

Hydraulischer Grundbruch im bindigen Baugrund: Schadensmechanismen und Nachweisstrategie

Dipl.-Ing. Robert-Balthasar Wudtke, Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau, Weimar

1 Einführung / Motivation

Die Standsicherheit eines durch eine gerichtete Strömung belasteten Bodenkontinuums wird im Kontext der verschiedensten Bausituationen bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts ingenieurtechnisch analysiert. Die Arbeiten von Bligh (1910), Lane (1935), Terzaghi & Peck (1961), Davidenkoff (1964) und Knaupe (1968) stellen verschiedene Etappen auf dem Weg zur Verbesserung des Verständnisses der Problematik der Phänomene Erosion und hydraulischer Grundbruch dar. Ein Vergleich der Arbeiten zeigt, dass der Grenzzustand hydraulischer Grundbruch teilweise unterschiedlichen Versagenszuständen zugeordnet ist. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass die Untersuchungen in Zusammenhang mit bestimmten Versagensereignissen, -fällen und Randbedingungen standen. Die vorliegenden Erläuterungen beziehen sich vor diesem Hintergrund auf die Betrachtung des hydraulischen Grundbruches am Bodenwiderlager eines umströmten Baugrubenverbau in bindigem Baugrund.

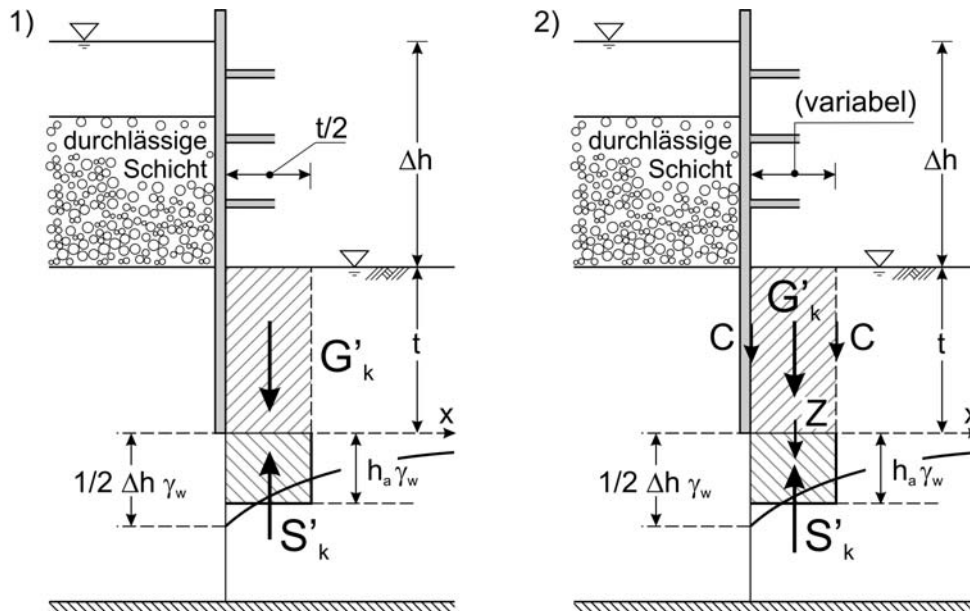


Bild 1: Berechnungsansätze für einen hydraulischen Grundbruch an einer umströmten Baugrubenwand: 1) für nichtbindigen Baugrund nach Terzaghi & Peck (1961), 2) für bindigen Baugrund nach Davidenkoff (1964)

Entsprechend der gültigen Definition des Grenzzustandes tritt ein hydraulischer Grundbruch ein, wenn für ein bestimmtes Bodenkontinuum eine vorhandene Strömungsbelastung die

durch den Boden aktivierbaren Widerstände übersteigt, vgl. DIN EN 1997-1 (2005) und DIN 1054 (2005). Der Bodenwiderstand wird hierbei durch das Gewicht des Bodens im Betrachtungsbereich repräsentiert. Die normativen Definitionen sehen für den Grenzzustand entweder die Betrachtung an einem diskreten Bodenvolumen (Bild 1-1) oder einen lokalen Spannungsvergleich vor. Konform zu den Festlegungen der DIN 1054 (2005) sind damit folgende Ansätze gültig:

$$S'_k \cdot \gamma_H \leq G'_k \cdot \gamma_{G,stab} \quad (1)$$

$$\gamma_w \cdot i \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot \gamma_{G,stab} \quad (2)$$

Die Vorgaben der DIN 1054 (2005) sehen keine Differenzierung der Nachweismethode nach der im möglichen Versagensbereich vorhandenen Bodenart vor. Allein die Einwirkung wird anhand des Teilsicherheitsbeiwertes γ_H für eine Strömungsbelastung in günstigem und ungünstigem Baugrund unterschieden.

Mit dem Ziel, speziell die im bindigen Baugrund aktivierbaren Bodenwiderstände beim Nachweis der Sicherheit gegen einen hydraulischen Grundbruch zu berücksichtigen, integrierte Davidenkoff (1964) in seinem Berechnungsansatz an einem diskreten, rechteckigen Kontrollvolumen in den vertikalen Scherflächen Widerstände aus der Kohäsion des Baugrundes, vgl. Bild 1-2. Im Unterschied zum Berechnungsansatz von Terzaghi & Peck (1961) wird die Breite des Kontrollvolumens als variabel vorausgesetzt, d. h. die für den Grenzzustand ungünstigste Größe des Versagensbereiches ist im Vorfeld zu ermitteln. Obwohl der Berechnungsansatz die Möglichkeit der Berücksichtigung bindigen Bodenverhaltens vorsieht, ist es fraglich, ob der bei einer entsprechenden Bausituation relevante Grenzzustand, dargestellt als Versagensablauf, adäquat abgebildet ist.

Die Berücksichtigung bindiger Bodeneigenschaften beim Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch erfordert eine Optimierung der Nachweismethode bezüglich der folgenden Fragestellungen:

- Ist der Versagensablauf und damit die Grenzzustandsdefinition für nichtbindigen und bindigen Boden identisch?
- Wie tritt der Grenzzustand bei der hydraulischen Belastung eines bindigen Bodens ein, d. h. welche Versagensmechanismen sind relevant? Durch welche Randbedingungen werden die Versagensmechanismen bestimmt?
- Welche Form und Größe weist der Versagensbereich an einer umströmten Baugrubenwand auf?

Ziel der nachfolgenden Ausführungen ist es, durch eine Verbesserung des Verständnisses über den Grenzzustand „hydraulischer Grundbruch in bindigem Baugrund“ die Grundlage einer ökonomischeren Bauweise zu schaffen. Eine Detaillierung des Wissens über den eigentlichen Vorgang führt zu einer Steigerung der Sicherheit der Konstruktion.

2 Phänomenologische Beschreibung

Mit dem Ziel, eine Optimierung des Nachweises „hydraulischer Grundbruch“ für bindigen Boden zu erreichen, wurden verschiedene Versuche ausgeführt, um insbesondere das

Versagensphänomen zu dokumentieren und zu beschreiben, vgl. Wudtke & Witt (2008; 2006). Wesentliche Versuchsziele waren die Identifizierung des Versagensablaufes, des Grenzzustandes und des Ortes der initialen Bodenschädigung. Außerdem sollte die Form des im Grenzzustand relevanten Bodenvolumens geometrisch beschrieben und Randbedingungen, welche die Größe des Versagensbereiches bestimmen, identifiziert werden.

Für die Durchführung der Versuche wurde ein an der Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA Weimar), Fachgebiet Geotechnik, entwickeltes Versuchsgerät verwendet. Das aus Plexiglas gefertigte Gerät ermöglicht in den Kontaktflächen zwischen Kunststoff und Boden eine kontinuierliche Beobachtung des durchströmten bindigen Versuchsbodens, einem tonigen Schluff. Die bei eingebautem Boden zweigeteilte Konstruktion simuliert die Umströmung einer Baugrubenwand. Während des Versuchsablaufes wird das eingebaute, gesättigte Bodenvolumen ($b \cdot l \cdot h = 120 \text{ cm} \cdot 60 \text{ cm} \cdot 20\text{-}30 \text{ cm}$), beginnend mit einem einheitlichen Druckzustand, durch eine kontinuierliche Steigerung der Potenzialdifferenz bis zum Versagens belastet.

Wesentliches Ergebnis der Versuche ist die Visualisierung des Versagensablaufes. Der Grenzzustand wird durch eine Abfolge von initialen Rissen und Porenaufweitung am Trennwandfuß (Bild 2-1) initiiert, was schließlich zur Entstehung einer ersten diskreten Bruchscholle führt. Infolge einer fortgesetzten Poren- und Rissaufweitung bildet sich nach einer lokalen strukturellen Zerstörung des bindigen Bodenkontinuums schließlich ein Strömungskanal bis zur abstromseitigen Bodenoberfläche aus (Bild 2-2). Findet auch weiterhin ein Druckausgleich durch den Strömungskanal statt, wird der zwischenzeitlich etablierte Bruchkörper erodiert. Im Laufe der Versuchsdurchführung wurde ausgehend von Referenzwassergehalt des Bodens beim Einbau, $w = 24,5 \%$, bis zum Grenzzustand ein Anstieg um bis zu 20% festgestellt. Dieser entspricht einer hydraulisch verursachten Volumendehnung von bis zu 15% .

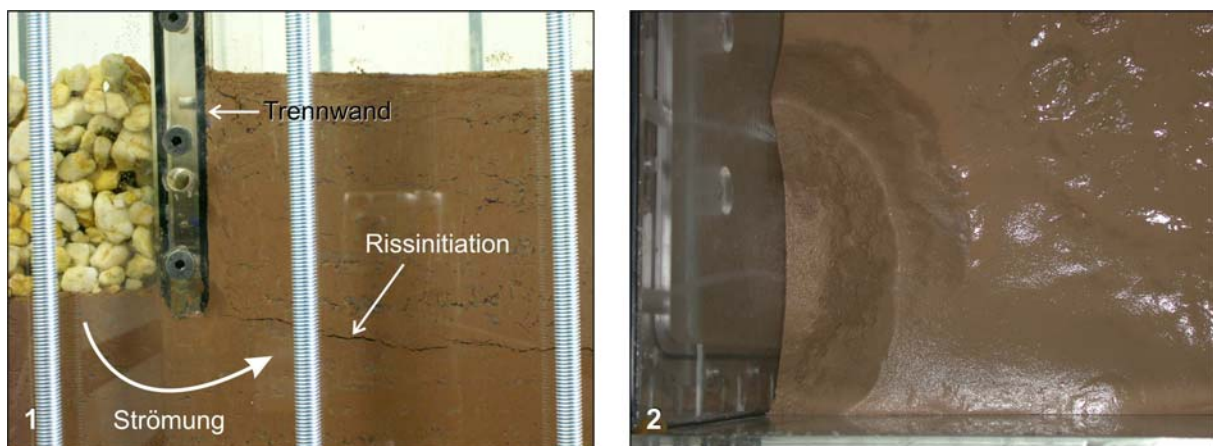


Bild 2: Versuchsergebnisse: 1 - initiale Schädigung, 2 - trichterförmiger Aufbruch (Blick auf den Versagenskörper)

Rückblickend zur Fragstellung der Gültigkeit einer von der Bodenart unabhängigen Definition des Grenzzustandes kann festgestellt werden, dass auch im nichtbindigen Boden eine Volumendehnung für das Eintreten des Grenzzustandes erforderlich ist. Der eigentliche Grenzzustand ist eine Verflüssigung mit anschließender Erosion. Im bindigen Boden werden jedoch bis zum Aufbrechen der baugrubenseitigen Bodenoberfläche stärkere Bodendeforma-

tionen eintreten und größere sowie andere Widerstände aktiviert werden. Im Versuch zur phänomenologischen Beschreibung des Grenzzustandes wurde beispielsweise vor der initialen Schädigung eine Hebung der baugrubenseitigen Bodenoberfläche von 1,5 cm bei einer Wandeinbindung von nur 10 cm festgestellt, was auf die deutlich größere Kompensationsfähigkeit des Bodens hinsichtlich der hydraulische Belastung hinweist.

Die zuvor beschriebene Abfolge des Versagens lässt unterschiedliche Varianten der zeitlichen Einordnung des Grenzzustandes zu. Ähnlich wie für nichtbindigen Boden ist eine Differenzierung zwischen einer lokalen und einer globalen Betrachtung möglich. Die initiale Rissentstehung kann in diesem Kontext als lokales Versagen angesehen werden. Eine globale Analyse des Grenzzustandes erfordert die Betrachtung an einem Kontrollvolumen und berücksichtigt für dieses unterschiedliche während des Versagensablaufes aktivierte Widerstandsanteile. Ein Vergleich beider Ansätze zeigt, dass der wesentliche Unterschied in der im Grenzzustand akzeptierten Bodenschädigung besteht. Während bei einer lokalen Betrachtung erst mit Erreichen des Grenzzustandes eine Schädigung eintritt, integriert eine globale Betrachtung sämtliche dem Aufbruch vorausgehenden Schädigungsereignisse im Nachweis.

Der Grenzzustand des hydraulischen Grundbruches ist im bindigen Baugrund erreicht, wenn die effektive Bodenspannung die Materialzugfestigkeit übersteigt. Im Gegensatz zum hydraulischen Grundbruch im nichtbindigen Boden tritt das Versagen nicht als Bodenverflüssigung sondern als Bruch, Auftrieb oder sukzessive Auflösung des bindigen Bodens in Schollen ein. Der Versagensablauf wird durch die Entstehung eines Risses eingeleitet und führt anschließend infolge einer zunehmenden Volumendehnung zur Abnahme der Festigkeit des Bodens bis schließlich der Kollaps eintritt. Homogene Baugrundverhältnisse vorausgesetzt wird der Versagensbereich direkt an der umströmten Baugrubenwand liegen. Die Form des Kontrollvolumens wird sich an der vorhandenen Strömungsverteilung orientieren.

3 Einfluss des Wassers auf die Bodeneigenschaften

Ein hydraulischer Grundbruch wird im bindigen Baugrund hauptsächlich durch die Struktur des Bodens, also dessen Zusammensetzung, bestimmt. Die auf den Grenzzustand Einfluss nehmenden Parameter sind der durch die Konstruktion, den Boden und den Grundwasserstand bestimmte Spannungszustand, der Wassergehalt des Bodens und die durch den Baugrund aktivierte Festigkeit. Nach Lambe & Withman (1979) kann für den während des Baufortschrittes zwangsläufig relevanten überkonsolidierten Boden keine allgemeingültige Beziehung zwischen den Festigkeitseigenschaften, dem effektiven Spannungszustand und dem Wassergehalt hergestellt werden, da sich diese jeweils in gegenseitiger Beeinflussung befinden. Die nachfolgenden Erläuterungen zum strukturellen Aufbau bindiger Böden, dem auf Zugversuchen begründeten Zusammenhang zwischen Wassergehalt und zu erwartender Zugfestigkeit und der spannungsabhängigen Festigkeit bindiger Böden sind daher wesentliche Grundlagen einer am Bauzustand orientierten Nachweisführung.

Die mechanischen Eigenschaften von Boden werden durch die Interaktion der Grundbestandteile Feststoff, Wasser und Luft bestimmt. Im Detail sind die Arten und Mechanismen der Kraftübertragung in Abhängigkeit der Porengrößen der Kornstruktur definiert. Die

Porengrößen werden maßgeblich durch die Zusammensetzung und Genese des Bodens bestimmt. Während in nichtbindigem Boden die Kraftübertragung über die Kornkontakte der Partikel stattfindet, wird in bindigem Boden zusätzlich der Einfluss von anziehenden und abstoßenden Kräften zwischen den Tonmineralen relevant. Chemische Vorgänge führen in diesem Zusammenhang zu Wassereinlagerungen und -bindungen durch Dipolbindung, Ionenbindung, Wasserstoffbrückenbindung und Van-der-Waals-Kräfte (Hiltmann & Stribny (1998)). Für Tonminerale werden die Wirkungsweisen oft mit der Theorie der Diffusen Doppelschichten erklärt (Heibroek (1996)). Durch die im bindigen Boden unterschiedlichen Funktionsprinzipien zur Kraftübertragung bildet sich eine aus Aggregaten bestehende Sekundärstruktur. Scherwiderstände werden in den Aggregatkontaktbereichen aktiviert.

Zur Analyse der Zugfestigkeit bindiger Böden existiert eine Vielzahl direkter und indirekter Versuchsmethoden. Die Zugfestigkeit kann indirekt durch den einaxialen Druckversuch nach DIN 18136 (2003), den Spaltzugversuch nach Schick (2005; 2006), den Biegezugversuch in Anlehnung an DIN EN 12390-5 (2001) und den Versuch mit der Laborflügelsonde nach DIN 4094-4 (2002) ermittelt werden. Zugfestigkeitsermittlungen bei direkter Krafteinleitung sind oft Thema wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen. Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben sind der Achterling-Versuch nach Niemeyer (1946), die Versuchsmethoden nach Scherbeck (1996), Brüggemann (1998), Junge (1999), Junge *et al.* (2000), Wendling & Meißner (2000; 2005), Zeh (2007) sowie der Modified-Tension-Test für Boden, vgl. Witt & Wudtke (2009), als Verfahren zur Untersuchung der Zugfestigkeit bindiger Böden zu nennen. Alle Versuchsmethoden haben eine mechanische Probenzerstörung gemeinsam.

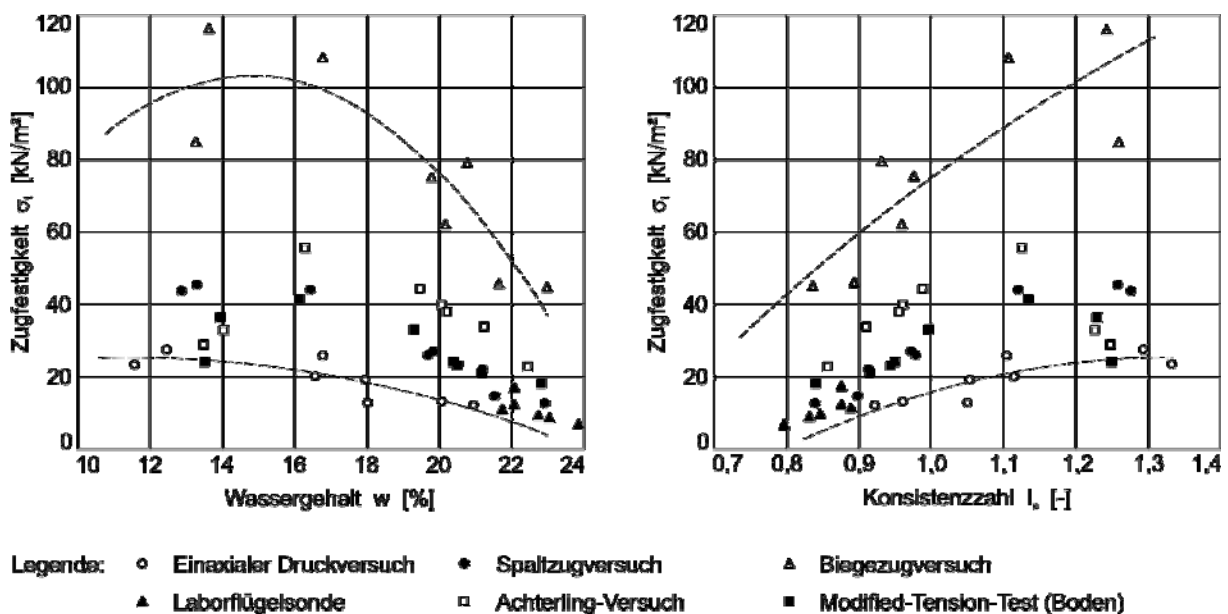


Bild 3: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Wassergehalt und Konsistenzzahl

Mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit der Verfahren zu vergleichen und die verfahrensspezifische Größenordnung der Zugfestigkeit zu identifizieren, wurden die verschiedenen Versuchsmethoden an einem tonigen Schluff der Bodengruppe TM ausgeführt. Als Ergebnis der Versuche ist in Bild 3 der Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Wassergehalt sowie Konsistenzzahl dargestellt. Anhand des Verlaufes der oberen und unteren Zugfestigkeits-

grenzen kann festgestellt werden, dass unterhalb einer steifplastischen Konsistenz ($I_c < 0,75$) die Zugfestigkeit vernachlässigbar gering ist.

Um eine dem Baufortschritt entsprechende Berücksichtigung der Zugfestigkeit zu ermöglichen, ist zusätzlich zum Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Wassergehalt die Spannungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaft zu berücksichtigen. Die oben genannten direkten und indirekten Zugversuche bilden aufgrund der vorhandenen einaxialen Krafteinleitung keinen für ein Baugrubenwiderlager realistischen Spannungszustand ab. Die Spannungsabhängigkeit der Zugfestigkeit bindiger Böden wurde in eigenen Versuchen untersucht, indem für einen definierten totalen Spannungszustand der gegenüber einer hydraulischen Einwirkung aktivierbare Widerstand ermittelt wurde. Die hydraulische Einwirkung wurde durch eine Steigerung des Porenwasserdruckes realisiert. Die Versuche wurden drainiert ausgeführt, d. h. die Druckänderungsgeschwindigkeit wurde sehr langsam gewählt und die Zu- und Abflüsse orientierten sich an der Wasserdurchlässigkeit des Versuchsbodens. Ein wesentliches Ergebnis der Versuche ist die Feststellung, dass eine Steigerung des wirksamen Spannungszustandes zu einer Erhöhung der Bodenzugfestigkeit führt. Die am Bodenwiderlager eines Verbaus wirksamen Zugfestigkeiten werden damit über den herkömmlich ermittelten Werten liegen.

4 Versagensmechanismen

Die Optimierung der Nachweismethode für einen hydraulischen Grundbruch im bindigen Boden erfordert eine Anpassung des Bemessungsansatzes an die Grenzzustandsbedingungen. Die Versagensmechanismen sind Rissentstehung, Scherbruch und Erosion. Obwohl innerhalb des Bodens stattfindende Partikeltransportvorgänge bereits im Stadium der hydraulisch verursachten Porenaufweitung zu einer Beeinflussung der Durchlässigkeits- und Festigkeitseigenschaften führen können, wird eine Erosion großmaßstäblich erst nach Erreichen des Grenzzustandes relevant, nach dem Aufbruch der baugrubenseitigen Bodenoberfläche. Vergleichsrechnungen zur möglichen Oberflächenerosion von Partikeln bei einer angenommenen aufwärts gerichteten Strömung haben gezeigt, dass bereits mit einem sehr geringen Kohäsionsanteil an der Gesamtscherfestigkeit eine Erosion nicht mehr der dominante Versagensmechanismus sein kann, vgl. Witt & Wudtke (2007) und Wudtke & Witt (2006).

Die Abgrenzung der Grenzzustände Rissentstehung und Scherbruch kann anhand der Spannungspfadanalyse im p' - q -Diagramm für beim hydraulischen Grundbruch kritische Bodenbereiche vorgenommen werden. Für das Bodenwiderlager einer Baugrubenwand sind grundsätzlich Spannungs- und Verformungsänderungen resultierend aus einem Bodenaus- und Einbau von Aussteifungen oder Verankerungen sowie Grundwasserabsenkungen relevant. Die Baumaßnahmen haben eine Änderung des Spannungszustandes zur Folge, die von einer gleichmäßigen Bodenentlastung ($-\Delta\sigma_1 = -\Delta\sigma_3$) bis hin zu einer gerichteten Widerbelastung des Bodenwiderlagers ($\Delta\sigma_3 > 0$) reichen. Der Verformungszustand des Bodens wird sich gleichzeitig in einem Bereich zwischen volumenkonstant und durch Aufweitungseffekte beeinflusst bewegen. Der Übergang zwischen dominanten Zug- oder Schubversagen wird durch die Funktion $q = p'$ beschrieben.

Um die Möglichkeit des Eintretens der beiden Versagensarten näher zu analysieren sind in Bild 4 zwei Spannungspfade gegenübergestellt. Ausgehend von einem an einem Baugrubenwiderlager gültigen Spannungszustand sind die Spannungspfade für eine Erhöhung der hydraulischen Belastung ($-\Delta\sigma_1 = -\Delta\sigma_3$) und für eine Verringerung der größten Hauptspannung ($\Delta\sigma_1 < 0$) bei gleichzeitig konstanter kleinster Hauptspannung ($\Delta\sigma_3 = 0$) dargestellt. Es wird deutlich, dass ein Zugversagen nur bei Steigerung der hydraulischen Einwirkung eintreten kann. Für den Bau einer Baugrube sind Spannungs- und Verformungszustände die eine gleichmäßige Entlastung bei einer gleichzeitigen Volumenkonstanz darstellen, prädestiniert für ein Zugversagen des Bodens. Entsprechende Randbedingungen sind hauptsächlich für den Fuß eines umströmten Verbaus gültig. Für sämtliche Bodenbereiche, die im weiteren Abstand zum Verbau liegen, wird im Grenzzustand ein Schubversagen relevant sein.

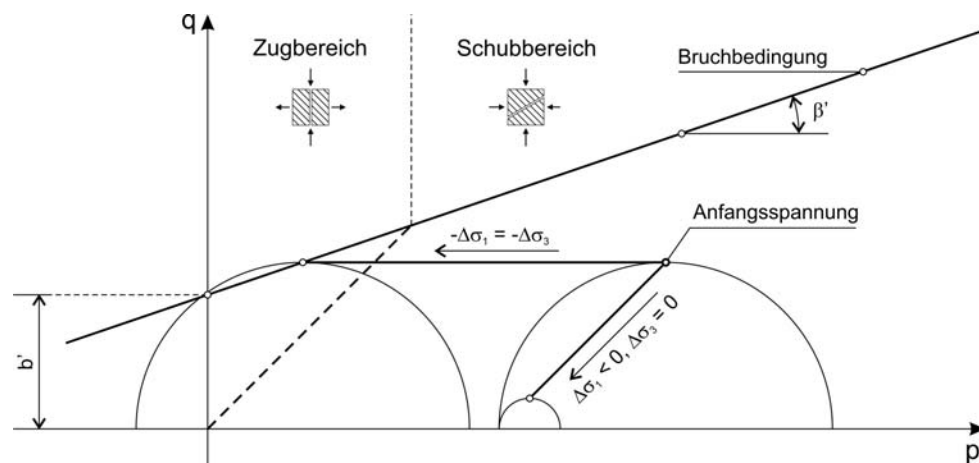


Bild 4: Spannungspfade am Bodenwiderlager eines Verbaus beim Aushub einer Baugrube

Eine Interpretation des Grenzzustandes durch bruchmechanische Theorien definiert den Grenzzustand zwangsläufig für die Rissentstehung oder für das Eintreten einer definierten Rissaufweitung. Die Theorie, ursprünglich für Feststoffe entwickelt Griffith (1921), hat inzwischen für verschiedene geotechnische Problemstellungen Anwendung gefunden. Hierzu zählen beispielsweise die böschungsparelle Rissausbreitung bei infiniten Lamellen Saada *et al.* (1985) sowie Tragfähigkeitsanalysen für Böschungen und Erddämmen mit und ohne den Einfluss von Porenwasserdruck Vallejo (1993). Durch Anwendung der Bruchmechanik wird es möglich, das Verformungsverhalten bei Spannungsänderungen als Resultat eines Baugrubenaushubs oder variabler Grundwasserstände zu berücksichtigen. Das Rissversagen repräsentiert schließlich die Zerstörung eines bestimmten Bodenvolumens. Der Grenzzustand findet nach Eintreten der Rissaufweitungseffekte in Form eines Scherbruchs oder durch Auftrieb der verbleibenden relativ geringmächtigen Bodenschicht ein. Beim Nachweis kann der Gesamtwiderstand durch die während der Rissentstehung und Rissaufweitung dissipierte Energie vergrößert werden Wudtke & Witt (2008).

5 Nachweisstrategie

Entsprechend der derzeitigen Bemessungspraxis ist keine Differenzierung der Nachweismethode nach der im Versagensbereich vorhandenen Bodenart vorgesehen. Durch den oben beschriebenen Unterschied der Versagensabläufe im nichtbindigen und bindigen Baugrund

kann die Relevanz der bodenspezifischen Festigkeitseigenschaften auf den Grenzzustand klar belegt werden. Eine verbesserte Nachweismethode muss den Bruchmechanismus, die Geometrie des Bruchkörpers und die bis zum Grenzzustand aktivierten Widerstände berücksichtigen.

Als konsequente Folge der Beschreibung des Grenzzustandes werden bis zum Aufbruch der abstromseitigen Bodenoberfläche Widerstände aus der während der strukturellen Zerstörung des Bodenkontinuums aktivierten Zugfestigkeit (Z), der durch die Widerlagerwirkung des Verbaus bedingten Bodenverspannung (A_v) sowie den beim finalen Aufbruch aktivierten Anteilen aus Scherfestigkeit (C_v) und Bodeneigengewicht (G') berücksichtigt, vgl. Bild 4-1. Die Widerstandsanteile A_v , C_v und G' sind durch die etablierten Bodenparameter bestimmbar.

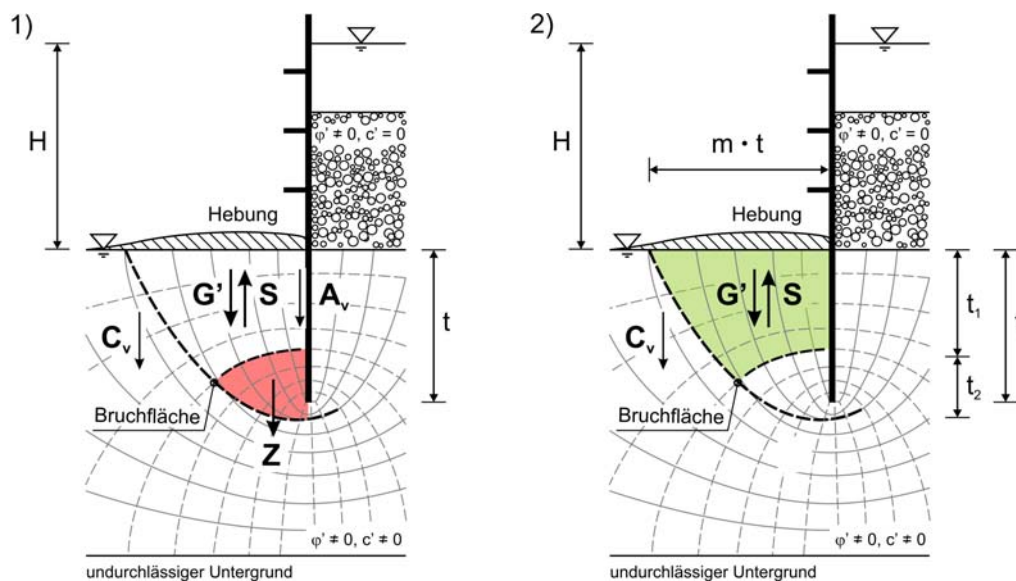


Bild 5: hydraulischer Grundbruch – Bemessungsansatz für bindigen Boden: 1) Einflussgrößen, 2) Grundlage Vergleichsrechnung

Um das beim hydraulischen Grundbruch im bindigen Baugrund relevante Bodenverhalten realistisch im Grenzzustand abzubilden, ist eine separate Betrachtung der strukturellen Bodenzerstörung und des finalen Aufbruches erforderlich. Im Nachweis ist zunächst die Ermittlung der Größe des strukturell zerstörten Bereiches notwendig um für die beiden resultierenden Kontrollvolumen jeweils die Sicherheit gegen das Versagen zu bestimmen. Während die Analyse der rissbedingten Bodenzerstörung einen ungeschädigten Boden voraussetzt, werden beim finalen Aufbruch die zuvor absolvierten Versagensschritte durch das verkleinerte Kontrollvolumen beim Nachweis berücksichtigt.

Das im Grenzzustand betrachtete Kontrollvolumen orientiert sich in Form und Dimension am Strömungsnetz, vgl. Bild 4-2. Im Versagenszustand reicht der relevante Versagensbereich bis unter die Wand, vgl. Odenwald & Herten (2008). Eine Unterscheidung der nach dem Versagensablauf identifizierten Bodenbereiche des Kontrollvolumens erfordert die Definition der geometrischen Parameter t_1 und t_2 . Im Detail bezeichnet t_1 die für den finalen Aufbruch relevante Einbindung der Wand während t_2 die Größe des Bereichs der im Vorfeld stattfindenden strukturellen Bodenzerstörung charakterisiert. Die Abgrenzung des Kontrollvolumens zum umgebenden Baugrund kann durch eine parabelförmige Funktion dargestellt werden.

Die Breite des Versagensbereichs muss den kritischsten Belastungszustand abbilden und ist daher zunächst variabel definiert, $m \cdot t$.

Die Berücksichtigung bindigen Bodenverhaltens wird nachfolgend anhand der Analyse des finalen Aufbruches dargestellt. Auf die Gegenüberstellung der Standsicherheitsberechnung bei einer Rissentstehung wird an dieser Stelle verzichtet. Das Grenzgleichgewicht kann demnach wie folgt beschrieben werden:

$$(\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot \frac{t_1}{3} \cdot \left(t_1 + t_2 - \frac{\sqrt{t_2^3}}{\sqrt{t_1 + t_2}} \right) + c' \cdot t_1 = 0 \quad (3)$$

Die effektive Kohäsion c' repräsentiert den beim Aufbruch aktivierten Scherwiderstand. Die Breite des Bruchkörpers ist mit $t/2$ angenommen. Der am Kontrollvolumenwirksame hydraulische Gradient i charakterisiert die hydraulische Einwirkung.

Exemplarisch soll im Folgenden der Nachweis ohne, Gleichung (1), und mit Berücksichtigung des Bodenwiderstandes, Gleichung (3), gegenübergestellt werden. Der Grenzzustand soll hierbei zunächst anhand der charakteristischen Werte der Einwirkungen und Widerstände analysiert werden. Das Berechnungsbeispiel geht von folgenden Randbedingungen aus:

$t = 2,0 \text{ m}$	Wandeinbindung
$t_1 = 1,75 \text{ m}$	Restwandeinbindung beim finalen Aufbruch
$t_2 = 0,5 \text{ m}$	Bereich des Strukturverlustes
$\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$	Auftriebsgewicht
$c' = 10 \text{ kN/m}^2$	effektive Kohäsion

Wird für den Fuß des umströmten Verbaus ein hydraulisches Potenzial von 4,5 m vorausgesetzt, ergibt sich nach dem herkömmlichen Berechnungsansatz aus Gleichung (1) ein Ausnutzungsgrad von $\mu = 114\%$. Die Sicherheit gegen einen hydraulischen Grundbruch ist somit rechnerisch nicht mehr gegeben. Bereits die in Gleichung (3) enthaltene Berücksichtigung der beim Aufbruch der Baugrubensohle aktivierten Scherwiderstände resultiert in einem Ausnutzungsgrad von $\mu = 55\%$ und zeigt damit noch deutliche Sicherheitsreserven des Bodenwiderlagers.

6 Zusammenfassung

Beim Nachweis des hydraulischen Grundbruches bleiben die nach DIN 1054 (2005) durch Scherverformung oder Zugfestigkeit aktivierbaren Widerstände unberücksichtigt. Die Folge ist bei bindigem Baugrund eine Überdimensionierung und unwirtschaftliche Abmessungen der Wand.

Eine Berücksichtigung der Bodenwiderstände erfordert zunächst eine differenzierte Betrachtung des die Bausituation und die Unterströmung charakterisierenden Kontrollvolumens. Die durch eine hydraulische Einwirkung verursachte strukturelle Zerstörung des Bodens vor dem Aufbruch erfordert die Berücksichtigung der Zugfestigkeit. Die Zugfestigkeit wird global durch die Bodenart und im Detail durch den Spannungszustand, die Porenzahl und den Wassergehalt des Bodens bestimmt.

Eine geschlossene Nachweismethode erfordert für bindigen Boden die Analyse der Sicherheit für die zwischenzeitlich eintretende strukturelle Bodenzerstörung und den finalen Aufbruch der baugrubenseitigen Bodenoberfläche.

7 Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse experimenteller und analytischer Untersuchungen sind Teil und basieren auf dem Forschungsprojekt „Hydraulischer Grundbruch in bindigen Böden“, das von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) gefördert wird. Wir bedanken uns für die Unterstützung und die kooperative Zusammenarbeit.

8 Literatur

- DIN 1054:2005 - Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 01/2005.
- DIN EN 1997-1:2005 - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 10/2005.
- DIN 4094-4:2002 - Baugrund - Felduntersuchungen, Teil 4: Flügelscherversuche, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 01/2002.
- DIN EN 12390-5:2001 - Prüfung von Festbeton, Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 02/2001.
- DIN 18136:2003 - Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Einaxialer Druckversuch, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 11/2003.
- Bligh, W. G. (1910): Dams, Barrages and Weirs on Porous Foundations, Engineering News, Vol. 64 (26), 708 - 710, 1910.
- Brüggemann, R. (1998): Zugfestigkeit verdichteter Tone als Funktion des Wassergehalts, Diplomarbeit, Institut für Grundbau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1998.
- Davidenkoff, R. (1964): Zur Berechnung des Hydraulischen Grundbruches, Wasserwirtschaft, Vol. (9), 230 - 235, 1964.
- Griffith, A. A. (1921): The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, in: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, containing Papers of a mathematical or physical Character, Vol. 221, Ed., 163 - 198, 1921.
- Heibroek, G. (1996): Zur Rissbildung durch Austrocknung in mineralischen Abdichtungsschichten an der Basis von Deponien, Institut für Grundbau, Ruhr-Universität Bochum Bochum, 1996.
- Hiltmann, W. & Stribny, B. (1998): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten: Tonmineralogie und Bodenphysik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 3-540-59465-5, 1998.
- Junge, T. (1999): Zur Bedeutung des Porenwasserdruckes für die Zugfestigkeit von Böden, Dissertation, Nr. 52, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität Kiel Kiel, 1999.
- Junge, T., Gräsle, W., Bensel, G. & R., Horn (2000): Einfluss des Porenwasserdruckes auf die Zugfestigkeit von Bodenproben, Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Vol. 163 (1), 21 - 26, 2000.

- Knaupe, W. (1968): Hydraulischer Grundbruch an Baugrubenumschließungen. Deutsche Bauencyklopädie, Schriftenreihen der Bauforschung, Reihe Ingenieur- und Tiefbau, Leipzig, 1968.
- Lambe, T. W. & Withman, R. V. (1979): Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1979.
- Lane, E. W. (1935): Security from under-seepage masonry Dams on Earth Foundations, Transactions American Society of Civil Engineers, Vol. 100 (1919), 1235 - 1351, 1935.
- Niemeyer, R. (1946): Der Lehm- und Schluffbau und seine praktische Anwendung. Sachse, 978-3922964100, 1946.
- Odenwald, B. & Herten, M. (2008): Hydraulischer Grundbruch: neue Erkenntnisse, Bautechnik, Vol. 85 (9), 585 - 595, 2008.
- Saada, A. S., Chudnovsky, A. & Kennedy, M. R. (1985): A Fracturing Mechanics Study of Stiff Clay, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 637 - 640, 1985.
- Scherbeck, R. (1996): Geotechnisches Verhalten mineralischer Deponieabdichtungen bei ungleichförmiger Verformungseinwirkung, Institut für Grundbau, Ruhr-Universität Bochum Bochum, 1996.
- Schick, P. (2005): Spaltzugversuche mit kohäsiven Böden, Bautechnik, Vol. 82 (2), 90 - 104, 2005.
- Schick, P. (2006): Durchführung und Auswertung von Spaltzugversuchen mit kohäsiven Böden, in: Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik, Vol., Ed., 41 - 62, Springer, Berlin, 2006.
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1961): Die Bodenmechanik in der Baupraxis. 9, Springer-Verlag, Berlin / Göttingen / Heidelberg, 1961.
- Vallejo, L. E. (1993): Shear stresses and the hydraulic fracturing of earth dam soils, Soils and Foundations, Vol. 33 (3), 14 - 27, 1993.
- Wendling, S. & Meißner, H. (2000): Zugverhalten eines teilgesättigten bindigen Bodens, in: 2. Workshop Weimar 2000, Teilgesättigte Böden, Schriftreihe Geotechnik, Vol. 4, Ed. T. Schanz, 97 - 101, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 3-86068-147-8, 2000.
- Wendling, S. & Meißner, H. (2005): Numerical study to the desiccation cracks formation in mineral liners for landfills, in: Unsaturated Soils: Numerical and Theoretical Approaches, Springer proceedings in physics, Vol. 2, Ed. T. Schanz, 251 - 266, Springer, Berlin, 3-540-21122-5, 2005.
- Witt, K. J. & Wudtke, R.-B. (2007): Versagensformen des Hydraulischen Grundbruches an einer Baugrubenwand, 22. Christian Veder Kolloquium, Graz, 12. & 13. April 2007, 229 - 242, 2007.
- Witt, K. J. & Wudtke, R.-B., (2009): Zugfestigkeit bindiger Böden, Hydraulischer Grundbruch in bindigem Boden, 5.2, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) & Bauhaus-Universität Weimar, 2009.
- Wudtke, R.-B. & Witt, K. J. (2006): A Static Analysis of Hydraulic Heave in Cohesive Soil, 3rd International Conference on Scour and Erosion, Amsterdam, 1 - 3 November 2006, 251, 2006.
- Wudtke, R.-B. & Witt, K. J. (2008): Einfluss von Bodenwiderständen beim Hydraulischen Grundbruch, 6. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Ostfildern, 22. & 23. Januar 2008, 147 - 153, 2008.
- Zeh, R. (2007): Die Zugfestigkeit bindiger Böden als Kriterium der Rissgefährdung mineralischer Oberflächenabdichtungen, Dissertation, Schriftenreihe Geotechnik Weimar, Heft 13, Bauhaus-Universität Weimar Weimar, 2007.