

Hydraulischer Grundbruch in bindigem Baugrund

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor – Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von:

Dipl.-Ing. Robert-Balthasar Wudtke
(Berlin)

Gutachter:

1. Univ. Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt
2. Univ. Prof. Dr. D. Kolymbas
3. Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Achmus

Tag der Disputation: 24. Januar 2014

Vorwort des Herausgebers

Das Phänomen des hydraulischen Grundbruchs wird schon seit fast 100 Jahren bei der Bemessung unterströmter Bauwerke berücksichtigt. International anerkannte Bemessungs- und Nachweisregeln gehen von einem sehr einfachen statischen Modell aus. Das Modell bildet nicht die im Bruchzustand auftretende Verflüssigung von nichtbindigem Boden ab und kann den stabilisierenden Einfluss einer Kohäsion bei bindigem Baugrund nicht berücksichtigen. Ob, wann und wie ein bindiger Boden bei einer gegen die Schwerkraft gerichteten Durchströmung im Sinne des Hydraulischen Grundbruchs versagt, wurde bisher kaum untersucht. Es gibt zwar in älteren Publikationen pragmatische Vorschläge zum Ansatz kohäsiver Widerstände, sie haben sich aber bei der Bemessung in der Ingenieurpraxis nicht durchgesetzt.

Hydraulisch bedingtes Versagen von unterströmten Bauwerken und Baugruben ist nach einigen Schadensfällen in jüngster Zeit erneut ins Blickfeld geraten. Es war ein Glücksfall, dass die Abteilung Erdbau der Bundesanstalt für Wasserbau vor einigen Jahren mit einem Forschungsauftrag an uns herangetreten ist, bei dem der stabilisierende Einfluss der Kohäsion untersucht und eine einfache Nachweismethode entwickelt werden sollte. Ersten Modellversuchen zur Veranschaulichung des Phänomens folgten theoretische Betrachtungen und Elementversuche im Labor. Das vorliegende Heft, die Dissertation von Herrn Wudtke, präsentiert die Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen zum Einfluss einer Kohäsion beim Hydraulischen Grundbruch und stellt einen neuen Bemessungsansatz vor. Eine einfache Formel zum Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch mit Berücksichtigung der Widerstände aus Kohäsion, anfängliches Ziel der Arbeit, ist dabei nicht herausgekommen. Dies ist der Komplexität des Bruchverlaufs geschuldet und der simplen Frage, wann, wo und in welchem Maß eine Kohäsion beim Versagen eines bindigen Bodens mobilisiert werden kann.

Die Arbeit formuliert die Gleichgewichtsbedingungen beim hydraulisch verursachten Versagen an einer unterströmten Baugrubenwand und entwickelt daraus einen Bemessungsansatz. Offen bleibt die Berücksichtigung der veränderten Zustände und Bedingungen vor dem Versagen, die Veränderung der Bodeneigenschaften, der Spannungs- und Potentialverteilung in der Bruchzone. Dieser Aspekt der Standsicherheit einer umströmten Baugrubenwand bei Annäherung an ein hydraulisch verursachtes Versagen bietet sich als ein lohnenswertes Thema der Fortführung und Erweiterung an.

Weimar, Juni 2014

Karl Josef Witt

Vorwort des Verfassers

In der vorliegenden Arbeit wird für den Grenzzustand Hydraulischer Grundbruch ein Berechnungsansatz zur Berücksichtigung bindigen Bodenverhaltens vorgestellt. Der Ansatz wurde auf der Grundlage von Versuchen und theoretischen Betrachtungen zum Versagen bindiger Böden unter dem Einfluss steigender Porenwasserdrücke entwickelt. Mit dem Berechnungsansatz werden repräsentativ für eine unterströmte Baugrubenwand zusätzlich zum Bodeneigengewicht Scherwiderstände und die Widerlagerwirkung an einem durch die Strömungsverteilung definierten Referenzvolumen berücksichtigt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mentor und Erstgutachter Herrn Professor Dr.-Ing. K. J. Witt für die Initiierung und fachliche Betreuung der Arbeit sowie die stets anregenden Diskussionen zum Thema.

Ich danke Herrn Professor Dr. D. Kolymbas für die Übernahme eines Koreferates und die konstruktive Kritik, welche wegweisend für die Interpretation des Grenzzustandes und Entwicklung des Berechnungsansatzes war.

Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. M. Achmus für die Übernahme eines Koreferates.

Die Arbeit entstand auf Grundlage des Forschungsprojektes „Hydraulischer Grundbruch in bindigen Böden“, welches von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) finanziert wurde. Für die fachlichen Diskussionen im Rahmen des Forschungsprojektes danke ich Herrn Dr.-Ing. B. Schuppener, Herrn Dr.-Ing. M. Heibaum, Herrn Dr.-Ing. B. Odenwald und insbesondere Frau Ch. Laursen.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeitern der geotechnischen Professuren der Bauhaus-Universität Weimar und der Abteilung Geotechnik der MFPA-Weimar sowie den vielen Studenten, welche im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten Anteil hatten.

Für die vielen fachlichen Diskussionen und die Hilfe bei der textlichen Überarbeitung der Arbeit danke ich Herrn Dr.-Ing. T. Wolff, Herrn Dr.-Ing. E. Bombasaro und insbesondere meiner Frau Idna.

Weimar, Juni 2014

Robert-Balthasar Wudtke

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XV
Symbolverzeichnis.....	XVII
1 Einführung.....	1
2 Stand der Forschung.....	3
2.1 Transportmechanismen und Versagensformen.....	3
2.1.1 Allgemeines.....	3
2.1.2 Hydraulisch verursachter Materialtransport im Boden.....	3
2.1.3 Hydraulisch verursachte Grenzzustände.....	5
2.2 Geschichtliche Entwicklung der Bemessung gegen Hydraulischen Grundbruch.....	8
2.3 Aktuelle Bemessungsansätze für nichtbindigen und bindigen Boden.....	11
2.4 Wissensdefizite.....	15
3 Zieldefinition und thematische Einordnung.....	17
4 Geologische und hydrogeologische Einflüsse.....	23
4.1 Allgemeines.....	23
4.2 Struktur bindiger Böden.....	24
4.3 Wasser im Baugrund.....	28
4.4 Eigenschaften und Verhalten bindiger Böden.....	32
4.5 Bedeutung für den Grenzzustand.....	35
5 Experimentelle Analyse.....	39
5.1 Hydraulisch induziertes Versagen bindiger Böden.....	39
5.1.1 Fragestellung.....	39
5.1.2 Versuchsmethode, -aufbau und -durchführung.....	40
5.1.3 Versuchsergebnisse.....	43

5.1.4	Schlussfolgerungen	46
5.2	Zugfestigkeit bindiger Böden.....	47
5.2.1	Allgemeines.....	47
5.2.2	Versuchsmethoden	49
5.2.3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	54
5.3	Hydraulisch bedingter Strukturverlust bindiger Böden	56
5.3.1	Motivation	56
5.3.2	Versuchsbeschreibung und -randbedingungen.....	57
5.3.3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	62
5.4	Bedeutung der Versuchsergebnisse für die Grenzzustandesanalyse im bindigen Boden	67
6	Grenzzustandesbetrachtungen zum hydraulischen Bodenversagen	71
6.1	Überblick.....	71
6.2	Erosion	72
6.2.1	Einleitung	72
6.2.2	Grundlagen und Randbedingungen	73
6.2.3	Ansätze zur Berechnung von Erosionsversagen.....	75
6.2.4	Vergleichsrechnungen und Schlussfolgerungen.....	76
6.3	Scherversagen	79
6.3.1	Grundlagen	79
6.3.2	Scherbruch vs. Rissversagen	81
6.3.3	Ansätze zur Berechnung von Scherversagen.....	85
6.3.4	Schlussfolgerungen	90
6.4	Rissversagen.....	90
6.4.1	Grundlagen	90
6.4.2	Ursachen und Ablauf der Rissentstehung im bindigen Boden	94
6.4.3	Ansätze zur Berechnung von Rissversagen.....	96
6.4.4	Schlussfolgerungen	101

6.5	Gegenüberstellung der Grenzzustände	103
7	Berechnungsansatz.....	107
7.1	Nachweisstrategie	107
7.2	Beschreibung des Versagenskörpers.....	110
7.3	Rissversagen	117
7.4	Scherversagen.....	120
7.4.1	Referenzvolumen	120
7.4.2	Eigengewicht.....	122
7.4.3	Scherwiderstand	123
7.4.4	Widerlagerwirkung	126
7.5	Zusammenstellung des Berechnungsansatzes.....	131
8	Analyse des Berechnungsansatzes.....	137
8.1	Berechnungsgrundlagen.....	137
8.2	Vergleichsrechnungen	140
8.2.1	Randbedingungen.....	140
8.2.2	Ergebnisse nach DIN EN 1997-1 (2009) und DIN 1054 (2010).....	140
8.2.3	Ergebnisse nach WUDTKE & WITT (2006).....	142
8.2.4	Ergebnisse nach neuem Berechnungsansatz	144
8.2.5	Auswertung	148
8.3	Schlussfolgerungen.....	152
9	Zusammenfassung.....	155

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	schematische Darstellung eines Hydraulischen Grundbruches an einer Baugrubenwand.....	5
Abbildung 2:	Entwicklung eines Erosionsgrundbruches: 1) Initiation und erste Schädigung, 2) rückschreitende Erosion, 3) Bildung eines Strömungskanals, 4) Durchbruch und Bodenverflüssigung nach EAU (2005)	6
Abbildung 3:	verschiedene Situationen beim Auftriebsnachweis: 1) Betonsohle, 2) tief liegende Dichtungsschicht, 3) Einbindung in gering durchlässige Schicht, 4) annähernd undurchlässige Schicht unter der Baugrubensohle nach EAB (2006)	7
Abbildung 4:	geschichtliche Entwicklung von Bemessungsansätzen zum Hydraulischen Grundbruch.....	11
Abbildung 5:	Berechnungsansatz für Hydraulischen Grundbruch in nichtbindigem Boden: 1) Modellvorstellung, 2) Parameterdefinition nach TERZAGHI & PECK (1948).....	13
Abbildung 6:	Berechnungsansatz für Hydraulischen Grundbruch: 1) in nichtbindigem Boden, 2) in bindigem Boden nach DAVIDENKOFF (1956) (1970)	14
Abbildung 7:	Betrachtungsebenen beim Hydraulischen Grundbruch im bindigen Baugrund	19
Abbildung 8:	Zusammensetzung bindiger Böden: links - Korngefüge und Porenarten, rechts - Porengrößenverteilungsbereiche verschiedener Bodenarten; nach HEIBROCK (1996) und HARTGE & HORN (1991)	27
Abbildung 9:	Grundlagen zur Herleitung von Darcy's Gesetz anhand der Theorie poröser Medien nach PERAU (2001) (2010).....	30
Abbildung 10:	Abhängigkeit zwischen Wassergehalt, Porenwasserdruck, Sättigungszahl und Elastizitätsmodul; leichtplastischer Ton (TL) nach MURDOCH (1992a).....	34
Abbildung 11:	Phasen eines hydraulischen Grundbruches in einem Zweischichtsystem mit relativ durchlässiger Deckschicht nach KNAUPE (1972).....	39
Abbildung 12:	Versuchsgerät zur visuellen Identifizierung des Grenzzustandes; links - nach Abschluss der Versuchsvorbereitungen, rechts - Dimension.....	41

Abbildung 13: Visualisierung eines Hydraulischen Grundbruches in bindigem Baugrund: Versuchsaufbau, -messtechnik und -ablauf	42
Abbildung 14: Seitenansicht - initiale Schädigung (1) und Draufsicht - trichterförmiges Referenzvolumen (2)	44
Abbildung 15: Verteilung von Ausbauwassergehalt (Differenz zum Einbauwassergehalt) und Volumendehnung.....	45
Abbildung 16: Ableitung wassergehaltspezifischer Widerstände anhand der rheologischen Einteilung von Böden nach REHFELD (1972).....	48
Abbildung 17: Gestalt und Form des Probekörpers beim Zugversuch nach NIEMEYER (1946) und DIN 18952 (1956), Blatt 2	52
Abbildung 18: Versuchsprinzip MTT-Boden nach WITT & WUDTKE (2009c).....	53
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Wassergehalt sowie Konsistenzzahl.....	56
Abbildung 20: Schematischer Zeit-Spannungs-Verlauf beim Versuch mit hydraulischer Probenzerstörung	58
Abbildung 21: Versuchsbeschreibung: oben - Schema des Versuchsstandes, unten links - Spannungsverteilung und initiale Schädigung, unten rechts - Geometrie und Bestandteile des Probekörpers	59
Abbildung 22: Bauphasenweise Spannungszustände am Fuß eines umströmten Baugrubenverbaus	61
Abbildung 23: Gegenüberstellung von Grenzzuständen bei mechanischer und hydraulischer Probenzerstörung; Dokumentation der Versuchsrandbedingungen.....	63
Abbildung 24: Grenzzustände bei hydraulischer Probenzerstörung; isotrope und anisotrope Spannungsrandbedingungen.....	64
Abbildung 25: Volumendehnung ϵ , Porenwasserdruckänderung Δu und maximale Spannungsdifferenz q bei Versuchen mit hydraulischer Probenzerstörung .	65
Abbildung 26: Spannungsabhängigkeit des kritischen hydraulischen Gradienten; Versuch bei hydraulischer Probenzerstörung.....	66
Abbildung 27: Vergleich der Versagensarten Erosion, Zugversagen und Schubversagen...	71
Abbildung 28: Erosionskriterien nach REHFELD (1967) und DAVIDENKOFF (1976)	73

Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Kohäsion und kritischem hydraulischen Gradienten für verschiedene bindige Böden nach REHFELD (1967) (1), DAVIDENKOFF (1976) (2), MÜLLNER (1991) (3) und ZOU (2000) (4).....	77
Abbildung 30: Gegenüberstellung der kritischen hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit der Kohäsion für 1) Ton (TL/TM/TA), 2) mittelplastischen Schluff (UM) und 3) leichtplastischen Schluff (UL) bei Anwendung verschiedener Erosionskriterien	78
Abbildung 31: Charakteristische Spannungsverlaufszonen für unterschiedliche Bauzustände nach BECKER (2009)	82
Abbildung 32: Effektive Spannungspfade im undrainierten Triaxialversuch, normal konsolidiert und überkonsolidiert.....	83
Abbildung 33: Differenzierung von Scher- und Zugversagen für Spannungspfade am Bodenwiderlager einer Baugrubenwand	84
Abbildung 34: Grenzen des elastischen und plastischen Materialverhaltens von Böden.....	86
Abbildung 35: Elastoplastische Materialmodelle: 1) Mohr-Coulomb, 2) Cam-Clay	88
Abbildung 36: Scherfestigkeit bei gesättigten und ungesättigten Randbedingungen sowie Druck- und Zugspannungen	92
Abbildung 37: Analyse der Rissentstehung in Tonen: 1) wassergehaltsabhängige Steifigkeitseigenschaften des Versuchsbodens, 2) zeitabhängiger Flüssigkeitsdruck bei konstantem Injektionsvolumen für verschiedene Wassergehalte nach MURDOCH (1992a) c)	95
Abbildung 38: Bruchmechanismen bei Flüssigkeitsinjektion in eine Pore bei undrainierten Randbedingungen: 1) Zugriss, 2) Scherbruch nach MITCHELL & SOGA (2005) ⁷⁰	97
Abbildung 39: Spannungen an einem Bodenelement mit einem Riss nach VALLEJO (1993)	100
Abbildung 40: Vergleich der Versagensarten Erosion, Scherbruch und Rissversagen: links - i_{krit} in Abhängigkeit von c' bzw. σ'_t , rechts - i_{krit} in Abhängigkeit von I_C	104
Abbildung 41: Berechnungsansatz Hydraulischer Grundbruch im bindigen Boden: 1) Dimension Kontrollvolumen, 2) Einwirkungen und Widerstände	109

Abbildung 42: Verteilungen von Potenzial- und Stromlinien sowie Gradienten für unterströmte Wände bei geschichtetem Baugrund (links) und homogenem Baugrund (rechts)	112
Abbildung 43: Bereiche für dominantes Scherversagen (A_S) und Rissversagen (A_R) an einer umströmten Baugrubenwand bei geschichtetem Baugrund (links) und homogenem Baugrund (rechts).....	113
Abbildung 44: Versagensbereiche für Riss- und Scherversagen bei räumlichem Referenzvolumen.....	115
Abbildung 45: Schematisierte Darstellung der zweidimensionalen Flächenanteile von Scherbuch (A_S) und Rissversagen (A_R): links - Verläufe A_i/A_{Gesamt} , rechts - Verläufe m für Flächengleichheit.....	116
Abbildung 46: Versagens- und Schädigungskriterium bei drainierten und undrainierten Randbedingungen	118
Abbildung 47: Versagensbereiche am Referenzvolumen bei ebener Betrachtung.....	121
Abbildung 48: Parameterdefinition bei räumlichem Scherversagen	125
Abbildung 49: Scherflächenbestimmung bei räumlichem Referenzvolumen.....	126
Abbildung 50: Größe und Ausrichtung der effektiven Hauptspannungen für die Bauphasen 1, 5 und 6.....	127
Abbildung 51: Spannungen an einer unterströmten Wand: links - Vertikalspannungsvergleich im Endzustand, rechts - bauphasenweise Horizontalspannungen	128
Abbildung 52: Berechnungsablauf Rissversagen / hydraulisch verursachter Strukturverlust	132
Abbildung 53: Berechnungsablauf Scherversagen (ebene Analyse)	133
Abbildung 54: Berechnungsablauf Scherversagen (räumliche Analyse).....	134
Abbildung 55: Verschiedene Ansätze eines Starrkörperversagens nach WUDTKE & WITT (2006).....	138
Abbildung 56: Ausnutzungsgrad und kritischer hydraulischer Gradient (DIN EN 1997-1 (2009) und DIN 1054 (2010)).....	141
Abbildung 57: Ausnutzungsgrad und kritischer hydraulischer Gradient: 1) rechteckiger Körper, 2) dreieckiger Körper, 3) parabelförmiger Körper	143

Abbildung 58: Ausnutzungsgrad und kritischer hydraulischer Gradient für unterschiedliche Widerstandskombinationen bei ebenem Berechnungsansatz: 1) UL, 2) UM.....	144
Abbildung 59: Ausnutzungsgrad und kritischer hydraulischer Gradient für unterschiedliche Widerstandskombinationen bei ebenem Berechnungsansatz: 1) TL, 2) TM, 3) TA	145
Abbildung 60: Ausnutzungsgrad und kritischer hydraulischer Gradient für unterschiedliche Widerstandskombinationen bei räumlichem Berechnungsansatz: 1) UL, 2) UM.....	146
Abbildung 61: Ausnutzungsgrad und kritischer hydraulischer Gradient für unterschiedliche Widerstandskombinationen bei räumlichem Berechnungsansatz: 1) TL, 2) TM, 3) plastischer Ton TA.....	147
Abbildung 62: Zusammenstellung bodenspezifischer Ausnutzungsgrade bei ebenem Berechnungsansatz und unterschiedlicher Widerstandsaktivierung.....	149
Abbildung 63: Zusammenstellung bodenspezifischer Ausnutzungsgrade bei räumlichem Berechnungsansatz und unterschiedlicher Widerstandsaktivierung.....	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bodenspezifischer Zusammenhang zwischen Analyseziel und Betrachtungsebene.....	20
Tabelle 2:	Chemische Bindungsarten und ihre Bindungsenergie nach ATKINS & DE PAULA (2006), HUHEEY et al. (2003) und JEFFREY (1997).....	25
Tabelle 3:	Sequenzen des Versagens beim Hydraulischen Grundbruch im bindigen Boden.....	44
Tabelle 4:	Versuchseigenschaften indirekter Zugversuche	49
Tabelle 5:	Versuchseigenschaften direkter Zugversuche	51
Tabelle 6:	Vergleich der Variationskoeffizienten für indirekte und direkte Zugversuche	55
Tabelle 7:	Überblick und Interpretation zum Versuchsprogramm	61
Tabelle 8:	Bodenkennwerte auf der Grundlage von Erfahrungswerten	76
Tabelle 9:	Zusammenstellung von Materialmodellen zur Anwendung für gesättigten bindigen Boden.....	87
Tabelle 10:	Theorienvergleich zum Rissversagen.....	102
Tabelle 11:	Interpretation der Einwirkungen und Widerstände nach dem Nachweiskonzept von DIN EN 1997-1 (2009)	109
Tabelle 12:	Berechnungsansätze und Widerstandsberücksichtigung bei Vergleichsrechnungen zum Hydraulischen Grundbruch in bindigen Böden.....	138

Symbolverzeichnis

A_1	[m ²]	ungeschädigter Scherkörperanteil des Referenzvolumens, eben
A_{1+2}	[m ²]	Scherkörperanteil des Referenzvolumens, eben
A_{1+2+3}	[m ²]	Gesamtreferenzvolumen, eben
A_S	[m ²]	Scherbruchkörperfläche
A_R	[m ²]	Rissversagensfläche
C	[kN/m]	Scherkraft; basierend auf der effektiven Kohäsion c' als Reibungsanteil
C_b, C_m		Kompressionszahl hinsichtlich totaler Spannung bzw. Saugspannung
C_{erf}		reduzierter Sickerwegquotient
C_v	[kN/m ²]	Widerstand resultierend aus der Scherfestigkeit bindiger Böden
G'	[kN/m]	charakteristische Eigenlast eines durchströmten Bodenkörpers unter Auftrieb
E	[MN/m ²]	Elastizitätsmodul
$E_{a,v}$	[kN/m]	vertikaler Anteil des aktiven Erddruckes
$E_{p,v}$	[kN/m]	vertikaler Anteil des passiven Erddruckes
F_v	[kN/m ²]	Widerstand resultierend aus der Widerlagerwirkung an einer Verbauwand
I_A		Aktivitätsindex
I_c		Konsistenzzahl
I_p		Plastizitätszahl
K		intrinsische Permeabilität des Korngefüges
K_h		Erddruckbeiwert
K_i		Spannungsintensitätsfaktor
N		Normalkraft
OCR		Überkonsolidationsverhältnis

Q	[m ³ /s]	Wasserdurchfluss
S	[kN/m]	Strömungskraft, Einwirkung
$S_{dst,d}$	[kN/m]	Bemessungswert der Strömungskraft, destabilisierend
$S_{dst,k}$	[kN/m]	charakteristischer Wert der Strömungskraft, destabilisierend
S'_d	[kN/m]	Bemessungswert der Strömungskraft
S'_k	[kN/m]	charakteristische Strömungskraft an einem durchströmten Bodenkörper
T		Tangentialkraft
T_1		Gefügefaktor
U		Ungleichförmigkeitszahl, potenzielle Oberflächenenergie
V_1	[m ²]	ungeschädigter Scherkörperanteil des Referenzvolumens, räumlich
V_{1+2}	[m ²]	Scherkörperanteil des Referenzvolumens, räumlich
V_{1+2+3}	[m ²]	Gesamtreferenzvolumen, räumlich
$VarK$	[%]	Variationskoeffizient
W		Dehnungsenergie
Z	[kN/m]	Zugkraft, basierend auf der effektiven Zugfestigkeit σ'_t
c'	[kN/m ²]	effektive Kohäsion, Scherparameter
c_u	[kN/m ²]	undrainierte Kohäsion, Scherparameter
d	[mm]	Korndurchmesser
d_{17}	[mm]	Korndurchmesser, repräsentativ für 17 M.-% Siebdurchgang
d_a	[μ m]	Äquivalentdurchmesser
d_p	[mm]	äquivalenter Porendurchmesser
e		Porenzahl
h_a	[m]	mittlere Restdruckhöhe
i_a		hydraulischer Gradient; basierend auf der mittleren Restdruckhöhe h_a

i_{krit}		kritischer hydraulischer Gradient
i_{max}		maximaler hydraulischer Gradient
$i_{m,y}$		größter mittlerer hydraulischer Gradient im Abstrom, richtungsabhängig
$i_{Schädigung}$		schädigungsrelevanter hydraulischer Gradient
i_{vorh}		hydraulischer Gradient
k_f	[m/s]	Wasserdrucklässigkeit
l_{erf}	[m]	erforderliche Strömungslänge, Gesamtsickerlänge
m		Anpassungsfaktor Referenzvolumenbreite
n		Porenanteil
t	[m]	Einbindung eines Verbaus (baugrubenseitig)
t_l	[m]	Referenzvolumenhöhe im Bereich effektiver Druckspannungen
$t_{l,g}$	[m]	Höhe des geschädigten Referenzvolumens im Bereich effektiver Druckspannungen
$t_{l,u}$	[m]	Höhe des ungeschädigten Referenzvolumens im Bereich effektiver Druckspannungen
t_2	[m]	Referenzvolumenhöhe im Bereich effektiver Zugspannungen
p	[kN/m ²]	mittlerer Spannungszustand
q	[kN/m ²]	maximale Spannungsdifferenz
q_u	[kN/m ²]	einaxiale Druckfestigkeit
u_0	[kN/m ²]	Anfangsporenwasserdruck
u_1	[kN/m ²]	Porenwasserdruck im Grenzzustand
$u_{dst,d}$	[kN/m ²]	Bemessungswert des Porenwasserdruckes, destabilisierend
$u_{dst,k}$	[kN/m ²]	charakteristischer Wert des Porenwasserdruckes, destabilisierend
u_{oben}	[kN/m ²]	Porenwasserdruck an Probenoberseite
u_{unten}	[kN/m ²]	Porenwasserdruck an Probenunterseite
w	[%]	Wassergehalt

w_L	[%]	Fließgrenze
w_{Pr}	[%]	Wassergehalt bei optimalem Verdichtungsgrad
x	[m]	horizontale Abstand von der Baugrubenwand
z	[mm]	halbe Rissbreite
ϕ'	[°]	effektiver Reibungswinkel, Scherparameter
ϕ_m	[°]	mobilisierter Reibungswinkel, Scherparameter
γ_c, γ_{cu}		Teilsicherheitsbeiwert für Scherwiderstände aus drainierter und undrainierter Kohäsion
$\gamma_{G,dst}$		Teilsicherheitsbeiwert für destabilisierende ungünstige ständige Einwirkungen
$\gamma_{G,stab}$		Teilsicherheitsbeiwert für stabilisierende günstige ständige Einwirkungen
γ_H		Teilsicherheitsbeiwert für die Strömungskraft
γ_ϕ		Teilsicherheitsbeiwert für Scherwiderstände aus Reibung
γ_w	[kN/m ³]	Raumgewicht von Wasser
γ'	[kN/m ³]	Raumgewicht unter Auftrieb
η		Sicherheitsfaktor
η_F		dynamische Viskosität
ν		Querdehnzahl
σ_3, σ_1	[kN/m ²]	kleinste und größte totale Hauptspannung
σ'	[kN/m ²]	effektive Spannung
σ'_3, σ'_1	[kN/m ²]	kleinste und größte effektive Hauptspannung
σ_t'	[kN/m ²]	effektiven Zugfestigkeit
τ	[kN/m ²]	Schubspannung

1 Einführung

Nach der gültigen Definition des Grenzzustandes tritt ein Hydraulischer Grundbruch an einer unterströmten Baugrubenwand ein, wenn infolge der aufwärts gerichteten Durchströmung eines Bodens in einem diskreten Bodenvolumen die effektiven Spannungen aufgehoben werden. Der Grenzzustand kann im nichtbindigen Boden als eine Art Bodenverflüssigung charakterisiert werden. Für bindigen Boden ist aufgrund der unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften ein abweichendes Versagen gültig.

Nach DIN EN 1997-1 (2009) und DIN 1054 (2010) wird der Grenzzustand Hydraulischer Grundbruch unter dem Gesichtspunkt des Versagensablaufes nicht nach der Bodenart des durchströmten Baugrundes unterschieden. Die Nachweisführung geht von einem rechteckigen Referenzvolumen an der Innenseite einer unterströmten Baugrubenwand aus. Für den Boden vor dem Wandfuß hat das Referenzvolumen eine Breite, die der halben baugrubenseitigen Wandeinbindung in den gesättigten Baugrund entspricht. Der Nachweis kann bei Berücksichtigung totaler oder effektiver Spannungen geführt werden. Destabilisierende Einwirkungen sind durch Porenwasserdrücke oder Strömungskräfte gegeben. Stabilisierende Einwirkungen werden durch totale Spannung an der Unterseite des Referenzvolumens oder das Auftriebsgewicht desselben berücksichtigt. Eine Berücksichtigung weiterer bodenspezifischer Widerstände ist nach DIN EN 1997-1 (2009) nicht vorgesehen.

Gemäß dem gültigen Bemessungsansatz ist eine Unterscheidung der im Referenzvolumen betrachteten Böden nach ihrem Durchströmungsverhalten vorgesehen. Für Böden wie Kies, Kiessand, mindestens mitteldicht gelagerten Sand ($d > 0,2 \text{ mm}$) und mindestens steifplastische tonige bindige Böden ist demnach mit einem günstigen Durchströmungsverhalten zu rechnen. Als ungünstig gelten locker gelagerte Sande, Feinsand, Schluff sowie weichplastischer bindiger Boden.

Ansätze zur Berücksichtigung von Scherwiderständen, welche den vor dem Versagen eintretenden Aufweitungsprozess des Bodens charakterisieren, sind nicht in der gültigen Grenzzustandsanalyse integriert. Hintergrund ist ein Wissensdefizit über den Zusammenhang zwischen Versagensabfolge, Form und Größe des Referenzvolumens und den ansetzbaren Festigkeitseigenschaften.

Die Berücksichtigung bindigen Bodenverhaltens beim Hydraulischen Grundbruch erfordert die Kenntnis spannungsabhängiger Festigkeitseigenschaften unter Beachtung veränderlicher Wassergehalte. Für bindigen Boden charakterisieren die Kohäsion und die Zugfestigkeit die maßgeblichen Festigkeitseigenschaften. Für den abzubildenden Grenzzustand liegen die

Defizite der Versuchsmethoden zur Ermittlung der Festigkeitseigenschaften in der Reproduzierbarkeit eines definierten Sättigungsgrades / Wassergehaltes sowie Spannungszustandes und in den zeitlichen Versuchsrandbedingungen begründet. Die Faktoren sind im Kontext eines Hydraulischen Grundbruches bindiger Böden bestimmend für den Grenzzustand.

Die Sicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch an einer unterströmten Wand wird durch den Spannungszustand, die Strömungsbelastung und den Wassergehalt im Bereich der Einbindung bestimmt. Die genannten durch die Bausituation bestimmten Randbedingungen sind Grundlage zur Identifikation der dominanten Versagensart. Eine Optimierung des Bemessungsansatzes Hydraulischer Grundbruch für bindige Böden erfordert eine vergleichende Analyse der für das Phänomen möglichen Versagenszustände Erosion, Rissversagen und Scherbruch unter Beachtung des Einflusses der Festigkeitseigenschaften auf die Versagensmechanismen.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Bemessungsansatzes für den Grenzzustand Hydraulischer Grundbruch, welcher die Festigkeitseigenschaften bindiger Böden berücksichtigt. Grundlage des Ansatzes sind die Erkenntnisse zum Versagensablauf bindiger Böden und der den Grenzzustand kennzeichnenden Versagensart. Die Grenzzustandsbetrachtung muss die für den Versagensbereich charakteristischen Bodeneigenschaften und die bausituationsspezifische Potenzialverteilung repräsentieren. Die Festigkeitseigenschaften des Baugrundes sind spannungs- und wassergehaltsabhängig zu berücksichtigen.