Wellenatlas für Schweizer Seen

Autor(en): **Diebold, Marc / Iseli, Christoph / Elsener, Jürg**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **111 (2019)**

Heft 1

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-946158

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Wellenatlas für Schweizer Seen

Marc Diebold, Christoph Iseli, Jürg Elsener, Philippe Heller

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird das Projekt LATLAS vorgestellt, mit speziellem Augenmerk auf den Zürichsee. Diese interaktive Internetplattform beinhaltet einen Wellenatlas der wichtigsten Schweizer Seen. Für verschiedene Wiederkehrperioden und typische vorherrschende Winde werden dabei Wellencharakteristiken wie Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenlänge und Wellenrichtung berechnet. Diese Datengrundlage liefert eine einfach zugängliche und einheitliche Basis für die Wahl von Dimensionierungswellen. Um die verschiedenen Funktionalitäten der Internetplattform Swisslakes.net in der Praxis anzuwenden, wurde für den Zürichsee eine entsprechende Studie durchgeführt.

Auch wenn sich dieses Werkzeug in erster Linie an die zuständigen Behörden sowie an Ingenieur- und Umweltbüros richtet, die sich mit Uferschutz und Uferrenaturierung beschäftigen, so liefert die Plattform auch wertvolle Grundlagen für verschiedene Nutzer von Seen und Seeufern.

Résumé

Cet article présente le projet LATLAS qui vise à fournir, par une plateforme Internet interactive, un atlas des vagues pour les principaux lacs suisses. Les caractéristiques des vagues (hauteur significative, période, longueur d'onde, direction) générées pour chaque vent dominant y sont données pour différentes périodes de retour. Ainsi constituée, cette base de données propose une approche commune pour le choix des vagues de dimensionnement. Afin de présenter les différentes fonctionnalités pratiques de la plateforme Internet Swisslakes.net, les résultats pour le cas pratique du lac de Zürich sont exposés et discutés.

Si cet outil s'adresse en premier lieu aux administrations ainsi qu'aux bureaux de génie civil et d'environnement actifs dans le domaine lacustre, il est aussi destiné aux différents utilisateurs des lacs intéressés par cette thématique.

1. Einleitung

Das Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz) vom 24. Januar 1991 und die Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 haben den umfassenden Schutz der Gewässer und ihrer vielfältigen Funktionen als Lebensräume für Pflanzen und Tiere sowie die nachhaltige Nutzung durch den Menschen zum Ziel. Die Revision der Gewässerschutzgesetzgebung im Jahr 2011 geht noch einen Schritt weiter. So führte sie unter anderem die Pflicht zur strategischen Planung und Umsetzung von Gewässerrevitalisierungen ein. Nachdem die strategische Revitalisierungsplanung für Fliessgewässer bereits abgeschlossen und in Umsetzung ist, werden die Kantone die Planungen für die Seeufer bis 2022 verabschieden müssen.

Ziel der Planung ist ein umfassender Schutz der Seeufer sowie deren gezielte Entwicklung in Richtung eines naturnahen Zustandes. Das Gesetz definiert Revitalisierung als Wiederherstellung der natürlichen Funktionen eines verbauten, korrigierten oder überdeckten oberirdischen Gewässers mit baulichen Massnahmen. Eine Voraussetzung für die Erreichung dieser Ziele sind gute Kenntnisse nicht nur über den Zustand der Seen und der Seeufer, sondern auch über die biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse, welche die naturnahen Gewässer prägen.

Neben der Seegrund-Topografie (Bathymetrie), den Sedimenteigenschaften und dem Wasserstand sind Welleneigenschaften wie Wellenhöhe, Wellenlänge oder Wellenrichtung hauptsächlich für die morphologische Entwicklung der Ufer verantwortlich. Für die Gestaltung und Bemessung von Revitalisierungsmassnahmen sind neben der Topografie des Ufers, der Körnung des Sediments und dem Wasserstand die Wellenbelastung und die windinduzierten Strömungen massgebend.

Die bisherigen Kenntnisse über die effektiven Wellenbelastungen an konkreten Uferabschnitten waren eher bescheiden. Mit dem Wellenatlas LATLAS wird eine Lücke gefüllt. Nicht nur beim Bau von «harten» Uferstrukturen, sondern insbesondere auch für die Bemessung von naturnahen, «weichen» Uferschutzmassnahmen in Revitalisierungsprojekten sind diese Kenntnisse von zentraler Bedeutung.

1.1 Die Wellenproblematik in der Schweiz

Auch wenn die Schweiz weit entfernt ist von Meeren und Ozeanen, so ist sie wegen der zahlreichen grossen Seen trotzdem von der Wellenproblematik betroffen. Die Modellierung von Wellen auf den Schweizer Seen ist wegen der oftmals verwinkelten Form und des Einflusses der Topografie auf die Winde kompliziert und anspruchsvoll. Die Abschätzung von extremen Wellen kann jedoch zum besseren Schutz der Uferböschungen und Uferverbauungen bei Extremereignissen beitragen. Dank der Internetplattform Swisslakes.net, die durch das Büro Hydrique entwickelt wurde, sind diese Ergebnisse für sämtliche Betroffenen und Interessengruppen frei zugänglich.

1.2 Stand der Technik, Literaturrecherche

Wellenforschung wurde zuerst in Ländern durchgeführt, die über lange Küstenstreifen verfügen. In einzelnen Fällen, wie zum Beispiel in den Niederlanden, bildete diese Forschung die Grundlage für den effektiven Schutz von Land mit Dämmen und Deichen. In diesen Ländern gibt es lange Zeitreihen von Wellendaten, die die Be-

stimmung von Eigenschaften extremer Wellen durch statistische Methoden erlauben (Jahresspitzen, Schwellenwerte). Darüber hinaus sind küstennahe Windfelder meistens relativ homogen, da die Meeresoberfläche kein Relief aufweist.

Auf Seen, und speziell auf Seen in der Umgebung von Bergen, sind Windfelder sowohl bezüglich Richtung wie Intensität deutlich heterogener. Die Seemodellierung ist daher eine vorteilhafte Alternative zu Messungen, da sie gute räumliche Interpolationen erlaubt.

Für die Wellenmodellierung existieren zahlreiche Methoden. Die einfachste Methode basiert auf der Messkampagne JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) (*Hasselmann et al.* 1973), welche die signifikanten Wellenhöhen[1] auf offener See, ausgehend von der verfügbaren maximalen Überstreichlänge (Fetch) und der mittleren Windgeschwindigkeit einer bestimmten Dauer, liefert. Programme wie Mike21 von DHI (Danish Hydraulic Institute) oder SWAN (Simulating WAves Nearshore, an der Technischen Universität Delft entwickelt) erlauben eine genauere Modellierung, indem sie die Bathymetrie wie auch ein in Zeit und Raum variables Windfeld berücksichtigen.

1.3 Forschung in der Schweiz

Methoden des naturnahen Wasserbaus an Fliessgewässern waren bereits etabliert, als an Seeufern die ersten Versuche unternommen wurden. In den 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts wurden am Bielersee umfangreiche Revitalisierungsmassnahmen geplant und umgesetzt. Mit zunehmender Praxis in der Anwendung naturnaher Methoden wurde jedoch deutlich, dass nicht nur Erfahrungen fehlen, sondern auch grosse Wissenslücken bezüglich der Grundlagenkenntnisse bestehen. Das Landschaftswerk Biel-Seeland initiierte deshalb das Forschungsprojekt EROSEE, welches die dringendsten Fragen insbesondere zu den hydromorphologischen Prozessen an Seeufern und Flachwasserzonen, zu den hydrodynamischen Zusammenhängen zwischen Wind, Wellen, Strömungen, Sedimenten und Vegetation sowie anwendungsorientierte Fragen zu Konzeption und Bemessung von naturnahen wasserbaulichen Massnahmen beantworten sollte.

Basierend auf Feldmessungen, hydraulischen Modellversuchen und numerischen Modellierungen, wurden an der Berner Fachhochschule und der ETH Lausanne von 2002 bis 2006 Bemessungsgrundlagen für naturnahe, nachhaltige Massnahmen zum Schutz von Seeufern vor Erosion erarbeitet. Die massgeblichen Einflussfaktoren wie Bathymetrie, Sedimenteigenschaften, Wind- und Wellenklima wurden in Feldmessungen an fünf verschiedenen Versuchsstandorten am Bielersee ermittelt. Diese Messungen hatten zum Ziel, die Wechselwirkungen zwischen Schutzmassnahmen und Wellen zu quantifizieren, um anschliessend die numerischen und physikalischen Modellierungen eichen zu können. Auf der Plattform www.erosee.org sind Projektberichte und Publikationen aus der Projektphase zugänglich.

Im Jahr 2012 hat der Kanton Zürich durch das Büro *Staubli Kurath* u. *Partner AG* eine erste Wellenmodellierung für den Zürichsee durchführen lassen (*AWEL, Kanton Zürich*, 2012). Dabei wurden verschiedene Windszenarien und Wiederkehrperioden berücksichtigt. Die in dieser Studie erarbeitete Wellenkarte basierte auf Windüberstreichlängen (Fetch) und Windfeldern, für die verschiedene Extremereignisse und ihre Wiederkehrperioden gewählt wurden. Die Seetiefen sowie spezielle Ufereigenschaften wurden hingegen bei der Abschätzung der Welleneigenschaften nicht berücksichtigt. Die so ermittelten Wellenhöhen sind daher nur bei grossen Seetiefen und in Richtung der Fetch-Achse aussagekräftig.

Der vorliegende Artikel beschreibt zuerst das Projekt LATLAS, von seiner Erstellung bis zu den letzten Entwicklungen. In einem technischen Teil werden anschliessend die verschiedenen Schritte der Wellenmodellierungen beschrieben. Darauf folgt eine Vorstellung der Internetplattform Swisslakes.net mit einer Übersicht über die nächsten Schritte und zukünftigen Entwicklungen. Am Schluss des Artikels werden Ergebnisse einer Studie für den Zürichsee vorgestellt, in der die Funktionalitäten in der Praxis angewendet wurden.

2. LATLAS

2.1 Kurze Übersicht über Entwicklungen von LATLAS

2.1.1 Erste Version (2007)

Die erste LATLAS-Version datierte von 2007, bei der die nachfolgend beschriebene Methode angewendet wurde.

- Die Standorte und Windrosen der Wetterstationen in der Nähe des Sees wurden analysiert, um die für die Winde auf dem See geeignetsten Stationen auszuwählen.
- Messreihen über mehrere Jahrzehnte ermöglichten es, für jede Hauptwindrichtung Intensität-Dauer-Frequenz-(IDF-)Kurven für Wiederkehrperioden bis hundert Jahre zu erstellen. Für eine ausgewählte Wiederkehrperiode und Ereignisdauer zeigten die IDF-Kurven den auf das Ereignis bezogenen mittleren Wind.
- Die räumlichen Windeigenschaften auf dem See sind mit den Ergebnissen des Wettermodells COSMO2 von MeteoSchweiz erkennbar (*Doms et al.*, 2011), (*Doms et al.*, 2015). Zusammen mit den IDF-Kurven (siehe *Bild 2*) konnten diese Windfelder für verschiedene Ereignisse modelliert werden.
- Das Modell SWAN erlaubte die Modellierung der Welleneigenschaften (signifikante Wellenhöhe, -dauer, -länge und -richtung) für verschiedene Ereignisse. Für diese Simulationen wurden zudem Bathymetrie- und Geometriedaten berücksichtigt.

Die Ergebnisse wurden schliesslich nachprozessiert. Die massgeblichen Wellenhöhen sind seit 2013 auf der Internet-Plattform Swisslakes.net online.

2.1.2 Verwendung von präziseren Windfeldern: Übergang von COSMO zu WINDSIM (2015)

2015 wurde die Genauigkeit der Windfelder erhöht. Anstelle der Windfelder des Wettermodells COSMO2 mit einer Auflösung von 2 km wurden Resultate des Modells WINDSIM von Meteotest verwendet. Dank diesen neuen Eingabedaten konnte die Auflösung der Windfelder auf Punkte alle 50 m (Vierwaldstättersee) oder alle 100 m (Zürichsee) verbessert werden.

[1] Die signifikante Wellenhöhe (h_s oder $h_{1/3}$) ist statistisch definiert als das arithmetische Mittel aus dem höchsten Drittel der Wellen einer Beobachtung.

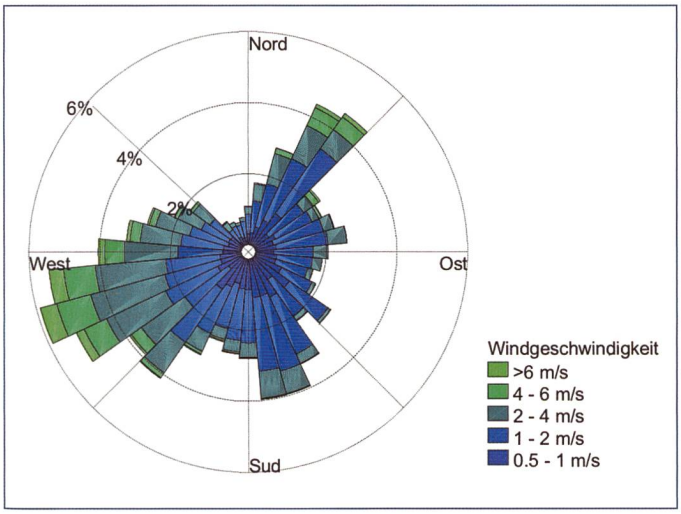

Bild 1. Windrose für die Wetterstation Wädenswil.

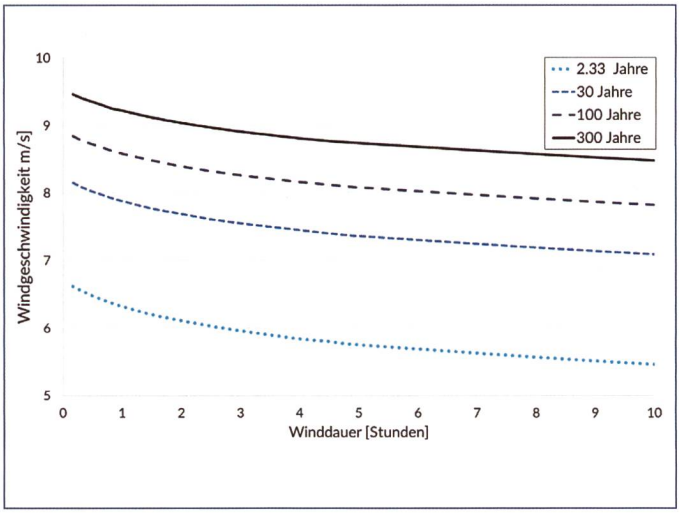

Bild 2. IDF-Kurven für eine Bise bei der Station Wädenswil.

2.1.3 Bessere Normierung der Windfelder (2016)

Die lineare Normierung der Windfelder mit Hilfe der IDF-Kurven ergibt für jeden Ort zu intensive Windfelder. Um dieses Problem zu beheben, wurde das Verhalten von Extremereignissen an 108 Wetterstationen von SwissMetNet (SMN) analysiert. Diese Studie ermöglichte die Bestimmung einer verbesserten Beziehung zwischen den Stationsdaten und den Bodendaten (*Diebold M.*, 2017).

2.1.4 Neue verfügbare Parameter (2017)

Für eine bessere Nutzung der verfügbaren Resultate auf der Internetplattform Swisslakes.net wurden ab 2017 neue Parameter zur Verfügung gestellt. Dazu gehören neben den signifikanten Wellenhöhen die Bathymetrie des Sees, die Wellenrichtungen, -längen und -perioden.

2.2 Simulationen

2.2.1 Wetterstationen, IDF-Kurven und Windfelder

Für jeden See werden die benachbarten Wetterstationen analysiert. Die Stationen, die Wind messen sowie über lange Messzeitreihen verfügen (mehrere Jahrzehnte) und deren Standort bezüglich Wind auf dem See geeignet sind (nahe am Seeniveau, von Erhebungen entfernt), werden berücksichtigt. Die Windrosen *(Bild 1)* der repräsentativen Stationen erlauben es, die Hauptwindrichtungen (in der Regel drei oder vier) zu bestimmen.

Für jede Hauptwindrichtung werden die IDF-Kurven mit den Jahresspitzen und Schwellenwerten (*Ancey,* 2015) berechnet *(Bild 2)*. Für eine ausgewählte Wiederkehrperiode ergeben diese Kurven die mittlere Windgeschwindigkeit in Funktion der entsprechenden Winddauer. Die Kurven ermöglichen es, für jedes Extremszenario Referenz-Windgeschwindigkeiten für jede Station zu ermitteln ($v_{\text{extrême,station}}$).

Diese Referenzgeschwindigkeiten für die Extremszenarien erlauben es, die Windfelder aus COSMO2 (MeteoSchweiz) oder WINDSIM (Meteotest) auf ein «Standardverhalten» für den vorherrschenden Wind zu normieren.

2.2.2 Normierung der Windfelder

Die Beziehung zwischen den Stationsdaten ($v_{station}$) und den Bodendaten ($v_{terrain}$) wurde, basierend auf einer Studie des Stationsnetzes SMN, bestimmt. Die extrapolierten Werte für das extreme Windfeld ($v_{\text{extrême}}$) – ausgehend vom mittleren Windfeld, das als Referenz dient (v_{ref}) – folgen der folgenden Beziehung:

$$v_{exteme}(terrain) = v_{extreme}(station) \left(\frac{v_{ref}(terrain)}{v_{ref}(station)}\right)^{0.65} \quad (1)$$

Es ist interessant zu sehen, dass im Fall einer linearen Normierung (ausgedrückt durch den Koeffizient 1 statt 0.65) die extrapolierten Winde bereits bei einer Wiederkehrperiode von rund zehn Jahren Orkanstärke erreichen.

2.2.3 Modellierung mit SWAN

Mit dem SWAN-Modell können Welleneigenschaften wie die signifikante Wellenhöhe, Wellenperioden, -längen und -richtungen für verschiedene Ereignisse simuliert werden. Diese Simulationen basieren auf einem Netz aus Daten der Bathymetrie und der Geometrie des Sees. Die Windfelder des Ereignisses werden auf den See angewendet und die entsprechenden Welleneigenschaften berechnet. Die Maschenweiten des Netzes werden an die Oberfläche des zu modellierenden Sees angepasst, wodurch die Resultate je nach See für 30 000 bis 120 000 Punkte verfügbar sind. In jedem Punkt sind die vier erwähnten Welleneigenschaften ersichtlich. Weiter werden die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Koordinaten des Punkts sowie die Seetiefe angezeigt.

Die Datenmodelle müssen die kleinräumigen Bedingungen auf den Seen abbilden können, weshalb verschiedene Simulationen durchgeführt werden. Die Höhe der Wellen ist bekanntlich ein Resultat aus den Faktoren Windstärke, Winddauer und Überstreichlänge. Die maximale Wellenhöhe wird aber begrenzt, und zwar entweder durch die Stärke des Windes, durch dessen Dauer oder durch die Überstreichlänge. Zudem gilt, dass für eine bestimmte Eintretenswahrscheinlichkeit die Dauer eines Windereignisses mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Damit nun für alle Windszenarien und alle Expositionen eines Sees Modelldaten zur Verfügung stehen, werden für jede Wiederkehrperiode und jede Windrichtung Simulationen für verschiedene Winddauern durchgeführt. In der Regel werden sieben Winddauern berücksichtigt (¼ h, ½ h, ¾ h, 1 h, 1h½, 2 h, 3 h).

Diese verschiedenen Werte werden für jeden Wind und jede Eintretenswahrscheinlichkeit berechnet. Ausgehend von diesen Resultaten wird eine Wellenrose für die acht Hauptrichtungen erzeugt. Die Werte berücksichtigen die Richtung der Welle und die signifikante Wellenhöhe. Eine Welle, die sich nicht parallel zur gewählten Richtung bewegt, erhält eine reduzierte signifikante Höhe. Der Reduktionsfaktor entspricht dem Kosinus des Winkels zwischen der gewählten Richtung

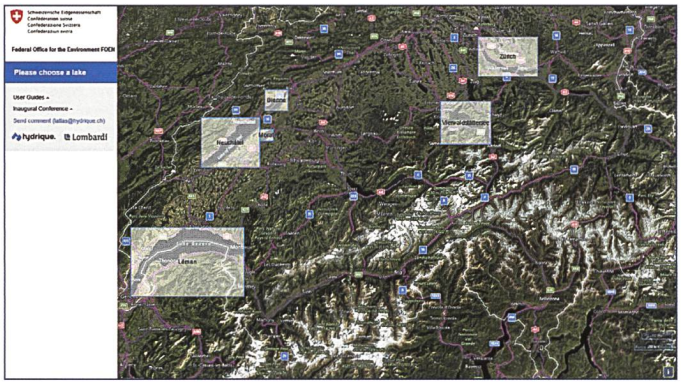

Bild 3. Ebene «Schweiz»: Hauptmenu der Internetplattform Swisslakes.net.

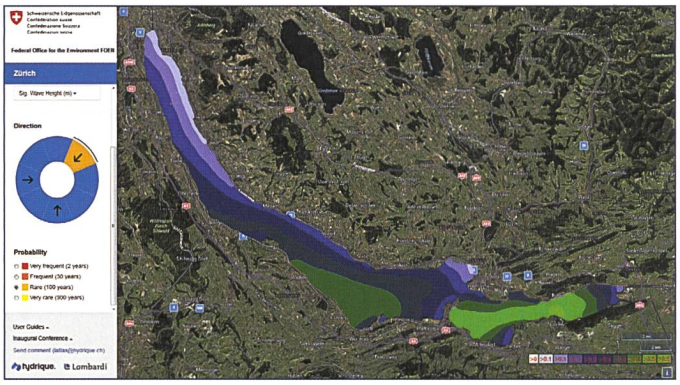

Bild 4. Ebene «See» für den Zürichsee für ein 100-jährliches Bise-Ereignis.

Bild 5. Ebene «Punkt» für den Zürichsee, Auswahl der Seetiefe.

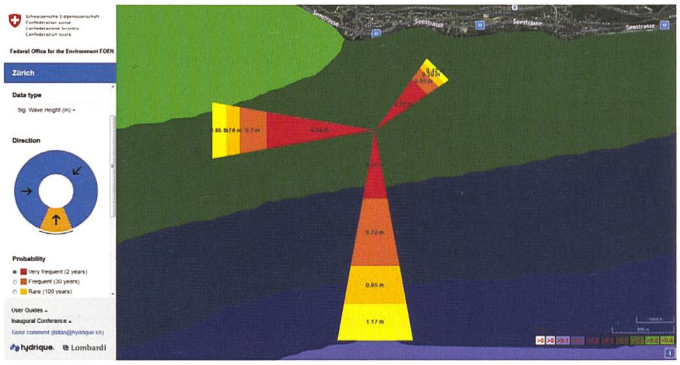

Bild 6. Ebene «Punkt» für den Zürichsee: Beispiel einer Wellenrose im südlichen Teil des Sees.

und der Richtung der Welle. Die maximale Welle in jeder Ausbreitungsrichtung wird aus der Gesamtheit der Resultate für die verschiedenen Windszenarien erzeugt.

2.2.4 Nachprozessierung der SWAN-Resultate

Für die grafische Darstellung der Ergebnisse in jedem Berechnungspunkt werden einzig die Eigenschaften der grössten Welle betrachtet (für jede Wiederkehrperiode und jede Windrichtung). Der Zusammenzug der zugehörigen Simulationen von verschiedenen Dauern ermöglicht die Bestimmung der signifikanten Wellenhöhen für jeden Punkt im See. Die entsprechende Wellenperiode, -länge und -richtung sowie die Winddauer werden festgehalten und gespeichert.

2.3 Vorstellung der Internetplattform Swisslakes.net

Die Internetplattform Swisslakes.net umfasst drei Nutzerebenen, um an verschiedene Informationen zu kommen. Diese Ebenen werden nachfolgend beschrieben.

2.3.1 Ebene «Schweiz»

Das Hauptmenü zeigt in den blauen Kästchen die verschiedenen modellierten Seen, siehe *Bild 3*. Ein Klick auf einen der Seen öffnet die nächste Ebene und erlaubt den Zugang zu den Daten des Sees.

2.3.2 Ebene «See»

Das geöffnete Fenster zeigt den gewählten See *(Bild 4)*. Der Name des Sees wie auch technische Informationen zur Modellierung (Basisdaten, vorherrschende Winde, IDF-Kurven usw.) können nun angezeigt werden. Der Nutzer kann aus den sechs im Menü «Data type» angezeigten Parametern (Seetiefe, signifikante Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenlänge, Wellenrichtung und interpolierte signifikante Wellenhöhe) auswählen. Weiter kann die vorherrschende Windrichtung (z. B. für den Zürichsee Bise, Westwind, Föhn) und die Wiederkehrperiode (für den Zürichsee 2-, 30-, 100- und 300-jährlich) aktiviert werden.

2.3.3 Ebene «Punkt»

Nachdem man auf einen Punkt im See geklickt hat, erscheinen die Koordinaten des Punkts sowie sämtliche berechneten Werte für das gewählte Windszenario *(Bild 5)*.

Bild 6 zeigt eine Wellenrose im südlichen Teils des Zürichsees. Es ist eine 2-jährliche Bise dargestellt, bei der signifikante Wellenhöhen von 0.27 m zu erwarten sind. Im Vergleich dazu wären bei einem 100-jährlichen Westwind signifikante Wellenhöhen von 0.78 m möglich.

Auf der Ebene «Punkt» ist es zudem möglich, automatisch die Werte der signifikanten Wellenhöhe im gewählten Punkt anzuzeigen. Das erzeugte CSV-File enthält für den gewählten Punkt die folgenden Informationen:

- X/Y-Koordinaten im Koordinatensystem CH1903+ / LV95
- Seetiefe
- signifikante Wellenhöhen für alle vorherrschenden Winde und Wiederkehrperioden
- Wellenlängen für alle vorherrschenden Winde und Wiederkehrperioden
- Wellenperioden für alle vorherrschenden Winde und Wiederkehrperioden
- signifikante Wellenhöhen in Ausbreitungsrichtung für die acht Hauptrichtungen und Wiederkehrperioden.

3. Praktische Anwendung für den Zürichsee

Für den Zürichsee wurde eine Studie durchgeführt, um die verschiedenen Funktionalitäten der Internetplattform Swisslakes.net zu testen und in der Praxis anzuwenden.

In der Nähe des Zürichsees befinden sich fünf Wetterstationen: Schmerikon, Uetliberg, Wädenswil, Zürich-Fluntern und Zürich-Kloten. Gemäss einer Literaturrecherche können mit diesen Stationen die wichtigsten Winde über dem Zürichsee bestimmt werden: die Bise (Wind aus Nordosten), der Föhn (Wind aus

Süden) und der Westwind. Aufgrund der zu grossen Distanz zum See der Station Zürich-Kloten und der topografischen Lage der Station Uetliberg wurden diese zwei Wetterstationen für die Studie nicht berücksichtigt, da sie nicht repräsentativ waren für die Windbedingungen über dem See.

Für die Studie wurden somit die Winddaten und entsprechenden Statistiken der Wetterstationen Zürich-Fluntern, Wädenswil und Schmerikon verwendet. Aufgrund ihrer Standorte wurden für die Windtypen Bise und Westwind die Daten aller drei Stationen verwendet, während für die Charakterisierung des Windtyps Föhn nur die Wetterstation Wädenswil geeignet war und beigezogen wurde.

Für die Bestimmung der Windfelder wurden nach Vorgabe des AWEL die vier Wiederkehrperioden für 2, 30, 100 und 300 Jahre berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit mit den Jährlichkeiten der Fliessgewässer sicherzustellen. Um möglichst alle grösseren Wellen auf dem See zu erfassen, wurden die 7 Winddauern 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2 und 3 Stunden ausgewählt.

Die Studie lieferte interessante Resultate in Bezug auf die grössten Wellen auf dem See. Es ist anzumerken, dass es sich hier um signifikante Wellenhöhen handelt. Bei der entsprechenden Herleitung wird die mittlere Distanz zwischen Wellenspitze und Wellental vom Drittel der grössten Wellen berücksichtigt. Die beobachtbaren, effektiven maximalen Wellenhöhen bei diesen Ereignissen können beinahe doppelt so gross sein wie die ermittelten signifikanten Wellenhöhen.

Für ein 2-jährliches Bise-Ereignis überschreiten die Wellen nur sporadisch die signifikante Wellenhöhe von 30 cm (auf dem Obersee und in der Nähe von Wädenswil). Bei 2-jährlichen stürmischen Westwinden können in der Gegend von Jona signifikante Wellenhöhen von über 60 cm erwartet werden (siehe *Bild 6* und *Bild 7*). Und bei Föhn sind die signifikanten Wellenhöhen südlich und südöstlich der Stadt Zürich grösser als 40 cm (siehe *Bild 8*).

Für den Zürichsee gilt generell, dass Werte für die Wellenlänge und Wellenperioden eng mit den signifikanten Wellenhöhen korrelieren. Zusammen mit Daten zur Seetiefe liefern die Ergebnisse wichtige Informationen für die Vordimensionierung von Uferbauwerken. Wenn zum Beispiel in Zollikon ein neuer Schiffsteg den alten ersetzen soll, kann aus der Internetplattform Swisslakes.net herausgelesen werden, dass ein 30-jährlicher Föhnsturm zu Wellen führt, deren Spitze maximal bis 1 m über den normalen Wasserstand reichen. Dadurch kann der Steg entsprechend dimensioniert werden, indem man die Steghöhe gegenüber dem Wasserstand entsprechend wählt oder indem man die Struktur so verstärkt, dass die vertikalen Kräfte der Wellen aufgenommen werden können.

3.1 Verbesserungen durch die Internetplattform Swisslakes.net

Die neue Version der Internet-Plattform Swisslakes.net bringt gegenüber der Wellenkarte Zürichsee von 2012 (*AWEL*, 2012) verschiedene Verbesserungen.

Bezüglich der angewendeten Methode berücksichtigt die Plattform Swisslakes.net im Gegensatz zur Wellenkarte 2012 die Seetiefen und spezifischen Ufereigenschaften. Bei der Wellenkarte 2012 wurde eine vereinfachte Formel für grosse («unendliche») Seetiefen und ohne Ufereigenschaften verwendet. Bei der Plattform Swisslakes.net wird eine Wellentransformation in Ufernähe berechnet, obwohl die dieser Berechnung zugrunde liegende Bathymetrie beim Zürichsee relativ ungenau ist. Trotzdem führt dies zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse gegenüber der Wellenkarte 2012.

Bei Westwind und einer 30-jährlichen Wiederkehrperiode sagt die Wellenkarte 2012 signifikante Wellenhöhen von 1.3 m voraus (Sektor 12 der Karte). Die Plattform Swisslakes.net liefert hingegen Werte von weniger als 0.3 m. Bei genauerer Betrachtung wird klar, dass der Wert von 1.3 m aus der Wellenkarte 2012 ausschliesslich für den Sektor 300–330° der Windrose gilt, während die Werte bei den benachbarten Sektoren 270–300° und 330–360° unter 0.4 m liegen.

Demgegenüber kann gesagt werden, dass die Werte aus der Wellenkarte 2012 und der Plattform Swisslakes.net gut übereinstimmen, wenn der Einfluss der Ufereigenschaften begrenzt und die Windüberstreichlängen (Fetchs) bestimmend sind. So ergeben sich am nördlichen Ende des Zürichsees für einen 30-jährlichen Föhn Wellenhöhen von 1.05 m aus der Wellenkarte 2012 und 0.95 m aus der Plattform Swisslakes.net.

Aus praktischer Sicht ist zu erwähnen, dass die Plattform Swisslakes.net Werte für jeden Punkt im See liefert, während aus der Wellenkarte 2012 Ergebnisse nur für 23 Sektoren bereitgestellt werden. Weiter können Wellenrichtungen je nach entsprechender Windrichtung stark variieren. Die Plattform Swisslakes.net liefert Wellendaten für jede Windrichtung, was bei der Wellenkarte 2012 nicht der Fall ist. Die Kenntnis des genauen Angriffswinkels einer Welle, z. B. auf einen Damm, erlaubt eine präzisere Dimensionierung des Bauwerks. Schliesslich liefert die Berücksichtigung von 2-jährlichen Ereignissen auf der Plattform Swisslakes.net ebenfalls eine bessere Dimensionierungsgrundlage.

4. Schlussfolgerungen

4.1 Neue Datengrundlage

Die Uferbereiche der Seen und das Verständnis der dortigen Prozesse sind für künftige Revitalisierungen und Hochwasserschutzmassnahmen von zentraler Bedeutung. Der Wellenatlas liefert detaillierte Daten zu den Wellen für verschiedene

Bild 7. Signifikante Wellenhöhen für 2-jährliche Westwind-Ereignisse, aus der Internetplattform Swisslakes.net.

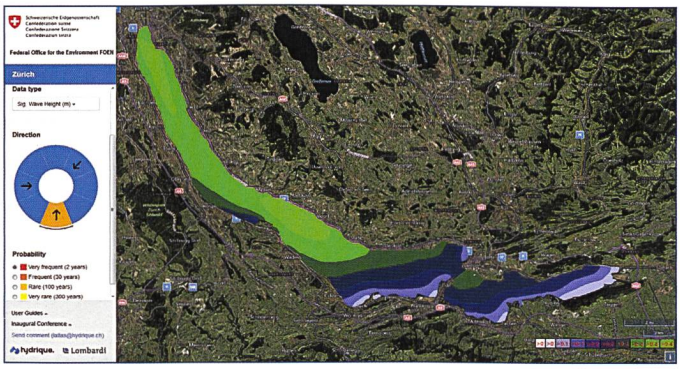

Bild 8. Signifikante Wellenhöhen für 2-jährliche Föhn-Ereignisse, aus der Internetplattform Swisslakes.net.

Wiederkehrperioden für jeden Punkt im See, insbesondere für die Uferbereiche. Er ist damit eine wichtige Grundlage für die Bemessung von (harten und weichen) Uferschutzmassnahmen, welche bisher in dieser Art nicht zur Verfügung stand. Der Wellenatlas enthält heute Daten von sechs Schweizer Seen. Eine Erweiterung des Atlasses auf weitere Seen ist mit der ausgereiften Methodik jederzeit möglich. Wünschbar wäre dabei jeweils der Einbezug einer aktuellen Bathymetrie.

Mit den Wellendaten ist nun die Energie bekannt, welche auf das Ufer wirkt. Im Rahmen eines Wasserbauprojekts interessieren jedoch auch die mit den Welleneigenschaften und den windinduzierten Strömungen zusammenhängenden morphologischen Prozesse am Ufer und in der Flachwasserzone. Gerade für Uferrevitalisierungen wären genauere Kenntnisse über die vorhandenen Sedimenttransporte entscheidend, bedeutet doch die Wiederherstellung der natürlichen Funktionen auch die Wiederherstellung einer möglichst natürlichen morphologischen Dynamik.

Im Rahmen der Studie Zürichsee konnten die wichtigsten Funktionalitäten der Plattform Swisslakes.net für die Praxis anwendbar gemacht werden. Auf dieser Grundlage konnten die Welleninformationen für den Zürichsee gegenüber der Wellenkarte von 2012 verbessert werden.

4.2 Nächste Schritte

Als vielversprechender nächster Schritt wird die Weiterentwicklung eines «Strömungsatlasses» als zusätzliche Grundlage für die Bemessung der Ufer und insbesondere für die Revitalisierung von Seeufern angesehen. Dazu sollen zunächst Vorarbeiten zur Methodologie durchgeführt werden. Während die Wellen über den ganzen See gerechnet werden müssen, sind Strömungen das Resultat der Wellen und können deshalb lokaler betrachtet werden.

Eine neu entwickelte Methode für die Berechnung von Strömungsgeschwindigkeit, Sedimenttransport und Sedimentbilanz soll mit neuen Felddaten kombiniert und abgeglichen werden. Um eine bessere Modellierung der Wellentransformation in der Flachwasserzone des Sees zu ermöglichen, wurden in Ufernähe des Genfersees und des Bielersees bereits präzisere Messungen durchgeführt. Für den Zürichsee laufen momentan die Vorbereitungen für solche Messungen. Neben der Verbesserung der Vorhersagen der Wellenhöhen ermöglichen diese Messungen wie erwähnt eine bessere Modellierung der ufernahen Prozesse wie Strömungen und Sedimenttransport.

Danksagung

Dieser Artikel wurde massgeblich durch das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL), *Matthias Oplatka* und *Natascha Eisenhut*, unterstützt. Basis dafür war die Erarbeitung des Wellenatlasses für den Zürichsee. Weiter möchten wir uns bei *Andreas Huber* für die technische Unterstützung und erfolgreiche Zusammenarbeit bei der Studie Zürichsee bedanken.

Literatur

Amini, A., Dhont, B., Heller, Ph. 2017: Wave atlas for Swiss lakes: modeling design waves in mountainous lakes. Journal Of Applied Water Engineering And Research, 5 (2), 103–113.

Amini, A., Heller, Ph. 2016: Assessment of wave risk for Swiss lakes: Numerical simulation of waves of different return periods. Proceedings of extended abstracts, INTERPRAEVENT 2016, 182–183

Ancey, C. 2015. Risques hydrologiques et aménagement du territoire. s.l.:Laboratoire hydraulique environnementale (LHE) - EPFL.

AWEL Kanton Zürich, Staubli Kurath & Partner AG, 2012: Wellenkarte Zürichsee, Übersicht 1:25 000; Januar 2014: Wellenkarte Zürichsee, Technischer Bericht.

Diebold, M., Heller, Ph., 2017. Scaling wind fields to estimate extreme wave heights in mountainous lakes. Journal of Applied Water Engineering and Research.

Doms, G. et al. 2011. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model - Part 2, Offenbach, Germany: Deutscher Wetterdienst.

Doms, G. et al., e., 2015. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model – Part 1, Offenbach, Germany: Deutscher Wetterdienst.

Hasselmann, K. et al. 1973. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Ergänzungssheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift.

Staubli, R., Matthias, S., Huber, A., Hermann, F., Dierer, S., Pellandini, S. 2014: Eine Wellenkarte des Zürichsees. «Wasser Energie Luft» – 106. Jahrgang, 2014, Heft 1, 31–38.

Anschrift der Verfasser

Marc Diebold, Hydrique Ingénieurs
marc.diebold@hydrique.ch

Christoph Iseli, Landschaftswerk Biel-Seeland
ch.iseli@landschaftswerk.ch.

Jürg Elsener, Hydrique Ingenieure
juerg.elsener@hydrique.ch

Philippe Heller, Hydrique Ingénieurs
philippe.heller@hydrique.ch