

# Durch Wellen erzeugte Sedimentbewegungen in Bergbaufolgeseen

Harold Wagner, Almuth Götz, Tamara Starke

**E**s ist ein verbreiteter Irrtum, dass Sedimentbewegungen in Binnenseen in ihrer Wirksamkeit nicht relevant sind und deshalb vernachlässigt werden können. Besonders an den Uferbereichen der Bergbaufolgeseen der Lausitz und Mitteldeutschlands ist oft mit stark ausgebildeten Sedimentbewegungen und ihren Folgen zu rechnen.

Die Gründe für diese über das sonst übliche Maß hinausgehenden Erscheinungen werden durch folgende Faktoren hervorgerufen:

- relativ große, vor Windangriff ungeschützte Wasserflächen,
- Ufermaterial meist bestehend aus feinkörnigen Sanden,
- sehr lockere Lagerung des Böschungsmaterials - besonders in Kippenbereichen,
- Bewirtschaftung der Seengebiete mit Wasserspiegellamellenbetrieb,
- relativ steile, dem Wellenangriff nicht äquivalente Uferprofile sowie
- der Wellenbelastung unangepasste Uferlinienkonturen (Wasserspiegellinien).

Die auftretende Sedimentdynamik umfasst den vollen Problembereich von:

## Erosionen, Entmischungsprozessen und Akkumulationen

### Erosion, d.h.:

- Materiallockerung,
- Erzeugung von Roll- und Hubbewegungen des Sandmaterials,
- Kolke, Kliffs,
- Uferabbruch,
- Materialabtrag und
- Strandverlust.

### Entmischungsprozesse, d.h.:

- Entzug löslicher Bestandteile (z.B. Pyrit),
- Wellensuffosion (Entzug der Feinanteile des Korngemisches durch Scheinsuspension),
- partielle Fraktionsseparierung,

- Gesamtvolumenvergrößerung durch Abtrennung der Feinteile,
- Verringerung der Raumdichte,
- Vergrößerung der Durchlässigkeit und
- Aufbau einer besonders lockeren Lagerung in den Absetzbereichen.

### Akkumulation, d.h.:

- Auflandungen, Untiefen,
- Strandbildungen,
- Versandungen von Ein- und Ausläufen, Hafeneinfahrten und Liegestellen.

Zur analytischen Bearbeitung wird die durch Wellen erzeugte Sedimentdynamik an den Uferregionen von Seegebieten zweigeteilt und zwar in ufernormale und uferparallele Prozesse.

Für die ufernormalen Bewegungsvorgänge werden überwiegend Gleichgewichtsbedingungen verwendet. Sie sind ausführlich in [1] dargestellt und charakterisiert.

Für die uferparallele Sedimentbewegung wird nach dem Grundansatz entsprechend Abb. 1 verfahren. Danach ergibt sich das Volumen des Sediments im Uferlängstransport aus dem im Bezugsvolumen auf dem Unterwasserhang aufgewirbelten Sandmaterial multipliziert mit der Belastungszeit und der Uferlängsgeschwindigkeit.

Für die Uferlängsgeschwindigkeit  $v_L$  wurde in Ansatz gebracht:

$$v_L \sim m \cdot T \cdot g \cdot \sin 2\delta$$

Dabei bezeichnen:

- $m$  [1] die Strandneigung  $m = \text{ctg } \alpha$
- $T$  [s] die Wellenperiode
- $\delta$  [°] Richtungswinkel des Wellenlaufes als Abweichung der Wellenrichtung von der Ufernormalen.

$g$  [ $\text{m/s}^2$ ] Erdbeschleunigung  
Zusammen mit dreidimensionalen Modell-, mit Naturrecherchen und theoretischen Ansätzen entstand daraus ein Bestimmungssystem (s. Abb. 2), mit dem in Abhängigkeit von der Wellenbelastung (Wellenhöhen, Wellenlängen, Wellenrichtungen, Belastungsdauern, den Nutzungsanforderungen (Wasser-

spiegelwechsel), den Uferprofilen und den Kennwerten des Böschungsmaterials (mittlerer Korndurchmesser, Ungleichförmigkeitsgrad, Raumdichte, Lagerungsdichte) eine Sedimentbilanz ausgewiesen werden kann. Daraus ergeben sich wiederum Ufererosionen und Ablagerungen als Maßstab und Notwendigkeit für eventuell notwendige Bau- und Regulierungsmaßnahmen.

Insgesamt kommen dabei in Betracht:

- Standortverlagerungen,
- Abgrabungen, Abspülungen,
- Aufschüttungen, Aufspülungen,
- Flächenaufgaben aus größerem Material,
- Befestigungen (Steinbefestigungen, Matten, biologischer Verbau),
- Buhnen (Linear-, Sichel-, Haken- und T-Buhnen),
- Molenbauten,
- Unterwasserschwellen,
- Wellenbrecher
- sowie Kombinationen aus diesen Maßnahmen.

Grundsätzlich gibt es keine Standardlösungen. Die Auswahl der jeweiligen Maßnahme wird maßgeblich bestimmt durch die Sedimentbilanz (Menge, Richtung, Korngrößen), durch örtliche Besonderheiten, durch Kombination mit Mehrfachnutzungen, durch den Füllungszustand des Restsees und schließlich und letztlich durch das Preis-Leistungs-Verhältnis.

Eine Sedimentberechnung, oder besser noch eine Sedimentbilanz, sollte deshalb grundsätzlich als Entscheidungsgrundlage, zumindest aber als Projektsicherung zu jeder größeren Baumaßnahme gehören, die in das Ufergeschehen eingreift. Die Anwendung dieser Methodik soll aus Platzgründen hier nur an zwei realen Beispielen demonstriert werden.

## Auslaufbucht Cospuden

Ausgangspunkt für Sedimentuntersuchungen von Bergbaunachfolgebächen der Lausitz und Mitteldeutschlands war die Versandung der Auslaufbucht Cospuden (s. Abb. 2).

Der Cospudener See ist ein neues Naherholungsgebiet der Stadt Leipzig. Er liegt im südlichen Randgebiet der Stadtgrenze von Leipzig, hat eine Länge von ca. 4 km, eine Breite von ca. 2 km und Wassertiefen bis

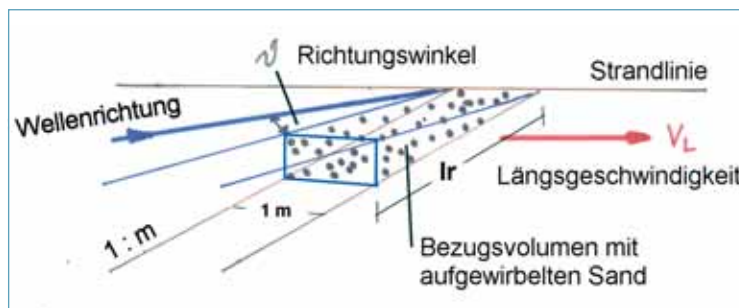


Abb. 1: Prinzipische Skizze zum Ansatz des Uferlängstransports

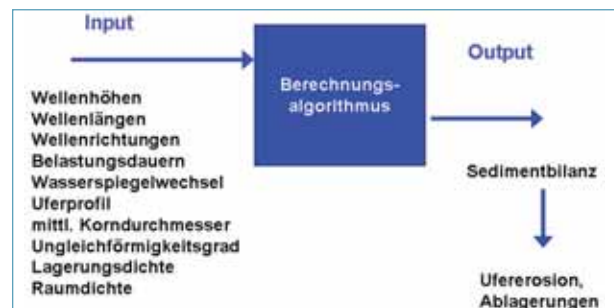


Abb. 2: Berechnungsalgorithmus zur Sedimentbilanz



Abb. 3: Auslaufbucht Cospuden ohne wesentliche Versandung, Blickrichtung Süd



Abb. 4: Auslaufbucht Cospuden ohne wesentliche Versandung, Blickrichtung Nord



Abb. 5: Ausgeprägte Hakenbildung am Ostufer der Auslaufbucht



Abb. 6: Einschnürung des Einlaufquerschnittes der Auslaufbucht Cospuden durch Versandung



Abb. 7: Einschnürung des Abflussquerschnittes der Auslaufbucht Cospuden in Höhe der Fußgängerbrücke



Abb. 8: Anlandung von Sedimentmaterial im Luv der Buhne am Westufer der Auslaufbucht Cospuden

54 m. Mit einer Wasserfläche von 4,3 km<sup>2</sup>, einem Volumen von 109 Mio. m<sup>3</sup> und einem Umfang von 10,4 km besitzt der Cospudener See den längsten Sandstrand Sachsens.

Am Nordufer dieses Bergbaufolgesees war zur Anbindung an die Vorflut und zur Ableitung des vom See erwirtschafteten Überschusswassers eine Auslaufbucht hergestellt worden. Als im August 2000 die Flutung abgeschlossen und der Endwasserstand erreicht wurde, war die gesamte Auslaufbucht für einen Durchfluss von 30 m<sup>3</sup>/min funktionsbereit und hatte keine erkennbaren Versandungen (s. Abbn. 3 und 4).

Bereits aber ein Jahr später, im November 2001, war das Gerinne durch massiven Materialeintrag fast völlig blockiert und funktionsunfähig (s. Abbn. 5, 6 und 7). Deutlich zu erkennen ist auf Abb. 5 die ausgeprägte östliche Strandhakenbildung.

Abb. 6 zeigt, dass nur noch eine schmale flache Mulde im Einlaufbereich verblieben ist. Wie Abb. 7 dokumentiert, ist auch in der Region der Fußgängerbrücke eine massive Verengung mit sehr feinkörnigem Material eingetreten.

Um die Funktionsfähigkeit wieder herzustellen, wurden die eingetragenen Sande ausgebagert. Diese Maßnahme hatte jedoch nur kurzzeitig Erfolg. Bereits im Oktober 2002 war ein erneutes Ausbaggern notwendig. Vor der Badesaison 2003 war die Auslaufbucht wiederum so erheblich versandet, dass erneut gebaggert werden musste. Deshalb ist im Mai 2003 die Bucht nochmals geräumt worden. Gleichzeitig wurde an der Westseite der Bucht als Schüttung aus Wasserbausteinen eine ca. 15 m bis 20 m lange Buhne errichtet und die Böschungen auf der Ostseite der Bucht mit Wasserbausteinbelag gesichert.

2004 konnte festgestellt werden, dass westlich der Buhne Anlandungen zu verzeichnen waren (Abb. 8), dass der Sandeintrag im vorderen Bereich reduziert wurde, dass aber im Bereich der Fußgängerbrücke beträchtliche Einschnürungen auftraten und dass zusätzlich erhebliche Materialablagerungen unmittelbar nördlich der Brücke zustande kamen.

Um einen dauerhafteren Erfolg zu gewährleisten, wurde Fluß- und Seebau Consult Potsdam von der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) beauftragt, die physikalischen Ursachen für die feststellbaren Sedimenteinträge zu klären und abgeleitet daraus Vorschläge für Maßnahmen zur Gewährleistung von langfristig ausreichenden Abflussquerschnitten bei gleichzeitiger Stabilisierung gleichbleibender Strandbreiten im westlich und östlich angrenzenden Bereich zu erarbeiten.

Als Grundlage zur Entscheidungsfindung wurde eine Sedimentberechnung vorgenommen. Sie ergab (s. Abb. 9), dass in einem mittleren meteorologischen Jahr aus West 307 m<sup>3</sup>/a und aus Ost



Abb. 9: Ergebnisdarstellung der Sedimentberechnung

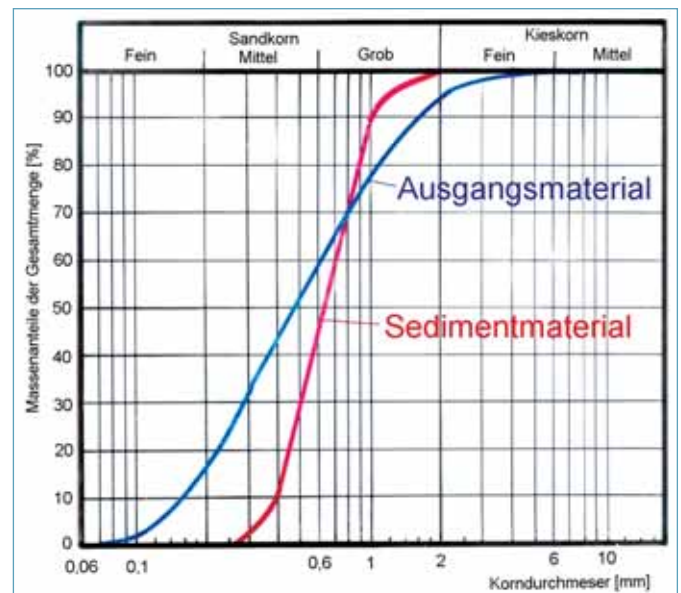


Abb. 10: Kornverteilungslinien von Ausgangs- und Sedimentmaterial

147 m<sup>3</sup>/a Sandmaterial eingetrieben werden. Außerdem werden ca. 50 m<sup>3</sup>/a Feinmaterial in die Auslaufbucht eingeschwemmt.

Weiterhin war feststellbar, dass mehr als 80 % des Sedimenttransportes bei Wellen mit Windgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s (über Land) von statten ging. Über 95 % des Transportes wurden von Wellen mit Windgeschwindigkeiten bis zu 15 m/s induziert.

Der überwiegende Transport des Feinmaterials ist allerdings an





Abb. 11: Auslaufbucht Cospuden, direkt nach Fertigstellung der Bauwerke



Abb. 12: Auslaufbucht Cospuden, Blick auf den Einlaufbereich ca. ein Jahr nach Fertigstellung



Abb. 13: Auslaufbucht Cospuden, Blick auf den Bereich der Fußgängerbrücke



Abb. 14.: Hakenbuhnen zur Stabilisierung des Badebereiches Nordstrand Cospuden

größere Wellen und höhere Windgeschwindigkeiten gebunden. Es vagabundiert dann bei Wellenbelastung mit allen auftretenden Strömungen (z. B. Driftströmungen) und kann sehr weit verfrachtet werden.

Abb. 10 zeigt die Kornverteilungslinien von Ausgangs- und einem Sedimentmaterial, das aus der Wasserlinie der Anlandungen westlich der Buhne entnommen wurde. Deutlich ist die Veränderung des Ausgangsmaterials erkennbar. Es fehlen im Sedimentmaterial der gesamte Feinkorn- sowie der Kiesanteil. Übereinstimmend mit der Sedimentberechnung folgt daraus, dass der Feinkornbereich (ca. 25 Gewichtsprozente) als Scheinsuspension mit jeder auftretenden Strömung transportiert und zum Teil im Bereich der Fußgängerbrücke abgelagert wurde. Die Kiesfraktionen des Ausgangsmaterials sind in Bereichen unterhalb des Wasserspiegels abgesetzt worden.

Der Sanierungsvorschlag für die Gestaltung der Auslaufbucht Cospuden basiert auf der Arbeitsthese, dass die Einspülungen durch uferparallele Transporte durch ausreichend lange Grenzbuhnen nahezu verhindert und die ufernormalen Sedimenteintragen durch eine Kopfschwelle vermindert werden können. In direkter Bindung zum errechneten Masseneintrag wurde deshalb vorgeschlagen, die östliche Randbuhne auf ca. 50 m Länge auszubauen, eine westliche Randbuhne von ca. 60 m Länge zu errichten und den Einlauf zwischen ihnen mit einer Gabionensohlenschwelle von ca. 30 m zu verbinden. Damit wird ein mehrjähriger Erfolg in Bezug auf die Verhinderung der Versandung durch den Uferlängstransport in Aussicht gestellt. Ebenso war eine effektive Verminderung der eingetriebenen Feinsande zu erwarten. Eine weitere Verbesserung kann ggf. durch weitere Verlängerung der westlichen Begrenzungsbuhne erreicht werden.

Der westlich anschließende Badestrand war weiterhin mit drei, der östliche Strandbereich mit einer Hakenbuhne zu stabilisieren. Um auch Sandeinwehungen durch Wind weitgehend auszuschließen, wurde zusätzlich eine Heckenbepflanzung des Westbereiches der Auslaufbucht angeordnet.

Abb. 11 dokumentiert die Auslaufbucht unmittelbar nach Fertigstellung der Baumaßnahmen. Der Blick auf den Einlaufbereich (Abb. 12) sowie auf den Querschnitt der Fußgängerbrücke (Abb. 13) zeigt, dass ein Jahr nach Fertigstellung keine Versandungen im Innenbereich erkennbar sind. Das westlich der Auslaufbucht gelegenen Badeufer (Abb. 14) hat eine stabile Form angenommen.

#### Nordostböschung Seelhausener See

Der Seelhausener See ist ein Gewässer, das aus dem ehemaligen Braunkohlentagebau Rösa entstanden ist. Es gehört zum Seenverbund Goitsche und liegt knapp 10 km südöstlich von Bitterfeld. Die

Flutung begann im Juli 2000 mit Muldewasser. Der See hat ein Volumen von 74 Mio. m<sup>3</sup>, eine Oberfläche von 6,22 km<sup>2</sup> und eine maximale Wassertiefe von 25 m.

Durch das Hochwasser im August 2002 kam es zu starken Erosionen im nördlichen Teil der Nordostböschung, wo durch Abspülungen ein ausgeprägtes Buchtenufer mit Rückverlagerungen der Böschungskante um ca. 150 m gebildet wurde (s. Abb. 15).

Nach erfolgter Sanierung (Böschungsabgleich auf Neigungen von 1:12 bis 1:15) trat trotzdem starker Uferrückgang auf. Die dabei auftretenden Kliffe mit über 2 m Höhe (s. Abb. 16 und Abb. 17) wurden in Bezug auf den Badebetrieb als akute Gefahr für die öffentliche Sicherheit angesehen. Sie sollen auf Anordnung der Bergbaubehörde vermieden werden. Maximal wird zukünftig eine Kliffhöhe von bis zu 0,50 m toleriert.

Fluss- und Seebau Consult Potsdam wurde deshalb wiederum von der LMBV beauftragt, ein Lösungskonzept zu erarbeiten, das Kliffhöhen über 0,50 m ausschließt, das die touristische Nutzung weitgehend begünstigt, das umweltverträglich ist und das schließlich mit relativ geringen Investitionen realisierbar erscheint. Als Grundlage zur Bearbeitung wurde mit erheblichem Aufwand eine Sedimentbilanz für das gesamte Nordostufer erstellt.

Die Ergebnisse sind aus Abb. 18 ablesbar. Auf der Abszisse ist die Kilometrierung entlang des ausgeglichenen Ufers von West nach Ost aufgetragen. Auf der Ordinate wurde die Veränderung des Ufervolumens pro Breitenmeter pro Jahr dargestellt. Positive Werte stehen dabei für Abbruch und negative für Anlandungen.

Die gestrichelte Linie kennzeichnet dabei zunächst den Ausgangszustand mit voll ausgebildeten Buchten, die nach dem Hochwasser entstanden waren. Demgegenüber stellt die ausgezogene Linie die Situation dar, die vorhanden ist, wenn die Buchten verfüllt und eine ausgeglichene Uferlinie vorhanden wäre.

Es ist feststellbar, dass zunächst im Buchtenbereich dieser Uferlinie lebhaftere Sedimentbewegungen mit Veränderungen des Ufervolumens bis 10 m<sup>3</sup>/a m zu erwarten waren. Sie beinhalten einen Strandrückgang von bis zu ca. 9 m/a und Kliffbildungen von 0,8 m/a. Diese Vorgänge laufen mit der Tendenz, die Buchten zu verfüllen und die Strandlinie auszugleichen.

Überlagert wird dieses Geschehen von dem langfristigen Trend, bei dem vom km 1 bis km 2,3 beachtliche Abrasionen (bis zu 3,7 m<sup>3</sup>/a m) und vom km 2,3 bis km 3,5 erhebliche Anlandungen zu verzeichnen sind.

Aus der Abhängigkeit zwischen Ufervolumenveränderung und Kliffhöhe kann nun geschlussfolgert werden, dass bei einem vorgegebenen Prognosezeitraum von zehn Jahren und dem kritischen Wert der Kliffhöhe von 0,5 m die Volumenveränderung von 0,5 m<sup>3</sup>/a m nicht überschritten werden darf. Damit benötigt die gesamte Uferstrecke von km 0,8 bis km 2,3 zweckmäßige Sanierungsmaßnahmen.

Der Grundgedanke für das Sanierungskonzept besteht in dem Ansatz, dass dann ein Seeufer keine Kliffhöhen größer als 0,50 m ausbilden kann, wenn das Höhenniveau dieses Bereiches nicht mehr als 0,50 m über der Endhöhe des Gleichgewichtsprofils liegt. Da unter den vorliegenden Belastungsbedingungen die Endhöhe des Gleichgewichtsprofils mit 0,25 m über Wsp. angegeben werden kann, muss die



Abb. 15: Luftbildaufnahme Seelhauser See mit durch Hochwasserüberlauf erodierten Nordufer (Buchtenbereich)



Abb. 16 und 17: Kliffbildung am Nordostufer des Seelhauser Sees

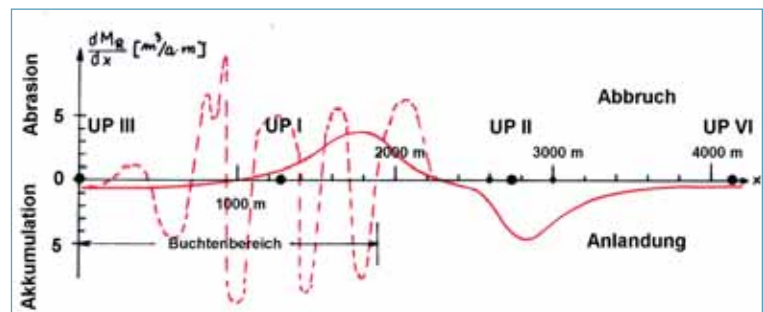


Abb. 18: Darstellung der Ergebnisse der Sedimentbilanz

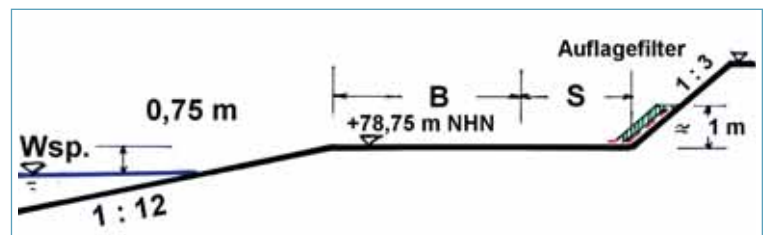


Abb. 19: Sanierungsprofil

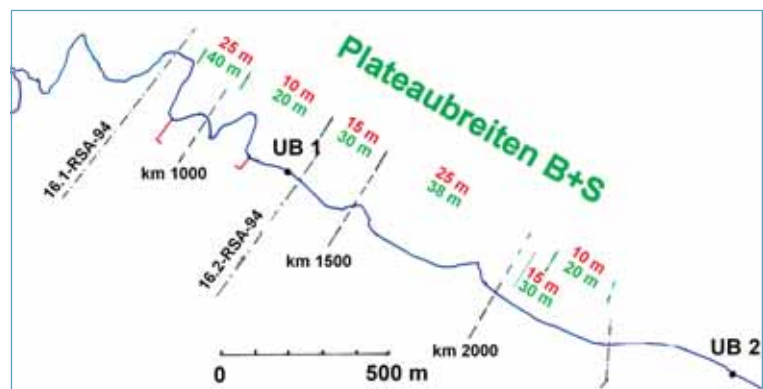


Abb. 20: Ergebnisdarstellung Plateaubreiten

Höhenkote des zu schaffenden Uferbereiches  $0,25\text{ m} + 0,50\text{ m} = 0,75\text{ m}$  über dem Wasserspiegel, also auf  $78,75\text{ m}$  NHN liegen.

Die notwendigen Breiten  $B$  dieses Plateaus werden dann durch die Geometrie des Gleichgewichtsprofils und durch die Erosionsvolumen bestimmt.

Es wird weiterhin dazu angenommen, dass die Abbruchprozesse nach ca. zehn Jahren weitgehend abgeklungen sind. Als zusätzliche Sicherheit und als Reserve für eine extensive touristische Nutzung des gesamten Nordostufers wird eine zusätzliche Sicherheitsbreite  $S$  der Bemessung der Plateaubreite hinzugefügt. Damit entsteht ein Uferprofil, das in Abb. 19 schematisch dargestellt ist.

Wasserseitig beginnt es mit einer für die vorliegende Belastung und das anstehende Ufermaterial ausgewiesenen Gleichgewichtsneigung von  $1:m_A = 1:12$ , die bis zu einer Höhe von  $0,75\text{ m}$  über den Wasser-

spiegel gezogen wird. Mit diesem Höhenniveau schließt sich der Plateaubereich, bestehend aus Verlust- ( $B$ ) und Sicherheitsbreite ( $S$ ) an.

Der Übergang an das anstehende Gelände wird mit einer Böschungsneigung von  $1:3$  hergestellt. Zum Erosionsschutz kann ggf. der Böschungsfuß mit einem Auflagerfilter gesichert werden.

Die notwendigen Plateaubreiten, die sich durch Abgrabung und Aufschüttung ergeben, sind in Abb. 20 detailliert dargestellt. Die grünen Ziffern kennzeichnen die empfohlenen, die roten die Minimalbreiten.

Zum besonderen Schutz und zur zweckmäßigen Gestaltung des Hauptbadebereichs wird dieses Gebiet durch zwei nach innen kehrende Hakenbuhnen geschützt (s. Abb. 20).

Auf der Basis der detaillierten Kennzeichnung der Sedimentbewegungen konnte im vorliegenden Fall eine naturverträgliche,

sich den Belastungsbedingungen anpassende Sanierung entwickelt werden, die Dank des Gestaltungswillens der LMBV zukünftig eine gefahrlose Anpassung der Uferregionen an die aktuelle Belastung und gleichzeitig eine wesentlich verbesserte touristische Nutzung garantiert.

### Schrifttum

- [1] Wagner, H.: Zweckmäßige Profilierung unbefestigter Ufer. In Vorbereitung zur Veröffentlichung in dieser Zeitschrift.

### Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner,  
Fluß- und Seebau Consult Potsdam,  
Am Havelblick 5 a, 14473 Potsdam  
Dipl.-Ing. Almuth Götz,  
Dipl.-Ing. Tamara Starke,  
beide Lausitzer und Mitteldeutsche  
Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH,  
Walter Köhn Straße 2, 04356 Leipzig