

Untersuchungen zum Nachweis gegen Erosionsgrundbruch an Stauwerken

Prof. Dr.-Ing. M. Achmus

Dr.-Ing. B.G.S. Mansour

Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover,
Appelstr. 9A, 30167 Hannover

1 Einleitung

Die rückschreitende Erosion bzw. der zugehörige Versagenszustand Erosionsgrundbruch ist ein sowohl für Flusssperwerke als auch für Dämme und Deiche höchst relevanter Prozess. Bei der Unterströmung solcher Bauwerke in erosionsanfälligen Böden (vorwiegend relativ feinkörnige nichtbindige Böden wie z. B. Feinsand) kann es bei Überschreitung einer gewissen Wasserspiegeldifferenz zur Ausbildung einer Erosionsröhre im Untergrund kommen. Solche Vorgänge nehmen in der Regel am unterwasser- bzw. binnenseitigen Strömungsausstritt ihren Anfang. Infolge fortschreitenden Materialtransports erweitert sich die Erosionsröhre entgegen der Strömungsrichtung, so dass es am Ende zu einem Absacken des Bauwerks in den erodierten Bereich und schließlich zum völligen Standsicherheitsverlust (Erosionsgrundbruch) kommt.

In Abb. 1 sind die Verläufe von Erosionskanälen unter einem Flusssperwerk sowie unter der bindigen Deckschicht eines Deichuntergrunds schematisch dargestellt. Der Prozess beginnt mit dem Materialtransport am unterwasserseitigen Austritt der Strömung. Da die Strömung für die dargestellten Fälle hier nahezu vertikal nach oben gerichtet ist, entspricht dies dem Auftreten eines hydraulischen Grundbruchs. Im Grundsatz gilt es also, den hydraulischen Gradienten am Strömungsausstritt so zu begrenzen, dass ein hydraulischer Grundbruch mit ausreichender Sicherheit vermieden wird. Problematisch ist dabei, dass mögliche Störungen (z. B. Kolkbildungen an Flusssperwerken) oder Heterogenitäten des Baugrunds dazu führen, dass lokal größere Strömungsgradienten auftreten als am idealisierten zweidimensionalen Berechnungsmodell ermittelt. Bereits TERZAGHI & PECK (1961) wiesen bezüglich der Unterspülung von Dämmen darauf hin, dass diese erfahrungsgemäß bei einer deutlich geringeren Niveaudifferenz auftreten könne, als sich dies aus dem Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch ergebe.

Da eine rechnerische Berücksichtigung räumlicher Effekte schon aufgrund des nur lückenhaften Wissens über den Baugrund nicht in Frage kommt, müssen die zulässigen Austrittsgradienten diese Effekte über entsprechend hohe „Sicherheiten“ abdecken.

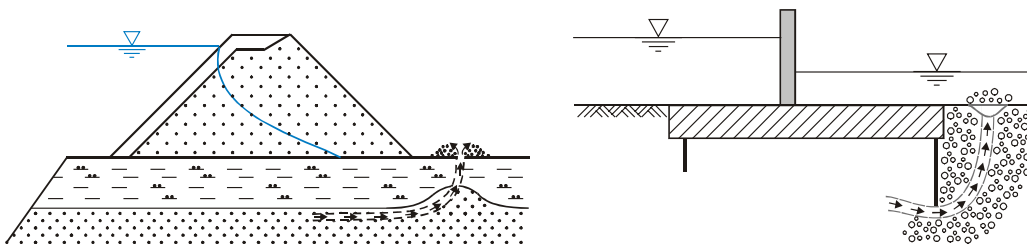


Abb. 1: Erosionskanäle unter einem Deich (links) und unter einem Flusssperwerk (schematisch)

In diesem Beitrag werden Bemessungsansätze für rückschreitende Erosion vorgestellt und am Beispiel von Flusssperrwerken miteinander verglichen. Außerdem werden die Ergebnisse von Modellversuchen zur rückschreitenden Erosion, bei denen an der Unterwasserseite gezielt Baugrundstörungen simuliert wurden, vorgestellt.

2 Bemessungsverfahren für rückschreitende Erosion

Der erste Bemessungsansatz für rückschreitende Erosion stammt von BLIGH (1912). Er definierte einen Sickerwegquotienten C_B als Quotient aus dem kürzesten Strömungsweg L um das Bauwerk und der Wasserspiegeldifferenz bzw. Differenzdruckhöhe H :

$$C_B = \frac{L}{H} \geq C_{B,erf} \quad (1)$$

Für diesen Sickerwegquotienten, der dem Kehrwert eines repräsentativen hydraulischen Gefälles entspricht, legte er auf Grundlage von Erfahrungen bodenartabhängige Mindestwerte $C_{B,erf}$ fest (siehe Tab. 1).

SELLMEIJER (1988) hat anhand theoretischer Überlegungen eine Gleichung für den kritischen Gradienten H/L (bzw. $1/C_B$) aufgestellt, bei dem ein Versagen durch rückschreitende Erosion eintritt. Die von BLIGH berücksichtigte Abhängigkeit des erforderlichen Sickerwegquotienten von der Bodenart wird durch diesen theoretischen Ansatz bestätigt (s. auch MANSOUR 2005).

LANE (1934) hat die Gleichung von BLIGH modifiziert. Durch die Auswertung der Daten einer Vielzahl von Dämmen, von denen einige infolge rückschreitender Erosion versagt hatten, gelangte er zu der Erkenntnis, dass ein großer vertikaler Anteil des Strömungswegs günstig wirkt. Er schlug deshalb vor, den vertikalen Strömungsweg höher zu gewichten als den horizontalen, und definierte den Sickerwegquotienten und die Bemessungsgleichung wie folgt:

$$C_L = \frac{L_v + L_h/3}{H} \geq C_{L,erf} \quad (2)$$

Die nach LANE erforderlichen Mindestwerte $C_{L,erf}$ für einige Bodenarten sind ebenfalls in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1: Erforderliche Sickerwegquotienten nach BLIGH (1912) und nach LANE (1934)

Bodenart	$C_{B,erf}$ nach BLIGH	$C_{L,erf}$ nach LANE
Sehr feiner Sand / Schluff	18	8,5
Feinsand	15	7
Grobsand	12	5
Kiessand / Feinkies	9	4

Die genauen Randbedingungen des durchströmten Gebiets unter einem Sperrwerk bzw. einem Damm werden bei den Verfahren von LANE und BLIGH nicht berücksichtigt. Die tatsächlich im Untergrund wirksamen hydraulischen Gradienten werden jedoch zum Beispiel von der Mächtigkeit der durchströmten Bodenschicht sowie von der Anordnung und Tiefe von Schürzen (z. B. Spundwänden) beeinflusst (Abb. 2).

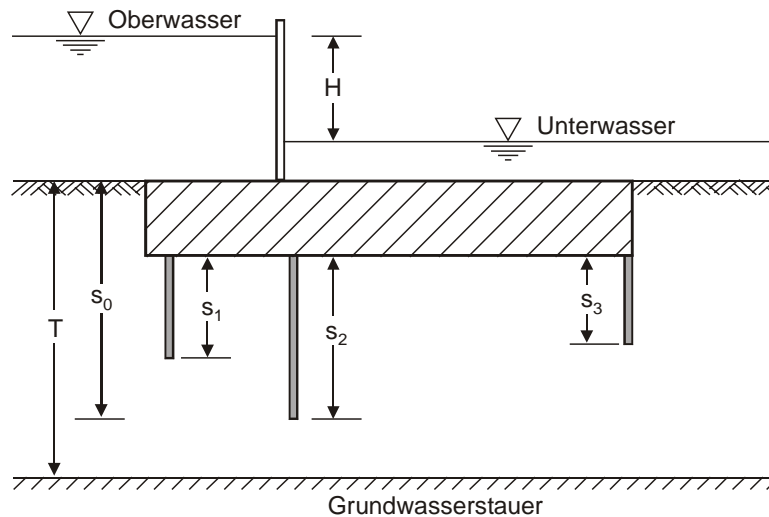


Abb. 2: Geometrieparameter eines unterströmten Sperrwerks

TSCHUGAJEW (1956) hat eine Methode vorgeschlagen, einen repräsentativen hydraulischen Gradienten (Kontrollgradient I_c) unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Strömungsgebiets zu ermitteln:

$$I_c = \frac{H}{T \sum \zeta_i} \quad (3)$$

Die Widerstandskoeffizienten ζ_i werden für jeden Abschnitt des Strömungsgebiets (Einlauf, Spundwand, Bereich zwischen zwei Spundwänden usw.) nach von TSCHUGAJEW angegebenen Gleichungen berechnet (s. auch MANSOUR 2005).

Die in Tab. 2 für Sandböden angegebenen kritischen Kontrollgradienten wurden von TSCHUGAJEW anhand der Auswertung der Daten von insgesamt 174 Dämmen ermittelt, von denen einige infolge Erosionsgrundbruch versagt hatten.

Tab. 2: Kritische Kontrollgradienten nach TSCHUGAJEW (1956)

Bodenart	$I_{c,grenz}$ für Fälle mit „single cut-off“	$I_{c,grenz}$ für andere Fälle
Feinsand	0,15 bis 0,20	0,12 bis 0,16
Mittelsand	0,20 bis 0,26	0,15 bis 0,20
Grobsand	0,30 bis 0,39	0,25 bis 0,33

Mit den drei genannten Verfahren kann sicherlich abgeschätzt werden, ob die Gefahr eines Erosionsgrundbruches besteht. In kritischen Fällen ist aber eine genauere Behandlung zweckmäßig.

Der Vorgang der rückschreitenden Erosion beginnt am unterwasserseitigen Austritt der Strömung. Maßgebend für den Beginn des Versagensmechanismus ist daher neben der Bodenart der hydraulische Gradient an dieser Stelle. Bei der Austrittsgradientenmethode wird dieses Strömungsgefälle i_{exit} aus einem Potentialliniennetz ermittelt und einem zulässigen – wiederum bodenartabhängigen – Austrittsgradienten $i_{exit,zul}$ gegenübergestellt. Schematisch ist diese Methode in Abb. 3 dargestellt. Mittels numerischer Verfahren zur Ermittlung von Strömungsnetzen lassen sich die Randbedingungen des Strömungsgebiets

und zum Beispiel auch eine Schichtung oder eine Anisotropie der Durchlässigkeit des Untergrunds exakt berücksichtigen. Durch Parameterstudien mit Variation gegebenenfalls unsicherer Eingangswerte können dabei auch Risikoabschätzungen vorgenommen werden.

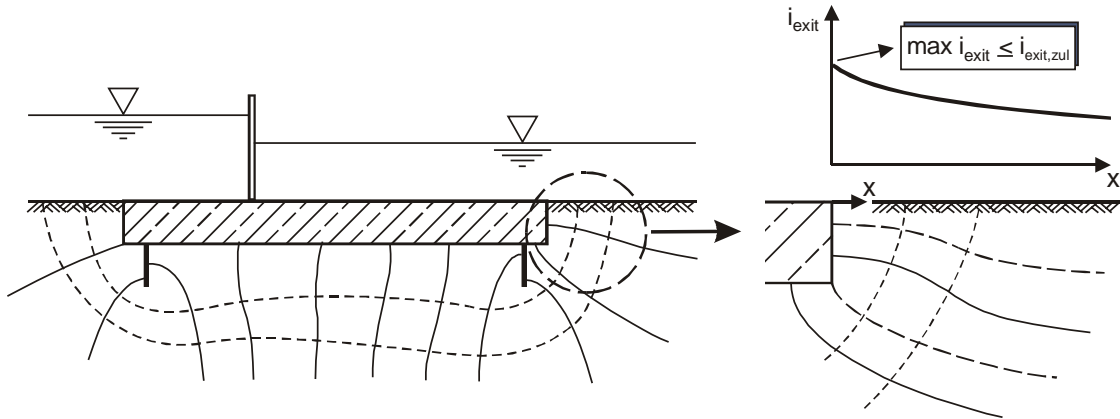


Abb. 3: Vorgehensweise bei der Austrittsgradientenmethode

An die Stelle erforderlicher Sickerwegquotienten oder eines zulässigen Kontrollgefälles tritt bei diesem Verfahren der zulässige Austrittsgradient. NOVAK ET AL. (2001) geben die in Tab. 3 zusammengestellten zulässigen Austrittsgradienten an.

Tab. 3: Zulässige Austrittsgradienten nach NOVAK ET AL. (2001)

Bodenart	$i_{\text{exit,zul}}$
Feinsand	0,14 bis 0,17
Grobsand	0,17 bis 0,20
Kies	0,20 bis 0,25

Für das Beispiel eines Sperrwerks wurde die zulässige bzw. kritische Wasserstandsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasser nach den genannten Bemessungsverfahren berechnet (Abb. 4). Es handelt sich hierbei um den Querschnitt des alten Nilsperwerks bei Assiut in Ägypten (s. MANSOUR 2005). Variiert wurde die Anordnung der Spundwände (unter- und oberwasserseitige Spundwand, keine Spundwand und jeweils nur eine Spundwand).

Die Methode von TSCHUGAJEW ergibt sehr hohe Wasserstandsdifferenzen, weil der kritische Kontrollgradient keine Sicherheiten enthält. LANE-, BLIGH- und Austrittsgradientenmethode ergeben zulässige Wasserstandsdifferenzen in ähnlicher Größenordnung. Nur die letztgenannte Methode kann aber die unterschiedliche Effektivität von ober- und unterwasserseitiger Spundwand erfassen und bietet außerdem auch die Möglichkeit, komplexere Randbedingungen wie Baugrundsichtung, Anisotropie der Durchlässigkeit usw. zu berücksichtigen.

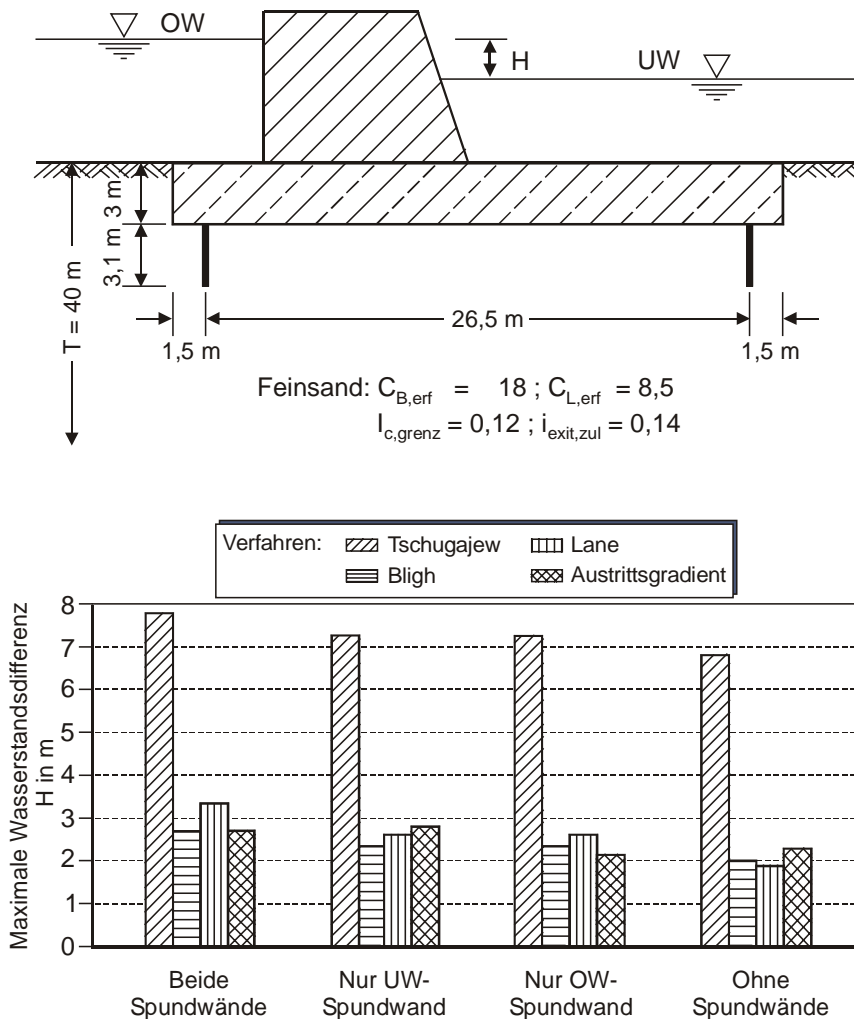


Abb. 4: Vergleich der Bemessungsverfahren am Beispiel des alten Nilsperwerks bei Assiut

3 Zur Größe des kritischen Austrittsgradienten

Die Wirkung einer vertikal aufwärts gerichteten Strömungskraft auf die effektive Vertikalspannung im Boden lässt sich als eine Änderung der Wichte des Bodens unter Auftrieb beschreiben:

$$\bar{\gamma} = \gamma' - i \gamma_w \quad (4)$$

Hierin ist i das hydraulische Gefälle, γ' die Wichte des Bodens unter Auftrieb ohne Strömungskraft und γ_w die Wichte des Wassers. Damit wird die effektive Wichte zu Null, wenn der hydraulische Gradient folgenden Wert annimmt:

$$i_{krit} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (5)$$

Setzt man am Austritt der Strömung eine annähernd vertikal nach oben gerichtete Wasserströmung voraus, so tritt hier, da keine Auflastspannung vorhanden ist, bei Erreichen dieses kritischen Gradienten ein Zustand auf, in dem die Effektivspannung Null ist. Die Bodenteilchen eines nichtbindigen Bodens sind fluidisiert und befinden sich in

einem Schwebezustand. Bei einer geringen Zunahme des Strömungsgefälles kommt es zum Aufschwimmen der Teilchen und damit zur Erosion. Theoretisch beginnt damit die rückschreitende Erosion, wenn der Austrittsgradient dem kritischen Gradienten gemäß Gleichung (5) entspricht: $i_{exit,krit} = \gamma' / \gamma_w$. Je nach Lagerungsdichte ergeben sich damit für nichtbindige Böden kritische Austrittsgradienten zwischen rd. 0,9 und 1,1.

Der zulässige Austrittsgradient ergibt sich unter Berücksichtigung einer Sicherheit η zu

$$i_{exit,zul} = \frac{i_{exit,krit}}{\eta} \quad (6)$$

NOVAK ET AL. (2001) haben die in Tab. 3 genannten zulässigen Austrittsgradienten aus Gleichung (6) unter Ansatz eines Sicherheitsbeiwerts von $\eta = 5,5$ ermittelt.

Die Einhaltung einer Sicherheit gegen den kritischen Austrittsgradienten entspricht im Grundsatz dem Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch. Zumindest für Flusssperwerke mit unterwasserseitiger Spundwand und entsprechend am Austritt vorwiegend vertikal nach oben gerichteter Strömung ergibt sich aus beiden Nachweisen auch annähernd das gleiche Sicherheitsniveau, wie Abb. 5 verdeutlicht.

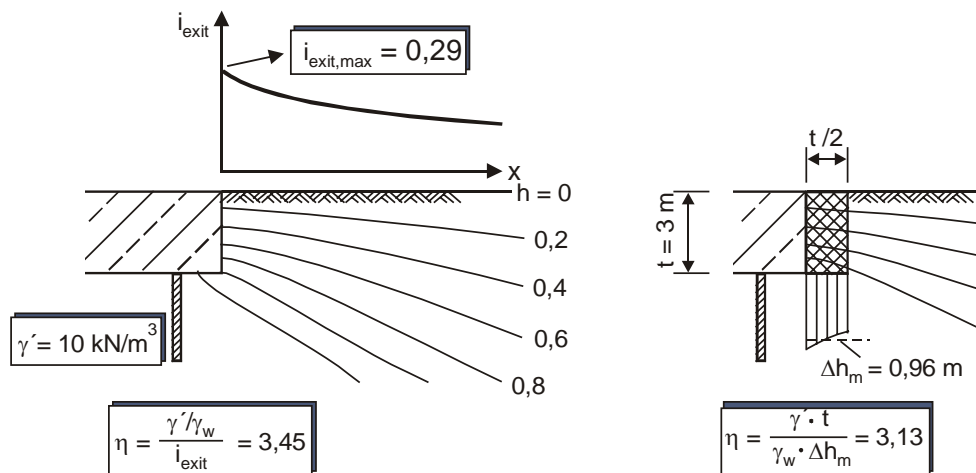


Abb. 5: Zusammenhang zwischen kritischem Austrittsgradienten und hydraulischer Grundbruchsicherheit für ein Flusssperwerk

Der hohe von NOVAK ET AL. vorgeschlagene Sicherheitsbeiwert kann zunächst dadurch gerechtfertigt werden, dass sich für das in Abschnitt 2 berechnete Beispiel zulässige Wasserstandsdifferenzen ergeben, welche im Mittel recht gut mit den empirisch abgeleiteten Werten von LANE und BLIGH übereinstimmen. Er kann somit als durch Erfahrung weitgehend bestätigt gelten.

Dennoch sind Sicherheitsbeiwerte $\eta > 5$ gegen mögliche Versagenszustände selbst in der Geotechnik unüblich. Hintergrund dieser Forderung ist aber, dass die tatsächliche Sicherheit gegen das Auftreten rückschreitender Erosion geringer ist, weil hier Effekte infolge Baugrundheterogenitäten und -störungen eine Rolle spielen, die lokal zu höheren Strömungsgradienten führen können als rechnerisch ermittelt.

Während Strömungsnetze in aller Regel an einem zweidimensionalen, ebenen Modell ermittelt werden, ist rückschreitende Erosion ein eindeutig dreidimensionaler Prozess. Die Erosionsröhre sucht sich den Weg des geringsten Widerstands im Baugrund. An

Flusssperrenwerken kann der Ausgangspunkt zum Beispiel ein Kolk am unterwasserseitigen Ende des Sperrwerks sein.

Um den tatsächlichen, in den zulässigen Austrittsgradienten gemäß Tab. 3 enthaltenen Sicherheitsbeiwert abschätzen zu können, wurden Erosionsversuche durchgeführt, bei denen Störungen am unterwasserseitigen Sperrwerksende gezielt simuliert wurden.

4 Modellversuche

4.1 Übersicht über bisherige Versuche

Bereits TERZAGHI studierte 1922 rückschreitende Erosion unter einer Flachgründung im Modellversuch und stellte fest, dass in dem Verfahren von BLIGH verglichen mit seinen Versuchsergebnissen hohe Sicherheiten enthalten sind.

DAVIDENKOFF führte in den 1930er Jahren ähnliche Versuche wie TERZAGHI durch, aber durch die Einführung von Glasröhrchen schaffte er künstliche Schwachstellen für Erosionsvorgänge. Er stellte fest, dass die zur Erosion führende Wasserstandsdifferenz dadurch etwa halbiert wurde (DAVIDENKOFF 1970).

Aus jüngerer Zeit stammen die Versuchsergebnisse von HÜTTL ET AL. (1992). Untersucht wurde hier die rückschreitende Erosion in Sand unter einer bindigen Deckschicht. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6 wiedergegeben.

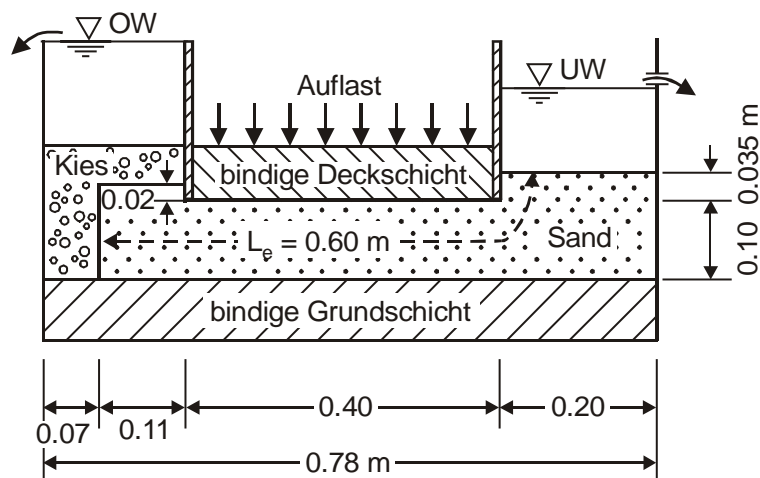


Abb. 6: Versuchsaufbau (schematisch) von HÜTTL ET AL. (1992)

Als mittlerer hydraulischer Gradient wurde der Quotient aus Wasserspiegeldifferenz und der Länge $L_e = 0,6$ m (vgl. Abb. 6) definiert. Untersucht wurden drei Sandböden mit jeweils unterschiedlichen Einbauporenanteilen bzw. Lagerungsdichten. Die ermittelten mittleren Gradienten, bei denen rückschreitende Erosion einsetzte, sind in Tab. 4 angegeben. Sie liegen für alle Bodenarten und Lagerungsdichten deutlich über dem theoretischen kritischen Gradienten gemäß Gleichung (5).

Tab. 4: Versuchsergebnisse von HÜTTL ET AL. (1992)

Bodenart	Porenanteil n	$i_{m,krit} = H_{krit}/L_e$
Feinsand	0,47	1,67
	0,41	1,83
Mittelsand	0,46	1,75
	0,40	1,83
Mittel-Grobsand	0,36	2,30
	0,34	2,50

4.2 Eigene Versuche

Ziel der durchgeführten Erosionsversuche war die Ermittlung kritischer Wasserspiegeldifferenzen und daraus – anhand einer Rückrechnung – kritischer Austrittsgradienten unter Berücksichtigung von Baugrundstörungen im Unterwasserbereich. Untersucht wurde ein Modell des bereits in Abb. 4 dargestellten alten Nilsperwerks bei Assiut im Maßstab von etwa 1:100. Den Modellaufbau zeigt Abb. 7.

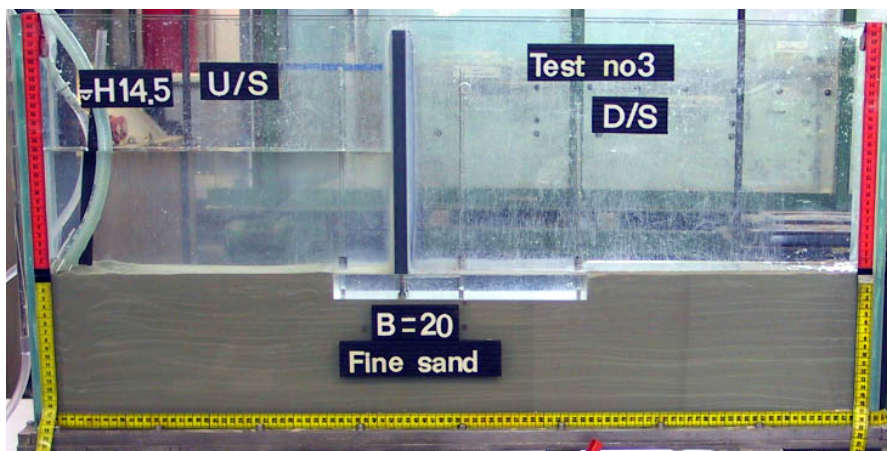
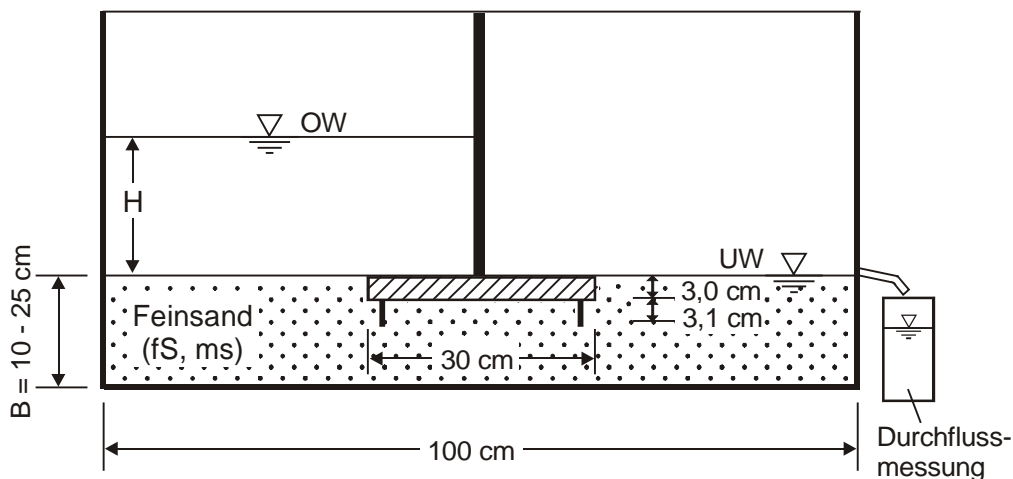


Abb. 7: Aufbau der Modellversuche (oben: schematisch; unten: Beispiel eines Versuchsaufbaus ohne Spundwände)

Als Versuchsboden wurde ein gleichförmiger mittelsandiger Feinsand verwendet, der jeweils einmal in lockerer bis mitteldichter ($D = 0,33$) und einmal in dichter Lagerungsform ($D = 0,88$) eingebaut wurde. In verschiedenen Versuchen wurde die Mächtigkeit der durchströmten Sandschicht zwischen 10 und 25 cm variiert. Außer dem in Abb. 7 dargestellten Sperrwerksquerschnitt mit zwei Spundwänden wurde auch ein Querschnitt ohne Spundwände untersucht.

Ausgehend von einem ausgeglichenen Wasserspiegel wurde der Oberwasserspiegel während eines Versuchs schrittweise erhöht und es wurde jeweils abgewartet, bis sich annähernd stationäre Strömungsverhältnisse einstellten. Gemessen wurden dabei sowohl die durchströmende Wassermenge als auch mittels Piezometern der Wasserüberdruck an mehreren Stellen in der Sperrwerkssohle.

Von entscheidender Bedeutung für die Interpretation der Versuchsergebnisse ist, dass nach jeder Wasserspiegelerhöhung auf der Unterwasserseite durch gegebenenfalls mehrfaches, einige Zentimeter tiefes Einstechen einer dünnen Nadel Baugrundstörungen wie z. B. Kolke simuliert wurden. Wenn trotz dieser Störungen keine Erosion einsetzte, wurde der Oberwasserspiegel weiter erhöht.

Der Beginn des Erosionsvorgangs ist durch das lokal begrenzte Entstehen einer „boiling“-Zone am unterwasserseitigen Sperrwerksende gekennzeichnet (Abb. 8). Innerhalb eines kleinen Kegels bewegen sich hier Sandteilchen unter der Einwirkung der Strömungskraft und werden heraustransportiert. Dieser fluidisierte Zustand sieht aus, als würde der Sand kochen (engl. boiling). Obwohl ausgeworfenes Material jeweils vorsichtig entfernt wurde, ist dieser Zustand zunächst stabil, d. h. ein Fortschreiten der Erosionsröhre tritt erst bei weiterer Erhöhung des Oberwasserspiegels auf. Dieses Phänomen ist auch von SELLMIEJER (1988) bereits beschrieben worden. Einen weiter fortgeschrittenen Erosionszustand zeigt Abb. 9.

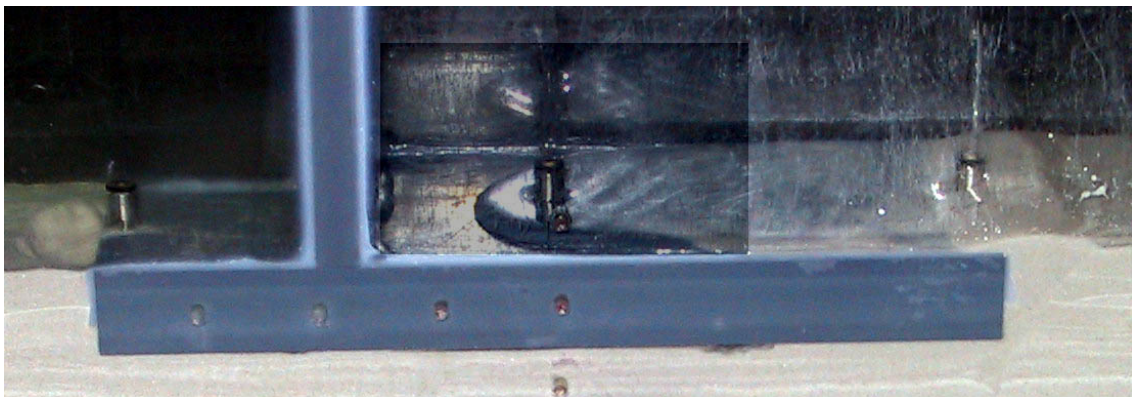


Abb. 8: Beginn des Erosionsvorgangs: Boiling am unterwasserseitigen Strömungsausstritt (rechts); später auch Bodenabsenkung an der Oberwasserseite (links)



Abb. 9: Fortgeschrittener Erosionsvorgang beim Modell mit Spundwänden (Unterwasserseite rechts)

Zu unterscheiden sind also die Wasserspiegeldifferenzen bzw. die hydraulischen Gradienten zu Beginn des Erosionsprozesses sowie beim Tragfähigkeitsverlust des Sperrwerks. Letzterer war bei den Modellversuchen durch einen vollständigen Bodenaustrag unter dem Sperrwerk und den nahezu schlagartigen Ausgleich von Ober- und Unterwasserspiegel gekennzeichnet (Abb. 10). Der Grund hierfür war, dass das Sperrwerksmodell zur Vermeidung von Randumströmungen mittels Silikon an den Seitenscheiben des Modells festgeklebt war.



Abb. 10: Endzustand nach dem Tragfähigkeitsverlust durch rückschreitende Erosion

Die Ergebnisse aller Versuche sind in Tab. 5 angegeben. Es ergibt sich zum Einen ein Einfluss der Lagerungsdichte auf die kritische Wasserstandsdifferenz, im Mittel ergeben sich bei dichter Lagerung um rd. ein Drittel höhere Werte für den Beginn des Erosionsprozesses als bei lockerer bis mitteldichter Lagerung. Zum Anderen zeigt sich auch ein – nach der Austrittsgradientenmethode zu erwartender – Einfluss der Mächtigkeit

der Sandschicht. Eine kleinere Sandschichtmächtigkeit führt wegen des geringeren Fließquerschnitts zu höheren Gradienten und entsprechend zu kleineren kritischen Wasserstandsdifferenzen. Zum Vergleich sind in Tab. 5 auch die zulässigen Wasserspiegeldifferenzen nach den Verfahren von LANE und BLIGH angegeben. Die vorgenannten Einflüsse werden von diesen Verfahren nicht berücksichtigt. Je nach Randbedingung enthalten diese Verfahren Sicherheiten gegen den Beginn der rückschreitenden Erosion zwischen rd. 3,5 und rd. 7.

In Abb. 11 sind schließlich die experimentell ermittelten, zum Beginn des Erosionsprozesses gehörigen Austrittsgradienten grafisch dargestellt. Diese wurden aus den Wasserstandsdifferenzen anhand einer Rückrechnung mit einem Strömungsnetz für das jeweilige Versuchsmodell berechnet. Es zeigt sich eine gewisse Abhängigkeit der kritischen Gradienten von der Dicke der durchströmten Sandschicht. Auch ergeben sich für ein Sperrwerk ohne Spundwände tendenziell etwas geringere Werte.

Vernachlässigt man diese Abhängigkeiten, so können auf Grundlage der Versuchsergebnisse folgende kritische (den Beginn des Erosionsprozesses repräsentierende) Austrittsgradienten genannt werden:

Feinsand, mittelsandig, dichte Lagerung: $i_{\text{exit,krit}} = \text{rd. } 0,50$
 Feinsand, mittelsandig, lockere bis mitteldichte Lagerung: $i_{\text{exit,krit}} = \text{rd. } 0,40$

Demnach enthalten die von NOVAK ET AL. (2001) angegebenen zulässigen Austrittsgradienten (s. Tab. 3 und Abb. 11) einen Sicherheitsbeiwert von etwa 3,0.

Tab. 5: Ergebnisse der Modellversuche

Versuch	Sanddicke B in cm	Wasserstandsdifferenz H in cm		H _{zul} in cm nach
		Beginn Piping	Versagen	
Sand, locker bis mitteldicht, ohne Spundwände	10	13	16	LANE: 2,3 BLIGH: 2,4
	15	11	15	
	20	13	14	
	25	10	13,5	
Sand, dicht, ohne Spundwände	10	15,5	18	BLIGH: 2,4
	15	15	17	
	20	14,7	16,5	
	25	14	16	
Sand, locker bis mitteldicht, mit Spundwänden	10	17	22	LANE: 4,1 BLIGH: 3,2
	15	14	22	
	20	14	21	
	25	14	20	
Sand, dicht, mit Spundwänden	10	22	27	BLIGH: 3,2
	15	20	25	
	20	21	26	
	25	19	25	

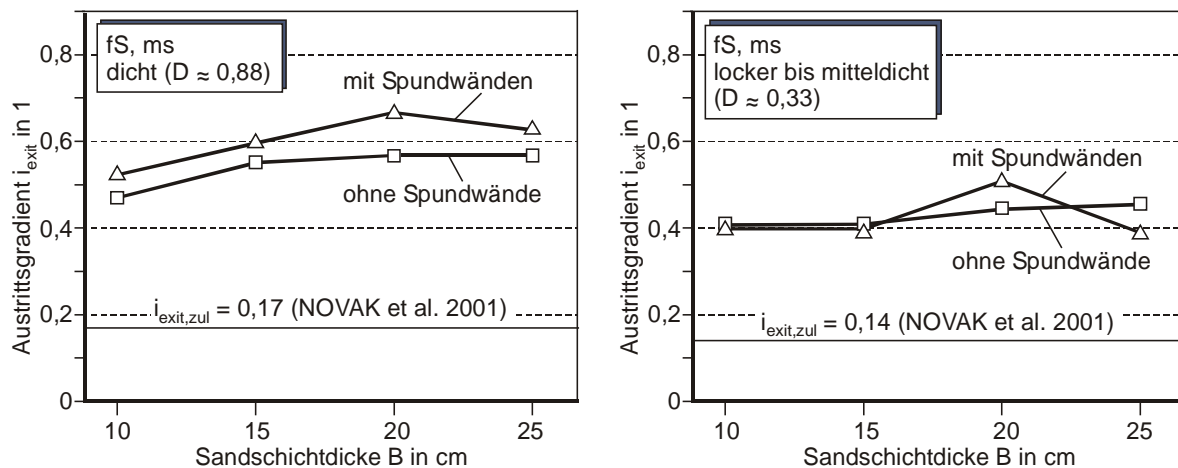


Abb. 11: Austrittsgradienten bei Beginn des Erosionsvorgangs

5 Schlussfolgerungen

Die auf der Auswertung eines Strömungsnetzes basierende Austrittsgradientenmethode ermöglicht die Berücksichtigung aller Randbedingungen der Unterströmung eines Sperrwerks. Dieser Methode sollte daher bei der Bemessung gegen rückschreitende Erosion zumindest in kritischen Fällen der Vorzug gegeben werden gegenüber den Verfahren von BLIGH, LANE oder TSCHUGAJEW.

Unterstellt man eine vertikal nach oben gerichtete Bewegung des Wassers am unterwasserseitigen Strömungsaustritt, so wäre je nach Lagerungsdichte der Beginn des Erosionsprozesses bei einem Austrittsgradienten zwischen rd. 0,9 und 1,1 zu erwarten. Die vorgestellten Versuchsergebnisse belegen, dass unter Berücksichtigung von Baugrundstörungen im Unterwasserbereich der Prozess bei deutlich kleineren (am ebenen System ermittelten) Austrittsgradienten beginnt. Für Feinsand betragen die kritischen Gradienten je nach Lagerungsdichte zwischen rd. 0,4 und 0,5.

Hierdurch wird belegt, dass der Prozess der rückschreitenden Erosion ganz wesentlich durch im Regelfall nicht erfassbare Untergrundheterogenitäten und -störungen (wie z. B. Kolkbildungen) geprägt ist. Vor diesem Hintergrund erscheint das in den zulässigen Gradienten nach NOVAK ET AL. (Tab. 3) enthaltene, relativ hohe Sicherheitsniveau gerechtfertigt. Weitere Untersuchungen bezüglich zulässiger hydraulischer Gradienten sind jedoch in jedem Fall wünschenswert und notwendig.

6 Schrifttum

- BLIGH, W.G. (1912): The Practical Design of Irrigation Works. Constable, London.
- DAVIDENKOFF, R. (1970): Unterläufigkeit von Stauwerken. Werner Verlag, Düsseldorf.
- HÜTTL, T., HERRMANN, R., HILMER, K. (1992): Modellversuche zur Rückschreitenden Erosion in gleichkörnigen rolligen Böden unter bindiger Deckschicht. Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Landesgewerbeanstalt Bayern, Heft 60.
- LANE, E.W. (1934): Security from Under-Seepage Masonry Dams on Earth Foundations. Proceedings ASCE, Transactions No. 100, p. 1235-1272.

- MANSOUR, B.G.S. (2005): Investigations on Design and Rehabilitation Options for River Barrages with Special Respect to Piping. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover, Heft 62.
- NOVAK, P., MOFFAT, A.I.B., NALLURI, C., NARAYANAN, R. (2001): Hydraulic Structures. 3rd edition, Spon Press, London/ New York.
- SELLMEIJER, J.B. (1988): On the Mechanism of Piping under Impervious Structures. Technical University of Delft, the Netherlands.
- TERZAGHI, K., PECK, R.B. (1961): Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Springer Verlag, Berlin.
- TSCHUGAJEW, R. (1956): Eine neue Methode der Berechnung der Sickerwasserbewegung. Gidrotechniceskoe stroitel'stvo 26, Moskau.