Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 99 (2007)
Heft: 4

Artikel: Erosionsprozesse an Seeufern
Autor: Huber, Andreas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940149

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Erosionsprozesse an Seeufern

■ *Andreas Huber*

Zusammenfassung

Der folgende Beitrag wird durch entstehungsgeschichtliche und morphologische Betrachtungen über die Seen eingeleitet. Zunächst wird auf die Vorkommen der Flachufer und deren Veränderungen innerhalb geologischer Zeiträume eingegangen. Die wesentlichen Ursachen der Ufererosion sind durch das Zusammenspiel der Strömungen windinduzierter Wellen und der langfristigen Absenkungen und der Schwankungen der Spiegel gegeben. Wellenströmungen üben im seichten Wasser Schubspannungen auf den feinkörnigen Seegrund aus und bewirken den Sedimenttransport, der teils uferparallel verläuft und teils seewärts zum Tiefwasser gerichtet ist. Harte Uferverbauungen verstärken diese Erosionsprozesse. Die Zusammenhänge zwischen den anlaufenden Wellen, den Strömungen und dem Sedimenttransport im Uferbereich werden erklärt.

Summary

The following contribution starts with the history of the origin of lakes and morphological observations. In the beginning the sites and the alterations of flat shores within geological periods are being treated. Bank erosions are mainly caused by the interplay of wind induced wave currents and long term water level drawdowns and fluctuations. Such currents in shallow waters cause shear stresses on the fine grained bottom and induce a transport of sediment taking its course partly along the shore and partly towards the deep water zone. Massive shore measures for the protection of the shore increase the eroding procedure. The correlation between approaching waves, the currents and the transport of sediment in the shore area is being explained.

1. Einleitung

«Seen werden, Seen vergehen» lautet der Titel eines Buches, dessen Autor der Schweizer Geologe Georg Jung ist (Jung, 1990). Der Themenkreis Seen umfasst folgende Aspekte: Entstehungsgeschichte, Geologie, Altersfrage, Geomorphologie, Limnologie und Ökologie. Hier interessiert vor allem die Geomorphologie, welche Auskunft über die Bildung der Ufer gibt. Kenntnisse in den drei zuerst genannten Fachgebieten tragen dazu bei, die Veränderungsprozesse, insbesondere das morphologische Geschehen an den Ufern, besser zu verstehen.

Der Buchtitel ruft in Erinnerung, dass Seen verschiedenen Prozessen unterworfen sind, dass sie sich im Laufe meist grosser Zeiträume von vielen Jahrtausenden verändern und wieder verschwinden. Zahlreich sind die Entstehungsmerkmale, nach welchen die verschiedenen Seetypen benannt sind:

- Glazialerosive Seen
- Karstseen
- Natürliche Stauseen durch Abdämmung
- Seebecken in vulkanischen Hohlformen
- Meteorkraterseen
- Seebecken als Folge tektonischer Bewegungen
- Seen in winderzeugten Deflationswannen
- Höhlenseen
- Rinnenseen

Für die vorliegenden Betrachtungen interessieren die glazialerosiven Seen am meisten. Im Alpenraum und in andern Gebieten, die mit Gletschereis bedeckt waren *(Bild 1)*, überwiegt dieser Typ zahlenmässig bei weitem. Alle grossen und viele kleinere Schweizer Seen gehören dazu.

Die zurückgezogenen Gletscher der letzten Eiszeit, dem Würm, hinterliessen vor etwa 15 000 Jahren Täler mit dem typischen glazialen Längenprofil, das durch Übertiefungen (Ü) und rückläufige Gefälle (RG) gekennzeichnet ist *(Bild 2 oben)*. In den Wannen bildeten sich Seen, welche bis heute durch die Flüsse eines weitverzweigten Systems durchströmt werden. Die Seebecken sind in der Regel langgezogen, oft mehrarmig. An den Enden sind die Ufer flacher, an den Talflanken, je nach Talform, meist steiler. Die Zuflüsse, welche heute noch zum Teil einem Gletscher entspringen, lagern ihre Geschiebefracht bei der Einmündung in einem Delta ab. Innerhalb einiger Jahrtausende werden die Seen durch Sedimente aufgefüllt sein. Die Täler werden dann ein fluviales Längenprofil ohne Übertiefung und ohne rückläufige Gefälle angenommen haben *(Bild 2 unten)*. Kleinere Seen haben diesen Prozess bereits durchlaufen und sind von der Landkarte verschwunden. Bei grossen Seen stossen die Mündungsgebiete infolge der hertransportierten Sedimentfrachten immer weiter vor. Beispiele sind etwa der Alpenrhein vor dem Bodensee, der Tessin vor dem Lago Maggiore, die Rhone vor dem Genfersee, die Reuss vor dem Urnersee und die Aare vor dem Brienzersee. Kurz nach dem Rückzug der Gletscher reichten diese Seen viel weiter talaufwärts.

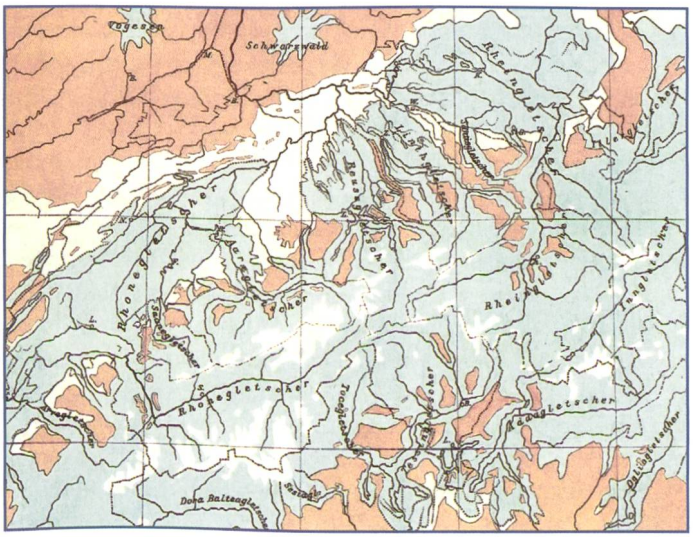

Bild 1. Vergletscherung der Schweiz in der Riss- und in der Würmeiszeit (Imhof, 1951). Weiss: heutige Gletscher, Blau: Würmgletscher, Hellblau: Rissgletscher, Rot: eisfrei.

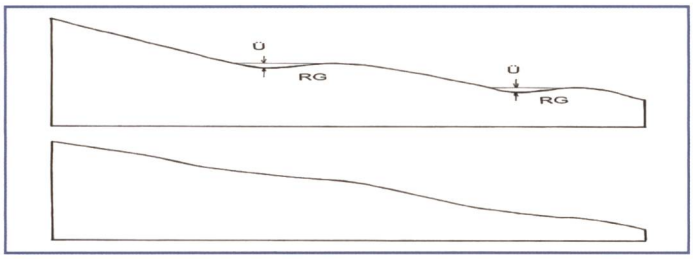

Bild 2. Glaziales (oben) und fluviales (unten) Längenprofil von Tälern.

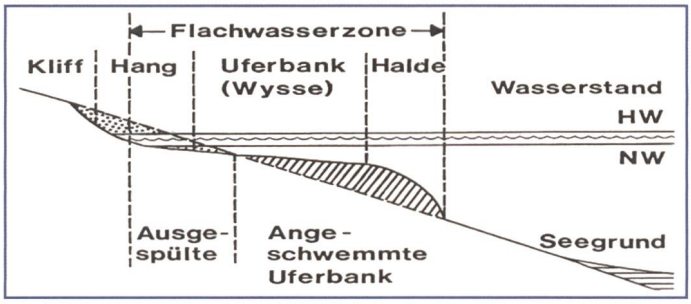

Bild 3. Abtragungsufer im Bereich einer Uferbank. Wellenerosion von feinkörnigem Lockergestein und verwitterungsfähigem Fels.

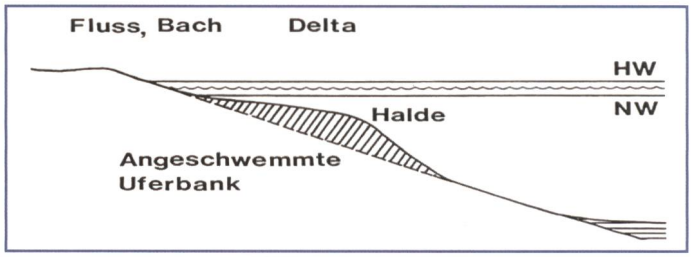

Bild 4. Anschwemmungsufer im Deltagebiet,. Wellenerosion als Folge der Korrektion und Kanalisierung des Zuflusses und der Kiesbaggerungen aus dem Delta.

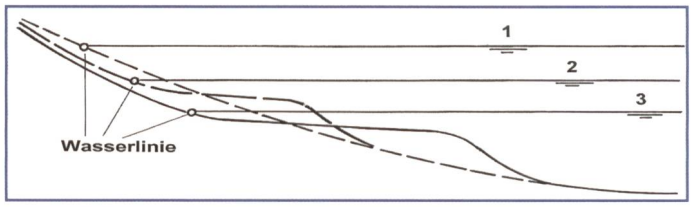

Bild 5. Entwicklung der Abtragungsufer bei absinkendem Seespiegel infolge Eintiefung des Seeausflusses. Legende: 1) Ursprünglicher Seespiegel nach Rückzug des Gletschers, 2) Zwischenstadium, 3) Heutiger Zustand mit Erosionsufer und Uferbank.

2. Ufertypen

Zunächst sind Flachufer und Steilufer auseinander zu halten. Die Grenze der Böschungsneigung zwischen den beiden Typen kann willkürlich bei 1:3 angesetzt werden:

Flachufer <1:3:

- Anschwemmungsufer im Mündungsgebiet eines Flusses
- Abtragungsufer mit Uferbank aus feinem Material
- Angrenzung an Schwemmebenen
- Vom Gletscher vorgeformte flache Gebiete

Steilufer >1:3:

- Anstehender Fels
- Schutthalden
- Felssturzgebiete
- Grober Moräneschotter

Aus Naturbeobachtungen ist bekannt: Je feiner der Seegrund, je flacher das Ufer oder je flacher das Ufer, je feiner der Seegrund. Es ist nicht möglich, an einem Steilufer einen Sandstrand anzulegen. Das feine Material würde durch die Wellenkräfte unter Mithilfe der Schwerkraft und Böschungsneigung innerhalb kurzer Zeit in die Tiefen des Seebeckens verfrachtet. Flachufer unterliegen einer stärkeren Uferdynamik als Steilufer. In kurzer Zeit kann sich mehr verändern. Voraussetzung neben dem feinkörnigen Seegrund ist ein rauhes Wellenklima mit starkem Wellengang.

Natürlich verändern sich auch Steilufer, allerdings innerhalb grösserer Zeiträume. Ursache sind nicht in erster Linie Wellenkräfte. Verwitterung und Massenbewegungen wie Rutsche und Felsabbrüche führen hier zu Veränderungen. Die folgenden Betrachtungen sollen sich im Rahmen des EROSEE–Projektes (EROSEE 2006) auf die Erosionsprozesse an den Flachufern beschränken.

Flachufer kommen einerseits entlang den Flanken verschiedener Seen vor *(Bild 3)*, so auf der Südostseite des Neuenburger- und des Bielersees. Diese sog. Abtragungs- oder Erosionsufer sind nicht ursprünglich. Sie entstanden im Bereich der brandenden Wellen durch Abtrag der Uferböschung. In einer weiteren Phase transportieren die Wellenströmungen das lose Material in Suspension und die gröberen Körner über dem Seegrund ins Tiefwasser. Schliesslich lagern sich die Sedimente auf der Halde und im Tiefwasser ab und gehen dem Ufer und Flachwasser für immer verloren.

Auf der Südseite des Neuenburger- und des Bielersees lieferten die anstehenden und leicht verwitterbaren Felsen der unteren Süsswassermolasse das sandige Material, aus welchem die bis zu mehrere 100 m breiten Uferbänke entstanden sind. Noch heute erkennt man bei Châbles hoch über dem Neuenburgersee kliffartige Sandsteinfelsen. Sie sind Zeugen der ehemals höheren Seestände. Der Rhonegletscher hinterliess nach der Eiszeit einen einzigen grossen Jurasee, dessen Pegel ca. 24 m über den Wasserständen der drei gegenwärtigen Seen lag. Im Nord-Osten reichte er bis zur Endmoräne bei Aarwangen.

Am Bodensee hingegen bestehen die Uferbänke aus gröberem Lockergestein. Es handelt sich um Moränematerial des Quartärs. Nicht jeder See besitzt ausgeprägte Uferbänke. In einigen tiefen Alpenrandseen fehlen sie ganz.

Flachufer finden sich andererseits auch am Rande der Schwemmebenen, dort wo die verzweigten Flussarme ihre Feststofffracht im See ablagern *(Bild 4)*.

Diese sog. Anschwemmufer wurden durch die Feststofffracht der Zuflüsse gebildet. Infolge anthropogener Eingriffe hat sich dieser Zustand vielerorts geändert. Hauptsächlich zwei Gründe sind verantwortlich dafür, dass die Flachufer der Deltas erosionsgefährdet sind und sich die Uferlinie landeinwärts verschiebt:

1. Nach der Korrektion und Kanalisation der Zuflüsse in ein fixes Gerinne lagern diese das Geschiebe nur noch konzentriert an einem Punkt des Deltas ab. Das verzweigte System der Flussarme, welche das Delta am gesamten Umfang mit Sedimenten nährten, besteht nicht mehr. Von der Wellenerosion abgetragenes Ufermaterial wird wegen des ausbleibenden Geschiebenachschubes nicht mehr ersetzt.
2. Flusskies ist ein begehrtes Baumaterial und von wirtschaftlichem Nutzen. An zahlreichen grösseren Flussmündungen haben sich deshalb Baggerbetriebe installiert. Sie tiefen den Seegrund mit den Kiesentnahmen stark ab. Die Baggerlöcher befinden sich in Ufernähe, dort wo sich das verwendbare Sand-Kies-Material ablagert. Die feinen und nicht brauchbaren Silt- und Tonfraktionen werden durch die Flussströmungen weiter seewärts getragen. Unter Wasser entstehen unstabile steile Böschungen. Subaquatische Rutschungen und das von den Wellen ausgelöste Ab-

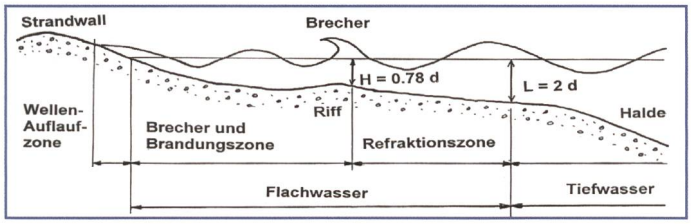

Bild 6. Übergang des Seegrundes und der Wellen vom Tiefwasser ins Flachwasser. Legende: d: Wassertiefe, h: Brecherhöhe, l: Wellenlänge.

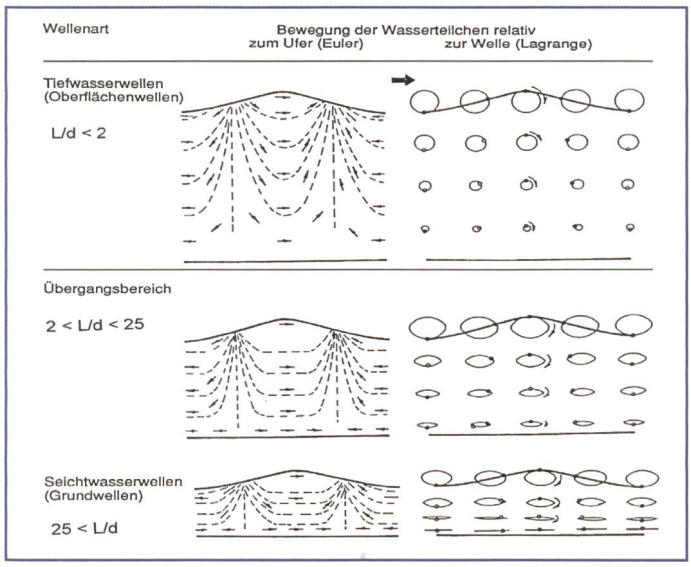

Bild 7. Wellenströmungen in tiefem und in seichtem Wasser

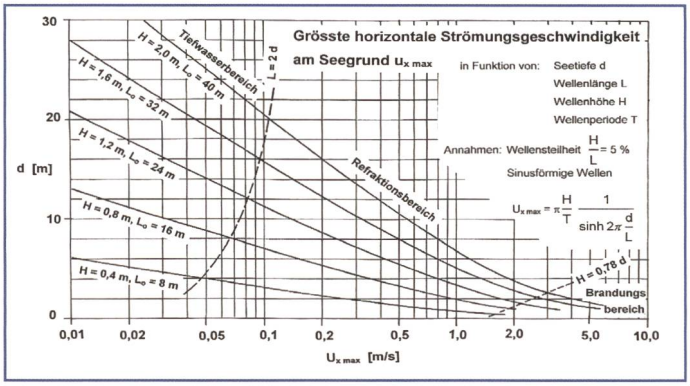

Bild 8. Grösste horizontale Strömungsgeschwindigkeit am Seegrund in Funktion von Seetiefe und den Wellenparametern Wellenlänge und Wellenhöhe.

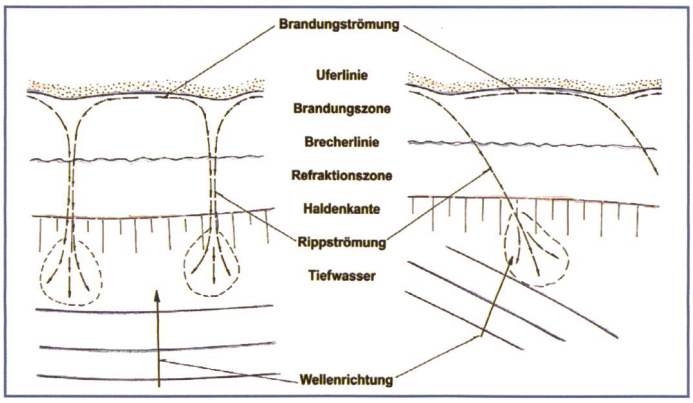

Bild 9. Strömungen im ufernahen Flachwasser, links bei senkrechtem Anlauf, rechts bei schrägem Anlauf der Wellen.

driften des aufgewirbelten Ufersubstrates in grössere Seetiefen sind die Folge.

Im Laufe der Nacheiszeit vertieften sich die Seeausflüsse *(Bild 5)*. Gleichzeitig senkten sich die Seespiegel. Bei diesem Vorgang veränderten sich auch die Ufer stetig. Die Uferbänke und Deltas passten sich den abdriftenden Seeständen an.

3. Windeinwirkung und Wellen in der Flachwasserzone

Winde, die Wasserflächen überstreichen, erzeugen infolge der Schubspannungen zwischen Luft und Wasser Windwellen. Periode, Länge und Höhe, die Kenndaten der Wellen, sind abhängig von der Streichlänge des Windes, von der Winddauer und der Windstärke. Jeder See ist ein Individuum. Eines seiner Merkmale sind die typischen Winde. Die Wind- und Wellenverhältnisse können sich je nach Uferstandort stark ändern.

Beim Übergang vom Tiefwasser in die sog. Refraktionszone *(Bild 6)* beginnen die Wellenströmungen den Seegrund zu spüren. Die Seetiefe wird kleiner als die halbe Wellenlänge (L=2d). Die Strömungen erzeugen am Seegrund Schubspannungen, welche bei abnehmender Wassertiefe noch zunehmen.

Unter dem sog. Shoalingeffekt drehen sich die Wellen gegen das Ufer zu, werden gegen das Ufer hin höher und steiler. Im zunehmend seichteren Wasser ist die Stabilität der Wellen nicht mehr gewährleistet, sobald die Wellenhöhe das 0,78-Fache der Wassertiefe erreicht hat. Sie brechen in einer Brecherlinie. In abgeschwächter Form durchlaufen sie die Brandungszone, bis sie in der Auflaufzone den Strandwall erreichen und nachher zurücklaufen.

4. Wellenströmungen und Sedimentbewegungen

Die Strömungsbahnen der Wellen im Vertikalschnitt unterscheiden sich nach Zone *(Bild 7)*.

- Im Tiefwasser reichen die Strömungen nicht bis auf den Grund. Die Wasserteilchen der wandernden Wellen bewegen sich auf kreisförmigen Bahnen.
- Im Refraktions- oder Übergangsbereich dringen die Wellenströmungen bis auf den Grund. Die bewegten Wasserteilchen beschreiben Ellipsen.
- Im seichten Wasser schliesslich ist der Zustand des Übergangsbereiches noch ausgeprägter und die Wasserteilchen am Grund führen nur noch horizontale Hin-und-Her-Bewegungen im Rhythmus der Wellen aus.

In der Refraktionszone und noch mehr in der Brandungszone erreichen die Schubspannungen Werte, die ausreichen, das Material am Seegrund in Bewegung zu versetzen. Es ist zu unterscheiden zwischen der wirkenden Schubspannung und der Grenzschubspannung bei Bewegungsbeginn des Sedimentes. Die Abhängigkeiten sind folgende:

- Wirkende Schubspannung: Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenlänge, Wassertiefe
- Grenzschubspannung bei Bewegungsbeginn: Korndurchmesser, Dichte des Materials

In der Praxis wird oft der Einfachheit halber nicht die Grenzschubspannung, sondern die Strömungsgeschwindigkeit als Kriterium für den Bewegungsbeginn verwendet. Aufgrund der Wellenparameter kann die Strömungsgeschwindigkeit am Seegrund nach der Wellentheorie berechnet werden (Wiegel, 1964). Für ausgewählte Werte ist die Beziehung in einer Kurvenschar dargestellt *(Bild 8)*.

Die entsprechenden Grenzgeschwindigkeiten liegen in der Grössenordnung von dm/s.

Beschaffenheit des Seegrundes	Grenzgeschwindigkeit in m/s
Silt, feiner Sand (0,02/0,2 mm)	0,20
mittlerer Sand (0,2/0,6 mm)	0,20–0,30

grober Sand (0,6/2 mm)	0,30–0,60
feiner Kies (2/6 mm)	0,60
mittlerer Kies (6/20 mm)	0,60–0,80
grober Kies (20/60 mm)	1,00–1,40

Bisher wurden die Wellenströmungen und deren Wirken nur im Ufer-Querprofil mit angrenzendem Flachwasser betrachtet, d.h. zweidimensional. Um den Prozess der Ufererosion vollständig nachzuvollziehen, soll das Geschehen auch im Grundriss verfolgt werden.

Die gegen das Ufer treibenden Wellen bewirken einen Massentransport. Hinter der Brecherlinie und in der Brandungszone herrscht bei starkem Wellengang eine erhöhte Turbulenz. Die Silt- und Sandfraktionen feinkörniger Seeböden gehen in Suspension über und trüben das Wasser. Wellen und Strömungen bilden gemeinsam ein Transportsystem, bei welchem die Wellen das Seebodenmaterial erodieren und aufwirbeln, während die Strömungen das aufgewirbelte Material forttransportieren (Siessegger 2001).

Aus Kontinuitätsgründen müssen zum Ufer gedrängte Wassermassen in gleichen Mengen zurückweichen. Eine ausgleichende Zirkulation wird dadurch hervorgerufen *(Bild 9)*. Diese zeichnet sich einerseits durch uferparallele Strömungen aus (sog. Brandungsströmungen). Andererseits entstehen Rückströmungen, welche die ankommenden Wellen seewärts unterlaufen. Dieser Wasserrücklauf wird durch senkrecht vom Ufer abgehende gebündelte Strömungen (sog. Rippströmungen) ergänzt. In unregelmässigen Abständen zielen sie über das Flachwasser und die Haldenkante hinweg ins Tiefwasser.

In diesem komplexen und energiereichen Strömungsfeld werden je nach Wellengang beträchtliche Sedimentmengen mobilisiert, teilweise entlang des Ufers transportiert und teilweise ins Tiefwasser befördert, wo sie sich absetzen und von den Wellenströmungen nicht mehr erfasst werden. Die Massenbilanz der Sedimente fällt deshalb auf die Dauer zuungunsten der Ufer aus. Feinsandige Ufer ohne Sedimentzufuhr eines Fliessgewässers sind deshalb dem Zahn der Erosion ausgesetzt.

5. Strömungen und Erosion an verbauten Ufern

Was geschieht nun in einem Flachwasser, dessen Ufer zur Landgewinnung vorgeschüttet und mit einer harten Verbauung, einer Ufermauer *(Bild 10)* oder einer gepflästerten Böschung etwa, vom Land abgetrennt wurde? Weil das Wasser vor dem künstlichen Ufer meistens zu tief ist, wird das Brecherkriterium $H > 0{,}78\,d$ nicht erfüllt. Die Wellen brechen nicht oder dann unmittelbar vor der massiven Uferbefestigung und laufen diese mit unverminderter Wucht an. Auch hier ergibt sich aus Kontinuitätsgründen ein komplexes Feld von uferparallelen Brandungsströmungen, Rückströmungen und Rippströmungen. Im Vergleich zum stetig auslaufenden Flachwasser sind diese Strömungen intensiver. An der Verbauung werden die Wellen zurückgeworfen und das Wasser zum Rücklauf umgelenkt. Die Wellen reflektieren mindestens teilweise. Am Reflexionspunkt können sich die Wellenhöhen praktisch verdoppeln. Es entstehen hohe dynamische Drücke mit ungleichmässiger Verteilung. Die Druckenergie wird beim Zurückweichen der Wellen in Bewegungsenergie umgewandelt. Bei diesem Vorgang entsteht eine rotierende, walzenartige Strömung mit uferparallelem Wirbelkern. Der Wirbel kann sich über weite Strecken entlang des Ufers ausbreiten und zu verstärkter Erosion in benachbarten natürlichen Ufergebieten führen.

Die Strömungen der aufprallenden Wellen erzeugen am Fusse der massiven Uferbefestigungen im feinkörnigen Seegrund Kolke, welche die Bauwerke gefährden. Die energiereichen Wellenströmungen tragen anstelle des Ufermaterials jenes des Seegrundes ab und befördern es dem Ufer entlang und ins Tiefwasser. Insgesamt sind bei gleichen Wellen die Erosionsraten grösser als bei flach auslaufenden Naturufern. Wohl bremsen Ufermauern und Blockwürfe die Ufererosion. Jedoch bewirken die Strömungen der reichlich vorhandenen Wellenenergie eine Abtiefung des Seegrundes, weil der Materialnachschub vom Ufer fehlt. Anstelle der eigentlichen Ufererosion tritt vermehrt die Tiefenerosion. Die Abtiefung dauert an, bis sich die Schubspannungen am Seegrund unter den kritischen Grenzwert verringert haben. Eine Analogie dazu ist aus dem Flussbau bekannt: Flüsse, deren Geschiebenachschub zu gering ist, etwa wegen der Errichtung einer Talsperre, neigen zur Tiefenerosion.

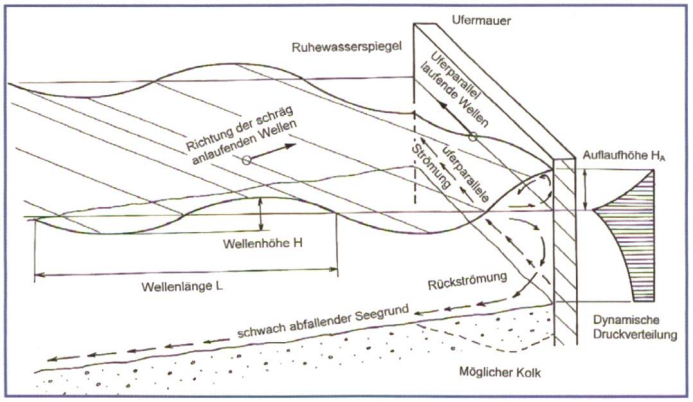

Bild 10. Strömungen, dynamische Druckverteilung und Kolkbildung vor einer Ufermauer bei schräg anlaufenden Wellen.

6. Ufermorphologische Erkenntnisse über Seen

Nach dem Rückzug der Gletscher vermindert sich der Inhalt glazialerosiver Seen stetig. Ursache sind der Sedimenteintrag der Zuflüsse, der Uferabtrag der Wellen und die Spiegelabsenkung infolge sich eintiefender Seeausflüsse.

Antrieb der ufermorphologischen Veränderungen ist vor allem die unerschöpfliche Energie der Winde. Je feinkörniger der Seegrund und je rauer das örtliche Wellenklima, desto stärker sind die Ufer von der Wellenerosion gefährdet.

Die Böschungsneigung natürlicher Ufer und die Körnung des Grundes sind voneinander abhängig. Je gröber das Material, desto steiler ist die Böschung.

Die feinen Teile des Ufermaterials werden von den Wellenströmungen teilweise ins strömungsarme Tiefwasser weggetragen und abgelagert, wo sie dem Ufer und dem Angriff der Wellenströmungen dauernd entzogen sind.

Wird der Abtrag der Ufer durch harte Verbauungen verhindert, so konzentriert sich der Angriff der Strömungen ungedämpft anlaufender Wellen auf die Abtiefung des vorgelagerten Flachwassers und auf die benachbarten unverbauten Ufer.

Bibliographie

EROSEE (2006) Fachtagung Erosionsprozesse und Schutzmassnahmen an Seeufern, WEL 4/06, 1/07, 2/07.

Imhof E. (1951). Schweizerischer Schulatlas, Kantonaler Lehrmittelverlag in Zürich.

Jung G. (1990). Seen werden, Seen vergehen; Ott Verlag Thun.

Siessegger B., Teiber P. (2001). Erfolgsmodell für Renaturierungen am Bodenseeufer, Ingenieurbiologie 3/01.

Wiegel R.L. (1964). Oceanographical Engineering, Prentice-Hall International Inc. London

Anschrift des Verfassers
Dr. *Andreas Huber*
Dipl. Bauing. ETHZ, beratender Ingenieur
Im Baumgarten 12, CH-8606 Greifensee
Tel. +41 (0)44 940 74 03
huber.andreas@ggaweb.ch