

Risiko eines durch Windwellen induzierten Strandrückgangs

Stephan Mai

Zusammenfassung

Sowohl an den Küsten der Meere als auch den Ufern grosser Seen bestimmen Wellen die für den Strand- bzw. Uferrückgang massgebliche Belastungssituation. Während an Meeresküsten neben winderzeugten Wellen auch Dünung diese Belastung bestimmt, handelt es sich an den Seeufern um lokal erzeugte Windwellen. Zur Abschätzung des Risikos eines mit der Wellenbelastung der Ufer einhergehenden Strand- bzw. Uferrückgangs wird beispielhaft für den Bieler See aufbauend auf der Windstatistik ein probabilistisches Konzept vorgestellt. In diesem werden die Windverhältnisse mit Hilfe numerischer Simulationen in die Wellenbedingungen auf dem Bieler See überführt und die Wellenbedingungen an der Brecherlinie in Ufernähe schliesslich in Transportraten für die strand- bzw. ufernahen Sedimente umgeformt. Bei Divergenz des Transports ergibt sich ein Strandrückgang. Mit der Zuordnung der Windbedingungen zu Transportraten erfolgt die Übertragung der Windstatistik in eine Transportstatistik. Der sich aus der Transportstatistik ergebende Erwartungswert des Transports ist ein Mass für das Risiko eines durch Windwellen induzierten Strandrückgangs.

Abstract

Wave climate determines the predominant stress causing the shoreline retreat of marine coasts or of the banks of large lakes respectively. In comparison to marine coasts, where wind waves as well as swell make up the load, only locally generated wind waves act on the banks of lakes. In order to estimate the risk of shoreline retreat caused by wave action a probabilistic concept founding on wind statistics is developed. A worked out example is presented for lake Biel. Within this approach different wind conditions are transferred to wave conditions on the lake making use of numerical modeling. The wave parameters at the line of breaking are finally used to calculate the transport of near-shore sediments. In case of diverging sediment transport shore retreat has to be expected. With this attribution of wind conditions to sediment transport rates the wind statistics is transferred to the statistics of sediment transport. The expected value derived from transport statistics serves as a measure for the risk of shore retreat induced by wind waves.

1. Einleitung

An vielen grossen Seen der Schweiz, insbesondere auch an dem Bieler See, wird derzeit an einzelnen Uferabschnitten ein starker kontinuierlicher Uferrückgang festgestellt (Sayah et al., 2005). Dieser Uferrückgang wird auf den Einfluss von winderzeugten Wellen zurückgeführt (Laboratoire de Constructions Hydrauliques, 2003). Die Intensität

des Uferrückgangs entlang des Seeufers ist hierbei einerseits von der Wellenbelastungssituation und andererseits von der Sedimentbeschaffenheit, insbesondere von der Kornverteilung, am Ufer abhängig.

Während die Kornverteilung derzeit ausschliesslich über direkte in-situ-Messungen, wie z.B. für den Bieler See durch die Berner Fachhochschule (2003) dargestellt, erfasst werden kann, sind für die Beschreibung der Wellenbelastung am Ufer nicht zwangsläufig flächendeckende Messungen nötig. Vielmehr können Wellenmessungen an einzelnen Lokationen, wie durch die Berner Fachhochschule (2003) am Bieler See durchgeführt, unter Vorgabe des herrschenden Windes entweder durch empirische Verfahren (Fetch-Diagramm) der Wellenvorhersage (USACE, 2001, CUR/TAW 1992), wie durch Sayah et al. (2004) für den Bieler See erläutert, oder durch numerische Wellensimulation (Sayah et al., 2005) ergänzt werden.

Auf der Grundlage einzelner Wellensimulation ist bei vergleichbarer Sedimentbeschaffenheit am Ufer eine erste deterministische Beurteilung der Gefahr eines Uferrückgangs mit Hilfe des Energieflusses der Wellen möglich (Partenscky et al., 1988). So ist die uferparallele Komponente des Energieflusses proportional zum Uferlängstransport des Sediments. Unter Berücksichtigung der Windstatistik lässt sich das deterministische Vorgehen in ein probabilistisches Konzept überführen, welches im folgende näher erläutert und am Beispiel des Bieler Sees vorgestellt wird.

2. Risiko des Strandrückgangs – Theoretisches Konzept

Ausgehend von den Wellenparametern entlang des Ufers - signifikante Wellenhöhe $H_s(s)$, der mittleren Wellenperiode $T_m(s)$ und der mittleren Wellenangriffsrichtung normal zum Ufer $\alpha(s)$ - ist zunächst die Energiedichte der Wellen $E(s)$ am Ufer zu berechnen:

$$E(s) = \frac{\rho \cdot g}{8} \cdot H_s(s)^2 \quad (1)$$

Aus der Energiedichte $E(s)$ und Gruppengeschwindigkeit $c_g(s)$ der Wellen im Brechpunkt vor dem Ufer folgt der Energiefluss P^* je Einheitslänge des Wellenkamms

$$P^*(s) = E(s) \cdot c_g(s) \quad (2)$$

Bei schrägen Wellenangriff am Ufer ($\alpha(s) \neq 0^\circ$) folgt der Energiefluss $P(s)$ je Einheitslänge des Ufers nach

$$P(s) = P^*(s) \cdot \cos(\alpha(s)) \quad (3)$$

Für die küstenparallele, d.h. sedimenttransportwirksame, Komponente $P_l(s)$ des Energieflusses je Einheitslänge des Ufers gilt dann

$$P_l(s) = P(s) \cdot \sin(\alpha) \quad (4)$$

Die küstenparallele Komponente des Energieflusses ist proportional zur Sedimenttransportrate $Q(s)$ entlang der Küste (Daemrich et al., 1984):

$$Q(s) = C_s(s) \cdot P_l(s) \quad (5)$$

Die Proportionalitätskonstante $C_s(s)$ ist darin eine Funktion der Sedimenteigenschaften, insbesondere des Korndurchmessers (CERC, 1984).

Eine Bilanzierung des Transports, d.h. die Identifikation von Erosionszonen, erfolgt durch Differentiation:

$$Q'(s) = \frac{\partial Q(s)}{\partial s} = \frac{\partial C_s(s)}{\partial s} \cdot Q(s) + C_s(s) \cdot \frac{\partial Q(s)}{\partial s} \quad (6)$$

Erosion tritt für $Q'(s) < 0$ ein. Bei gleichartigen Sedimentbedingungen ($\partial C_s(s)/\partial s=0$) entlang der Küste gilt:

$$Q'(s) = C_s(s) \cdot \frac{\partial Q(s)}{\partial s} \quad (7)$$

Da die Wellenparameter und damit auch Energiefluss, Sedimenttransportrate und Sedimentbilanz entlang des Ufers infolge veränderlicher Windbedingungen nicht zeitlich konstant sind, ist eine Berücksichtigung ihrer Statistik bei der Beurteilung des Erosionsrisikos nötig.

Werden die Wellenbedingungen empirisch über ein Fetch-Diagramm oder durch Einzelsimulation der Wellen bestimmt, bildet die Statistik $p_w(u_w, \gamma_w)$ von Windgeschwindigkeit u_w und Windrichtung γ_w den Ausgangspunkt dieser probabilistischen Betrachtung. Über das Fetch-Diagramm werden die Windbedingungen in zugehörigen Wellenbedingungen überführt:

$$H_s = f_H(u_w, \gamma_w) \quad (8)$$

$$T_m = f_T(u_w, \gamma_w) \quad (9)$$

$$\alpha = f_\alpha(u_w, \gamma_w) \quad (10)$$

Das Einsetzen der Formeln (8) - (10) in das Formelsystem (1) - (7) lässt die Ermittlung von Transferfunktionen zur Bestimmung von Energiefluss, küstenparallelem Energiefluss und Sedimentbilanz aus den Windbedingungen zu:

$$P = f_P(u_w, \gamma_w) \quad (11)$$

$$P_l = f_{P_l}(u_w, \gamma_w) \quad (12)$$

$$P_{Q'} = f_{Q'}(u_w, \gamma_w) \quad (13)$$

Für die Statistik der Wellen- und Transportparameter gilt dann:

$$p_H(H_s) = \iint \delta(H_s - f_H(u_w, \gamma_w)) p_w(u_w, \gamma_w) du_w d\gamma_w \quad (14)$$

$$p_T(T_m) = \iint \delta(T_m - f_T(u_w, \gamma_w)) p_w(u_w, \gamma_w) du_w d\gamma_w \quad (15)$$

$$p_\alpha(\alpha) = \iint \delta(\alpha - f_\alpha(u_w, \gamma_w)) p_w(u_w, \gamma_w) du_w d\gamma_w \quad (16)$$

$$p_P(P) = \iint \delta(P - f_P(u_w, \gamma_w)) p_w(u_w, \gamma_w) du_w d\gamma_w \quad (17)$$

$$p_{P_1}(P_1) = \iint \delta(P_1 - f_{P_1}(u_w, \gamma_w)) p_w(u_w, \gamma_w) du_w d\gamma_w \quad (18)$$

$$p_{Q'}(Q') = \iint \delta(Q' - f_{Q'}(u_w, \gamma_w)) p_w(u_w, \gamma_w) du_w d\gamma_w \quad (19)$$

Gilt für die Sedimentbilanz im Mittel

$$\overline{Q'} = \int Q' p_{Q'}(Q') dQ' < 0 \quad (20)$$

so besteht für den Uferabschnitt das Risiko eines Strandrückgangs.

Alternativ zu dem im Formelsystem (8) - (19) dargestellten Konzept der Risikobeurteilung unter Verwendung von empirischen Wind-Welle-Beziehungen oder von Einzelsimulationen des Seegangs ist auch eine Langzeit-Wellensimulation über mehrere Jahre möglich. Die Statistik der Wellenparameter, des Wellenenergieflusses und der Sedimentbilanz ergibt sich dann durch direkte Auswertung der Zeitreihe dieser Parameter.

3. Numerische Simulation der Wellenentstehung auf dem Bieler See

Für den Bieler See werden im folgenden sowohl Langzeit-Simulationen des instationären Wellenfeldes bei variablen Windbedingungen als auch Einzelsimulationen des stationären Wellenfeldes unter der Annahme eines zeitkonstanten Windfeldes dargestellt. Als Grundlage dieser Simulationen dient ein digitales Höhenmodell des Seegrundes einer räumlichen Auflösung von 25 m, welches auf der NM25 basiert (Sayah et al., 2005). Die Berechnung der Wellenfelder erfolgt mit dem phasengemittelten Modell Simulating Waves Nearshore SWAN der Technischen Universität Delft (Booij et al., 1999, Ris et al. 1999). SWAN löst dazu die orts- und zeitabhängige Erhaltungsgleichung des Wellenimpulses $N(\omega, \theta)$, der von Wellenfrequenz ω und Wellenrichtung θ abhängig ist:

$$\frac{\partial N(\omega, \theta)}{\partial t} + \frac{\partial c_x N(\omega, \theta)}{\partial x} + \frac{\partial c_y N(\omega, \theta)}{\partial y} + \frac{\partial c_\omega N(\omega, \theta)}{\partial \omega} + \frac{\partial c_\theta N(\omega, \theta)}{\partial \theta} = \frac{S(\omega, \theta)}{\omega} \quad (21)$$

Durch die wassertiefen- (d) und wellenzahlabhängigen (k) Geschwindigkeiten c_x und c_y des Impulstransports im Ortsraum ist der Prozess des Shoaling berücksichtigt. Die gleichermassen abhängige Geschwindigkeit c_θ des Impulstransports im Spektralraum der Wellenrichtung bildet den Prozess der Refraktion ab. Die Geschwindigkeit c_ω dient der Berücksichtigung des Impulstransports im Frequenzraum bei Vorhandensein von Strömungen und wird im folgenden vernachlässigt. Der Prozess der Diffraktion bleibt wegen der Phasenmittelung in SWAN unberücksichtigt. Für die stationären Simulationen des Wellenfeldes verschwindet die zeitliche Änderung des Wellenimpulses, d.h. $\partial N/\partial t = 0$. Neben den genannten Umverteilungen des Wellenimpulses sind zudem insbesondere folgende Quellen (Windenergieeintrag (1. Summand)) und Senken (Wellenbrechen (2. Summand) und Bodenreibung (3. Summand)) zu berücksichtigen:

$$S(\omega, \theta) = +S_w(\omega, \theta) - \frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \frac{\omega_m}{2\pi} \rho \cdot g \cdot \gamma^2 \cdot d^2 \cdot \frac{N(\omega, \theta)}{\omega \cdot E} - \dots \quad (22)$$

$$\dots - C_{fw} \cdot g \cdot U_{rms} \cdot \frac{\omega^2}{\sinh^2(kd)} \cdot \frac{N^2(\omega, \theta)}{\omega^2 \rho^2 g^3}$$

Die in Formel (22) eingehenden Parameter für das Wellenbrechen α_{BJ} und γ sowie für die Bodenreibung C_{fw} sind durch Mai et al. (1999a+b) durch Vergleich mit Seegangsmessungen an der Küste und experimentellen Untersuchungen im Grossen Wellenkanal der Universität Hannover bestimmt und in dieser Arbeit entsprechend verwendet worden, da für grosse Inlandgewässer bisher nur wenige Untersuchungen (z.B. Booij et al. (1996)) verfügbar sind. Auf eine im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführte Validierung des Wellenmodells wird im Rahmen der Darstellung des Vorgehens für die Langzeit-Simulationen eingegangen.

Den Ausgangspunkt der Langzeit-Simulation des Wellenfeldes auf dem Bieler See bildet eine Zeitserie von Windgeschwindigkeit und -richtung für das Jahr 2003. Diese ist ausschnittsweise (20.12.2003-22.12.2003) in Abbildung 1 dargestellt. Während dieses „Le Vent“-Ereignisses mit charakteristischerweise südwestlichen Windrichtungen sind Windgeschwindigkeiten von über 12 m/s aufgetreten. Unter Vorgabe dieses zeitabhängigen Windes unter Vernachlässigung der räumlichen Struktur des Windfeldes ist sodann das zeitabhängige, räumlich variable Wellenfeld ermittelt worden.

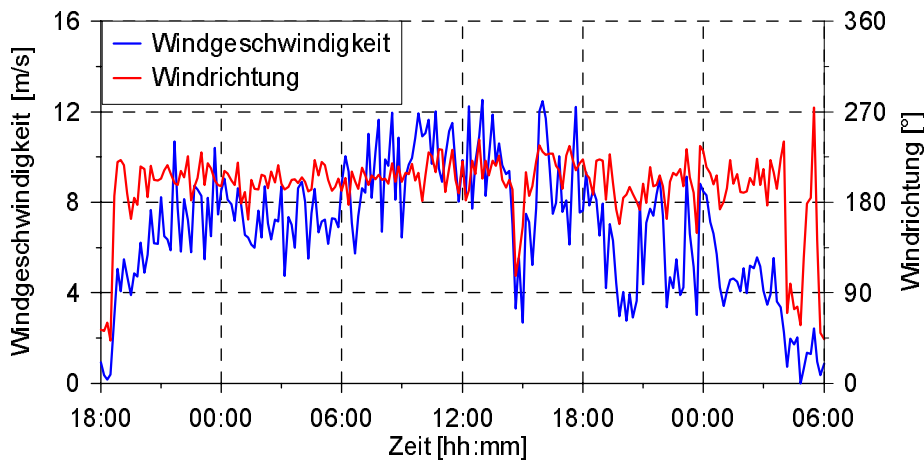


Abbildung 1 Instationäre Windbedingungen am Bieler See (Situation: Le Vent)

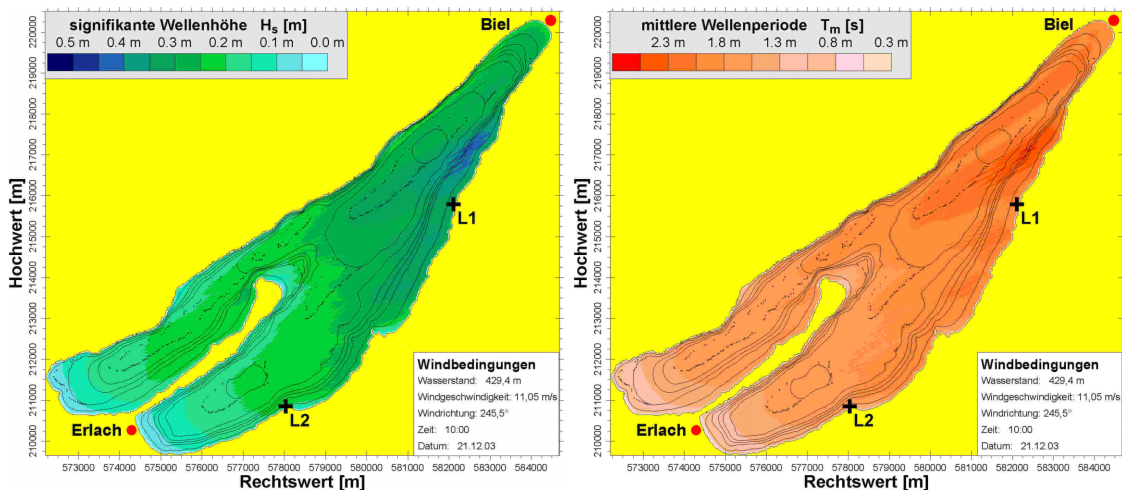


Abbildung 2 Ergebnis instationärer Wellensimulation mit SWAN während der Windsituation „Le Vent“ - signifikante Wellenhöhe (rechts), mittlere Wellenperiode (links)

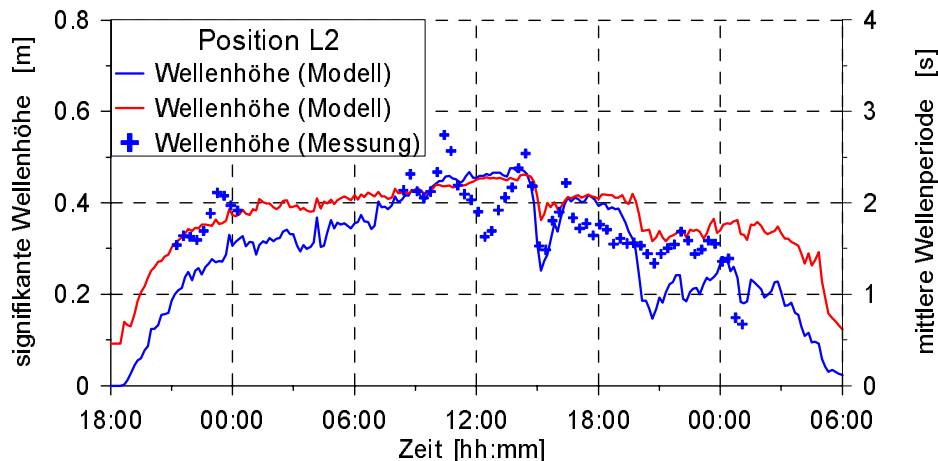


Abbildung 3 Zeitliche Entwicklung der Wellenparameter vor dem Ufer bei Lüscherz während der Windsituation „Le Vent“ und Vergleich mit Messungen

Die Abbildung 2 zeigt das Wellenfeld auf dem Bieler See zu einem Zeitpunkt (21.12.2003, 10:00 Uhr) hoher Windgeschwindigkeit. Für das „Le Vent“-Ereignis sind die maximalen Wellenhöhen und –perioden und damit auch die Wellenenergieflüsse am Ufer vor Sutz zu erwarten. Eine Zeitreihe der Wellenparameter ist für das in Abbildung 1 dargestellte Windereignis für das Ufer vor Lüscherz in Abbildung 3 dargestellt. Die signifikante Wellenhöhe beträgt maximal bis zu 0,45 m und die mittlere Wellenperiode maximal bis zu 2,3 s. Zur Modellvalidierung stehen vor Lüscherz Messungen der signifikanten Wellenhöhe der Berner Fachhochschule zur Verfügung (siehe auch Wyler, 2004). Diese sind in Abbildung 3 den Modellergebnissen gegenübergestellt. Es zeigt im Tagesmittel eine gute Übereinstimmung von Modell und Messung. Kurzzeitige Variationen der gemessenen Wellenhöhe werden jedoch nicht wiedergegeben, was möglicherweise auf die Annahme eines homogenen Windfeldes über dem See zurückzuführen ist. Die Korrelation von Modell und Messung beträgt 0,75.

Aus den in Abbildung 3 dargestellten Wellenparametern ergeben sich mit Hilfe des Formelsystems (2) – (4) unter Einbeziehung der Zeitreihe der mittleren Wellenrichtung die Energieflüsse P^* , P und P_l , welche in Abbildung 4 dargestellt sind. Mit dem Korndurchmesser vor Lüscherz kann so die Sedimenttransportrate Q und ihre Bilanz Q' bestimmt werden.

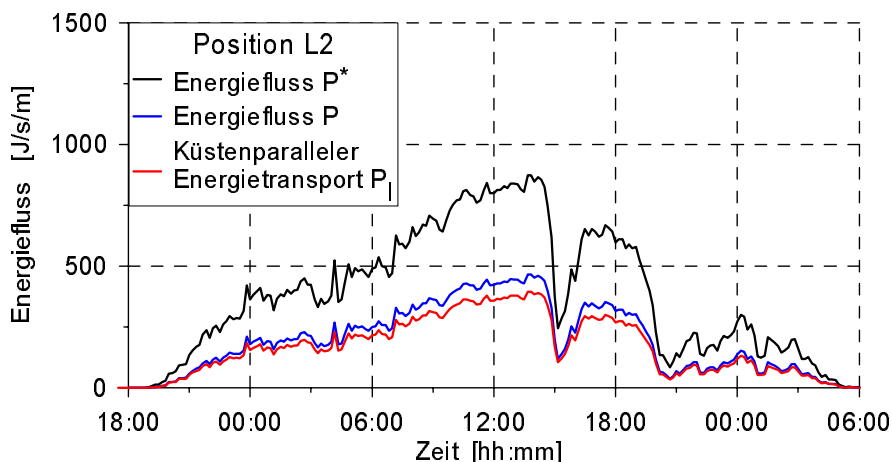


Abbildung 4 Zeitliche Entwicklung des Energieflusses vor dem Ufer bei Lüscherz

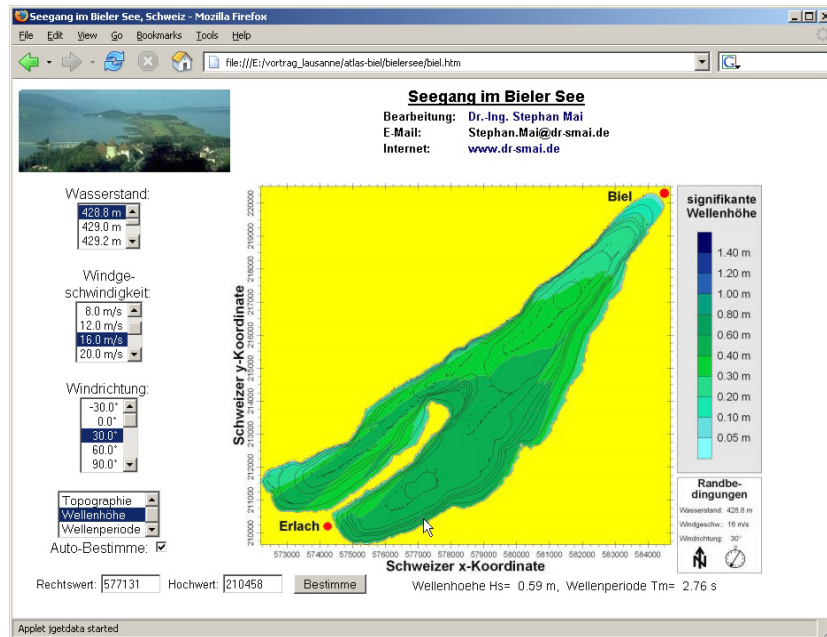


Abbildung 5 Zusammenstellung einzelner Wellensimulationen in einem internet-basierten Atlas

Den Ausgangspunkt der stationären Simulationen des Wellenfeldes bildet die Vorgabe eines sowohl zeitlich und räumlich konstanten Windes. Für den Bieler See sind Simulationen für Richtungen von 0° , 30° , ..., 360° und für Windgeschwindigkeiten von 4 m/s, 8 m/s, ..., 28 m/s durchgeführt worden. Die Simulationsergebnisse sind in einen internet-basierten Atlas (siehe auch Mai u. v. Lieberman, 1999) zusammengestellt und dort über verschiedene Auswahlmensüs wählbar. Die Abbildung 5 zeigt eine Bildschirmkopie des Atlases. Die Graphik stellt die signifikante Wellenhöhe für eine „La Bise“-Windsituation dar. Für das „La Bise“-Ereignis sind die maximalen Wellenhöhen am Ufer bei Lüscherz zu erwarten.

4. Statistik der Wellenparameter und der Sedimenttransportrate

Durch Auswertung der stationären Wellensimulationen am Seeufer für die verschiedenen Windbedingungen folgen die in den Formeln (8) - (13) eingeführten Transferfunktionen.

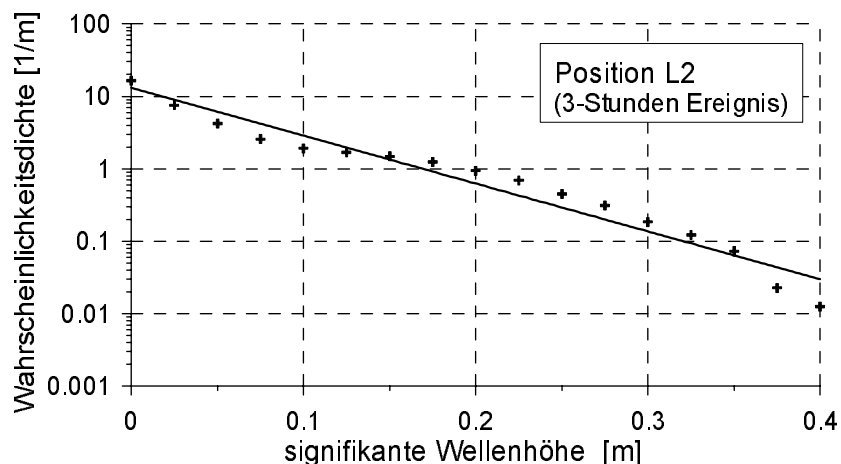


Abbildung 6 Statistik der signifikanten Wellenhöhe vor dem Ufer bei Lüscherz

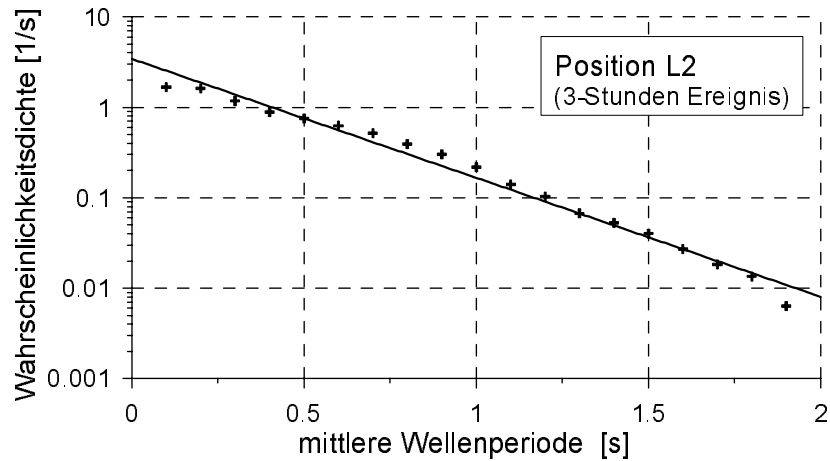


Abbildung 7 Statistik der mittleren Wellenperiode vor dem Ufer bei Lüscherz

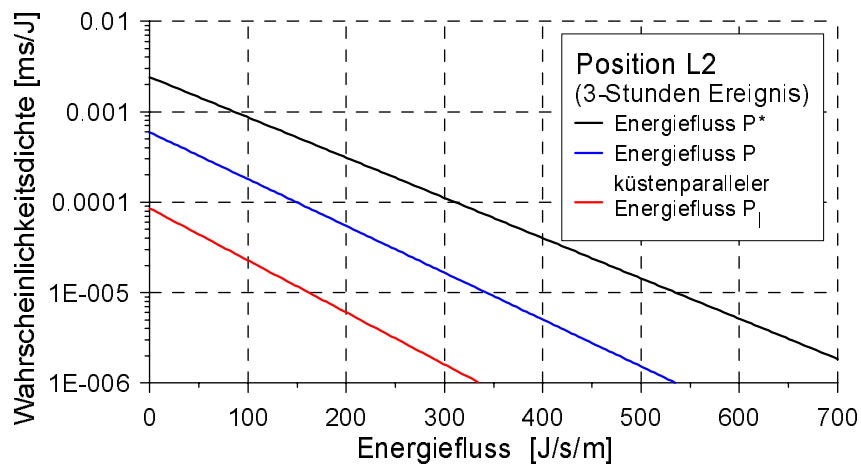


Abbildung 8 Statistik des Energieflusses vor dem Ufer bei Lüscherz

Mit einer aus einem 25 Jahre langen Datensatz von Windmessungen bei Payerne (Station des ANETZ) für den Bieler See abgeleiteten Windstatistik (Sayah et al., 2005) folgen über das Formelsystem (14) - (18) die Statistik der signifikanten Wellenhöhe H_s , der mittleren Wellenperiode T_m und der Energieflüsse P^* , P und P_l . Die Abbildung 6 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte der Wellenhöhen, Abbildung 7 die der Wellenperiode. Für die Energieflüsse ist die Wahrscheinlichkeitsdichte in Abbildung 8 gegeben. Es zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeitsdichte des Energieflusses längs des Wellenkamms etwa fünfmal grösser ist als der Energiefluss bezogen auf die Uferlänge. Der küstenparallele Energiefluss ist um einen weiteren Faktor 5 geringer. Bei Kenntnis der Sedimenteigenschaften folgt schliesslich die Statistik der Transportrate und das Risiko einer Ufererosion.

5. Schlussfolgerungen

Am Beispiel des Bieler Sees ist der Einsatz des numerischen Modells SWAN zur Analyse der Erosionsgefährdung der Seeufer dargestellt worden. Neben der Nutzung rechenzeitintensiver Langzeitsimulationen wird ein statistisches Konzept der Beurteilung der Erosionsgefährdung auf der Grundlage stationärer, weniger rechenzeitintensiver Einzelsimulationen erläutert und dessen Anwendbarkeit exemplarisch gezeigt. Das Konzept kann insbesondere bei der Identifikation von Vorrangbereichen für Uferschutz-

massnahmen, wie sie z.B. durch Sayah (2005) untersucht wurden, helfen.

Bibliographie

- Berner Fachhochschule** (2003). *Development of Constructional Techniques and Dimensioning Principles by the Example of Lake Biemme*, 1. Zwischenbericht zum Projekt EROSEE (Teil 3), KTI-Projekt 5760.1UTS, Lausanne, Switzerland, 1-96.
- Booij, N., Holthuijsen, L.H., Ris, R.C.** (1996). *The SWAN Wave Model for Shallow Water*, Proc. 25th Int. Conf. On Coastal Engineering, Orlando, Florida, USA, 668-676.
- Booij, N., Ris, R.C. Holthuijsen, L.H.** (1999). *Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, Model Description and Validation*, JGR, 104, Washington, USA, 7649-7666.
- CERC** (1984). *Shore Protection Manual, Vol. 1*, Manual, Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA.
- CUR/TAW** (2001). *Guide for Design of River Dikes, Vol. 1 – Upper River Areas*, Report 142, Centre for Civil Engineering Research and Codes / Technical Advisory Committee on Water Defences, Gouda, The Netherlands.
- Daemrich, K.-F., Kohlhase, S., Partenscky, H.-W.** (1984). *Investigations of Longshore Transport and Morphological Changes of the Coastline in the Vicinity of Lome/Togo*, Proc. of the 4th ADP-IAHR congress, Chiang Mai, Thailand.
- Laboratoire de Constructions Hydrauliques** (2003). *Wave Effect on Erosion and Shore Protection – Efficiency in Shallow Lakes*, 1. Zwischenbericht zum Projekt EROSEE (Teil 2), KTI-Projekt 5760.1UTS, Lausanne, 1-62.
- Mai, S., Ohle, N., Zimmermann, C.** (1999a). *Applicability of Wave Models in Shallow Coastal Waters*, Proc. 5th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Cape Town, South Africa, 170-179.
- Mai, S., Ohle, N., Daemrich, K.-F.** (1999b). *Numerical Simulations of Wave Propagation compared to Physical Modeling*, Proc. of HYDRALAB-Workshop, Hannover, Germany, 217-226.
- Mai, S., v. Liebermann, N.** (2000). *Internet-based Tools for Risk Assessment for Coastal Areas*, Proc. 4th Int. Conf. on Hydroinformatics, Iowa, USA, CD-ROM.
- Partenscky, H.-W., Kohlhase, S., Daemrich, K.-F., Scheffer, H.-J., Schwarze, H.** (1988). *Theoretische Vorstudie zur wellendämpfenden Wirkung des Riffs und zum seegangserzeugten Feststofftransport an der Westküste der Insel Sylt*, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, 67, 135-244.
- Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., Booij, N.** (1999). *A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions, 2. Verification*. JGR, 104, Washington, USA, 7667-7681.
- Sayah, S., Boillat, J.-L., Schleiss, A.** (2004). *The Use of Soft Shore Protection Measures in Shallow Lakes: Research Methodology and Case Study*, Limnologica, 34, 65-74.
- Sayah, S., Boillat, J.-L., Schleiss, A.** (2004). *Effect of Porosity of Brushwood Fences on Wave Transmission*, Proc. of the 4th International Symposium on Environmental Hydraulics ISEH, Hong Kong, 1057-1062.
- Sayah, S., Mai, S., Boillat, J.-L., Schleiss, A.** (2005). *Field Measurements and Numerical Modeling of Wind-Waves in Lake Biel: A Basic Tool for Shore Protection Projects*, Proc. of the XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea, 4332-4343.
- Sayah, S.** (2005). *Efficiency of Soft Coastal Structures for Shore Protection Against Wind-Wave Induced Erosion*, Ph.D. thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- USACE** (2001). *Coastal Engineering Manual*, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C.
- Wyler, E.** (2004) *Statistische Auswertung von Wellendaten*, Bericht zum Projekt EROSEE, Berner Fachhochschule, Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB, Burgdorf, Biel, Schweiz, 1-20.

Notationen

$C_s(s)$	korngrossenabhängiger Transportparameter ($m^3/(J/m)$)	f_{P1}	Transferfunktion zur Ermittlung des küstenparallelen Wellenenergieflusses aus dem Wind ($J/s/m$)
C_{fw}	Collins-Parameter (-)	f_Q	Transferfunktion zur Ermittlung der Sedimentbilanz aus dem Wind ($m^3/s/m$)
E	Energiedichte der Wellen (J/m^2)	g	Erdbeschleunigung (m/s^2)
$E(s)$	Energiedichte der Wellen (J/m^2)	k	Wellenzahl ($1/m$)
$H_s(s)$	signifikante Wellenhöhe (m)	p_w	Wahrscheinlichkeitsdichte der Windgeschwindigkeit und -richtung ($1/(m/s)$)
$N(\omega, \theta)$	Impulsdichte der Wellen (Js/m^2)	p_H	Wahrscheinlichkeitsdichte der signifikanten Wellenhöhe ($1/m$)
$P^*(s)$	Energiefluss je Einheitslänge des Wellenkamms ($J/s/m$)	p_T	Wahrscheinlichkeitsdichte der mittleren Wellenperiode ($1/s$)
$P(s)$	Energiefluss je Einheitslänge des Ufers ($J/s/m$)	p_α	Wahrscheinlichkeitsdichte der mittleren Wellenrichtung (-)
$P_l(s)$	küstenparalleler Energiefluss je Einheitslänge des Ufers ($J/s/m$)	p_P	Wahrscheinlichkeitsdichte des Wellenenergieflusses ($1/(J/s/m)$)
$Q(s)$	Sedimenttransportrate (m^3/s)	p_{P1}	Wahrscheinlichkeitsdichte des küstenparallelen Wellenenergieflusses ($1/(J/s/m)$)
$Q'(s)$	Sedimentbilanz ($m^3/s/m$)	$p_{Q'}$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Sedimentbilanz ($1/(m^3/s/m)$)
Q_b	Anteil der brechenden Wellen (-)	s	Koordinate entlang der Küste (m)
$S(\omega, \theta)$	Quellen und Senken von Impulsdichte der Wellen (J/m^2)	t	Zeit (s)
$S_w(\omega, \theta)$	Winderzeugter Eintrag von Impulsdichte in das Wellenfeld (J/m^2)	u_w	Windgeschwindigkeit (m/s)
$T_m(s)$	mittlere Wellenperiode (s)	x	Ortskoordinate (m)
U_{rms}	effektive Orbitalgeschwindigkeit am Boden (m/s)	y	Ortskoordinate (m)
c_x	Geschwindigkeit der Impulsadvektion im Ortsraum (m/s)	$\alpha(s)$	mittlere Wellenangriffsrichtung normal zur Küste (-)
c_y	Geschwindigkeit der Impulsadvektion im Ortsraum (m/s)	α_{BJ}	Battjes-Janssen-Parameter (-)
c_θ	Geschwindigkeit der Impulsadvektion im Richtungsraum des Wellenspektrums ($1/s$)	γ	Brecherparameter (-)
c_ω	Geschwindigkeit der Impulsadvektion im Frequenzraum des Wellenspektrums ($1/s^2$)	δ	Dirac-Funktion (-)
$c_g(s)$	Gruppengeschwindigkeit der Wellen (m/s)	γ_w	Windrichtung (-)
d	Wassertiefe (m)	ρ	Dichte des Seewassers (kg/m^3)
f_H	Transferfunktion zur Ermittlung der Wellenhöhe aus dem Wind (m)	θ	Wellenrichtung (-)
f_T	Transferfunktion zur Ermittlung der Wellenperiode aus dem Wind (s)	ω	Kreisfrequenz der Wellen ($1/s$)
f_α	Transferfunktion zur Ermittlung der Wellenrichtung aus dem Wind (-)	ω_m	mittlere Kreisfrequenz der Wellen ($1/s$)
f_P	Transferfunktion zur Ermittlung des Wellenenergieflusses aus dem Wind ($J/s/m$)	<i>Indizes und Exponenten</i>	
		l	küstenparallel
		m	mittlere
		s	signifikant
		s	Sediment
		w	Wind

Verdankung

Die vorgestellten Ergebnisse sind im Anschluss an einen durch die European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion (ERCOFTAC) unterstützten Gastaufenthalt am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), welcher dankend erwähnt wird, entstanden.

Adresse der Autoren

Dr.-Ing. Stephan Mai
vormals: Franzius-Institut, Universität Hannover
jetzt: Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56076 Koblenz, Deutschland
+49-0261-1306 5322
<http://www.bafg.de>
Mai@bafg.de