

Eurotop – Das europäische Wellenüberlaufhandbuch

– Eine Kurzfassung –

Von HOLGER SCHÜTTRUMPF, ANDREAS KORTENHAUS, JENTSJE VAN DER MEER,
TIM PULLEN, WILLIAM ALLSOP und TOM BRUCE

Zusammenfassung

Für die Bemessung von Küsten- und Hochwasserschutzbauwerken stellt der Wellenüberlauf eine maßgebende Größe dar. Der Kenntnisstand zum Thema Wellenüberlauf wurde in den letzten Jahren auf der Grundlage zahlreicher nationaler und internationaler Forschungsprojekte signifikant erweitert und verbessert. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, vorhandene Richtlinien und Empfehlungen zum Thema anzupassen und zu überarbeiten. Um Synergieeffekte zu nutzen, haben die Environmental Agency (UK), Rijkswaterstaat (NL) und das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) die Erarbeitung eines europäischen Wellenüberlaufhandbuchs beschlossen. Der vorliegende Beitrag stellt die Schwerpunkte des Eurotop-Manuals zusammen. Die vollständige Version wird in Heft 73 der Küste erscheinen.

Summary

Wave overtopping is one important parameter for the design of coastal and flood protection structures. The knowledge on wave overtopping has been significantly improved within the last years based on a number of national and international projects. Therefore, it was important to extend and adapt existing guidelines and recommendations. Environmental Agency (UK), Rijkswaterstaat (NL) and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (D) have decided to set up a European overtopping manual. The present paper presents the main aspects of the Eurotop-manual. The full version of the Eurotop-manual will be published in volume 73 of "Die Küste".

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Struktur des Eurotop-Manuals.	3
3. Eurotop-Manual	3
3.1 Einführung	3
3.2 Wasserstände und Wellenbedingungen	4
3.3 Zulässige Wellenüberlaufraten	4
3.4 Ermittlung des Wellenüberlaufs	5
3.4.1 Empirische Methoden	6
3.4.2 CLASH-Datenbank	8
3.4.3 Neuronales Netz (NN)	8
3.4.4 PC-Overtop	11
3.4.5 Numerische Modellverfahren	12
3.4.6 Hydraulischer Modellversuch	14
3.4.7 Empfehlungen zur Auswahl einer geeigneten Methode	15
3.5 Deiche und geneigte Ufermauern	16
3.6 Schüttsteinböschungen und Böschungen mit rauer Oberfläche	19
3.7 Vertikale Bauwerke	20
4. Calculation-Tool	23
5. Danksagung	25
6. Schriftenverzeichnis	25

1. Einleitung

Bei der Bemessung von Hochwasser- und Küstenschutzbauwerken stellt die Ermittlung des Wellenüberlaufes neben dem maßgebenden Wasserstand eine wesentliche Bemessungsgröße für die Ermittlung der Kronenhöhe dar. Aufgrund der Unsicherheiten in der Festlegung der maßgebenden Wasserstände und der dazugehörigen Wellenparameter kann Wellenüberlauf nicht ausgeschlossen werden und war daher im vergangenen Jahrzehnt Gegenstand zahlreicher nationaler und internationaler Forschungsprojekte. Der Wissensstand zum Thema Wellenüberlauf wurde auf der Grundlage dieser Forschungsprojekte signifikant verbessert und erweitert. Neu- und Weiterentwicklungen des Wissensstandes wurden insbesondere hinsichtlich der folgenden Themen erzielt:

- Ansätze zur Ermittlung mittlerer Wellenüberlaufsraten für verschiedene Bauwerkstypen (Deiche, Ufermauern, senkrechte und geschüttete Wellenbrecher, HWS-Wände, etc.)
- Ansätze zur Berücksichtigung von Einflussfaktoren auf den Wellenüberlauf (Rauheit, Bermen, Schräger Wellenauflauf/-überlauf, Wind, Naturspektren, Kronenmauern)
- Ansätze zur Beschreibung der Wellenüberlaufströmung (Schichtdicken, Überlaufgeschwindigkeiten)
- Methoden zur Ermittlung mittlerer Wellenüberlaufsraten (z.B. CLASH-Database, Neural Network, etc.)
- Ermittlung des Gefahrenpotentials durch Wellenüberlauf (kritische Wellenüberlaufsraten, kritische Überlaufgeschwindigkeiten)
- Untersuchungen zum Einfluss von Maßstabs- und Modelleffekten auf den Wellenüberlauf
- Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Bemessung auf Wellenauflauf und -überlauf
- Probabilistische Ansätze zur Bemessung von Hochwasser- und Küstenschutzbauwerken.

Aufgrund der zahlreichen Weiter- und Neuentwicklungen zum Wellenüberlauf sollen die vorhandenen Richtlinien und Empfehlungen zum Wellenauflauf/Wellenüberlauf in Deutschland, den Niederlanden und Großbritannien aktualisiert werden.

- Großbritannien: Design and Assessment Manual Wave Overtopping of Seawalls (BESLEY, 1999)
- Niederlande: Technical Report Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes (VAN DER MEER, 2002)
- Deutschland: Kap. 4 der Empfehlungen des Arbeitsausschusses Küstenschutzwerke (EAK, 2002).

Da nationale Überarbeitungen der jeweiligen Richtlinien und Empfehlungen sehr zeit- und kostenintensiv sind und Synergieeffekte der jeweiligen nationalen Forschungsschwerpunkte nicht oder nur begrenzt genutzt werden können, haben die Environmental Agency (UK), Rijkswaterstaat (NL) und das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen sowie der HTG-Ausschuss für Küstenschutzwerke (D) die Erarbeitung eines europäischen Wellenüberlaufhandbuchs unter Leitung von HR Wallingford im Rahmen des Eurotop-Projektes vereinbart. Im Folgenden soll das europäische Wellenüberlaufhandbuch kurz mit „*Eurotop-Manual*“ bezeichnet werden. Weitere Partner im Eurotop-Projekt waren neben HR Wallingford auch INFRAM (NL), die Bundesanstalt für Wasserbau (D) sowie die Universitäten von Edinburgh (UK) und Braunschweig (D). Ergänzende Beiträge zum *Eurotop-*

Manual kamen vom *Steering Committee* (Projektbegleitende Lenkungsgruppe) sowie von Fachkollegen aus Italien und Dänemark.

Der vorliegende Beitrag soll einen Überblick über die Schwerpunkte des *Eurotop-Manuals* geben. Ausgewählte Kapitel wurden dazu teilweise übersetzt. Auf eine wortwörtliche Übersetzung wurde bewusst verzichtet. Daher darf der vorliegende Beitrag auch nicht für die Ermittlung des Wellenüberlaufs für Hochwasser- und Küstenschutzbauwerke verwendet werden. Vielmehr wird für eine Bemessung auf das *Eurotop-Manual* verwiesen, das in Heft 73 der Küste erscheinen wird bzw. auf www.overtopping-manual.com zum Download zur Verfügung steht.

2. Struktur des Eurotop-Manuals

Das Eurotop-Manual besteht aus zwei Teilen:

- *Eurotop-Manual* (das eigentliche Handbuch).
- *Calculation Tool* (internet-basierte Berechnungshilfe)

Das *Eurotop-Manual* besteht aus ca. 200 Seiten Text und ist unterteilt in die folgenden Kapitel:

- Kapitel 1: Einleitung
- Kapitel 2: Wasserstände und Wellenbedingungen
- Kapitel 3: Zulässige Wellenüberlauraten
- Kapitel 4: Ermittlung des Wellenüberlaufs
- Kapitel 5: Deiche und geneigte Ufermauern
- Kapitel 6: Schüttsteinböschungen
- Kapitel 7: Vertikale Bauwerke.

Ergänzt wird der Textteil um Informationen zur Struktur des *Calculation Tools* sowie zu Rechenbeispielen. Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, einen Überblick über beide Teile zu geben. Dazu werden in Kap. 3 wesentliche Teile des *Eurotop-Manuals* und in Kap. 4 die Elemente des *Calculation Tools* kurz beschrieben.

3. Eurotop-Manual

3.1 Einführung

Das *Eurotop-Manual* beschreibt Methoden zur Ermittlung von Wellenauflauf und Wellenüberlauf für Hochwasser- und Küstenschutzbauwerke. Es empfiehlt Methoden zur Ermittlung mittlerer Wellenüberlauraten, maximaler Wellenüberlaufvolumina und des Anteils überlaufender Wellen. Für ausgewählte Bauwerke werden auch Ansätze zur Ermittlung von Überlaufgeschwindigkeiten und Schichtdicken des Wellenauflauf- und Wellenüberlaufschwalls empfohlen. Das Handbuch soll dem planenden Ingenieur außerdem Hilfestellung geben, die zulässigen Wellenüberlauraten unter Bemessungsbedingungen festzulegen und dann auf der Grundlage der verfügbaren Ansätze nachzuweisen, dass die zulässigen Wellenüberlauraten nicht überschritten werden.

Das *Eurotop-Manual* beschränkt sich in diesem Zusammenhang auf drei grundlegende Bauwerkstypen, die einen Großteil der Hochwasser- und Küstenschutzanlagen in Europa abdecken:

- Flach geneigte Deichböschungen und flach geneigte Ufermauern

- Schüttsteinböschungen und andere flach geneigte Böschungen mit rauer Oberfläche
- Vertikale Wände und steile Böschungen.

Bei der Wellenüberlaufberechnung sind Unsicherheiten sowohl in den Eingangsparametern (Wellenparameter, geometrische Parameter) als auch in den Wellenüberlaufmodellen selber zu berücksichtigen. Daher wurde das Wellenüberlaufhandbuch so aufbereitet, dass sowohl eine deterministische als auch eine probabilistische Ermittlung des Wellenüberlaufs möglich ist. Entsprechende Ansätze werden getrennt dargestellt, und am Ende jedes Bauwerkskapitels (Kap. 5, 6, 7) werden Empfehlungen zum Umgang mit den verschiedenen Unsicherheiten gegeben.

3.2 Wasserstände und Wellenbedingungen

Das *Eurotop-Manual* legt seinen Schwerpunkt auf die Aspekte Wellenauflauf und Wellenüberlauf. Es handelt sich nicht um ein Bemessungshandbuch, in dem der gesamte Planungs- und Bemessungsprozess eines Hochwasserschutzbauwerks beschrieben wird. Daher kann es auch nicht Ziel des *Eurotop-Manuals* sein, Empfehlungen zur Ermittlung der maßgebenden Wasserstände und der relevanten Seegangsbedingungen zu geben. Vielmehr werden die wesentlichen Eingangsparameter für die Wellenüberlaufberechnung aufgezeigt und Empfehlungen zu deren Bestimmung gemacht. Hierzu zählen die Wasserstände, die Wellenbedingungen, die Wellenumwandlung im wassertiefenbegrenzten Bereich und Strömungen. In diesem Zusammenhang werden auch kurze Erläuterungen zu den relevanten Prozessen, Modellen und Werkzeugen sowie Hinweise auf das relevante Schrifttum gegeben. Die Unsicherheiten in den Eingangsparametern sowie der Umgang mit den Unsicherheiten werden diskutiert.

3.3 Zulässige Wellenüberlauraten

Ziel eines Hochwasser- und Küstenschutzbauwerks ist es, die Wellenüberlaufmengen und damit die Überflutung des Hinterlandes zu begrenzen. Die zulässigen Wellenüberlaufmengen sind ortsspezifisch und hängen von der Größe und Nutzung des geschützten Gebietes, der Kapazität der Entwässerungsgräben, dem Bauwerkstyp und dem Wiederkehrintervall eines Sturmflutereignisses ab.

Es ist nicht möglich, exakte Grenzen für zulässige Wellenüberlauraten für alle denkbaren Randbedingungen festzulegen. Im Rahmen des *Eurotop-Manuals* wird daher eine Hilfestellung zur Abschätzung zulässiger mittlerer Wellenüberlauraten und zulässiger maximaler Wellenüberlaufvolumina gegeben. Diese Grenzwerte sollten unter den jeweiligen Randbedingungen auf die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden.

Im *Eurotop-Manual* finden sich Hinweise für folgende Gefährdungen infolge Wellenüberlauf:

- Zulässige Grenzwerte für Fußgänger
- Zulässige Grenzwerte für Fahrzeuge
- Zulässige Grenzwerte für Eigentum (Schiffe, Bauwerke, etc.) hinter der Hochwasserschutzanlage
- Zulässige Grenzwerte für Schäden am Hochwasserschutzbauwerk selber.

Beispielhaft werden hier die zulässigen Grenzwerte für Deiche und Ufermauern dargestellt (Tab. 1), die auf der Basis von Erfahrungswissen und früheren Untersuchungen festgelegt wurden.

Anfang 2007 wurden Wellenüberlaufversuche an einem echten Deich in den Niederlanden im Rahmen des europäischen ComCoast-Projekts durchgeführt. Der Deich hatte eine 1:3 geneigte Binnenböschung und eine gute Kleiabdeckung (Sandgehalt niedriger als 30 %) mit einer Grassode. Ein Wellenüberlaufsimulator wurde verwendet, um den Erosionswiderstand der Binnenböschung gegen Wellenüberlauf zu untersuchen. Im Rahmen der Versuche wurde jeweils eine sechsstündige Sturmflut für verschiedene konstante mittlere Wellenüberlaufsraten simuliert. Die Wellenüberlauftrate wurde schrittweise von 0,1 l/(sm) über 1; 10; 20; 30 und schließlich auf 50 l/(sm) erhöht. Nach diesen simulierten Wellenüberlaufsraten befand sich die Böschung weiterhin in einer guten Verfassung und zeigte nur wenige Erosionserscheinungen. Der Erosionswiderstand der Böschung gegen Wellenüberlauf war sehr hoch.

Für eine zweite Versuchsphase wurden Wellenüberlaufversuche für eine nackte Kleiböschung ohne Grassode durchgeführt. In diesem Fall konnten bei gleicher Steigerung der Wellenüberlaufbelastung bei rd. 10 l/(sm) zwei große Erosionslöcher festgestellt werden. Erste Analysen dieser Versuche lassen den Schluss zu, dass die zulässigen Wellenüberlaufsraten in Zukunft verbessert und präzisiert werden können. Allerdings sind zusätzliche Versuche in der Natur erforderlich, um auch den Einfluss der Kleiqualität, des Grastyps und der Unterhaltung zu berücksichtigen.

Grenzwerte werden im *Eurotop-Manual* nicht nur für mittlere Wellenüberlaufsraten angegeben. Es wurden auch Grenzwerte für Wellenüberlaufvolumina, Wellenüberlaufgeschwindigkeiten und Kräfte infolge Wellenüberlauf zusammengestellt.

Tab. 1: Zulässige Grenzwerte für Schäden an der Krone oder der Binnenböschung von Hochwasserschutzbauwerken

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s/m)
Embankment seawalls/sea dikes	
No damage if crest and rear slope are well protected	50–200
No damage to crest and rear face of grass covered embankment of clay	1–10
No damage to crest and rear face of embankment if not protected	0.1
Promenade or revetment seawalls	
Damage to paved or armoured promenade behind seawall	200
Damage to grassed or lightly protected promenade or reclamation cover	50

NB: Results of recent (2007) tests on inner slopes of sea dykes in the Netherlands will modify some limits.

3.4 Ermittlung des Wellenüberlaufs

Verschiedene Methoden stehen zur Ermittlung des Wellenüberlaufs für unterschiedliche Bauwerkstypen unter vorgegebenen Wellen- und Wasserstandsrandbedingungen zur Verfügung. Jede Methode hat ihre individuellen Stärken und Schwächen. Theoretisch können analytische Methoden verwendet werden, um den Einfluss der Belastungen (Wellen) auf das Bauwerk aus der Kenntnis der physikalischen Prozesse zu ermitteln. Sehr selten liegen jedoch so einfache und kontrollierbare Randbedingungen vor, dass der Wellenüberlauf analytisch ermittelt werden kann. Daher werden analytische Methoden im Folgenden nicht weiter diskutiert.

3.4.1 Empirische Methoden

Überwiegend werden empirische Methoden zur Ermittlung des Wellenüberlaufs aus den maßgebenden Wellen- und Bauwerksparametern verwendet. Diese empirischen Methoden stellen den Schwerpunkt des *Eurotop-Manuals* dar. Die zur Ermittlung von Wellenüberlaufparametern (mittlere Wellenüberlauraten, individuelle Wellenüberlaufvolumina) empfohlenen Ansätze wurden im *Eurotop-Manual* getrennt für Deiche, Schüttsteinböschungen und vertikale Wände bzw. steil geneigte Böschungen zusammengefasst.

Empirische Methoden stellen eine vereinfachte Beschreibung der physikalischen Prozesse dar. Üblicherweise werden dimensionslose Gleichungen verwendet, um die mittlere Wellenüberlaufrate als Funktion der maßgebenden Wellen- und Bauwerksparameter zu ermitteln. Die Form und die Koeffizienten dieser dimensionslosen Gleichungen werden anhand von Modellversuchen oder Naturmessungen bestimmt.

Da die mittlere Wellenüberlaufrate sehr einfach im physikalischen Modell zu messen ist, wurden weltweit sehr viele Modellversuche sowohl im Rahmen der Grundlagenforschung für einfache Bauwerke als auch im Rahmen der angewandten Forschung für praktische Aufgaben durchgeführt. Im Rahmen des europäischen CLASH-Projektes wurde eine Datenbank mit mehr als 10.000 Modellversuchen zum Wellenüberlauf aufgestellt. Einige der Testserien der *CLASH-Datenbank* wurden auch zur Entwicklung empirischer Gleichungen verwendet. Diese empirischen Gleichungen sind dann auf bestimmte typische Bauwerksgeometrien wie flach geneigte Böschungen (z.B. Deiche), raue Böschungen (z.B. geschüttete Wellenbrecher) oder vertikale Bauwerke (z.B. Hochwasserschutzmauern) beschränkt.

Die generelle Form der Wellenüberlaufgleichung zur Bestimmung mittlerer Wellenüberlauraten lautet:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \exp(-bR_c/H_{m0})$$

mit :

q = mittlere Wellenüberlaufrate [$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$]

g = Erdbeschleunigung [m/s^2]

H_{m0} = Wellenhöhe [m]

a, b = empirische Koeffizienten [-]

R_c = Freibordhöhe [m].

Es handelt sich hierbei um eine exponentielle Gleichung unter Verwendung der dimensionslosen Wellenüberlaufrate $q/(gH_{m0}^3)^{1/2}$ und der relativen Freibordhöhe R_c/H_{m0} . Dieser Gleichungstyp kann in einer logarithmischen Darstellung als Gerade dargestellt werden und ermöglicht somit den direkten Vergleich der Gleichungen für verschiedene Bauwerkstypen (Abb. 1).

Eine weitere Möglichkeit, verschiedene Bauwerkstypen miteinander zu vergleichen, ist die Darstellung der dimensionslosen mittleren Wellenüberlaufrate als Funktion der Böschungsneigung (Abb. 2). Eine vertikale Wand bedeutet $\cot\alpha = 0$. Steile glatte Böschungen stellen den Bereich zwischen $1 \leq \cot\alpha \leq 3$ dar. Sehr steile Wände haben Neigungen zwischen $0 < \cot\alpha < 1$. Flache Ufermauern und Deiche haben Böschungsneigungen von $\cot\alpha \geq 2$ bis 3. Abb. 2 zeigt Kurven für relative Freibordhöhen von $R_c/H_{m0} = 1,5$ und 3,0.

Steile Böschungen ergeben bei gleicher relativer Freibordhöhe die größten Wellenüberlauraten. Die Wellenüberlauraten werden für flachere Böschungen in Abhängigkeit von der

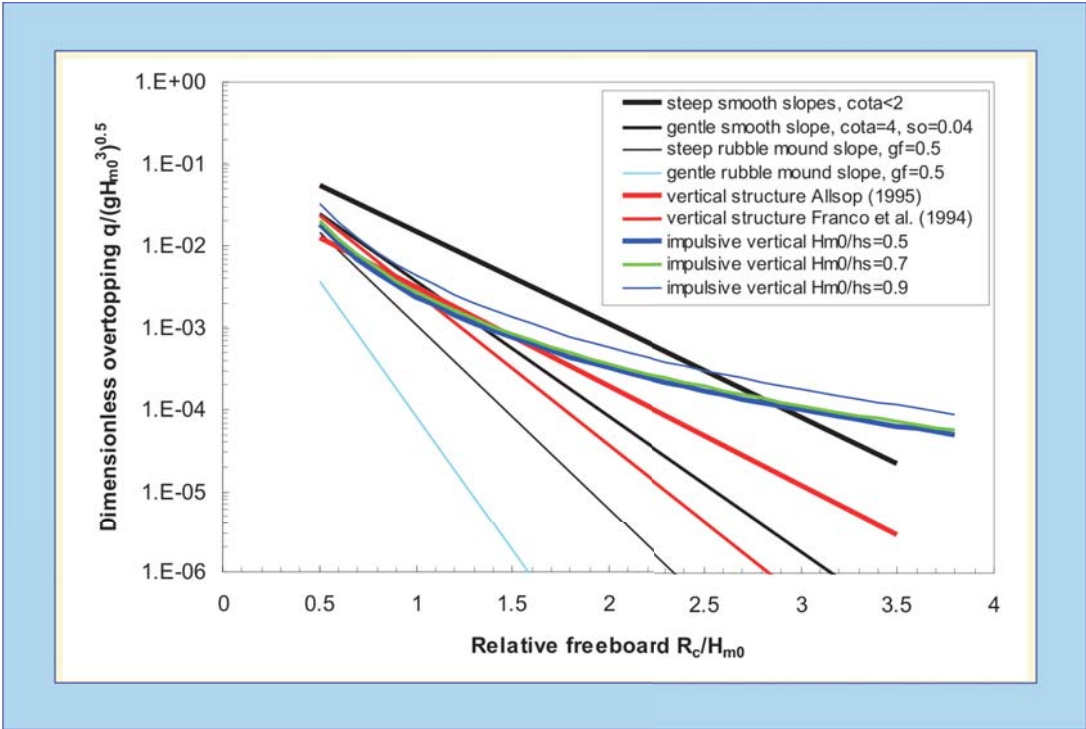


Abb. 1: Vergleich von Wellenüberlaufformeln für verschiedene Bauwerkstypen

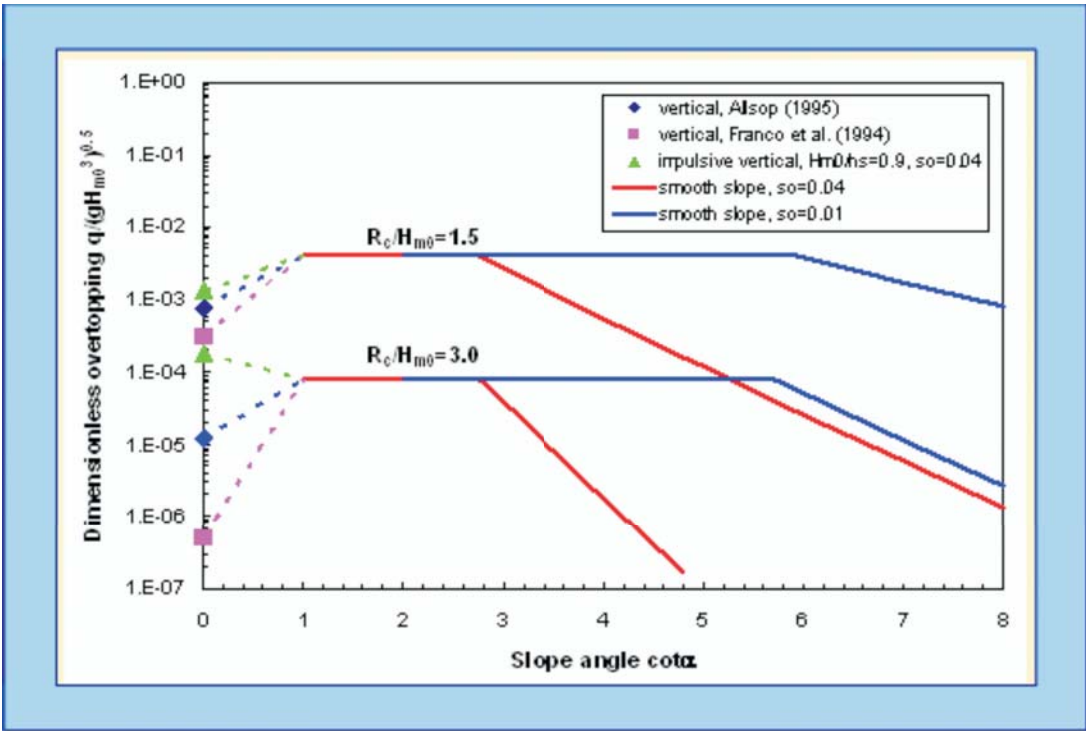


Abb. 2: Vergleich von Wellenüberlaufformeln für verschiedene Böschungsneigungen

Wellenperiode kleiner. Vertikale Wände ergeben unter gleichen Wellenbedingungen bei gleicher relativer Freibordhöhe weniger Wellenüberlauf als steile glatte Böschungen. Dies gilt nicht für hohe Bauwerke unter Druckschlagbedingungen.

3.4.2 CLASH-Datenbank

Eine weitere Methode zur Bestimmung mittlerer Wellenüberlauraten stellt die *CLASH-Datenbank* dar, die auf der Grundlage gemessener mittlerer Wellenüberlauraten in Modellversuchen und in der Natur aufgestellt wurde und mehr als 10 000 Modellversuche beinhaltet, die durch 31 verschiedene Parameter beschrieben werden. Die Verwendung der *CLASH-Datenbank* kann kompliziert sein und erfordert Erfahrung in der Verwendung der Eingangsdaten.

Jeder Modellversuch wird durch 29 geometrische und hydraulische Parameter sowie zwei Parameter zu Charakterisierung der Zuverlässigkeit und der Komplexität des Modellversuchs und des Bauwerks beschrieben. Die Datenbank steht als Excel-Datei zur Verfügung und beinhaltet eine Matrix mit 31 Spalten und mehr als 10 000 Reihen.

Wenn ein Anwender ein bestimmtes Bauwerk untersuchen möchte, so kann er in der Datenbank nach einem ähnlichen Bauwerk unter ähnlichen Wellenbedingungen mit gemessenen mittleren Wellenüberlauraten suchen. Es kann also möglich sein, dass ein geometrisch ähnliches Bauwerk bereits unter den richtigen Wellenbedingungen untersucht wurde! Die Suche kann durch Verwendung von Filtern in der Excel-Datenbank durchgeführt werden. Eine umfangreiche Erklärung der Vorgehensweise wird im *Eurotop-Manual* gegeben.

3.4.3 Neuronales Netz (NN)

Einfacher und schneller als die Verwendung der *CLASH-Datenbank* ist die Verwendung eines neuronalen Netzes (NN), das mit den Daten der *CLASH-Datenbank* trainiert wurde. Das neuronale Netz kann entweder automatisch auf einem PC laufen, oder in andere Simulationsverfahren eingebunden werden. Damit eignen sich neuronale Netze insbesondere in Kombination mit Risikoanalysen.

Künstliche neuronale Netze werden in vielen Gebieten und auch im Küsteningenieurwesen verwendet, so z.B. zur Ermittlung der Stabilität einer Steinschüttung, der Kräfte auf Wände, der Wellentransmission und des Wellenüberlaufs. Die Entwicklung eines neuronalen Netzes ist sinnvoll, wenn:

- der zu beschreibende Prozess sehr kompliziert ist und von einer Vielzahl von Eingangsparametern abhängt
- eine große Anzahl von Daten zur Verfügung stehen.

Dies waren u.a. die Gründe, das EU-CLASH-Projekt zu initiieren, in dem zwei neuronale Netze entwickelt wurden. Ein neuronales Netz ist das offizielle Netz des CLASH-Projektes, das von Delft Hydraulics entwickelt wurde. Es läuft als ausführbare Datei und kann von der CLASH-Homepage sowie der Eurotop-Homepage zusammen mit einem Handbuch heruntergeladen werden. Das zweite neuronale Netz wurde im Rahmen einer Dissertation an der Universität von Gent/Belgien entwickelt (VERHAEGHE, 2005). Dieses neuronale Netz wurde in einer MatLab®-Umgebung entwickelt und benötigt daher MatLab®.

In beiden Fällen basiert das neuronale Netz auf einer Struktur entsprechend Abb. 3 mit einer Eingabeebene aus 15 Eingangsparametern (β , h , H_{m0toe} , $T_{m-1,0toe}$, h_p , B_p , γ_p , $\cot\alpha_d$, $\cot\alpha_w$,

R_c , B , h_b , $\tan \alpha_b$, A_c , G_c) und einem Ausgabeparameter in der Ausgabebene (d.h. der mittleren Wellenüberlafrate q).

Die Eingabeebene des neuronalen Netzes erfordert 10 Bauwerksparameter und 4 hydraulische Parameter. Die hydraulischen Parameter sind Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenrichtung und Wassertiefe unmittelbar vor dem Bauwerk. Die Bauwerksparameter beschreiben nahezu jede mögliche Konfiguration durch Festlegung des Bauwerksfußes (2 Parameter), zweier Böschungen (inkl. einer vertikalen Wand und einer Wellenumlenkwand), einer Berme (2 Parameter) und der Bauwerkskrone (3 Parameter). Den zehnten Parameter stellt die Böschungsrauheit dar (γ_f). Verschiedene Böschungsrauheiten können nicht berücksichtigt werden. Einen Überblick der verschiedenen Bauwerkskonfigurationen, die mit dem neuronalen Netz des CLASH-Projektes untersucht werden können, gibt Abb. 4.

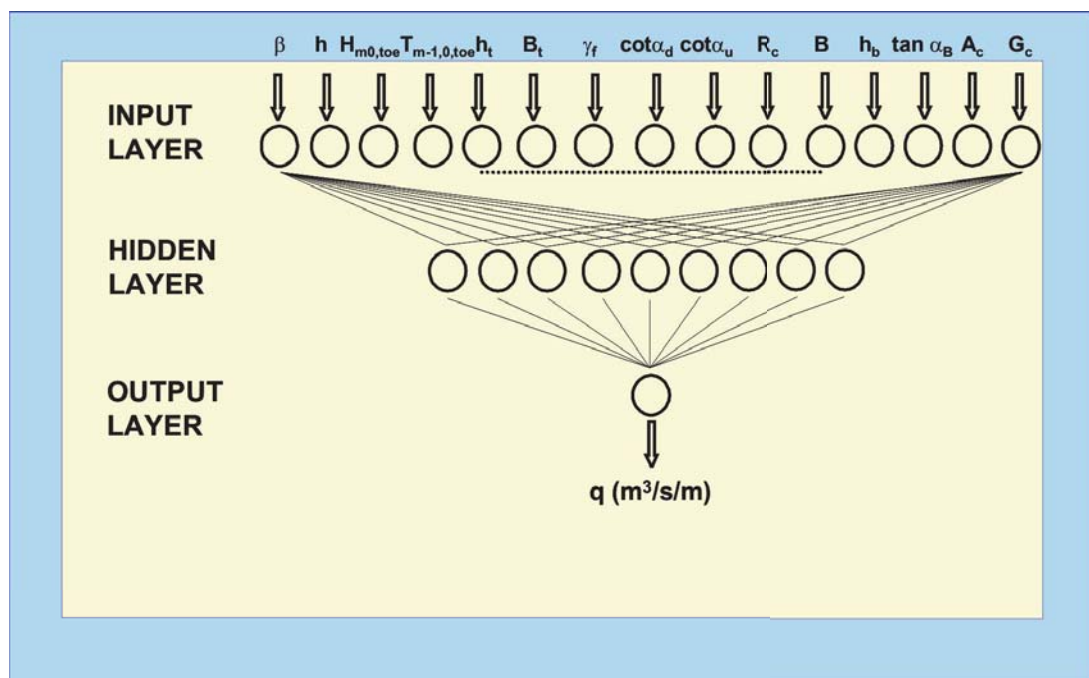


Abb. 3: Aufbau eines neuronalen Netzwerks für Wellenüberlauf

Die Entwicklung eines neuronalen Netzes ist eine schwierige und komplizierte Aufgabe. Alle Daten müssen sehr sorgfältig verifiziert werden, und das Training eines neuronalen Netzes erfordert besondere Fähigkeiten. Auf der anderen Seite ist die Anwendung eines fertigen neuronalen Netzes sehr einfach und stellt auch einen unerfahrenen Anwender ohne Kenntnisse von neuronalen Netzen vor keine besonderen Probleme und Hürden! Dies ist der Grund, warum das neuronale CLASH-Netz Bestandteil des *Eurotop-Manuals* ist.

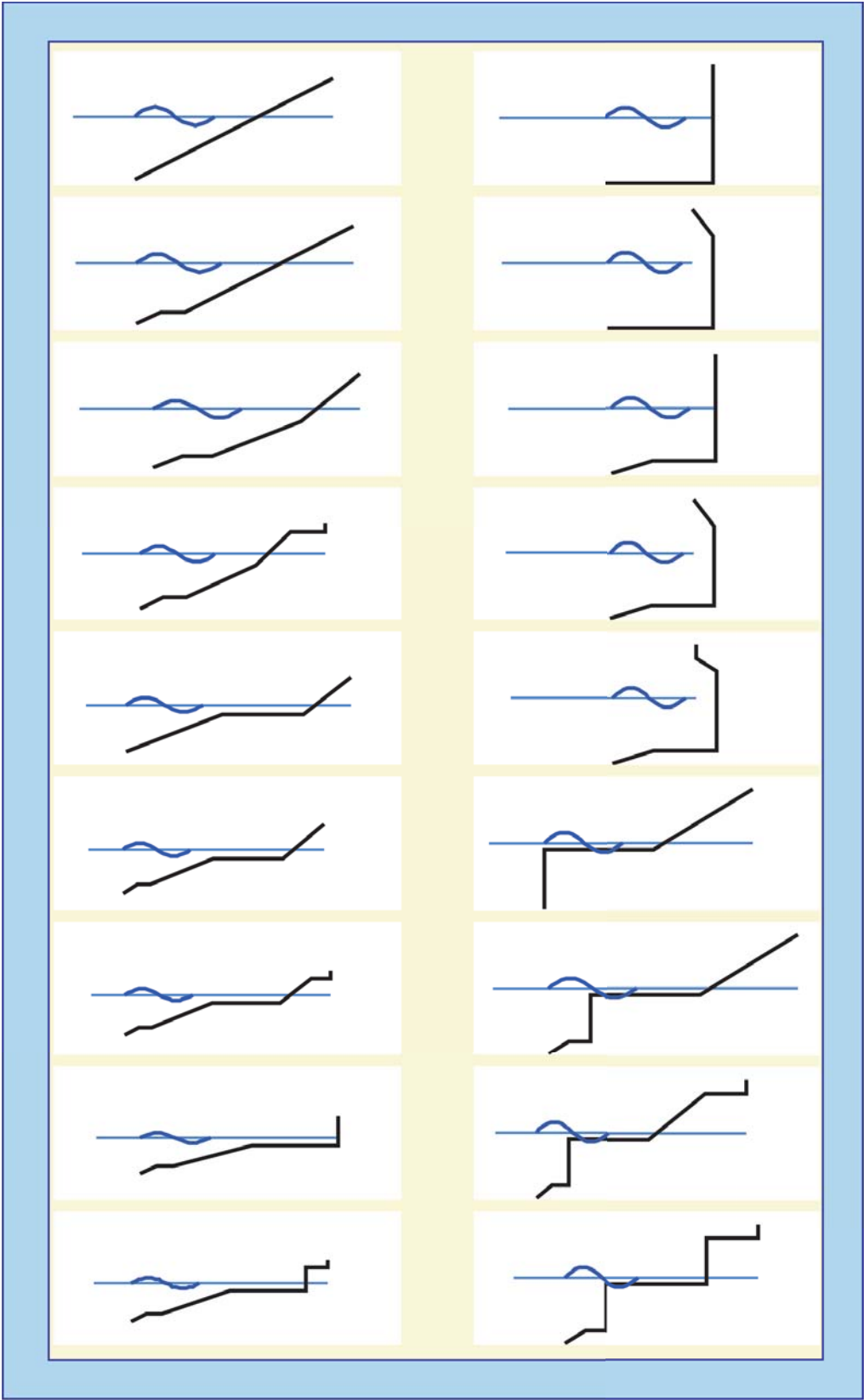


Abb. 4: Überblick möglicher Bauwerkskonfigurationen für das neuronale Netz

In vielen Fällen ist der Anwender nicht nur an einer, sondern an vielen Lösungen interessiert. Da die Eingabedatei keine Begrenzungen hinsichtlich der Anzahl von Eingabezeilen aufweist (= Anzahl der Berechnungen), ist es sehr einfach, einen oder mehrere Parameter zu variieren und einen Trend für eine bestimmte Veränderung dieses Parameters zu finden. Beispielhaft zeigt Abb. 5 wie verschiedene Maßnahmen (Kronenerhöhung, Berme auf Höhe des Bemessungswasserstandes, breitere Krone, Kronenmauer) den Wellenüberlauf beeinflussen. Das Ergebnis wurde mit dem CLASH-NN erzielt.

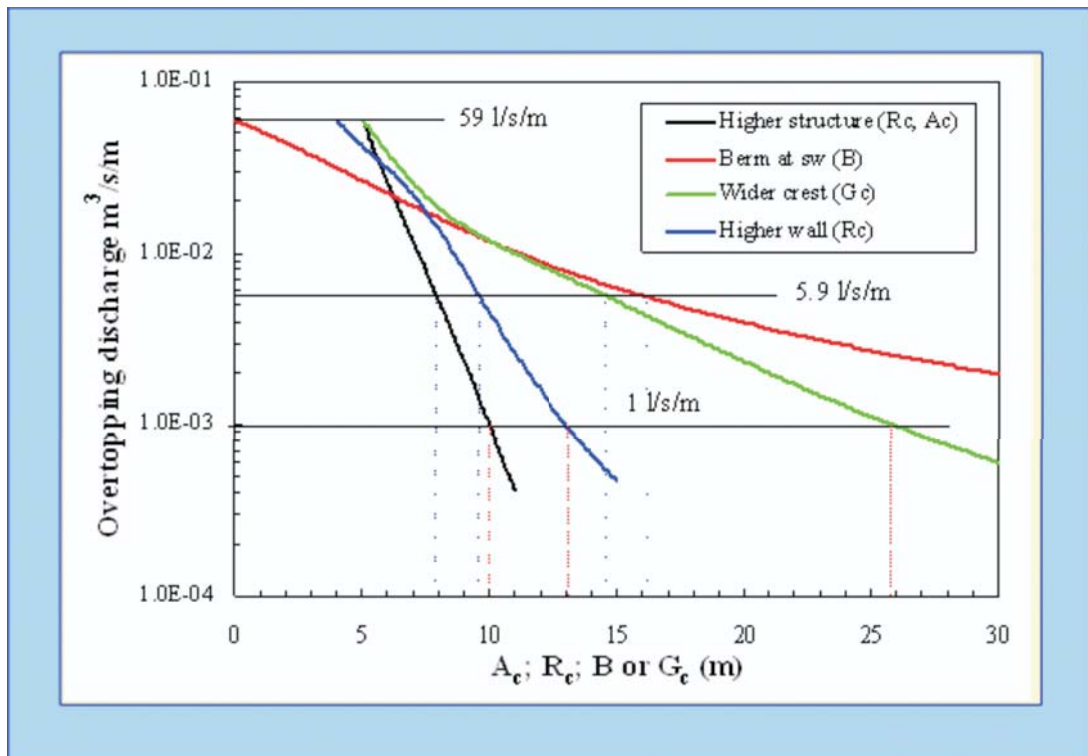


Abb. 5: Trendberechnung mit neuronalem Netz. Die Darstellung zeigt den Einfluss verschiedener konstruktiver Maßnahmen zur Reduktion der mittleren Wellenüberlaufrate

3.4.4 PC - Overtop

PC-Overtop wurde zusammen mit dem Technical TAW-Report „Wave run-up and wave overtopping at dikes“ für die Sicherheitsüberprüfung niederländischer Deiche entwickelt. Der TAW-Report wurde durch die Kapitel 5 bis 7 des *Eurotop-Manuals* ersetzt. Das Programm *PC-Overtop* basiert auf den dort angegebenen Gleichungen (s. Abschnitt 3.5 bis 3.7), wurde in diesem Zusammenhang für Nutzer des *Eurotop-Manuals* verfügbar gemacht und kann ebenfalls von der *Eurotop*-Homepage herunter geladen werden. Da das Programm für deichähnliche Bauwerksgeometrien entwickelt wurde, sollte es nur für geböschte Bauwerke eingesetzt werden. Um den Wellenüberlauf zu berechnen, wird das Bauwerk in einzelne Sektionen unterteilt, die durch x-y-Koordinaten beschrieben werden. Für jede Sektion kann ein unterschiedlicher Rauheitsbeiwert definiert werden. *PC-Overtop* kann alle relevanten

Überlaufparameter (mit Ausnahme von Strömungsgeschwindigkeiten und Schichtdicken) berechnen:

- Wellenaufbauhöhe $R_{u,2\%}$
- Mittlere Wellenüberlaufhöhe q
- Anteil überlaufender Wellen P_{ow}
- Wellenüberlaufvolumen pro Welle V
- Bauwerkshöhe bei vorgegebener Wellenüberlaufhöhe z_K

Die größten Vorteile von *PC-Overtop* sind somit:

- Jedes geböschte Bauwerk kann untersucht werden,
- Unterschiedliche Böschungsrauheiten werden berücksichtigt,
- Verschiedene Wellenüberlaufparameter werden berechnet, nicht nur mittlere Wellenüberlaufhöhen.

PC-Overtop ist nicht in der Lage, Wellenüberlaufparameter für vertikale, raue und durchlässige Bauwerke zu berechnen. Dies ist als größter Nachteil des Verfahrens zu sehen.

Ein typischer Deichquerschnitt, der sehr gut für die Berechnung mit *PC-Overtop* geeignet ist, ist in Abb. 6 dargestellt.

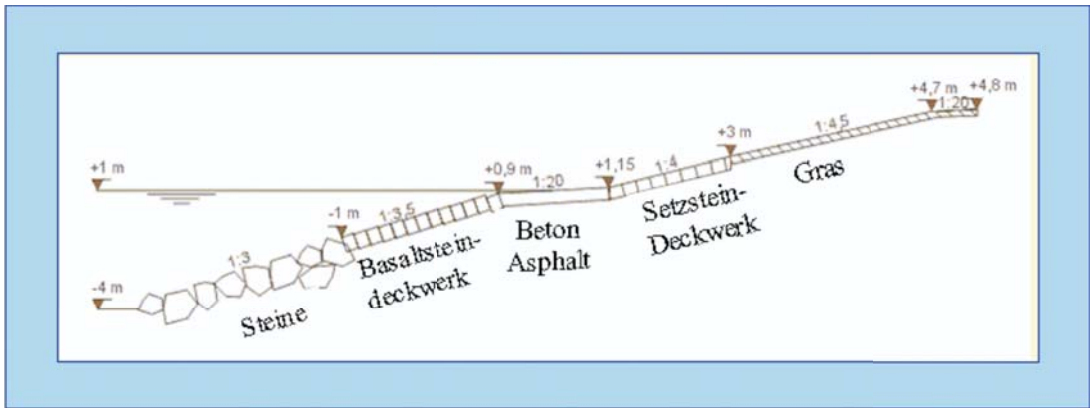


Abb. 6: Beispiel für einen komplexen Deichquerschnitt

3.4.5 Numerische Modellverfahren

Unter hydraulischen oder geometrischen Randbedingungen, für die keine Modellversuche existieren oder die oben beschriebenen Methoden keine vertrauenswürdigen Ergebnisse liefern, werden weitere Methoden empfohlen. Eine Anzahl numerischer Modellverfahren stehen hierfür zur Simulation des Wellenüberlaufprozesses zur Verfügung. Die numerischen Modellverfahren vereinfachen den Wellenüberlaufprozess und sind somit auf bestimmte Bauwerkstypen und Wellenbedingungen beschränkt. Im Allgemeinen benötigen numerische Modellverfahren eine Kalibrierung und Validierung der Ergebnisse für eine erfolgreiche Nutzung. Theoretisch können validierte numerische Modellverfahren dann auch auf beliebige Geometrien angewandt werden. Die Verwendung von numerischen Modellen ist allerdings auf wenige Nutzer beschränkt, die ein entsprechendes Verfahren besitzen, da deren Entwicklung zeit- und kostenintensiv ist.

Realistische Simulationen von Wellenüberlauf sollten in der Lage sein, die Prozesse Shoaling, Wellenbrechen, Druckschläge am Bauwerk und den eigentlichen Wellenüberlauf

zu simulieren. Wellenbelastungen von durchlässigen Bauwerken mit hoher Durchlässigkeit können nur dann im Modell nachvollzogen werden, wenn die Strömungsprozesse im porösen Medium aber auch die Austauschprozesse in das Bauwerk hinein sowie aus dem Bauwerk heraus berücksichtigt werden können. Weiterhin sollten numerische Modelle in der Lage sein, mehr als 1000 Wellen zu simulieren, um vertrauenswürdige Wellenüberlaufergebnisse zu liefern.

Zurzeit existieren keine numerischen Modelle, die in der Lage sind, alle oben genannten Kriterien zu erfüllen und den Wellenüberlauf genau und in kurzer Zeit zu simulieren. Vermutlich werden noch Jahre vergehen, bis entsprechende Modelle vorliegen. Allerdings existieren einige Modellsysteme, die einen Teil der vorgegebenen Kriterien erfüllen. Diese Modellsysteme können in zwei Kategorien klassifiziert werden: Modellsysteme auf Basis der nichtlinearen Flachwassergleichungen (NLSW) und auf der Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen. Diese prinzipiellen Modellverfahren werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit sowie der mathematischen Grundlagen diskutiert.

Modellverfahren auf der Grundlage der Navier-Stokes Gleichungen

Die Strömung in Navier-Stokes-Modellen wird generell anhand zweier unterschiedlicher Modelltechniken nachgebildet: Die *Volume of Fluid* (VOF) Methode (HIRT u. NICHOLS, 1981) und die *Smooth Particle Hydrodynamics* (SPH) Methode (MONAGHAN, 1994). Beide Methoden benötigen eine detaillierte Beschreibung des Strömungsraumes. Die Navier-Stokes-Gleichungen müssen dann für jeden Punkt des Strömungsraumes (Gitterknoten, Partikel) gelöst werden. Trotz der üblichen Beschränkung auf zwei Dimensionen und zwei bis drei Wellenlängen benötigen diese Modelle ein Vielfaches der Echtzeit für die Simulation eines gleichen Zeitschritts.

Ein Modellverfahren auf der Basis der Navier-Stokes-Gleichungen ist zum Beispiel das VOF-Verfahren *Skylla*. Es wurde für eine große Bandbreite von Anwendungsfällen bei hoher Genauigkeit und einer detaillierten Beschreibung des Strömungsfeldes für verschiedene Bauwerkstypen, auch durchlässige Bauwerke entwickelt. *Skylla* ist in der Lage, Strömungen mit freier Oberfläche und poröse Strömungen zu simulieren. Allerdings ist das Verfahren auf regelmäßige Wellen beschränkt, da der Rechenaufwand für Wellenspektren zu hoch ist.

Auch wenn der Rechenaufwand sehr hoch ist, können diese Modellverfahren eine gute Beschreibung des Druck- und Strömungsfeldes im porösen Medium und der Belastungen durch brechende Wellen inkl. Druckschläge geben. Die Berechnung der Wellentransformation und des Wellenauflaufes für regelmäßige Wellen ist möglich, allerdings ist die Untersuchung des Wellenüberlaufes nur für einige wenige unregelmäßige Wellen möglich.

Modellverfahren auf der Grundlage der nichtlinearen Flachwassergleichungen

Die eindimensionalen Flachwassergleichungen wurden ursprünglich zur Simulation von horizontalen Strömungsprozessen entwickelt. Die Gleichungen beschreiben die Wassertiefe und die horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten zeit- und ortsabhängig. Vertikale Strömungsgeschwindigkeiten werden vernachlässigt und lediglich hydrostatische Druckverhältnisse berücksichtigt. Die nichtlinearen Flachwassergleichungen (NLSW) können aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet werden und vereinfachen das mathematische Problem stark. Sie erlauben jedoch realistische, vereinfachte und schnelle Simulationen der Strömungsprozesse.

Damit die Annahmen gültig sind, dürfen diese Verfahren nur unter Flachwasserverhältnissen angewandt werden ($h/L < 0.05$). Weiterhin wird vorausgesetzt, dass die Wellen im untersuchten Bereich entweder brechen oder bereits gebrochen sind. Mathematisch wird in diesem Zusammenhang vorausgesetzt, dass sich Wellen wie Boren ausbreiten (HIBBERD u. PEREGRINE, 1979). Verfahren auf der Grundlage der NLSW-Gleichungen können auch die Prozesse an der Bauwerkskrone simulieren.

ODIFLOCS (VAN GENT, 1994) ist ein eindimensionales, zeitabhängiges Verfahren zur Simulation des bauwerksnormalen Wellenangriffs auf durchlässige und nicht-durchlässige Bauwerke. Das NLSW-Modellverfahren wurde mit einem Verfahren zur Simulation der Strömungsprozesse im porösen Medium gekoppelt (KOBAYASHI et al., 1987). Auf diese Weise können die Infiltration und die Durchströmung eines porösen Mediums getrennt von der Simulation der Prozesse mit freier Oberfläche simuliert werden. ODIFLOCS wurde entwickelt, um Durchlässigkeitskoeffizienten, Wellentransmission sowie den Einfluss des Wellenspektrums auf den Wellenaufbau und Wellenüberlauf abzuschätzen.

Das ANEMONE-Modellverfahren wurde von DODD (1998) entwickelt und kann sowohl im ein- als auch zweidimensionalen Bereich (horizontal) eingesetzt werden (CLARKE et al., 2004). Die landwärtigen Randbedingungen sowohl für die Strömung im porösen Medium als auch für die Strömung mit freier Oberfläche können als offene oder geschlossene Randbedingung modelliert werden (nicht bzw. voll reflektierende Randbedingung). Das Verfahren ist in der Lage, Stürme mit bis zu 1000 Wellen ohne großen Rechenaufwand zu simulieren und den Wellenüberlauf jeder einzelnen Welle zu bestimmen.

Diese und ähnliche numerische Modellverfahren sind sehr wertvolle Werkzeuge zur Ermittlung des Wellenüberlaufverhaltens, wenn z.B. Änderungen des Bauwerks vorgesehen sind. So sind z.B. lange Simulationszeitreihen für verschiedene Seegangsszenarien und unterschiedliche Bauwerksgeometrien geeignete Anwendungsfälle für numerische Modellverfahren. Die berechneten absoluten Wellenüberlaufhöhen sind allerdings bedingt vertrauenswürdig, da sie sehr stark vom Aufbau des Modells wie z.B. der Lage der seewärtigen Randbedingung abhängen. Die absolute Differenz zwischen zwei ähnlichen Simulationsläufen liefert dagegen realistische Informationen.

3.4.6 Hydraulischer Modellversuch

Eine weitere Methode stellt der hydraulische Modellversuch dar, bei dem der Wellenüberlauf in einem skalierten Modell unter korrekt skalierten Wellenbedingungen untersucht wird. Üblicherweise werden Modellversuche zum Wellenüberlauf im Modellmaßstab von 1:20 bis 1:60 durchgeführt; in ausgewählten Großforschungseinrichtungen können aber auch Modellmaßstäbe von 1:2 und mehr erreicht werden. Hierbei sind ggf. Maßstabeffekte zu berücksichtigen. Die einzelnen Wellen werden im Modell zufällig unter Berücksichtigung eines vorgegebenen Wellenspektrums erzeugt. Dabei können sowohl einfache Bauwerksquerschnitte im Wellenkanal (2-D) als auch komplizierte Strukturen mit Krümmungen, Übergängen ggfs. in einem Wellenbecken (3-D) untersucht werden. Hydraulische Modellversuche sind geeignet, außer mittleren Wellenüberlaufhöhen auch weitere Wellenüberlaufparameter wie Überlaufgeschwindigkeiten, Schichtdicken, etc. zu ermitteln.

Bei der Durchführung von hydraulischen Modellversuchen sind insbesondere Modell- und Maßstabeffekte zu beachten.

Modelleffekte können durch nicht naturgetreue Nachbildung des Modells und der maßgebenden Kräfte sowie aufgrund der Datenerfassung und Datenanalyse entstehen. Ursachen

von Modelleffekten stellen das Bauwerk in der Natur (z.B. Entwicklung der Unterwassertopographie), die Konstruktion im Modell (z.B. Oberflächenrauheit), die Randsteuerung (z.B. Wellengenerierung), die Messung (z.B. Position und Art des Messgeräts), die Datenerfassung (z.B. Abtastrate), die Datenanalyse (z.B. Analysezeitraum) sowie vernachlässigte Prozesse (z.B. Wind, Strömungen) dar.

Maßstabeffekte entstehen aufgrund der Verletzung bzw. mangelhaften Erfüllung der maßgeblichen Ähnlichkeitsgesetze im verkleinerten Modell. Hierzu zählen eine Verletzung der Ähnlichkeit in den Schwerkraften, Reibungskraften sowie der Oberflächenspannung. Grenzwerte zur Vermeidung von Maßstabeffekten sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Grenzwerte zur Vermeidung von Maßstabeffekten

Prozess	Maßgebliche Kräfte	Modellgesetz	Grenzwerte
Wellenausbreitung	Schwerkraften Reibungskraften Oberflächenspannung	Fr_W Re_W We	$Re_W > Re_{W,krit} = 1 \cdot 10^4$ $T > 0,35 \text{ s}$; $d > 2,0 \text{ cm}$
Wellenbrechen	Schwerkraften Reibungskraften Oberflächenspannung	Fr_W Re_W We	$Re_W > Re_{W,krit} = 1 \cdot 10^4$ $T > 0,35 \text{ s}$; $d_b > 2,0 \text{ cm}$
Wellenauflauf	Schwerkraften Reibungskraften Oberflächenspannung	Fr_A, Fr_q Re_q We	$Re_q > Re_{q,krit} = 10^3$ $We > We_{krit} = 10$
Wellenüberlauf	Schwerkraften Reibungskraften Oberflächenspannung	Fr_A, Fr_q Re_q We	$Re_q > Re_{q,krit} = 10^3$ $We > We_{krit} = 10$

Mit: $Fr_W = c/(g \cdot d)^{1/2}$; $Fr_A = v_A/(g \cdot h_A)^{1/2}$; $Fr_q = V_A/(2 \cdot g \cdot A)$; $Re_W = c \cdot d/v$; $Re_q = (A-R_C)^2/(v \cdot T)$; $We = V_A \cdot h_A \cdot \rho_W/\sigma_W$

3.4.7 Empfehlungen zur Auswahl einer geeigneten Methode

Ein internet-basiertes *Calculation Tool* wurde zusammen mit dem *Eurotop-Manual* entwickelt (s. auch Abschnitt 4). Elemente des *Calculation Tools* sind:

- *Empirical Calculator*: Der *Empirical Calculator* wurde mit den wesentlichen empirischen Gleichungen der Kapitel 5, 6 und 7 programmiert (s. auch Abschnitte 3.5 bis 3.7)
- *PC-Overtop*: *PC-Overtop* beinhaltet alle Ansätze zur Berechnung mittlerer Wellenüberlauraten in Kapitel 5 (s. Abschnitt 3.4.4)
- *Neural Network*: Das NN wurde im Rahmen des *CLASH-Projektes* für mittlere Wellenüberlauraten ermittelt (s. Abschnitt 3.4.3)
- *CLASH-Database*: Die *CLASH-Datenbank* besteht aus einer Liste von Eingabeparametern und mittleren Wellenüberlauraten für ca. 10 000 Versuche (s. Abschnitt 3.4.2).

Keine dieser Methoden gibt das „beste Ergebnis“. Die zuverlässigste Methode hängt vom Typ und der Komplexität des Bauwerks sowie von der Konformität mit den zugrunde-

liegenden Annahmen ab. Um eine Methode auszuwählen oder zu entscheiden, welche Ergebnisse einer bestimmten Methode zu berücksichtigen sind, ist der Ursprung einer jeweiligen Methode zu berücksichtigen. Um diese Entscheidung zu erleichtern, werden im Folgenden einige allgemeine Hinweise gegeben:

- Für einfache, zusammengesetzte oder sehr steile Wände, die den Idealisierungen in Kap. 7 entsprechen, sind die Ergebnisse des *Empirical Calculators* vertrauenswürdiger als die Ergebnisse der anderen Methoden, da entsprechende Modellversuche weder im NN noch in der *CLASH-Datenbank* vorliegen bzw. *PC-Overtop* nicht anwendbar ist.
- Für einfache Deiche und flach geneigte Böschungen mit durchgehender Böschungsrauhheit wurden zahlreiche Versuche für die Entwicklung der Gleichungen im *Empirical Calculator* verwendet. Daher handelt es sich hierbei um die zuverlässigste und einfachste Methode. *PC-Overtop* ist genauso einfach; allerdings ist eine unabhängige Überprüfung kompliziert. Die *CLASH-Datenbank* und das NN werden zuverlässiger, wenn das Bauwerk komplizierter wird.
- Schüttsteinböschungen und raue Oberflächen sollten mit dem *Empirical Calculator* berechnet werden. Bauwerke mit geringer Durchlässigkeit können auch mit *PC-Overtop* untersucht werden. Bauwerke mit Kronenmauer sollten bevorzugt mit der Datenbank oder dem NN untersucht werden.
- Für komplexe Bauwerke mit vielen Elementen sollten bevorzugt *PC-Overtop* (wenn anwendbar), die *CLASH-Datenbank* oder das NN verwendet werden.

Die Nutzung aller Methoden beinhaltet diverse Vereinfachungen gegenüber der tatsächlichen Situation. Je weiter das Bauwerk oder die Randbedingungen von den Annahmen und Randbedingungen der einzelnen Methoden abweichen, umso unzuverlässiger sind die Ergebnisse und die Unsicherheiten größer. Daher kann es im Einzelfall erforderlich sein, physikalische Modellversuche durchzuführen.

3.5 Deiche und geneigte Ufermauern

Eine exakte Beschreibung des Wellenauflauf- und Wellenüberlaufvorgangs für Seedeiche und flach geneigte Ufermauern ist aufgrund der stochastischen Natur des Wellenbrechens und des Wellenauflaufvorgangs sowie der zahlreichen Einflussfaktoren auf den Wellenauf- und Wellenüberlauf nicht möglich. Daher werden sowohl der Wellenauf- als auch der Wellenüberlauf für Deiche und flach geneigte Ufermauern überwiegend auf der Grundlage experimentell bestimmter empirischer Gleichungen beschrieben. Der Einfluss von Rauheitselementen, Kronenmauern, Bermen und anderen Faktoren wird durch Korrekturbeiwerte berücksichtigt.

Wellenüberlauf tritt bei Deichen auf, wenn die Kronenhöhe niedriger als der höchste Wellenauf- ist. Daraus folgt die Freibordhöhe, die definiert ist als der vertikale Abstand zwischen dem Bemessungswasserstand und der Kronenhöhe. Wellenüberlauf hängt exponentiell von der Freibordhöhe ab und nimmt bei abnehmender Freibordhöhe zu. Üblicherweise wird Wellenüberlauf in Form einer mittleren Wellenüberlauftrate in der Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ bzw. $\text{Liter}/(\text{s} \cdot \text{m})$ angegeben.

Zahlreiche experimentelle Untersuchungen wurden zur Bestimmung der mittleren Wellenüberlauftrate für Deiche durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigen, dass die experimentellen Ergebnisse gut durch eine exponentielle Funktion beschrieben werden können.

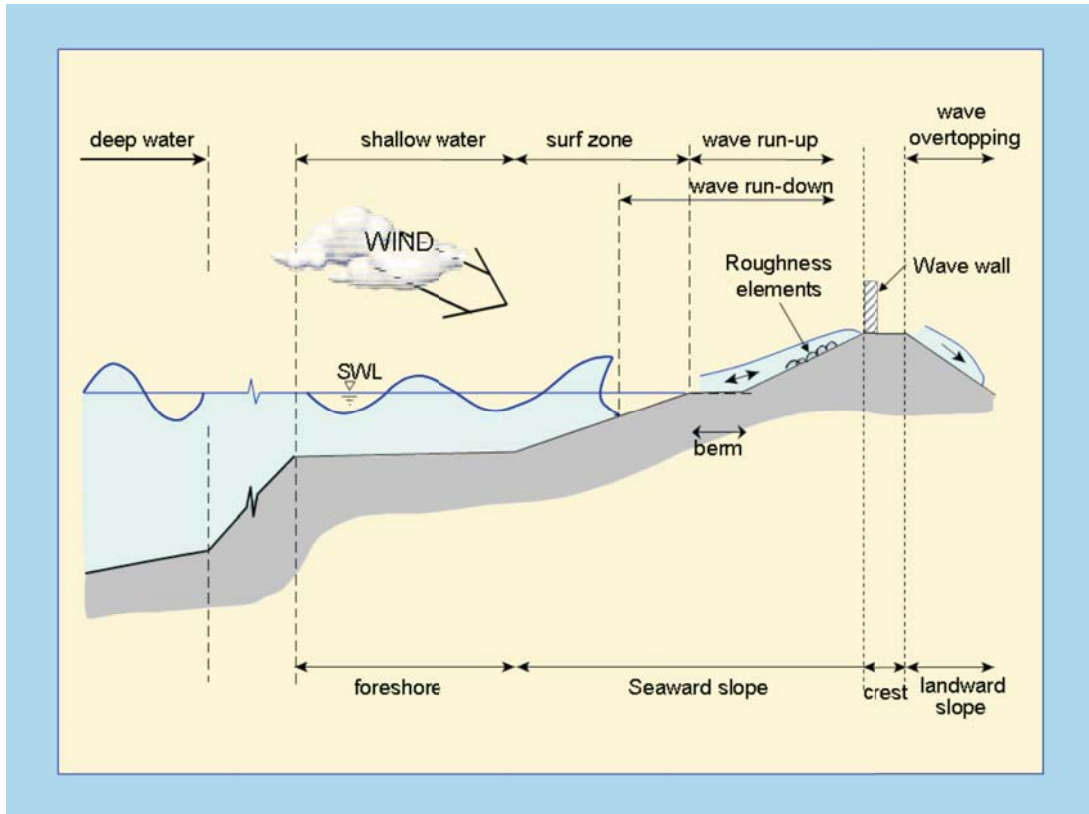


Abb. 7: Wellenauflauf und Wellenüberlauf für Deiche und flache Ufermauern (schematische Darstellung)

$$Q_* = Q_0 \exp(-bR_*)$$

mit: Q_* = dimensionslose Wellenüberlafrate

R_* = dimensionslose Freibordhöhe.

Für Deiche werden im *Eurotop-Manual* Funktionen für die probabilistische Bemessung bzw. für den Vergleich mit Messungen sowie Funktionen für die deterministische Bemessung empfohlen:

Probabilistische Bemessung:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left(-4.75 \frac{R_C}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)$$

mit einem Maximum von:
$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp \left(-2.6 \frac{R_C}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)$$

In dieser Funktion stellen q die mittlere Wellenüberlafrate, g die Erdbeschleunigung, H_{m0} die Wellenhöhe, $\tan \alpha$ die Neigung der Außenböschung, γ_b den Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung einer Berme, γ_f den Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Böschungsrauheit, γ_β den Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Wellenangriffsrichtung,

γ_v den Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung einer Kronenmauer, R_C die Freibordhöhe und $\xi_{m-1,0}$ die Brecherkennzahl unter Berücksichtigung der Wellenperiode $T_{m-1,0}$ dar.

Die Zuverlässigkeit dieser Funktion wird dadurch beschrieben, dass die beiden Koeffizienten 4,75 und 2,6 als Mittelwert einer Normalverteilung mit der Standardabweichung 0,5 bzw. 0,35 angesetzt werden.

Deterministische Bemessung:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left(-4.3 \frac{R_C}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)$$

mit einem Maximum von: $\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp \left(-2.3 \frac{R_C}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)$

Im Rahmen einer deterministischen Bemessung wird empfohlen, die mittlere Wellenüberlaufquote im Vergleich zur Gleichung für die probabilistische Bemessung um eine Standardabweichung des Koeffizienten 4,75 bzw. 2,6 zu erhöhen. Ein Vergleich der beiden Gleichungen für brechende Wellen ist in Abb. 8 dargestellt.

Zusätzlich werden im *Eurotop-Manual* auch Ansätze für Flachwasserbereiche, in denen das Wellenspektrum durch starkes Wellenbrechen verformt wird, und extreme Wellenüberlaufbedingungen (Freibordhöhe Null und negative Freibordhöhe) empfohlen. Einflussfaktoren auf den Wellenüberlauf, die sich aus der Böschungsrauheit, dem Einfluss der Wellenangriffsrichtung, Bermen und Knicken in der Deichaußenböschung und durch Kronenmau-

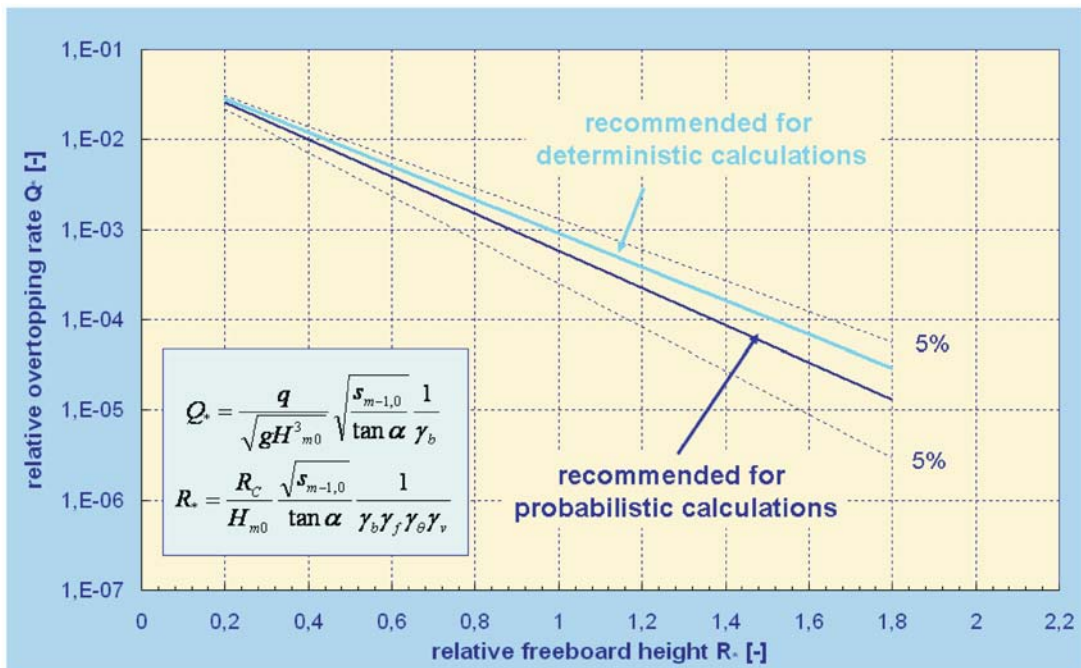


Abb. 8: Vergleich der Gleichungen zur Bestimmung der mittleren Wellenüberlaufquote bei Deichen (probabilistische und deterministische Bemessung)

ernergeben, werden diskutiert und dargestellt. Die Beschreibung der Wellenüberlaufströmung auf der Grundlage von Schichtdicken und Strömungsgeschwindigkeiten wird ebenfalls diskutiert, und entsprechende Ansätze werden empfohlen.

3.6 Schüttsteinböschungen und Böschung mit rauer Oberfläche

Im Gegensatz zu Deichen spielen die Porosität und die Oberflächenrauheit eine wichtige Rolle bei der Ermittlung des Wellenaufbaus und des Wellenüberlaufs für Schüttsteinböschungen und raue Oberflächen. Während insbesondere bei Seedeichen die Wellenaufbauhöhe $R_{u,2} \%$, d.h. die Aufbauhöhe, die von 2 % aller ankommenden Wellen überschritten wird, früher eine wesentliche Bemessungsgröße war, spielte die Wellenüberlauftrate bei Schüttsteinböschungen schon immer eine entscheidende Rolle. Die Gleichungen zur Bestimmung der mittleren Wellenüberlauftrate für Schüttsteinböschungen entsprechen den Gleichungen für Deiche, wobei aufgrund der Steilheit der Außenböschung (1:n = 1:1,5) überwiegend nicht-brechende Wellen relevant sind. Die Rauheit der Böschung ist nach Tab. 3 zu berücksichtigen.

Probabilistische Bemessung:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right)$$

Deterministische Bemessung:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.2 \cdot \exp\left(-2.3 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right)$$

Tab. 3: Rauheitsbeiwerte für Schüttsteinböschungen

Type of armour layer	γ_f
Smooth impermeable surface	1.00
Rocks (1 layer, impermeable core)	0.60
Rocks (1 layer, permeable core)	0.45
Rocks (2 layers, impermeable core)	0.55
Rocks (2 layers, permeable core)	0.40
Cubes (1 layer, random positioning)	0.50
Cubes (2 layers, random positioning)	0.47
Antifers	0.47
HARO's	0.47
Accropode™,	0.46
Xbloc®	0.45
CORE-LOC®	0.44
Tetrapods	0.38
Dolosse	0.43

Auch für Schüttsteinböschungen werden Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Wellenangriffsrichtung sowie der Wirkung von Bermen und Kronenmauern angegeben. Zusätzlich werden Empfehlungen zur Berücksichtigung von Maßstabseffekten und Windeffekten gegeben. Vergleiche von Naturmessungen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass beide Effekte hier – im Gegensatz zu flach geneigten glatten Seedeichböschungen – einen Einfluss auf die mittlere Wellenüberlaufrate haben können. Ansätze zur Berücksichtigung von Maßstabs- und Windeffekten sind daher gegebenenfalls bei der Wellenüberlaufrrechnung zu berücksichtigen.

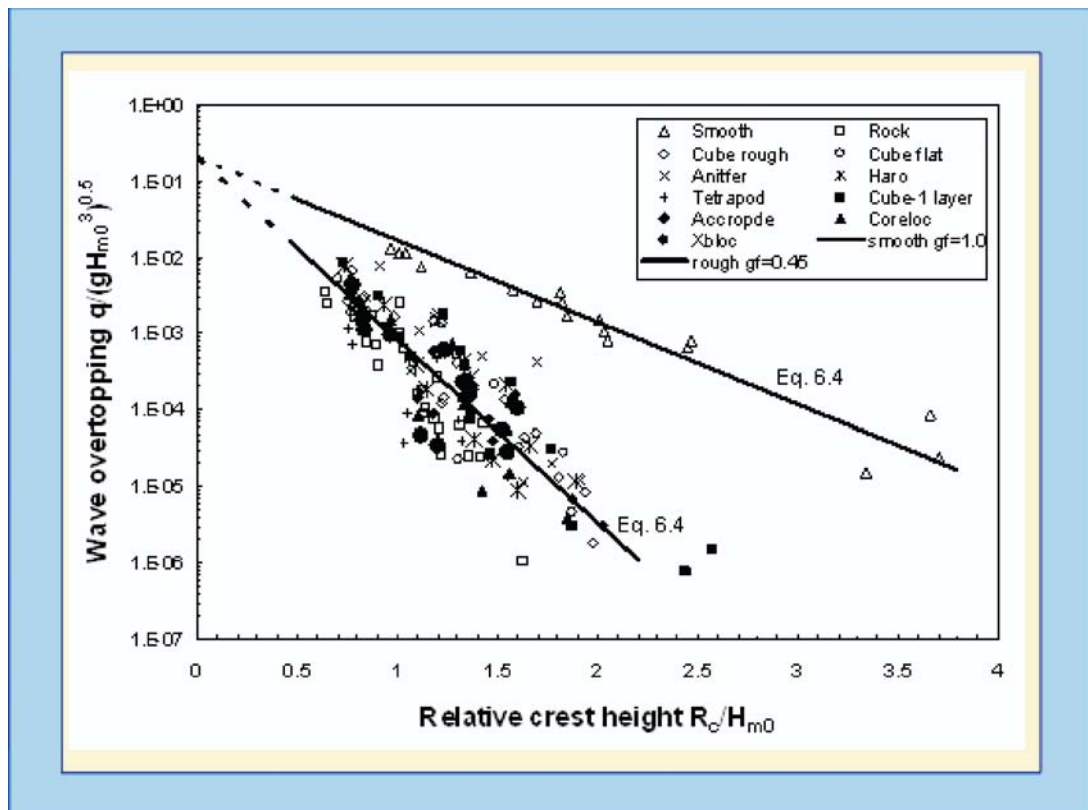


Abb. 9: Mittlere Wellenüberlaufraten für 1:1,5 geneigte glatte und raue Böschungsoberflächen

3.7 Vertikale Bauwerke

Dieses Kapitel gibt Empfehlungen zur Berechnung des Wellenüberlaufs für vertikale und steile Hochwasserschutz- und Küstenschutzbauwerke wie Caissonwellenbrecher, Ufer- und Hochwasserschutzmauern. Auch zusammengesetzte vertikale bzw. steile Bauwerke mit Bermen, Wellenumlenkern, etc. werden berücksichtigt. Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Kapiteln sind einige wesentliche Unterschiede zu vermerken:

- Wellenaufbau spielt keine Rolle. Die Definition ist auch schwierig, insbesondere wenn eine brechende oder gebrochene Welle das Bauwerk erreicht und nach oben umgelenkt wird.

- Die Beschreibung der physikalischen Prozesse am Bauwerk selber ist komplizierter als bei den anderen Bauwerkstypen. Unterscheidungen für nicht-brechende Wellen, brechende Wellen, Druckschlagbedingungen und gebrochene Wellen in Abhängigkeit des jeweiligen Bauwerkstyps sind erforderlich. Dies erfordert die Festlegung des jeweiligen Wellenüberlaufverhaltens in Abhängigkeit von kennzeichnenden Parametern.
- Der Windeinfluss ist zu berücksichtigen.

Wie bereits erwähnt, hat das Brechverhalten der Wellen einen entscheidenden Einfluss auf den Wellenüberlauf. Ist die Wellenhöhe im Verhältnis zur lokalen Wassertiefe klein und die Wellensteilheit gering, so treten bei steilen und vertikalen Böschungen nicht-brechende Wellenbedingungen auf (Abb. 10). Druckschlagbedingungen treten auf, wenn die Wellenhöhe durch Shoaling vor oder auf dem Bauwerk zunimmt und groß im Verhältnis zur Wassertiefe wird. Unter diesen Verhältnissen kann starkes Wellenbrechen auftreten und die resultierenden Kräfte können das 10- bis 40-fache nicht-brechender Wellen betragen. Wellenüberlauf unter diesen Bedingungen ist charakterisiert durch einen starken Wellenüberlaufstrahl mit hohem Lufteinschluss. Zwischen den brechenden und den nicht-brechenden Wellen gibt es einen kleinen Bereich, der durch eine extreme vertikale Bewegung des Wellenüberlaufstrahls gekennzeichnet ist. Dieses Phänomen wird als flip-through-Verhalten beschrieben. Da jedoch die Wellenüberlaufraten denen der brechenden Wellen entsprechen, wird dieser

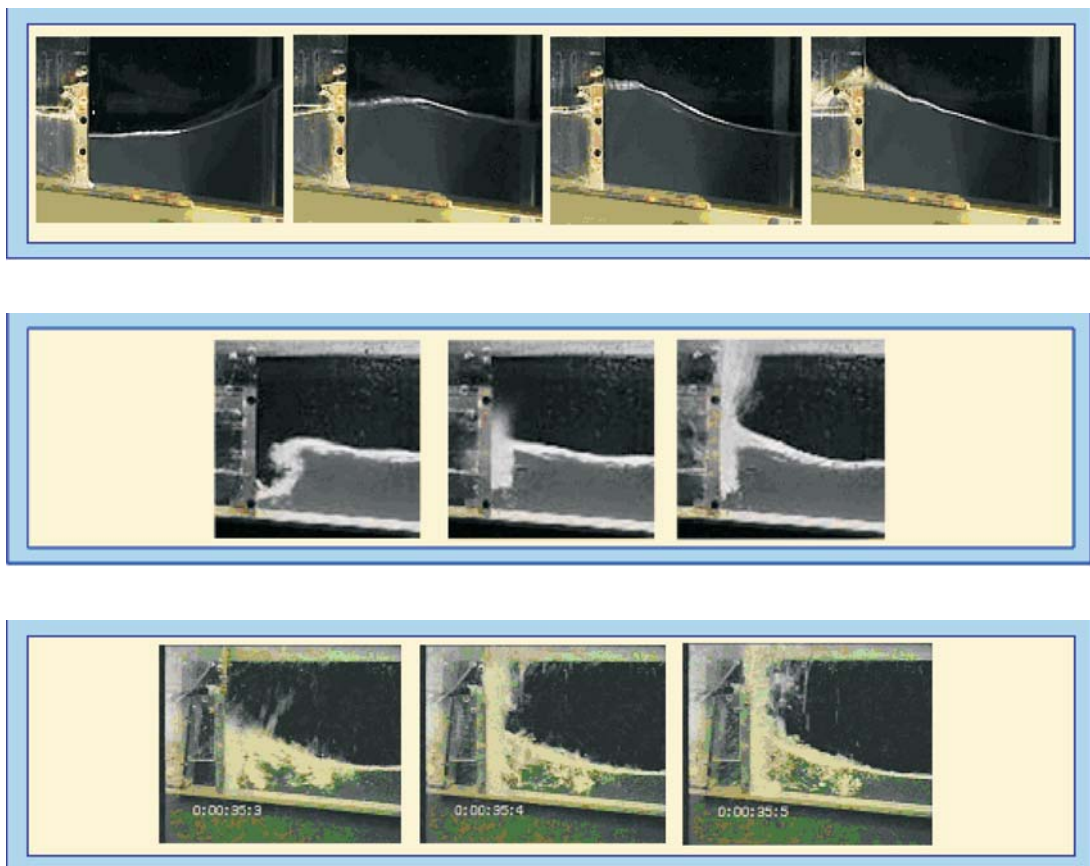


Abb. 10: Wellenüberlaufverhalten einer nicht-brechenden (oben), brechenden (Mitte) und gebrochenen Welle (unten)

Bereich nicht gesondert behandelt. Abschließend sind noch die gebrochenen Wellen zu erwähnen. Dabei trifft eine Wassermasse unter hohem Luftgehalt auf das Bauwerk. Einige Fotos sollen das Wellenüberlaufverhalten unter verschiedenem Brechverhalten verdeutlichen (Abb. 10).

Zur Unterscheidung des Brechverhaltens werden zwei verschiedene Parameter verwendet. Für senkrechte Bauwerke kann das Brechverhalten durch einen Parameter h_* beschrieben werden (nicht brechende Wellen $h_* > 0,3$, brechende Wellen $h_* < 0,2$; h_s = Wassertiefe am Bauwerksfuß):

$$h_* = 1.35 \frac{h_s}{H_{m0}} \frac{2\pi h_s}{gT_{m-1,0}^2}$$

Für zusammengesetzte Bauwerke (composite structures) wird ein anderer Parameter verwendet (d = Wassertiefe über der Berme des Bauwerks):

$$d_* = 1.35 \frac{d}{H_{m0}} \frac{2\pi h_s}{gT_{m-1,0}^2}$$

Anschließend können, wie bereits für die beiden anderen Bauwerkstypen, die mittleren Wellenüberlauraten auf der Grundlage exponentieller Gleichungen bestimmt werden. Dazu werden einige Unterscheidungen in Abhängigkeit des Bauwerkstyps durchgeführt:

- Einfache senkrechte Wand
- Geneigte, jedoch sehr steile Wände
- Zusammengesetzte vertikale Uferwände und -mauern.

Beispielhaft sollen hier die Wellenüberlaufgleichungen für einfache vertikale Wände und Mauern dargestellt werden.

Probabilistische Bemessung, nicht brechende Wellen:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.04 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \text{ gültig für } 0,1 < R_c/H_{m0} < 3,5$$

Deterministische Bemessung, nicht brechende Wellen:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.04 \exp\left(-1.8 \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \text{ gültig für } 0,1 < R_c/H_{m0} < 3,5$$

Probabilistische Bemessung, brechende Wellen:

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gh_s^3}} = 1.5 \times 10^{-4} \left(h_* \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3.1} \text{ gültig für } 0,03 < h_* R_c/H_{m0} < 1,0$$

Deterministische Bemessung, brechende Wellen:

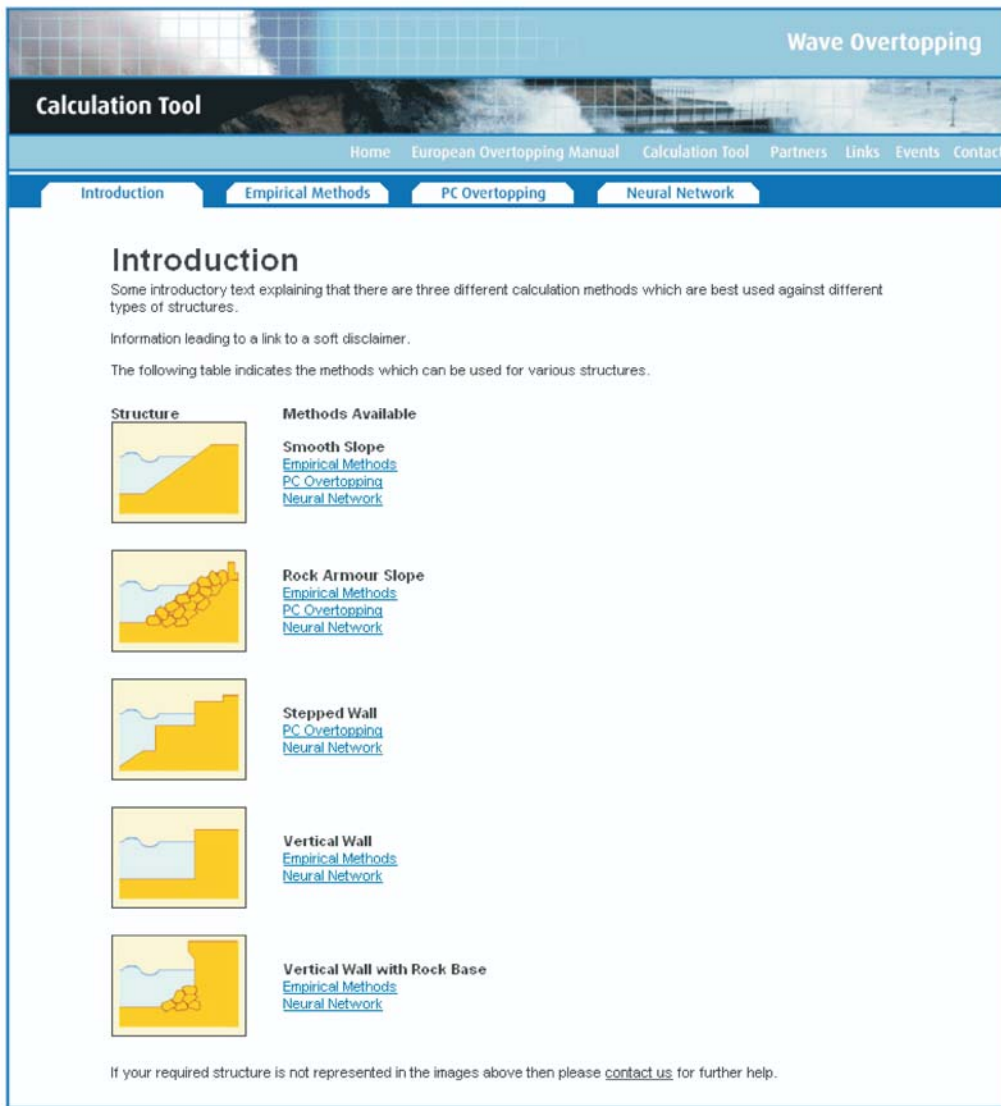
$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gh_s^3}} = 2.8 \times 10^{-4} \left(h_* \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3.1} \text{ gültig für } 0,03 < h_* R_c/H_{m0} < 1,0$$

Es werden Hinweise zum Einfluss des schrägen Wellenangriffs, einer Wellenumlenkwand und des Windes auf den Wellenüberlauf gegeben. Hierbei ist zu beachten, dass diese Einflussfaktoren auch das Wellenbrechen beeinflussen. Daher kann nicht mit einfachen Korrekturbeiwerten wie in den Kapiteln 3.5 und 3.6 gerechnet werden.

Abschließend werden Hinweise zur Berechnung von Wellenüberlaufvolumina, Wellenüberlaufgeschwindigkeiten sowie zur Verteilung der Wellenüberlaufvolumina hinter einem Hochwasserschutzbauwerk gegeben.

4. Calculation-Tool

Um das *Eurotop-Manual* zu vervollständigen, wurde eine Website aufgebaut, um dem Anwender die Nutzung der einzelnen Methoden zu erleichtern und einfache Tools zur Berechnung des Wellenüberlaufs für verschiedene Bauwerkstypen zur Verfügung zu stellen.



Wave Overtopping

Calculation Tool

Home European Overtopping Manual Calculation Tool Partners Links Events Contact

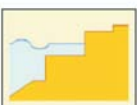
Introduction Empirical Methods PC Overtopping Neural Network

Introduction

Some introductory text explaining that there are three different calculation methods which are best used against different types of structures.

Information leading to a link to a soft disclaimer.

The following table indicates the methods which can be used for various structures.

Structure	Methods Available
	Smooth Slope Empirical Methods PC Overtopping Neural Network
	Rock Armour Slope Empirical Methods PC Overtopping Neural Network
	Stepped Wall PC Overtopping Neural Network
	Vertical Wall Empirical Methods Neural Network
	Vertical Wall with Rock Base Empirical Methods Neural Network

If your required structure is not represented in the images above then please [contact us](#) for further help.

Abb. 11: Calculation Tool – Introduction

<http://www.overtopping-manual.com>

Die erste Internet-Seite des *Calculation Tools* stellt eine Liste der wesentlichen Bauwerkstypen und der möglichen Methoden zur Wellenüberlaufermittlung dar. Um den Wellenüberlauf für ein bestimmtes Bauwerk zu berechnen, ist lediglich auf die Liste der Methoden rechts vom Bauwerk zu klicken, um zur Eingabeseite zu gelangen (Abb. 11).

Wurde ein Bauwerk ausgewählt (hier: flach geneigte Böschung), die Methode gewählt (hier: *Empirical Calculator*), so müssen nur noch die Eingabeparameter in die entsprechenden Boxen eingetragen werden (Abb. 12). Durch Click auf den Button „Calculate Overtopping Rate“ wird die mittlere Wellenüberlaufrate berechnet.

Wave Overtopping

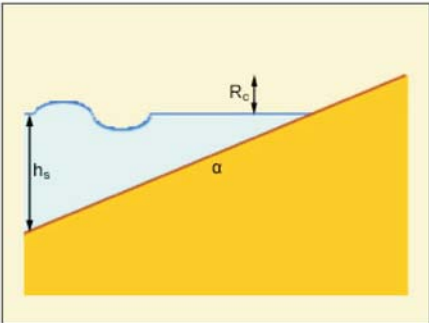
Calculation Tool

[Home](#) [European Overtopping Manual](#) [Calculation Tool](#) [Partners](#) [Links](#) [Events](#) [Contact](#)

[Introduction](#) [Empirical Methods](#) [PC Overtopping](#) [Neural Network](#)

Empirical method for Simple Slopes

Method Selection ☒ Van Der Meer ☐ Owen



Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (m³/s/m)

T (wave period) ☐ T_m ☐ T_p ☒ T_{m-1,0}

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure)

α (the angle of the slope)

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level (m))

ξ_{tr} (Transition value between breaking and non-breaking conditions)

V (coefficient for reduction factors)

Calculate Overtopping Rate

[Terms & Conditions](#) [About this Website](#)

Abb. 12: *Empirical Calculator* für einfache Böschungen

5. D a n k s a g u n g

Das Eurotop-Manual wurde in Großbritannien von der Environmental Agency (EA), in Deutschland vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) und in den Niederlanden von Rijkswaterstaat finanziert.

Besonderer Dank gilt auch den Mitgliedern des Steering-Committees: C. Mitchell (EA), M. Owen (EA), D. Thomas (Faber Manusell), P. van den Berg (Hoogheemraadschap Rijnland), H. van der Sande (Waterschap Zeeuwse Eilanden), M. Klein Breteler (Delft Hydraulics) und D. Schade (Ingenieurbüro Mohn).

6. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

a.) Eurotop-Manual

PULLEN, T.; ALLSOP, N. W. H.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCHÜTTRUMPF, H. and VAN DER MEER, J. W.: Eurotop – Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. www.overtopping-manual.com, 2007.

b.) Sonstiges Schrifttum

CLARKE, S.; DODD, N. and DAMGAARD, J.: Flow on and in a Porous Beach. ASCE J. Waterway, Port, Coast & Ocean Eng., 2003.

DODD, N.: A Numerical Model of Wave Run-up, Overtopping and Regeneration. Proc ASCE, Jo. Waterway, Port, Coast & Ocean Eng., Vol 124, No 2, pp 73–81, ASCE, New York, 1998.

HIBBERD, S. and PEREGRINE, D. H.: Surf and Run-up on a Beach: a Uniform Bore. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 95, and part 2, pp. 323–345, 1979.

HIRT, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Comp. Physics, Vol. 39, pp. 201–225, 1981.

KOBAYASHI, N.; OTTA, A. K. and ROY, I.: Wave Reflection and Run-up on Rough Slopes. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 282–298, 1987.

MONAGHAN, J. J.: Simulating Free Surface Flows with SPH. J. of Comp. Physics, 110: 499–406, 1994.

VAN GENT, M. R. A.: The Modelling of Wave Action on and in Coastal Structures. Coastal Engng. 22, pp. 311–339, 1994.

VERHAEGHE, H.; VAN DER MEER, J. W.; STEENDAM, G.-J.; BESLEY, P.; FRANCO, L. and VAN GENT, M. R. A.: Wave Overtopping Database as the Starting Point for a Neural Network Prediction Method. ASCE, Proc. Coastal Structures 2003, Portland, Oregon, pp. 418–430, 2003.

Auf eine ausführliche Liste der Referenzen wurde im Zusammenhang mit dieser Kurzfassung des *Eurotop-Manuals* verzichtet. Mehr als 175 relevante Literaturangaben zu den Themen Wellenauflauf und Wellenüberlauf sind Bestandteil des *Eurotop-Manuals*.

Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut
für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52056 Aachen
Germany
E-Mail: schuettrumpf@iww.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Andreas Kortenhaus
Leichtweiss-Institut für Wasserbau
Beethovenstr. 51a
38106 Braunschweig
Germany
E-Mail: a.kortenhaus@tu-bs.de

Dr. Jentsje van der Meer
Van der Meer Consulting B.V.
P.O.Box 423
8440 AK Heerenveen
The Netherlands
E-Mail: jm@vandermeerconsulting.nl

Dr. Tim Pullen
HR Wallingford
Howbery Park
Wallingford
Oxon
OX10 8BA
United Kingdom
E-Mail: t.pullen@hrwallingford.co.uk

Prof. William Allsop
Howbery Park
Wallingford
Oxon
OX10 8BA
United Kingdom
E-Mail: w.allsop@hrwallingford.co.uk

Dr. Tom Bruce
University of Edinburgh
School of Engineering & Electronics
King's Buildings
Edinburgh
EH9 3JL
United Kingdom
E-Mail: tom.bruce@ed.ac.uk