



Der Systemansatz zur Beurteilung der Gefahr der Hydrodynamischen Bodendeformation

Sebastian Perzlmaier
Ronald Haselsteiner

Kurzzusammenfassung

Der folgende Beitrag gibt Einblick in aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der hydrodynamischen Bodendeformation. Basierend auf Anmerkungen zur hierzulande üblichen Nachweisführung wird mit dem Systemansatz, der das Versagen durch hydrodynamische Bodendeformation als Aneinanderreihung mehrerer Teilprozesse zu verstehen hilft, eine international anerkannte Herangehensweise vorgestellt. Gemeinsam mit der Beschreibung der Erosionsphasen wird ein Überblick über den internationalen Stand der Technik bezüglich der Entwurfsgrundsätze, der vorhandenen Nachweisverfahren sowie der Beurteilung bestehender Dämme gegeben. Eine darauf basierende exemplarisch ausgeführte Anwendung zur Beurteilung der Gefahr der hydrodynamischen Bodendeformation in Deichen findet sich in dem dazugehörigen separaten Beitrag von HASELSTEINER & PERZLMAIER (2006).

1 Einleitung

Initiiert durch jahrelange Tätigkeit auf dem Gebiet der verteilten faseroptischen Leckageortung konnten der Lehrstuhl und die Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TUM in den vergangenen Jahren an der Arbeit der im European Club of ICOLD organisierten Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams teilhaben, dessen jährliches Treffen im Juni 2005 im Rahmen eines mehrtägigen Workshops an der Versuchsanstalt in Oberrach statt fand. Im Zuge dieser Veranstaltung ist deutlich geworden, dass sich die Herangehensweise an das Thema in den letzten Jahren vorwiegend im angelsächsischen, westeuropäischen und skandinavischen Raum in Forschung und Praxis grundlegend gewandelt hat und mitunter von der bei uns vorherrschende Sichtweise abweicht.

Die Innere Erosion, oder genauer die hydrodynamische Bodendeformation, ist weltweit nach Überströmen die häufigste Ursache für das Versagen von Dämmen. Von hydrodynamischer Bodendeformation spricht man, wenn Bodenpartikel im Damm oder dessen Untergrund bei Durchsickerung in Bewegung geraten. Es gibt mehrere Prozesse, die in diesem Sinne der Umlagerung von Bodenpartikeln zuzuordnen sind.

Das Klassifizierungsschema zur Einteilung der Erscheinungsformen der hydrodynamischen Bodendeformation, auf das in Deutschland sowohl in wissenschaftlichen Arbeiten als auch in Regelwerken meist zurückgegriffen wird, geht zurück auf ZIEMS (1969). Es hat unter anderem Eingang in die ostdeutsche Talsperren TGL (ehem. DDR Standard entspr. DIN), in das Merkblatt ATV-DVWK-M 502 (2002) „Berech-

nungsverfahren für Staudämme – Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund“, in das derzeit in Überarbeitung befindliche DVWK-Merkblatt 210 (1986) „Flussdeiche“ (zukünftig DWA-M „Deiche an Fließgewässern“, Gelbdruck, 2006), in das Merkblatt „Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen“ (BAW MAK 1989) sowie in das Standardwerk zur Geohydraulik von BUSCH et al. (1993) gefunden. Die hydrodynamische Bodendeformation in körnigen Erdstoffen unterteilt sich laut Klassifizierungsschema in Erosion, Suffosion und Kolmation. Die Erosion kann als äußere Erosion¹, als Innere Erosion, als Kontakterosion² und als Fugenerosion³ auftreten. Die Suffosion wird in innere, äußere und Kontaktsuffosion unterteilt. (vgl. Abb. 1)

HYDRODYNAMISCHE BODENDEFORMATION

Erosion:	Suffosion:	Kolmation
äußere Erosion	innere Suffosion	
innere Erosion	äußere Suffosion	
Kontakterosion	Kontaktsuffosion	
Fugenerosion		

Abb. 1: Klassifizierungsschema nach ZIEMS (1969)

Beim Nachweis der Sicherheit gegen hydrodynamische Bodendeformation kommen i. d. R. entweder geometrische, mitunter auch hydraulische Kriterien zur Anwendung. Mit geometrischen Kriterien für Kontakterosion (Filterkriterien) kann im Rahmen ihrer Anwendungsgrenzen ein Eindringen des Basiserdstoffes⁴ in den Filtererdstoff ausgeschlossen werden. Wenn Partikeltransport geometrisch möglich ist, findet dieser nur statt, wenn die Kraffteinwirkung der Durchströmung auf die Bodenkörner⁵ deren Widerstandskraft überschreitet, was Grundlage der hydraulischen Kriterien ist.

2 Anmerkungen zur Nachweisführung

Das beschriebene Klassifizierungsschema von ZIEMS (1969) hat immer wieder zu der fälschlichen Annahme geführt, dass innere Erosion im Inneren eines Erdstoffes zur spontanen Entstehung von Erosionsröhren führen kann. ZIEMS (1969) weist jedoch selbst darauf hin, dass der inneren Erosion eine den Erosionsprozess auslösende Initiierung vorausgehen muss, wie durch kleine Hohlräume pflanzlichen oder tierischen Ursprungs oder durch rückschreitende Erosion von einem ungefilterten Sickerwasseraustritt bzw. an einem zu groben Filter.

Bei Deichen lassen sich die in Abb. 1 dargestellten Phänome nach SAUCKE (2006) auf Kontakterosion senkrecht oder parallel zur Schichtgrenze, auf Suffosion und auf

¹ z. B. Sedimenttransport in Fließgewässern

² an Schichtgrenzen zweier Erdstoffe

³ unter Massivbauwerken

⁴ feinkörnigerer, zu filternder Erdstoff

⁵ I. d. R. verwendet man den hydraulische Gradienten, mitunter wäre die Poren- oder Filtergeschwindigkeit der aussagekräftigere Parameter, der jedoch nur schwer zu bestimmen ist.

Erosionsgrundbruch¹ reduzieren, wie es auch im Entwurf für das DWA Merkblatt „Deiche an Fließgewässern“ enthalten ist. Die Fugenerosion entlang von Massivbauwerken wird gesondert betrachtet, auch wenn es an verlässlichen Kriterien zu deren Beurteilung zu mangeln scheint.

Für die Bewertung von Filtern für bindige Erdstoffe wird in BAW MAK (1989) ein Kriterium angeführt, dass sich auch in anderen Merkblättern wiederfindet. Die vorgeschlagenen Filter für bindige Erdstoffe² entsprechen vermutlich nicht uneingeschränkt der anerkannten Forderung nach kohäsionslosen Filtern (vgl. KUTZNER 1996, SCHULER 1997). Auch scheint der vorgeschlagene Bodenaustausch für Böden mit $0 \leq c_u \leq 10 \text{ kN/m}^2$ nicht zwingend erforderlich, da auch für solche Böden bewährte Filterkriterien existieren (SHERARD & DUNNIGAN 1989).

Bezüglich des oft zitierten Kriteriums für Kontakterosion nach CISTIN & ZIEMS (vgl. BUSCH et al. 1993) bleibt zu erwähnen, dass vielerorts von der Anwendung von Filterkriterien, die auf dem Abstandsverhältnis $A = D_{50} / d_{50}$ ³ basieren, abgeraten wird (u. a. BRAUNS & SCHULER 1993). Auch wenn das Kriterium durch Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit einen scheinbaren Vorteil gegenüber klassischen Filterkriterien auf der Basis D_{15} / d_{85} (z. B. TERZAGHI & PECK 1948, SHERARD & DUNNIGAN 1984a) zu haben scheint, so haben sich letztere für körnige Erdstoffe doch in unzähligen Fällen bewährt, so dass das Kriterium nach CISTIN & ZIEMS mit zunehmender Ungleichförmigkeit des Filters konservativer zu werden scheint (WITTMANN 1980), was mit einer Reduktion des Schluckvermögens einhergeht (KUTZNER 1996). Ohnehin unterliegt der Einbau sehr ungleichförmiger Filter immer der Gefahr der Entmischung.

Bezüglich der hydraulischen Kriterien sollte erwähnt werden, dass sie von einer intakten Bodenmatrix ausgehen, was in der Praxis schwer einzuhalten sein dürfte. So setzt z. B. ZIEMS (1969) für die Gültigkeit seines Kriteriums für $i_{\text{krit,B}}$ im Basismaterial bei aufwärts gerichteter Strömung und aufliegendem Filter die gleichmäßige Durchströmung⁴ voraus. Welchen Einfluss eine lokale Variabilität der Durchlässigkeit hat, lässt sich gut aus den Diagrammen von MUCKENTHALER (1989) ablesen. Schließlich resultiert dessen Ansatz auf dem Zusammenhang zwischen erodiertem Partikeldurchmesser und Strömungsgeschwindigkeit, die um mehrere Zehnerpotenzen von der mittleren Geschwindigkeit abweichen kann. Ob die in BAW MSD (2005) aufgeführten Sicherheitsbeiwerte für hydraulische Kriterien dieser Tatsache ausreichend Rechnung tragen, bleibt zu hinterfragen. SCHULER (1997) erwähnt, dass hydraulische Kriterien bei nicht vorhandener geometrischer Filterstabilität nur bei bindiger Basis oder kurzzeitig bzw. untergeordnet wirkenden Filtersystemen zulässig sind.

¹ Aufbrechen der bindigen Deckschicht am luftseitigen Böschungsfuß mit anschließender rückschreitender Erosion und gegebenenfalls Röhrenbildung bis ins Oberwasser

² für Basiserdstoffe mit Plastizitätsindex $I_p \geq 0,15$ und undrainierter Kohäsion $c_u \geq 10 \text{ kN/m}^2$ werden Filter mit $D_{10} \leq 0,016 \text{ mm}$ und $D_{60} \leq 2 \text{ mm}$ vorgeschlagen

³ hier und im Folgenden bezieht sich D auf den Filter- und d auf den Basiserdstoff

⁴ „keine bevorzugten Strömungswege“

Der Nachweis der Filterwirksamkeit einer Filter-/ Basiskombination erfordert, abgesehen von der Wahl eines geeigneten Filterkriteriums, kein vertieftes Prozessverständnis. Hingegen muss z. B. der so genannte Erosionsgrundbruch als systematische Abfolge mehrerer Teilprozesse vom Entstehen einer Fehlstelle in der bindigen Deckschicht über einsetzende rückschreitende Erosion im darunter liegenden Erdstoff bis zur Fortpflanzung einer Erosionsröhre ins Oberwasser verstanden werden, für deren Beurteilung grundlegendes Prozessverständnis unentbehrlich ist.

Im Folgenden soll dargestellt werden, wie unter Verwendung des Systemansatzes nach FELL et al. (2005)¹ die Prozesse der hydrodynamischen Bodendeformation besser verstanden und eingeordnet werden können. Er wurde entwickelt, um die Versagenswahrscheinlichkeit bestehender Dämmen durch hydrodynamische Bodendeformation unter Verwendung prozessbasierter Ereignisbäume verglichen zu können. Der Systemansatz wird den systemimmanenten Unsicherheiten² bei der Bewertung der hydrodynamischen Bodendeformation besser gerecht als die isolierte Beurteilung einzelner Erosionsphänomene.

FRAGEN	PHASEN	KRITERIEN
<i>Können Bodenpartikel in Bewegung geraten?</i>	Erosionsbeginn durch: •rückschreitende Erosion (Oberfläche / Schichtgrenze) •lokale Leckage (im Dichtungselement / an Bauwerken) •Suffosion (Eigenstabilität der Böden)	Überwachung Suffosionskriterien
<i>Kommt der Transport von Bodenpartikeln zum Erliegen oder schreitet er fort?</i>	Erosionsentwicklung: •keine Erosions •etwas Erosion •ausgeprägte Erosion •fortschreitene Erosion •keine Filter	Filterwirksamkeit: geometrische Kriterien hydraulische Kriterien
<i>Welche Folgen hat ein progressiver Austrag von Bodenpartikeln?</i>	Erosionsfortschritt: •Erosionsröhrenstabilität •Erosionsröhrenvergrößerung •Setzungen / Setzungstrichter •Durchströmungsbehinderung (Stützkörper)	Standfestigkeit (Feinteilanteil / Bauwerke) Erodierbarkeit / Erosionsrate Gegenmaßnahmen Überwachung
<i>Welche Mechanismen führen wie schnell zum Versagen?</i>	Versagen: •Vergrößerung der Erosionsröhre •Kronensetzung mit Überströmung •Böschungsbruch mit Überströmung	Dauer Abflussdrosselung Notmaßnahmen

Abb. 2: Fragen, Phasen und Kriterien im Systemansatz

¹ Prof. Fell und Mitarbeiter arbeiten seit Ende der 90er Jahre verstärkt an einem „Framework for assessing the likelihood of internal erosion and piping of embankment dams and their foundations“. Vergleiche hierzu die zitierten Literaturstellen von FELL, FOSTER und WAN. Die aktuellste Übersicht dieser Arbeiten ist in FELL et al. (2005, noch unveröffentlichter Beitrag zu einem Workshop in Aoussoise, Frankreich, April 2005) enthalten, auf den hier exemplarisch verwiesen wurde. Eine ähnliche Herangehensweise wurde unter anderem beim USBR erarbeitet und umgesetzt (vgl. URS 2000). In England verfolgt man vergleichbare Ansätze (vgl. KBR 2003).

² z. B. Inhomogenität der Erdstoffe, Variabilität der hydr. Belastung, Zuverlässigkeit der Nachweise

3 Der Systemansatz für Hydrodynamische Bodendeformation

3.1 Phasen der hydrodynamischen Bodendeformation

Das Versagen durchströmter Dämme durch hydrodynamische Bodendeformation lässt sich in vier aufeinander folgenden Phasen unterteilen (Abb. 2). Der Erosionsbeginn fasst die Prozesse zusammen, durch die Bodenpartikel in Bewegung geraten können. Die Erosionsentwicklung bewertet, ob der Erosionsprozess z. B. durch Filterwirkung stoppt oder fortschreitet. Die Folgen eines kontinuierlichen Materialausstrages werden im Erosionsfortschritt, Bruch- und Versagensmechanismen in der Versagensphase zusammengefasst.

3.2 Erosionsbeginn

Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion

Die rückschreitende Erosion fasst die Fälle des Erosionsbeginns zusammen, bei denen der Partikeltransport beim Austritt der Durchsickerung an einer freien Oberfläche startet. Sie tritt entweder im Bereich hinter dem luftseitigen Böschungsfuß oder an der luftseitigen Böschung auf, aber auch an Schichtgrenzen von Erdstoffen, wenn keine ausreichende Filterwirkung besteht. Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion an einer Schichtgrenze (Kontakterosion) kann unter Zuhilfenahme entsprechender Filterkriterien ausgeschlossen werden (vgl. Erosionsentwicklung).

Die Durchsickerung kann bei homogenen Dämmen oder bei Versagen von Dichtungs- und Drainageelementen hinter dem Böschungsfußpunkt (Qualmwasser) oder auf der Böschung (Hangquelle) austreten. Es sind kritische hydraulische Gradienten die zu erdstatischem Versagen (abtreibende Strömungskräfte) führen und solche, die rückschreitende Erosion durch Partikeltransport beginnen, zu unterscheiden. Die hydraulische Belastung kann entweder durch mittlere Gradienten entlang des gesamten Sickerweges oder genauer durch lokale Gradienten am Punkt des Sickerwasser-austrittes beschrieben werden.

Aus erdstatischer Sicht ist hinter dem luftseitigen Böschungsfußpunkt hydraulischer Grundbruch in körnigen Erdstoffen bei $i \geq i_{\text{krit}} = (G_s - 1) \cdot (1 - \varepsilon) \approx 1$ bis $1,4$ ¹ zu erwarten. Rückschreitende Erosion kann schon bei deutlich kleineren Gradienten einsetzen. Der kritische hydraulische Gradient für den Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion in körnigen Erdstoffen wird maßgeblich von der Ungleichförmigkeit und dem Korndurchmesser beeinflusst (SCHMERTMANN 2000). Besonders kritisch sind demzufolge gleichförmige körnige Erdstoffe geringen Korndurchmessers, wie Fein- und Mittelsande. SCHMERTMANN (2000) kommt durch Versuche zu kritischen lokalen Gradienten i_{PMT} , die für Ausbildung einer Erosionsröhre bis ins Oberwasser überschritten werden müssen (Abb. 3), und definiert Faktoren, die deren Übertragbarkeit auf praktische Fälle erlauben². WEIJERS & SELLMAIJER (1993) haben in ihren Ver-

¹ Nullspannungsbedingung mit G_s : spezifisches Gewicht der Körner, ε : Porosität

² u. A. Faktoren für: Länge des Sickerweges L , Dicke des Aquifers D , Korngröße d_{10} , Anisotropie k_H/k_V

suchen festgestellt, dass rückschreitende Erosion bereits bei 40 % der Gradienten beginnen kann, die eine Ausbildung der Erosionsröhre bis ins Oberwasser bedingen. Aus der Zusammenschau der beiden Erkenntnisse lassen sich die in Abb. 3 dargestellten kritischen hydraulischen Gradienten für Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion abschätzen. Ein Vergleich mit Versuchen von WAN & FELL (2004, aufwärts gerichtete Durchströmung, ungefilterter Sickerwasseraustritt) zeigt, dass die kritischen lokalen Gradienten für Erosionsbeginn aus Abb. 3 für $U = 6$ auch bei weitgestuften, suffosionssicheren Schluff-Sand-Kies-Gemischen auf der sicheren Seite liegen. Die Versuche weisen darüber hinaus auf eine Anwendbarkeit der kritischen lokalen Gradienten, die MUCKENTHALER (1989) aus der Widerstandskraft ruhender Partikel ursprünglich für horizontale Strömungen abgeleitet hat, zur Abschätzung des Erosionsbeginns durch rückschreitende Erosion bei aufwärts gerichteter Strömung an horizontalen Oberflächen hin¹. Außerdem sind in Abb. 3 unter Berücksichtigung der Faktoren für unterschiedliche Sickerwegslängen und Anisotropien errechnete kritische lokale Gradienten i_{PMT} für Ausbildung einer Erosionsröhre bis ins Oberwasser nach SCHMERTMANN (2000) dargestellt.

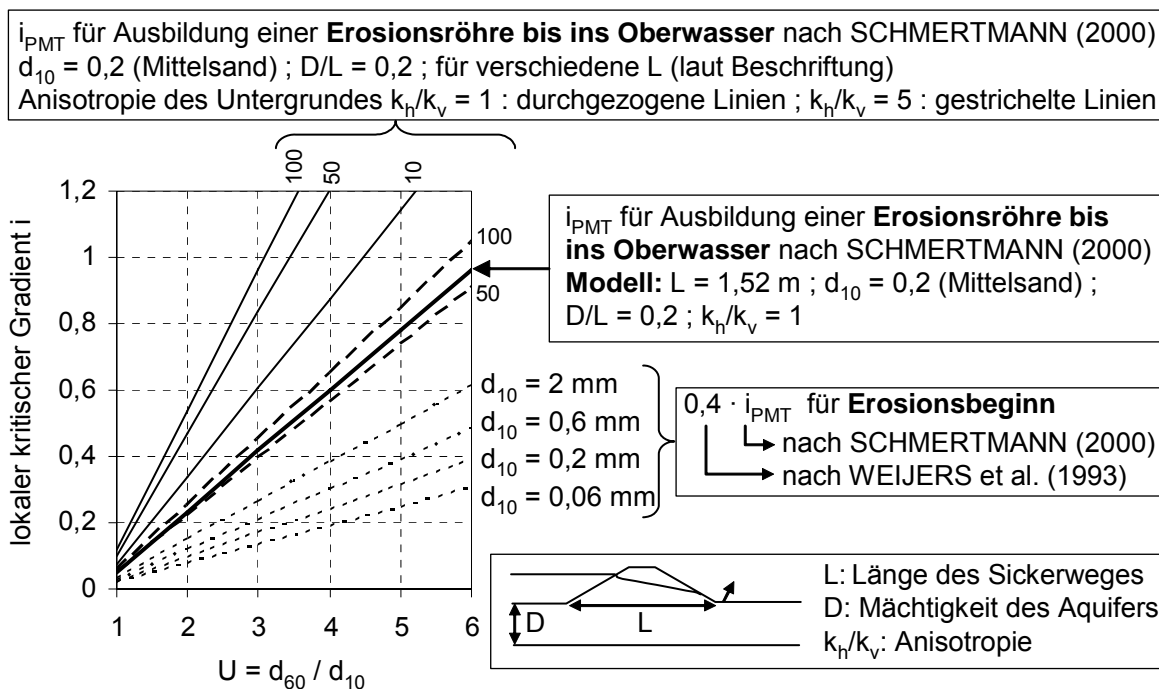


Abb. 3: Kritische lokale hydraulische Gradienten für rückschreitende Erosion

Die Auftriebssicherheit von bindigen Deckschichten, unter denen sich die Wasserdreue aus dem Oberwasser fortpflanzen können, ist häufig nicht nachweisbar. Ein möglicherweise resultierendes Aufbrechen der Deckschicht kann zu hydraulischem Grundbruch oder zumindest zu Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion im darunter liegenden körnigen Erdstoff führen (FELL et al. 2005). Obwohl ein Aufbrechen der Deckschicht bei Überschreiten der Nullspannungsbedingung, bedingt durch deren Kohäsion selten zu beobachten ist, sollten zur Beurteilung eines möglichen

¹ bei Verwendung des Partikeldurchmessers d_{10} und der tatsächlichen Durchlässigkeit des Bodens

Erosionsbeginns durch rückschreitende Erosion Fehlstellen angenommen werden, die z. B. pflanzlichen oder tierischen Ursprungs sein können. Die lokalen hydraulischen Gradienten nehmen ab, sobald Fehlstellen in der bindigen Deckschicht vorhanden sind. Der wesentliche Unterschied im Vergleich zu Fällen ohne bindige Deckschicht besteht in den anfänglich höheren lokalen hydraulischen Gradienten im Bereich der Fehlstelle. Außerdem sind Erosionsröhren, die sich unter dem Schutz der Deckschicht ausbilden, mit großer Wahrscheinlichkeit standfest.

Die wegen der Ähnlichkeit des Falles gerne herangezogenen Kriterien von BLIGH (1912), LANE (1935) und CHUGAEV (1962) (vgl. SAUKE 2004) basieren auf statistischen Auswertungen vieler unterströmter Wehr- und Dammbauwerke ohne Felsgründung. Sie alle berücksichtigen nicht die Kornverteilung und fallen daher für ungleichförmigere in sich stabile Böden vermutlich konservativer aus. Die mittleren hydraulischen Gradienten nach BLIGH (1912) scheinen für die hier untersuchten Fälle mit vorwiegend horizontaler Strömung andere Sicherheiten zu enthalten als die von LANE (1935) (vgl. Tabelle 1), der horizontale Anteile des Sickerweges nur zu einem Drittel ansetzt ($L = L_{\text{vert}} + L_{\text{horiz}} / 3$). Zu den kritischen mittleren Gradienten nach CHUGAEV ist zu sagen, dass die angegebenen Spannen auf einem Fortschrittskoeffizienten (1,0 bis 1,3) basieren, der aus damaliger Sicht (1962) zukünftigen Wissensgewinn berücksichtigen sollte und deshalb nur die untere Grenze ein fachlich fundiertes Kriterium darstellt. Von den zugrunde liegenden 162 ausgewerteten Bauwerken haben acht versagt. Allerdings waren die kritischen mittleren Gradienten bei fünf davon kleiner als die Untergrenze des Kriteriums (vgl. DAVIDENKOFF 1970). Eine vertrauenswürdigeren Abschätzung, basierend auf dieser Erkenntnis, könnte mit abgeminderten Gradienten erfolgen (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich mittlerer kritischer hydraulischer Gradienten

Bodenart	i_{krit} CHUGAEV ¹	abgemindert i_{krit} nach CHUGAEV ²	$H / L = i_{\text{krit}}$ nach BLIGH ³	$3 H / L = i_{\text{krit}}$ nach LANE ⁴	i_{krit} nach MÜLLER- KIRCHEN- BAUER ⁵	$i_{\text{krit, We}}$ nach WEIJERS & SELLMEIJER ⁶
Kies	0,25	0,25	(0,10)	0,095	-	(0,28 / 0,34)
Grobsand			0,083	0,067	0,12 – 0,17	(0,18 / 0,28)
Mittelsand	0,15	0,11	(0,062)	0,056	0,08 – 0,10	0,16 / 0,24
Feinsand	0,12	0,10	0,056	0,061	0,06 – 0,08	0,09 / 0,14

¹ CHUGAEV (1962) aus DAVIDENKOFF (1970) ohne „Fortschrittskoeffizienten 1,3“

² CHUGAEV (1962) aus DAVIDENKOFF (1970) mit Berücksichtigung der aufgeführten Versagensfälle

³ Mittelsand und Kies sinngemäß aus Tabellen nach BLIGH (1912) in MALLETT et al. (1951)

⁴ ohne vertikalen Sickerweg und L/3 für horizontalen Sickerwege nach LANE (1935) in MALLETT et al. (1951)

⁵ für geschichteten Aufbau nach SAUCKE (2006)

⁶ nach WEIJERS & SELLMEIJER (1993) mit: $U = 1,5$ (links) / 3 (rechts); D Mächtigkeit Aquifers 10 m, L Länge des Sickerweges, $D/L = 0,1$; $\varepsilon = 0,39$; Kies und Grobsand außerhalb des Gültigkeitsbereiches, d_{70} Kies: 4 mm; Grobsand: 1 mm; Mittelsand 0,6 mm; Feinsand: 0,1 mm

Mit dem Kriterium von WEIJERS & SELLMEIJER (1993) lässt sich ein boden- und geometrieabhängiger mittlerer kritischer Gradient $i_{krit,We}$ bestimmen, der zu rückschreitender Erosion und nachfolgender Ausbildung einer Erosionsröhre bis ins Oberwasser führt. Das Kriterium umfasst somit nicht nur den Erosionsbeginn, sondern auch den Erosionsfortschritt. Gleiches gilt für die bereits vorgestellten Kriterien, mit deren Ergebnissen die von WEIJERS & SELLMEIJER (1993) weitgehend übereinstimmen (Tabelle 1), auch wenn die Autoren die Gültigkeit auf Fein- und Mittelsande einschränken. MÜLLER-KIRCHENBAUER et al. (1993) und SCHMERTMANN (2000) weisen auf den negativen Einfluss deichlagernaher Schichtungen des Untergrundes hin, die zu kleineren mittleren kritischen Gradienten führen (Tabelle 1).

Bezüglich der rückschreitenden Erosion bei Austritt der Sickerlinie an der Böschung muss aus erdstatischer Sicht die lokale Standsicherheit erfüllt sein. Für kohäsionslose Erdstoffe ohne Vegetationsdecke und Drainagen lässt sich daraus eine maximale Böschungsneigung ableiten, die mit Reibungswinkeln zwischen 25° und 35° Werte zwischen 1:4,5 und 1:3 annimmt¹. Unter der Annahme, dass die Sickerlinie am höchsten Austrittspunkt böschungsparell und am Böschungsfußpunkt bei dichtem Untergrund horizontal austritt, lassen sich nach DAVIDENKOFF (1964) die lokalen hydraulischen Gradienten entsprechend Abb. 4 (links) berechnen. Der Anteil senkrecht zur Böschung $i_{b,senk}$, der einen Partikeltransport durch rückschreitende Erosion verursachen kann, nimmt für die oben beschriebenen Neigungen Werte zwischen 0,05 und 0,11 an. Hierbei handelt es sich um lokale Gradienten, die verglichen mit Abb. 3 und Tabelle 1 einen Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion für Fälle, in denen die lokale Standsicherheit der Böschung bei körnigen Erdstoffen auch ohne Berücksichtigung der Wurzelkohäsion gegeben ist, unwahrscheinlich machen.

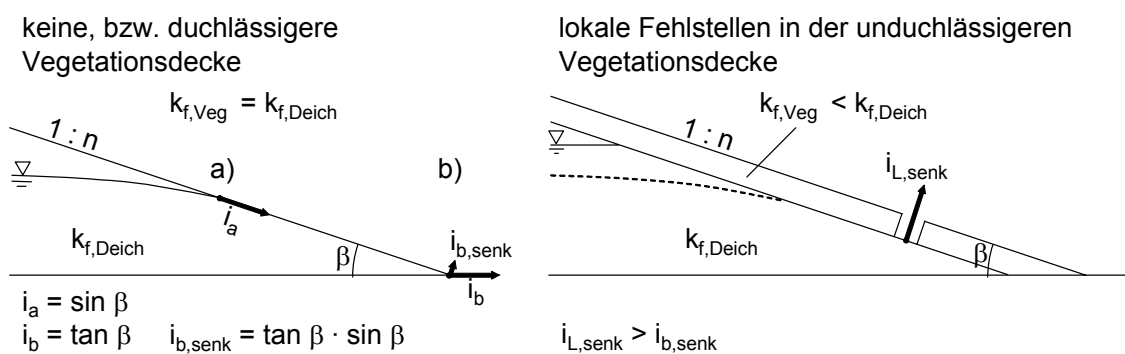


Abb. 4: Hydraulische Gradienten bei Austritt der Sickerlinie am Böschungsfuß

Anders stellt sich die Situation dar, wenn auf der luftseitigen Böschung eine Vegetationsschicht vorhanden ist, die undurchlässiger als das Dammmaterial ist (Abb. 4, rechts). Neben einem möglichen Aufstau der Sickerlinie kommt es an lokalen Fehlstellen in der Vegetationsdecke zu einem deutlichen Ansteigen der lokalen hydraulischen Gradienten, und Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion ist wahrscheinlicher. Vor diesem Hintergrund erweisen sich neuerdings häufig angewendete

¹ bei Entsprechung der Wichte des Bodens unter Auftrieb mit der Wichte des Wassers

Vegetationsdecken aus Magerrasen als günstig, da sie durchlässiger sind als die meisten Dammbaumaterialien (HASELSTEINER & STROBL 2004).

Erosionsbeginn in konzentrierten Leckagen

Konzentrierte Leckagen können durch Risse in bindigen Erdstoffen (z. B. Dichtungskern), durch Fehlstellen in Dichtungselementen oder durch andere Zonen erhöhter Durchlässigkeit entstehen. Risse in bindigen Erdstoffen können durch Setzungsunterschiede, Austrocknung, Frosteinwirkung oder Hydraulic Fracturing entstehen. Fehlstellen in Dichtungselementen können ausführungs- oder alterungsbedingt sein. Zonen erhöhter Durchlässigkeit entstehen durch einen übermäßigen Grobkornanteil (z. B. Entmischung beim Schütten), durch schlechte Verdichtung oder durch Wühltiere und/oder Bewuchs. Konzentrierte Leckagen können außerdem an Fugen zu Massivbauwerken auftreten¹, besonders wenn deren Oberflächen so steil geneigt sind, dass Setzungen und Verschiebungen des Erdkörpers zur Abnahme der Normalspannung in der Fuge führen.

Bindige Materialien werden landläufig als sicher gegen Erosion angesehen, wenn sie eine ausreichende Plastizität und Kohäsion aufweisen (vgl. MAK BAW 1989). Diese Annahme gilt allerdings nur ohne konzentrierte Leckagen, die z. B. durch Setzungsunterschiede, Austrocknung oder Frosteinwirkung entstehen können. So kann die Erosionssicherheit bindiger Erdstoffe letztendlich nur durch Filter sichergestellt werden, die in der Lage sind, möglichen Materialaustrag zu verhindern oder zu stoppen, was thematisch in die Phase der Erosionsentwicklung fällt. Hier ist lediglich darauf hinzuweisen, dass Erosion von Kernmaterial in lokalen Leckagen nur dann gestoppt werden kann, wenn sich Risse im Kern nicht in den Filter fortpflanzen. Daher rührt die Forderung nach kohäsionslosen Filtern für natürliche Dichtungen (vgl. Kapitel 2), die durch Limitierung der Feinteile im Filter ($D < 0,075$ mm) auf maximal 5 % erfüllt werden kann. PARK (2003) zeigt, dass dieses Kriterium auch für plastische Feinteile Gültigkeit besitzt und für nichtplastische Feinteile bis auf 15 % erweitert werden kann.

An der Kontaktfläche zu Massivbauwerken können konzentrierte Leckagen entstehen, in denen erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten und in der Folge Materialtransport stattfinden kann. Da für die Nachweisführung keine konkreten Verfahren vorliegen, sei für horizontale Fugen auf die Überlegungen zur rückschreitenden Erosion und die Entsprechung mit den in Tabelle 1 zusammengestellten Fällen hingewiesen. Für vertikale Fugen mit aufwärts gerichteter Strömung empfiehlt SAUCKE (2006) das Kriterium von WITTMANN (1980). Hier scheinen außerdem die auf Überlegungen zum Sedimenttransport basierenden Kriterien von MUCKENTHALER (1989) zuzutreffen, wobei die Durchlässigkeit als groß anzusetzen ist und MUCKENTHALER (1989) empfiehlt, auf eine Ausnutzung der Adhäsion zu verzichten. Der Fugenerosion kann wirkungsvoll mit baulichen Maßnahmen begegnet werden (Untergrundabdichtung, Verwendung plastischer Erdstoffe im Anschlussbereich).

¹ vgl. Fugenerosion nach ZIEMS 1969

Erosionsbeginn durch Suffosion

Von Suffosion spricht man, wenn aus einem Erdstoff durch Sickerwasser selektiv Feinteile erodiert werden, ohne die Matrix aus gröbereren Körnern zu zerstören, was mit einer Vergrößerung von Porenraum und Durchlässigkeit einhergeht. Die resultierenden veränderten hydraulischen Randbedingungen können neben erdstatischem Versagen einen Erosionsbeginn durch rückschreitende Erosion oder durch konzentrierte Leckagen begünstigen. Die Filterwirksamkeit von Filter-/ Basiskombinationen, wie sie mit Filterkriterien z. B. auf der Basis D_{15}/d_{85} nachgewiesen wird, ist jedoch nur gewährleistet, wenn sowohl Filter als auch Basis in sich stabil, also nicht suffosionsanfällig sind. Andernfalls können entweder selektiv ausgetragene Feinteile der Basis den dann zu groben Filter passieren, oder ein selektiver Austrag von Feinteilen aus dem Filter hinterlässt diesen zu grob, um die Basis zu filtern. Häufig wird als mögliche Folge von Suffosion eine verminderte Steifigkeit des Erdstoffes mit resultierenden Setzungen angeführt, was bestimmt vom Anteil der erodierten Fraktionen abhängt und nur schwer quantifiziert werden kann.

Suffosionsanfällige Böden sind i. d. R. stetig weitgestufte Böden mit aufwärts konkaver Kornverteilungslinie sowie intermittierend gestufte Böden, also Böden mit Ausfallkörnung. Dabei sind grobkörnige Böden mit einem begrenzten Anteil sehr feiner Körner sowie locker gelagerte Böden besonders anfällig. Für einen möglichen Erosionsbeginn durch Suffosion müssen folgende Kriterien erfüllt sein (WAN & FELL 2004):

- Die Körner der feinen Fraktionen müssen klein genug sein, um durch die Porenengstellen der gröbereren Kornmatrix zu passen (erstes geometrisches Kriterium). Andernfalls spricht man von selbstfilternden Böden.
- Der Anteil der feinen Fraktionen muss gering genug sein (< 30 bis 40 %), um die Zwischenräume der gröbereren Kornmatrix nicht auszufüllen (zweites geometrisches Kriterium). Andernfalls schwimmen die groben Körner in den Feinteilen und bilden keine kraftschlüssige Bodenmatrix.
- Die Porengeschwindigkeit muss ausreichend groß sein, um die Feinteile in der gröbereren Kornmatrix zu bewegen (hydraulisches Kriterium). Die hydraulischen Gradienten, die erforderlich sind, um Suffosion zu beginnen, sind in der Regel kleiner als die für hydraulischen Grundbruch oder für den Beginn von rückschreitender Erosion erforderlichen.

Das Phänomen der Suffosion in Sand- und Kiesböden ist Bestandteil vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Die Suffosion in Erdstoffen mit Schluff- oder Tonanteilen fand bisher nur geringe Beachtung und wurde von WAN & FELL (2004) systematisch untersucht. Für den Nachweis der geometrischen Sicherheit gegen Suffosion empfiehlt BAW MSD (2005) eine Auftrennung in einen Fein- und einen Grobkornanteil mit nachfolgendem Nachweis der Filterstabilität. Die Trennung erfolgt in der Regel zwischen 10% und 20 % Siebdurchgang, gegebenenfalls bei markanten Knickpunkten in der Kornverteilung, oder im Bereich der Ausfallkörnung (Sattelpunkt der Kornvertei-

lung) bei intermittierend gestuften Böden. Der international gängige Nachweis nach KENNEY & LAU (1985, 1986) basiert auf der Vorstellung, dass für jede Fraktion mit dem Korndurchmesser d ein ausreichender Anteil an Korngrößen zwischen d und $4 \cdot d$ vorhanden sein muss, um nicht ausgespült zu werden. Das Verfahren beinhaltet eine systematische Einbeziehung aller relevanten Kombinationen aus Fein- und Grobkornanteil. Das Suffosionskriterium von BURENKOVA (1993) kann nach SAUKE (2006) empfohlen werden, ist aber nach WAN & FELL (2004) bei seiner Anwendung auf Erdstoffen mit Schluff- oder Tonanteilen weniger konservativ als das von KENNEY & LAU (1985, 1986). Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass unter Berücksichtigung sehr vieler Versuchsergebnisse ein eindeutiges geometrisches Kriterium für Sand- und Kiesböden mit und ohne Schluff- oder Tonanteile sehr konservativ ausfallen müsste, schlagen WAN & FELL (2004) ein Suffosionskriterium vor, das die Suffosionsanfälligkeit auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundlage beschreibt. Demnach sind Böden, die sowohl nach KENNEY & LAU (1985, 1986), als auch nach BURENKOVA (1993) als suffosionsanfällig eingestuft werden, mit großer Wahrscheinlichkeit nicht in sich stabil, und umgekehrt. Außerdem zeigen WAN & FELL (2004), dass die Suffosionsanfälligkeit mit zunehmender Porosität und abnehmendem Verdichtungsgrad zunimmt. Eine Abschätzung suffosionsgefährdeter Kornfraktionen kann nach BURENKOVA (1993) erfolgen.

3.3 Erosionsentwicklung

Ist Erosionsbeginn durch eines der oben beschriebenen Phänomene nicht auszuschließen, muss untersucht werden, ob progressiv ablaufender Materialaustrag einsetzen kann oder ob eine Veränderung der geometrischen und hydraulischen Randbedingungen diesen zum Erliegen bringt. Ob die Erosion fortschreitet, hängt in erster Linie davon ab, ob der Austrittspunkt des Sickerwassers gefiltert ist oder nicht. Bei ungefiltertem Austritt der Durchströmung wird der Erosionsprozess solange fortschreiten bis sich die hydraulischen Randbedingungen zum Besseren ändern.

An der Schichtgrenze von Filter-/ Basissystemen kann Filterwirkung entweder ohne oder mit Partikelbewegung erreicht werden. Bei letzterem Fall bildet sich durch Kolation ein Filterkuchen¹ aus. Bezüglich der geometrischen Filterkriterien, die eine Erosionsentwicklung durch Kontakterosion ausschließen können (keine Erosion), sei exemplarisch auf die in Kapitel 2 erwähnten geometrischen Kriterien vom TERZAGHI & PECK (1948) mit $D_{15} / d_{85} < 4$, SHERARD & DUNNIGAN (1989, vgl. Tabelle 2) und auf die reichhaltige Zusammenstellung in PARK (2003) verwiesen.

Falls ein Nachweis mit geometrischen Kriterien scheitert, kann mit hydraulischen Kriterien abgeschätzt werden, ob Partikeltransport möglich ist. Bezüglich deren Anwendbarkeit sei auf die Anmerkungen in Kapitel 2 verwiesen. Hydraulische Kriterien für Kontakterosion in körnige Erdstoffe sind in SAUKE (2006)² zusammengestellt.

¹ Versiegelung der Schichtgrenze durch Partikel des Basiserdstoffes

² ZIEMS (1969): aufwärts gerichtete Strömung / horizontale Schichtgr., BRAUNS (1985): horizontale Strömung / horizontale Schichtgr., BEZUJEN et al. (1987): variabel geneigte Strömung und Schichtgr.

Ist die Kornverteilung des Filters zu grob, um jegliche Erosion zu verhindern, kommt es im Basismaterial zu etwas, zu ausgeprägter oder zu fortschreitender Erosion. Der Ansatz von FOSTER & FELL (2001) hilft bei der Beurteilung der Erosionssicherheit von Filter-/ Basissystemen, bei denen der Filter nicht modernen Filterkriterien genügt. Dabei sind die in Abb. 5 gezeigten Bereiche zu unterscheiden.

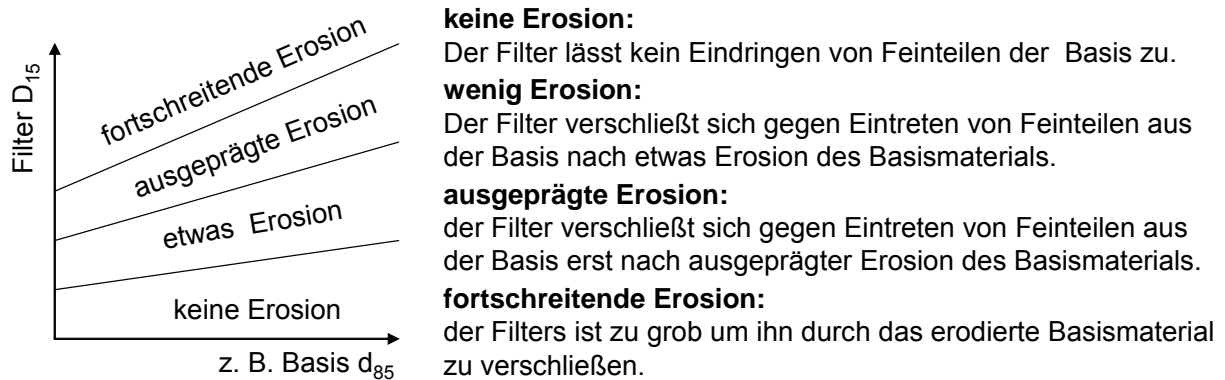


Abb. 5: Kriterien zur Beurteilung der Erosionsentwicklung bei Kontakterosion nach FOSTER & FELL (2001)

Angelehnt an das Filterkriterium nach SHERARD & DUNNIGAN (1989) haben FOSTER & FELL (2001) ausgehend von eigenen Versuchen, die Grenze bis zu der keine Erosion auftritt, schärfer gezogen (Tabelle 2). Dabei fällt auf, dass ihr Kriterium für Basiserdstoffe mit einem Feinteilanteil > 35 % strenger (feinere Filter) und für solche mit einem Feinteilanteil < 35 % weniger streng (gröbere Filter) ausfällt.

Tabelle 2: Filterkriterien und Grenzen zwischen keiner und etwas Erosion

Feinteilanteil F Basis [%] ¹	Filterwirksamkeit		Grenze keine / etwas Erosion	
	Spanne ²	Kriterium ³	Spanne ⁴	Kriterium ⁵
≥ 85	$D_{15} \leq (7 - 12) d_{85}$	$D_{15} \leq 9 d_{85}$	$D_{15} \leq (6,5 - 13,5) d_{85}$	$D_{15} \leq 6,5 d_{85}$
35 - 85	$D_{15} \leq 0,7 - 1,5 \text{ mm}$	$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$	$D_{15} \leq 0,7 - 1,7 \text{ mm}$	$D_{15} \leq 0,5 \text{ mm}$
15 - 35	$D_{15} \leq (40 - F) \cdot (4 d_{85} - 0,7 \text{ mm}) / 25 + 0,7 \text{ mm}$		$D_{15} \leq 1,6 ((35 - F) \cdot (4 d_{85} - 0,7 \text{ mm}) / 20 + 0,7 \text{ mm})$	
≤ 15	$D_{15} \leq (7 - 10) d_{85}$	$D_{15} \leq 4 d_{85}$	$D_{15} \leq (6,8 - 10) d_{85}$	$D_{15} \leq 7 d_{85}$

Die Grenzen zwischen etwas und ausgeprägter, bzw. zwischen ausgeprägter und fortschreitender Erosion nach FOSTER & FELL (2001) können bei der Beurteilung bestehender Dämme helfen (Tabelle 3). Demnach ist ab einem Verhältnis $D_{15} / d_{85} > 9$ unabhängig vom Basiserdstoff mit fortschreitender Erosion zu rechnen. Bei der Beurteilung der Versagenswahrscheinlichkeit durch hydrodynamische Bodendeformati-

¹ F: Anteile Basis < 75 µm, Grenzen der Bodengruppen von SHERARD & DUNNIGAN (1989) modifiziert nach FOSTER & FELL (2001) 35% statt 40%, Körnungslinie Basis muss auf $d_{\max} = 4,75 \text{ mm}$ angepasst werden (gilt entsprechend für F in Tabelle 3)

² Beobachtete Spanne der Filterwirksamkeit nach SHERARD & DUNNIGAN (1989)

³ Entwurfskriterium nach SHERARD & DUNNIGAN (1989), Sicherheit vgl. ², auch in US SCS (1986)

⁴ Beobachtete Spanne für keine Erosion nach FOSTER & FELL (2001)

⁵ vorgeschlagenes Kriterium für Grenze keine / etwas Erosion nach FOSTER & FELL (2001)

on im Rahmen des Systemansatzes spielen diese Kriterien eine wichtige Rolle, wobei immer Körnungsbänder betrachtet werden sollten.

Tabelle 3: Grenzen zur ausgeprägten bzw. fortschreitenden Erosion

Basiserdstoff		Grenze etwas / ausgeprägte Erosion	Grenze ausgeprägte / fortschreitende Erosion
$d_{95} \leq 0,3 \text{ mm}$		$D_{15} > 9 d_{95}$	$D_{15} > 9 d_{95}$
$0,3 \text{ mm} < d_{95} < 2 \text{ mm}$		$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$	
$d_{95} \geq 2 \text{ mm}$	$F \geq 35$	nur mit Filterversuchen	
	$15 < F < 35$	$D_{15} \leq 2,5 \cdot ((35 - F) \cdot (4 d_{85} - 0,7 \text{ mm}) / 20 + 0,7 \text{ mm})$	
	$F \leq 15$	$D_{15} > 9 d_{85}$	

3.4 Erosionsfortschritt

Beim Erosionsfortschritt bedingt die hydraulische Schleppspannung in dem erodierenden Boden einen anhaltenden Materialaustrag. Es kann entweder zur Ausbildung von standfesten Erosionsröhren oder zu Setzungstrichtern (Nachsacken des Bodens über Stellen des Materialaustrags) kommen. Standfeste Erosionsröhren, die nicht bereits bei geringer Größe kollabieren, können sich nach FOSTER (1999) vor allem in bindigen Böden sowie in schluffigen Sanden und sandigen Schluffen mit einem Feinkornanteil ($d < 0,075 \text{ mm}$) größer 15 % ausbilden. Die Gefahr von standfesten Röhren besteht darüber hinaus unter Massivbauwerken und unter bindigen Deckschichten. Für den Fall, dass sich keine standfesten Erosionsröhren ausbilden, kann sich der Erosionsfortschritt vorzeitig durch Sackungen oder Setzungstrichter an der Oberfläche abzeichnen, was eine gewisse Reaktionszeit für Gegenmaßnahmen einräumt. Auch die rückschreitende Erosion an einem ungefilterten Austritt der Durchsickerung macht sich i. d. R. durch Materialaustrag an der Oberfläche bemerkbar. Kritischer sind diesbezüglich Erosionsröhren in bindigen Dichtungskernen, da zum einen keine sichtbaren Anzeichen auftreten und zum anderen Maßnahmen zur Verringerung der Durchsickerung an der wasserseitigen Böschung i. d. R. unwirksam sind.

Ob sich ein Riss in einem bindigen Material, dessen Partikel nicht von einem Filter aufgehalten werden, vergrößert, hängt von der Erodierbarkeit des Bodens und der hydraulischen Belastung ab. Die hydraulische Belastung (Schubspannung τ) lässt sich aus dem hydraulischen Gradienten und einer Rissweitenabschätzung rückrechnen. Die Erodierbarkeit von Böden lässt sich mit der kritischen Schubspannung τ_0 für den Erosionsbeginn und dem Erosionsratenindex I_{HET} beschreiben. Für $\tau > \tau_0$ findet Materialaustrag statt, wobei die Erosionsgeschwindigkeit vom Erosionsratenindex I_{HET} nach WAN & FELL (2002, 2004¹) bestimmt wird. Der Erosionsratenindex kann in so genannten Pinhole oder Slot Erosion Tests (HET, SET) versuchstechnisch bestimmt oder überschlägig nach WAN & FELL (2002, 2004) abgeschätzt werden. Für Böden mit Tonanteilen > 20 % oder Feinteilanteil > 50 % ist ein $I_{\text{HET}} > 3$ wahrschein-

¹ $I_{\text{HET}} < 2$: sehr schnelle bzw. $I_{\text{HET}} > 6$: sehr langsame Erosion

lich. Die Erosionsrate, welche die Geschwindigkeit bestimmt, mit der sich ein Riss tatsächlich vergrößert, berechnet sich zu $\varepsilon_t = 10^{-I_{\text{HET}}} (\tau - \tau_0)$ in $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$. Die Erodierbarkeit von Böden wird auch vom Verdichtungs- und vom Sättigungsgrad beeinflusst.

Wenn die Leckageabflüsse bei Vergrößerung einer Erosionsröhre groß werden, kann der Durchfluss auch durch die Stützkörper oder andere Elemente, wie eine Betonoberflächendichtung begrenzt werden, in denen sich dann auch ein hydraulischer Gradient einstellt. Material aus dem wasserseitigen Filter wird entweder die Erosionsröhre verstopfen oder es stellt sich im äußersten Fall eine Sickerlinie wie in einem homogenen Damm ein, wenn es nicht vorher zu geostatischem Versagen kommt.

3.5 Überwachung und Gegenmaßnahmen

Der Überwachung und Intervention kommt im Rahmen des Systemansatzes eine große Bedeutung zu. Es liegt auf der Hand, dass die Wahrscheinlichkeit eines Versagens wegen hydrodynamischer Bodendeformation durch Möglichkeiten eines rechtzeitigen Erkennens von Erosionsbeginn, Erosionsentwicklung oder Erosionsfortschritt abnimmt. Außerdem lassen sich durch Überwachung aus Unbekanntem resultierende Unsicherheiten minimieren. Faktisch kann eine erfolgreiche Überwachung ausreichend Zeit schaffen, um mit geeigneten Gegenmaßnahmen ein Versagen zu verhindern oder zu verzögern.

Ob wirksame Gegenmaßnahmen durchgeführt werden können, hängt neben einem erfolgreichen Erkennen und Lokalisieren kritischer Erosionsprozesse von Art und Ort der hydrodynamischen Bodendeformation, von der Zugänglichkeit, von verfügbarem Personal, Gerät und Material und nicht zuletzt von der verfügbaren Zeit ab. Im Gegensatz zu Flussdeichen kann bei Speicherbauwerken unter Umständen eine Stauspiegelabsenkung durchgeführt werden.

Hinweise auf hydrodynamische Bodendeformation resultieren typischer Weise aus Beobachtungen der Durchsickerung, die bei Dämmen traditionell durch visuelle Kontrollen, Sickerwasser- oder Porenwasserdruckmessungen erfolgt. Die unersetzliche visuelle Kontrolle beschränkt sich dabei naturgemäß auf das Erkennen von Veränderungen an der Luftseite und somit auf oberflächennahe Auswirkungen von Durchsickerungen. Sickerwasserabflussmessungen ermöglichen eine Ortung von Schadstellen nur bei hinreichender Schotteinteilung. Eine besondere Bedeutung kommt der Beobachtung oder Messung der Trübheit des Leckageabflusses zu. Bei Stauhaltungsdämmen oder Kraftwerkskanälen ist eine lückenlose Sickerwassermessung auf Grund ihrer großen Länge mit herkömmlichen Methoden meist nicht möglich. Hier erfolgt die Kontrolle der Durchsickerung in der Regel punktuell, z.B. mit Piezometern oder Pegeln.

Von den neueren geophysikalischen Methoden¹ gilt die thermische Leckageortung als besonders wirkungsvoll (KBR 2003). Für eine lückenlose Überwachung steht seit einigen Jahren die verteilte thermische Leckageortung zur Verfügung (PERZLMAIER

¹ Self potential, Electrical resistivity, Ground penetrating Radar, etc.

et al. 2006). Für die Beurteilung von Gefahrenpotentialen eignet sich dabei die verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung mit der Aufheizmethode (PERZLMAIER 2006) besonders, da sie erstmals eine direkte und verteilte Messung des für hydrodynamische Bodendeformation maßgebenden Parameters Filtergeschwindigkeit ermöglicht.

3.6 Versagen

Versagensformen, die durch hydrodynamische Bodendeformation eingeleitet werden, sind entweder hydraulischer oder geostatischer Art und unterscheiden sich in Ablauf und Dauer. Eine standfeste Erosionsröhre durch den Damm oder dessen Untergrund kann ohne Zusammenbruch des Schüttkörpers zu großen Leckageabflüssen führen. Das Versagen von Dichtungen mit resultierendem Anstieg der Sickerlinie im Stützkörper kann zu Böschungsbruch mit anschließender Überströmung und Breschenbildung führen. Sackungen oder Setzungen an der Krone können anfänglich zum Verlust des Freibordes und weiter zu Überströmung mit Breschenbildung führen. Typische Versagensformen für Deiche sind in HASSELSTEINER & PERZLMAIER (2006) enthalten.

Die Ereignisbäume, welche eine Aneinanderreihung von Teilprozessen bis hin zum Versagen bedingt durch hydrodynamische Bodendeformation zusammenfassen, sollten die vier in Abb. 2 beschriebenen Phasen durchlaufen. Zusätzliche Betrachtungen des Lastfalles (z. B. Normal- oder Vollstau, Erdbeben), des Ortes der hydrodynamischen Bodendeformation (z. B. im Dammkörper, im Untergrund oder an der Aufstandsfläche) sowie der Möglichkeiten einer erfolgreichen Überwachung und Intervention sollten in einem vollständigen Ereignisbaum enthalten sein. Für die Anwendung ist es von großer Bedeutung, kritische Versagensmechanismen zu extrahieren. Bei Staudämmen tritt hydrodynamische Bodendeformation im Dammkörper nach FOSTER et al. (2000) doppelt so häufig auf wie im Untergrund und zwanzigmal häufiger als vom Dam in den Untergrund. Rund zwei Drittel der ausgewerteten Versagensereignisse traten in den ersten fünf Betriebsjahren auf.

Literatur

ATV-DVKW-M 502 (2002): Merkblatt Berechnungsverfahren für Staudämme – Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

BAW MAK (1989): Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BAW MSD (2005): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Wasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

BEZUIJEN, A.; KLEIN-BRETTELEMER, M.; BAKKER, K.J. (1987) Design Criteria placed Block Revetments and Granular Filters. 2nd Int. Cof. Coastal & Port Eng. in Dev. Countries. Beijing.

BLIGH, W.G. (1912): The practical design of irrigation works. 2 ed. London.

- BRAUNS, J. (1985): Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung. *Wasserwirtschaft* 75, Nr. 9. 377-383.
- BRAUNS J.; SCHULER, U. (1993): Behaviour of coars and well-graded filters. In: Brauns, Heibaum & Schuler (Hrsg.): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Rotterdam, Balkema, 3 – 17.
- BURNKOVA, V.V. (1993): Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. In: Brauns, Heibaum & Schuler (Hrsg.): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Rotterdam, Balkema, 357–360.
- BUSCH K.-F.; LUCKNER, L.; TIEMER, K. (1993): *Geohydraulik, Lehrbuch der Hydrogeologie*. 3. neubearbeitete Auflage, Berlin; Gebrüder Bornträger.
- CHUGAEV, R.R. (1962): *Gründungsumriss von Wasserbauwerken* (in russischer Sprache). Moskau – Leningrad.
- DAVIDENKOFF, R. (1964): *Deiche und Erddämme*. Werner-Verlag, Düsseldorf.
- DAVIDENKOFF, R. (1970): *Unterläufigkeit von Staubawerken*. Werner-Verlag, Düsseldorf.
- DVWK M 210 (1986): *Merkblatt Flussdeiche*. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
- DWA M (Gelbdruck 2006): *Merkblatt Deiche an Fließgewässern* (Entwurf).
- FELL, R.; FOSTER, M.; WAN, C.-F. (2005): A framework for assessing the likelihood of internal erosion and piping of embankment dams and their foundations. Contribution to the Workshop of internal erosion and piping of dams and foundations. Aussoise, France, April 05, (Veröffentlichung in Vorbereitung, siehe auch Fell, Foster, Wan).
- FOSTER, M. (1999): *The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. PhD thesis, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.
- FOSTER, M.; FELL, R. (1999): *A framework for estimating the probability of embankment dams by piping using the event tree method*. UNICIV Report No. R-377. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.
- FOSTER, M.; FELL, R. (2001): *Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria*. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE*, Vol. 127, No. 4, 398-402.
- FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGEL, M. (2000): *The statistics of embankment dam failures and accidents*. *Canadian Geotechnical J.* 37, 1000-1024.
- HASELSTEINER, R.; PERZLMAIER, S. (2006): *Der Systemansatz zu Beurteilung des Versagenswahrscheinlichkeit von Deichen*. Tagungsband Workshop Deicher-tüchtigung und Deichverteidigung in Bayern, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 104.

- HASELSTEINER, R.; STROBL, TH. (2004): Zum Einfluss von Bewuchs und Hohlräumen auf die Durchsickerung von Deichbauten. In: Tagungsband Symposium Lebensraum Fluss, Wallgau Juni 2004, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 101/2, 92 – 100.
- KBR (2003): Early detection of internal erosion, feasibility report, Vol. 1 of 2: main report. Defra, Research Contract Reservoir Safety Advice, England.
- KENNEY, T.C.; LAU, D. (1985): Internal stability of granular filters. Canadian Geotech. J., Vol. 22, No. 2, 215-255.
- KENNEY, T.C.; LAU, D. (1986): Internal stability of granular filters: Reply. Canadian Geotech. J., Vol. 23, 420-423.
- KUTZNER, C. (1996): Erd- und Steinschüttdämme für Stauanlagen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- LANE, E.W. (1935): Security from under-seepage masonry dams on earth foundations. Transaction American Soc. of Civ. Eng., Vol 100, 1233-1351.
- MALLET, C.; PACQUANT, J. (1951): Erdstaudämme. Orig. Titel: Les Barrages en Terre. Übersetzt aus dem Franz.: H. Ferchland. VEB Verlag Technik, Berlin, DDR.
- MUCKENTHALER, P. (1989): Hydraulische Sicherheit von Staudämmen. Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft, TU München, Bericht Nr. 61.
- MÜLLER-KIRCHENBAUER, H.; RANKL, M.; SCHLÖTZER, C. (1993): Mechanism for regressive erosion beneath dams and barrages. In: Brauns, Heibaum & Schuler (Hrsg.): Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Balkema, 369–376.
- PARK, J. (2003): Investigation of the ability of filters to stop erosion through cracks in dams. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and States University.
- PERZLMAIER, S. (2006): Der Wärmeübergang vom Heizzylinder an gesättigte und durchströmte Schüttungen. Workshop: Anwendung und Grenzen physikalischer und numerischer Modelle im Wasserbau. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 104.
- PERZLMAIER, S.; PORRAS, P.; AUFLEGER, M. (2006): Anwendungskonzepte verteilter faseroptischer Leckageortung. Tagungsband des V. Mittweidaer Talsperrentages: Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, 11. Mai 06, Mittweida.
- SAUKE, U. (2004): Bewertung der Erosionsanfälligkeit strukturierter körniger Sedimente. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 162.
- SAUKE, U. (2006): Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion für körnige Erdstoffe. geotechnik 29 (2006) Nr. 1.
- SCHERARD J.L., DUNNIGAN, L.P. (1984a): Basic properties of sand and gravel filters. J. Geotech. Eng. ASCE, Vol. 110, No. 6, 684-700.

SCHERARD J.L., DUNNIGAN, L.P. TALBOT J.R. (1984b): Filters for silts and clays. J. Geotech. Eng. ASCE, Vol. 110, No. 6, 701-718.

SCHERARD J.L., DUNNIGAN, L.P. (1989): Critical Filters for impervious soils. J. Geotech. Eng. ASCE, Vol. 115, No. 7, 927-946.

SCHMERTMANN, J.H. (2000): The non-filter factor of safety against piping through sands. ASCE Geotechnical Special Publication No. 111, Judgement and innovation. Edited by F. Silva and E. Kavazanjian, ASCE, Reston.

SCHULER, U. (1997): Bemessung von Erdstoff-Filtern unter besonderer Berücksichtigung der Parameterstreuung. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 143.

THERZAGHI, K.; PECK, R. (1948): Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons Inc., New York.

URS (2000): Seepage through embankment dams. Proceedings of the research needs workshop, in the scope of the National dam safety programme, Oct. 2000, Denver Colorado.

US SCS (1986): Engineering guide for determining the gradation of sand and gravel filters. Soil Mechanics Note No. 1.1210-VI.

WAN, C.-F.; FELL, R. (2004): Experimental investigation if internal instability of soils in embankment dams and their foundations. UNICIV Report No. R-429. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. ISBN: 85841 396 5.

WAN, C.-F.; FELL, R. (2004a): Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams and their foundation. J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE, Vol. 130, No. 4, 373-380.

WEIJERS, J.B.A.; SELLMAIJER, J.B. (1993): A new model to deal with the piping mechanism. In: Brauns, Heibaum & Schuler (Hrsg.): Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Rotterdam, Balkema, 345 – 355.

WITTMANN, L. (1980): Filtrations- und Transportphänomene in porösen Medien. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 86.

ZIEMS, J. (1969): Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. Dissertation, Technische Universität Dresden.

Adressen der Verfasser

Sebastian Perzlmaier und Ronald Haselsteiner
 Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München
 Arcisstraße 21, 80290 München
 s.perzlmaier@bv.tum.de und r.haselsteiner@bv.tum.de