

Bärbel Koppe
Birgitt Brinkmann

Abschätzung der Wellenüberlaufrate an Hochwasserschutzbauwerken nach dem EurOtop-Manual – Erfahrungen aus der Ingenieurpraxis

Der Entwurf und die Bemessung von Küsten- und Hochwasserschutzwerken unterliegen nur sehr begrenzt einer Normung und werden in der Praxis aus Schrifttum mit empfehlendem Charakter abgeleitet. Im August 2007 wurde das EurOtop-Manual veröffentlicht [2], dessen Erarbeitung von Küstenschutzinstitutionen aus Großbritannien, den Niederlanden und Deutschland unterstützt wurde. Es ersetzt die bis dahin in diesen Ländern gültigen Ansätze zur Berechnung der Wellenüberlaufrate an Küsten- und Hochwasserschutzwerken, in Deutschland somit die relevanten Abschnitte des Kapitels 4 der Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzbauwerke [1].

Im Gegensatz zu [1] werden in [2] eine Vielzahl von Ansätzen zur Berechnung der Überlaufrate vorgestellt, jeweils unterschieden nach Bauwerksausformung, Wasserstand-Kronenhöhe-Verhältnis und Wellenanlaufrichtung relativ zur Bauwerksachse. Zudem wird eine Unterscheidung zwischen probabilistischer und deterministischer Bemessung vorgenommen.

Für den praktischen Ingenieur stellt das EurOtop-Manual ein ausführliches, aber auch gewöhnungsbedürftiges Instrument dar. Insbesondere bei der Abschätzung der Wellenüberlaufrate entlang längerer Bauwerksabschnitte sind in der Regel eine Vielzahl von Berechnungsansätzen auszuwählen und anzuwenden.

Grundlagen der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen

Die erforderliche Höhe einer Hochwasserschutzanlage ist abhängig von der Ausbildung und der Belastung der Schutzanlagen sowie von der als tolerierbar angesehenen mittleren Wellenüberlaufrate.

Ausbildung der Schutzanlagen

Linienförmige Hochwasserschutzanlagen können grundsätzlich in geböschte und senkrechte Bauwerke unterschieden werden.

Wichtige Bauwerksparameter für die Berechnung der Überlaufrate an geböschten Bauwerken sind nach [2]:

- Kronenhöhe
- Rauheit der wasserseitigen Böschung
- wasserseitige Böschungsneigung (einheitlicher oder über die Böschungslänge variierender Neigungswinkel)
- Anordnung einer Berme an der wasserseitigen Böschung
- Anordnung einer senkrechten Wand auf der Bauwerkskrone

Bei der Berechnung der Überlaufrate an senkrechten Bauwerken sind die folgenden Bauwerksparameter nach [2] zu unterscheiden:

- Bauwerkshöhe
- Geländehöhe am Bauwerksfußpunkt
- Fußvorlage wasserseitig der Wand oder Abstufung der Wand
- Anordnung eines Wellenabweisers

Zusätzlich zu den rein bauwerksbezogenen Parametern spielt der Wellenanlaufwinkel, bezogen auf die Bauwerksausrichtung bei geböschten und bei senkrechten Bauwerken, eine wichtige Rolle.

Bei der Abschätzung der mittleren Überlaufmengen an senkrechten Strukturen wird zudem unterschieden in stoßartige (Bild 1) und nicht stoßartige Belastungen. Bei der stoßartigen Belastung liegt der Ruhewasserspiegel unterhalb oder im Bereich des Wandfußes, während er bei der nicht stoßartigen Belastung weiter oberhalb des Wandfußes liegt.

Belastungsgrößen

Die Höhe von Hochwasserschutzanlagen wird auf der Grundlage der Kombination hoher Wasserstände (dem örtlichen Bemessungshochwasserstand) und hoher Seegangbelastungen (entsprechend der definierten Windsituation) bemessen.

Die Festlegung des maßgebenden Bemessungshochwasserstands basierte früher i. d. R. allein auf dem höchsten bisher bekannt gewordenen örtlichen Hochwasserstand. Mittlerweile wird das Bemessungshochwasser oftmals als Hochwasser mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit auf der Basis von Wasserstandsbeobachtungen oder an Flüssen Abflussbeobachtungen gewählt. Für den Entwurf von Hochwasserschutzanlagen



Bild 1. Stoßartige Wellenbelastung einer Küstenschutzanlage im Nordosten Taiwans während eines Taifuns im Jahr 1998

liegen i. d. R. amtlich festgelegte Bemessungshochwasserstände vor, die z. B. Generalplänen und Aktionsplänen zu entnehmen sind.

Die Abschätzung der Seegangsbelastung im Planungsgebiet kann mit Hilfe verschiedener Methoden erfolgen wie

- das SPM-Flachwasservorhersageverfahren [3]
- die numerische Modellierung mit SWAN [4]
- die Wind-Wellen-Korrelationsrechnung bei vorhandenen Seegangsmessdaten im Gebiet.

Die Seegangsbelastung wird auf der Grundlage eines hinsichtlich der Windstärke und des maßgebenden Windrichtungssektors definierten Bemessungswindes ermittelt. Der maßgebende Windrichtungssektor wird i. d. R. in 5°- oder 10°-Schritten aufgelöst betrachtet.

Der örtlich maßgebende Seegang zur Bemessung der Bauwerkshöhe ist der Seegang, der zu den örtlich höchsten Wellenüberlaufhöhen am Schutzbauwerk führt. Hierbei sind die von der Windrichtung abhängigen signifikanten Wellenhöhen (H_s) und Wellenperioden (T_{02} , $T_{m-1,0}$) ebenso zu betrachten wie die Wellenanlaufhöhe relativ zur Bauwerksachse.

Die resultierenden Belastungen und die sich hieraus ergebenden Wellenüberlaufhöhen sind für sämtliche Richtungen am gewählten Ort zu berechnen, und der Bemessungsfall ist auszuwählen. Bei gleichen Wellenhöhen und Wellenperioden sind bei senkrechtem Wellenangriff die Belastungen am Bauwerk größer als bei schrägem Wellenangriff. Sind bei schrägem Wellenangriff jedoch signifikant höhere Wellen zu erwarten, kann dies der maßgebende Bemessungsfall sein.

Darüber hinaus sind wegen der Aufteilung der Schutzlinie in einzelne Berechnungspunkte und der somit punktuellen Berechnung der maßgebenden Wellenüberlaufhöhe drei verschiedene Bauwerksrichtungen je Berechnungspunkt einzubeziehen (Bild 2):

- die Richtung der Tangente am „aktuellen Berechnungspunkt“ gegen Nord (Winkel α_1),
- die Richtung der Verbindungslinie „aktueller Berechnungspunkt“ – „folgender Berechnungspunkt“ gegen Nord (Winkel α_2) und
- die Richtung der Verbindungslinie „aktueller Berechnungspunkt“ – „voriger Berechnungspunkt“ gegen Nord (Winkel α_3).

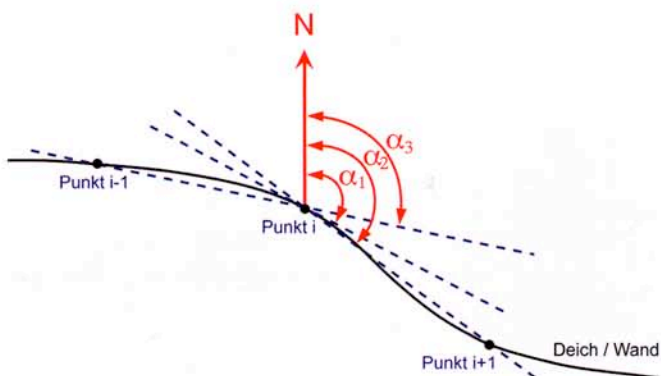


Bild 2. Zu betrachtende Bauwerksrichtungen α_1 , α_2 , α_3 , jeweils gegen Nord gemessen (Foto/Grafik 1 und 2: Koppe)

Bei gradliniger Ausrichtung der Schutzanlage über mehrere Berechnungspunkte sind die drei beschriebenen Richtungen identisch.

Tolerierbare Wellenüberlaufhöhen

Bei der Bemessung von Hochwasserschutzbauwerken wird i.d.R. der Überlauf von Wellen in tolerierbaren Mengen zugelassen. Hiermit wird der stochastischen Natur des Seegangs Rechnung getragen, die Baukosten werden vermindert und die sich ergebende geringere Höhe des Bauwerks reduziert eventuell auftretende Sichtbehinderungen.

Tolerierbare Überlaufmengen sind definiert als Mengen, die keinen Schaden am Bauwerk selbst bzw. an angrenzenden binnenliegenden Flächen und deren Nutzung verursachen. Hierbei sind die funktionelle und die konstruktive Sicherheit zu unterscheiden. Die funktionelle Sicherheit liefert i. d. R. die für die Bemessung maßgebenden Größen, während die konstruktive Sicherheit noch bei vergleichsweise großen Überlaufmengen gegeben ist.

Zur Festlegung der erforderlichen Höhe der Schutzbauwerke sind Überlaufwassermengen unter Berücksichtigung des Bemessungswasserstands sowie der maßgebenden Seegangsparameter zu berechnen. Die Überlaufhöhen sind in m^3 bzw. Liter pro Sekunde und laufendem Meter Bauwerkslänge anzugeben. Da die zeitliche Verteilung der Überlaufmengen bei Betrachtung von Zeitskalen im Sekundenbereich wegen der spektralen Form des natürlichen Seegangs sehr unterschiedlich ist, werden mittlere Überlaufhöhen eines mehrere Minuten langen Zeitintervalls betrachtet.

Nach [2] beträgt z. B. die zulässige mittlere Überlaufhöhe bei einer Nutzung des Geländes hinter der Schutzanlage durch „normale Fußgänger“ $0,1 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ und durch „gefahrenbewusste Hilfskräfte“ $1 \text{ bis } 10 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$. Die Wahl der zulässigen Überlaufhöhe hat einen erheblichen Einfluss auf die erforderliche Höhe der Schutzbauwerke.

Berechnung der mittleren Wellenüberlaufhöhe nach EUROTOP 2007

Die nach [2] zur Berechnung der in die Höhenbemessung der Hochwasserschutzwerke eingehenden mittleren Wellenüberlaufhöhe dienenden Berechnungsansätze sind auf der Grundlage von Modellversuchen aufgestellt worden. Die in die Ermittlung der jeweiligen Ansätze eingehenden Daten weisen Streuungen auf, die auf Parameter- und Modellungenauigkeiten zurückzuführen sind (Bild 3). Die Streuung der Werte um ihren Mittelwert wird durch die Standardabweichung beschrieben.

Bei der probabilistischen Bemessung nach [2] werden die Berechnungsansätze auf der Basis des Mittelwertes der betrachteten Modellergebnisse ermittelt und die Standardabweichung wird im Bemessungsverfahren berücksichtigt. Bei der deterministischen Bemessung nach [2] basieren die Berechnungsansätze auf dem Mittelwert der betrachteten Modellergebnisse zuzüglich der Standardabweichung (Bild 4).

Je nach Bemessungsverfahren (probabilistisch oder deterministisch), Ausbildung des Schutzbauwerks (geböschst oder senkrecht, mit oder ohne Berme bzw. Fußvorlage etc.), zu betrachtender Wellenangriffsrichtungen be-

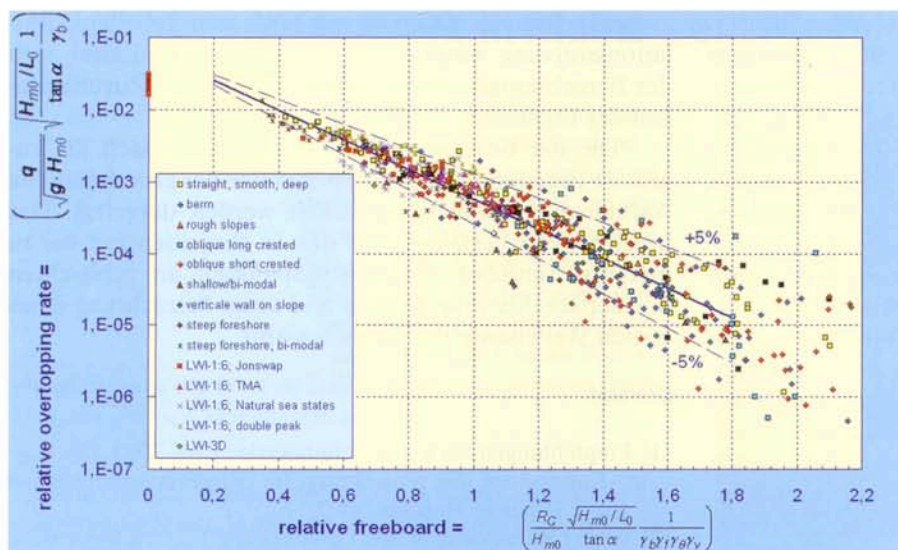


Bild 3. Wellenüberlaufdaten für brechende Wellen und Ansatz zur Berechnung der Wellenüberlauftrate mit 5% Unter- und Überschreitung

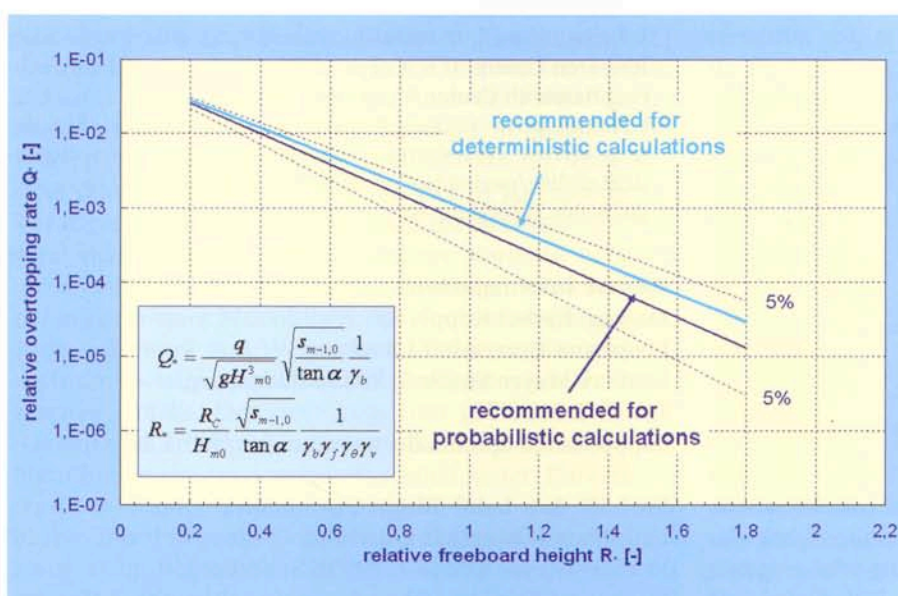


Bild 4. Wellenüberlaufdaten für brechende Wellen – Vergleich der Formeln für die probabilistische und deterministische Bemessung (Grafiken 3 und 4: [2])

zogen auf die Bauwerksachse sowie stoßartiger oder nicht-stoßartiger Belastung senkrechter Bauwerke sind die relevanten Berechnungsansätze nach [2] auszuwählen.

Sind im Planungsgebiet geböschte und senkrechte Bauwerke verschiedener Ausführung vorhanden und ist nicht nur eine Wellenangriffsrichtung, sondern ein größerer Sektor an Wellenangriffsrichtungen relevant für die Bemessung, ist ein erheblicher Berechnungsaufwand zur Ermittlung der Wellenüberlauftrate nach [2] zu leisten. Bei der Betrachtung längerer Schutzabschnitte mit einer entsprechend hohen Anzahl von Berechnungspunkten ist es deshalb von Vorteil, die Berechnung zu automatisieren.

In einer Software zur Tabellenkalkulation können die nach [2] im Planungsgebiet zu betrachtenden Eingangsdaten sowie Berechnungsformeln eingegeben werden. Die Auswahl der jeweils relevanten Berechnungsformel erfolgt über verschachtelte Wenn-Dann-Bedingungen. Die Erstellung einer entsprechenden Kalkulationstabelle erfordert die Erarbeitung und Einhaltung einer klaren Berechnungsstruktur, ermöglicht dann aber eine schnelle und zu-

verlässige Ermittlung der mittleren Wellenüberlauftrate entlang ausgedehnter Hochwasserschutzanlagen.

Eine getrennte Berechnung geböschter und senkrechter Bauwerksabschnitte ist hinsichtlich der Aufstellung der Kalkulationstabellen von Vorteil. Die Berechnung der Überlauftrate an geböschten Bauwerken nach [2] ist auch bei Betrachtung unterschiedlicher Wellenangriffsrichtungen mit deutlich geringerem Rechenaufwand verbunden, als diejenige an senkrechten Bauwerken.

Bei der Berechnung der Überlauftraten ist zunächst anhand der Orientierung der Schutzlinie und der jeweiligen Wellenangriffsrichtung zu prüfen, ob ein Wellenangriff am Schutzbauwerk vorliegt. Ist dies nicht der Fall, ist die mittlere Überlauftrate gleich Null.

Bei senkrechten Bauwerken ist dann zu prüfen, ob eine stoßartige oder nicht stoßartige Belastung vorliegt und ob bei den jeweiligen Eingangsdaten die Gültigkeitsgrenzen der Berechnungsansätze eingehalten werden. Bei sehr kleinen und großen Freibord-Wellenhöhe-Verhältnissen liefert [2] keine gültigen Berechnungsansätze. In dem einen Fall kann von einer über dem zulässigen Wert liegen-

den Überlaufrate (kleines Freibord-Wellenhöhe-Verhältnis) und im anderen Fall von einer unter dem zulässigen Wert liegenden Überlaufrate (großes Freibord-Wellenhöhe-Verhältnis) ausgegangen werden.

Nach Prüfung der vorstehenden Kriterien kann die eigentliche Berechnung der mittleren Überlaufrate gemäß der Ansätze nach [2] erfolgen. Die Anzahl der anzuwendenden und damit in die Kalkulationstabelle über Wenn-Dann-Bedingungen zu verschachtelnden Ansätze hängt von der Unterschiedlichkeit der Ausbildung der Schutzanlagen ab. Selbst bei einer einheitlichen Ausbildung z. B. eines senkrechten Schutzbauwerks über die gesamte zu betrachtende Länge sind infolge der unterschiedlichen Winkel zwischen Wellenangriff und Bauwerksausrichtung zumindest drei unterschiedliche Berechnungsansätze zu verwenden. Hierbei sind die in [2] nur diskret angegebenen Winkel zwischen Wellenangriff und Bauwerksnormale von $\beta = 15^\circ$, 30° und 60° auf Winkelintervalle zu erweitern und die entsprechenden Berechnungsansätze den gewählten Intervallen zuzuordnen.

Abschließend sind die Maximalwerte der mittleren Überlaufrate an den jeweiligen Berechnungspunkten zu ermitteln und für die weitere Bauwerksbemessung heranzuziehen. Liegt die jeweilige maximale Überlaufrate oberhalb des zulässigen Wertes, ist eine größere Kronenhöhe zu wählen oder ein anderer Bauwerksparameter wie Neigung oder Fußvorlage entsprechend zu ändern. Bei einer sehr geringen maximalen Überlaufrate ist gegebenenfalls zu prüfen, ob das Bauwerk überbemessen ist und ob z. B. die Kronenhöhe verringert werden kann.

Zusammenfassung

Die Berechnung der mittleren Überlaufrate an geböschten und senkrechten Hochwasserschutzbauwerken nach dem EurOtop-Manual [2] ist wegen der Vielzahl der zu betrachtenden Berechnungsansätze insbesondere bei der Bemessung längerer und in der Ausbildung inhomogener Bauwerksabschnitte aufwändig. In diesen Fällen wird eine

automatisierte Berechnung mit Hilfe von Tabellenkalkulationssoftware empfohlen. Hierdurch vermindert sich der Berechnungsaufwand erheblich, und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse wird erhöht.

Die der Berechnung der Überlaufrate nach [2] zugrunde liegenden Eingangsdaten sowie der grundsätzliche Aufbau der Kalkulationstabellen werden dargelegt. Das beschriebene Verfahren hat sich in Projekten mit bis zu mehreren tausend Berechnungspunkten an geböschten und senkrechten Bauwerken und unter Betrachtung eines weiten Wellenangriffssektors bewährt.

Literatur

- [1] Empfehlungen für Küstenschutzwerke, EAK 2002. Die Küste, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.), Heide in Holstein 2002.
- [2] Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Environmental Agency UK, Expertise Network Waterkeren NL, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen DE.
- [3] Shore Protection Manual, Volume I. Coastal Engineering Research Centre, U.S. Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg 1984.
- [4] Numerisches Seegangsvorhersagemodel SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Informationen auf: www.citg.tu-delft.nl/live/pagina.jsp?id=f928097d-81bb-4042-971b-e028c00e3326&lang=en

Weitere Informationen:

Dr.-Ing. Bärbel Koppe,
Leuphana Universität Lüneburg,
Herbert-Meyer-Straße 7, 29556 Suderburg,
Tel. 0172 3184752,
koppe@uni.leuphana.de, www.uni-leuphana.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Birgitt Brinkmann,
Leuphana Universität Lüneburg,
Herbert-Meyer-Straße 7, 29556 Suderburg,
brinkmann@uni.leuphana.de, www.uni-leuphana.de