Sicherheitsstandards aufgrund von größer werdenden Risiken und steigenden Werten in den zu schützenden Küstenregionen.

Der Anstieg des Meeresspiegels bedroht die Küstenregionen und insbesondere die in Ästuaren und Flussdeltas angesiedelten Städte. In städtischen Gebieten verursacht die Erhöhung der Hochwasserschutzanlagen, etwa der Seedeiche, aufgrund des begrenzten Raumes häufig Probleme. Umso wichtiger ist die Finanzierung und Entwicklung ökonomisch sinnvoller und ökologisch verträglicher Lösungen, die einerseits einen sehr hohen Sicherheitsstandard gewährleisten und andererseits die verschiedenen Nutzungsinteressen berücksichtigen.

Die Stadt Hamburg liegt im Mündungsgebiet der Elbe, ca. 110 km von der Nordsee entfernt. Die Region ist damit einem hohen Risiko durch Sturmfluten ausgesetzt. Gleichzeitig muss die Stadt vor dem hohen Abfluss der Binnengewässer geschützt werden. Ohne Hochwasserschutzanlagen wie Deiche und Uferwände wären bis zu 45 % der Fläche des Stadtgebietes aufgrund ihrer geringen Geländehöhen bei Sturmfluten von Überflutungen bedroht. Die Gesamtfläche des von Deichen geschützten tief liegenden Gebiets beträgt in Hamburg 342 km<sup>2</sup>. In diesem Gebiet leben und arbeiten rund 325.000 Menschen.

Der in Hamburg praktizierte Küsten- und Hochwasserschutz lässt sich in drei Bereiche untergliedern: den öffentlichen Hochwasserschutz in Form von Flutschutzwänden und Seedeichen, den privaten Hochwasserschutz, der hauptsächlich als Einzelobjektschutz in der HafenCity umgesetzt wird, und den Hochwasserschutz im Hafengebiet. Die 103 km lange öffentliche Hochwasserschutzlinie Hamburgs umfasst 78 Kilometer Erddeiche, 25 Kilometer Hochwasserschutzwände und 86 Kreuzungsbauwerke wie Siele, Schöpfwerke, Schleusen und Sperrwerke, die innerhalb der Hauptdeichlinie liegen. Da die Wasserstände des Elbe-Ästuars von den Gezeiten in der Nordsee beeinflusst werden, werden die Deiche entlang der Elbe in Hamburg dem Küstenschutz zugerechnet.

## 2 Strategien für Hauptdeichlinie & HafenCity

In den zurückliegenden Jahrzehnten wurden die Hochwasserschutzanlagen in Hamburg mehrfach erhöht. Beim Bau neuer Hochwasserschutzwände wurde in der Vergangenheit in den Gründungselementen eine zusätzliche Sicherheit von 0,80 m für zukünftige Erhöhungen (Ausbaureserve) eingeplant. Mit dieser Strategie können die Planer zukünftig die meisten Bauwerke auf wirtschaftliche Weise erweitern.

In den 1990er Jahren entwickelte die Freie und Hansestadt Hamburg einen Masterplan zum Bau eines neuen Stadtteils mit Wohn- und Geschäftshäusern auf dem Gelände eines nicht länger für den Handel und Umschlag genutzten alten Hafengebietes. Der Masterplan wurde im Jahr 2000 vom Hamburger Senat verabschiedet. Der neu errichtete Stadtteil „HafenCity“ liegt außerhalb der öffentlichen Hochwasserschutzlinie. Die Gebäude in diesem Bereich müssen durch Einzelobjektschutz, etwa durch Hochwasserschutztore, gesichert oder auf künstlich angehobenem, hochwassersicherem Gelände (Warften) gebaut werden. Die Höhe der künstlich aufgeschütteten Warften wird analog

zu den öffentlichen Hochwasserschutzanlagen Hamburgs unter Berücksichtigung des Bemessungswasserstandes und des lokal zu erwartenden Seegangs ermittelt. Dieses Sicherheitskonzept basiert auf einem hohen Maß an Eigenverantwortung der Menschen die dort leben und arbeiten. Das Gebiet der HafenCity ist zweigeteilt. In einem Teil liegt die Speicherstadt mit ihren historischen, Ende des 19. Jahrhunderts erbauten Lagerhäusern. Das Straßenniveau befindet sich hier heute noch auf der Höhe des alten Hafengebietes und liegt damit deutlich unterhalb des derzeit gültigen Bemessungswasserstands. Da das Gebiet somit überflutungsgefährdet ist, müssen die Gebäude jeweils durch geeignete Objektschutzmaßnahmen gesichert werden. Der andere Teil der HafenCity wurde auf künstlich erhöhten Grund so hoch gebaut, dass er auch bei hohen Sturmflutwasserständen nicht überschwemmt wird. Für die hier errichteten Gebäude besteht keine Notwendigkeit zum Objektschutz gegen eindringendes Wasser. Einige dieser neuen Gebäude grenzen an tiefer liegende Flächen an, die individuell geschützt werden müssen. Die höher liegenden Straßen sind durch Brücken mit den Bereichen der Innenstadt verbunden, die sich im Schutz der öffentlichen Hochwasserschutzanlagen befinden, und ermöglichen den Menschen in der HafenCity im Sturmflutfall den Zugang zum sicheren Stadtzentrum Hamburgs.

### **3 Ermittlung der Bemessungswasserstände nach Multimethodenansatz**

Der Bemessungswasserstand ist definiert als der höchste in einer bestimmten Region und für einen bestimmten Zeitraum zu erwartende Wasserstand unter Berücksichtigung von astronomischer Tide, Windstau, Fernwellen, hohen Oberwasserabflüssen und einem steigenden Meeresspiegel. Er wird für die Stadt Hamburg zunächst für den Tidepegel Cuxhaven bestimmt. Die maßgeblichen Werte der Komponenten für Cuxhaven werden mit drei Methoden ermittelt. Dabei werden die höchsten eingetretenen einzelnen Sturmflutkomponenten mit Hilfe eines Mehrmethodenansatzes (bestehend aus deterministischer Überlagerung sowie numerischen und statistischen Methoden) nicht-linear miteinander kombiniert. Im Anschluss wird der Wasserstand von Cuxhaven mithilfe eines hydrodynamisch-numerisches Modell nach Hamburg übertragen. In Hamburg erreichen die Bemessungswasserstände der Elbe Höhen von NHN + 7,90 m bis NHN + 8,60 m (siehe Abb. 1).

Der Klimawandel und seine Folgen wirken sich auf die Sicherheit der Menschen und monetären Werte in Küstenregionen aus. Die Abschätzung der Folgen ist mit Unsicherheiten verbunden. Um dieser Unsicherheitslage zu begegnen, sind neue mehrdimensional ausgerichtete Schutzkonzepte für die Dimensionierung der Küstenschutzvorrichtungen erforderlich.

In der Praxis werden Bemessungswasserstände in Abhängigkeit von den in der spezifischen Region geltenden Sicherheitsstandards festgelegt. Die festgelegten Bemessungswasserstände werden einer Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet, die schließlich mit dem lokal geltenden Sicherheitsstandard verglichen wird. Der Bemessungswasserstand kann auch an den für europäische Metropolregionen berechneten Sicherheitsstandard angepasst werden, wenn dies im Sinne eines möglichst effektiven Küstenschutzkonzepts notwendig ist.

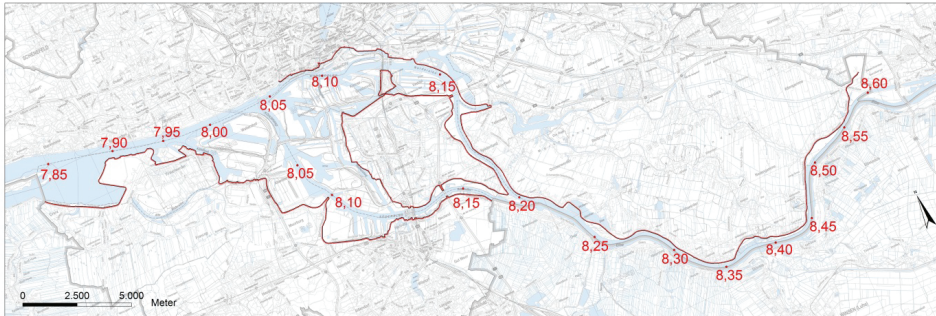


Abbildung 1: Aktuell gültige Bemessungswasserstände (in m NHN) für die Elbe in Hamburg und die Hauptdeichlinie (rote Linie) (LSBG Hamburg).

Der Ansatz zur Festlegung eines neuen Bemessungswasserstands für Hamburg sieht die detaillierte Analyse der höchsten Werte der einzelnen Sturmflutkomponenten Springtide, Fernwelle und Windstau vor. Laut Analyse der Sturmflutkomponenten wurden bis zum heutigen Zeitpunkt noch nie alle Komponenten mit ihrem maximalen Beobachtungswert in einem Sturmflutereignis gleichzeitig beobachtet. Da das vorgegebene Ziel die Berechnung physikalisch plausibler Extremereignisse ist, wurde die hydrologische Plausibilität einer Kombination aller Sturmflutkomponenten untersucht. Das Ergebnis bestätigte die meteorologische und hydrologische Plausibilität eines solchen Ereignisses. Daher wurden die Komponenten mit der höchsten Ausprägung aus den verschiedenen Ereignissen zu einem Extremsturmflutereignis zusammengeführt und unter Berücksichtigung der nicht-linearen Interaktionen mit dem neuen Ansatz berechnet.

Zur Berechnung der nicht-linearen Effekte zwischen den Komponenten wurden alternative Berechnungsmöglichkeiten der Extremereignisse ausgewertet und in einen Multimethodenansatz aufgenommen. Es stellte sich heraus, dass sowohl empirische als auch numerische und statistische Methoden wichtige und aussagekräftige Ergebnisse liefern, diese Methoden jedoch auch spezifischen Beschränkungen unterliegen. Um die Vorteile der einzelnen Methoden zu nutzen und die Beschränkungen und Unsicherheiten so gering wie möglich zu halten, wurden sie in einem Multimethodenansatz zusammengeführt. Kommen mehrere Methoden zu demselben Ergebnis, so wird das Ergebnis als belastbar angesehen. Hält das Ergebnis darüber hinaus dem Vergleich mit dem für das Untersuchungsgebiet relevanten Sicherheitsstandard stand, ist eine Grundlage für die Investition von Millionen von Steuergeldern in Küstenschutzanlagen geschaffen. Zu den besonderen Merkmalen dieses Ansatzes gehört die Untersuchung der maßgeblichen Sturmflutkurve, die eine Berücksichtigung des gesamten Sturmflutverlaufs ermöglicht. Dabei gilt das Prinzip, dass Ergebnisse erst dann als gesichert betrachtet werden können, wenn sie durch mehrere aktuell gültige Methoden belegt sind (GÖNNERT et. al. 2013).

Der sogenannte Klimafaktor ist eine Reserve, die die Einhaltung des Sicherheitsstandards für einen definierten zukünftigen Zeitraum, in der Regel 100 Jahre, gewährleisten soll. Er berücksichtigt vor allem den Meeresspiegelanstieg, der im Allgemeinen als der wichtigste Einflussfaktor für die Charakteristika zukünftiger Sturmfluten angesehen wird. Ergebnisse von unterschiedlichen Forschungsvorhaben zeigen ein großes Spektrum an regionalen Projektionen zum Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100. Diese Projektionen wurden in einer explorativen Studie analysiert und dienen als Referenzstudie für die

Ermittlung der Bemessungswasserstände in Hamburg (GÖNNERT et al. 2010). Die regionalen Szenarien für einen Meeresspiegelanstieg in der Nordsee reichen von wenigen Zentimetern bis hin zu 115 cm. Auf Basis dieser Informationen muss für den Klimafaktor eine plausible Höhe im jeweiligen Untersuchungsgebiet spezifiziert werden, was immer eine technische und gleichzeitig eine bestimmte politische Entscheidung bedeutet.

#### 4 Seegangmodellierung

Der Seegang und die Wellentransformation vor der Hauptdeichlinie in Hamburg wurden unter Anwendung des Seegangmodells der dritten Generation SWAN berechnet (BOOIJ et al. 1999; RIS et al. 1999). Die Simulationen wurden für den Bemessungswasserstand und für verschiedene Windrichtungen durchgeführt, um für alle Abschnitte der Schutzanlagen in Hamburg die kritischen Seegangsbedingungen zu erfassen.

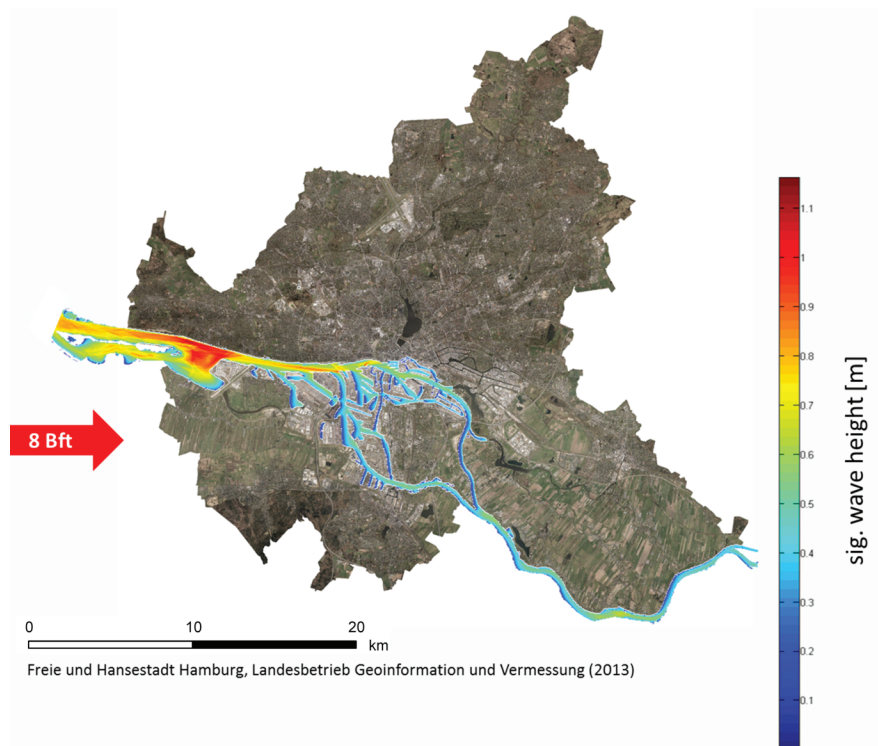


Abbildung 2: Seegangsklima in der Tideelbe in Hamburg bei normalem Tidehochwasser und Westwind.

Da der Bemessungswasserstand als Scheitel des höchsten zu erwartenden Sturmflutverlaufs definiert ist, sind bei der Seegangssimulation keine Strömungen berücksichtigt worden. Es wird von einer Überflutung der tiefer liegenden Gebiete vor der Hauptdeichlinie ausgegangen. Folgende Parameter wurden an mehreren Punkten vor der Flutschutzanlage

aus dem Seegangmodell extrahiert: signifikante Wellenhöhe, mittlere Wellenperiode, Wellenrichtung, richtungsabhängige Ausbreitung und die Wassertiefe. Allen Seegangsrechnungen wurde ein einheitliches Windfeld mit einer konstanten Windgeschwindigkeit von 20 m/s westlich der Elbbrücken und 17 m/s östlich davon und Windrichtungen von 180° N bis 360° N in 10 Grad-Sektoren zugrunde gelegt, da für die extrem hohen Sturmflutwasserstände im Elbe-Ästuar Stürme aus westlicher Richtung maßgeblich verantwortlich sind.

Auf den Kais und Poldern im Hafengebiet werden bei den Seegangssimulationen keine Gebäude berücksichtigt, da angenommen wird, dass sie zur Zeit der Bemessungsflut nicht existieren. Die so erhaltene konservative Schätzung der Seegangsbedingungen gewährleistet die Sicherheit der Schutzwerke unabhängig von möglichen zukünftigen Nutzungen dieser Gebiete. Die Polderwände im Hafengebiet sind als Wände mit einer Höhe von 7,50 m über dem Meeresspiegel schematisiert. Sie werden bei Wasserständen von ca. 8,10 m über dem Meeresspiegel überflutet und wirken im Bemessungsfall im Modell als Unterwasser-Wellenbrecher.

Das Hafengebiet liegt fast größtenteils außerhalb der Hauptdeichlinie Hamburgs und kann bei Extremwasserständen zum Teil überflutet werden.

### 5 Wellenüberlauf und Deichquerschnitt

Der Freibord für die öffentlichen Küstenschutzanlagen in Hamburg wird nach dem EurOtop-Verfahren (EurOtop Overtopping Manual, 2007) berechnet. Diese zusätzliche Höhe der Anlagen über dem Bemessungswasserstand dient der Reduzierung des Wellenüberlaufs auf 0,5 l/m/s. Der Mindestfreibord ist für Deiche auf 0,5 m und für vertikale Flutschutzwände auf 0,3 m festgelegt.

Zur Berechnung des benötigten Freibords wurde das EurOtop-Verfahren in verschiedene Matlab-Skripte überführt, um die Freibordberechnung automatisiert alle 10 m entlang des öffentlichen Flutschutzes in Abhängigkeit von der Ausrichtung des Flutschutzbauwerks, der kritischen Wellenrichtung und der Wellenhöhe durchzuführen. Mit Hilfe dieses Verfahrens wird unterschieden, ob als Konstruktion eine vertikale Betonwand oder ein „grüner“, mit Gras bewachsener Deich vorgesehen ist. Die Ergebnisse werden lagetechnisch nach Deichkilometern erfasst und zusammen mit ihren Koordinaten, den kritischen Seegangsbedingungen, den lokalen Bemessungswasserständen, des Freibords sowie der sich ergebenden Kronenhöhe des jeweiligen Schutzelementes in Tabellen und Längsschnitten aufgenommen. Die ermittelte Kronenhöhe ist die endgültige Höhe des Bauwerkes, die an allen Orten mindestens gewährleistet sein muss.

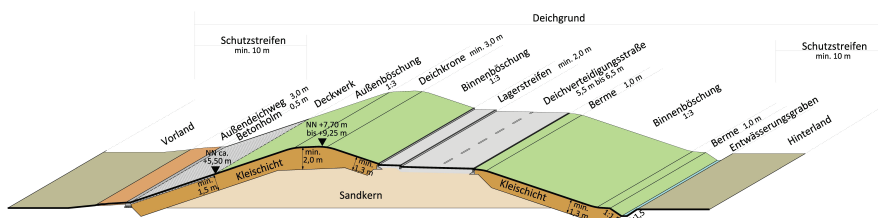


Abbildung 3: Profil eines typischen Deichs in Hamburg.

Abb. 3 zeigt das typische Profil eines Seedeichs in Hamburg. Der Deich ist an beiden Böschungen im Verhältnis 1:3 geneigt und mit Gras bedeckt. Im unteren Teil der Außenböschung schützen Deckwerksteine den Deich vor Schäden durch Eis oder Treibgut. Eisschollen auf der Elbe, die von Tidedrömungen und Wasserstandsänderungen bewegt werden, können einen beträchtlichen Schaden an der Grasnarbe der Deiche verursachen. Zum Deichprofil gehört auch eine asphaltierte Straße landseitig des Dammes, die während eines schweren Sturmflutereignisses den Zugang zu allen Stellen entlang der öffentlichen Schutzvorrichtung gewährleistet.

## 6 Umsetzung der Verstärkungsmaßnahmen

Vor Beginn der Verstärkungsmaßnahmen des öffentlichen Hochwasserschutzes in Hamburg war es notwendig, die Reihenfolge der durchzuführenden Umbauten festzulegen und ein Prioritätenprogramm zu entwickeln. Die verschiedenen Abschnitte des öffentlichen Hochwasserschutzes wurden hinsichtlich der Dringlichkeit von Ertüchtigungsmaßnahmen untersucht und entsprechenden Kriterien zugeordnet. Eines der wichtigsten Kriterien war die Differenz zwischen der derzeitigen Höhe und der neu umzusetzenden Sollhöhe. Ein weiteres Kriterium war der Bedarf an dringlichen Wartungsarbeiten an den Deichen und Hochwasserschutzwänden. Auch die Vulnerabilität der Gebiete hinter den untersuchten Deichabschnitten wurde berücksichtigt. Anhand der Kriterien war es möglich, die verschiedenen Abschnitte der 103 km langen öffentlichen Schutzlinie entsprechend der Priorisierung einer Rangfolge zuzuordnen.

Bevor die Erhöhung der gesamten öffentlichen Schutzanlagen in Hamburg in Angriff genommen wurde, musste die Höhe des Erweiterungsbereichs HafenCity gemäß dem beschriebenen Verfahren berechnet werden. Die Zeit für den Bau aller im Zuge des öffentlichen Flutschutzes in Hamburg neu zu errichtenden Hochwasserschutzanlagen wird auf etwa 20 Jahre geschätzt.

## 7 Schriftenverzeichnis

- BOOIJ, N.; RIS, R. C. and HOLTHUIJSEN, L. H.: A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geophys. Res.* C4, 104,7649-7666, 1999.
- EUROTOP OVERTOPPING MANUAL: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. *Die Küste*, 73, 2007
- GÖNNERT, G.; Jensen, J.; von Storch, H.; Thumm, S.; Wahl, T. und Weisse, R.: Der Meeresspiegelanstieg. Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. *Die Küste*, 76, 2010.
- GÖNNERT, G.; GERKENSMEIER, B.; und MÜLLER, J.-M.: Ermittlung des Sturmflutbemessungswasserstandes für den öffentlichen Hochwasserschutz in Hamburg, Berichte des Landesbetriebes für Straßen, Brücken und Gewässer, Heft 12, 2012.
- Masterplan HafenCity; Freie und Hansestadt Hamburg, Bürgerschafts-Drucksache Nr. 16/3909.

Weitere Informationen finden Sie unter: [www.LSBG.Hamburg.de](http://www.LSBG.Hamburg.de).