

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Richwien, Werner

Seegang und Bodenmechanik - Geotechnische Versagensmechanismen von Seedeichen

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102828>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Richwien, Werner (1989): Seegang und Bodenmechanik - Geotechnische Versagensmechanismen von Seedeichen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 66. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 139-154.

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.



SEEGANG UND BODENMECHANIK
GEOTECHNISCHE VERSAGENMECHANISMEN VON SEEDEICHEN

Prof. Dr.-Ing. W. Richwien
Institut f. Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau
Universität Hannover

Einleitung

Geotechnische Nachweise für Seedeiche umfassen regelmäßig die Grundbruchsicherheit, die Sicherheit gegen Böschungsbruch und den Nachweis der Setzungen. Als Lasten werden dazu die jeweiligen Bemessungshochwasserstände eingeführt /1/. Für Deckwerke gelten Bemessungsregeln, in denen die Wirkung von Druckschlägen sowie von Auftriebskräften aus hohen Wasserständen im Deichinnern berücksichtigt werden /2/. In keinem dieser Nachweise wird jedoch berücksichtigt, daß die Erdstoffe, aus dem Deiche im allgemeinen bestehen, nämlich Sand und Klei, bei periodischer Beanspruchung ihre mechanischen Eigenschaften verändern können. In der Bodenmechanik sind diese Phänomene als zyklische Mobilität, inkrementeller Kollaps und als Verflüssigung bekannt, und auch in den neueren Arbeiten über Seedeiche werden diese geotechnischen Versagensmechanismen aufgeführt (Abb. 1). Gleichzeitig wird hier jedoch ausgeführt, daß Entwurf oder Nachweiskonzepte für diese Versagensform noch fehlen oder gar deren physikalischen Grundlagen noch weitgehend unbekannt sind /2/, /3/.

Dieser Beitrag behandelt die Wechselwirkungen zwischen Seegang und Deich und zeigt, unter welchen Bedingungen geotechnische Schädigungsmechanismen ausgelöst werden. Dieser Beitrag befaßt sich ausschließlich mit dichten Böschungsabdeckungen, die nachfolgenden Darstellungen zu Art und Größe der Beanspruchung sowie zur Reaktion des Bodens darauf sind aber von grundsätzlicher Gültigkeit und daher auf jede Deckwerksform übertragbar.

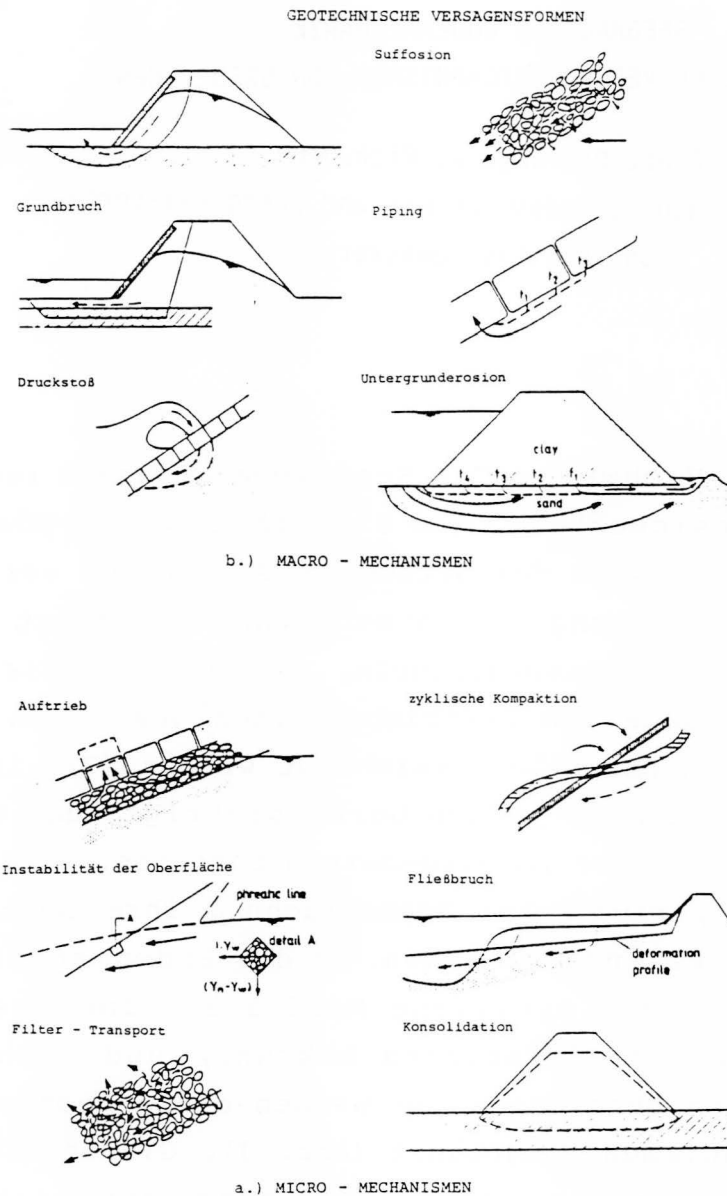
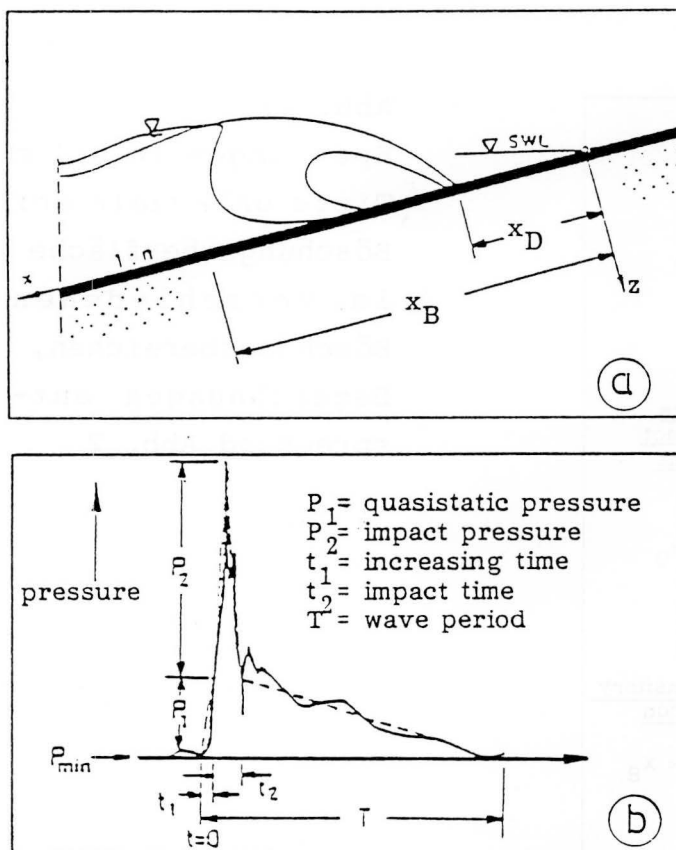


Abb. 1: Überblick über geotechnische Versagensformen von Deichen (nach Pilarczyk, 1987)

Seegang bewirkt periodische und transiente Beanspruchungen

Seegang bewirkt periodische Beanspruchungen, dies ist leicht nachzuvollziehen, da durch Seegang zeitlich und örtlich veränderliche Wasserauflasten auf eine Böschung einwirken. Diese rufen im Deichkern Spannungsänderungen hervor, die zeitlich direkt mit den einwirkenden Kräften gekoppelt sind und deren Größe geometrisch von letzteren abhängt (Abb. 2).

Diese Beanspruchungen sind also quasistatisch. Hinzu kommen aber auch dynamische Belastungen, wenn sich auflaufende Wellen auf der Böschung brechen und die Wellenzunge als stoßartige Belastung auf die Böschung einwirkt. In dem schwingungsfähigen System Deckwerk/Deichkern bewirkt dieser Stoß Spannungsänderungen in Form transienter Schwingungen, was durch Fourieranalysen gemessener Spannungsänderungen gezeigt werden kann (Abb. 3). Der nur rd. 20 bis 30 ms andauernde Brecherstoß bewirkt also dynamische Spannungsänderungen, deren Amplitude und zeitliche Abfolge vor allem von den Systembedingungen abhängen, d.h. von Masse, Steifigkeit und Dämpfung des Systems "Deich".



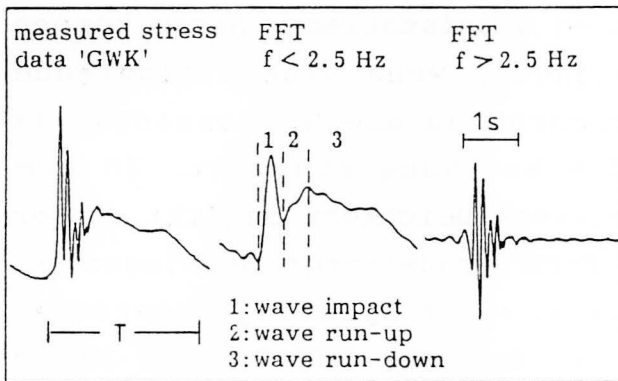


Abb. 3:
Analyse von gemessenen Spannungsänderungen und deren Fourier-Transformationen, periodischer und transienter Spannungsanteil

Seegangsbeanspruchungen von brechenden Wellen beinhalten stets beide Spannungsanteile, die sich entlang der Böschung eines Deiches, jedoch mit unterschiedlichen Amplituden überlagern (Abb. 4).

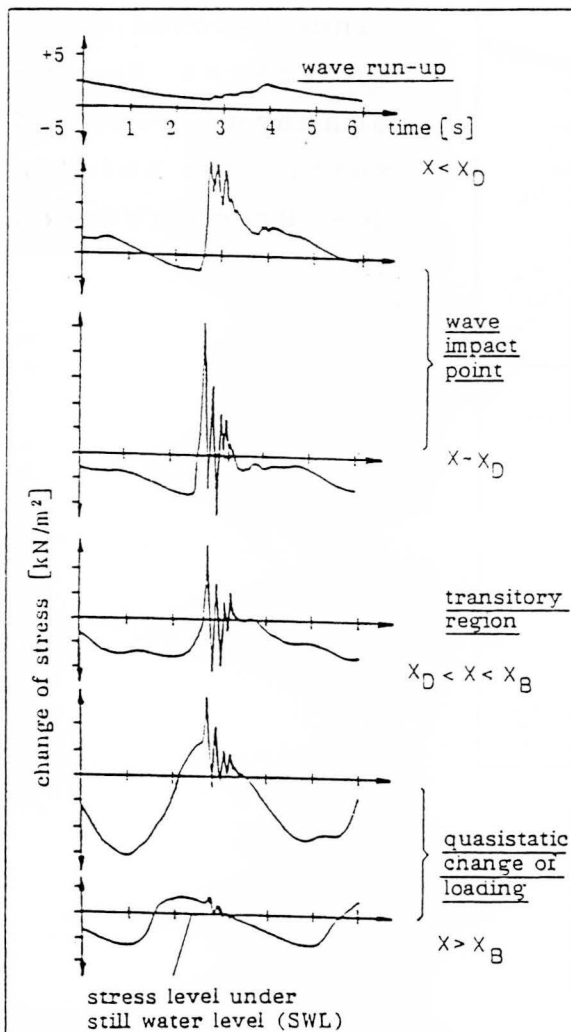
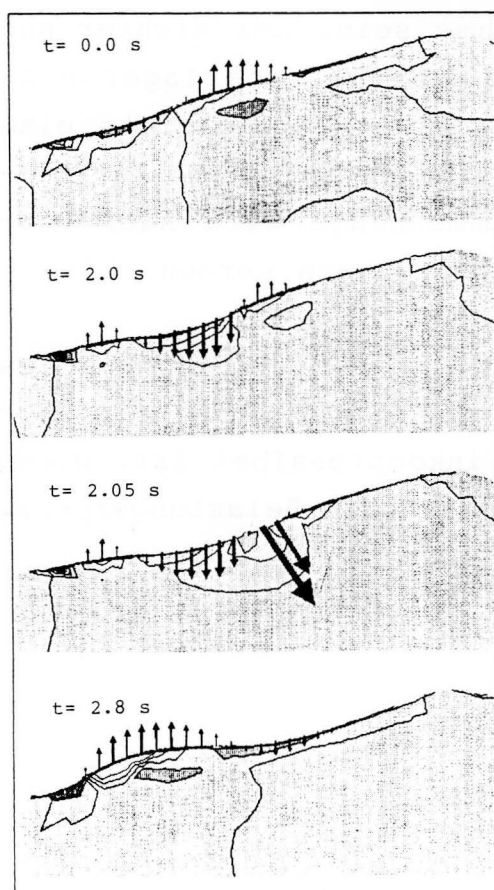
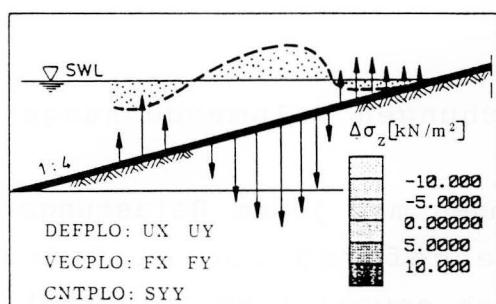


Abb. 4:
Spannungen in 0,4 m Tiefe unterhalb der Böschungsoberfläche in verschiedenen Böschungsbereichen, Bezeichnungen entsprechend Abb. 2

Somit unterliegt der gesamte Deich einer ständigen periodischen und dynamischen Spannungsänderung. Ausgehend von einem Anfangsspannungszustand werden vor allem die oberflächennahen Zonen des Deiches abwechselnd be- und entlastet. Dies wird sehr schön durch die Ergebnisse einer Nachrechnung auf FEM-Basis deutlich (Abb. 5). Der hier qualitativ dargestellte Ablauf für eine einzige Welle wiederholt sich mit jeder auf den Deich auflaufenden Welle, wobei allerdings die Spannungsamplituden vor allem durch stochastische Bedingungen beeinflusst werden /4/.



HARDCOPY (PGA-NEC-Version)
COPYRIGHT T. HARTMANN 1988

Abb. 5:

Nachrechnung der Deichbelastung in einem FEM-Modell (Copyright T. Hartmann, 1988). Innerhalb einer Wellenperiode wird der Deich in schneller Folge be- und entlastet. Die Pfeile geben die Wasserbe- und -entlastung an, die angelegten Flächen die Spannungsänderungen in kN/m², die Böschungslinie ist ein qualitatives Maß für die Deformationen

Das Stoffverhalten von Böden bei zyklischer und dynamischer Beanspruchung

Größere Biege- und Zugbeanspruchungen in dichten Böschungsabdeckungen (Asphaltbeton, Klei) ergeben sich vorwiegend aus den Deformationen des Deichkernes, die Beanspruchungen aus dem Druckschlag selbst sind hingegen klein gegenüber den zulässigen Spannungen /5/. Somit sind Schädigungen des Deckwerks immer eine Folge der Deichkerndeformationen. Um diese beurteilen zu können, muß man das spezifische Stoffverhalten von Böden bei periodischer und dynamischer Beanspruchung beachten. Dieses unterscheidet sich von dem anderer Baustoffe nämlich dadurch, daß Böden

- auch bei reinen Scherbeanspruchungen Volumendehnungen erleiden und
- bei nicht monotonen Beanspruchungen mit jedem Belastungszyklus eine bleibende Volumendeformation eintritt (Abb. 6). Diese kann grundsätzlich sowohl eine Volumenabnahme als auch eine Volumenzunahme sein, bei dichter und mitteldichter Lagerung und bei geringen Überlagerungsspannungen (oberflächennah) ist sie allerdings stets eine Volumenabnahme. (Anmerkung: auf eine detaillierte Darstellung der bodenmechanischen Zusammenhänge wird hier verzichtet, sie kann z.B. bei /6/ nachgelesen werden.)

Die Volumenabnahme von Böden ist immer eine Abnahme des Porenvolumens, da das einzelne Bodenkorn im Vergleich zur Steifigkeit der Kornmatrix nahezu inkompressibel ist. Diese Volumenabnahme wiederholt sich mit jedem Belastungszyklus mit abnehmenden Absolutbeträgen.

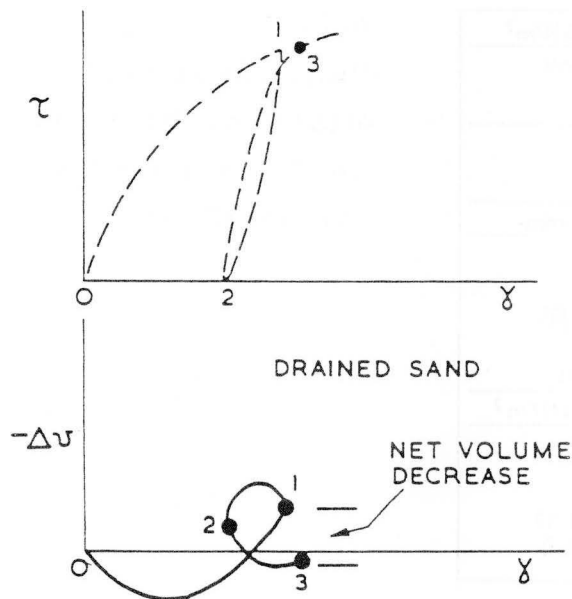


Abb. 6:
Volumenabnahme bei
einer Belastungsfol-
ge 1-2-3

Bei trockenen Böden bzw. bei Böden, deren Porenvolumen nur teilweise mit Wasser gefüllt ist, folgt aus dieser Volumenreduktion eine schrittweise vergrößerte Lagerungsdichte, ohne daß die damit verbundenen Setzungen eine nennenswerte Größenordnung erreichen. Sind jedoch die Porenräume ganz oder teilweise mit Wasser gefüllt, so muß dieses gleichzeitig mit der periodischen Reduzierung des Porenvolumens abfließen, da auch Wasser im Verhältnis zur Kornmatrix nahezu inkompressibel ist. Die dazu erforderliche Druckgradienten Δu richtet sich nach der Wasserdurchlässigkeit des Bodens und reduziert in der Kornmatrix die von Korn zu übertragenden Spannungen und somit die von der Kornmatrix aufnehmbare Schubspannung.

Dadurch wird die Kornmatrix mit jedem Lastzyklus "weicher" und verliert ihre Steifigkeit schließlich ganz, wenn der Porenwasserüberdruck gleich der totalen Überlagerungsspannung ist (Abb. 7). Dieser Zustand wird als "Verflüssigung" bezeichnet, weil die Kornmatrix nun keinerlei Scherkräfte mehr übertragen kann, sich also wie eine reibungsfreie Flüssigkeit verhält (Abb. 8).

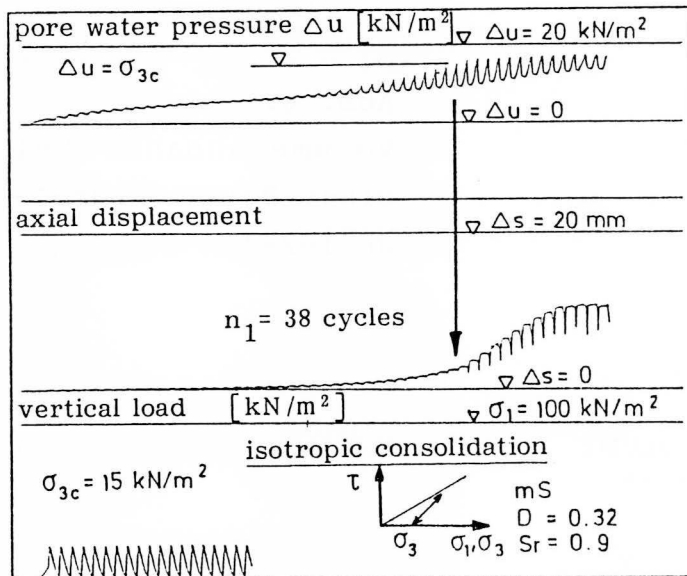


Abb. 7:
Verflüssigung von
mitteldichtem Sand
nach 38 Lastzyklen
von 15 kN/m²

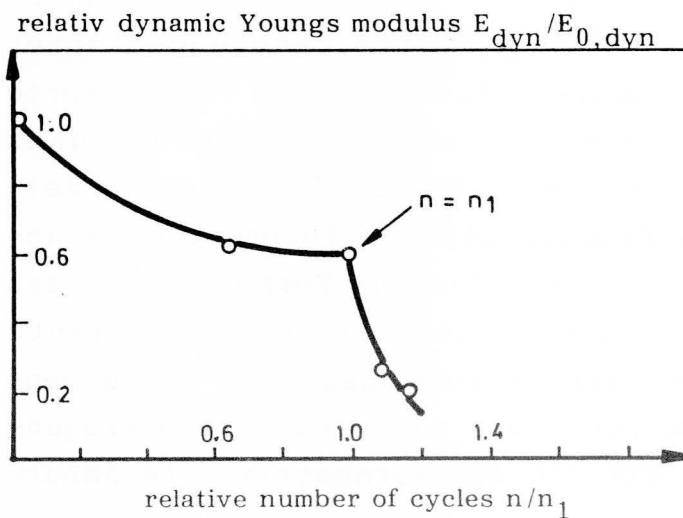


Abb. 8:
Abnahme der drei-
axialen Steifigkeit
eines Mittelsandes
vor und nach der
Verflüssigung

Das geotechnische Versagen von dichten Böschungsabdeckungen

Dichte Böschungsabdeckungen (z.B. aus Asphaltbeton) werden so dimensioniert, daß bei Druckschlagbeanspruchungen die Randzugdehnungen nicht überschritten werden und daß sie ausreichende Sicherheit gegen Wasserüberdruck im Deichkörper haben (Auftrieb). Bei Dimensionierung gegen den Druckschlag

wird die Belastung durch eine Linienlast angenähert und die Abdeckung als unendliche Platte auf elastischer Bettung berechnet /3/ (Abb. 9).

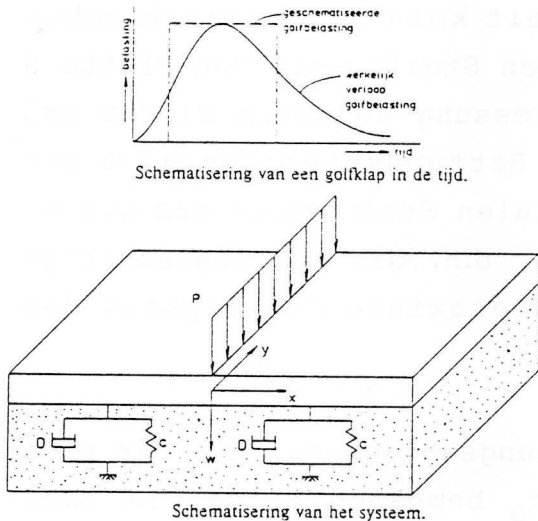


Abb. 9:

Berechnung einer Böschungsabdeckung als elastisch gebetteter Platte, Druckschlag als Linienlast angenähert /3/.

Der Boden wird durch gekoppelte Federn und Dämpfer modelliert, wobei allerdings in den Lösungen der Biegelinien-Differentialgleichung das Dämpfungsmaß D meist zu $D = 0$ gewählt wird.

Die erforderliche Plattendicke ergibt sich dann zu:

$$h_{\text{erf}} = 0,75 \cdot \left[27/16 \cdot (1/(1-\nu^2)) \cdot (P/\sigma_b)^4 \cdot (S/c) \right]^{0,2} \quad (1)$$

mit P = Druckstoß, als Linienlast angenähert (N/m)

σ_b = Bruchfestigkeit des Plattenmaterials (N/m²)

S = Steifigkeitsmodul des Plattenmaterials (N/m²)

ν = Querkontraktionszahl der Platte (-)

c = Bettungssteifigkeit des Deichs (N/m³)

Der Einfluß des Deiches wird also nur durch dessen Bettungssteifigkeit erfaßt und die erforderliche Plattendicke h_{erf} ist der Bettungssteifigkeit umgekehrt proportional.

Ohne an dieser Stelle weiter darauf einzugehen, sei angedeutet, daß diese Bettungssteifigkeit kein bodenspezifischer Wert ist, sondern von der relativen Steifigkeit von Platte S und Deichkern E sowie von der Pressung zwischen Platte und Bettung, also von P abhängt. Die Bettungssteifigkeit c ist aber dem E-Modul oder der dreiaxialen Steifigkeit des Deichkernmaterials direkt proportional, d.h. die Bettungssteifigkeit c wird kleiner, wenn die dreiaxiale Steifigkeit des Bodens abnimmt und umgekehrt.

Somit ergibt sich, daß eine Böschungsabdeckung, die für eine anfängliche Bettungssteifigkeit c_0 bemessen wurde, im Lauf eines Sturmes überbeansprucht wird, wenn sich dabei mit wiederholter zyklischer Belastung die dreiaxiale Steifigkeit des Bodens - etwa wie in Abb. 7 und Abb. 8 gezeigt - verringert.

Nach Gl. 1 wird bereits bei halber Bettungssteifigkeit $h_{\text{erf}} = 1,14 \cdot h_0$ und bei einem Abfall der Bettungssteifigkeit auf 20% des Anfangswertes ($c_0/c = 5$) wird $h_{\text{erf}} = 1,38 \cdot h_0$ (Abb. 10)

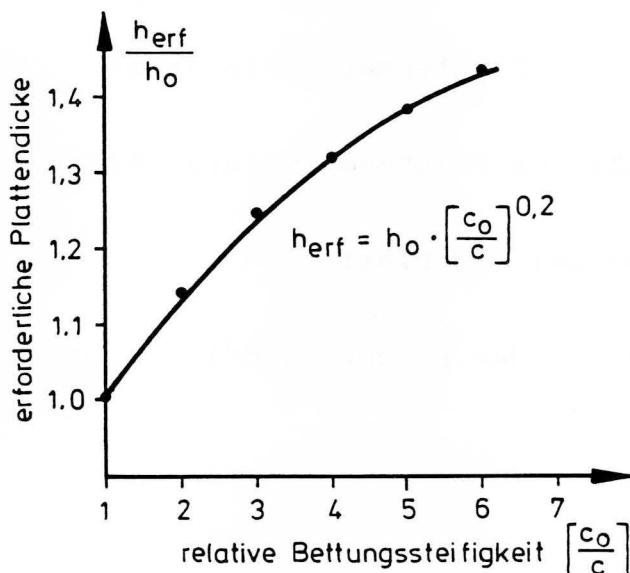


Abb. 10:

Die erforderliche Plattendicke einer Böschungsabdeckung bei veränderlicher Bettungssteifigkeit

Somit kann eine anfänglich ausreichend dimensionierte Böschungsabdeckung im Verlauf eines Sturmereignisses durch Erreichen der zulässigen Spannungen ihre Tragfähigkeit verlieren, woraus sich großflächige Böschungsdeformationen oder Risse in der Abdeckung ergeben (vgl. Abb. 1). Mit den Rissen dringt dann das Außenwasser in den Deichkern ein und löst Erosionen aus und ein gänzlich anderer Schädigungsmechanismus setzt ein.

Die Dimensionierung von dichten Böschungsabdeckungen ist also vorrangig eine Frage der Langzeitstandsicherheit, wenn sich die Bettungssteifigkeit im Laufe eines Sturmereignisses ändern kann.

Entwurfskonzept für feste Böschungsabdeckungen

Aus den vorstehend beschriebenen bodenmechanischen Zusammenhängen können nun die Grundzüge eines Entwurfskonzepts für Böschungsabdeckungen abgeleitet werden (Abb. 11). Die Arbeiten hierzu sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen, so daß die formelmäßigen Zusammenhänge zur Porenwasserdruckbildung und zur Dissipation noch nicht abschließend formuliert sind.

Die wichtigste Voraussetzung für eine geotechnische Schädigung von Böschungsabdeckungen ist, daß der Boden im Deich überhaupt ein kontraktantes Stoffverhalten aufweist. Der Entwurf einer Böschungsabdeckung sollte also stets mit der Überprüfung des Stoffverhaltens des Bodens beginnen.

Dazu ist die Ermittlung der "kennzeichnenden Spannungszustände LC" des Deichbodens erforderlich. Die kennzeichnenden Spannungszustände geben den Übergang von kontraktantem zu dilatantem Formänderungsverhalten an und sind von der Körnungslinie und der Lagerungsdichte abhängig /8/. Bei nichtbindigen Böden nimmt der kennzeichnende Spannungszustand LC für Belastung mit der Lagerungsdichte D ab, während er für Entlastung nahezu konstant ist (Abb. 12).

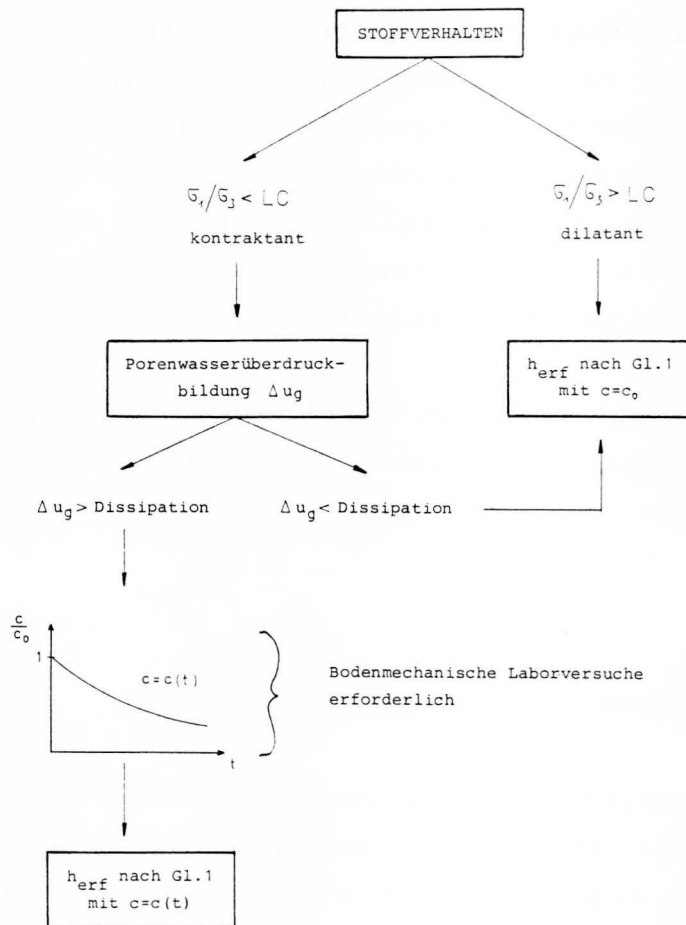


Abb. 11: Entwurfskonzept für dichte Böschungsabdeckungen

Kontraktantes Stoffverhalten ist immer dann zu erwarten, wenn der mittlere Hauptspannungsquotient $\sigma_1/\sigma_3 < LC$ ist.

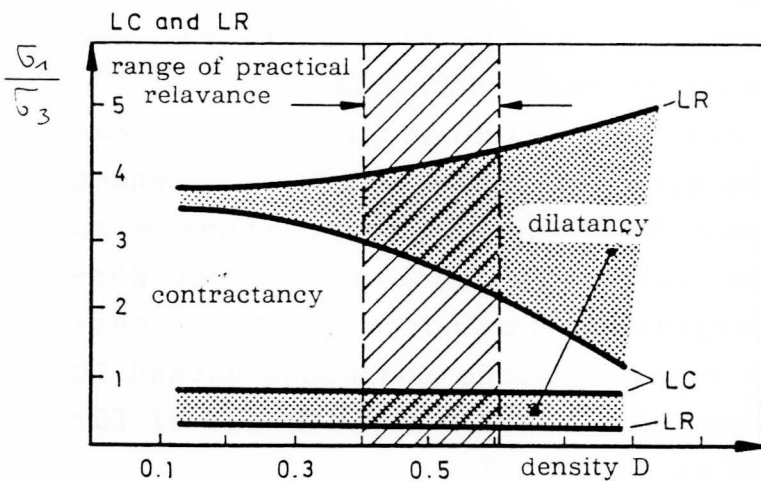


Abb. 12: Kennzeichnender Spannungszustand LC und Grenzspannungszustand LC für einen Mittelsand bei verschiedenen Lagerungsdichten

In diesem Fall müssen zur Beurteilung einer latenten geotechnischen Gefährdung der Böschungsabdeckung die Bedingungen der Porenwasserüberdruckbildung näher untersucht werden (Abb. 11). Ist $\sigma_1/\sigma_3 > LC$, kann eine zyklische Porenwasserdruckbildung ausgeschlossen und die erforderliche Dicke einer Böschungsabdeckung nach Gl. 1 mit $c = c_0$ berechnet werden.

(Anmerkung: in erster Näherung ist der Spannungszustand in einem Erdkörper stets $\sigma_1/\sigma_3 = 1/K_0$. Für K_0 kann wiederum als Näherung $K_0 = 1 - \sin\varphi'$ benutzt werden. Damit gilt im Deich

$$\sigma_1 / \sigma_3 = 1/K_0 = 1/(1 - \sin\varphi')$$

mit φ' = Reibungswinkel des Bodens).

Für den Fall eines kontraktanten Stoffverhaltens ist im zweiten Schritt zu prüfen, ob die zyklische Porenwasserüberdruckbildung größer oder kleiner ist als die gleichzeitige Dissipation.

Im zweiten Fall wird der zyklisch gebildete Porenwasserdruck innerhalb einer Belastungsfolge vollständig dissipiert, so daß wieder h_{erf} mit der anfänglichen Bettungssteifigkeit c_0 berechnet werden kann.

Ist jedoch die Porenwasserdruckbildung betragsmäßig größer als die gleichzeitige Dissipation, so bleibt mit jedem Belastungszyklus, d.h. mit jedem Brecher ein inkrementeller Porenwasserüberdruck, der sich im Laufe eines Sturmereignisses ähnlich Abb. 7 aufaddiert. In diesem Fall muß dann die zeitlich veränderliche Bettungssteifigkeit $c(t)$ in bodenmechanischen Laborversuchen ermittelt werden und die erforderliche Plattendicke einer Böschungsabdeckung muß mit einer gegenüber dem Ausgangswert abgeminderten Bettungssteifigkeit $c(t) < c_0$ berechnet werden.

Dieser doch recht langwierige Nachweis kann aber auch nach der Feststellung einer latent gegebenen geotechnischen Gefährdung abgebrochen werden und für ein neues Material neu geführt werden oder es können konstruktive Maßnahmen gegen den Verlust der Bettungssteifigkeit (Einbringen von Bindemitteln) herangezogen werden.

Eine letzte Bemerkung gilt dem möglichen Einwand, daß eine der Bedingungen für Porenwasserdruckbildung, ein möglichst hoher Sättigungsgrad des Porenvolumens im Entwurfskonzept nach Abb. 11 überhaupt nicht enthalten ist. Immerhin ist ja bekannt, daß Vorlanddeiche längere Zeit nach ihrer Fertigstellung nur noch einen geringen Wassergehalt im Deichkern haben, wenn das meist aus dem Spülbetrieb beim Bau stammende Porenwasser ausgeblutet ist. Nach Auffassung des Verfassers sollte dieser in den meisten Fällen tatsächlich vorhandene Umstand allerdings nicht bemessungswirksam werden, da vorübergehende Ausnahmen immer möglich sind /9/.

Schlußbemerkung

Dieser Beitrag berichtet über Ergebnisse eines Forschungsvorhabens, das seit 1983 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Programm des Sonderforschungsbereiches 205 "Küsteningenieurwesen" gefördert wird.

Die Versuche am Seedeich wurden im Großen Wellenkanal (GWK) sowie im bodenmechanischen Labor des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover durchgeführt. Das Projekt wurde von Herrn Dr. Wehner und Herrn H. Seehausen bearbeitet.

Literatur

- /1/ Die Küste, Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Heft 36 - 1981, Westholsteinische Verlagsanstalt Bogens + Co, Heide i. Holst.
- /2/ Pilarczyk, K.W., Sea Defence, Dutch Guidelines on Dike Protection, Rijkswaterstaat, Delft, 1987
- /3/ Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Leidraad voor de toepassing van asfalt in de waterbouw, Staatsuitgeverij - s' Gravenhage, 1984
- /4/ Führböter, A., Bemessungs- und Ausführungsgrundlagen für Seedeiche und Deckwerke im Küstenschutz. Arbeits- und Ergebnisberichte des SFB 205, 1983 - 1985, Hannover, 1985
- /5/ Lücke, H., Gerlach, A., Übertragung theoretischer Bemessungsgrundsätze aus dem konstruktiven Straßenbau auf Deichdeckwerke aus Asphalt, Forschungsbericht LU 346/1-1 1987
- /6/ Gudehus, G., Materialverhalten von Sand: Neuere Erkenntnisse, Bauingenieur 55 (1980), 57 - 67, Springer Verlag
- /7/ Wood, D.M., Laboratory Investigations of the Behaviour of Soils under Cyclic Loading: a Review, in Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads, Herausgeber: Pande/Zienkiewicz, John Wiley + Sons, 1982
- /8/ Richwien, W., Wehner, Th., Wave impact on slope revetments - a problem of long-term stability, SOWAS '88, International Symposium on modelling Soil - Water - Structure Interactions, Delft, 1988, Balkema, Rotterdam
- /9/ Richwien, W., Wehner, Th., Bodenmechanische Kennwerte gespülter Seedeiche im norddeutschen Küstenraum, Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 10/1988, Bertelsmann

