

Zeichen:
Zie/Au

Datum:
19.03.09

Zusammenfassung

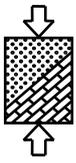
Aktenkenzeichen: ZP 52-5- 11.73-1299/08

Forschungsvorhaben: „Sicherheitsnachweise für den Hydraulischen Grundbruch“

Forschende Stelle: Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen

in Zusammenarbeit mit

Wayss & Freytag Ingenieurbau AG
Eschborner Landstraße 130-132
60489 Frankfurt



Zusammenfassung

1 Einführung

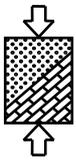
Der hydraulische Grundbruch zählt zu den gefährlichsten Versagensmechanismen im Bereich der Geotechnik. Dies liegt daran, dass durch rückschreitende Erosion der hydraulische Grundbruch ohne große Vorankündigung eintritt (EAU, E 116) und es innerhalb kürzester Zeit zum schlagartigen großflächigen Aufbrechen der Baugrubensohle kommt. Ein solches System weist keine Duktilität im Sinne von DIN 1054, Abschnitt 4.3.4 auf.

Für den rechnerischen Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch werden meist Näherungsverfahren für ebene Verhältnisse verwendet, die auf einer Betrachtung des direkt an der Baugrubenwand entlang führenden Stromfadens beruhen. Sie berücksichtigen generell nicht die Geometrie der Baugrube, die Mächtigkeit des Grundwasserleiters und die aufgrund der räumlichen Zuströmung im Eckbereich veränderten Verhältnisse. Berechnungen mit einem linearen Druckabbau, wie er in einigen kommerziellen Rechenprogrammen verwendet wird, liegen praktisch immer auf der unsicheren Seite.

Erkenntnisse, welche durch die Wayss & Freytag Ingenieurbau AG bei der Planung der schmalen Schlitzwandbaugruben für die unterirdischen Bahnhöfe der U-Bahn-Linie Nord-Süd-Stadtbahn Köln der Kölner Verkehrs-Betriebe AG (KVB) gewonnen wurden, waren Auslöser, weiterführende Untersuchungen zur Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch durchzuführen. Bei der Planung der Schlitzwandbaugruben der Haltestellen erwiesen sich übliche Berechnungsverfahren und die Ergebnisse einiger der verwendeten Rechenprogramme z. T. entweder als unwirtschaftlich oder als auf der unsicheren Seite liegend.

2 Stand der Kenntnis

Ein hydraulischer Grundbruch tritt ein, wenn ein Boden infolge einer nach oben gerichteten Strömungskraft gewichtslos wird. Aufwärtsgerichtete Strömungskräfte treten z.B. dann auf, wenn innerhalb einer Baugrubenkonstruktion ein niedrigerer Wasserstand als außerhalb der Baugrube vorherrscht. Dadurch strömt das Wasser von außen nach innen bzw. vom höheren zum niedrigeren Potential um den Verbau herum und bewirkt eine Strömungskraft, welche im Inneren der Baugrube nach oben gerichtet ist. Ist diese Strömungskraft S'_k größer als das Eigengewicht des Bodens unter Auftrieb G'_k zuzüglich eventueller Auflasten, so kommt es zu einem Anheben des Bodens. Dieser Vorgang wird als hydraulischer Grundbruch bezeichnet.



Der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ist in der DIN 1054 geregelt und wird dem Grenzzustand GZ1A zugeordnet. Die Grenzzustandsbedingung lautet:

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

mit γ_H Teilsicherheitsbeiwert für die Strömungskraft bei günstigem bzw. ungünstigem Untergrund im Grenzzustand GZ1A

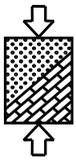
$\gamma_{G, \text{stb}}$ Teilsicherheitsbeiwert für günstige ständige Einwirkungen im Grenzzustand GZ1A

Die Strömungskraft S'_k ist nach DIN 1054 in der Regel durch Auswertung eines Strömungsnetzes zu ermitteln. Unabhängig davon, ob dieses zeichnerisch, durch Modellversuche oder durch numerische Berechnungen erhalten wird, sind ungünstige Einflüsse wie die räumliche Wirkung bei schmalen, runden oder rechteckigen Baugruben zu berücksichtigen. In überschaubaren Fällen dürfen auch Näherungslösungen verwendet werden.

Ergänzend zur DIN 1054 zählen die Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ – EAB und die Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ – EAU zum Stand der Technik. Im Wesentlichen entsprechen die dort getroffenen Aussagen der DIN 1054. Auch dort wird empfohlen, die Ermittlung der Strömungskraft durch Auswertung eines Strömungsnetzes vorzunehmen. Allerdings besagt die EAB, dass, wenn die Voraussetzungen für eine räumliche Wirkung gegeben sind, eine Erhöhung des aufwärtsgerichteten Strömungsdruckes gegenüber dem ebenen Fall zu erwarten ist. Weiterhin sind die Baugrubenwände an den Ecken und gegebenenfalls an den Schmalseiten tiefer zu führen als im mittleren Bereich der Längsseiten, um auch dort die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch wie an den anderen Stellen einer rechteckigen Baugrube gleich groß zu erhalten. Darüber hinaus werden sowohl in der EAB als auch in der EAU Näherungsverfahren zur Bestimmung der Strömungskraft vorgeschlagen.

Neben der EAB und der EAU enthält die weiterführende Literatur wie z.B. das Grundbautaschenbuch auch noch andere Näherungsverfahren. Die gängigsten Näherungsverfahren werden im vollständigen Abschlussbericht beschrieben.

Hierbei wird auch, sofern die einzelnen Näherungsverfahren dies vorsehen, auf die Berücksichtigung der räumlichen Anströmung eingegangen.



3 Numerische Berechnungen

Im Rahmen der angestellten Untersuchungen wurde die Ermittlung der Strömungskraft ausschließlich durch die Auswertung von mit numerischen Programmen berechneten Potentialverteilungen bzw. Strömungsnetzen vorgenommen. Dabei wurde am Lehrstuhl für Geotechnik der RWTH Aachen mit dem Programm GGU-SS-Flow2D bzw. GGU-SS-Flow3D und bei der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG mit dem Programm Sofistik-Hydra gearbeitet.

Sämtliche Untersuchungen wurden für homogenen und isotropen Baugrund durchgeführt.

In Voruntersuchungen wurde zunächst der maßgebende Bruchkörper ermittelt. Dabei wurde innerhalb der Scherfuge zwischen Bruchkörper und Boden Reibung angesetzt, da sonst immer ein infinitesimal kleiner Streifen bzw. Stromfaden entlang der Verbauwand maßgebend wäre.

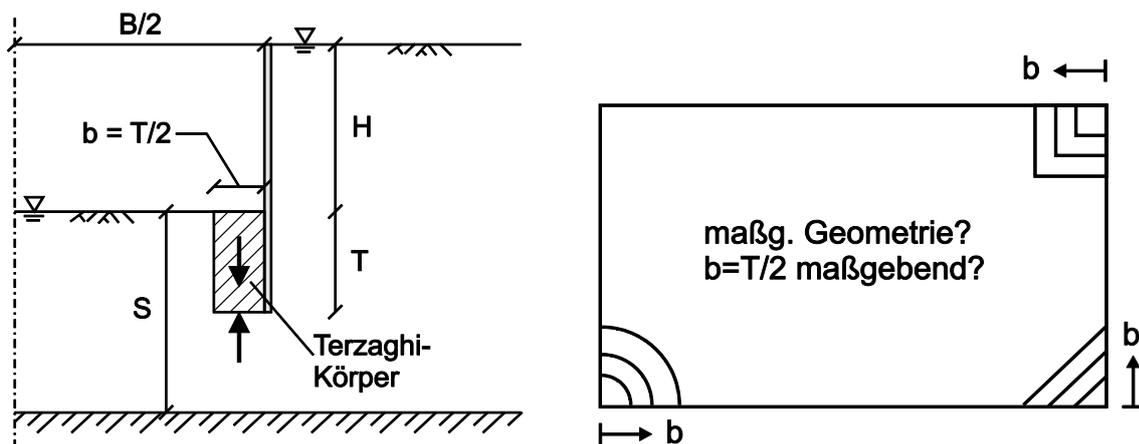
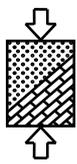


Abbildung 1: Systemskizze mit Bruchkörper im ebenen Fall und Bruchkörper im Grundriss im räumlichen Fall

Die Voruntersuchungen ergaben, dass im ebenen Fall ein Körper der Breite $b = T/2$ maßgebend ist. Untersuchungen im räumlichen Fall ergaben, dass die maßgebende Form im Grundriss ein Dreieck der Kantenlänge $b = T/2$ ist (vgl. Abbildung 1).

Um für möglichst viele Situationen die erforderliche Einbindetiefe zu ermitteln, wurde zunächst im ebenen Fall die Breite der Baugrube B und die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht S variiert. Weiterhin wurden sowohl die Wichte variiert, als auch zum einen günstiger und zum anderen ungünstiger Baugrund mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten angesetzt.

Die Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe T erfolgte für jedes der Systeme iterativ durch Überprüfung des Ausnutzungsgrades μ . Wenn dieser $\mu = 1,0$ beträgt entspricht die zugehörige Einbindetiefe der nach DIN 1054 erforderlichen Einbindetiefe. Weiterhin erfolgen alle Ergebnisdarstellungen dimensionslos, indem sämtliche Größen auf die Wasserspiegeldifferenz H bezogen werden.



Neben den vorab beschriebenen zahlreichen ebenen Berechnungen wurden auch umfangreiche räumliche Berechnungen durchgeführt. Eine entsprechende Systemskizze zeigt Abbildung 2.

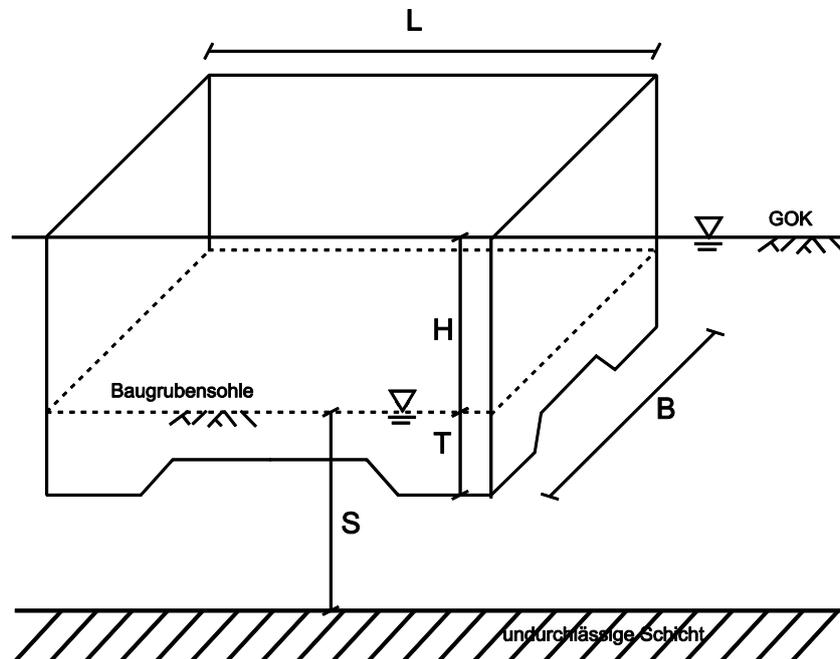


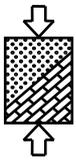
Abbildung 2: Systemskizze für den räumlichen Fall

Die Bezeichnungen im räumlichen Fall entsprechen denen im ebenen Fall. Zusätzlich kommt jedoch die Länge der Baugrube L als weitere zu variierende Größe hinzu. Die in Abbildung 2 bereits skizzierte Abtreppung des Verbaus wurde in diesen Berechnungen zunächst noch nicht in Ansatz gebracht.

Analog zum ebenen Fall wurden auch im räumlichen Fall die Breite der Baugrube B sowie die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht S variiert. Wie bereits erwähnt ist es im räumlichen Fall zusätzlich notwendig, das Verhältnis der Breite der Baugrube zur Länge der Baugrube zu berücksichtigen. Untersucht wurden die Verhältnisse $B/L = 1,0 / 0,5 / 0,3$.

Da die Einbindetiefe in den Baugrubenecken bei gleicher Sicherheit größer als entlang der Seiten sein muss, wurden je Situation die erforderlichen Einbindetiefen für die Ecke und die Mitten der Stirn- und Längsseite ermittelt. In den Berechnungen wurde jeweils eine konstante Einbindetiefe für die gesamte Baugrube angenommen und diese iterativ so lange geändert, bis der Ausnutzungsgrad an der entsprechenden Stelle $\mu = 1,0$ betrug.

Auf eine Variation der Wichte sowie eine zusätzliche Berechnung für ungünstigen Baugrund wurde im räumlichen Fall zunächst verzichtet. Die angesetzte Wichte betrug $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$.



4 Auswertung

Für den ebenen Fall wurden acht Baugrundsituationen untersucht, für die jeweils ein Bemessungsdiagramm (vgl. Abbildung 3, links) aufgestellt wurde. Analog zum ebenen wurden auch für den räumlichen Fall Bemessungsdiagramme (vgl. Abbildung 3, rechts) aufgestellt. Die verschiedenen Diagramme im räumlichen Fall gelten alle für günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$. Für $B/L = 0,5$ und $0,3$ gibt es jeweils drei, für $B/L = 1,0$ zwei Diagramme, welche die Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe für die Ecke und die Seiten der Baugrube ermöglichen.

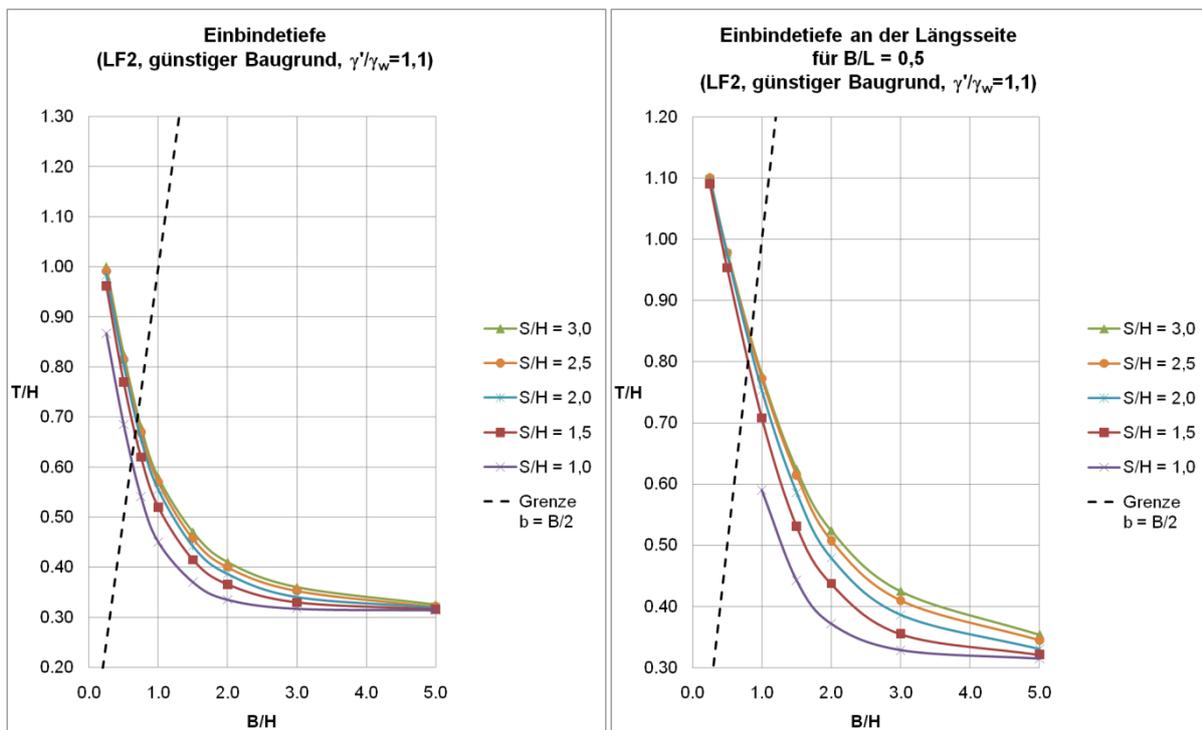
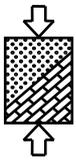


Abbildung 3: Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für günstigen Baugrund im ebenen Fall (links) und im räumlichen Fall an der Längsseite (rechts)

Aufgetragen ist jeweils das Verhältnis der Einbindetiefe T zur Wasserspiegeldifferenz H über der Breite der Baugrube B , welche ebenfalls auf die Wasserspiegeldifferenz bezogen ist. Die verschiedenen Kurven berücksichtigen unterschiedliche Mächtigkeiten S der wasserführenden Schicht.

Rechts der gestrichelt eingetragenen Grenze wurde die Einbindetiefe an einem Bruchkörper der Breite $b = T/2$ ermittelt. Links der Grenze ist die Bruchkörperbreite hingegen auf $b = B/2$ beschränkt, da hier die erforderliche Einbindetiefe T größer als die Breite der Baugrube B ist.



Mit den Diagrammen ist es für den räumlichen Fall möglich, die erforderliche Einbindetiefe in der Ecke und an den Seiten einer Baugrube zu ermitteln. Auf der sicheren Seite liegend könnte man die gesamte Verbauwand mit der erhaltenen Einbindetiefe für die Ecke ausführen. Bei kleinen Baugruben ist dies mit Sicherheit auch sinnvoll. Da dies bei großen Baugruben unwirtschaftlich sein kann, wurden weitere Untersuchungen mit abgetreppten Verläufen angestellt.

Dabei wurde im Eckbereich die hierfür ermittelte Einbindetiefe angesetzt und auf jeder Seite eine Stufe eingefügt. An dieser Stufe wurde die Einbindetiefe auf den für die jeweilige Seite ermittelten Wert verkürzt. Hierbei zeigte sich, dass für die untersuchten Verhältnisse eine Abtrepung in einer Entfernung von der Ecke von $0,3 \cdot B$ auf der Stirn- bzw. $0,3 \cdot L$ auf der Längsseite eine gute Lösung darstellt.

Weiterhin sind mit den Bemessungsdiagrammen zahlreiche Baugrundverhältnisse im ebenen Fall abgedeckt worden. Anhand der Ergebnisse wurde eine Interpolationsfunktion gefunden, welche es ermöglicht, aus den Ergebnissen für eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ in sehr guter Näherung auf die erforderliche Einbindetiefe für andere Wichten zu schließen. Man erhält die erforderliche Einbindetiefe für beliebige Wichten nach:

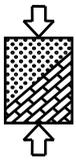
$$\frac{T}{H}(\gamma') = \frac{T}{H}(\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3) \cdot \left(\frac{11 \text{ kN/m}^3}{\gamma'} \right)^{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Einzig bei schmalen Baugruben in Kombination mit geringmächtigen Aquiferen traten größere Abweichungen auf.

Bei der Wahl des Wertes für T/H ($\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$) ist jeweils zwischen günstigem und ungünstigem Baugrund zu unterscheiden.

Anhand einiger zusätzlicher Berechnungen für eine Wichte von $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$ wurde die Interpolationsfunktion auch im räumlichen Fall überprüft. Dies hat gezeigt, dass für die betrachteten Situationen auch im räumlichen Fall eine gute Übereinstimmung zwischen numerisch berechneter und durch Faktorisierung erhaltener Einbindetiefe besteht.

Zur Verifizierung der Beziehung im räumlichen Fall sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig. Mit Anwendung des Faktors erhaltene Einbindetiefen können jedoch auf jeden Fall den Aufwand bei der Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe mittels numerischer Berechnung bzw. durch Auswertung eines Strömungsnetzes erheblich reduzieren, indem sie als nahe der tatsächlichen Lösung liegende Eingangswerte herangezogen werden.



5 Berechnungsbeispiele

Um zum einen die Anwendung der Bemessungsdiagramme aufzuzeigen und zum anderen die Ergebnisse der eigenen Berechnungen denen der Näherungsverfahren gegenüberstellen zu können, wurde am Beispiel der Haltestelle Rathaus der Nord-Süd-Stadtbahn Köln die erforderliche Einbindetiefe für zwei verschiedene Baugrundmodelle ermittelt. Für ein vereinfachtes homogenes Baugrundmodell wurde die erforderliche Einbindetiefe sowohl mit Hilfe der Bemessungsdiagramme als auch mit gängigen Näherungsverfahren ermittelt. In Abbildung 4 sind hierfür die Ergebnisse der einzelnen Verfahren gegenübergestellt.

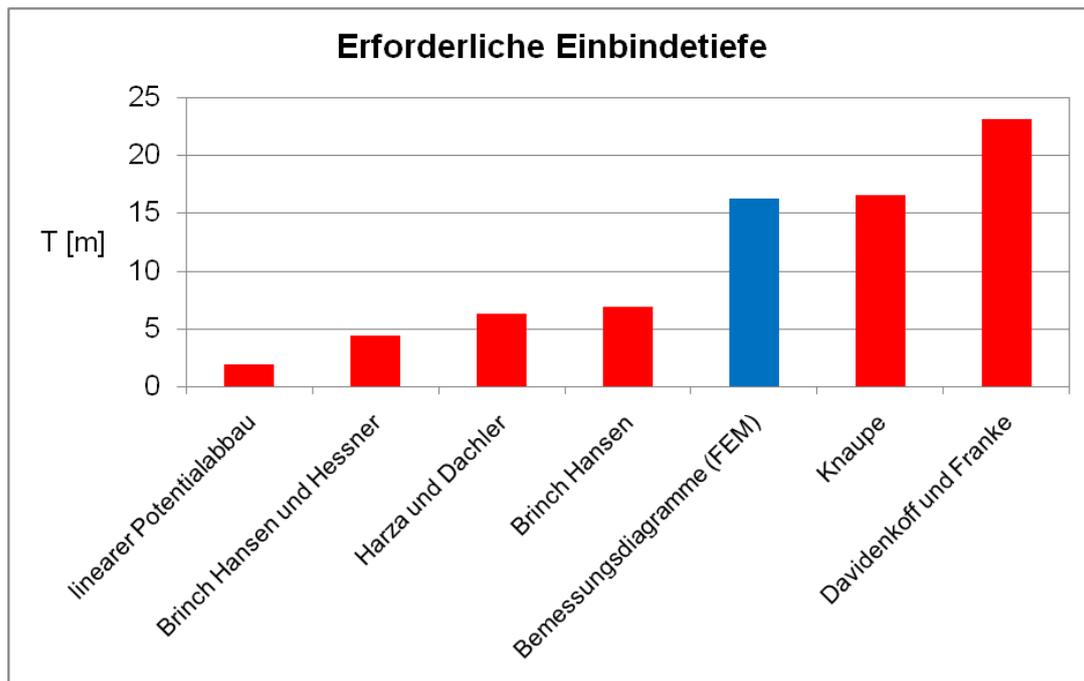
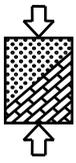


Abbildung 4: Vergleich gängiger Näherungsverfahren und der Bemessungsdiagramme

Man erkennt, dass einige Verfahren im Vergleich zur genaueren Lösung mittels FEM sehr unsichere Ergebnisse liefern. Der Ansatz nach Davidenkoff und Franke liefert hingegen die größten Einbindetiefen und kann somit unwirtschaftlich sein. Am besten stimmt das Ergebnis nach dem Verfahren von Knaupe mit der numerischen Lösung überein.

Dieser Vergleich verdeutlicht, dass die Anwendung einfacher Näherungsverfahren Einbindetiefen ergeben kann, welche viel zu gering sind. Dadurch können Situationen entstehen, welche nicht nur wirtschaftlichen Schaden mit sich bringen, sondern unter Umständen auch Menschenleben gefährden können.

Die Beispielrechnung an einem geschichteten Baugrundmodell hat weiterhin gezeigt, dass bei vorhandener Baugrundsichtung nähere Untersuchungen anzustellen sind.



6 Wertung für die praktische Anwendung

Die vorliegende Forschungsarbeit liefert zunächst einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik und über die in den Normen, Empfehlungen und Literaturquellen enthaltenen Näherungsverfahren. Damit ist die Grundlage geschaffen, sich ein Urteil über die einzelnen Näherungsverfahren zu bilden und diese vor deren Anwendung zu hinterfragen.

Auf der Grundlage eigener Berechnungen, welche allesamt auf der Auswertung von Strömungsnetzen beruhen, wurden sowohl für den ebenen als auch für den räumlichen Fall Bemessungsdiagramme erstellt. Mit Hilfe dieser Diagramme ist es dem Anwender möglich, die nach DIN 1054:2005 erforderliche Einbindetiefe unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse direkt abzulesen.

Weiterhin wird eine Empfehlung ausgesprochen, wie im räumlichen Fall eine Abtreppung von Verbauwänden mit Hilfe der aus den Diagrammen ermittelten Einbindetiefen vorgenommen werden kann. Damit lässt sich unter Einhaltung der Sicherheit die Wirtschaftlichkeit bei großen Baugruben gegenüber der Ausführung mit konstanter Einbindetiefe verbessern.

Auf Grundlage der ebenen Berechnungen wurde eine Interpolationsfunktion gefunden. Mit dieser ist es im ebenen Fall möglich, die erforderliche Einbindetiefe mit Hilfe eines Diagramms auch für andere Wichten hinreichend genau zu ermitteln. Auch im räumlichen Fall zeigten erste Kontrollrechnungen, dass die Funktion eine gute Näherung darstellt. Zur Verifizierung bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen. Dennoch können die mit Hilfe der Funktion ermittelten Einbindetiefen den Aufwand erheblich reduzieren, indem sie als nahe der tatsächlichen Lösung liegende Eingangswerte für Berechnungen herangezogen werden.

Durch die konkreten Beispielrechnungen wird nicht nur die Anwendung der Diagramme verdeutlicht, sondern der Anwender nochmals dahingehend sensibilisiert, Ergebnisse einfacher Näherungsverfahren kritisch zu hinterfragen und speziell bei komplizierten Baugrundverhältnissen vertiefte Untersuchungen anzustellen.

Insgesamt bieten die auf der Auswertung von Strömungsnetzen basierenden Ergebnisse des Forschungsvorhabens die Möglichkeit, die erforderliche Einbindetiefe in Abhängigkeit der geometrischen Verhältnisse und der Wichte des Bodens direkt zu bestimmen oder aber zumindest realitätsnahe Eingangswerte für eigene Untersuchungen zu ermitteln und damit den Aufwand erheblich zu reduzieren.