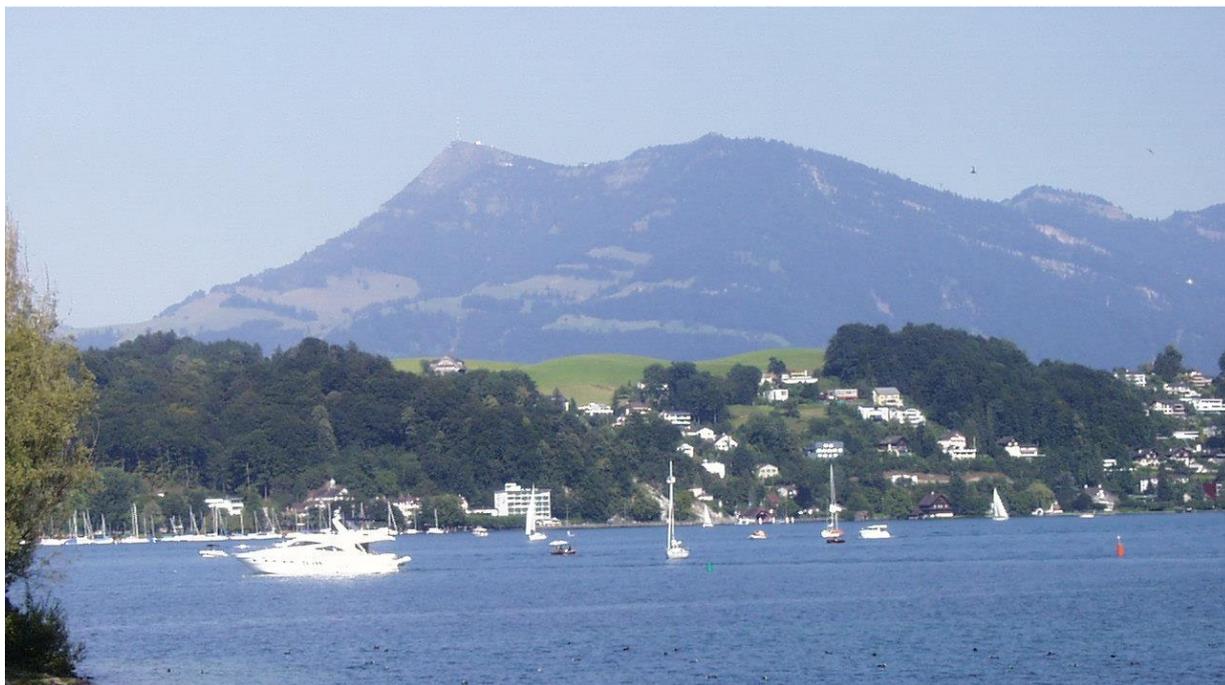


KANTONE
URI, SCHWYZ, OBWALDEN
NIDWALDEN, LUZERN



AUFSICHTSKOMMISSION
VIERWALDSTÄTTERSEE



Wellenatlas Vierwaldstättersee

Schlussbericht

Mai 2016

Auftraggeber

Aufsichtskommission Vierwaldstättersee (AKV)

Kantone: Uri, Schwyz, Obwalden,

Nidwalden, Luzern

c/o Amt für Umwelt Nidwalden

Engelbergstrasse 34

6371 Stans

Telefon 041 618 75 04

Telefax 041 618 75 28

afu@nw.ch

www.4waldstaettersee.ch

Projektleitung: Robert Lovas, Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern

Auftragnehmer



e-dric.ch

eau énergie environnement

Chemin du Rionzi 54

CH-1052 Le Mont sur Lausanne

info@e-dric.ch

Tel 021 784 33 13

Fax 021 784 33 22

Mobil 078 679 77 88

Autoren: Dr. Philippe Heller

Dr. Frédéric Jordan

Le Mont-sur-Lausanne, Mai 2016

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	2
2	ZIELE	2
3	METHODIK.....	2
3.1	WINDANALYSE.....	2
3.2	BERECHNUNGSSCHRITTE.....	2
3.3	MODELLIERUNG DER WELLEN	3
4	WINDANALYSE	4
4.1	WINDROSE UND IDF-DIAGRAMME.....	4
4.2	WINDSIM.....	6
5	WELLENMODELL	8
5.1	BATHYMETRIE	8
5.2	SIMULATION.....	9
5.3	RESULTATE	9
6	INTERNET PLATTFORM	11
7	ABSCHÄTZUNG DER UNSICHERHEIT	13
7.1	UNSICHERHEIT DER WINDSZENARIEN	13
7.2	UNSICHERHEIT DES PHYSIKALISCHEN MODELLS	14
7.3	NUMERISCHE UNSICHERHEIT	14
7.4	KOMBINATION DER FEHLER	14

1 Einleitung

Projekt LAT-LAS In diesem Projekt werden die Maximalwellen auf dem Vierwaldstättersee für verschiedene Wiederkehrperioden und ein Extremereignis berechnet. Der Wellenatlas wurde im Auftrag der Aufsichtskommission Vierwaldstättersee (AKV) erstellt und ist Teil der Internet-Plattform LATLAS (<http://swisslakes.net>), in welchem bereits der Zürich-, Neuenburger-, Bieler-, Murten- und Genfersee dargestellt sind.

2 Ziele

Die technischen und wissenschaftlichen Ziele dieses Projekts sind folgende :

- | | |
|--------------------------|--|
| Wind | 1) Meteorologische Analyse der Winde auf dem Vierwaldstättersee. Bestimmung der Geschwindigkeitsfelder und der Windrichtungen für die Wiederkehrperioden 2.33, 30, 100 und 300 Jahre. Als Extremereignis wird 1.5-mal das 300-jährliche Ereignis angenommen. |
| Wellen | 2) Detaillierte Berechnung der Wellenfelder auf dem Vierwaldstättersee. Für jeden Punkt und jede Wiederkehrperiode wird die maximale signifikante Wellenhöhe für jede Richtung bestimmt. |
| Internet-Plattform | 3) Die Resultate sind auf der Internetplattform http://swisslakes.net für alle frei zugänglich. Die Resultate können so zur Überprüfung der Machbarkeit oder der dynamischen Beanspruchung von Wasserbauwerken genutzt werden. |
| Unsicherheit-abschätzung | 4) Abschätzung der Unsicherheit bei der Wellenberechnung. |

3 Methodik

3.1 Windanalyse

Räumliche Diskretisierung des Windes Wellen entstehen durch Reibung zwischen Wind und Wasseroberfläche. Aus diesem Grund müssen die verschiedenen Windregime und deren Integration im Wellenmodell detailliert analysiert werden. Als Erstansatz galt ein uniformer Wind in der Richtung und der Intensität über den ganzen See. Dieser Ansatz ist für den Vierwaldstättersee nicht geeignet, da aufgrund der komplexen Topographie grosse Änderungen des Windes sowohl in der Richtung wie auch in der Intensität entstehen. MeteoSchweiz verfügt über ein numerisches Modell mit einer Höchstauflösung von 2 km (COSMO2). Diese Auflösung wird für dieses Projekt als ungenügend eingeschätzt. Aus diesem Grund wird zusätzlich ein 3D Modell benutzt, um die lokalen Winde in einem 25 m Raster zu simulieren. Das simulierte Windfeld wird abschliessend in der Intensität angepasst, um an den Stationen des Messnetzes SMN (SwissMetNet) die gemessenen Extremwinde zu erreichen.

3.2 Berechnungsschritte

Methode Folgende Methode wurde angewendet:

- 1) Bestimmung der dominanten Winde anhand der Windrose der SMN-Messstationen in Luzern, Giswil und Altdorf (ab 1981 bis Juni 2015) und Definition

der Windszenarien.

- 2) Erstellen von Intensität-Dauer-Frequenz (IDF) Diagramme für die dominanten Windrichtungen an den SMN-Messstationen. Extrapolation der IDF bis zur Wiederkehrperiode von 300 Jahren.
- 3) Berechnung der lokalen Winde für die definierten Windszenarien (Software WINDSIM).
- 4) Anpassung der lokalen Winde auf 10 m Höhe über der Wasseroberfläche, um an den SMN-Messstationen die Intensität der IDF Diagramme zu erhalten.
- 5) Modellierung der Wellen für jedes Szenario (Wiederkehrperiode, Dauer, Windrichtung)
- 6) Bestimmung der maximalen signifikanten Wellenhöhe für jeden Punkt im Modell und für jede Ausbreitungsrichtung und Wiederkehrperiode.

3.3 Modellierung der Wellen

Flexibles Gitternetz	Um Wellen zu modellieren braucht es Berechnungskerne über der gesamten Seefläche, so dass die Bathymetrie (Seetiefe an jedem Punkt) interpoliert werden kann. Ein flexibles Gitternetz mit Dreieckselementen wird angewendet. Dies erlaubt verschiedene Elementauflösungen. Die Auflösung der Uferelemente beträgt 20 m. In der Seemitte können die Elementauflösungen bis zu 100 m erreichen. Mit diesem Ansatz kann die Anzahl Netzelemente und somit auch die Rechenzeit limitiert werden.
Numerisches Modell	Die numerische Modellierung der Wellen erfolgt mit der Software SWAN (Simulating WAVes Nearshore, entwickelt an der Delft University of Technology). Dieses Modell wurde speziell für die Modellierung der Wellenbildung durch Wind auf dem Meer oder Seen entwickelt. SWAN ist eine ausführliche Software mit einem hohen Grad an Flexibilität, sowie der Möglichkeit gewisse Arbeitsschritte zu automatisieren. Eingangsvariablen sind ein Windfeld und ein Gitternetz der Bathymetrie des Sees. Dies erlaubt eine detaillierte Modellierung der Wellenprozesse bis zum Ufer. Ausgangsvariablen sind die physikalischen Parameter der Wellen, unter anderen die signifikante Wellenhöhe.
Simulation	Für jedes Windszenario, definiert durch die Wiederkehrperiode, Dauer und Richtung, wird eine Simulation ausgeführt. Die Dauer wird so gewählt, dass für eine gegebene Windrichtung und Wiederkehrperiode die Wellenhöhe maximal ist. Die Resultate werden am Schluss aggregiert, um für jede Wiederkehrperiode die maximalen Wellenhöhen zu erhalten.
Wellen- refraktion Feines Gitter- netz	Einer der Hauptschwierigkeiten bei der Wellenmodellierung liegt bei der Berücksichtigung der Uferrefraktion der Wellen. Bei starken Änderungen in der Bathymetrie wird die numerische Konvergenz der Berechnungen schwierig. Deshalb muss in Ufernähe die Elementauflösung verfeinert werden. Zudem wurde die Diskretisierung der Wellenspektren im Berechnungscode SWAN verfeinert, um die Qualität der Resultate zu erhöhen. Diese Anpassung ist vor allem für schwache Winde (< 10 m/s) sehr wichtig.

4 Windanalyse

4.1 Windrose und IDF-Diagramme

SMN
Stationen

Drei Messstationen (Abb. 1) aus dem SMN-Messnetz können für den Vierwaldstättersee verwendet werden:

- Luzern (LUZ), Höhe 454 m ü.M., Messung in 41 m Höhe, Daten seit Januar 1981
- Altdorf (ALT), Höhe 438 m ü.M., Messung in 10 m Höhe, Daten seit Dezember 2008.
- Giswil (GIH), Höhe 471 m ü.M., Messung in 10 m Höhe, Daten seit Januar 1994.

Windrose

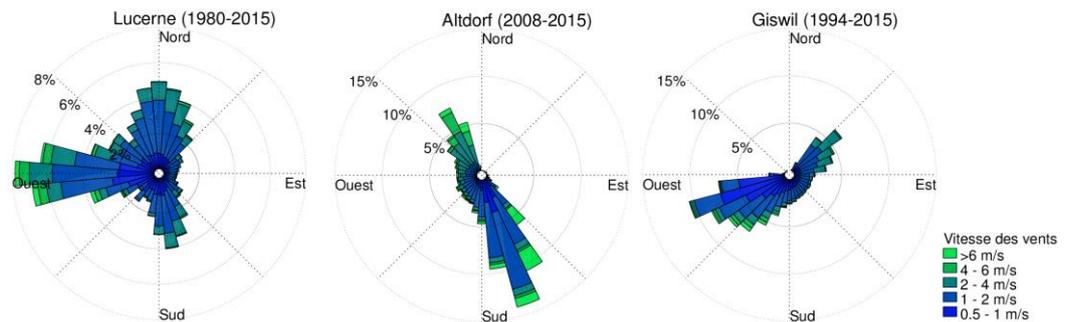


Abb. 1: Windrosen der ANETZ Messstationen

Dominierende
Winde

Die Windrosen (Abb. 1) bestätigen die Präsenz von drei dominierenden Windszenarien. Für den Vierwaldstättersee sind dies die Bise, Der Westwind sowie der Föhn. Für jedes dieser Windeszenarien kann eine SMN-Station als Referenzwert verwendet werden:

- Luzern (LUZ) für den Westwind (220° bis 310°)
- Altdorf (ALT) für den Föhn (130 bis 180°)
- Giswil (GIH) liegt in einiger Entfernung vom Vierwaldstättersee, befindet sich jedoch in einem Tal welcher die Bise (30° bis 80°) kanalisiert. Die Messwerte können daher für die Bestimmung des Windfeldes des Vierwaldstättersees verwendet werden.

IDF-
Diagramme

Für jede Messstation und jede dominante Windrichtung wird ein IDF-Diagramm erstellt. Zwei robuste statistische Methoden werden angewendet, um die Daten für hohe Wiederkehrperioden zu extrapolieren. Es handelt sich um die Block Maxima Methode (Zweijahresblöcke) mit einer Gumbelverteilung und der Schwellenmethode mit einer Exponentialverteilung. Für die Extrapolation der IDF-Diagramme für hohe Wiederkehrperioden wird ein gewichtetes Mittel beider Methoden berücksichtigt. Abb. 2 zeigt als Beispiel das IDF-Diagramm des Westwindes in Luzern.

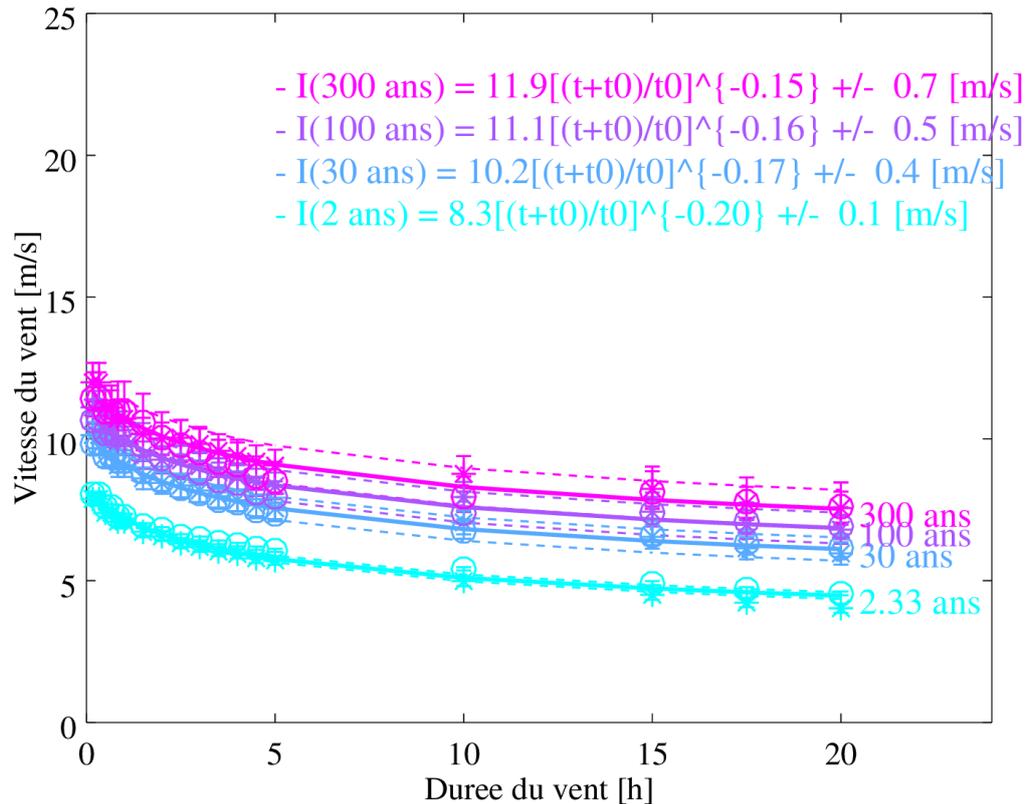


Abb. 2 : IDF-Diagramm für den Westwind in Luzern. Die Sterne stehen für die Block Maxima Methode und die Kreise für die Schwellenmethode. Die Fehlerbalken zeigen die Unsicherheit der statistischen Extrapolation. Jede Kurve wird mit der Gleichung $I = a(t+1)^{-b}$ parametrisiert, wobei die Koeffizienten a und b für jede Wiederkehrperiode einzeln bestimmt werden.

Die Diagramme auf Abb. 3 zeigen „theoretisches Quantil - empirisches Quantil“ für die beiden statistischen Extrapolationsmethoden (Block Maxima und Schwellenmethode) und bestätigen die Kalibrationsgüte.

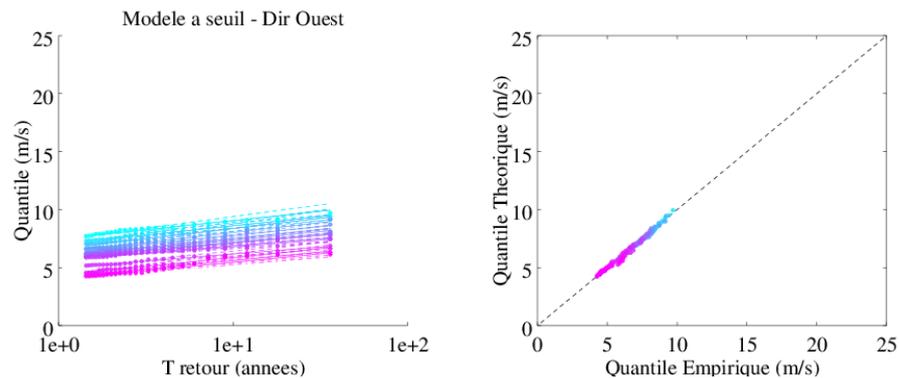


Abb. 3 : Diagramm Quantil – Wiederkehrperiode und theoretisches Quantil – empirisches Quantil des IDF-Diagramms vom Westwind in Luzern

Die mittlere Unsicherheit bei der Extrapolation (Mittelwert beider Modelle) liegt bei 2, 3, 10 und 20% für die jeweiligen Wiederkehrperioden von 2.33, 30, 100 und 300 Jahren.

4.2 WINDSIM

Windfeld Die Lokalwinde werden für die drei Hauptwindregime simuliert (Bise, Westwind und Föhn). Ein 3D Modell (WINDSIM) mit einer Elementauflösung von 25 m ermöglicht es, lokale Windvariationen zu berücksichtigen.

Skalierung des Windfeldes Die Geschwindigkeiten dieser lokalen Winde werden in einem weiteren Schritt angepasst, damit an den SMN-Stationen die gemessenen Werte erreicht werden. Eine Analyse des Windes über das gesamte SMN-Messnetz (108 Stationen) hat eine Korrelation zwischen mittlerer Windstärke und extremer Windspitze gezeigt. Diese Korrelation folgt einem Potenzgesetz mit einem Exponent von 0.65. Dieses Potenzgesetz wurde angewendet für die Skalierung des Windfeldes auf dem See basierend auf den gemessenen Windstärken an den Messstationen (Luzern, Altdorf und Giswil).

Die Resultate für jedes Regime sind nachfolgend aufgeführt.

Bise Die Bise ist grundsätzlich ein Nordostwind, aber dreht sich auf Höhe Brunnen zu einem Ostwind und am südlichsten Teil des Vierwaldstättersees zu einem Nordwind. Abb. 4 zeigt die Intensität und die lokalen Windrichtungen einer Bisesituation mit einer Dauer von einer Stunde und einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren. Die Kanalisierung der Bise in Richtung der SMN-Station Giswil ist gut sichtbar.

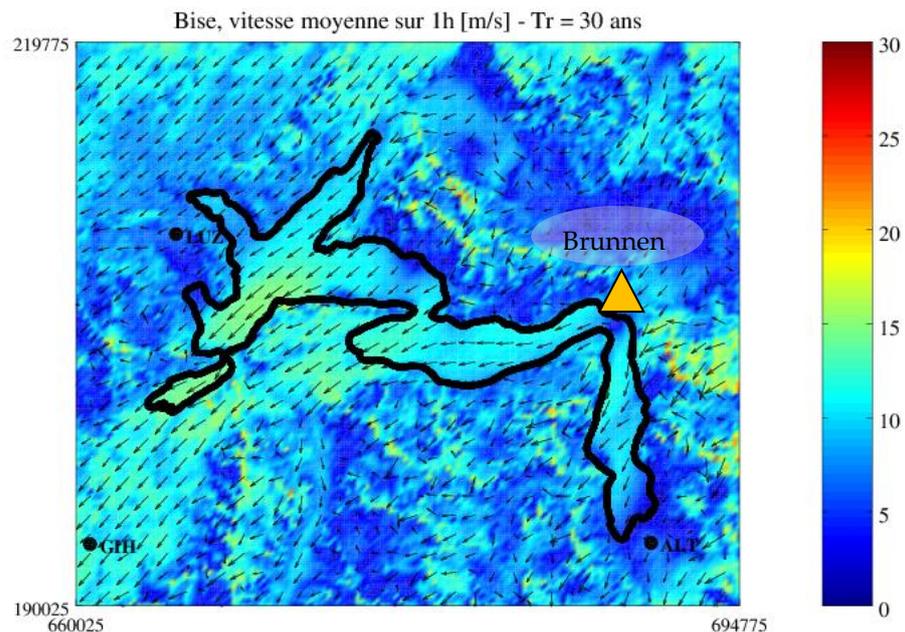


Abb. 4 : Windfeld einer Bisesituation mit einer Dauer von einer Stunde und einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren.

Westwind Der Westwind ist ein Wind aus Westen, der sich aber am südlichen Ende des Sees (bei Altdorf) zu einem Nordwind dreht und an Intensität einbüsst. Im nördlichen Teil des Sees in der Gegend von Küsnacht dreht sich der Westwind zu einem Wind aus Südwest. Intensität und lokale Windrichtungen für einen Westwind einer Dauer von einer Stunde und einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren sind auf Abb. 5 ersichtlich.

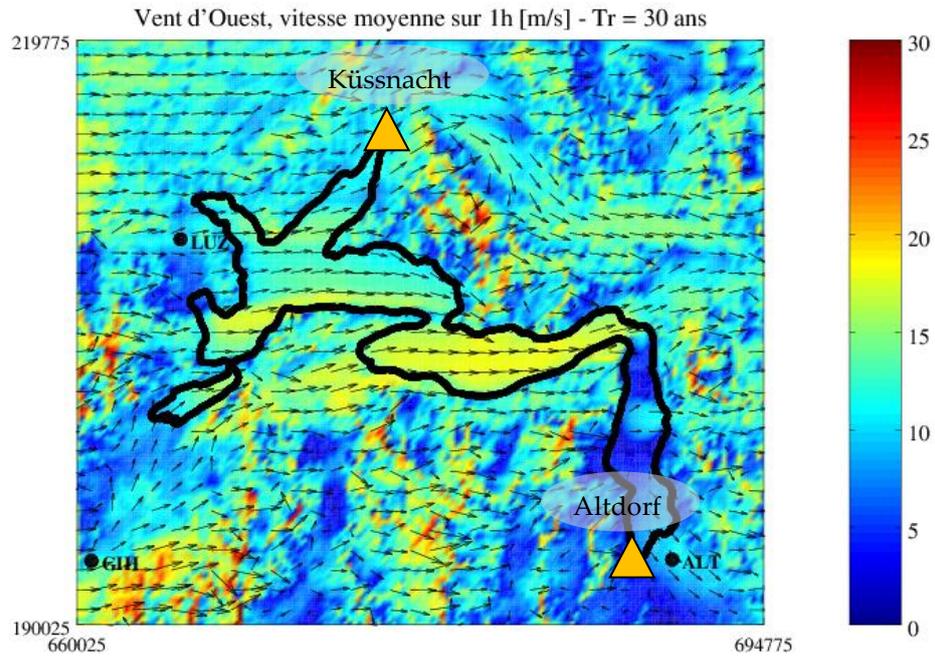


Abb. 5 : Windfeld einer Westwindsituation mit einer Dauer von 1 Stunde und einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren.

Föhn

Der Föhn ist grundsätzlich ein Südwind, welche durch die Topographie lokal verändert wird. Für eine Wiederkehrperiode von 30 Jahren und einer Dauer von einer Stunde ist der Föhn meistens stärker als der Westwind und die Bise. Der Föhn ist häufig der massgebende Wind für die nach Süden ausgerichteten Küstenabschnitte. Abb. 6 zeigt die Intensität und die lokalen Windrichtungen einer Föhnsituation mit einer Dauer von einer Stunde und einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren.

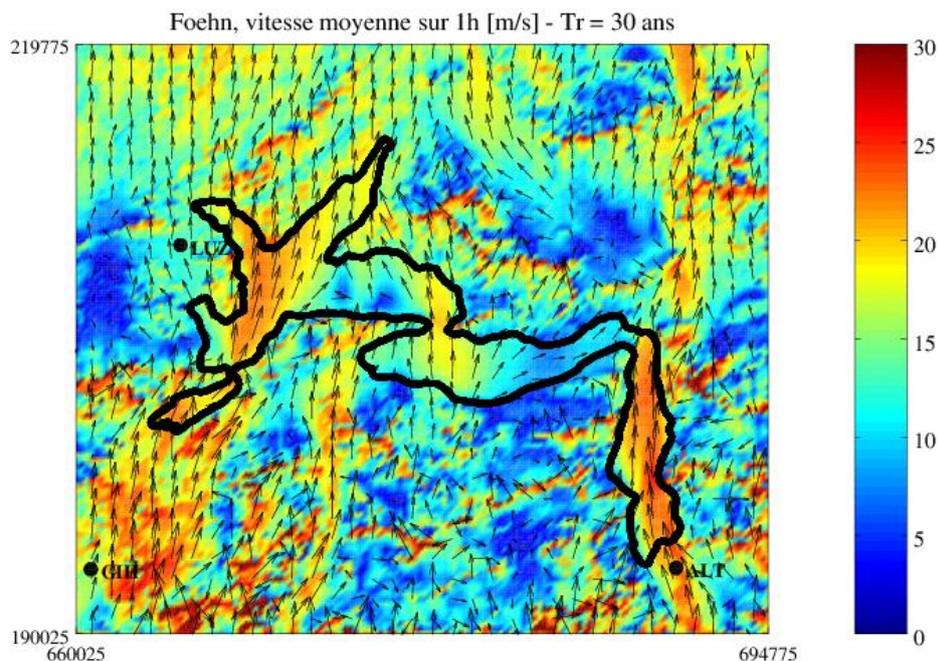


Abb. 6 : Windfeld einer Föhnsituation mit einer Dauer von 1 Stunde und einer Wiederkehrperiode von 30 Jahren.

5 Wellenmodell

5.1 Bathymetrie

Bathymetrie Die Bathymetrie des Sees wird aus den Isobathen der 1:25'000 Nationalkarten abgeleitet. Wo detaillierte Daten vom Kanton Luzern vorhanden waren, wurden diese benutzt. Abb. 7 zeigt die benutzte Bathymetrie.

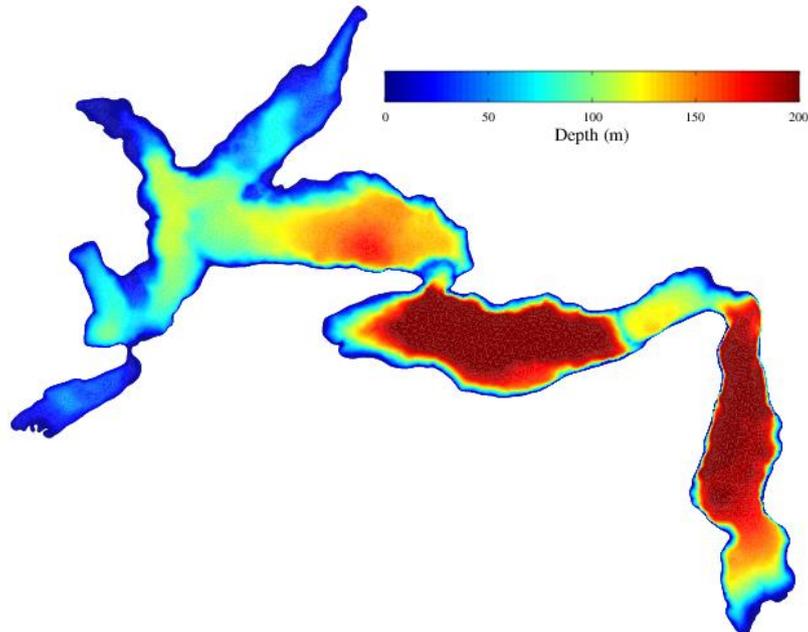


Abb. 7 : Bathymetrie des Vierwaldstättersees

Dreiecks-Gitternetz Ein Dreiecks-Gitternetz mit flexiblen Elementgrössen wird für die gesamte Seefläche bestimmt. Die Elementgrössen sind limitiert durch die Ufernähe, die Wassertiefe und Tiefenänderungen ($\Delta x < h/\tan\theta$). Das Gitternetz besteht aus 112'092 Elementen, was einer mittleren Grösse von 1'000 m² respektive einer mittleren Seitenlänge von ca. 45 m entspricht. Entlang der Ufer werden die Elemente auf 20 m limitiert. Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt des Gitternetzes.

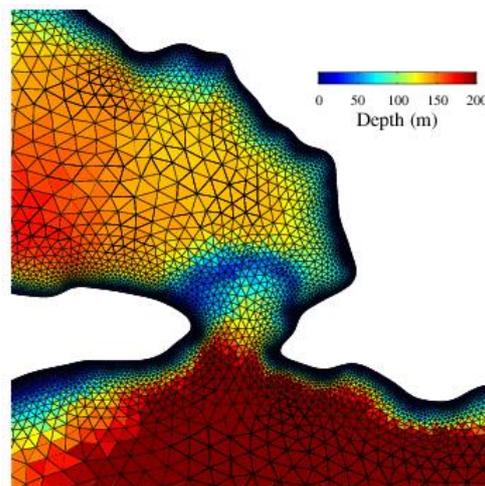


Abb. 8 : Flexibles Dreiecks-Gitternetz. Ausschnitt der Region Vitznau.

5.2 Simulation

Dauer und Wiederkehrperiode Für alle drei Windregime werden die Wiederkehrperioden 2.33, 30, 100 und 300 Jahre mit einer Dauer von 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2 und 3 Stunden simuliert. Es wurde sichergestellt, dass die maximale Wellenhöhe mit einer der untersuchten Dauern erreicht wurde.

Das 500-jährliche Ereignis wird nicht simuliert, weil die signifikante Wellenhöhe als 1.5-mal das 300-jährliche Ereignis definiert ist.

5.3 Resultate

Signifikante Wellenhöhe Das Hauptresultat der Modellierung ist die signifikante Wellenhöhe, welche per Definition das arithmetische Mittel aus dem höchsten Drittel der Wellenhöhen einer Beobachtung darstellt. Als Wellenhöhe gilt die Höhendifferenz zwischen dem Tief- und Hochpunkt eines Wellenbergs.

Wellenhöhe nach Windregime Die erhaltenen signifikanten Wellenhöhen sind auf Abb. 9 bis Abb. 11 für die drei Hauptwindregime dargestellt. Nur die Karten der Wiederkehrperiode 30 Jahre sind in diesem Bericht aufgeführt. Alle weiteren Karten sind direkt unter <http://swisslakes.net> verfügbar.

Bise

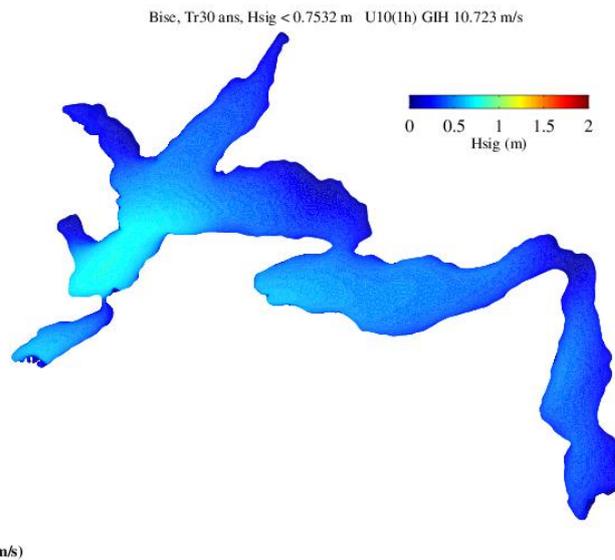


Abb. 9 : Signifikante Wellenhöhen bei Bise (Wiederkehrperiode = 30 Jahre)

Westwind

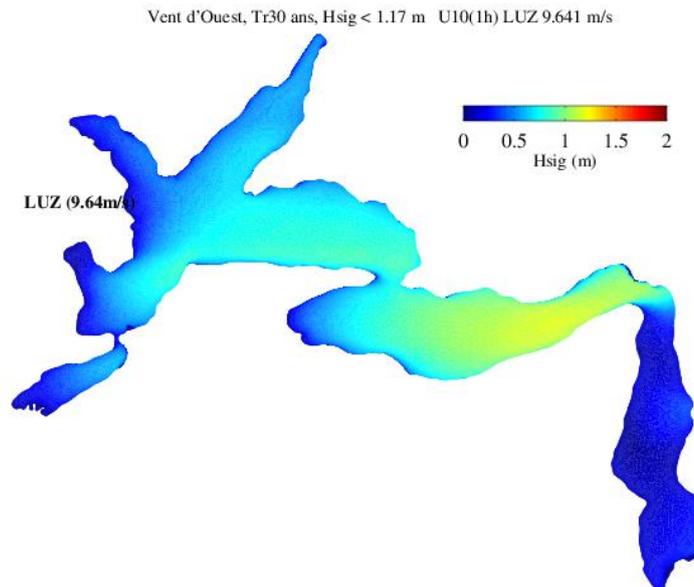


Abb. 10 : Signifikante Wellenhöhen bei Westwind (Wiederkehrperiode = 30 Jahre)

Föhn

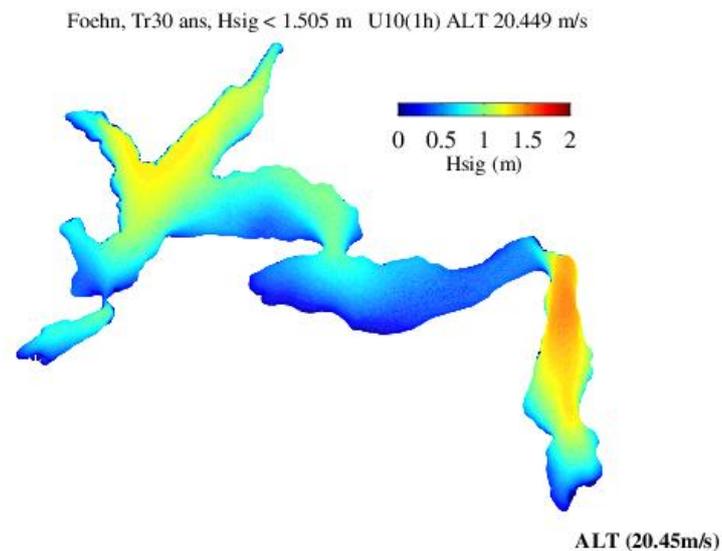


Abb. 11 : Signifikante Wellenhöhen bei Föhn (Wiederkehrperiode = 30 Jahre)

„Wellenrosen“ Es besteht die Möglichkeit, die Resultate anstatt anhand der Hauptwindregime anhand der Wellenausbreitungsrichtung darzustellen. Die Winde werden lokal zum Teil stark in ihrer Richtung abgeändert, daher können auch die Wellenrichtungen lokal von der Windrichtung des Windszenarios abweichen. Die Wellenrose wird in acht gleichgrosse Sektoren unterteilt und die maximale Wellenhöhe für jede Ausbreitungsrichtung bestimmt. Anhand der drei berechneten Wellenausbreitungsrichtungen werden die Wellenhöhen für die dazwischenliegenden Richtungen mithilfe einer trigonometrischen Beziehung berechnet. Auf Abb. 12 sind die Wellenhöhen für die acht Ausbreitungsrichtungen dargestellt.

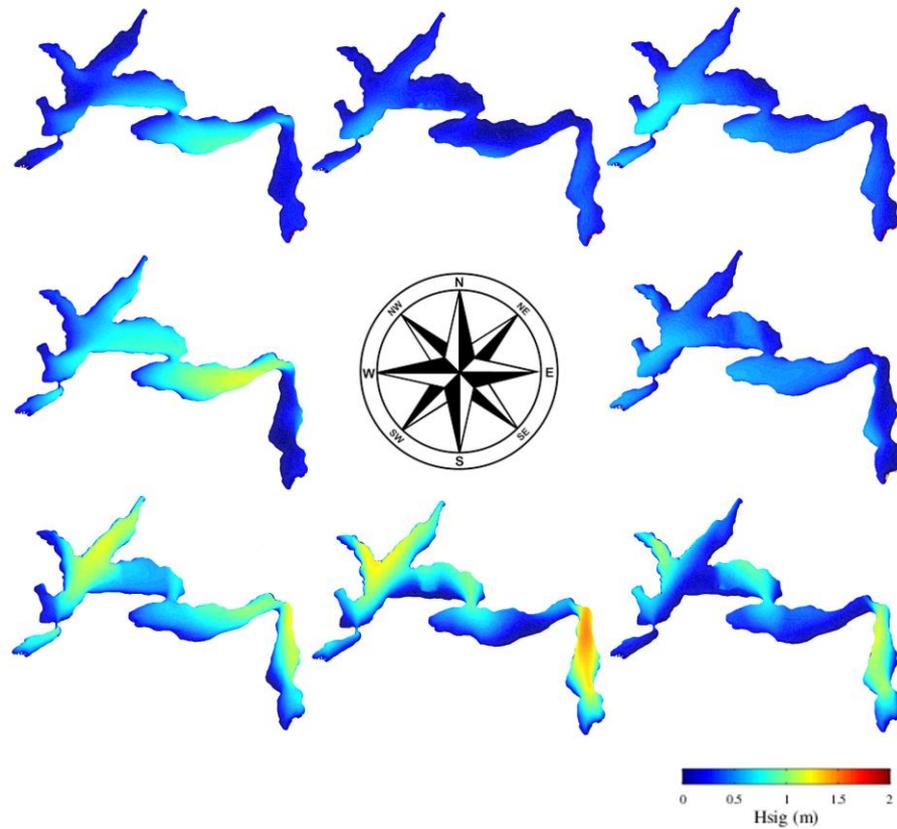


Abb. 12 : Maximale signifikante Wellenhöhe für jede Ausbreitungsrichtung für die 30 jährliche Wiederkehrperiode

6 Internet Plattform

Plattform der
Resultate

Alle Resultate sind unter <http://swisslakes.net> veröffentlicht.

Auf der Startseite (Abb. 13) ist die Schweizer Karte mit allen modellierten Seen zu sehen. Einer davon ist der Vierwaldstättersee (4cantons).

Seeauswahl

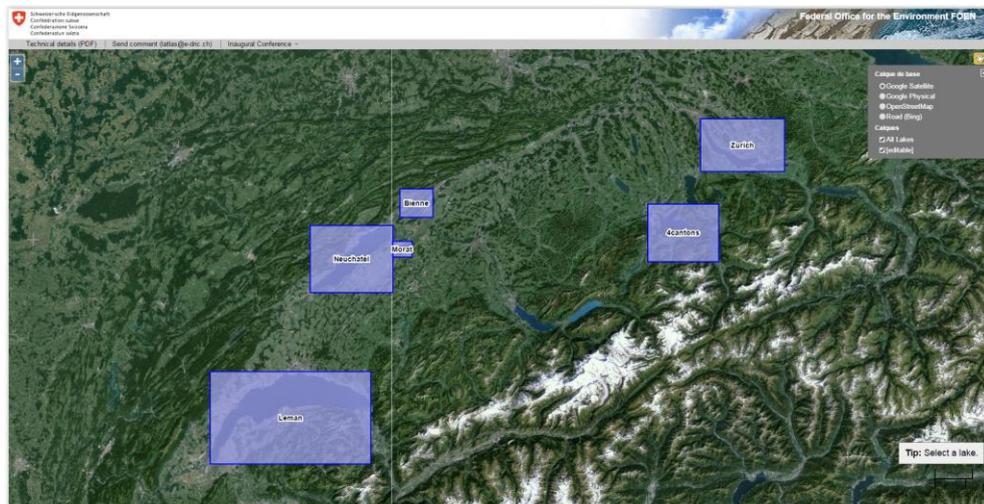


Abb. 13 : Startseite swisslakes.net

Wellenfelder Die Resultate des Vierwaldstättersees können mit einem Klick auf die Region aufgerufen werden. Die Plattform zeigt die maximalen signifikanten Wellenhöhen für jede Wellenrichtung und für unterschiedliche Wiederkehrperioden (Abb. 14).



Abb. 14: Signifikante Wellenhöhen mit Sicht auf den Gesamtsee

Wellen nach Richtung Mit einem Klick auf einen bestimmten Punkt im See werden die signifikanten Wellenhöhen in alle Richtungen angezeigt (Abb. 15). Die « Wellenrose » zeigt für einen gegebenen Punkt die maximale signifikante Wellenhöhe aus acht Richtungssektoren und für alle analysierten Wiederkehrperioden.

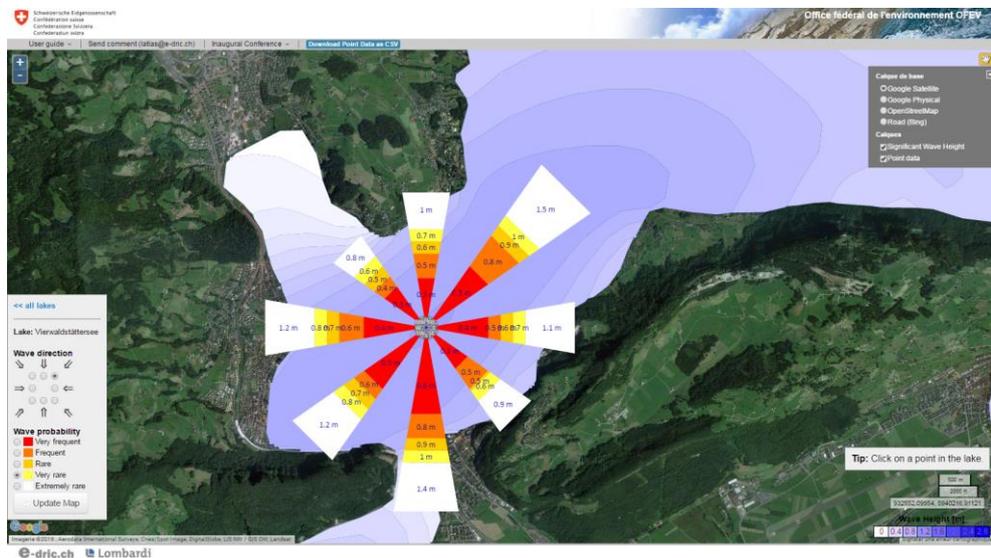


Abb. 15: « Wellenrose » für jeden Punkt im See

Eine Anleitung ist direkt auf der Internet Plattform unter „User Guide“ verfügbar.

7 Abschätzung der Unsicherheit

Fehlerquellen Die Unsicherheiten bei der Prognose der maximalen signifikanten Wellenhöhe können in drei Kategorien unterteilt werden.

- Unsicherheit bei der Wahl der Windszenarien
- Unsicherheit der physikalischen Wellenmodellierung
- Unsicherheit des numerischen Modells und dessen Randbedingungen

7.1 Unsicherheit der Windszenarien

Wellen entstehen durch den Wind. Die Resultate sind daher direkt von der Wahl der Windgeschwindigkeit und der Winddauer abhängig. Für die Windanalyse sind Daten über 30 Jahre an den SMN-Messstationen verfügbar. Aus diesen Daten werden Wiederkehrperioden bis zu 300 Jahren extrapoliert, welche daher mit einem Fehler behaftet sind. Der Fehler kann mit der Fisher-Information (zweite Ableitung der Maximum-Likelihood-Funktion) statistisch angenähert werden. Die oberen Fehlergrenzen für die Messstationen von Luzern und Altdorf sind in der Tab. 1 aufgeführt.

Tab. 1 : Unsicherheit in der Prognose der Windintensität

Wiederkehrperiode (Jahre)	2.33	30	100	300
Fehler Windgeschwindigkeit (%)	2	5	10	20

Bei limitierendem Fetch ist die Beziehung zwischen Windintensität und signifikanter Wellenhöhe nicht linear. Im Falle des Vierwaldstättersees ist die signifikante Welle proportional zur Windintensität mit einer Potenz zwischen 1.1 und 1.5. Aus dieser Kenntnis kann der Fehler der Wellenhöhe abgeleitet werden (Tab. 2).

Tab. 2 : Unsicherheit der Prognose der signifikanten Wellenhöhe in Abhängigkeit des Fehlers der Windintensität

Wiederkehrperiode (Jahre)	2.33	30	100	300
Fehler Wellenhöhe (%)	3.0	7.6	15.4	31.4

Nebst der Windintensität spielt auch die Windrichtung eine wichtige Rolle bei der Wellenbildung. Nach einer Sensibilitätsanalyse wird dieser Fehler auf maximal 1.5% pro Grad Abweichung in der Richtung geschätzt. Bei einer 10° Abweichung in der Windrichtung würde der Fehler also ungefähr 15% betragen.

7.2 *Unsicherheit des physikalischen Modells*

Die Wellensimulationen werden mit dem Modell SWAN durchgeführt. Dieses Modell hat sich bereits in vielen Studien für den Transport und die Ausbreitung der Wellen auf Seen bewährt. Der Fehlerbereich liegt bei ähnlichen Studien bei 10 bis 15%^{1,2}. Gemäss der wissenschaftlichen Literatur kann die Wellenphysik mit dem Modell SWAN mit einem Fehlerbereich von 15% angenähert werden.

7.3 *Numerische Unsicherheit*

Die Unsicherheit, welche bei der Wahl der räumlichen Auflösung entsteht, wird mit der Wahl eines Gitternetzes mit lokal angepasster Elementgrösse klein gehalten. Beim Vergleich der Resultate mit zwei unterschiedlichen Gitternetzauflösungen kann der numerische Fehler auf 5% geschätzt werden.

7.4 *Kombination der Fehler*

Der mittlere Fehler der Prognose kann durch eine Kombination der vorherig beschriebenen Kategorien abgeschätzt werden und liegt bei:

- 20 bis 40% für eine Wiederkehrperiode von 2.33 Jahren
- 40 bis 60% für eine Wiederkehrperiode von 300 Jahren

Das Extremereignis wurde als 1.5-mal die Welle einer Wiederkehrperiode von 300 Jahren definiert. Dieser Faktor kann demnach auch als Marge der Unsicherheitsfaktoren betrachtet werden.

Lausanne, 4 Mai 2016

e-dric.ch

eau énergie environnement ingénieurs conseils

Dr Frédéric Jordan

Dr Philippe Heller

¹ Jin et al., 2001, Calibration and verification of a spectral wind-wave model for Lake Okeechobee, *Ocean Engineering*, 28, 571-584.

² Bottema et al., 2009, A ten-year data set for fetch- and depth-limited wave growth, *Coastal Engineering*, 56, 703-725.