

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Richwien, A.; Meyer, N.

Nachweis der Standsicherheit von Unterwasserböschungen aus nichtbindigen Bodenarten

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102177>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Richwien, A.; Meyer, N. (2004): Nachweis der Standsicherheit von Unterwasserböschungen aus nichtbindigen Bodenarten. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Boden- und Sohl-Stabilität - Betrachtungen an der Schnittstelle zwischen Geotechnik und Wasserbau
Soil and Bed Stability - Interaction Effects between Geotechnics and Hydraulic Engineering.
Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



12 Nachweis der Standsicherheit von Unterwasserböschungen aus nichtbindigen Bodenarten

Slope stability analysis of underwater slopes in non-cohesive soils

A. Richwien

Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal
Institut of Geotechnical Engineering and Mine Surveying, Technical University Clausthal, Germany

N. Meyer

Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal
Institut of Geotechnical Engineering and Mine Surveying, Technical University Clausthal, Germany

KURZFASSUNG: Der Beitrag beschreibt einen erweiterten Standsicherheitsnachweis für Abbauböschungen unter Wasser, in dem die auftretenden hydrodynamischen Belastungen aus dem Abbau, aus Wasserspiegeldifferenzen und aus Wellen auf einfache Weise berücksichtigt werden. Grundlage ist ein Nachweis nach E DIN 4084: 2002, in den die Ergebnisse von Untersuchungen bezüglich der Porenwasserdruckreaktionen an Binnenwasserstraßen eingearbeitet wurden. Dieser Bemessungsansatz wird für den Nachweis der Standsicherheit von wasserdruckbelasteten Sand- und Kiesböschungen verwendet. Es kann gezeigt werden, dass die hydrodynamischen Einwirkungen aus dem Abbau, aus Wellen und aus Wasserspiegelschwankungen eine Abflachung der Böschung erfordern. Diese fällt allerdings deutlich geringer aus, als die Abflachung, die sich beim vereinfachten Ansatz einer böschungsp parallelen Strömung ergibt.

ABSTRACT: The intention of the paper is to include the excess pore water pressures caused by hydrodynamic loads in the conventional slope stability analysis used for the design of underwater slopes in order to optimize slope angles of submerged pits in sand and gravel. The design is based on E DIN 4884: 2002 and on the results of investigations on the pore water pressure propagation in soils which have been performed at the slopes of inland waterways. The results of the calculations show that due to the hydrodynamic impacts of operation, waves and oscillating water tables the slopes of submerged pits in sand and gravel need to be less steep. The difference in steepness is much smaller than calculated with the simplified approach with flow parallel to the slope surface.

12.1 Einleitung

Beim Nachweis der Standsicherheit der im Nassabbau von Sand und Kies entstehenden Unterwasserböschungen folgt man in der derzeitigen Genehmigungspraxis der Vorstellung, dass der Abbau der Rohstoffe unter Wasser nicht ohne beträchtliche Störung des Lagerstättenmaterials erfolgen kann.

Die Böschungen, die sich beim Abbau ergeben, können zwar vorübergehend steil sein, sie sind mit dieser Steilheit aber unter den vorstehenden Annahmen nicht dauerhaft standsicher. Bereits kleinste Störungen können zu einer Umlagerung des Bodens führen und der sich dann einstellende Böschungswinkel ist sehr viel flacher, als der Böschungswinkel der Abbauböschung. Eine analytische Beschreibung der beim Abbruch auftretenden Umlagerungsprozesse ist jedoch zurzeit nicht möglich /Richwien & Meyer 2002/.

Da der Abbau von Sand und Kies der Genehmigungspflicht durch eine Aufsichtsbehörde unterliegt, müssen im Rahmen des jeweiligen Genehmigungsverfahrens auch die Standsicherheiten der Abbauböschungen nachgewiesen werden. Nach /Meyer & Fritz 2001/ kann bei einem schonenden Abbau der Standsicherheitsnachweis entsprechend DIN 4084 geführt werden.

Meyer & Fritz sprechen aber auch davon, dass in der Praxis von einem nichtschonenden Abbau ausgegangen werden muss. Nichtschonender Abbau geht immer mit der beschriebenen Bodenumlagerung einher. Da diese Bodenumlagerung in den Standsicherheitsnachweisen nicht direkt berücksichtigt werden kann, verlangen einige Aufsichtsbehörden (so z. B. das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung, NLFb) beim rechnerischen Nachweis der Abbauböschungen den Ansatz einer böschungsp parallelen Strömung. Die Auswirkungen auf den maximal möglichen Neigungswinkel der rechnerisch standsicheren Böschung sind enorm.

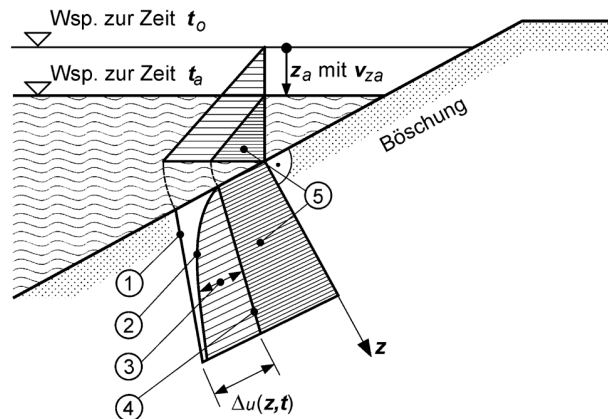
Für einen lockeren nichtbindigen Boden entspricht die natürliche Böschungneigung etwa dem Winkel der inneren Reibung des Böschungsmaterials. Setzt man aber eine böschungsp parallele Strömung an, so verringert sich der zulässige Böschungswinkel etwa auf den halben Reibungswinkel. Bei Einhaltung dieser Sicherheitsanforderung müssen die Böschungen relativ flach ausgebildet werden. Dieser Ansatz wird damit den Sicherheitsbedingungen gerecht, widerspricht aber der gesellschaftspolitischen Forderung nach Ressourcenschonung. Damit geht es nicht nur darum, die Böschung sicher zu gestalten sondern vielmehr die Böschungneigungen so zu optimieren, dass sie bei Ausnutzung der verfügbaren Bodenfestigkeit genauso steil sind, wie es die Standsicherheit erlaubt.

12.2 Instationärer Porenwasserüberdruck an wasserdruckbelasteten Abbauböschungen

Durch den Gehalt an gasförmigen Bestandteilen im Porenwasser ist die durch Wasserspiegeländerungen ausgelöste Porenwasserdruckverteilung im Boden stark von der Absinkgeschwindigkeit v_{za} [m/s] und von der Wasserdurchlässigkeit des Bodens k [m/s] abhängig. Handelt es sich nämlich um einen schnell fallenden Wasserspiegel, der in erster Näherung definiert ist für:

$$v_{za} \geq k \tag{12-1}$$

dann kann die Druckänderung im Porenwasser des anstehenden Bodens den Wasserspiegeländerungen nicht direkt folgen. Unterhalb des wasserdruckbelasteten Bodens kommt es zu dem in Bild 12.1 dargestellten zeitlich und tiefenabhängig veränderlichen instationären Porenwasserüberdruck $\Delta u(z, t)$.



- Legende :
- ① Porenwasserdruck zur Zeit t_0
 - ② Porenwasserdruck zur Zeit t_a
 - ③ Porenwasserüberdruck Δu zur Zeit $t = t_a$
 - ④ Porenwasserdruck zur Zeit $t = t_{\infty}$
 - ⑤ Hydrostatischer Druckanteil für $t = t_a$
 - z_a Wasserspiegelabsenk
 - v_{za} Absinkgeschwindigkeit ($v_{za} = \frac{z_a}{t_a}$)
 - Δu Porenwasserüberdruck
 - z Tiefe im Boden senkrecht zur Böschung

Bild 12.1: Hydrostatischer Porenwasserdruck und Porenwasserüberdruck während eines schnellen Wasserspiegelabsinks mit $v_{za} \geq k$ /BAW 2004/

Dieser instationäre Porenwasserüberdruck lässt sich nach /Köhler 1989/ und /de Groot 1988/ vereinfacht mit der Exponentialfunktion nach Gleichung (12-2) beschreiben:

$$\Delta u(z, t) = \gamma_w \cdot z_A \cdot (1 - a(t) \cdot e^{-b(t) \cdot z}) \quad (12-2)$$

In dieser Funktion ist γ_w [kN/m³] die Wichte des Wassers, z_A [m] der Absink zum Zeitpunkt t [s] und z [m] ist die Tiefe unter der Böschungs- bzw. Sohl-oberfläche. Das Absinkmaß $\gamma_w \cdot z_A$ wird in Gleichung (12-2) mit dem Dämpfungsglied einer exponentiellen Übertragungsfunktion multipliziert, die beiden Porenwasserdruckparameter $a(t)$ [-] und $b(t)$ [1/m] beschreiben die Krümmung der Exponentialfunktion und damit die Größe des Porenwasserüberdrucks.

Nach einer Analyse weiterer Messergebnisse konnte Gleichung (12-2) weiter vereinfacht werden:

$$\Delta u(z) = \gamma_w \cdot z_A \cdot (1 - e^{-b \cdot z}) \quad (12-3)$$

Die Größe des b -Werts wird allgemein aus Naturmessungen ermittelt, alternativ kann aber auch eine rechnerische Abschätzung des b -Werts nach /Schulz 1986/ erfolgen:

$$b = \sqrt{\frac{\gamma_w \cdot (n \cdot \beta_F + 1/E_s) \cdot \pi}{2 \cdot k \cdot t_A}} = \sqrt{\frac{S_s \cdot \pi}{2 \cdot k \cdot t_A}} \quad (12-4)$$

Der Porenwasserdruckparameter b beschreibt also die spezifischen Last- und Bodeneigenschaften und wird über den theoretischen Zusammenhang zwischen der Zusammendrückbarkeit von Boden und Porenwasser, dem Durchlässigkeitsbeiwert k und der maßgebenden Absinkzeit t_A definiert.

Die Druckdämpfung im Böschungsuntergrund wird in Gleichung (12-4) durch den spezifischen Speicherkoeffizienten S_s berücksichtigt:

$$S_s = \gamma_w \cdot (n \cdot \beta_F + 1/E_s) \quad (12-5)$$

In dieser Gleichung steht β_F [m²/kN] für die Kompressibilität des Luft-Wasser-Gemisches, γ_w [kN/m³] ist die Wichte des Wassers, $1/E_s$ [m²/kN] die Kompressibilität des Bodens und n [-] steht für das Porenvolumen.

/Köhler & Asami 2002/ beschreiben ein einfaches Vorgehen, um den Lastfall schnelle Spiegelsenkung im Standsicherheitsnachweis für Böschungen zu berücksichtigen. Sie konnten zeigen, dass der Ansatz eines spezifischen Speicherkoeffizienten S_s nach Gleichung (12-5) in einem kommerziellen, rechnergestützten Programmsystem (hier: GGU-TRANSIENT, Version 4.02) zu vergleichbaren Potentialdruckverhältnissen für den Lastfall schnelle Spiegelsenkung führt, wie sie sich auch bei Anwendung der Exponentialfunktion nach Gleichung (12-2) ergeben würden. Damit ist es möglich, die Belastung der Böschung aus schnellen Wasserspiegeländerungen auch bei der Standsicherheitsberechnung mit

marktüblichen Rechenprogrammen zu berücksichtigen.

12.3 Zusätzliche Berücksichtigung der Wellenbelastung im Nachweis nach E DIN 4084

12.3.1 Einflüsse auf die Größe der Druckdämpfung bei Abbauböschungen

In verschiedenen Untersuchungen, z. B. von /Köhler 1989/ und /Alberts 2001/, konnte gezeigt werden, dass der Baugrund mit einem Porenwasserüberdruck auf hydrodynamische Belastungen reagiert. Einfluss auf die Größe der Druckdämpfung haben die Größe der hydraulischen Belastung, die Durchlässigkeit des Bodens, die Sicherung der Böschung und die Wassertiefe.

Die Größe der hydraulischen Belastung ergibt sich bei Abbauböschungen aus den Abbauwellen, den Windwellen und aus natürlichen Wasserspiegeländerungen. Sie wird über die Größe des erzeugten Absinks z_A vor der Böschung erfasst, die mittlere Absinkgeschwindigkeit v_{zA} ergibt sich aus der zugehörigen Absinkdauer t_A zu:

$$v_{zA} = z_A / t_A \quad (12-6)$$

Aus typischen Körnungslinien für abgebaute Kiese und Sande kann die Bandbreite der k -Werte abgeschätzt werden. Für die betrachteten Bodenarten liegt sie zwischen 1×10^{-9} m/s < k < 1×10^{-3} m/s. Je größer die Wasserdurchlässigkeit, desto schneller kann sich der Porenwasserdruck den veränderten Belastungen anpassen und desto kleiner ist der instationäre Porenwasserüberdruck im Boden. Für Werte $k > 5 \cdot 10^{-5}$ m/s wird angenommen, dass die Druckänderung im Porenwasser des anstehenden Bodens den Wasserspiegeländerungen im Baggersee ohne Aufbau von Porenwasserüberdrücken folgen kann. Der Einfluss instationärer Porenwasserüberdrücke ist in diesen Fällen von untergeordneter Bedeutung.

Die Wassertiefe geht bei der Berechnung des Porenwasserüberdrucks über den Sättigungsgrad S ein. Allgemein gilt, dass bei größerem Sättigungsgrad des Bodens der Luftporenanteil im Boden kleiner wird. Bild 12.2 zeigt, dass die Sättigung des Bodens mit der Tiefe zunimmt, damit nimmt der Luftporenanteil mit der Tiefe ab.

Generell ist der Einfluss instationärer Porenwasserüberdrücke auf böschungsparelle Zonen beschränkt. Er ist damit bei den meist hohen Abbauböschungen geringer als an Binnenwasserstraßen, weil bei diesen die maßgebenden Gleitfugen weniger tief einbinden.

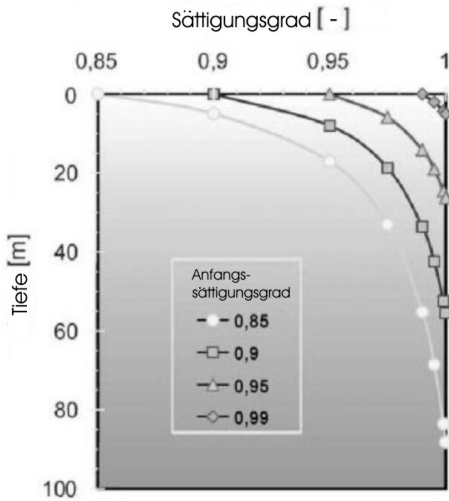


Bild 12.2: Verteilung des Sättigungsgrads S über die Tiefe z unterhalb der Wasser-Boden-Grenzfläche in Abhängigkeit vom Ausgangssättigungsgrad S_0 und Ausgangsporenvolumen n_0 /Köhler 2001/

12.3.2 Eingangsparmeter der Berechnung

Die Einflussgrößen des Böschungsbruchproblems lassen sich in drei Gruppen einteilen: Daten zur Böschungsgeometrie, Bodenkennwerte und Parameter zur Lasteinwirkung. In der nachfolgenden Tabelle 12.1 sind die maßgebenden Größen zusammengestellt.

	Physikalische Bedeutung	Bezeichnung
Geometrie	Böschungsneigung	β [°]
	Böschungshöhe	h [m]
	Höhe Grundwasserspiegel	h_{GW} [m]
	Höhe Außenwasserspiegel	h_{AW} [m]
Bodenkennwerte	Wichte des feuchten Bodens	γ [kN/m³]
	wirksamer Winkel der inneren Reibung des Bodens	φ' [°]
	wirksame Kohäsion des Bodens	c' [kN/m²]
	kapillare Steighöhe	h_c [m]
	Kapillarkohäsion	c_c [kN/m²]
Lasteinwirkungen	unbegrenzte Flächenlast	q (p) [kN/m²]
	auf b begrenzte Flächenlast	$q \cdot b$ ($p \cdot b$) [kN/m]
	Sicherheitsstreifenbreite	a [m]
	zusätzliche stationäre Strömungskraft	S_{Nat} [kN/m]
	Instationärer Porenwasserüberdruck infolge periodischer Wasserstandswechsel	$\Delta u(z)$ [kN/m²]

Tabelle 12.1: Eingangsparmeter

Die Böschungsgeometrie wird durch die Böschungsneigung β [°], die Böschungshöhe h [m] und die Lage von Außenwasser- und Grundwasserspiegel h_{AW} [m] und h_{GW} [m] bestimmt.

Das ursprüngliche Gefälle des Grundwasserspiegels ist im Baggersee aufgehoben. Durch die an den Böschungen eintretende Konzentration des Grundwassergefälles kommt es zu unterschiedlichen Wasserständen in und vor der Böschung, die durch h_{AW} und h_{GW} definiert sind. Die Lage von h_{AW} und h_{GW} zueinander bestimmt die Strömungsverhältnisse in der Böschung (E DIN 4084: 2002). In den Berechnungen werden die drei in Tabelle 12.2 zusammengestellten Strömungsfälle unterschieden.

Die Größe der möglichen Wasserspiegeldifferenzen Δh zwischen freiem Wasserspiegel und Grundwasserspiegel ergeben sich aus dem Fließgefälle des Grundwassers und der Ausdehnung des Baggersees in Fließrichtung. Für den hier vorliegenden Fall wird ein Fließgefälle von unter 1‰ angenommen, das entspricht einer Wasserspiegeldifferenz vor der Böschung von rd. $\Delta h \leq 0,5$ m bei 1000 m Baggerseebreite.

Zielgröße der Berechnung ist die Böschungsneigung β . Die Böschungshöhe h wird in den Berechnungen in einem für Abbauböschungen relevanten Bereich zwischen $h_{min} = 3$ m und $h_{max} = 40$ m variiert.

	1	2	3
Strömungsfall	$h_{AW} = h_{GW}$	$h_{AW} < h_{GW}$	$h_{AW} > h_{GW}$
	$\Delta h = 0$	$\Delta h < 0$	$\Delta h > 0$
Wasserspiegeldifferenz Δh			
Auswirkung	keine Strömung	Strömung aus der Böschung	Strömung in die Böschung
Berücksichtigung im Standsicherheitsnachweis	-	stationäre GW-Strömung	stationäre GW-Strömung

Tabelle 12.2: Strömungsfälle bezogen auf die Wasserspiegeldifferenz Δh zwischen h_{AW} [m] und h_{GW} [m]

Maßgebende Bodenkennwerte sind die Wichte und die Scherparameter. Beim Erschließen von Sand- und Kieslagerstätten wird in den meisten Fällen nur eine orientierende Erkundung zur Beurteilung der Bodenart durchgeführt. Bodenkennwerte sind DIN 1055-T. 2: 1976 und den Empfehlungen der EAU (1996 bzw. 2004) zu entnehmen. Für die Beispielrechnungen wird ein homogener Bodenaufbau angenommen, der mit einem einheitlichen Parametersatz aus Bodenkennwerten entsprechend DIN bzw. EAU beschrieben wird. Gewählt wurde hier ein kohäsionsloser Boden mit einem wirksamen Reibungs-

Einwirkung	Absunk z_A [m]	Absunkzeit t_A [s]	Absunkgeschwindigkeit v_{zA} [m/s]	Begründung
Wind $\lambda = 14$ m/s	$z_{A(\text{Wind})} = 0,24$	$t_{A(\text{Wind})} = 1,2$	$v_{zA(\text{Wind})} = 2,0 \cdot 10^{-1}$	nach BAW, 2004: $\lambda = 8 - 14$ m/s gew.: max $F_{\text{eff}} = 2$ km
natürliche Wasserspiegelschwankung	$z_{A(\text{nat})} = 0,50$	$t_{A(\text{nat})} = 86400$	$v_{zA(\text{nat})} = 5,8 \cdot 10^{-6}$	im Durchschnitt nat. Wasserspiegelschwankung von 0,5 m/Tag in einem Baggersee
Abbau	$z_{A(\text{Abbau})} = 0,60$	$t_{A(\text{Abbau})} = 5$	$v_{zA(\text{Abbau})} = 1,2 \cdot 10^{-1}$	durchschnittlicher Wert für eine Schiffsvorbeifahrt

Tabelle 12.3: Maßgebende Werte für Absunk z_A [m], Absunkzeiten t_A [s] und Absunkgeschwindigkeiten v_{zA} [m/s] an Baggerseen

winkel von $\varphi_k' = 30^\circ$. Grundsätzlich ist auch die Ein-gabe eines geschichteten Baugrundaufbaus möglich.

Zusätzliche Belastungen oberhalb der Böschung ergeben sich bei Sand- und Kiesgrubenböschungen hauptsächlich aus Betriebslasten q [kN/m²] (Bagger, Abfüllanlagen, Materialdeponien) oder Verkehrslasten p [kN/m²]. Im Rahmen der Berechnungen werden mögliche Lastkombinationen für Abbauböschungen nach den Empfehlungen von EAU (1996) und EAB (1994) angenommen. Weitere Lasteinwirkungen ergeben sich aus Wellen in der Wasserwechselzone. Diese bewirken periodische Wasserstandswechsel, die die zuvor beschriebenen instationären Strömungskräfte im Boden erzeugen können. Im Fall von Abbauböschungen müssen insbesondere die Wellen aus dem laufenden Abbaubetrieb, winderzeugte Wellen und natürliche Wasserspiegelschwankungen berücksichtigt werden. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte nicht auf Messwerte für die auftretenden Wellen zurückgegriffen werden, so dass zunächst realistische Werte für Absunk z_A und Absunkzeiten t_A auf der Grundlage von vorliegenden Erfahrungswerten angenommen werden müssen. In Tabelle 12.3 sind die Ergebnisse dieser Überlegungen zusammengestellt.

Windwellen und Wellen aus natürlichen Wasserspiegelschwankungen werden im Rahmen der Standsicherheitsberechnungen durch instationäre Porenwasserüberdrücke $\Delta u(z)$ erfasst, deren Größe mit dem vereinfachten Rechenansatz nach Gleichung (12-3) berechnet bzw. im rechnergestützten Programm über den spezifischen Speicherkoeffizienten S_s nach Gleichung (12-5) berücksichtigt werden.

Abbauwellen können ebenso wie Windwellen als vorübergehende Einwirkung betrachtet werden. Geht man davon aus, dass der Baggerbetrieb über 24 h/Tag erfolgt, erzeugt der Abbau eine kontinuierliche Welle und damit eine fortlaufende Belastung der Böschung. Auch der Einfluss der Abbauwellen wird

daher durch eine zusätzliche instationäre Strömungskraft erfasst. Dazu wird die Wasserspiegeldifferenz Δh zwischen Außen- und Grundwasserspiegel um das Absunkmaß der Abbauwelle $z_{A(\text{Abbau})}$ erhöht.

12.3.3 Berechnung instationärer Porenwasserüberdrücke und Berücksichtigung der Wellenbelastung im Nachweis nach E DIN 4084

Bei der Berechnung der instationären Porenwasserüberdrücke nach Gleichung (12-3) wird der Porenwasserdruckparameter b aus einem Bemessungsdiagramm, wie es in Bild 12.3 dargestellt ist, abgelesen.

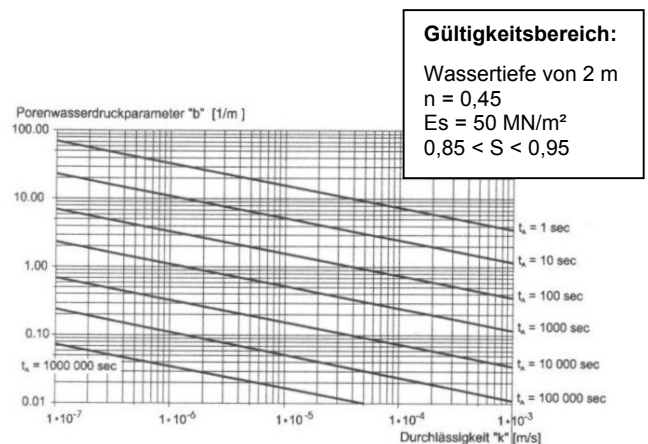


Bild 12.3: Bemessungsdiagramm (EAU, 2004)

Das Bemessungsdiagramm liefert den b -Wert in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des Bodens und der zugehörigen Absunkzeit t_A . Die b -Werte können für Absunkzeiten zwischen $t_A = 1$ s

und $t_A = 1.000.000$ s und für Wasserdurchlässigkeiten zwischen $1 \cdot 10^{-7}$ m/s $< k < 1 \cdot 10^{-3}$ m/s abgelesen werden, der Gültigkeitsbereich des Diagramms ist in Bild 12.3 angegeben.

Um das Bemessungsdiagramm auf Abbauböschungen unter Wasser anwenden zu können, ist eine Erweiterung des Diagramms auf Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte bis $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s und eine Modifizierung des Diagramms im Hinblick auf die mittlere Wassertiefe h_0 notwendig. Die mittlere Wassertiefe von Gewinnungsseen kann zwischen rd. 1,5 m und rd. 20 m oder mehr liegen, und ist damit unter Umständen deutlich größer, als die für das Diagramm in Bild 12.3 geltende mittlere Wassertiefe von $h_0 = 2$ m. Bild 12.4 zeigt beispielhaft ein modifiziertes Bemessungsdiagramm für eine mittlere Wassertiefe von $h_0 = 15$ m /Richwien & Meyer 2004/. Genau genommen müssen diese aus vorliegenden Messungen weiterentwickelten b-Werte aber noch verifiziert werden, der grundsätzliche Einfluss auf den Nachweis der Standsicherheit ist davon aber unberührt.

12.4 Durchführung der Berechnungen

Die im Folgenden ausgewerteten Berechnungen wurden mit den Programmen GGU-STABILITY, Version 6.24 (Standsicherheitsberechnung), GGU-SS-

FLOW2D, Version 7.57 (stationäre Strömungen) und GGU-TRANSIENT, Version 4.02 (instationäre Strömungen) von GGU Software durchgeführt.

Die Standsicherheitsnachweise werden nach E DIN 4084: 2002 geführt. Zielgröße der Berechnung ist die Böschungsneigung β . Sie wird so lange variiert, bis sich bei der Standsicherheitsberechnung unter Beachtung der Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054: 2003 ein Ausnutzungsgrad von $\mu = 1$ ergibt.

Die hydrodynamischen Einwirkungen aus dem Sand- und Kiesabbau werden durch eine Abbauwelle berücksichtigt. Außerdem wird die Auswirkung einer schnellen Spiegelsenkung infolge von Windwellen berücksichtigt. Dazu wird der Porenwasserüberdruck durch das Aufbringen eines periodischen Wasserstandswechsels, abhängig von der Lage des Ruhewasserspiegels, vom Absink z_A und von der Absinkzeit t_A ermittelt.

Wie bereits erwähnt, erlaubt das gewählte Programm keine direkte Eingabe des Porenwasserüberdrucks $\Delta u(z)$ nach Gleichung (12-3). Der Porenwasserüberdruck wird aber im spezifischen Speicherkoeffizienten S_s erfasst. Schreibt man die Gleichung (12-4) für den b-Wert nach S_s um, so ergibt sich:

$$S_s = [2 \cdot k \cdot t_A / \pi] \cdot b^2 \tag{12-6}$$

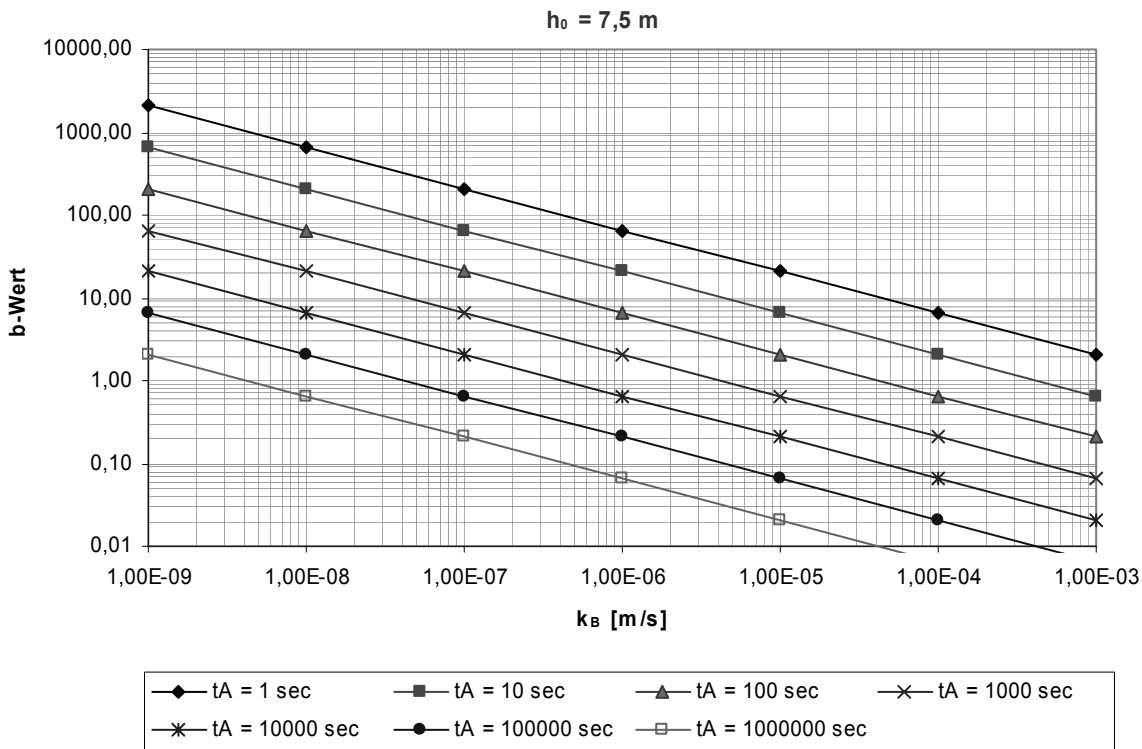


Bild 12.4: Modifiziertes Bemessungsdiagramm zur Bestimmung des Porenwasserdruckparameters b für eine mittlere Wassertiefe von $h_0 = 7,5$ m, $E_s = 50.000$ kN/m², $n = 0,45$ und $S = 0,9$

Mit den b-Werten aus dem zugehörigen modifizierten Bemessungsdiagrammen (Bild 12.4) lässt sich der spezifische Speicherkoeffizient (abhängig von der mittleren Wassertiefe h_0 , dem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k und der Absinkzeit t_A) als weiterer Bodenkennwert für das Rechenprogramm GGU-TRANSIENT berechnen.

Die Bemessungsgleichung ist nach E DIN 4084: 2002 mit den Bemessungswerten der Einwirkungen und Widerstände aufzustellen. Die Teilsicherheitsbeiwerte sind dabei abhängig vom Lastfall nach DIN 1054: 2003 zu wählen. Dabei sollte zwischen Arbeitsböschungen und Endböschungen unterschieden werden. Eine Arbeitsböschung ist in diesem Zusammenhang eine fortschreitende Böschung, an der die nutzbaren Rohstoffe gewonnen werden, die in der Regel nur kurzzeitig frei steht und die ihre Lage mit dem Abbaufortschritt in Richtung der Genehmigungsgrenzen verändert. Maßgebend ist hier der LF 2: Bauzustand. Eine Endböschung ist eine Abbauböschung an den Rändern des Gewinnungssees, die längere Zeit unverändert stehen bleibt. Für Endböschungen sind die Teilsicherheitsbeiwerte des LF 1: Endzustand anzunehmen.

Die Bemessungsgleichung lautet:

$$E_M/R_M = \mu \quad (12-7)$$

In dieser Gleichung steht E_M für das resultierende Moment um den Gleitkreismittelpunkt aus den Einwirkungen. R_M ist das resultierende Moment um den Gleitkreismittelpunkt aus den Widerständen. Die Belastung aus der natürlichen Wasserspiegelschwankung geht als zusätzliche Einwirkung in Form einer Strömungskraft in die Bemessungsgleichung ein und der instationäre Porenwasserüberdruck wird als $\Delta u(z)$ auf der Widerstandsseite berücksichtigt.

$$E_M = r \cdot \sum (G_i + P_{Vi}) \cdot \sin \vartheta_i + (\sum M_S + S_{Nat} \cdot a_s) \quad (12-8)$$

$$R_M = r \cdot \sum \frac{[G_i + P_{Vi} - [(u_i + \Delta u_i(z)) \cdot b_{Li}]] \cdot \tan \varphi_i}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \tan \varphi_i \cdot \sin \vartheta_i} \quad (12-9)$$

Nachdem alle Kenngrößen eingegeben sind, erfolgt die Festlegung der Gleitlinie für einen globalen Böschungsbruch. Lokale Versagenseffekte müssen an Baggerseeböschungen durch entsprechende konstruktive Maßnahmen (Bepflanzung) vermieden werden und sind dann für die vorliegenden Untersuchungen ohne Bedeutung.

12.5 Berechnungsergebnisse

12.5.1 Allgemeines

Erste Beispielberechnungen wurden für eine Arbeitsböschung (LF 2: Bauzustand) mit einer Flächenlast von $p = 10 \text{ kN/m}^2$ (allgemeiner Verkehr) auf der Böschungsschulter durchgeführt. Berechnet wurden Böschungen der Höhe $h = 3, 5, 10, 15,$ und 20 m . Für jede Böschungshöhe wurden die drei Strömungsfälle nach Tabelle 12.2 ausgewertet, wobei immer davon ausgegangen wurde, dass der Grundwasserstand rd. $0,5 \text{ m}$ unterhalb der Böschungsschulter ansteht. Als Reibungswinkel wurde $\varphi_k' = 30^\circ$ gewählt und die Durchlässigkeit mit $k = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Für den Absink aus Abbau und Wind ($Z_{A(\text{Abbau})}$, $Z_{A(\text{Wind})}$) sowie die Absinkzeit ($t_{A(\text{Abbau})}$, $t_{A(\text{Wind})}$) wurden die Werte nach Tabelle 12.3 angesetzt. Der Einfluss der in Tabelle 12.3 angegebenen natürlichen Wasserspiegelschwankung auf die Böschungsstandsicherheit ist wegen der langen Absinkzeit sehr gering, so dass dies in den Berechnungen als stationäre Strömung S_{Nat} berücksichtigt wurde.

12.5.2 Ergebniszusammenstellung

In Tabelle 12.4 sind die Ergebnisse der Berechnungen zusammengestellt. Für jede der Beispielrechnungen ist die maximal mögliche Böschungsneigung $\max \beta$ [°] angegeben, die sich für einen Ausnutzungsgrad von $\mu = 1$ für den Nachweis nach E DIN 4084: 2002 ($\max \beta_{DIN}$) und mit Berücksichtigung der hydrodynamischen Belastung aus Abbaueinflüssen und Wellen ($\max \beta_{NEU}$) ergibt.

In Spalte 1 der Tabelle 12.4 ist die Böschungshöhe h [m] angegeben. Jede Böschungshöhe wurde für die Strömungsfälle nach Tabelle 12.2 berechnet (Spalte 2). Weiterhin sind in Spalte 3 Angaben zum Lastfall nach DIN 1054: 2003, zur Größe der Lasteinwirkung auf der Böschungsschulter und zum gewählten Wasserdurchlässigkeitsbeiwert gegeben. Diese Werte wurden in den gezeigten Beispielrechnungen immer gleich gewählt.

Den Spalten 4 bis 6 können die Berechnungsergebnisse entnommen werden. Die Ergebnisse der Berechnung ohne die Einwirkungen aus dem Abbau und aus Wellen ($\max \beta_{DIN}$) sind in Spalte 4 zusammengestellt. In Spalte 5 sind die Berechnungsergebnisse $\max \beta_{NEU}$ für den Standsicherheitsnachweis unter Berücksichtigung hydrodynamischer Belastungen aufgeführt und in Spalte 6 ist die Differenz $\Delta \beta = (\max \beta_{DIN} - \max \beta_{NEU})$ ermittelt worden.

Grundsätzlich müssen die Böschungen flacher sein, wenn die hydrodynamischen Einwirkungen im Standsicherheitsnachweis berücksichtigt werden. Dies ist auch konsequent, da es sich in allen Fällen um zusätzliche Belastungen handelt.

1	2	3	4	5	6
Böschungshöhe h [m]	Strömungsfall wie Tab. 12-2	Sonstige Randbedingungen (für alle untersuchten Beispiele gleich)	max β_{DIN} [°]	max β_{NEU} [°]	$\Delta\beta$ [°]
20	1	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,8	28,0	0,8
15	1	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,4	27,6	0,8
10	1	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,2	26,8	1,4
5	1	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	27,0	25,0	2,0
3	1	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	26,6	22,8	3,8
20	2	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,0	27,2	0,8
15	2	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	27,6	26,8	0,8
10	2	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	27,0	25,5	1,5
5	2	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	25,2	23,0	2,2
3	2	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	23,0	20,5	2,5
20	3	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,8	28,4	0,4
15	3	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,8	28,4	0,4
10	3	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	29,4	27,8	1,6
5	3	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,8	26,8	2,0
3	3	LF 2 mit $p = 10 \text{ kN/m}^2$, $k_B = 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	28,3	25,2	3,1

Tabelle 12.4: Zusammenstellung einer Auswahl von Berechnungsergebnissen

Der Einfluss der hydraulischen Einwirkungen ist umso größer, je geringer die Böschungshöhe ist. Bei kleinen Böschungshöhen von $h = 3 \text{ m}$ ergibt sich aus den hydrodynamischen Einwirkungen eine Abflachung der Böschung um maximal $3,8^\circ$. Für den gleichen Strömungsfall ist die Differenz $\Delta\beta$ bei einer Böschungshöhe von $h = 20 \text{ m}$ kleiner als 1° und liefert damit ein Ergebnis, das fast genau mit dem ohne Berücksichtigung der hydrodynamischen Einwirkungen aus Abbau und Wellen übereinstimmt (Bild 12.5). Auch das ist folgerichtig, denn die aufgebrauchte hydrodynamische Belastung, die über den Absink $Z_{A(\text{Abbau})}$ und $Z_{A(\text{Wind})}$ definiert wird, wurde für alle Beispiele gleich angesetzt. Bei kleinen Bö-

schungshöhen macht sich die Auswirkung des instationären Porenwasserüberdrucks $\Delta u(z)$ daher stärker bemerkbar, als bei hohen Böschungen.

Ist die Differenz $\Delta\beta < 1,0^\circ$, lohnt sich der Aufwand einer Berechnung unter Berücksichtigung hydrodynamischer Belastungen nicht mehr, der Standsicherheitsnachweis kann dann ohne die Berücksichtigung dieser Einwirkungen durchgeführt werden. Der Ansatz von Abbau- und Windwellen ist damit nur nötig und sinnvoll für Böschungshöhen zwischen rd. 3 und rd. 15 m (Bild 12.5), und natürlich auch für die lokale Standsicherheit in einem Bereich um den Wasserpiegel des Abbauseses herum (Wasserwechselzone).

12.5.3 Kritische Bewertung der Ergebnisse

Ein wichtiges Ziel bei der Entwicklung des erweiterten Standsicherheitsnachweises war es, die hydrodynamischen Einwirkungen aus dem Abbau und aus Wellen auf möglichst einfach Art und Weise zu berücksichtigen. Daher folgt der vorgestellte Standsicherheitsnachweis der Vorgehensweise nach E DIN 4084: 2002, enthält aber zusätzliche Einwirkungen aus instationären Strömungskräften infolge der Abbautätigkeit, aus Wellen und aus schnellen Wasserspiegeländerungen. Der Nachweis ist damit mit Hilfe der marktüblichen Rechenprogramme möglich.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass es bei hohen Abbauböschungen ausreicht, die Standsicherheit der Gesamtböschung ohne Berücksichtigung hydrodynamischer Einflüsse nachzuweisen. Bei kleinen Böschungshöhen darf dagegen auf die Berücksichtigung hydrodynamischer Einflüsse nicht

verzichtet werden. Dies gilt ebenso für die lokale Standsicherheit um den Wasserspiegel im Abbausee herum, sofern diese nicht durch konstruktive Maßnahmen sichergestellt wird.

Bezüglich der hydrodynamischen Belastungen ist allerdings anzumerken, dass die angenommene Größenordnung von Absenk ($z_{A(\text{Abbau})}$ und $z_{A(\text{Wind})}$) und Absenkzeit ($t_{A(\text{Abbau})}$ und $t_{A(\text{Wind})}$) aus Erfahrungswerten an Wasserstraßen abgeleitet wurden. Die Werte für den Absenk aus Abbauwellen und Windwellen stammen aus Empfehlungen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Bundeswasserstraße /BAW 2004/ und wurden direkt auf Abbaugeräte übertragen. Um eine genaue Bemessung der Abbauböschungen vornehmen zu können, sollten diese Werte für die Bedingungen an Baggerseen überprüft werden. Prinzipiell können die Werte für Absenk und Absenkzeit infolge von Abbaubetrieb und Wind kleiner oder größer sein, als die in den Berechnungsbeispielen angenommenen Werte.

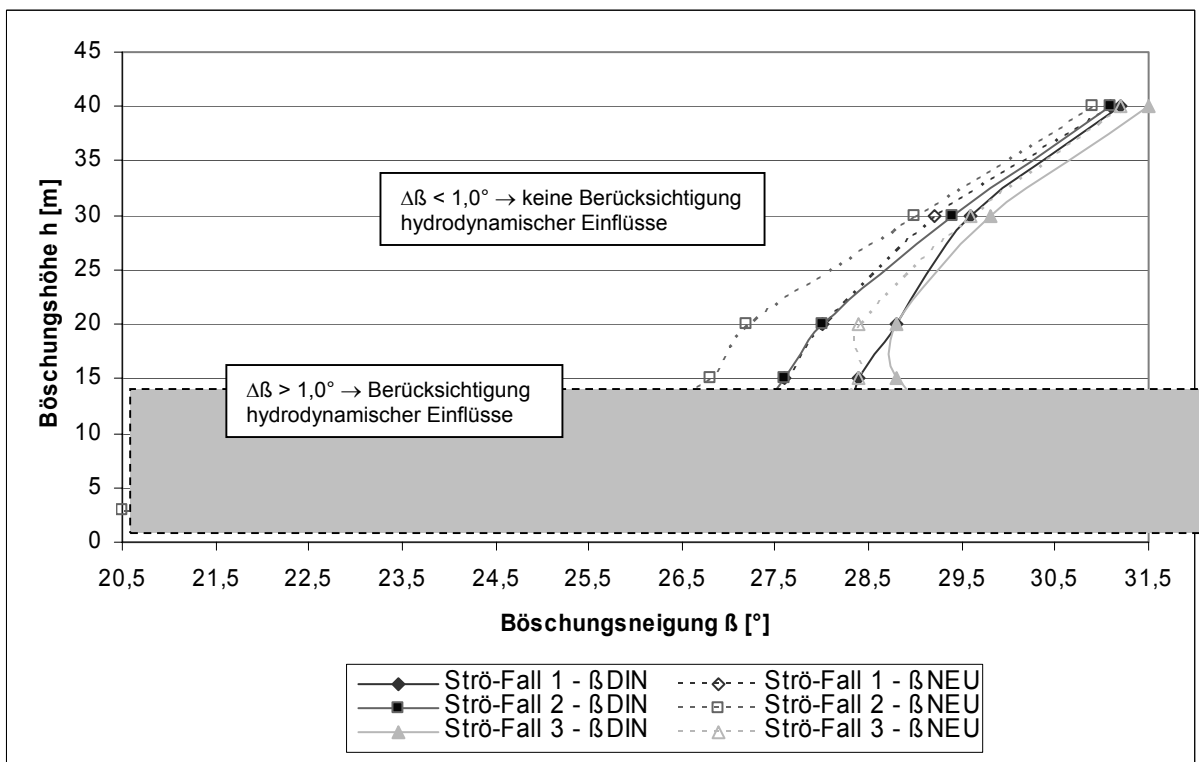


Bild 12.5: Darstellung der maximal möglichen Böschungsneigungen β_{DIN} [°] und β_{NEU} [°] über die Höhe h [m] in Abhängigkeit vom Strömungsfall

Der Ansatz einer böschungparallelen Strömung (wie von einigen Genehmigungsbehörden gefordert) liefert Böschungsneigungen, die nur etwa dem halben Winkel der inneren Reibung entsprechen, und zwar unabhängig von der Böschungshöhe. Dieser Ansatz ist damit hinsichtlich der Standsicherheit überzogen und er wird dem Aspekt der Ressourcenschonung nicht gerecht.

12.6 Zusammenfassung und Ausblick

Ein wesentlicher Aspekt bei der Planung von Abbauvorkommen ist die Wirtschaftlichkeit des Abbaus und die Ressourcenschonung. Allgemein gilt, je flacher eine Randböschung ausgebildet werden muss, desto mehr Rohstoff verbleibt in der Lagerstätte, umso unwirtschaftlicher ist der Abbau und umso weniger werden die verfügbaren Ressourcen an Sand und Kies geschont. Je steiler die Bö-

schung ist, umso wirtschaftlicher wird der Abbau und umso vollständiger werden die Vorkommen abgebaut, zugleich steigt die Gefahr eines Böschungsbruchs, wenn die Bodenfestigkeit den mit steilerer Böschung größer werdenden Einwirkungen nicht mehr Stand halten kann. Die Böschungsneigung ist also im Interesse von Standsicherheit, Ressourcenschonung und Wirtschaftlichkeit so steil auszuführen, wie es die verfügbare Bodenfestigkeit unter Berücksichtigung aller Einwirkungen erlaubt.

Der einfache Ansatz einer böschungsparellen Strömung zur Erfassung der Einwirkungen aus Abbau, Wellen und Wasserspiegelschwankungen wird dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und der Ressourcenschonung nicht gerecht. Daher wurde überlegt, ob es möglich ist, einen praxistauglichen Standsicherheitsnachweis für Abbauböschungen unter Wasser zu entwickeln, in dem die auftretenden hydrodynamischen Belastungen mit der notwendigen Genauigkeit der Formulierung, gleichzeitig aber auf einfache Weise, berücksichtigt werden. Im Hinblick auf die Praxistauglichkeit wurden die hydrodynamischen Belastungen aus Abbau, Wellen und Wasserspiegeländerungen durch zusätzliche instationäre Strömungskräfte im Standsicherheitsnachweis nach E DIN 4084: 2002 berücksichtigt.

Die vorstehend zusammengestellten Berechnungsergebnisse zeigen, dass eine Berücksichtigung der hydrodynamischen Belastungen bei geringen Böschungshöhen durchaus erforderlich ist. Bei großen Böschungshöhen bleibt der Einfluss der Einwirkungen aus Abbau, Wellen und Wasserspiegeländerungen auf lokale Böschungsbereiche beschränkt, der Nachweis der Standsicherheit der Gesamtböschung kann dann ohne die Berücksichtigung dieser Einwirkungen erfolgen.

Für eine praxistaugliche Weiterentwicklung des hiermit erstmals vorgestellten Standsicherheitsnachweises müssten zusätzlich auch noch Untersuchungen zu den Lastannahmen vorgenommen werden. Bei der praktischen Anwendung des erweiterten Nachweises sollten die hydrodynamischen Belastungen in ihrer real auftretenden Größe ansetzen werden. Dazu werden aber noch Informationen über die an einem Baggersee auftretenden Wellen benötigt. Außerdem kann ein Messprogramm zur Bestimmung von Größe und Verlauf des durch hydrodynamische Belastungen entstehenden Porenwasserdrucks dazu genutzt werden, die b -Werte des modifizierten Bemessungsdiagramms für Abbauböschungen in Sand und Kies zu überprüfen.

12.7 Symbole

$a(t)$	Porenwasserdruckparameter [-]
a_S	Hebelarm von S_{Nat} zum Gleitkreismittelpunkt [m]

b	Porenwasserdruckparameter [1/m]
b_{Li}	Breite des Gleitflächenabschnitts (Lamellenverfahren) [m]
E_S	[kN/m ²] Steifemodul des Bodens
$1/E_S$	Kompressibilität des Bodens [m ² /kN]
E_M	Resultierendes Moment der Einwirkungen um den Gleitkreismittelpunkt [kNm/m]
F_{eff}	effektiver Fetch [m]
G_i	Eigengewicht der Lamelle i [kN/m]
h	Böschungshöhe [m]
h_0	mittlere Wassertiefe über der Böschung [m]
Δh	Wasserspiegeldifferenz zwischen Außen- und Grundwasserstand [m]
k	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [m/s]
ΣM_S	Summe der einwirkenden Momente der in G_i und P_{Vi} nicht enthaltenen Einwirkungen um den Gleitkreismittelpunkt [kNm/m]
n	Porenvolumen [-]
P_{Vi}	vertikale Auflasten in Lamelle i [kN/m]
R_M	Resultierendes Moment der Widerstände um den Gleitkreismittelpunkt [kNm/m]
r	Gleitkreisradius [m]
S	Sättigungsgrad [-]
S_{Nat}	zusätzliche stationäre Strömungskraft [kN/m]
S_S	spezifischer Speicherkoeffizient [1/m]
t_A	Absinkzeit [s]
u_i	Porenwasserdruck auf die Gleitfläche der Lamelle i [kN/m ²]
$\Delta u(z)$	welleninduzierter Porenwasserüberdruck [kN/m ²]
v_{zA}	Absinkgeschwindigkeit [m/s]
z	Bodentiefe unter der Böschungsoberfläche [m]
z_A	Absinkmaß [m]
β	Böschungswinkel [°]
β_F	Volumenkompressibilität des Porenfluids [m ² /kN]
γ_W	Wichte des Wassers [kN/m ³]
λ	Windgeschwindigkeit [m/s]
ϑ_i	Neigungswinkel der Gleitlinie gegen die Horizontale in der Schwerlinie der Lamelle i [°]
μ	Ausnutzungsgrad der Bemessungswiderstände

φ_i Reibungswinkel in der Gleitfläche der Lamelle i [°]
 φ_k' charakteristischer Wert des wirksamen Winkels der inneren Reibung [°]

12.8 Literatur

Alberts 2001

Porenwasserdruckmessungen im teilgesättigten Sand der Unterwasserböschungen am Nord-Ostsee-Kanal. In: Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, Bauhaus-Universität Weimar, 3. Workshop 2001 Teilgesättigte Böden, ISBN 3-86068-167-2, Weimar

BAW 2004

Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Nr. 87, ISSN 0572-5801, Karlsruhe

de Groot, M. B. et al. 1988

The interaction between soil, water and bed or slope protection. In: Modelling Soil-Water-Structure Interactions, Edited by Kolkman et al.; A. A. Balkema, Rotterdam

DIN 1054: 2003

Baugrund: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin

DIN 1055-T. 2: 1976

Lastannahmen für Bauten; Bodenkenngrößen, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin

EAB 1994

Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben - EAB 1997, 3. Auflage, Ernst&Sohn

EAU 1996

Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen – EAU 1996, 8. Auflage, Hrsg.: Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Ernst&Sohn

EAU 2004

Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen – EAU 2004, (noch nicht veröffentlicht), Hrsg.: Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechnischen Ge-

sellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Ernst&Sohn

E DIN 4084: 2002

Baugrund: Geländebruchberechnungen, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin

GGU-Software

Copyright und Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Johann Buß, Braunschweig

Köhler, H.-J. 1989

Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund. In: Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 66, Karlsruhe

Köhler, H.-J. 2001

Druckwechselbelastung an Wasser-Boden-Grenzflächen. In: Zeitschrift für angewandte Geologie (ZAG), Jg. 47, Heft 1

Köhler, H.-J.; Asami, K. 2002

Transienter Porenwasserdruck und Hydraulischer Grundbruch. In: Beitragsband (Ergänzungsband) des TAE-Kolloquiums Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen (TAE), Ostfildern

Meyer, H.; Fritz, L. 2001

Unterwasserböschungen aus Sicht der Bodenmechanik. In: Zeitschrift für angewandte Geologie (ZAG), Jg. 47, Heft 1

Richwien, A.; Meyer, N. 2002

Messtechnische Erfassung von Unterwasserböschungen mit dGPS-Sonaranlagen. In: Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 68, Messen in der Geotechnik 2002, Braunschweig

Richwien, A.; Meyer, N. 2004

Unsaturated soil mechanics and it's application in slope stability analysis, International Conference on Geotechnical Engineering, Sharjah - UAE

Schulz, H. 1986

Kompressibilität und Porenwasserüberdruck – Bedeutung für Gewässersohlen. In: Mitteilungsblatt der BAW, Nr. 67, Karlsruhe

