

Einsatz verankerter schwimmender Strukturen zur Wellendämpfung und Freizeitgestaltung in Tagebaurestseen

Harold Wagner, Jürgen Clement

Seebau findet momentan und auch in Zukunft in Deutschland nicht nur an Nord- und Ostsee, sondern zu einem sehr bedeutenden Teil auch im Binnenland statt. Einen besonders großen Part haben daran Bauaktivitäten an Restseen des Tagebaues. Solche Rekultivierungsmaßnahmen, die als wesentlichen Bestandteil die Wasserauffüllung der Restlöcher beinhalten, schaffen aus Kraterwüsten des einstigen Braunkohlenabbaues ganz neue Seenlandschaften.

Die Bundesrepublik Deutschland verfügt in Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Bayern (siehe Abb. 1) über zahlreiche Braunkohlevorkommen.

In den neuen Bundesländern sind die Vorkommen weitgehend ausgekohlt, und man hat hier auf breiter Basis damit begonnen, die Tagebaurestlöcher mit Wasser zu füllen und neue Landschaften und Freizeitreviere zu gestalten.

Einen kleinen Eindruck von den entstehenden, umfangreichen Seengebieten in den rekultivierten Bergbaunachfolgelandschaften vermitteln die Detailskizzen der Umgebung von Senftenberg (Lausitz) Abb. 2 und des Südraumes von Leipzig (Mitteldeutschland Abb. 4).

Insgesamt handelt es sich im Bereich Lausitz und Mitteldeutschland um

- 224 zu sanierende Tagebaue in Verantwortung der LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH) und um fünf zu sanierende Tagebaue in Verantwortung von Vattenfall

- um die Auffüllung von 13 Milliarden Kubikmeter Wasserdefizit
- um die Schaffung von ca. 25.000 ha Wasseroberflächen
- und schließlich um Sicherungsmaßnahmen an ca. 1.500 km Uferböschungen, die etwa zu einem Viertel massiv belastet sind und eines intensiven Wellenschutzes bedürfen.

Es erschließt sich damit ein großes Bedarfsvolumen für Bau- und Gestaltungsmaßnahmen einmal direkt an den belasteten Ufern und dann darüber hinaus für Schutzkonstruktionen davor, welche die Wellenbelastung dämpfen und den Sedimenttransport vermindern. Hier sind dann u.a. effektiv wirkende schwimmende Wellenbrecher und ähnliche Konstruktionen erforderlich.

Das Böschungsmaterial dieser Ufer besteht im Regelfall aus relativ gleichkörnigem Feinsand mit oftmals starkem Pyritgehalt. Es ist besonders in den Kippenbereichen sehr locker gelagert.

Da oft nicht genügend Wasser zur schnellen Füllung zur Verfügung steht, vollzieht sich das Auffahren der Wasserspiegellagen meist über mehrere Jahre.

In diesem Füllungsprozess erodieren die auf den unterschiedlichen Wasseroberflächenlagen entstehenden Wellen die Böschungen. Das Wirkprinzip ist in Abb. 4 dargestellt.

Beim Aufruf auf die schräge Uferböschung steilen sich die anlaufenden Wellen auf, formieren sich zu Brechern, deren Strahl unter Einschluss einer Lufttasche auf die Böschung schlägt und das Sandmaterial aufwirbelt. Das gelöste Ufermaterial ist kurzzeitig Bestandteil eines Wasser-Luft-Sandgemisches bis die beteiligten Strömungen es periodisch vorwiegend seewärts verfrachtet haben.

Die durch die Windgeschwindigkeit W_{10} erzeugte Wellenbewegung (Wellenhöhen H , Wellenlängen L bzw. λ) erodiert damit die Böschung oberhalb des Wasserspiegels, erzeugt eine Flachterrasse und ein Kliff und lagert, wenn kein Uferlängstransport vorhanden und die Unterwasserböschung flacher als die Grenzneigung ist, die Akkumulationsmassen als Massiv auf dem Unterwasserhang ab.

Bei senkrechtem Wellenanlauf, gleichbleibendem Wasserspiegel und konstanter Belastung bildet sich letztlich ein Uferprofil heraus, auf dem die Sedimentbewegungen ausgeglichen sind und das in seiner Form (dynamisches Gleichgewichtsprofil) unveränderlich bleibt.

Alle diese Umformungsprozesse sind in Abhängigkeit von der Belastung detailliert verfolgbar. Zur analytischen Beschreibung des Gleichgewichtsprofils wird eine schematische Kontur benutzt, die in Abb. 5 wiedergegeben wurde.

Alle in Abb. 5 eingezeichneten Kennzeichen sind in Abhängigkeit von Wellenbelastung [1], [2] und den Eigenschaften des Böschungsmaterials bestimmbar [3], [4].

Besonders wichtig ist die Ausgleichsneigung m_A und die Terrassenbreite l_T .

Sie sind bestimmbar über nachfolgende Beziehungen:

$$m_A = m_{\phi} + \left(0,0625 \frac{\rho}{\rho_s} \cdot \frac{H_m}{D_{50}} \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}} \right)^A$$

mit $A = 0,5$ für $500 < H_m/D_{50}$

$$\text{und } A = 0,5 \left(1 - \cosh^{-1} \left[0,083 \left(\frac{H_m}{D_{50}} - 3,4 \right)^{2/3} \right] \right)$$

für $H_m/D_{50} \leq 500$

$$l_T = m_A (h_K + h_R)$$

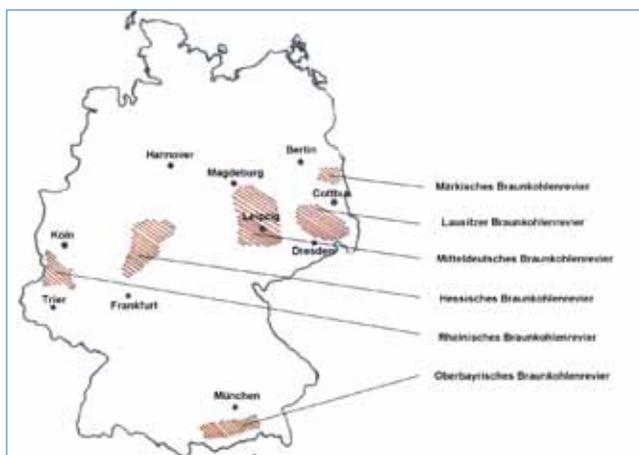


Abb. 1: Braunkohlegebiete in der Bundesrepublik Deutschland



Abb. 2: künftige Seenlandschaft um Senftenberg

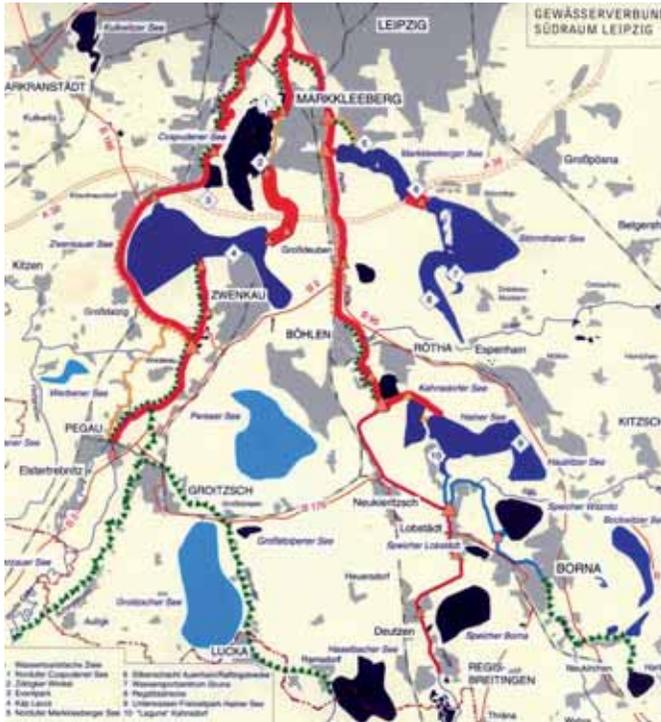


Abb. 3: Tagebauseenlandschaft im Leipziger Raum

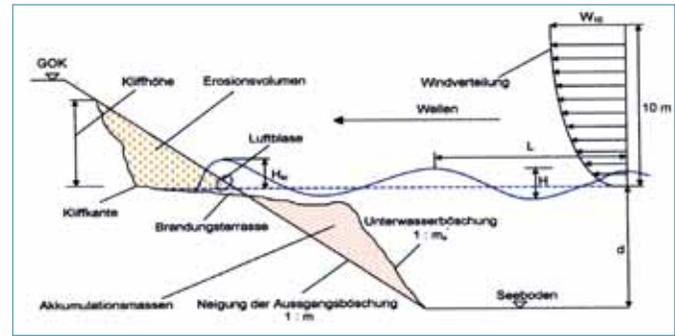


Abb.4: Prinzipskizze der Wellenerosion eines unbefestigten Ufers

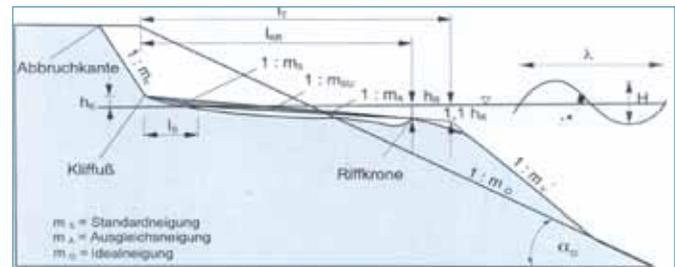


Abb. 5: Idealierte Erosionsböschung

Weiterhin bestimmbar sind Kliffußhöhe h_K und Riffwassertiefe h_R :

$$h_R = H_M (1 + 0,05 \sqrt{\lambda_m/H_m})$$

$$h_K = \frac{181}{m_A} H_m \sqrt{\frac{\lambda_m}{H_m}}$$

Dabei bezeichnen

- h_R Wassertiefe über dem Riff
- h_K Kliffußhöhe
- H_m mittlere Wellenhöhe
- λ_m mittlere Wellenlänge
- m_A Ausgleichsneigung
- m_U Grenzböschungeneigung unter Wasser
- ρ Dichte des Wassers
- ρ_S Auftriebsdichte des Ufermaterials
- D_{50} mittlerer Korndurchmesser des Ufermaterials

Wie aus den Beziehungen ersichtlich, sind diese Funktionsgrößen abhängig von der Grenzneigung m_U , dem mittleren Korndurchmesser D_{50} , der Auftriebsdichte ρ_S , des Böschungsmaterials sowie der mittleren Höhe H_m und Länge λ_m der maßgebenden Wellenbewegung

Bei den üblich vorhandenen Streichlängen des Windes auf der Wasseroberfläche von 0,5 km bis 2 km und dem Feinsandmaterial liegen die Terrassenlängen, die von jährlichen Wellenbelastungsereignissen erzeugt werden, bei etwa $l_T = 4$ m bis 6 m, bei Maximalereignissen bei $l_T = 10$ m bis 12 m.

Im Laufe des Füllungsprozesses werden deshalb, je nach Wasserspiegellage, Erosionsterrassen in unterschiedlichen, aufsteigenden Höhen erzeugt (s. Abb. 6). Dabei wird durch die Wellenbewegung ein beachtlicher Teil der Böschung »umgegraben«(s. Abb. 6).

Als Ergebnis des gesamten Wellenerosionsprozesses während der Füllung des Tagebaurestloches ist feststellbar, dass ein beachtlicher Teil des Materials der Ausgangsböschung abgetragen und verfrachtet wurde, dass die vorprofilierte Gleichgewichteneigung im Bereich des Endwasserpiegels angegriffen und die Sicherheitslinie weiter landseitig verschoben wurde.

Meist schwerwiegender als diese Materialumlagerungen und Materialverluste ist die während dieses Vorganges auftretende Versauerung des Seewassers und die damit massive Verschlechterung der Wasserqualität (s. Abb. 7).

Maßgebend für diesen Vorgang der Nutzungsver schlechterung des Wassers sind das Vorhandensein von Eisen- bzw. Aluminiumsulfaten (hier pauschal als Pyrit/Markasit bezeichnet) im Böschungsmaterial, der Sauerstoffeintrag durch die Wellenbrandung sowie die Pumpwirkung, die un-

ter dem Brecherstrahl entsteht (siehe Abb. 7 und 8). Diese Pump- und Druckwirkung reichen bei Fein- und Mittelsanden bis etwa Wellenhöhe unter die Oberfläche.

Die Eisensulfate werden innerhalb der Umformungsprozesse ausgespült und ausgewaschen und reagieren mit dem luftreichen Brandungswasser im Uferbereich derart, dass neben dem rötlich ausflockenden Eisenhydroxyd Sulfationen auch Wasserstoffionen entstehen, die die Versauerung bedingen.

Maßgeblich sind für diesen Vorgang die im Brandungsvorgang völlig ausgewaschenen Abbruchmassen. Sie sind in Abb. 6 ohne Berücksichtigung des Längstransportes dargestellt durch die Fläche zwischen der roten und schwarzen Linie.

Bei normalen Lage- und Belastungsverhältnissen entsteht so beispielsweise auf einer ca. 200 m langen Uferstrecke, beim Füllprozess über eine Höhe von 25 m, ein umgear-

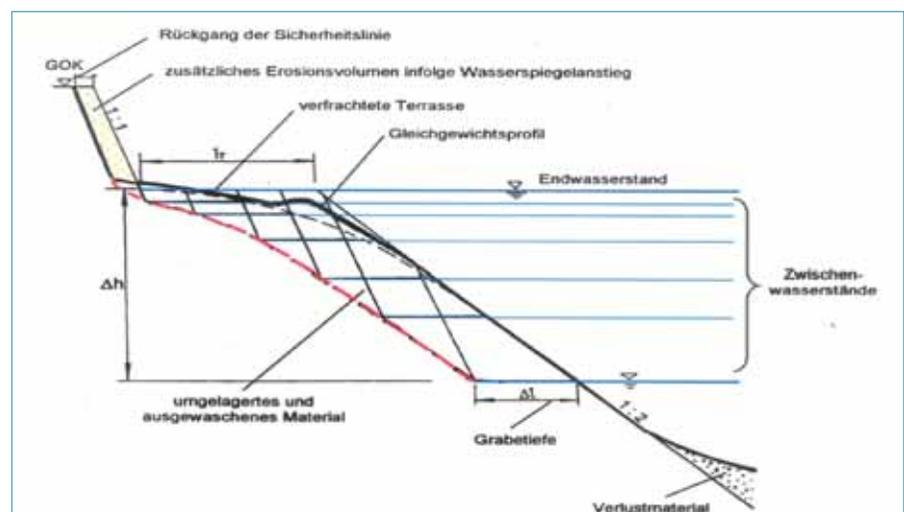


Abb. 6: Veränderung der Uferböschung während des Flutungsprozesses

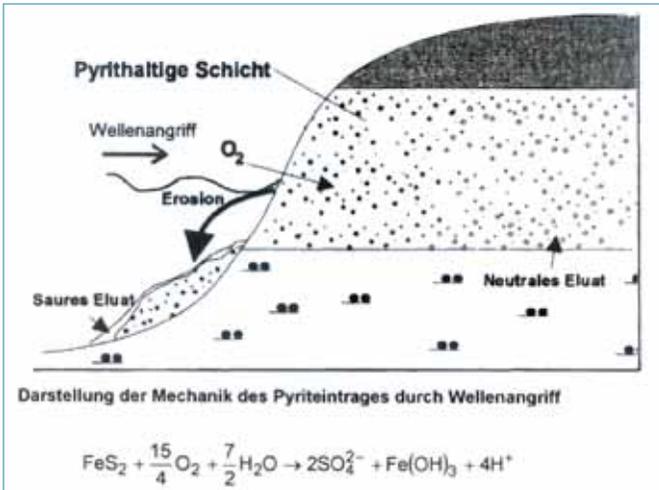


Abb. 7: Schematische Darstellung des Versauerungsprozesses

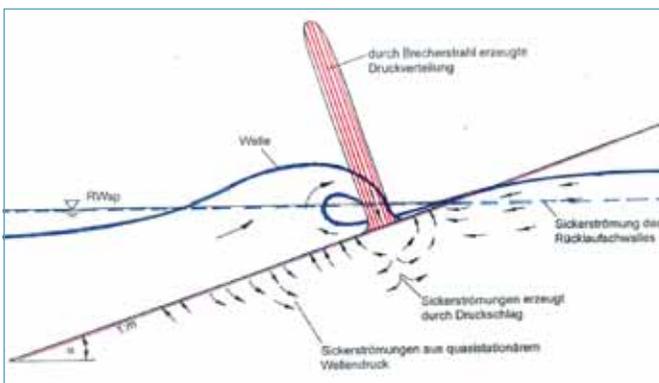


Abb. 8: Pumpwirkung des Brecherstrahles

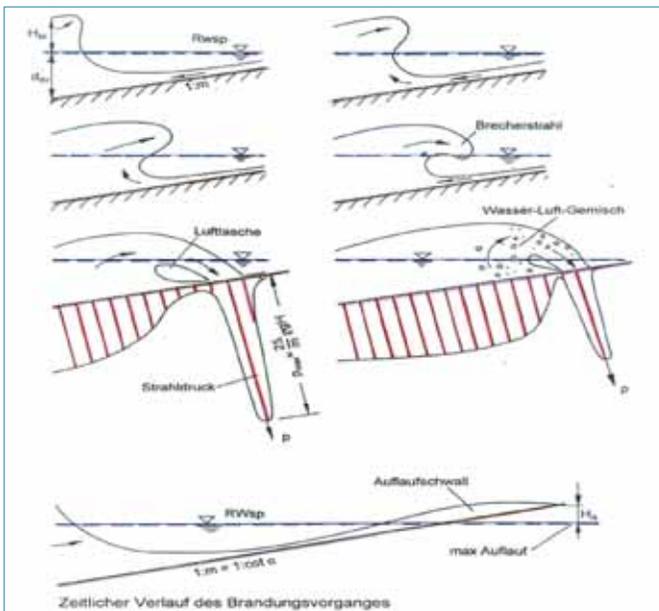


Abb. 9: Darstellung des Brandungsvorganges



Abb. 11: Anlage am Partwitzer See

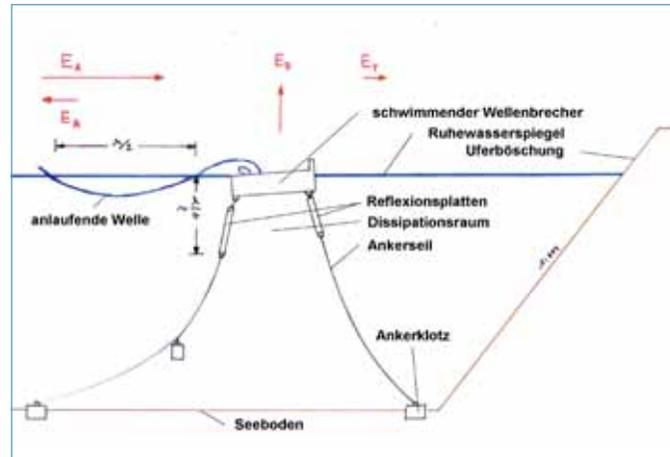


Abb. 10: Systemskizze eines schwimmenden Wellenbrechers

beitetes Abbruchvolumen von ca. 25.000 m³. Rechnet man mit einem Volumenpromille Pyrit im sandigen Ufermaterial, so besitzt das oben erwähnte Abbruchvolumen von 25.000 m³ eine Versauerungskapazität, die imstande ist, ca. 4,2 Mio. m³ Wasser von PH = 7 auf PH = 3 zu bringen.

Die Richtigkeit der Aussage, die das Hauptaugenmerk bei der Entstehung der Versauerung auf den Auswaschungsprozess durch Wellen legt, wurde durch Untersuchung des Füllungsprozesses am Restsee Dreiwießer nachgewiesen. Hier wurden kontinuierliche Säuregradmessungen zusammen mit Windmessungen durchgeführt. Über die Reproduktion des jeweils herrschenden Wellenklimas waren auch die Abbruchprozesse bestimmbar. Schließlich war damit die während des Füllvorganges festgestellte PH-Wertveränderung von 7 auf 3 sehr eindeutig dem Pyritgehalt der Abbruchmassen zuweisbar.

Als meist nur unvollkommenes Gegenmittel gegen die Versauerung der Tagebauseen während des Füllvorganges werden oft umfangreiche Kalkschüttungen vorgenommen. Sie binden zwar einerseits die Protonen, treiben jedoch andererseits durch Stärkung des basischen Bereiches die Reaktion der Versauerung und der Ausflockung weiter voran.

Günstiger in der technischen Anwendung erscheint es daher, vor dem Einsatz von Kalkstreuungen oder -schüttungen die pyrit-haltigen Uferbereiche vor den Wellenbelastungen vor allem in der Auffüllungsphase zu schützen. Damit wird nicht nur der Abbruch vermindert oder auch ganz verhindert und die vorprofilierte Uferkontur geschützt, sondern auch gleichzeitig der Sedimenttransport entlang des Ufers sowie die Versauerung maßgebend reduziert. Die Reduzierung der Versauerung wird dabei nicht nur durch Verringerung der Abbruchmassen, sondern auch durch Veränderung des chemischen Reaktionsklimas bedingt. Das Reaktionsklima kann dann neben der Verringerung des Sauerstoffangebotes auch durch lokal begrenzte Konzentration des saueren Regimes in unmittelbarer Ufernähe geprägt werden.

Besonders vorteilhaft ist für solche Zwecke der Einsatz geeigneter schwimmender Wellenbrecher (siehe beispielsweise Abb. 10).

Sie besitzen gegenüber herkömmlichen festen Wellenbrechern den großen Vorteil, dass ihre Kosten nicht mit der Wassertiefe steigen. Schwimmende Wellenbrecher können problemlos in ihrem Arbeitsbereich dem Wasseranstieg folgen. Sie erfüllen in der Endphase, vor allem auch bei einer vorgegebenen Staulamelle die Aufgaben des Uferschutzes und vermindern damit gleichzeitig die Sedimentbewegung und die Versauerung.

Das Wirkprinzip solcher schwimmender Wellenbrecher beruht auf Wellenreflexion, teilweise unterschiedlich gestaffelter Energiedissipation und der partiellen Trennung des ufernahen Wasserreiches (saurer Bereich) vom Kernwasserbereich des Seegebietes.



Abb. 12: Marina am Kummerower See



Abb. 13: Anlage in Chantecog



Abb. 15: Versandungserscheinungen am Einlauf Cospuden

Die von der Luvseite anlaufende Wellenenergie E_A wird zunächst zu einem beachtlichen Teil E_R (reflektierte Energie) an den vorderen, relativ senkrechten Teilen der schwimmend verankerten Struktur reflektiert, d.h. wieder in Richtung Luv abgestrahlt. Bei diesem Reflexionsvorgang wird weiterhin schon ein kleiner Teil der Energie E_{Di} dissipiert.

Sowohl durch die geringe Höhe der Wellenbrecheroberfläche, wie auch ggf. durch eine Schrägneigung der Schwimmkörperplatte im Wasserspiegelbereich brandet die Welle partiell unschädlich, weit genug vom Ufer entfernt und verliert dabei ebenfalls einen Teil ihrer Energie E_{Di} .

Ein weiterer Anteil der kinetischen Energie der anlaufenden Welle gelangt dann nur unter starken Verwirbelungen um die vordere Reflexionsplatte herum in den Raum unter den Wellenbrecher. Die dabei entstehenden Ablösungsvorgänge sind stark energiezehrend E_{Di} . Durch die hintere Reflexionsplatte zusammen mit dem Foliensegel wird eine direkte Transmission des Restteiles der anlaufenden Energie in den zu schützenden Bereich landseitig hinter den Wellenbrecher weitgehend verhindert. Es wird vielmehr ein beachtlicher Energieanteil in instationären Wirbelströmungssystemen im Raum unter dem Schwimmkörper zwischen den Reflexionsplatten gebunden E_{Di} . Durch Druckübertragung im Foliensegelbereich sowie durch Schwingung des Wellenbrechers wird schließlich ein Restteil der Energie E_T in den zu schützenden Bereich transmittiert.

Die Größe dieses Anteils wird durch die Güte der Wellenbrecherkonstruktion bestimmt.

Ein für diese Aufgabe zu empfehlender schwimmender Wellenbrecher wird durch ein Verhältnis E_T/E_A kleiner als 0,15 gekennzeichnet, das heißt der Wellenbrecher lässt weniger als 15 % der anlaufenden Energie in den zu schützenden Bereich.

Damit wird aber nachhaltig der Abbruch, die Sedimentbewegung und damit auch die Versauerung beeinflusst. Darüber hinaus begrenzt das Foliensegel das Initialgebiet der Versauerung in unmittelbarer Ufernähe und vermindert über Regimekonzentration den Versauerungsprozess.

Die gleiche Problematik in Bezug auf die Wellendämpfung besteht beim Bau geschützter Liegestellen für Sportboote (Marinas).

Massive Außenwerke (Molen) werden auch hier, abgesehen von wenigen lokalen Ausnahmen, durch große Wassertiefen unwirtschaftlich teuer. Funktionsfähige schwimmende Wellenbrecher können auch hier die geforderten Aufgaben übernehmen. Sie sind darüber hinaus gut mit Steganlagen kombinierbar.

Der Wirkungsgrad komplizierter schwimmender Wellenbrecher sollte einschließlich ihrer Verankerung über Modellversuche ermittelt werden. Eine Abschätzung kann in Analogie zu einem festgehaltenen Quader der Breite B und der Tauchtiefe d_w über folgende Beziehung erhalten werden:

$$\frac{E_T}{E_A} \approx \left[\frac{g \cdot T^2 \cdot \sinh \frac{2 \cdot \pi \cdot (d - d_w)}{\lambda}}{2 \cdot \pi^2 \cdot (B + d \cdot \tanh 3,5 \cdot d_w / d) \cdot \cosh \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}} \right]^2$$

Dabei bezeichnen:

- E_T/E_A das Verhältnis der in das Hafengebiet übertragenen Energie zur anlaufenden Wellenenergie
- B die Breite des Wellenbrechers
- λ die Wellenlänge
- d die Wassertiefe
- d_w die Eintauchtiefe des schwimmenden Wellenbrechers
- T die Wellenperiode

Besondere Formen solcher Wellenbrechersysteme sind patentrechtlich geschützt.

Nachfolgende Beispiele (Abb. 11, 12, 13) geben einen Eindruck solcher schwimmenden Anlagen.

Außer den Problemkreisen der Versauerung, des Rückganges der Sicherheitslinie und der Verringerung der Hafenuhrzeit interessieren auch oftmals stabile Uferverhältnisse hinsichtlich der Gestaltung von Badebereichen.

Badebereiche sollten gegenüber der Standardufergestaltung eine andere Konzeption haben. Während im Normalfall die flache Gleichgewichtsböschung bis etwa 1 m unter den Wasserspiegel gezogen wird, ist in Badebereichen diese Neigung bis zu etwa 2 m Wassertiefe zu projektieren. Dabei sind vorwiegend die Randbereiche verstärkter Erosion ausgesetzt. Leider ist aber auch dann das Ufer von Veränderung und Erosion betroffen. Besserung kann auch in einem solchen

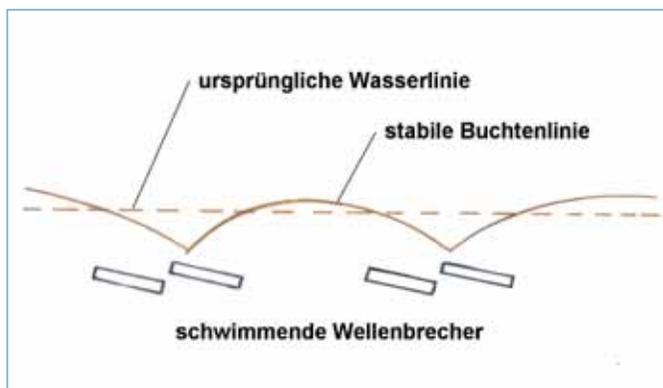


Abb. 14: Einsatz schwimmender Wellenbrecher zur Gestaltung einer stabilen Uferlinie

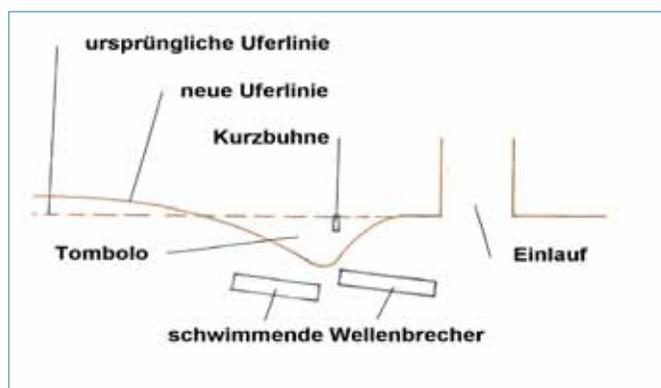


Abb. 16: Versandungsschutz für einen Einlauf



Abb. 17: Schiffsanleger IGA Rostock



Abb. 18: Schwimmende Gärten IGA Rostock

Fall der Einsatz schwimmender Wellenbrecher erbringen. Das Wirkprinzip ist in Abb. 14 schematisch dargestellt.

Durch die Wellenbeschattung ausgesuchter Uferbereiche wird der Sedimentlängstransport vermindert oder unterbrochen. Das mitgeführte Sandmaterial wird zumindest teilweise in Form von Tombolos abgelagert. Durch Aneinanderreihung im jeweils zweckmäßigen Abstand entsteht eine landschaftlich sehr interessante, stabile, aus Einzelbuchten aufgebaute Uferlinie, die darüber hinaus auch noch über eine größere Strandlänge verfügt.



Abb. 18: Schwimmende Gärten IGA Rostock

Ein weiteres zu erörterndes Problem ist die Versandungsgefahr der unterschiedlichsten Ein- und Ausläufe sowie die Verbindung der Tagebauseen untereinander.

Die übliche Vorstellung, dass nur wenig Sediment in den entstehenden Tagebauseen entlang der Ufer bewegt würde, ist leider falsch. Ein gutes Beispiel ist ein Einlauf am Restsee Cospuden.

Innerhalb eines Jahres war der Einlauf funktionsunfähig geworden, weil ca. 500 m³ Sandmaterial in den Einlauf eingetrieben wurden. In Abb. 15 kann dieses Geschehen deutlich sichtbar dargestellt werden, da die Hakenbildung über den Wasserspiegel hinausragt und die Einlaufbreite bis auf einen kleinen Bereich einengt.

Auch hier können schwimmende Wellenbrecher mit Erfolg das Geschehen verändern und die Versandung vermindern.

Das Prinzip beruht wiederum auf der Wellenbeschattung des in Luv liegenden Uferabschnittes (s. Abb. 16).

Wie bei der vorherigen Sachlage der Schaffung stabiler Uferbereiche wird auch hier der uferparallele Sedimenttransport beeinflusst und dadurch zumindest eine Teilablagung des mitgeführten Materials

im Schattenbereich der Wellenbrecher erzwungen.

Als Initialpunkt für eine anfängliche Strömungsumlenkung ist zusätzlich im Schattenbereich eine kleine Bühne angeordnet worden, die zu Beginn die Restströmung umlenkt.

Im Schutz der schwimmenden Wellenbrecher und fixiert durch die Kurzbühne entwickelt sich ein Tombolo, in dem das sonst störende Material abgelegt wird.

Schwimmende Wellenbrecher können neben den geschilderten primären Aufgaben auch gleichzeitig, sekundär oder temporär zu anderen Nutzungen herangezogen werden. Dazu gehören u.a. Schiffsanleger, Badeinseln, schwimmende Gärten usw. (siehe Abb. 17, 18, 19).

Zusammenfassend kann damit festgestellt werden, dass effektiv wirksame schwimmende Wellenbrecher sehr vorteilhaft zur wirtschaftlichen Lösung der Probleme in Tagebaurestseen genutzt werden können.

Die besonderen Vorteile ihrer Nutzung entstehen

- aus der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes in relativ großen Wassertiefen
- aus dem problemlosen Anpassen an ver-

änderliche Wasserspiegellagen

- aus dem vergleichsweise geringen Aufwand beim Bauen im Wasser (teilweise fortgeschrittener Flutungszustand in einer Reihe von Tagebaurestseen)
- aus der relativ einfachen Realisierbarkeit einer nachträglichen Korrektur des Standortes
- aus den Möglichkeiten eines nacheinander folgenden örtlich flexiblen Funktionseinsatzes sowie
- aus der Sekundär- und Mehr-

fachnutzung.

Einsetzbar sind diese wellendämpfenden Elemente vorrangig zur Verringerung des Böschungsabbruches, zur Verringerung der Versauerung sowie zur Beeinflussung des Transportes von Sediment entlang der Ufer. Sie sind weiterhin nutzbar für Stege, Anleger, schwimmende Straßen, Badeinseln sowie als schwimmende Basis für Bauten unterschiedlicher Nutzungsfunktionen.

Schrifttum

- [1] Wagner, H.: Empirisch-rechnerische Prognose von durch Wind erzeugten Wellen. Seewirtschaft 17(1985), H.6
- [2] Bollrich, G.: Technische Hydromechanik 2. Abs. 9, Verlag für Bauwesen Berlin, 1986
- [3] Wagner, H.: Böschungsumbildung durch Wellen. Wasserbauliche Mitteilungen, H.9, 1996, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
- [4] Wagner, H.: Empfehlungen und Bemessungsgrundlagen für die Gestaltung von Tagebaurestseen. LMBV

Verfasser

Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner,
Am Havelblick 5 a, 14473 Potsdam
Dipl.-Ing. Jürgen Clement,
Grubenstr. 48, 18044 Rostock