



**Wasser Energie Luft**  
**Eau énergie air**  
**Acqua energia aria**

1-2014  
13. März 2014

- **Perspektiven der Wasserkraft**
- **Flussrevitalisierungen**
- **Hochwasserschutz Stadt Zürich (Teil 2)**
- **Unwetterschäden 2013**

# Eine Wellenkarte des Zürichsees (Kanton Zürich)

Richard Staubli, Stephanie Matthias, Andreas Huber, Felix Hermann, Silke Dierer, Stefano Pellandini

## Zusammenfassung

Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich liess eine Wellenkarte des Zürichsees (Gebiet Kanton Zürich) erarbeiten. Auf der Karte sind die zu erwartenden Wellenhöhen und Wellenparameter für ein 30-, 100- und 300-jährliches Ereignis dargestellt. Für die Erstellung der Karte wurden die vorhandenen Winddaten des Zürichsees ausgewertet und extrapoliert. Die Karte gibt die signifikanten Tiefwasserwellen pro Uferabschnitt an. Um die Wellen in Ufernähe zu bestimmen, müssen die ufernahen Prozesse im Flachwasser- und Uferbereich berücksichtigt und beurteilt werden. Dies erfordert ein entsprechendes Fachwissen. Die Wellenkarte ist eine gute Grundlage für das Erkennen von Schwachstellen am Ufer, für die Abschätzung der Gefährdung infolge Wellen und für die Planung von Uferbereichen und Bauwerken sowie für die Planung von Uferrenaturierungen.

Abschnitt kann man auf der Karte die zu erwartenden Wellenhöhen für ein 30-, 100- und 300-jährliches Ereignis für verschiedene Windrichtungen in sogenannten Wellenrosen (Bild 2) herauslesen. Weiter sind auf der Karte pro Uferabschnitt die Wellenparameter Wellenhöhe, -periode und -länge in einer Tabelle zusammengestellt.

Bei den angegebenen Wellenhöhen handelt es sich um die signifikante Wellenhöhe der Tiefwasserwelle (siehe Kap. 2.2), welche den Seegang beschreibt. Aufgrund der Flachwasserprozesse (siehe Kap. 2.2 und 3.1) können sich in Ufernähe Wellenrichtung, -höhe und -länge wesentlich ändern. Auch der kleinräumliche Uferverlauf kann die Wellenbildung in Ufernähe stark beeinflussen. Befinden sich die Betracht-

## 1. Die Wellenkarte

Im Auftrag des AWEL, Baudirektion des Kantons Zürich, wurde eine Wellenkarte für den Zürichsee (Bild 1) erarbeitet. Die

Karte beschränkt sich auf das Seegebiet des Kantons Zürich.

Das Ufer des Zürichsees wird auf dieser Karte in 23 Abschnitte unterteilt. Pro

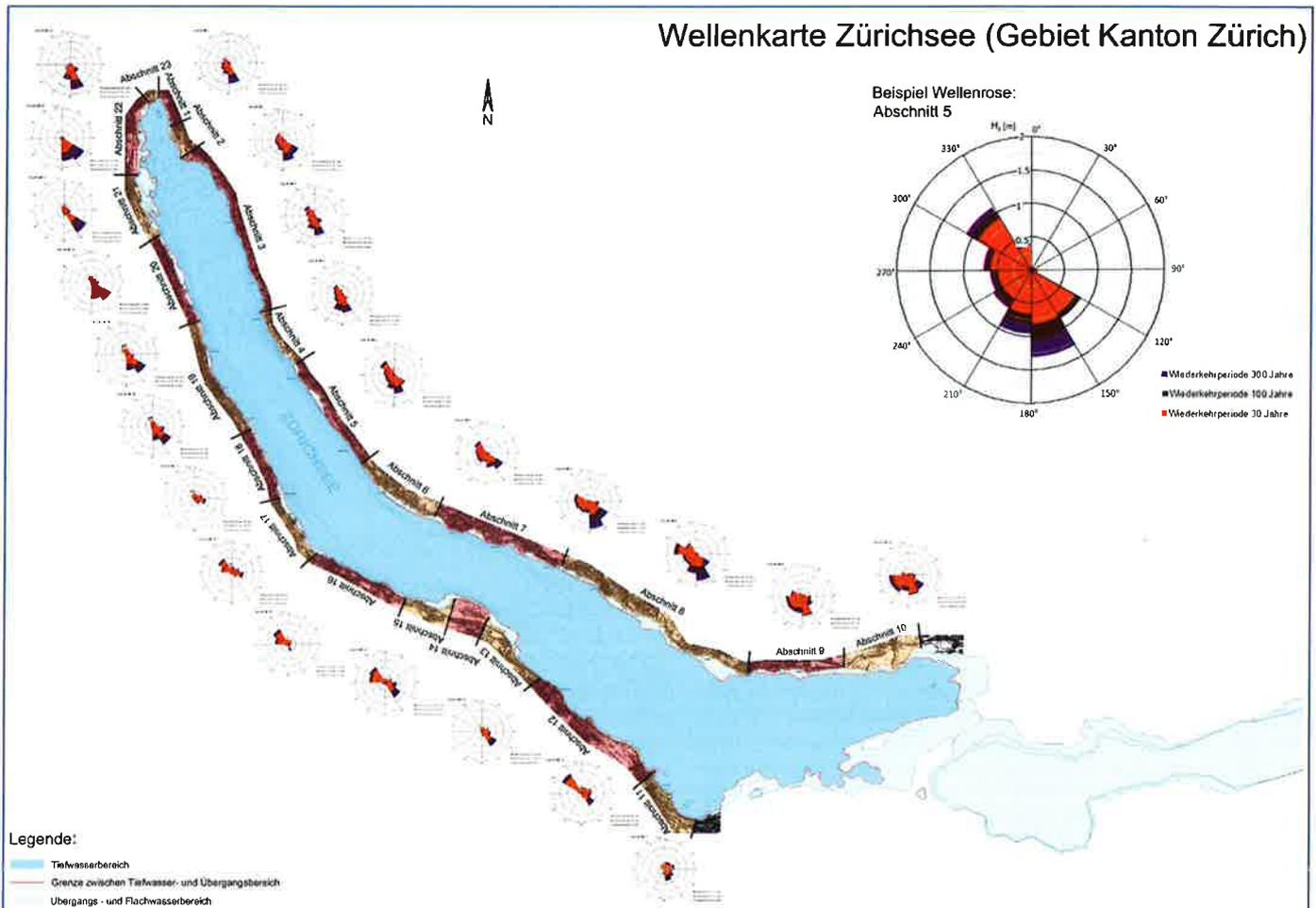
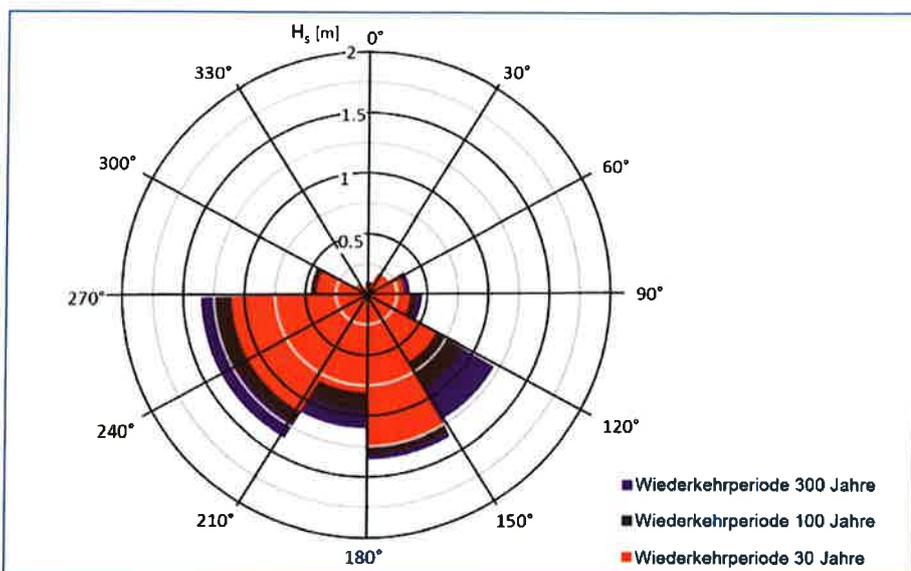


Bild 1. Wellenkarte des Zürichsees (Gebiet Kanton Zürich).



**Bild 2. Beispiel einer Wellenrose für einen bestimmten Uferabschnitt; Angabe der Wellenhöhen für verschiedene Windrichtungen und verschiedene Wiederkehrperioden.**

tungspunkte in Uferbuchten oder im Wellenschatten von Uferauskragungen, sind die Wellen am Betrachtungspunkt wesentlich kleiner, als im vorgelagerten Tiefwasserbereich. Die Auswirkungen der Flachwasserprozesse und der kleinräumlichen Uferstrukturen müssen fallweise situativ durch eine Fachperson beurteilt werden.

Die Wellenkarte beschränkt sich auf windinduzierte Wellen. Wellen, die durch andere Einwirkungen erzeugt werden, wie beispielsweise durch Schiffe und Wellen infolge Erdbeben, sind nicht berücksichtigt.

Integrierender Bestandteil der Wellenkarte ist der dazugehörige technische

Bericht, der die Methodik und die Anwendung der Karte beschreibt. Mit den Angaben aus der Wellenkarte sollen die Grundlagen für das Erkennen von Schwachstellen am Ufer, für die Abschätzung der Gefährdung infolge Wellen und für die Planung von Uferbereichen und Bauwerken zur Verfügung gestellt werden.

## 2. Grundlagen und Entstehung der Wellenkarte

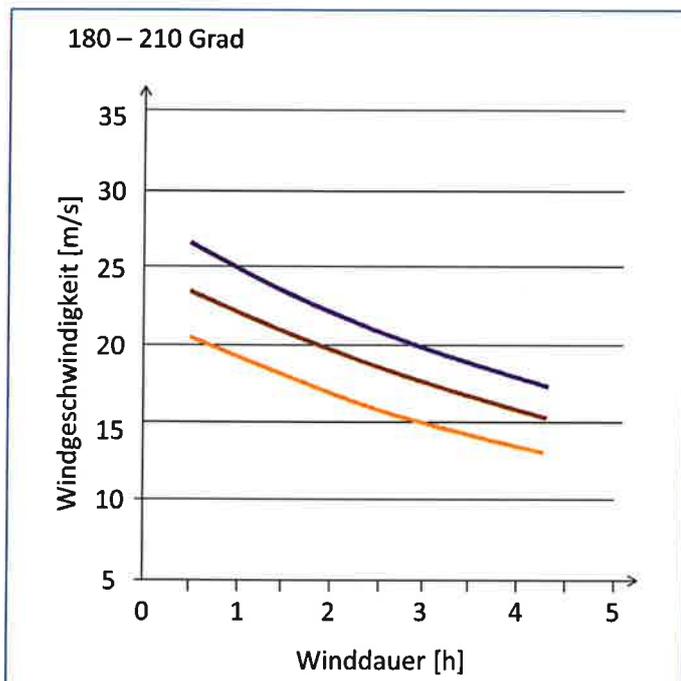
### 2.1 Winddaten

Auftretende Winde sind die hauptsächliche Ursache für die Bildung von Wellen auf Gewässern. Die Winddaten und deren

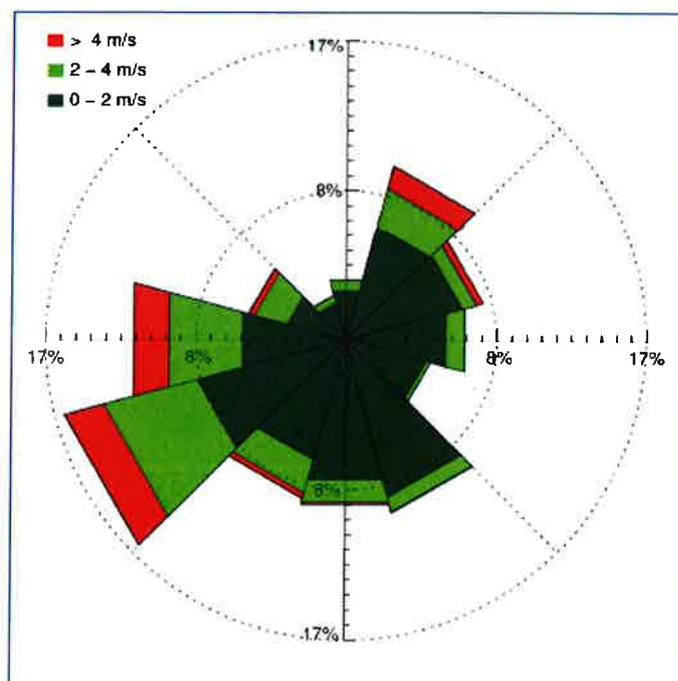
Qualität spielen somit eine zentrale Rolle bei der Ermittlung von Wellen. Die Aufbereitung der Winddaten für den Zürichsee erfolgte durch die Firma Meteotest in Bern. Ziel war es, die Windverhältnisse am Zürichsee in sogenannten IDF-Diagrammen (Intensität, Dauer, Frequenz) darzustellen. Da die Beziehung Winddauer und -stärke von der Windrichtung abhängt, wurde pro Betrachtungspunkt und Windrichtung jeweils ein IDF-Diagramm (Bild 3) erstellt. Es wurden zwölf verschiedene Sektoren definiert.

In einem ersten Schritt wurde recherchiert, welche langjährigen Messreihen der Windgeschwindigkeit und -richtung im Bereich des Zürichsees zur Verfügung stehen. Für die Berechnung von 30-, 100- und 300-jährlichen Wiederkehrperioden ist es wichtig, dass die eingehenden Winddaten einen möglichst langen Zeitraum umfassen.

Nach der Analyse aller Kriterien wurde beschlossen, die Berechnungen auf Grundlage der Klimatologie Wädenswil durchzuführen (Bild 4). Ausschlaggebend für diese Entscheidung war, dass die Klimatologie mit zwölf Jahren Dauer zu den längsten verfügbaren Messungen gehört, die Messstation in Wädenswil in der Nähe des Seeufers liegt und die Messung als sehr zuverlässig eingestuft wird. Die Aufspaltung in Windrichtungssektoren führte jedoch dazu, dass schon bei Zeitreihen von zwölf Jahren in vielen Sektoren nicht genug Werte für eine Extremwertstatistik vorlagen.



**Bild 3. Beispiel eines IDF-Diagramms (Intensität, Dauer, Frequenz) für die Windrichtung 180–210 Grad (orange = 30-jährlicher, braun = 100-jährlicher, violett = 300-jährlicher Wind).**



**Bild 4. Windrose der Messungen in Wädenswil (10 m über Grund).**

Für die Generierung der IDF-Diagramme wurde ein CFD-Modell (computational fluid dynamics) zu Hilfe genommen, welches ermöglicht, dreidimensionale Windfelder bei verschiedenen Anströmrichtungen zu berechnen. Mit dem Modell WindSim, das für die Bestimmung der Energieerträge von Windparks entwickelt wurde, ist es möglich, Zeitreihen der Windgeschwindigkeit von einem Standort zum anderen zu transferieren.

Für das gesamte Modellgebiet wurde ein digitales Geländemodell verwendet (Quelle: DHM25<sup>®</sup> swisstopo). Ein Rauigkeitsmodell wurde aus dem BN24-Bodennutzungs-Datensatz der Schweiz generiert (Quelle: BFS/GEOSTAT). Die in den Datensätzen angegebenen Geländehöhen und Rauigkeitslängen wurden anhand der topografischen Karte des Bundesamts für Landestopografie swisstopo geprüft und stimmen mit dieser – im Rahmen der erwarteten Genauigkeit – überein. Aufgrund der Grösse des Modellgebietes wurde die Modellierung mit einer Gitterweite von 100 m durchgeführt. Der Fokus liegt auf den Windverhältnissen über Wasser, wo Gelände bzw. Bodennutzung recht homogen sind. Daher wird die Gitterweite als ausreichend betrachtet.

Auf Basis dieser Grundlagen wurden die dreidimensionalen Windfelder für zwölf verschiedene Anströmrichtungen (30°-Sektoren) mit der Software WindSim berechnet. Die berechneten Windfelder wurden mit der Windstatistik von Wädenswil gewichtet. Somit erhielt man für jeden Gitternetzpunkt der Modellierung eine Windstatistik, die als Zeitreihe extrahiert werden konnte.

Die Genauigkeit der Windmodellierung wurde geprüft, indem die Klimatologie auf 10 m Höhe am Standort Wädenswil auf die Positionen der Windmessungen Mythenquai, Schmerikon und Zürich-Fluntern in 10 m Höhe transferiert wurde. Die transferierten Klimatologien wurden mit den Mastmessungen auf 10 m Höhe verglichen. Der Vergleich bestätigte, dass die Windmodellierung verlässliche Ergebnisse liefert.

Auf Grundlage der transferierten Zeitreihen wurden IDF-Diagramme berechnet. Die IDF-Diagramme zeigen, welche Windgeschwindigkeit mit einer bestimmten Dauer bei verschiedenen Wiederkehrperioden erreicht wird. Dabei sind für die Wellenmodellierung Wiederkehrperioden von 30, 100 und 300 Jahren und Windereignisse mit einer Dauer von bis zu 10 Stunden von Interesse. Mittels der Zeitreihen für Windgeschwindigkeit

und -richtung wird analysiert, welche Windgeschwindigkeit bei einem Windereignis einer bestimmten Dauer überschritten wird. Mithilfe von Extremwertstatistik wurden dann die Windgeschwindigkeiten für die Wiederkehrperioden von 2, 5, 10, 30, 50, 100 und 300 Jahren geschätzt. Die Werte für die Windgeschwindigkeit mit 100 und 300 Jahren Wiederkehrperiode sind aufgrund der verhältnismässig kurzen Messreihe mit einer höheren Unsicherheit behaftet. Die mithilfe der Extremwertstatistik berechneten Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Zeitdauern und Wiederkehrperioden bilden die Grundlagen für die IDF-Diagramme.

Die so generierten IDF-Diagramme wurden auf ihre Plausibilität überprüft und wo erforderlich aufgrund der relativ kurzen Messreihe an einen plausiblen Verlauf angepasst.

## 2.2 Topografie des Zürichsees

Der Seegrundverlauf ist für die Wellenausbildung im ufernahen Bereich wichtig, da die Wellenbildung durch Reibungseffekte am Seegrund (Flachwasserprozesse siehe Kap. 2.3 und 3.1) und durch den kleinräumlichen Uferverlauf beeinflusst wird.

Vom Zürichsee liegen nur ältere

grossflächige Seegrundaufnahmen von Dr. R. A. Schlund vor. Der Zürichsee wurde im Jahre 1972 ganzflächig vermessen. Die Äquidistanz zwischen den Höhenlinien dieser Aufnahmen beträgt 2.5 m, bzw. in Ufernähe 2 m (teilweise auch 1 m). Die Uferzone wurde damals nicht speziell vermessen. Die am nächsten des Ufers liegende Höhenkurve liegt auf Kote 404 m ü.M. bzw. bei einer Wassertiefe von 2 m (ab Mittelwasserstand). Die Genauigkeit dieser Aufnahmen ist nicht bekannt. Im ufernahen Bereich, wo die Wassertiefe einen massgebenden Einfluss auf die Wellenbildung hat, liegen somit keine Informationen über den Seegrundverlauf vor.

Das untere Seebecken zwischen Zürichhorn und Quaibrücke wurde ebenfalls von Dr. R. A. Schlund 1974 noch etwas genauer vermessen. Die Äquidistanzen bei diesen Aufnahmen betragen 1 m. Aber auch bei diesen Aufnahmen ist die Genauigkeit nicht bekannt und die Uferzonen wurden nicht speziell vermessen.

Ansonsten liegen keine grossflächigen Vermessungen des Seegrundverlaufes vor. Aufgrund der fehlenden Seegrundkoten in Ufernähe entschied man, sich bei der Wellenkarte auf Tiefwasserwellen zu beschränken (siehe Kap. 2.3).

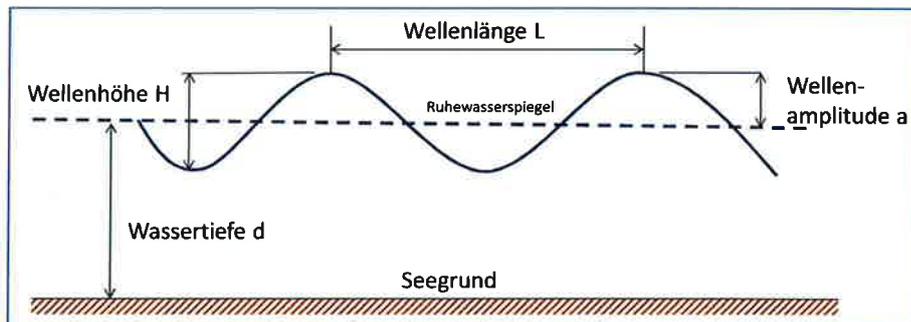


Bild 5. Schematische Wellendarstellung mit Parameter.

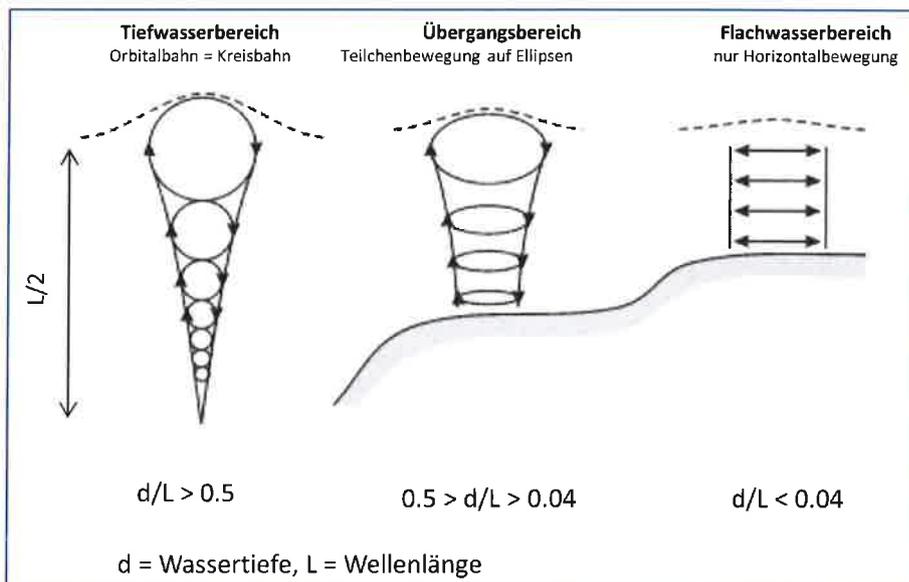


Bild 6. Mögliche Bewegungen der Wasserteilchen in einer Welle.

### 2.3 Wellentheorie

Auf Basis der Grundlagen «Wind» und «Topografie» konnten nun die Wellen auf dem Zürichsee berechnet werden.

Eine Welle ist eine periodische Bewegung des Wasserspiegels. Die Oberflächenwellen auf dem Zürichsee entstehen durch den windinduzierten Energieeintrag infolge der Reibung an der Wasseroberfläche. Eine idealisierte Welle wird durch verschiedene Parameter beschrieben (Bild 5).

In ausreichend tiefem Wasser pflanzen sich Wasserteilchen als oszillatorische Wellen fort. Beim Passieren einer Welle bewegen sich die Wasserteilchen auf kreisförmigen Bahnen, sogenannten Orbitalbahnen (Bild 6). Diese Bewegung der Wasserteilchen setzt sich bis in eine Tiefe von  $L/2$  (halbe Wellenlänge) fort.

Der Durchmesser der Kreise nimmt mit der Tiefe exponentiell ab. Ist die Wassertiefe grösser als  $L/2$ , hat der Seeboden keinen Einfluss auf die Bewegungen der Wasserteilchen; hier spricht man vom Tiefwasserbereich. Im Zürichsee mit üblichen Wellenlängen von ca. 12 m bis 25 m beginnt der Tiefwasserbereich ab einer Tiefe von 6 m bis 12 m.

Nähert man sich dem Ufer bis die Wassertiefe kleiner als  $L/2$  wird, so werden die Wellen infolge der Reibung am Seegrund durch verschiedene Prozesse beeinflusst. Hier finden die sogenannten Flachwasserprozesse (Bild 7) statt.

In der Natur überlagern sich die einzelnen Wellen und es entsteht der Seegang (Bild 8). Der Seegang kann als lineare Überlagerung von Wellenkomponenten aufgefasst werden. Für die Berechnungen geht man von einer Überlagerung einer grossen Anzahl von sinusförmigen langkämmigen Wellenkomponenten mit unterschiedlicher Richtung, Amplituden und Wellenlängen aus (idealisiertes Modell für lineare Wellentheorie). Gleichzeitig unterliegen die Wellen verschiedenen physikalischen Prozessen, wie z.B. dem Energieeintrag durch Wind, Atmosphäre, der Energiedissipation durch das Brechen der Wellen usw.

Die mathematische Beschreibung dieser Prozesse sowie die räumliche und zeitliche Entwicklung des Seeganges erfolgen auf der Basis der linearen Wellentheorie unter Verwendung der Spektralanalyse. Die Wellen auf einem See können als Signale eines Zufallsprozesses gedeutet und damit statistisch untersucht werden. Mittels der Fourier-Analyse werden die Wellenkomponenten eines Seegangs in sinusförmige Komponenten mit definierten Wellenhöhen und Perioden zerlegt. Die

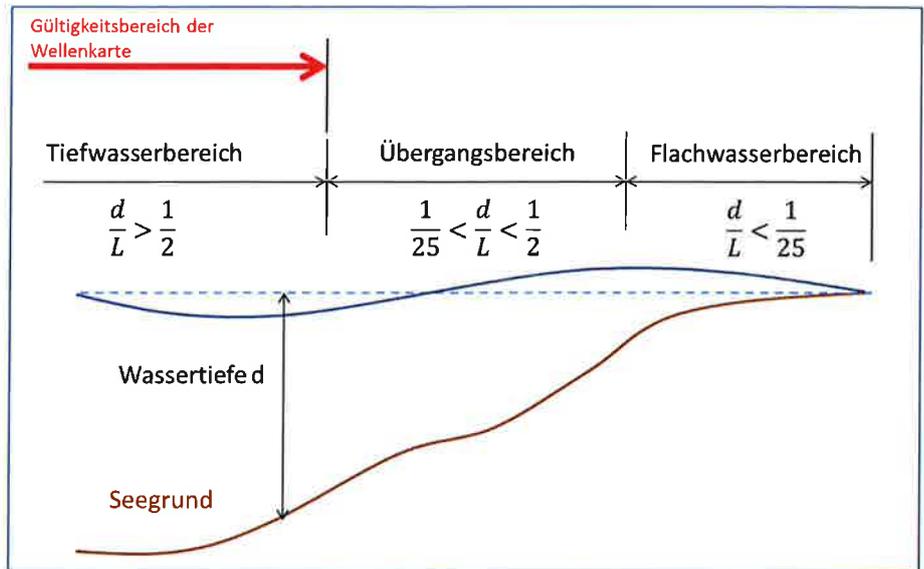


Bild 7. Übergang Tiefwasser- zu Flachwasserbereich ( $d$  = Wassertiefe,  $L$  = Wellenlänge).

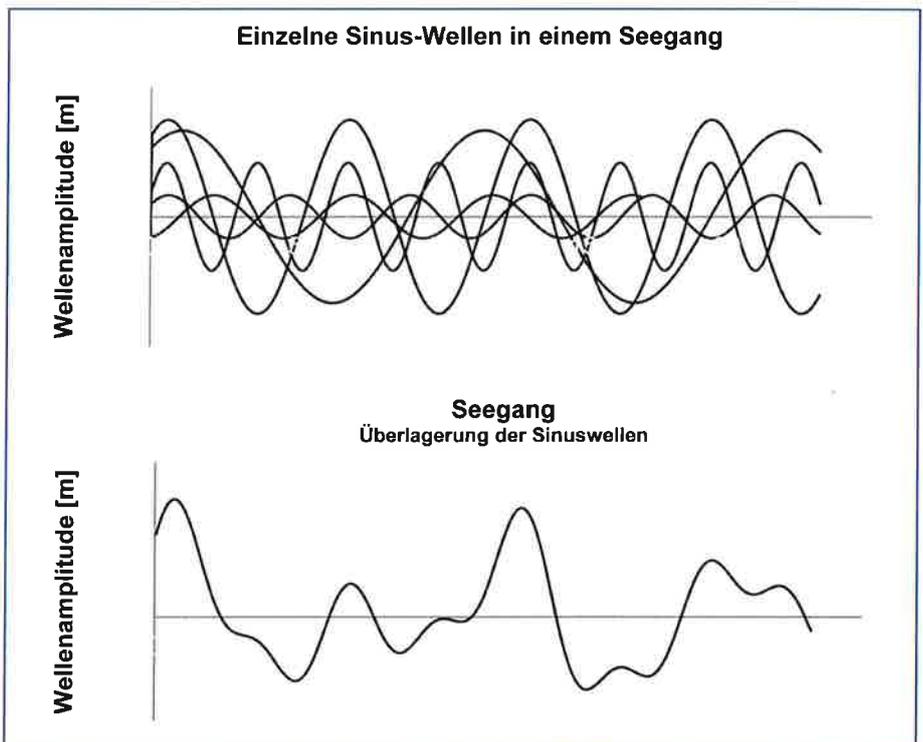


Bild 8. Durch Superposition mehrerer Wellen entsteht der Seegang.

sinusförmigen Wellen mit ihrer Frequenz lassen sich den entsprechenden Energiedichten zuordnen. Anhand des so ermittelten Energiedichtespektrums (Bild 9) können nun Kenngrössen des Seegangs bestimmt werden.

Wichtige Kenngrössen, mit welchen der Seegang beschrieben wird, sind die signifikante Wellenhöhe  $H_s = H_{1/3}$  und die Peakperiode. Sie sind durch die Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen (Bild 10) gegeben. Die signifikante Wellenhöhe entspricht dem Mittelwert des Drittels der höchsten Wellen. Die maximal auftretende Welle ist nochmals um den Faktor 1.86 grösser als die signifikante Welle.

Rund 13.5% aller Wellen sind grösser als die signifikante Welle. Die mittlere Wellenhöhe in einem Spektrum liegt bei 0.63 der signifikanten Wellenhöhe ( $H_m = 0.63 \times H_s$ ).

Verschiedene Forscher haben anhand von empirischen Untersuchungen Wellenspektren ermittelt und diese dann in mathematischen Formeln dargestellt. Bekannte Spektren sind das Pierson-Moskowitz-Spektrum oder das Jonswap-Spektrum für Tiefwasserwellen.

Für eine stationäre Windgeschwindigkeit und homogene Windfelder wurden verschiedene Formeln publiziert, um die Seegangparameter für ingenieurtechnische Anwendungen zu beschreiben. Oft

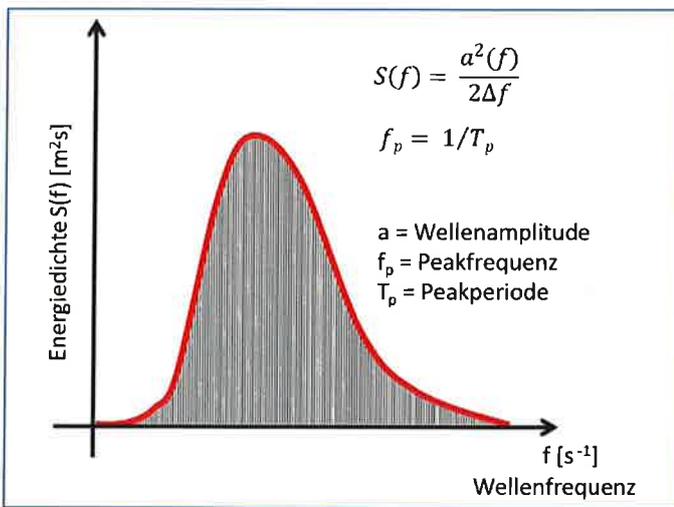


Bild 9. Energiedichtespektrum eines Seeganges.

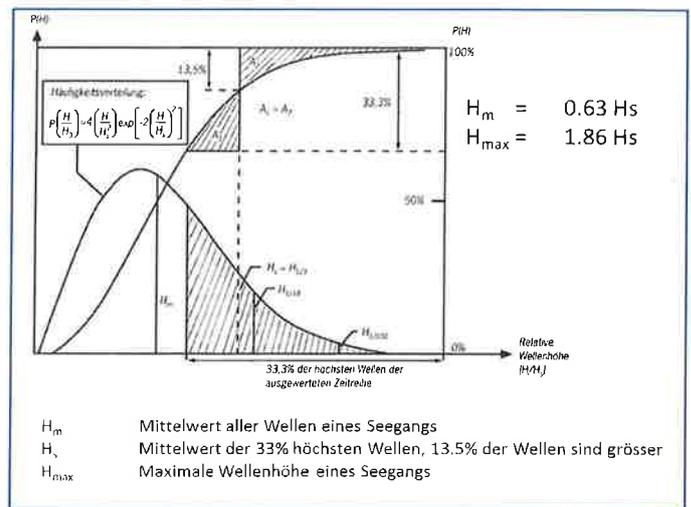


Bild 10. Häufigkeits- und Summenhäufigkeitsverteilung der Wellenhöhen eines Seeganges [6].

werden die mathematischen Funktionen auch in sogenannten Fetchdiagrammen dargestellt. Aus diesen Diagrammen kann die signifikante Wellenhöhe bei einer gegebenen Windgeschwindigkeit, -dauer und Fetchlänge – d.h. die Seelänge, welche für den Energieeintrag zur Verfügung steht (vgl. Kap. 2.4) – herausgelesen werden. Diese Diagramme stimmen nur für den Tiefwasserbereich.

Neben den genannten Frequenzspektren mit den dazugehörigen Fetchdiagrammen stehen heute auch numerische Modelle zur Verfügung, um die Seegangsentwicklung zu modellieren. Diesen Programmen liegen teilweise unterschiedliche Theorien zugrunde. Sie erlauben, die zeitliche Entwicklung eines Seeganges zu berechnen. Zudem kann man auch instationäre Windereignisse (Böen usw.) und nicht lineare Prozesse im Übergangs- und Flachwasserbereich erfassen.

Für die Erstellung der Wellenkarte wurde diskutiert, welche Modelle angewandt werden sollen. Die numerischen Modelle sind interessant, um die Wellenbildung in Ufernähe berechnen zu können. Aus folgenden Überlegungen hat man sich jedoch entschieden, keine numerische Simulation durchzuführen, sondern sich auf Tiefwasserwellen zu beschränken und mit Theorien, basierend auf Wellenspektren, zu operieren:

- Um den Flachwasserbereich modellieren zu können, müsste der Seegrundverlauf in Ufernähe und dessen Beschaffenheit bekannt sein. Diese Daten liegen nicht vor. Eine Aufnahme des Seegrundes entlang des Ufers wäre zu aufwendig. Somit können die Vorteile der numerischen Modellierung in Ufernähe nicht genutzt werden.
- Es ist nicht Ziel der Wellenkarte, insta-

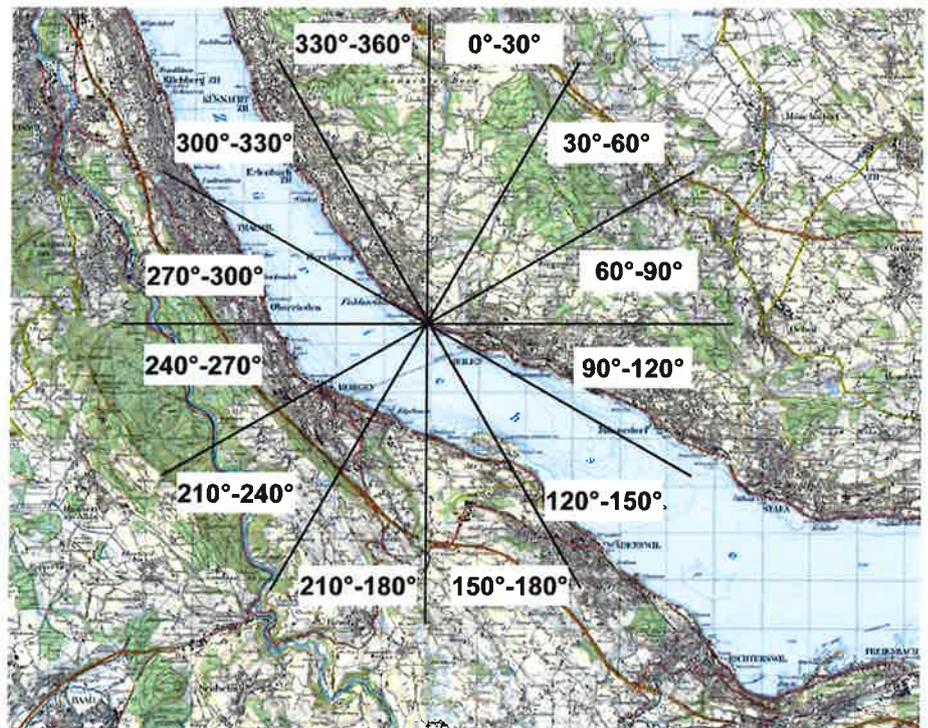


Bild 11. Bestimmung der Fetchlängen für zwölf Sektoren.

tionäre Windereignisse abzubilden oder die Wellenentwicklung zu verfolgen. Die Wellenkarte soll Maximalwellen liefern. Diese entstehen, wenn sich der Seegang voll ausgebildet hat. Auch liegen zu wenige Winddaten vor, um auftretende instationäre Windereignisse zu modellieren. Die einfacheren Ansätze über Frequenzspektren liefern diese Maximalwellen im Tiefwasserbereich.

Die Wellenhöhen in der Wellenkarte wurden nach der Theorie von K. Richter, welche auf dem Jonswap-Spektrum basiert, bestimmt (vgl. Kap 2.5).

## 2.4 Bestimmung der Fetchlängen

Für die Wellenberechnung sind die

Fetchlängen (= Anlaufstrecken) des Windes notwendig. Die Fetchlänge hängt sowohl von der Lage des betrachteten Uferabschnittes wie auch von der Windrichtung ab. Je länger die Fetchlänge bei gegebener Windstärke ist, desto mehr Energieeintrag vom Wind kann erfolgen und desto grössere Wellen entstehen. Von einem fetchbegrenzten Seegang ist auszugehen, wenn die Windeinwirkung mindestens so lange andauert, dass infolge des zur Verfügung stehenden Fetches kein weiterer Energieeintrag mehr möglich ist. Ist die Winddauer kürzer, so spricht man von dauerbegrenztem Seegang.

Zieht man vom Betrachtungspunkt einen Strahl gegen die Windrichtung, so entspricht die Fetchlänge der Strecke zwi-

schen Betrachtungspunkt und Schnittpunkt Strahl mit gegenüberliegender Uferlinie. Für jede Richtung ergibt sich somit eine andere Fetchlänge. Für die IDF-Winddiagramme wurden Sektoren von 30 Grad gebildet. Für jeden Sektor wurde ein IDF-Diagramm erzeugt. Innerhalb eines Sektors wurde jeweils die längste Fetchlänge als massgebend erachtet und damit wurden die weiteren Wellenberechnungen durchgeführt.

## 2.5 Bestimmung der Tiefwasserwellen

Mithilfe der Wellentheorie nach K. Richter können nun die Tiefwasserwellen für jeden Uferabschnitt und jede Windrichtung ermittelt werden. Dabei sind die IDF-Diagramme und die bestimmten Fetchlängen die Ausgangsgrössen.

Fetchbegrenzter Seegang (siehe Kap. 2.3)

$$H = \frac{U^2}{g} * 1.65 * 10^{-3} \left( \frac{g * x}{U^2} \right)^{0.5} \quad (1)$$

Dauerbegrenzter Seegang (siehe Kap. 2.3)

$$H = \frac{U^2}{g} * 8.46 * 10^{-5} \left( \frac{g * t}{U} \right)^{\frac{5}{7}} \quad (2)$$

H Wellenhöhe [m]

x Fetchlänge [m]

U Windgeschwindigkeit auf 10 m Höhe [m/s]

t Winddauer [s]

g Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

## 3. Anwendung der Wellenkarte

### 3.1 Prozesse in Ufernähe

Aus der Wellenkarte können die Wellen vor einer Uferzone im Tiefwasserbereich herausgelesen werden. Nähern sich die Wellen dem Ufer, so werden sie durch den Uferverlauf, durch vorhandene Bauwerke und die Bodenreibung beeinflusst. Die sogenannten Flachuferprozesse beschreiben diese Beeinflussung. Es handelt sich dabei um nicht lineare Prozesse, welche in der Fachliteratur ausführlich beschrieben sind. Für die Beurteilung der Wellenentwicklung in Ufernähe braucht es Wasserbauerfahrung und Kenntnis der Wellentheorie.

Bei den Flachwasserprozessen unterscheiden wir zwischen:

- Refraktion: Tiefenparalleles Einschwenken der Wellenberge (Bild 12)
- Shoaling: Veränderung der Wellenlänge, Wellenhöhe und Fortschrittgeschwindigkeit mit der Wassertiefe;

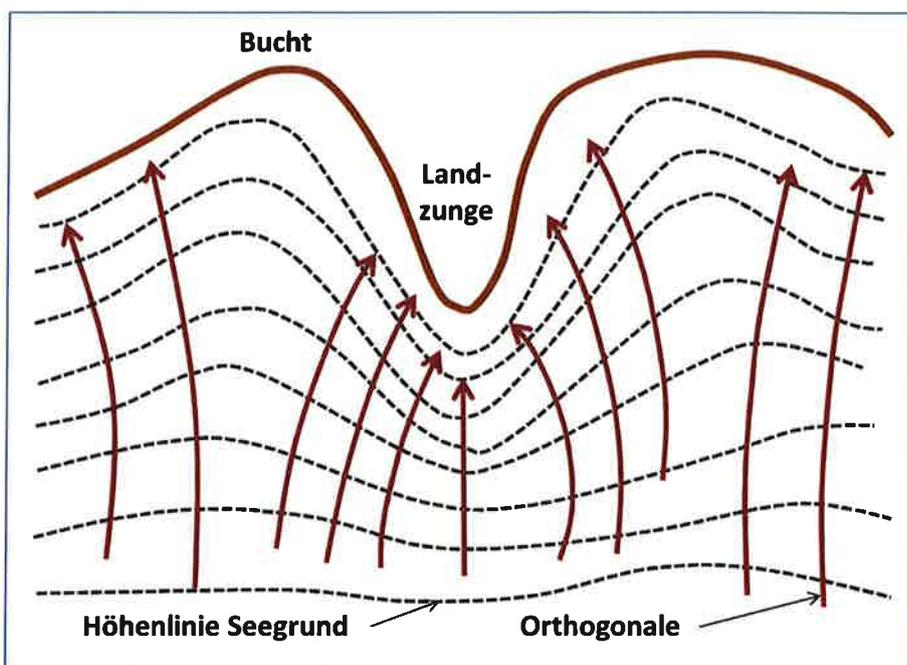


Bild 12. Beispiel von Refraktion, einer der möglichen Flachwasserprozesse.

durch Veränderung der Energietransportgeschwindigkeit

- Brechen: Energieumwandlung als Folge der Überschreitung der Grenzsteilheit, bzw. einer Wassertiefenbegrenzung
  - Bodenreibung
- Trifft die Welle auf das Ufer, kommt es zu weiteren Prozessen:
- Wellenreflektion: Durch ein Hindernis wird der Schwingungsvorgang der Welle gestört
  - Auflaufen der Welle (bei flachen Uferböschungen)
  - Wellentransmission: Ein Teil der Wellenenergie wird transmittiert (Wellenbrecher, usw.)
  - Wellendiffraktion: Ausbreitung der Wellen hinter einem Hindernis, z.B. einer Buhne oder Mole
  - Wellenüberlauf

Der Zürichsee hat eine längliche Form und erstreckt sich von Nordwesten Richtung Südosten. Die Windrichtungen, welche die grössten Wellen auf dem See induzieren, wehen aus den Richtungen Nordwesten und Südosten. Dies führt dazu, dass in einigen Uferabschnitten die grössten Wellen einen uferparallelen Verlauf aufweisen. Speziell uferparallele Wellen werden durch den kleinräumlichen Uferverlauf stark beeinflusst. Geschwungene Uferverläufe, Landzungen, Halbinseln usw. können solche Wellen örtlich stark abschwächen und ablenken. Nur mittels einer situativen, fachmännischen Beurteilung am Betrachtungspunkt können solche Einflüsse auf die Wellenausbreitung abgeschätzt werden.

Um die ufernahen Prozesse richtig beurteilen zu können, sind daher oft zusätzliche Grundlagenhebungen erforderlich. Insbesondere der genaue Uferverlauf und Seegrundverlauf in der Übergangs- und Flachwasserzone müssen aufgenommen werden. Auch die Beschaffenheit des Seegrundes (Körnung,) kann für gewisse Fragestellungen (z.B. Erosionsprozesse) eine erforderliche Information sein.

### 3.2 Bemessungswelle

Die Angaben aus der Wellenkarte bilden eine Grundlage für die Dimensionierung von Bauwerken. Aus der Wellenkarte resultiert die signifikante Wellenhöhe für das 30-, 100- und 300-jährliche Ereignis. Welche Wellenkräfte für die Dimensionierung eines Bauwerkes herangezogen werden, hängen von dessen Nutzung, Bedeutung, angestrebter Lebensdauer und akzeptiertem Risiko ab. Es ist Sache des Ingenieurs, sich diesbezüglich Überlegungen zu machen und die Jährlichkeit der Bemessungswelle festzulegen.

Bauwerke werden gemäss Norm SIA 260 normalerweise auf eine Nutzungsdauer von 50 bis 100 Jahren ausgelegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein 100-jährliches Ereignis mindestens einmal auftritt, liegt bei einer angenommenen Bauwerkslebensdauer von 50 Jahren bei 40%. Der Ingenieur muss sich überlegen, wie er die Bemessungswelle ansetzt. Dies hängt von der Bedeutung und dem Tragverhalten (Trägheit, Beweglichkeit, Robustheit, usw.) des Bauwerkes oder des betrachteten funktionalen Grenzwertes (Tragfähigkeit, Überlauf, Erosion usw.) und der ak-

zeptierten Auftretenswahrscheinlichkeit der Bemessungswelle ab. Auch muss bei der Berechnung nach Norm SIA 260 der angesetzte Lastfaktor bei der Bestimmung der Bemessungswelle mitberücksichtigt werden. Bei einem höher angesetzten Lastfaktor wird mit einer kleineren Welle gerechnet und umgekehrt.

Für Gebrauchstauglichkeits- und Ermüdungsüberlegungen sind die in der Wellenkarte aufgeführten Extremwellen nicht geeignet. Für solche Betrachtungen sollte man auf durchschnittlichen Wellen basieren. Auch sind die Häufigkeit und die Dauer der Wellenereignisse zu berücksichtigen.

#### 4. Praktische Beispiele

##### 4.1 Beispiele im technischen Bericht

Im technischen Bericht zur Wellenkarte werden zwei praktische Beispiele dargestellt und deren Berechnung dargelegt. Es handelt sich um die Berechnung einer Hafemole und die Dimensionierung eines Flachufers. Die Beispiele sollen zeigen, wie aufgrund der Angaben der Wellenkarte und der Beurteilung der ufernahen Prozesse Dimensionierungen vorgenommen werden können.

Das Beispiel des Flachufers wurde noch numerisch simuliert (Kap. 4.2). Mit dieser Berechnung wollte man testen, wie weit die Prozesse im Uferbereich theoretisch erfasst und abgebildet werden können.

##### 4.2 Numerische Simulation des Wellengangs am Seeufer

Bis die im Tiefenwasserbereich entstandenen Wellen am Ufer aufgelaufen sind und dort ihre Wirkungen entfalten können, müssen sie einige Veränderungen über sich ergehen lassen. Sie werden eventuell von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt, sie können brechen, sie interagieren mit dem Seegrund. All diese Prozesse sind komplex und können mit den bekannten Näherungsformeln nur entlang eines einzelnen Strahles beschrieben werden. Eine andere Herangehensweise besteht in der numerischen Simulation eines Uferabschnittes. Da es sich um einen Übergangsbereich handelt, können keine Vereinfachungen eingesetzt werden. Es muss das vollständige Set der Navier-Stokes-Gleichungen gelöst werden, inklusive dem Tracking der freien Oberfläche. Um ein vernünftig grosses Gebiet in genügend feiner Auflösung zu bearbeiten, braucht es eine gute Adaption der Zellengrösse an das physikalische Problem.



**Bild 13. Naturansicht des modellierten Gebietes mit Blick in die Hauptwindrichtung. Im Vordergrund sind die Riffs zu sehen.**



**Bild 14. Geländemodell für die Simulation.**

Die nachfolgenden Darstellungen wurden mit dem Programm «gerris» erstellt (gfs.sourceforge.net), einem freien CFD-Solver, welcher auf dem octree-Verfahren basiert. Mit diesem Verfahren werden die Gleichungen in kubischen Zellen mittels finiter Volumen gelöst. Je nach Bedarf kann eine Zelle in der laufenden Rechnung rekursiv in acht Unterzellen aufgeteilt werden, bis die gewünschte Feinheit erreicht ist. Mit dieser Methode ergeben sich einfache Zellengleichungen und es existieren robuste Lösungsalgorithmen. Dafür müssen alle Oberflächen, welche quer durch die Zellen verlaufen, mit aufwendigeren Verfahren (Volume of Fluid, VOF) approximiert werden.

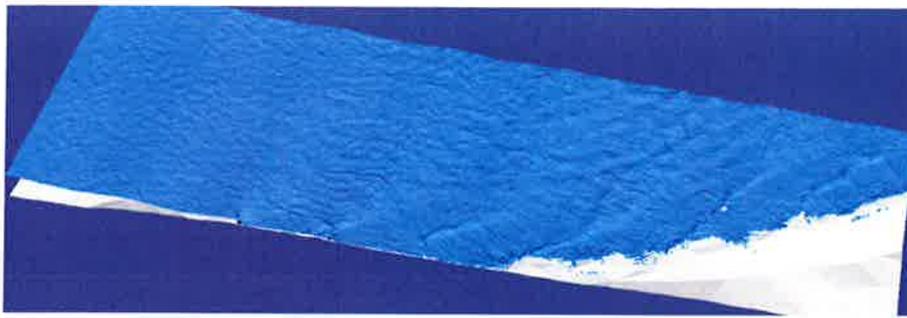
Das untersuchte Gebiet befindet sich am Zürichsee, zwischen Wädenswil

und Richterswil beim neu erstellten Seeuferweg. Es ist ein Streifen von 450 m x 150 m, welcher sich vom Tiefwasserbereich bis zum Ufer erstreckt. Die Orientierung des Ufers ist so, dass die grössten Wellen aus nordwestlicher Richtung direkt ins Gebiet hineinlaufen, die Randbedingung also einfach gehalten werden kann (Bild 13).

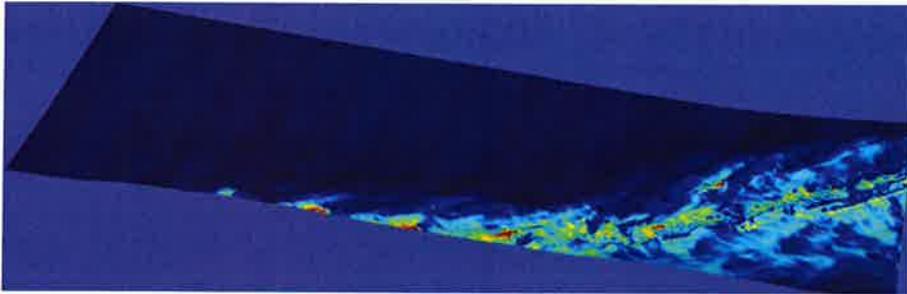
Die modellierten Wellen entsprechen dem 100-jährlichen Extremereignis mit einer Wellenhöhe von 1.4 m und einer Wellenlänge von 30 m. So muss die Wassertiefe am linken Modellrand mindestens 15 m betragen, damit es sich noch um Tiefwasserwellen handelt. Das Geländemodell wurde mittels der bathymetrischen Karte und den Plänen der beiden Riffs erstellt, welche sich im Untersuchungsgebiet be-



**Bild 15. Simulation des Wellengangs bei einem Extremereignis. In der Bildmitte ist eine brechende Welle zu sehen; darunter befindet sich das Riff.**



**Bild 16. Ansicht von oben. Gut zu erkennen ist, wie die Wellen abgelenkt werden (Refraktion) und ans Ufer branden.**



**Bild 17. Die Geschwindigkeitsverteilung am Boden zeigt die Stärke der Grundströmungen und wo Sediment verfrachtet werden kann.**

finden (Bild 14).

Am linken Modellrand muss die Welle definiert werden, dies geschieht durch die Vorgabe der auf Orbitalbahnen kreisenden, mit der Tiefe abnehmenden Geschwindigkeitsvektoren. An den Seiten des Rechengebietes besteht eine Symmetriebedingung, das Ufer ist als feste Berandung definiert. Ausser der Wellenbewegung am Einströmrand muss nichts mehr vorgegeben werden, alles andere entsteht dann sozusagen von selbst im Inneren des Rechengebietes.

Eine virtuelle Beobachterin würde in Ufernähe etwa das Bild 15 sehen. In Bildmitte ist gerade eine sich brechende Welle zu sehen. Die Wellenhöhe hat bis zum Auftreffen am Ufer nur wenig abgenommen – sie beträgt immer noch mehr als 1 m.

Von den Riffen ist nur zeitweise etwas zu sehen. Aus der Vogelperspektive sieht die Szenerie dann wie in Bild 16 aus: Es ist gut zu erkennen, wie die Wellen dort brechen, wo das Ufer flacher wird, und wie die Wellen zum Ufer hin abgelenkt werden (Refraktion). Wie in der Wellentheorie beschrieben, laufen sie nicht parallel ans Ufer, sondern mit einem Winkel von etwa 30 Grad.

Eine solche numerische Simulation ist sehr aufwendig. Sie kann den Wellenverlauf in der Flachwasserzone jedoch gut erfassen und abbilden. Der grosse Vorteil solcher Simulationen besteht auch darin, dass in der grossen Datenmenge (ein einzelner Zeitpunkt belegt gut 700 MB) alle

Grössen an jedem Punkt gespeichert sind. So lassen sich interessante Auswertungen machen. Als Beispiel hierfür ist im Bild 17 der Geschwindigkeitsbetrag am Seegrund zu sehen. Damit lässt sich aufgrund der Geschwindigkeiten abschätzen, welche Schubspannungen auftreten und welche Sedimentkörner mitgerissen werden. Aus einer Zeitfolge solcher Darstellungen könnte dann mitverfolgt werden, wo Sediment erodiert und wieder abgelagert wird.

#### Literatur

Brinkmann, B. (2005): Seehäfen, Planung und Entwurf, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Bruschin, Jaques (1974); Vagues de bise sur le Petit-Lac, I Préviation et analyse, II Stations de mesure; Etude effectuée pour le Département des Travaux Publics du Canton de Genève, Juillet 1974 EPFL, Département de génie civil, Laboratoire d'hydraulique.

Bruschin, Jaques, Falvey, Henry (1975); Vagues de vent sur un plan d'eau confiné, Considérations générales et application au Léman (Petit-Lac) Communication du Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL, Bulletin techniques de la Suisse romande – 101e année – No 14-3 juillet 1975.

Bruschin, Jaques, Schneiter, Louis (1978); Caractéristiques des vagues dans les lacs profonds, Vagues de bise sur le Léman (Petit-Lac) – Campagne de mesures 1974–1978, Bulletin techniques de la Suisse romande – 104e année – No 19–14 septembre 1978.

Die Küste, Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, EAK 2001, Empfehlungen für Küstenschutzwerke.

Empfehlungen des Arbeitsausschusses «Ufer-einfassungen» Häfen und Wasserstrassen EAU 2004, 10. Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2005.

Huber, A., Hächler, Hp., Ziemer, F. (1984): Wellenmessungen auf dem Walensee, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH, Zürich.

Mai, S., Peasler, C., Zimmermann, C. (2004): Wellen und Seegang an Küsten und Küstenbauwerken mit Seegangs atlas der Deutschen Nordküste, Vorlesungsergänzungen des Lehrstuhls für Wasserbau und Küsteningenieurwesen Franzius-Institut, Universität Hannover.

Schlund, R.A. (1972, 1975): Pläne der Tiefenkurve des Zürichsees im Kanton Zürich.

Shore Protection Manual, Volume I by U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 2001.

Trokey, Y. (2011): Foehn wind generating waves on Lake Zurich, Institute for Atmospheric and Climate Science ETH, Zurich, March.

Wasserbauliche Mitteilungen, Wellen – Prognosen – Wirkungen – Befestigungen, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden, 1996.

#### Anschrift der Verfasser

Richard Staubli, dipl. Ing. ETHZ, Ingenieurbüro Staubli, Kurath & Partner AG  
richard.staubli@wasserbau.ch

Stephanie Matthias, M.Sc. ETHZ., Ingenieurbüro Staubli, Kurath & Partner AG  
stephanie.matthias@wasserbau.ch

Andreas Huber, Dr. dipl. Ing. ETHZ beratender Ingenieur

huber.andreas@ggaweb.ch

Felix Hermann, Dr. dipl. Ing. ETHZ, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

felix.hermann@bd.zh.ch

Silke Dierer, Dr. rer. nat. (Meteorology), Meteotest

silke.dierer@meteotest.ch

Stefano Pellandini, dipl. Ing. ETHZ, Projektleiter Wasserbau, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

stefano.pellandini@bd.zh.ch.