

Ermittlung des Bemessungswasserstandes für Hochwasserschutzplanungen am Whitney Museum of American Art, NYC

O. Lojek¹ M.Sc., Dipl.-Ing. K. Krämer¹, Dr.-Ing. A. Stahlmann¹,
Dr.-Ing. N. Goseberg¹, Prof. Dr.-Ing. T. Schlurmann¹,
Dipl.-Ing. F. Hilgenstock², Dr.-Ing. K. Morgen²

¹ Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover

² WTM ENGINEERS INTERNATIONAL GmbH - Beratende Ingenieure im Bauwesen

Hurrikan Sandy überflutete im Oktober 2012 Teile von NYC und generierte ein für die Stadt und Region bislang unbekanntes Schadensausmaß in der Größenordnung von US\$65 Mrd., wovon ca. US\$30 Mrd. versicherte Schäden ausmachten (MunichRe, 2013). Unter die von Hurrikan Sandy betroffenen Einrichtungen fiel auch der Rohbau des neuen Whitney Museum of American Art (WMAA). Im Rahmen einer zuvor weltweit ausgeschriebenen Beratungs- und Wissensstudie wurden neue Bemessungswasserstände (BWS) sowie das Konzept und die Dimensionierung eines objektbezogenen Flutschutzes ermittelt. Hierbei kamen die deterministischen Einzel- und Vergleichswertmethoden sowie die statistische Extremwertanalyse zum Tragen. Zusätzlich wurden Einflüsse durch Hurrikane sowie lokale Windwellen untersucht und dabei vor allem Unsicherheiten und Restrisiken im Bemessungsansatz quantifiziert.

1. Einleitung

Die Flutung des Kellergeschosses des Rohbaus für das neue Whitney Museum of American Art (WMAA) im Meatpacking District, New York, durch Hurrikan Sandy im Oktober 2012 offenbarte unter anderem, welche inhärenten Risiken und Unsicherheiten zum Objektschutz trotz Einhaltung nationaler Flutschutzziele mit deren Umsetzung bei objektorientierten Maßnahmen verbunden sind.

Diese Erfahrung vor allem im Hinblick auf den zukünftigen Betrieb des Museums veranlasste die Geschäftsleitung des WMAA eine weltweite Ausschreibung durchzuführen, in der u.a. Untersuchungen und Konzepte für eine Ermittlung und Definition aktueller und zukünftiger Sturmflutwasserstände angefordert wurde, sowie eine Einstufung zum derzeitigen Flutschutzkonzept sowie daraus abzuleitende konstruktive Empfehlungen zur Ertüchtigung des WMAA-Gebäudes angefordert wurde. Darüber hinaus wurde eine Konzeption und Dimensionierung von permanenten und mobilen Flutschutzsystemen für das Museum erwartet.

Im Unterauftrag der WTM Engineers International führte das Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen in einer ersten Beauftragungsphase eine empirische Studie zur allgemeinen regionalen Sturmflutgefährdung sowie zum gebäudespezifischen Hochwasserrisiko durch, um damit die notwendigen Eingangsgrößen für die Dimensionierung eines permanenten und mobilen Hochwasserschutzsystems bereitzustellen, welches von WTM International entwickelt wurde.

In einer daran anschließenden zweiten Phase soll die Entwicklung von Notfallanweisungen (Standard Operation Procedure, SOP) zum operativen Betrieb eines mobilen Sturmflutschutzsystems und einem "in-house" Frühwarnsystem erarbeitet werden. Für die

finale Projektstudie wurde beabsichtigt, die reale Sturmflutgefährdung sowie das Überflutungsrisiko des WMAA mit Angabe belastbarer Wiederkehrintervalle ausgearbeitet werden. Bislang konzentrierte sich die wissenschaftliche Studie nur auf die erste Phase, so dass dieser empirische Ansatz die Grundlage für die Ertüchtigung des bestehenden Hochwasserschutzkonzeptes bildet.

2. Methodik

Küstenschutzbauwerke werden mithilfe von Bemessungswasserständen (BWS) dimensioniert und errichtet, um Menschen, Infrastruktur und finanzielle Werte in einem Risikogebiet zu schützen. Ein BWS ist auf ein bestimmtes Hochwasserereignis ausgelegt, welches das Schutzbauwerk abwehren soll. Ein Restrisiko, dass dieses gewählte Schutzniveau überschritten wird verbleibt dabei stets. Daher ist die Ermittlung eines BWS immer an politische und soziale Entscheidungsprozesse geknüpft, in denen versucht wird ein akzeptables Restrisiko gegen den Aufwand des Schutzbauwerkes abzuwägen (KFKI, 2002).

Trotz Vorgabe eines Bemessungswasserstandes, welcher in den allg. Baurichtlinien (Building Codes) für Neubauvorhaben in New York City vorgeschrieben ist und auf verbindlichen Angaben der FEMA (Federal Emergency Management Agency, 2013a) mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 100 bzw. 500 Jahren basiert, fehlen rechtlich bindende Vorgaben zur Methodik einer Hochwasserschutzbemessung in den USA. So wurden in einem ersten empirischen Ansatz mehrere in Deutschland gültige Verfahren vergleichend herangezogen. Angewendet wurden die deterministischen Einzel- und Vergleichswertverfahren sowie das statistische Extremwertverfahren, welche vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) in den Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken erarbeitet wurden. Die Verfahren wurden zur Bestimmung des BWS für die Küsten der Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern entwickelt. Die Verfahren unterscheiden sich nur im Detail, basieren jedoch alle auf vergleichbaren Annahmen (KFKI, 2002). Die grundlegenden Bestandteile einer Sturmflut bleiben unabhängig von der Region gleich, wodurch diese Verfahren auch auf andere Küstenregionen der Welt angewendet werden können. Die Verfahren sind jedoch statisch in ihrer Natur und können dynamische Prozesse nicht abbilden, die bei einer Sturmflut auftreten. Als Datenbasis wurden stündliche Messwerte des Pegels 'The Battery' genutzt, die über einen lückenlosen Zeitraum von 90 Jahren vorliegen (NOAA, 2013a). Der verwendete Pegel liegt 4,3 km Luftlinie stromabwärts des untersuchten Standortes am *Hudson River* an der Südspitze Manhattans.

Ermittelt wurden verschiedene BWS sowie deren Bandbreiten in Abhängigkeit ihrer Jährlichkeit. Literaturwerte, sowie offizielle staatliche Angaben zu BWS wurden ebenfalls aufgezeigt, wodurch eine stochastisch bedingte Bandbreite an BWS entstand, die auf unterschiedlichen Methoden beruht.

2.1. Vertikaldatum

Wasserstände sowie Höhenabgaben sind wie auch andernorts auf ein bestimmtes Vertikaldatum bezogen. Ein weit verbreitetes Bezugssystem ist das Mean Sea Level (MSL), welches jedoch mit Position und Zeit variiert, wodurch es nur für bestimmte Regionen und Perioden bestimmt werden kann. Die Architekten und Planer des WMAA beziehen ihre Angaben auf das lokal gültige Manhattan Datum (MD), weshalb BWS-Werte im Folgenden ebenfalls in MD angegeben werden, welches 0,56 m ü. MSL liegt (NOAA, 2014).

2.2. Einzelwertverfahren

Beim Einzelwertverfahren werden vier verschiedene physikalische Komponenten einer Sturmflut linear überlagert, um einen maximalen physikalisch möglichen Sturmflutwasserstand zu ermitteln (KFKI, 2002). Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintretens

der einzelnen Ereignisse bleibt bei diesem Vorgehen bewusst unberücksichtigt. Daher kann diese Methode zu sehr konservativen BWS Werten führen und spiegelt nicht die wahren physikalischen Randbedingungen; zumal in einem Ästuar wider. Die vier Komponenten des Einzelwertverfahrens sind in der nachstehenden Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Sturmflutkomponenten des Einzelwertverfahrens zur Bestimmung von BWS Werten für Küstenschutzbauwerke (KFKI, 2002).

| Komponente | Beschreibung |
|------------|---|
| a | Mittleres Tidehochwasser (MThw) über dem lokalen Bezugslevel (10-Jahres Mittel rückschreitend vom Berechnungsdatum) |
| b | Maximale Springerhöhung, berechnet aus dem Höhenunterschied zwischen dem maximalen, eingetretenen (Winter) Springtide-Hochwasser über dem mittleren Tidehochwasser (MThw). |
| c | Maximaler bisher eingetretener Windstau, berechnet als Höhenunterschied zwischen höchstem eingetretenem Tidehochwasser (HHThw) und dem zugehörigen vorausberechneten astronomischen Tidehochwasser (Thw). |
| d | Sicherheitszuschlag, welcher den säkularen Meeresspiegelanstieg berücksichtigt. (berücksichtigt ortsspezifische Änderungen des MThw über dem Bezugssystem). |

a – mittleres Tidehochwasser (MThw)

Die Komponente a des Einzelwertverfahrens, das MThw, wird für eine bestimmte Position als arithmetisches Mittel der lokalen Hochwasserwerte oberhalb eines Bezugssystems (z.B. NN) innerhalb eines Zeitraums herangezogen. Die *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) definiert den Berechnungszeitraum mit 19 Jahren, um die periodischen Langzeitvariationen der Tide über einen vollen Meton-Zyklus abzudecken (NOAA, 2000). Wasserstände gemessen an Tidepegeln werden in diesen 19 Jahre langen Zeiträumen ausgewertet. Diese Perioden werden als *National Tidal Datum Epoch* (NTDE) festgelegt. Der für die Berechnungen am WMAA relevante NTDE Zeitraum reicht von 1983 bis 2001. Im Gegensatz zu den Definitionen der NOAA fordern die Richtlinien der EAK die Berechnung des MThw als 10-Jahres-Mittel ausgehend vom Berechnungsdatum (KFKI, 2002). Da der zeitliche Unterschied zwischen dem Berechnungszeitraum nach EAK und der aktuell gültigen NTDE bereits einen Anstieg des mittleren Meeresspiegels enthält, fällt ein nach EAK berechnetes MThw geringfügig höher aus als ein auf der letzten NTDE basierendes. Der mittlere Tidehub für den Pegel 'The Battery' liegt bei $a = 1,38$ m, das MThw liegt bei 0,66 m ü. MSL (NOAA, 2014).

b – Maximale Springerhöhung

Die maximale Springerhöhung ist als maximaler Anstieg des Tidehochwassers (Thw) während der Springtide definiert. Die EAK-Richtlinien geben die Berechnung als Höhenunterschied zwischen dem höchsten eingetretenen Springtidehochwasser im Winterhalbjahr (HSpThw) und dem mittleren Tidehochwasser (MThw) vor.

Gemäß Vorgaben der NOAA wird die maximale Springerhöhung als Höhenunterschied zwischen der höchsten astronomischen Tide (engl.: highest astronomical tide, HAT) und dem mittleren Tidehochwasser (MThw) berechnet. Die maximale Springerhöhung an der Pegelstation 'The Battery' beträgt $b = 0,42$ m (NOAA, 2014).

c - Windstau

Der maximale Windstau wird als Höhenunterschied zwischen dem höchstem eingetretenen Tidehochwasser (HHThw) und dem zugehörigen vorausberechneten astronomischen Tidehochwasser (Thw) berechnet. Hierbei gleichen sich die Richtlinien der EAK sowie die Definition der NOAA (KFKI, 2002; NOAA, 2000). Die Komponente c des Einzelwertverfahrens steuert den größten Wert zum ermittelten BWS bei. Der höchste Wasserstand an 'The

Battery' wurde während Hurrikan Sandy im Jahr 2012 gemessen und beträgt $c = 2,84$ m über dem zugehörigen vorausgesagten astronomischen Tidehochwasser (NOAA, 2014).

d – Meeresspiegelanstieg

Für den säkularen Meeresspiegelanstieg wurden Werte aus einer Studie des United States Army Corps of Engineers (USACE) berücksichtigt (USACE, 2011). Die Studie gliedert den Meeresspiegelanstieg in drei unterschiedliche Szenarien und reicht von einer optimistischen Annahme mit 0,5 m, über einen moderaten Anstieg von 1,0 m bis hin zu einem drastischen Anstieg von 1,5 m bis zum Jahr 2100. Im Vergleich zu diesen Werten unterliegen die Pegelraten von 'The Battery' einem Trend von $0,27 \text{ mm a}^{-1} \pm 0,09 \text{ mm}$ (NOAA, 2014). Für die Berechnung der BWS-Werte wurde das optimistische Szenario mit $d = 0,5$ m Meeresspiegelanstieg gewählt.

Diesbezüglich wird kritisch angemerkt, dass Rahmstorf et al. (2012) kürzlich neueste Erkenntnisse zum Meeresspiegelanstieg (SLR) auf Grundlage von Beobachtungen vorlegten. Demnach belegen beobachtete und analysierte Zeitreihen des SLR einen ca. 50% schnelleren Anstieg im letzten Jahrzehnt und werden damit wesentlich pessimistischer als noch auf Grundlage der Studien des IPCC im vierten Sachstandsbericht von 2007 eingestuft. Mit diesen Beobachtungen unter Einbeziehung weiterer Triebkräfte wird ein globaler Meeresspiegelanstieg von ca. 1,4 m in 2100 projiziert. Die Rate des Anstiegs des globalen Meeresspiegels ist streng monoton steigend. Nach Rahmstorf (2012) betrug seit Beginn des 20. Jahrhunderts die Änderungsrate ca. 1 mm a^{-1} und ist in den letzten zwei Dekaden auf 3 mm a^{-1} angewachsen.

2.3. Vergleichswertverfahren

Im Einzelwertverfahren werden vier zeitlich unabhängige Sturmflutkomponenten linear überlagert. Im Gegensatz dazu bezieht das Vergleichswertverfahren das höchste historisch eingetretene Ereignis auf die Gegenwart. Hierbei stützt sich das Verfahren auf den höchsten eingetretenen Tidehochwasserstand (HHThw) und addiert zusätzlich einen Faktor do , der den Anstieg des Tidehochwassers (Thw) bzw. des Mittelwassers (MW) vom Eintrittsdatum bis zum Berechnungsdatum berücksichtigt. Abschließend wird ein Sicherheitszuschlag Δ addiert, welcher den Säkularanstieg vom Bemessungsdatum bis zum Berechnungsdatum plus 100 Jahre sowie örtliche Besonderheiten berücksichtigt (KFKI, 2002).

HHThw – Höchster lokal eingetretener Tidehochwasserstand

Das HHThw ist der größte Anteil des BHW-Wertes, der mit dem Vergleichswertverfahren bestimmt wird. Es bezeichnet den höchsten verifizierten lokal eingetretenen Tidehochwasserstand. Der größte historische Wert am Pegelstandort 'The Battery' wurde während Hurrikan Sandy am 30. Oktober 2012 gemessen und beträgt 3,44 m ü. MSL (NOAA, 2014).

do - Anstieg des Tidehochwassers

Der Faktor do berücksichtigt den Anstieg des Tidehochwassers (Thw) vom Eintrittsdatum bis zum Berechnungsdatum. Da das relevante Ereignis für NYC jedoch Hurrikan Sandy darstellt, ist der Faktor in diesem Fall sehr klein.

Δ - Sicherheitszuschlag

Der Sicherheitszuschlag Δ berücksichtigt den Säkularanstieg vom Bemessungsdatum bis zum Berechnungsdatum plus 100 Jahre sowie örtliche Besonderheiten (KFKI, 2002).

2.4. Extremwertverfahren

Das statistische Extremwertverfahren setzt voraus, dass eine hinreichend große Anzahl sicher gemessener Sturmflutwasserstände für den betreffenden Pegel vorliegt und dass diese Daten für eine Extremwertstatistik geeignet sind. Für die deutschen Nord- und Ostseeküsten wendet nur Schleswig-Holstein ein statistisches Verfahren an (KFKI, 2002). Bei einer

eingehenden Untersuchung der Methode stellte sich heraus, dass BWS-Werte aus Berechnungen mit längeren Zeitreihen (75 Jahre) durchschnittlich 20 Zentimeter niedriger sind, als die mit einer 50-jährigen Zeitreihe ermittelten Ergebnisse (KFKI, 2002). Die Methode erfordert ein Wiederkehrintervall kleiner $n = 0,01$ p.a. . Ferner unterscheidet die Methode zwischen einem Referenzwasserstand für eine 10-jährliche Sicherheitsüberprüfung und dem eigentlichen BWS für die Bemessung von Bauwerken. Das statistische Extremwertverfahren wurde im Rahmen des Projektes auf die einzig vorhandene, stark variierende Sturmflutkomponente angewendet. Dies ist im Einzelwertverfahren der Windstau, der Extremereignisse wie Hurrikane einschließt und somit den größten Einfluss auf den Bemessungswasserstand hat. Hierbei wurden Methoden gemäß internationaler Vorgaben berücksichtigt (KFKI, 2002; USACE, 2002; USACE 2003).

Grundsätzlich basiert die Extremwertstatistik auf gemessenen, eingetretenen Extremereignissen. Mithilfe einer Extrapolation der zugrundeliegenden Verteilungsfunktion können auch Werte für Ereignisse mit bestimmten außerhalb des Messzeitraumes liegenden Wiederkehrintervallen innerhalb eines Konfidenzintervalls berechnet werden

Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Daten eine Gleichwertigkeit aufweisen, homogen und stochastisch unabhängig sowie repräsentativ sind (KFKI, 2002).

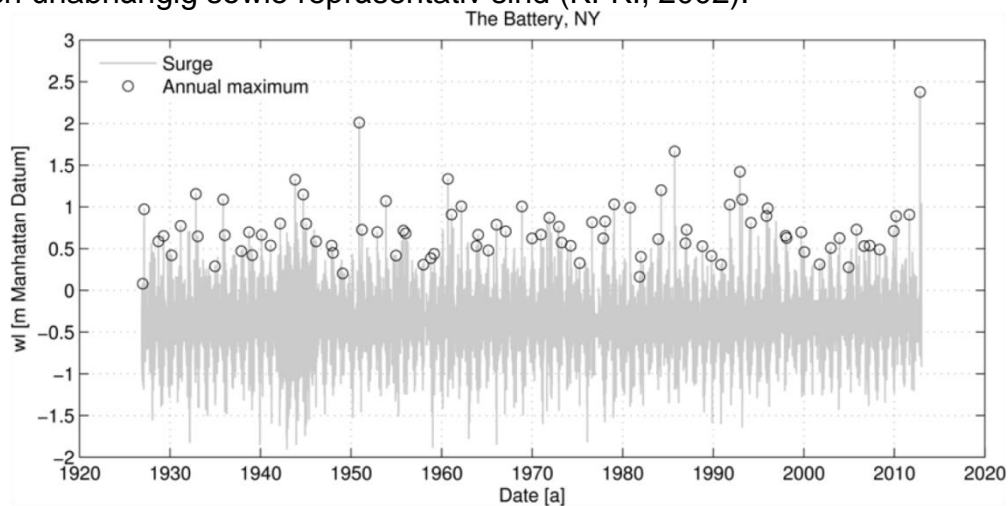


Abbildung 1: Trendbereinigte Zeitreihe aus stündlichen Messwerten der Pegelstation 'The Battery' mit jährlichen Maximalwerten.

Abbildung 1 zeigt die Zeitreihe der stündlichen Messwerte der Station 'The Battery'. Die Daten wurden gemäß dem Meeresspiegeltrend der NOAA trendbereinigt (NOAA, 2014).

Die Stichprobe wurde anhand der Block-Maximum-Methode ausgewählt, so dass jeweils das jährliche Maximum der Messwerte gewählt wurde.

Da bei einer Extremwertanalyse die vorliegende Verteilungsfunktion unbekannt ist, wird eine Verteilungsfunktion an die vorliegenden Messdaten angepasst. Hierfür eignet sich auf dem Feld der Hydrologie und Hydrographie die sogenannte *Generalized Extreme Value* (GEV) Verteilungsfunktion, da diese drei verschiedene Typen von Extremwertverteilungen, die Gumbel-Verteilungen Typ I-III, in sich vereint und anhand der vorliegenden Daten optimiert wird (Kotz and Nadarajah 2000; Coles 2001).

Eine anschließende Überprüfung der Ergebnisse ist nur sehr bedingt durchführbar, da die Verteilungsfunktion weiter unbekannt bleibt. Dennoch erlaubt die Extremwertstatistik Schätzwerte für Extremereignisse innerhalb vorgegebener Konfidenzintervallen zu ermitteln. Des Weiteren ist bis heute keine wirksame Alternative zur Extremwertanalyse entwickelt worden (Coles, 2001). Die Richtlinien für die Anpassung der Extremwertverteilungen an die Stichprobe schlagen die *maximum likelihood estimation* (MLE) vor (KFKI, 2002; USACE, 2002). Abbildung 2 zeigt die angepasste Extremwertfunktion für die klassifizierte Stichprobe der Extremwerte, sowie die extrapolierte Extremwertfunktion mit 95%-Konfidenzintervallen. Die angegebenen Werte sind auf das örtliche Bezugssystem Manhattan Datum (MD)

bezogen.

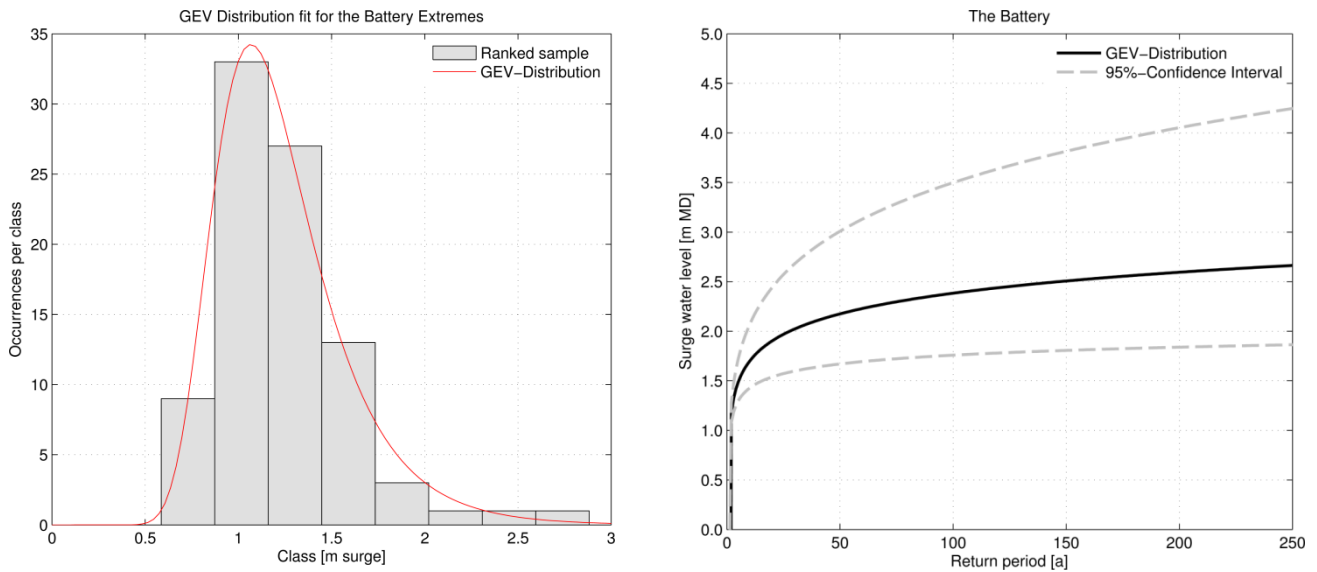


Abbildung 2: Links: GEV-Fit für die klassifizierte Windstauextreme der Stichprobe von 'The Battery'. Rechts: Extrapolierte Extremwertfunktion mit ermittelten 95%-Konfidenzintervallen. Werte sind in Metern angegeben und auf MD bezogen.

Anschließend wird die Güte der Übereinstimmung der angepassten Verteilungsfunktion mit den Daten der Stichprobe überprüft. Dies kann für hydrographische Daten über einen KS-Test, einen Chi-Quadrat-Test (X^2 -Test) oder den nw^2 -Test erfolgen (KFKI, 2002). Für die Überprüfung wurde jedoch ein Lillifors-Test bevorzugt, da die anderen Tests einen einseitigen statistischen Ansatz beinhalten, welcher eine vollkommen spezifizierte Null-Verteilung voraussetzt, die in diesem Fall jedoch nicht gegeben ist. Der Test bestätigt eine gute Übereinstimmung und damit die Wahl der angepassten Verteilungsfunktion. Zusätzlich werden die Konfidenzintervalle für die Verteilungsfunktion ermittelt, in die 95% der Ereignisse fallen werden. Dementsprechend wurden die 95%-Konfidenzintervalle für die angepasste Verteilungsfunktion bestimmt. Abschließend wird die angepasste Verteilungsfunktion auf Ereignisse extrapoliert, die kleine Wiederkehrintervalle (z.B. 200-jährliches Ereignis) aufweisen (CSC, 2012; KFKI, 2002; USACE, 2002).

2.5. Windwellen

Zusätzlich zu den oben aufgeführten Methoden wurden lokal generierte Windwellen untersucht, welche im Falle einer Sturmflut zur Überströmung von Schutzbauwerken führen könnten. Unter Berücksichtigung des Coastal Engineering Manuals (CEM), wurden Höhen für Windwellen anhand von Langzeit-Windmessdaten einer im regionalen Umfeld betriebenen Station am JFK International Airport¹ berechnet (USACE, 2003). Die Windmessdaten reichen bis in das Jahr 1973 zurück.

2.6. Hurrikan Sturmfluten

Abschließend wurden mögliche Hurrikan-Einflüsse untersucht, wobei maßgeblich Daten des National Hurricane Center (NHC) genutzt wurden (NHC, 2013).

¹ <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search> via interactive map

3. Ergebnisse

3.1. Bemessungswasserstände

Ergebnis der Untersuchungen und anschließender Iterationen mit dem WMAA und WTM sind szenarienabhängige Bemessungswasserstände. Die Ergebnisse wurden anhand von Langzeitdaten des Pegels 'The Battery', NYC berechnet. Sowohl das Einzelwertverfahren als auch das Vergleichswertverfahren liefern je einen deterministischen Wert für einen Bemessungszeitraum von 100 Jahren. Das Extremwertverfahren ergibt in Abhängigkeit des Wiederkehrintervalls von 50 - 250 Jahren verschiedene BWS-Werte. Die Ergebnisse aus dem Extremwertverfahren für die Sturmflutkomponente *c* (Windstau) wurden zu den Komponenten *a*, *b* und *d* aus dem Einzelwertverfahren addiert. Dies führte auf die angegebenen BWS-Werte für höhere Wiederkehrintervalle. Alle drei Methoden berücksichtigen ein optimistisches Szenario für den Säkularanstieg von 0,5 m in der Region NY.

Tabelle 2: Übersicht über die mit unterschiedlichen Methoden ermittelten BWS Werte für das WMAA. Werte sind in Metern dargestellt und auf MD bezogen.

| Methodik | Verfahren | Jährlichkeit | | | | |
|-----------------|----------------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | | - | 50 a | 100 a | 250 a | 500 a |
| Deterministisch | <i>Einzelwert</i> | 3,99 | - | - | - | - |
| | <i>Vergleichswert</i> | 3,44 | - | - | - | - |
| Statistisch | <i>Extremwert</i> | | | | | |
| | Komponente <i>c</i> ² | - | 1,74-2,95 | 1,85-3,47 | 1,98-4,26 | - |
| | BWS ³ | - | 2,47-3,68 | 2,58-4,20 | 2,71-4,99 | - |
| Numerisch | <i>Literatur</i> | | | | | |
| | Aerts et al. (2013) | - | - | - | - | - |
| | Komponente <i>c</i> ² | - | 1,61 | 2,30 | - | 2,75 |
| | BWS | - | 2,34 | 3,03 | - | 3,48 |
| | FEMA (2013a) | - | - | 2,21 | - | |
| | FEMA* (2013b) | - | - | 2,85 | - | 4,07 |

* Angepasst nach Hurrikan Sandy 2012

Die beiden weiteren Szenarien mit 1,0 m bzw. 1,5 m Säkularanstieg (USACE, 2011) würden entweder wesentlich aufwendigere objektbezogene Schutzsysteme notwendig machen oder die Einrichtung eines regionalen staatlichen Sturmflutschutzkonzeptes für das gesamte Stadtgebiet von New York City erfordern. Erste Ideen eines regionalen Sturmflutkonzeptes liegen mit Vorlage und Diskussion eines sogenannten *plNYC* (City of NY, 2013) seit Sommer 2013 vor. Ergänzend zu den ermittelten BWS-Werten wurden aktuelle Literaturwerte aus einer numerischen Modellierung der Situation für NYC (Aerts et. al., 2013) mit angeführt. Zusätzlich wurden offizielle Flutschutzwerte der Federal Emergency Management Agency (FEMA) aufgeführt. Diese sind obligatorisch für die Aufnahme in das staatlich geförderte National Flood Insurance Program (NFIP). Jedoch wurden die FEMA-Werte und damit verbindlichen Bemessungswerte in den Baurichtlinien für NYC für das 100-jährliche Ereignis am Standort des WMAA von Hurrikan Sandy deutlich überschritten, obwohl dieser von einem Hurrikan der Kategorie 1 zu einem post-tropischen Zyklon herabgestuft wurde, bevor er die Küste erreichte. Nach Hurrikan Sandy wurden die Werte von der FEMA überarbeitet und die vorläufigen, nicht bindenden Werte liegen deutlich über den bisher

² Das 95%-Konfidenzintervall der projizierten Sturmflutkomponente Windstau (Komponente *c*)

³ Das 95%-Konfidenzintervall des projizierten BWS, Summe des Konfidenzintervalls für den Windstau *c*) und der restlichen Sturmflutkomponenten

gültigen Werten. Insgesamt liegen die FEMA-Werte jedoch sowohl unter den in der vorliegenden Studie ermittelten Werten, als auch denen in der aktuellen Literatur angeführten (Aerts et. al., 2013).

3.2. Berechnete Windwellen

Die wesentlichen Parameter der infolge eines Sturms zu erwartenden Windwellen am Ufer des *Hudson River* variieren in Abhängigkeit der Windrichtung und der damit aus der lokalen Topographie hervorgehenden Fetchlängen.

Um die Windwellen als Komponente bei der Bestimmung der BWS zu berücksichtigen, wurden Bandbreiten für mögliche Wellenhöhen definiert (KFKI, 2002). Für Wiederkehrintervalle von 50, 100 und 200 Jahren wurden die Wellenhöhen für die jeweils kleinste und größte Fetchlänge bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ausgewählte signifikante Wellenhöhen (H_s) abhängig von der Streichlänge und Jährlichkeit.

| Fetchlänge | Signifikante Wellenhöhe H_s | | |
|---------------|-------------------------------|---------------|---------------|
| | 50 a | 100 a | 200 a |
| 2398 – 1632 m | 0.48 – 0.58 m | 0.49 – 0.60 m | 0.51 – 0.62 m |

3.3. Hurrikan-Sturmfluten

Ergebnisse aus Simulationen des NHC mit dem Model SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes) wurden für den Standort des WMAA ausgewertet (NHC, 2013).

Ergebnisse für verschiedene Hurrikan Klassen gemäß der Saffir-Simpson-Skala sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Table 4: SLOSH-Simulationsergebnisse für Sturmflutwasserstände inklusive Tide für den WMAA-Standort.

| Hurrikan-Kategorie | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| SLOSH-Modell | 2,93 m MD | 5,01 m MD | 7,02 m MD | 8,67 m MD |

Dennoch können Sturmflutereignisse im Zusammenhang mit einzelnen Hurrikan-Kategorien nicht mit ihren jeweiligen Wiederkehrintervallen belegt werden, da die komplexe Entwicklung der Stürme und ihrer Zugbahnen und die daraus resultierenden lokalen Sturmflutwasserstände bisher nicht vollständig nachvollzogen werden können (Aerts et al., 2013). Hurrikan Sandy wurde z.B. von einem Hurrikan der Kategorie 1 zu einem post-tropischen Zyklon heruntergestuft, bevor er am 29. Oktober die Küste von New Jersey rund 75 km südlich von NYC erreichte (Blake et al., 2013), dennoch löste er im Stadtgebiet von NYC weiträumige Überflutungen mit einem erheblichen Schadensausmaß aus. Aus den Ergebnissen der SLOSH-Simulationen wird außerdem deutlich, dass ein effektiver objektbezogener Sturmflutschutz gegen einen Hurrikan der Kategorie 3 und aufwärts konstruktiv auf Grund des bereits fertiggestellten Rohbaus mit vertretbarem Aufwand nicht realisierbar ist. Im Wissen um diese hydrometeorologischen Randbedingungen und bautechnischen Limitierungen wurden die zukünftigen objektbezogenen Sturmflutschutzsysteme geplant und dem Bauherrn die darin enthaltenen Restrisiken aufgezeigt.

3.4. Unsicherheiten

Die mit den oben dargestellten Methoden empirisch ermittelten BWS-Werte sind mit Unsicherheiten behaftet, da die herangezogene Datenbasis (Wind, Wasserstand) auf Messungen an verschiedenen Lokationen beruht. Zudem setzen die angewandten Verfahren voraus, dass die grundsätzlich voneinander entkoppelten hydrometeorologischen Prozesse

konstruktiv phasengleich überlagert werden, deren Maxima also zeitgleich auftreten und sich superponieren. Nichtlineare, sich verstärkende oder abschwächende Interaktionen der sturmflutbedingenden Prozesse und Komponenten (astronomische Tide, Windwellen, Strömungen, Binnenabfluss des Hudson River sowie eine Trichterwirkung der New York Bay) werden mit den angewendeten Methoden nicht erfasst. Dadurch ergeben sich zusätzliche Unsicherheiten bei der Bestimmung möglicher Bemessungswasserstände. Die Erkenntnisse dieser empirischen Studie und darauf fußende Empfehlungen sind auch derart zu interpretieren. Langzeittrends wie der Anstieg des mittleren Meeresspiegels sind zudem mit großen Unsicherheiten belegt. Dies spiegelt sich auch in den unterschiedlichen Szenarien des USACE wieder.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Verschiedene BWS-Werte wurden mit unterschiedlichen Methoden ermittelt und ein Szenario für die Dimensionierung eines permanenten oder mobilen Sturmflutschutzsystems für das WMAA in einem Risiken und Chancen abwägenden Diskussionsprozess schlussendlich gewählt. Dieses stützt sich auf den Wert von 4,99 m MD, welcher mithilfe der Extremwertanalyse für ein Wiederkehrintervall von 250 Jahren ermittelt wurde (vgl. Tabelle 2) und der oberen Grenze des 95%-Konfidenzintervalls entspricht. Sowohl die ermittelten Bemessungswasserstände als auch maßgebende aktuelle Literaturwerte zeigen, dass die vor Hurrikan Sandy veröffentlichten, für eine Teilnahme im NFIP obligatorischen Flutschutzziele der FEMA deutlich zu niedrig angesetzt waren. Im Nachgang zu Hurrikan Sandy wurden diese entsprechend überarbeitet und zwangsläufig erhöht. Dennoch liegen die aktuellen, immer noch nicht für die Baurichtlinie New Yorks bindenden Werte der FEMA weiterhin unter den im Rahmen dieser Studie ermittelten BWS-Werten.

BWS-Werte sind mit Unsicherheiten behaftet, da die Methoden und Ansätze keine nichtlinearen und dynamischen bzw. phasenunterscheidenden Interaktionen der einzelnen Sturmflutprozesse und -komponenten abbilden. Ferner werden Einflüsse durch die küstennahe Bathymetrie sowie einen vorhandenen Oberwassereinfluss durch den *Hudson River* nicht berücksichtigt.

Allerdings sind auch die offiziellen Werte der FEMA mit Unsicherheiten belegt, wie die Überflutung durch Hurrikan Sandy im Oktober 2012 zeigte. Weiter finden sich in der aktuellen Literatur Ergebnisse zu Sturmflutsimulationen für NYC, welche Oberwassereinflüsse sowie dynamische Interaktionen der Sturmflutkomponenten abbilden. Diese Ergebnisse weisen mit den hier mittels statischen Methoden ermittelten BWS-Werten eine bessere Übereinstimmung auf, als die zu optimistisch ausfallenden FEMA-Werte (Aerts et. al., 2013; FEMA, 2013b).

Zusätzlich wurden der Einfluss und die Wirkungen von Windwellen an den Ufern des Hudson River in unmittelbarer Nähe des WMAA untersucht. Ergänzend wurden Hurrikan-Ereignisse untersucht, die jedoch aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen Hurrikan-Intensität, Zugbahnen und den dadurch ausgelösten Sturmfluten nicht mit einer Jährlichkeit belegt werden können. Simulationsergebnisse des NHC für die Position des WMAA zeigen jedoch, dass ein objektspezifischer Sturmflutschutz gegen einen Hurrikan der Kategorie 3 und höher bautechnisch auf Grund des bereits fertiggestellten Rohbaus nicht realisierbar ist. Ein effektiver Schutz vor derartigen Ereignissen bleibt daher einem umfassenden Sturmflutschutzkonzept für den Großraum New York vorbehalten, wie zum Beispiel im vorliegenden planNYC (City of NY, 2013) angedeutet.

Das für die Dimensionierung des permanenten oder mobilen Hochwasserschutzsystems final ausgewählte Szenario stützt sich auf die Ergebnisse der Extremwertstatistik für ein Wiederkehrintervall von 250 Jahren. Der in zahlreichen Konsultationen kommunizierte und final ausgewählte Bemessungswasserstand von 4,99 m MD (vgl. Tabelle 2) liegt knapp unterhalb des konstruktiv noch zu bewerkstellenden Maximums von 5,05 m MD.

Dieser Wasserstand kennzeichnet den maximal möglichen Einstau des *Hudson River*, da andernfalls infolge zu großer resultierender Auftriebskräfte und Wasserdruckkräfte die Gebäudestatik versagen würde. Bei Überschreitung dieses Wasserstandes wird das Gebäude daher planmäßig geflutet, um einen Totalverlust des Objektes zu vermeiden. Das damit gewählte Schutzniveau entspricht in etwa einem nach SLOSH-Simulationsergebnissen zu erwartenden Wasserstand infolge eines Hurrikans der Kategorie 2 (NHC, 2013).

5. Literatur

- Aerts, J.C.J.H., Lin, N., Botzen, W.J.W., Emanuel, K., and de Moel, H. (2013): Low-Probability Flood Risk Modeling for New York City. *Risk Analysis*, 1539–6924.
- City of New York (2013): *plANYC – A stronger, more resilient New York*. www.nyc.gov/planyc
- Coles, S. (2001): *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer, London.
- CSC (2012): *Statistische Verfahren in der Auswertung von Klimamodell- und Impaktmodelldaten*. Climate Service Center Germany (CSC), Hemholtz-Zentrum Geesthacht, Geesthacht, Germany.
- FEMA (2013a): *What is my Advisory Base Flood Elevation (ABFE)? - FEMA Region II Coastal Analysis and Mapping*. <http://www.region2coastal.com/sandy/table>.
- FEMA (2013b): *Hurricane Sandy Advisory Base Flood Elevations (ABFEs)*. Public Documents. Federal Emergency Management Agency (FEMA). http://184.72.33.183/Public/Public_Documents/Sandy_ABFE_Fact_Sheet.pdf.
- KFKI. (2002): *EAK. Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken*. Die Küste 65, Korrigierte Ausgabe 2007.
- Kotz, S. und Nadarajah, S. (2000): *Extreme Value Distributions*. Imperial College Press, London.
- MunichRe (2013): *TOPICS Geo, Naturkatastrophen 2012. Analysen, Bewertungen, Positionen, Ausgabe I, 2013*
- NHC and NOAA (2012): *Storm Surge Overview*. National Hurricane Center (NHC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <http://www.nhc.noaa.gov/surge/>.
- NOAA (2000): *Tidal Datums and their Applications*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland.
- NOAA (2014): *NOAA Tides and Currents*. *Tides & Currents*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). *Datums for 8518750, The Battery NY*. <http://tidesandcurrents.noaa.gov/datums.html?id=8518750>.
- RAHMSTORF, S. (2012): *Sea-level rise: Towards understanding local vulnerability*. *Environmental Research Letters*, 7, 2, art. no. 021001.
- USACE (2002): *Coastal Engineering Manual. Water wave mechanics. Part II, Chapter 1*. United States Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
- USACE (2003): *Coastal Engineering Manual. Surf Zone Hydrodynamics. Part II, Chapter 4*. United States Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.
- USACE (2011): *Sea-Level Change Considerations for Civil Works Programs*. EC 1165-2-212. United States Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington, DC.