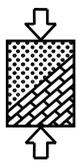


Zeichen:
Au/Zie

Datum:
30.03.2012

Zusammenfassung

- Aktenkennzeichen: P 52-5- 11.73.1-1351/09
- Forschungsvorhaben: „Sicherheitsnachweise für den Hydraulischen Grundbruch
- Erweiterung für den räumlichen Fall und für
geschichteten sowie anisotropen Boden“
- Forschende Stelle: Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen und
Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und
Verkehrswasserbau der RWTH Aachen (GiB)
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen
- in Zusammenarbeit mit
- Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
der RWTH Aachen (IWW)
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen
- Bearbeiter: Dipl.-Ing. Benjamin Aulbach (GiB)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler (GiB)
Dipl.-Inform. Sarah Horsten (IWW)
Dr.-Ing. Nils Peter Huber (IWW)



Zusammenfassung

1 Einführung

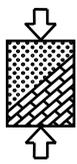
Im Rahmen eines früheren Forschungsvorhabens des Lehrstuhls für Geotechnik im Bauwesen (GiB) der RWTH Aachen wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zur Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch bei ebenen Verhältnissen angestellt und dazu Bemessungshilfen erarbeitet. Erste dreidimensionale Untersuchungen hatten aber auch aufgezeigt, dass eine dreidimensionale Betrachtungsweise in den meisten Fällen unerlässlich ist und weiterführende Untersuchungen für den räumlichen Fall notwendig waren.

Dem wurde im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens Rechnung getragen, indem durch das GiB intensive und umfangreiche Untersuchungen zur Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch unter Berücksichtigung räumlicher Anstromverhältnisse durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen beruhen auf der Auswertung numerischer Strömungsberechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode.

2 Wissenschaftliche Ausgangsbasis und Stand der Kenntnis

Die Untersuchungen und Erkenntnisse des aktuellen Forschungsvorhabens bauen auf denen des vorherigen Forschungsvorhabens „Sicherheitsnachweise für den Hydraulischen Grundbruch“ auf. Durch das vorherige Forschungsvorhaben ist bereits eine breite wissenschaftliche Ausgangsbasis vorhanden, die in dem dazugehörigen Abschlussbericht (vgl. [4]) ausführlich dokumentiert wurde. Erkenntnisse aus dem ersten Forschungsvorhaben konnten daher vorausgesetzt werden und wurden nicht nochmals im Detail beleuchtet. Insbesondere zu Untersuchungen, Näherungsverfahren und Empfehlungen anderer Wissenschaftler, Autoren und Gremien sei auf die umfangreiche Zusammenstellung im Abschlussbericht des vorherigen Forschungsvorhabens verwiesen.

Sowohl die vorherigen als auch die aktuellen Untersuchungen basieren auf einer Gegenüberstellung der Gewichtskraft unter Auftrieb G' und der Strömungskraft S . Dies entspricht den Regelungen des Eurocodes DIN EN 1997-1:2009-09 [1] (EC7) inklusive des dazugehörigen Nationalen Anhangs DIN EN 1997-1/NA:2010-12 [2] und der deutschen Ergänzungsnorm DIN 1054:2010-12 [3].



Die Gleichung für den Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch nach EC7 lautet:

$$S_{dst;d} = S_{dst;k} \cdot \gamma_H \leq G'_{stb;k} \cdot \gamma_{G,stb} = G'_{stb;d} \quad (1)$$

mit γ_H Teilsicherheitsbeiwert für die Strömungskraft

$\gamma_{G,stb}$ Teilsicherheitsbeiwert für günstige ständige Einwirkungen

Für die Untersuchungen wurden die Teilsicherheitsbeiwerte der Bemessungssituation BS-T verwendet. Diese entsprechen ebenso wie das Nachweisformat nach Gleichung (1) auch den Regelungen nach alter DIN 1054:2005-01.

Darüber hinaus gilt sowohl nach alter DIN 1054:2005-01 als auch nach EC7, dass die Ermittlung der Strömungskraft in der Regel durch Auswertung eines Strömungsnetzes erfolgen sollte. Weiterhin gilt nach wie vor, dass wenn der Boden vor dem Fuß einer Stützwand von unten nach oben durchströmt wird, die Strömungskraft in einem Bodenkörper zu betrachten ist, dessen Breite b in der Regel gleich der halben Einbindetiefe $T/2$ der Stützwand angenommen werden darf (sogenannter Terzaghi-Körper).

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Ermittlung der Strömungskraft an Strömungsnetzen bzw. Potentialverteilungen vorgenommen, welche aus numerischen Strömungsberechnungen erhalten wurden. Dabei wurde in der Regel an den Seiten der Baugruben der sogenannte Terzaghi-Körper mit $b = T/2$ (vgl. Abbildung 1, links) und in den Baugrubenecken ein im Grundriss dreieckiger Körper mit einer Kathetenlänge von ebenfalls $b = T/2$ betrachtet.

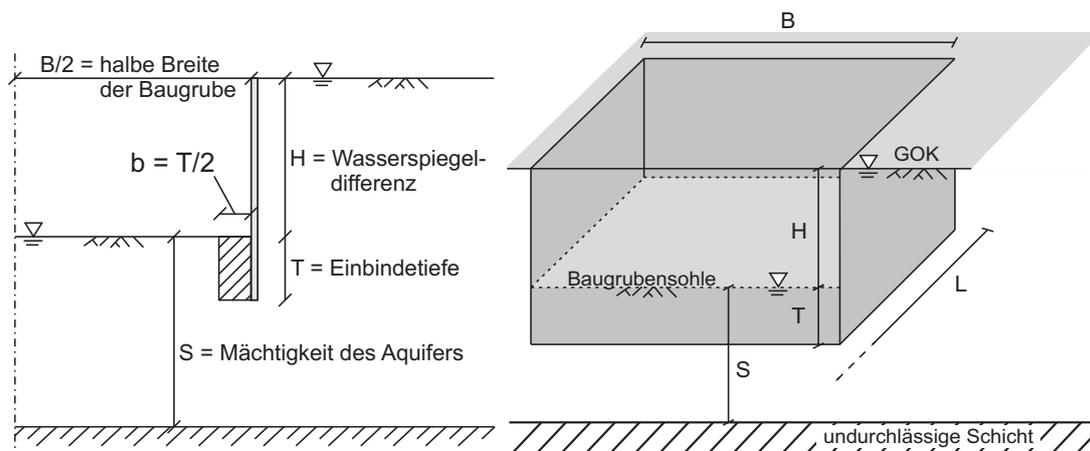
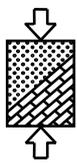


Abbildung 1: Systemskizze 2D und 3D

Um eine Übertragung der Untersuchungsergebnisse auf beliebig große Baugruben zu ermöglichen, wurden alle geometrischen Größen wie z.B. die Baugrubenbreite B auf die Wasserspiegeldifferenz H (vgl. Abbildung 1) bezogen wurden.



3 Feflow[®]-Modul

Bei der Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe auf Basis der Auswertung von Strömungsnetzen bzw. Potentialverteilungen handelt es sich um einen iterativen Prozess. Da eine Änderung der Einbindetiefe auch immer eine Veränderung der Strömung nach sich zieht, sind immer mehrere Rechengänge notwendig, um die Einbindetiefe für eine bestimmte Situation zu erhalten. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der zu variierenden geometrischen Größen B, L und S sowie der verschiedenen Baugrundeigenschaften ergaben sich alleine für homogenen und isotropen Baugrund ca. 11000 notwendige Berechnungen.

Um den Arbeits- und Zeitaufwand soweit zu reduzieren, dass die geplanten Berechnungen für den räumlichen Fall innerhalb eines vertretbaren Zeitraums realisierbar wurden, wurde zunächst ein Modul entwickelt, mit Hilfe dessen Teile der iterativen Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe automatisiert wurden. Hierzu wurde das Strömungsprogramm Feflow[®] verwendet, welches eine Schnittstelle – den sogenannten InterFaceManager (IFM) – bereitstellt, mit dem es möglich ist, während des Programmablaufs Modifikationen am Rechenmodell vorzunehmen. Die Programmierung dieses Feflow[®]-Moduls erfolgte durch den Projektpartner „Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft“ der RWTH Aachen in enger Abstimmung mit dem GiB.

Nach dem Laden eines Ausgangsmodells und dem Simulationsstart, wird durch das Feflow[®]-Modul durch Veränderung der Durchlässigkeit einzelner Elemente, durch Verschiebung von Knoten (vgl. Abbildung 2) und durch die Definition von Randbedingungen eine Baugrube entsprechend den Informationen in der Input-Datei erstellt.

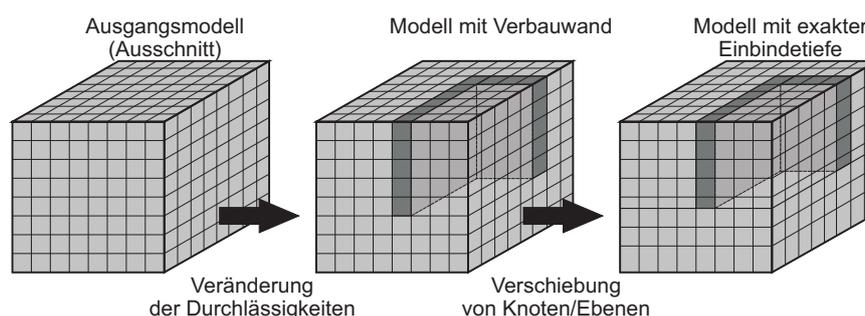
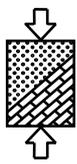


Abbildung 2: Skizze zur Modellanpassung

Im Anschluss an die Modellerstellung bzw. -anpassung erfolgen die Strömungsberechnung und die Überprüfung der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch. Sofern der Ausnutzungsgrad von $\mu \approx 1,0$ abweicht, wird die Einbindetiefe im Modell angepasst und eine neue Berechnung durchgeführt. Wird mit der erforderlichen Genauigkeit ein Ausnutzungsgrad von $\mu = 1,0$ erreicht, werden die Ergebnisse (Einbindetiefe T, Ausnutzungsgrad μ etc.) in einer Output-Datei abgespeichert.



Während der Entwicklung und stetigen Erweiterung des Feflow[®]-Moduls wurden parallel Kontrollrechnungen mit dem Program GGU-SSFlow3D durchgeführt, um mögliche Fehler innerhalb des Programmablaufs frühzeitig identifizieren und beseitigen zu können. Weiterhin wurden mit dem neu entwickelten Modul zunächst gleiche Fälle wie im Rahmen des vorherigen Forschungsvorhabens berechnet und miteinander verglichen, wobei stets gleiche Ergebnisse erhalten wurden.

4 Homogener und isotroper Baugrund

Im Rahmen des vorherigen Forschungsvorhabens wurden bereits für günstigen Baugrund und eine Wichte unter Auftrieb von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ umfangreiche Berechnungen angestellt und in Form von Bemessungsdiagrammen aufbereitet (vgl.[4]). Mit Hilfe des neu entwickelten FEFLOW[®]-Moduls und der damit einhergehenden Verringerung des Arbeitsaufwands konnten nun auch für ungünstigen Baugrund und verschiedene Wichten unter Auftrieb Untersuchungen für den räumlichen Fall angestellt werden. Der bezüglich des Baugrunds abgedeckte Wertebereich kann folgender Tabelle entnommen werden.

Wichtenverhältnis: γ'/γ_w	0,9	1,0	1,1	1,2
$\gamma_H = 1,30$ (günstig)	x	x	x	x
$\gamma_H = 1,60$ (ungünstig)	x	x	x	x

Tabelle 1: Wertebereich des untersuchten Baugrunds

Der Wertebereich der untersuchten geometrischen Verhältnisse erstreckt sich von schmalen ($B/H = 0,25$) bis hin zu breiten Baugruben ($B/H = 5,0$), von quadratischen ($B/L = 1,0$) bis hin zu langgestreckten Baugruben ($B/L = 0,3$) sowie von geringmächtigen ($S/H = 1,0$) bis hin zu mächtigen Grundwasserleitern ($S/H = 3,0$). Weiterhin wurde analog zu den vorherigen Untersuchungen eine Unterscheidung zwischen dem Eckbereich und der Stirn- bzw. der Längsseite vorgenommen.

Unabhängig von den bereits beschriebenen Kontrollberechnungen zur Überprüfung des Moduls (vgl. Abschnitt 3) wurden auch alle neu erhaltenen Ergebnisse stichprobenartig durch Vergleichsrechnungen mit GGU-SSFlow3D überprüft.

Aus den berechneten Einbindetiefen wurden dimensionslose Bemessungsdiagramme entwickelt, mit Hilfe derer die für die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch erforderliche Einbindetiefe einfach und unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen ermittelt werden kann. Die folgende Abbildung zeigt zwei der insgesamt 64 Bemessungsdiagramme für homogenen, isotropen Baugrund unter Berücksichtigung räumlicher Anstromverhältnisse.

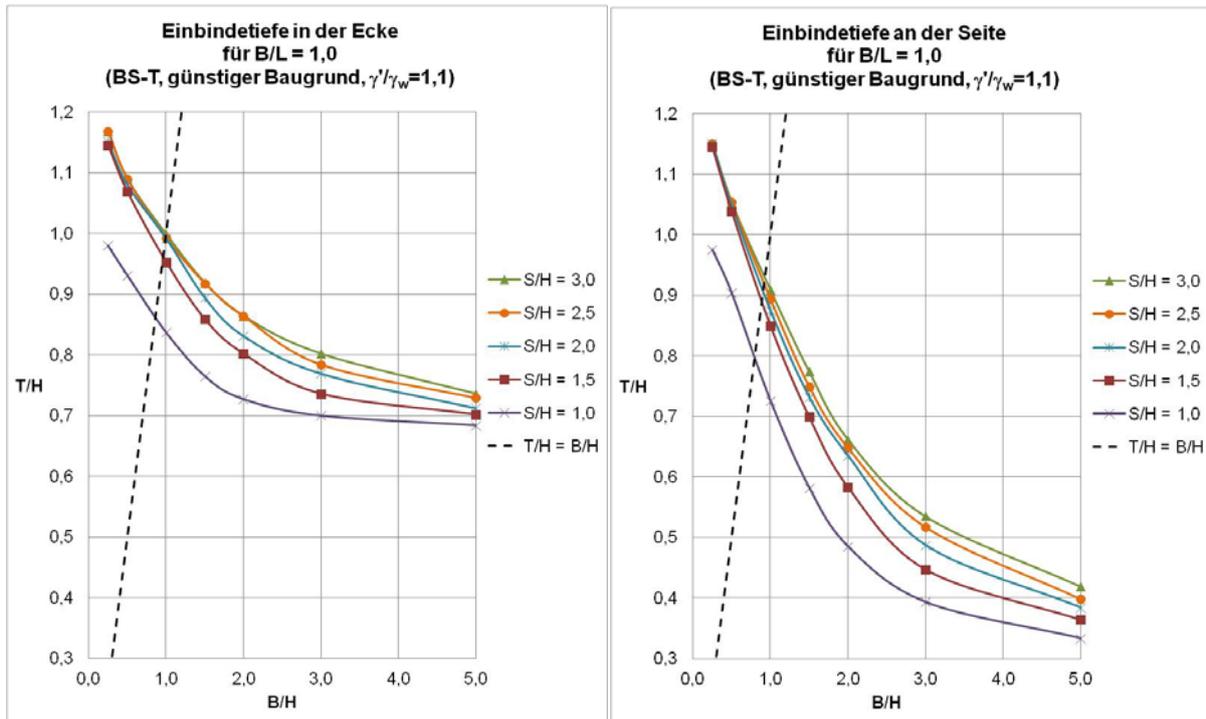
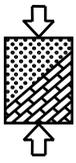


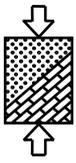
Abbildung 3: Dimensionslose Bemessungsdiagramme für quadratische Baugruben

In den Diagrammen ist - jeweils bezogen auf die Wasserspiegeldifferenz H - die erforderliche Einbindetiefe T/H über der Baugrubenbreite B/H aufgetragen. Die verschiedenen Kurven berücksichtigen die Mächtigkeit des Aquifers S/H .

Anhand der Bemessungsdiagramme ist deutlich der Einfluss der Baugrubenbreite zu erkennen. Je geringer die Breite einer Baugrube ist, desto größer ist auch die erforderliche Einbindetiefe. Für kleine Baugruben mit $B/H \leq 2,0$ nimmt die erforderlichen Einbindetiefe sehr stark zu, da hier durch die zunehmende Querschnittsverengung der größte Teil des Potentials im Inneren der Baugrube abgebaut wird.

Weiterhin ist der Einfluss der Aquifermächtigkeit zu erkennen. Da bei geringmächtigen Aquiferen unterhalb des Verbauwandfusses nur ein begrenzter Durchflussquerschnitt zur Verfügung steht, findet auf dem horizontalen Fließweg ein größerer Potentialabbau statt. Dies führt wiederum dazu, dass bei geringmächtigen Aquiferen geringere Einbindetiefen als bei sehr mächtigen Aquiferen erforderlich sind.

Vor allem zeigen die Diagramme aber, dass aufgrund der räumlichen Zuströmung in den Ecken von Baugruben teils wesentlich größere Einbindetiefen als an den Seiten erforderlich sind. Bei rechteckigen Baugruben wird im Gegensatz zu quadratischen Baugruben (vgl. Abbildung 3) zusätzlich zwischen der kürzeren Stirn- und der Längsseite unterschieden. In diesen Fällen ist die erforderliche Einbindetiefe an der Stirnseite stets größer als an der Längsseite. Mit abnehmender Baugrubenbreite werden die Unterschiede zwischen Ecke, Stirn- und Längsseite jedoch immer



geringer, da bei kleinen Baugruben ohnehin der größte Teil des Potentialabbaus im Baugrubeninneren stattfindet.

Auch die Wichte des Baugrunds hat einen entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch. Je geringer diese ist umso größer ist die erforderliche Einbindetiefe. Daher wurden vier verschiedene Wichten $\gamma' = 9 \div 12 \text{ kN/m}^3$ betrachtet und hierfür jeweils Bemessungsdiagramme aufgestellt. Um die Vielzahl der Diagramme für den Anwender zu reduzieren, wurde schließlich eine Interpolationsfunktion getestet, welche im Rahmen des vorherigen Forschungsvorhabens entwickelt wurde. Diese ermöglicht es, für beliebige Wichten unter Auftrieb γ' die erforderliche Einbindetiefe auf der Basis der Ergebnisse für die Referenzwichte $\gamma'_{\text{ref}} = 11 \text{ kN/m}^3$ zu ermitteln und lautet:

$$\frac{T}{H}(\gamma') = \frac{T}{H}(\gamma'_{\text{ref}}) \cdot \left(\frac{\gamma'_{\text{ref}}}{\gamma'} \right)^{\sqrt{2}} \quad (2)$$

mit γ' Wichte unter Auftrieb des vorhandenen Baugrunds

$\gamma'_{\text{ref}} = 11 \text{ kN/m}^3$ (Referenzwichte)

Bei Anwendung dieser Interpolationsfunktion ist zwischen günstigem und ungünstigem Baugrund zu unterscheiden und jeweils die entsprechende Einbindetiefe $T/H(\gamma'_{\text{ref}})$ zu verwenden.

Mit Ausnahme von sehr schmalen Baugruben mit $B/H \leq 0,5$ oder geringmächtigen Aquiferen mit $S/H = 1,0$ liefert die Funktion sehr gute Ergebnisse. Sehr große Abweichungen treten nur dann auf, wenn geringe Baugrubenbreiten in Kombination mit geringmächtigen Aquiferen vorliegen. In diesen Fällen sollten die Verbauwände jedoch ohnehin ausreichend tief in den Grundwasserstauer einbinden, wodurch die Gefahr eines hydraulischen Grundbruchs ausgeschlossen werden kann und die Anwendung der Diagramme bzw. der Interpolationsfunktion hinfällig wird.

5 Anisotrope und geschichtete Baugrundverhältnisse

Sowohl bei anisotropen Verhältnissen, bei denen die horizontale Durchlässigkeit k_h größer als die vertikale Durchlässigkeit k_v ist, als auch dann, wenn eine weniger durchlässige Schicht von einer wesentlich durchlässigeren Schicht überlagert wird, verringert sich die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch gegenüber homogenen und isotropen Verhältnissen. Zu sehen ist dies anhand der Abbildung 4 für anisotrope (links) und geschichtete (rechts) Verhältnisse. Im rechten Diagramm charakterisiert die Variable h die Lage der Schichtgrenze, wobei $h = 1$ einem homogenem Aufbau entspricht und die Schichtgrenze für $h = 0$ in Höhe der Baugrubensohle liegt.

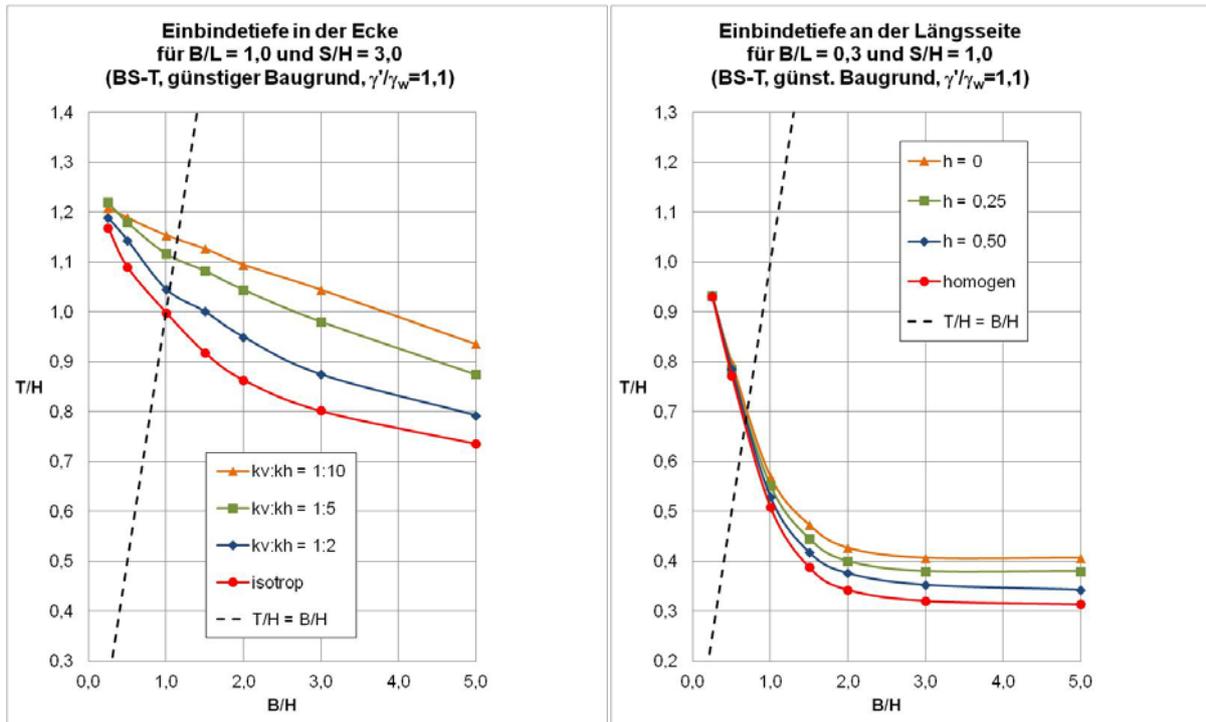
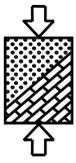


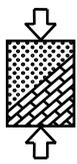
Abbildung 4: Vergleich der Einbindetiefe für anisotrope (links) und geschichtete (rechts) Verhältnisse

In einem weiteren Schritt wurden daher zunächst anisotroper Baugrund und schließlich geschichtete Baugrundverhältnisse untersucht. Für beide Fälle wurden auf Basis der Untersuchungsergebnisse Empfehlungen erarbeitet und Näherungsformeln entwickelt. Diese beinhalten neben verschiedenen Eingangsparametern wie z.B. der Baugrubenbreite auch jeweils einen Lagefaktor, mit Hilfe dessen berücksichtigt wird, ob die Ecke, die Stirn- oder die Längsseite betrachtet wird.

Sowohl mit der Näherung für anisotropen und als auch mit der Näherung für geschichteten Baugrund werden mit geringen Einschränkungen ausreichend genaue Ergebnisse erhalten. Damit wurde neben den Bemessungshilfen für homogenen und isotropen Baugrund ein weiteres Hilfsmittel zur Bemessung von Baugruben bezüglich der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch geschaffen.

6 Baugruben mit abgetreppten Verbauwänden

Mit den Bemessungshilfen kann für die Ecke, die Stirn- und die Längsseite einer Baugrube die jeweils erforderliche Einbindetiefe ermittelt werden. Auf der sicheren Seite könnten Baugruben mit der für die Ecke ermittelten Einbindetiefe ausgeführt werden. Eine konstante Einbindetiefe bedeutet jedoch für den Mittelbereich der Seiten eine Überdimensionierung (vgl. Abbildung 5, rechts oben) und behindert zudem verstärkt den natürlichen Grundwasserfluss. Gerade aber bei dauerhaft im Boden verbleibenden Verbauwänden wird oft gefordert, dass die natürlichen Grundwasserverhältnisse nicht unnötig verändert werden. Um dies berücksichtigen



zu können, wurden daher auch Berechnungen mit abgetreppten Verbauwänden durchgeführt, wie folgende Abbildung zeigt.

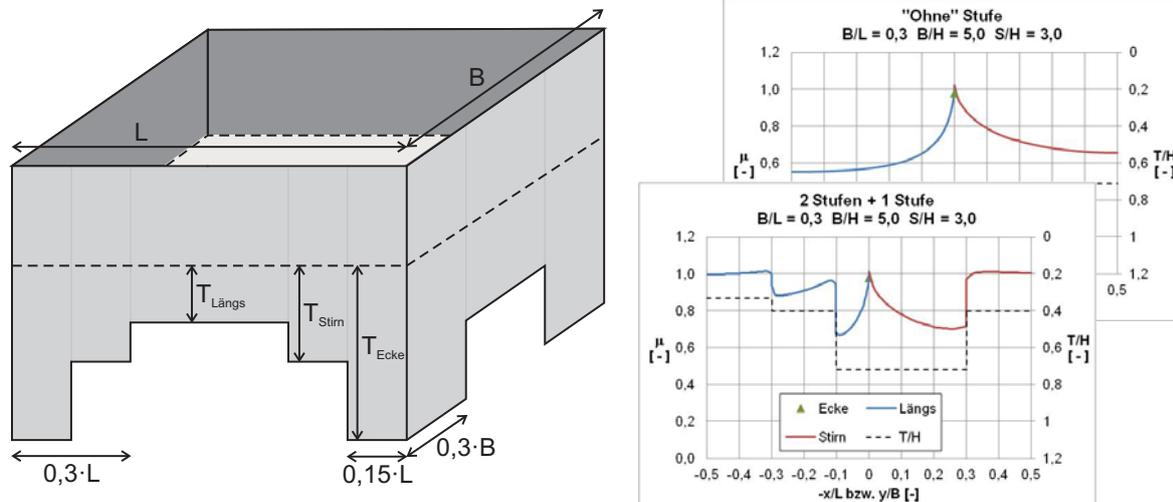


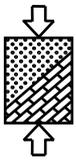
Abbildung 5: Systemskizze mit abgetreppter Verbauwand und Ausnutzungsgrad μ entlang von Verbauwänden

Auf Basis dieser Untersuchungen wurden drei Ansätze entwickelt mit denen auf Basis der erforderlichen Einbindetiefe aus den Bemessungsdiagrammen Baugruben so dimensioniert werden können, dass eine zugleich sichere als auch an die Anstromverhältnisse angepasste Lösung erhalten wird.

7 Wertung für die praktische Anwendung

Mit den Bemessungsdiagrammen und der Interpolationsfunktion für homogene und isotrope Baugrundverhältnisse steht ein Instrument zur Verfügung, mit Hilfe dessen die für die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch erforderliche Einbindetiefe auf einfache Weise und unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen ermittelt werden kann. Mit den ergänzenden Empfehlungen und Näherungen kann zusätzlich auch die erforderliche Einbindetiefe für anisotrope sowie geschichtete Verhältnisse abgeschätzt werden. Eine Anpassung der Verbauwände an die unterschiedlichen Anstromverhältnisse in den Ecken und an den Seiten von Baugruben kann durch die entwickelten Ansätze mit abgetreppten Verbauwänden erfolgen.

Insgesamt bieten die Ergebnisse des Forschungsvorhabens die Möglichkeit, für eine Vielzahl von Situationen die erforderliche Einbindetiefe in Abhängigkeit der geometrischen Verhältnisse und der Beschaffenheit des Baugrunds direkt zu bestimmen oder aber zumindest realitätsnahe Eingangswerte für eigene Untersuchungen zu ermitteln und damit den Aufwand erheblich zu reduzieren.



Literatur

- [1] DIN EN 1997-1:2009-09, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Allgemeine Regeln;
Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009
- [2] DIN EN 1997-1/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln
- [3] DIN 1054:2010-12, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1
- [4] Ziegler, M., Aulbach, B.
Sicherheitsnachweise für den Hydraulischen Grundbruch
Abschlussbericht Stuttgart, 2009
Fraunhofer IRB Verlag