

Die Bemessung von Seedeichen auf Wellendruckschlag

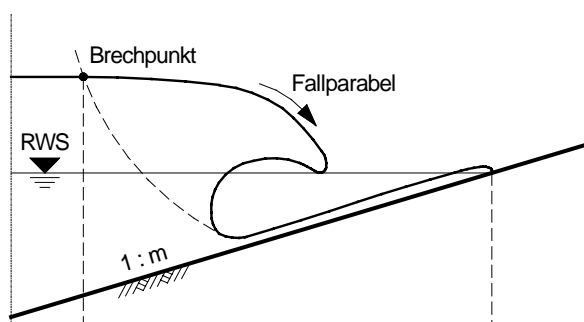
Dipl.-Ing. Carsten Pohl, Universität Duisburg-Essen, e-mail: carsten.pohl@uni-essen.de

1. Einleitung

Um den wachsenden Querschnitten der See- und Ästuardeiche gerecht zu werden, ist man Mitte des 20. Jahrhunderts dazu übergegangen, diese mit einem Sandkern herzustellen und mit einer Kleiabdeckung vor dem Angriff aus Wind und Wellen zu schützen. Die heutige Bauweise geht dabei überwiegend auf Erfahrungen aus der schweren Sturmflut von 1962 zurück. Damals konnten an den Außenböschungen insbesondere in der Zone des höchsten Tidehochwasserstandes zahlreiche Böschungsausschläge beobachtet werden, welche auf die Beanspruchung durch Druckschlag aus brechenden Wellen zurückzuführen sind. Als Konsequenz leitet der Küstenausschuss Nord- und Ostsee die folgerichtige Empfehlung ab, Außenböschungen nicht steiler als 1 : 6 auszuführen. Zur Quantifizierung der Sicherheitsreserven wurden an der Universität Duisburg-Essen, unter wissenschaftlicher Leitung von Herrn Prof. Richwien, die maßgebenden Schädigungsmechanismen identifiziert.

2. Die Schädigungsmechanismen

Druckschläge entstehen auf Böschungen einzig durch die Wellenform des Sturzbrechers, bei dem die Wassermassen eine Fallparabel bilden und in dem so entstehenden Hohlraum Luft einschließen und komprimieren (s. Abb. 1). Schließlich bricht die Welle explosionsartig auf und leitet so ihre Energie als Druckspannung schlagartig über einen Bereich von wenigen Dezimetern in die Abdeckung ein. Die Spannungsmaxima, die einmal unter 1000 Wellen zu



erwarten sind betragen nach Führbötter (1991) für die 1 : 6 geneigte Böschung rund das 4-fache der hydrostatischen Wasserlast, bei einer Neigung von 1 : 3 das 8-fache und hängen damit linear von der Wellenhöhe ab. Bereits bei einer Wellenhöhe von 1 m sind für die heutzutage gängigen Böschungseigungen Spannungsspitzen von über 40 kN/m² zu erwarten.

Abb. 1: Der Druckschlag

Die Struktur der Abdeckung ist geprägt vom Einfluss der Witterung, d. h. einem stetigen Wechsel aus Tauen und Gefrieren, Vernässung und Austrocknung. Infolge der Austrocknung bilden sich im oberflächennahen Bereich Schumpfrisse, die sich häufig auch bei einer anschließenden Vernässung nicht wieder schließen. Trifft ein Druckschlag gemäß Abb. 2 auf einen wassergefüllten Riss, pflanzt er sich in der Sekundärstruktur mit Schallgeschwindigkeit fort und wirkt im Riss wie eine hydraulische Presse. In Anlehnung an Führbötter (1966) liefert das Kräftegleichgewicht unter Annahme einer mit 45° geneigten Gleitfläche für den undrainierten Fall ($\varphi_u = 0$) und bei Vernachlässigung des Bodeneigengewichts eine erforderliche undrainierte Scherfestigkeit c_u in Höhe von 50 % des Druckschlagmaximums

p_{max} .

Bei geschlossener Abdeckung ruft der Druckschlag in der durch Aggregation gekennzeichneten Sekundärstruktur des Bodens einen zusätzlichen Porenwasserdruck hervor, der je nach dem Verhältnis von Be- zur Entlastungssteifigkeit des Systems auch nach der eigentlichen Belastung nur langsam im Rahmen der Konsolidation abklingt und somit Teile der Abdeckung auf Abheben beansprucht und zunehmend auflockert.

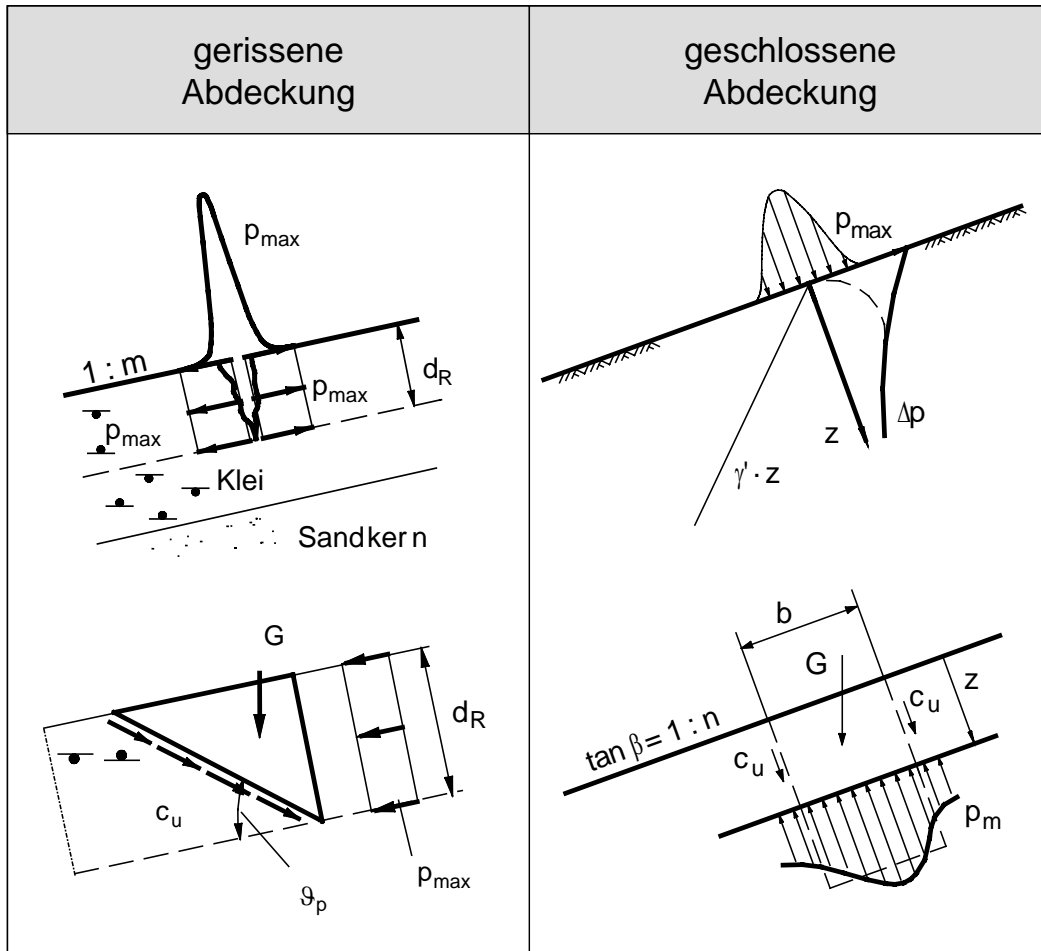


Abb. 2: Schädigungsmechanismen bei Druckschlag

Boden ist ein Dreiphasensystem aus Feststoff, Luft und Wasser. Gerade bei bindigen Böden bleibt auch bei anhaltender Infiltration immer ein Rest an Gasblasen im Porenwasser gelöst, sodass nie eine vollständige Sättigung erreicht wird. Die Abdeckung erhält somit eine höhere Kompressibilität, die Höhe und Phase des Porenwasserüberdrucks bestimmt. Ähnliche Phasenverschiebungen über die Tiefe sind für den Porenwasserdruck aus Wellenbelastung auf sandigem Meeresboden nachgewiesen worden (vgl. Magda, W. 1998 und Köhler, H.-J., Schwab, R. 2005). Dem Porenwasserüberdruck steht das geostatische Eigengewicht G der Abdeckung sowie die Festigkeit des Bodens c_u gegenüber:

$$c_u \geq \frac{p_m \cdot b - G \cdot \cos \beta}{2 \cdot z}$$

Die Höhe des Überdrucks p_m folgt aus numerischen Berechnungen. An einem vereinfachten Modell wird zur Zeit gearbeitet.

Gleichzeitig erleidet die Abdeckung infolge der Vernässung durch den Einstau und den typischerweise vorausgehenden Regenereignissen einen deutlichen Festigkeitsverlust, der nach Richwien (vgl. Weißmann, R., Richwien, W. 2004) auch bei aggregierten Böden logarithmisch zur Konsistenzzahl I_c verläuft:

$$c_u(w) = c_u(w_p)^{I_c}$$

Während der Abdeckung bei einem Wassergehalt an der Ausrollgrenze w_p noch eine entscheidende Festigkeit zugesprochen werden kann, geht die Festigkeit bei einem Wassergehalt an der Fließgrenze w_L gegen Null.

3. Bemessung der Abdeckung gegen Druckschlag

Die Identifizierung der Schädigungsmechanismen einschließlich des Festigkeitsverlustes bei Vernässung ermöglicht die statische Bemessung der Kleiabdeckung. Die geringste Festigkeit des Systems liegt vor, wenn der gesamte Porenraum n mit Wasser gesättigt ist. Entsprechend kann eine gewisse Mindestfestigkeit gewährleistet werden, wenn der Boden so verdichtet wird, dass selbst bei Sättigung mit Wasser noch eine ausreichende Konsistenz vorliegt:

$$n \leq \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \left[w_l - \frac{\ln(\text{erf. } c_u)}{\ln(c_u(w_p))} \cdot (w_l - w_p) \right].$$

Das Verdichtungsverfahren ist auf diese Einbauvorschrift beispielsweise durch das Anlegen von Prüflösen abzustimmen und die Einhaltung des zul. Porenanteils ist im Rahmen von Eigen- und Fremdüberwachung nachzuweisen. Da nahezu alle benötigten Kennwerte ebenfalls Eingang in die Bewertung der Böden als Deichbaustoff finden, ist der zusätzliche Aufwand gering (s. Weißmann, R. 2003).

4. Zusammenfassung

Die Kleiabdeckung von See- und Ästuardeichen wird durch die Einwirkungen aus Wellendruckschlag in Hinblick auf ihre Festigkeit beansprucht. Um eine ausreichende Festigkeit bei Vernässung zu gewährleisten, ist in Abhängigkeit der bodenmechanischen Eigenschaften des verwendeten Bodens und der hydrodynamischen Einwirkungen ein maximal zulässiger Porenanteil festzulegen. Gerade für die aufgrund ihres hohen natürlichen Wassergehaltes häufig schwer zu verdichtenden Kleiböden erhält der Planer somit ein Hilfsmittel zur wirtschaftlichen Optimierung der Ausführung bei Gewährleistung eines hinlänglichen Sicherheitsniveaus. Außerdem können die Sicherheitsreserven bestehender Deiche quantifiziert werden.

5. Literatur

- Führböter, A. (1966): Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen, Mitteilungen des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover, Heft 27.
- Führböter, A. (1991): Wellenbelastung von Deich- und Deckwerksböschungen, Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft (HTG), Bd. 46, S. 225 – 282.
- Köhler, H.-J., Schwab, R. (2005): Fluidisierungsphänomene unter Wellenbelastung, HANSA, 142. Jahrgang, Nr. 12, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide in Holstein, S. 49 – 59
- Magda, W. (1998): Wave-induced pore pressure oscillations in sandy seabed sediments, Technical University of Gdansk, Marine Civil Engineering Department, GRAFIX, Gdansk, Poland
- Weißmann, R. (2003): Ein Bewertungsverfahren für Klei im Deichbau, HANSA, 140. Jahrgang, Nr. 7, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide in Holstein, S. 71 - 75.
- Weißmann, R., Richwien, W. (2004): Funktionale und statische Bemessung der Abdeckung von Deichbinnenböschungen, HANSA, 141. Jahrgang, Nr. 6, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide in Holstein, S. 69 - 75.