

# Neue Formel für den Nachweis des hydraulischen Grundbruchs

Dr.-Ing. Benjamin Aulbach

## 1 Einleitung

Die Bestimmung der für die Sicherheit gegen Versagen durch hydraulischen Grundbruch erforderlichen Einbindetiefe kann durch die Analyse von Potentialnetzen erfolgen. Da dieser i. d. R. iterative Prozess zudem 3D-Strömungsberechnungen beinhaltet und damit sehr aufwendig sein kann, existieren eine Reihe von Näherungslösungen, deren Ergebnisse jedoch in einem erheblichen Maße variieren können. So unterscheiden sich die erforderlichen Einbindetiefen im folgenden Beispiel bis um den Faktor acht (**Bild 1**).

Der deutliche Unterschied zwischen den Ergebnissen der Näherungslösungen resultiert u. a. daraus, ob und wie die Baugrubengeometrie berücksichtigt wird. Eine Vernachlässigung z.B. der Breite B, wie dies bei den ersten drei Näherungslösungen in Bild 1 der Fall ist, kann insbesondere für schmale Baugruben zu Ergebnissen auf der unsicheren Seite führen.

Daher wurden zahlreiche GW-Strömungsberechnungen am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse dieser Berechnungen konnten die maßgebenden Randbedingungen identifiziert und ihr Einfluss auf die erforderliche Einbindetiefe quantifiziert werden [1].

## 2 Numerische Berechnungen und Bemessungsverfahren

Im Rahmen der eigenen numerischen Untersuchungen wurden alle maßgebenden geometrischen Randbedingungen wie die Länge L und die Breite B der Baugrube, die Wasserspiegeldifferenz H sowie die Aquifermächtigkeit S (**Bild 2**) im numerischen Model abgebildet und damit auch bei der Bestimmung der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch automatisch berücksichtigt.

Nach den Regelungen des EC 7 (DIN EN 1997-1 2009) kann die Sicherheit gegen Versagen durch hydraulischen Grundbruch dadurch nachgewiesen werden, dass der Bemessungswert der Strömungskraft  $S_{dst;d}$  dem Bemessungswert der Gewichtskraft unter Auftrieb  $G'_{stb;d}$

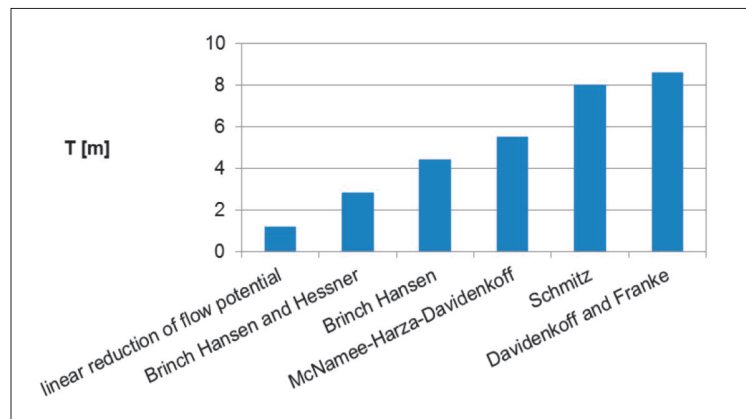


Bild 1: Erforderliche Einbindetiefe T auf Grundlage verschiedener Näherungslösungen für eine Baugrube der Breite B = 10 m mit einer Wasserspiegeldifferenz von H = 10 m

in jedem relevanten Bodenprisma gegenüber gestellt wird:

$$S_{dst;d} \leq G'_{stb;d} \quad (1)$$

Die Bemessungswerte werden durch Multiplikation der charakteristischen Größen mit den Teilsicherheitsbeiwerte für die destabilisierende Strömungskraft  $\gamma_H$  und die stabilisierenden Gewichtskraft  $\gamma_{G, stb}$  enthalten:

$$S_{dst;k} \cdot \gamma_H \leq G'_{stb;k} \cdot \gamma_{G, stb} \quad (2)$$

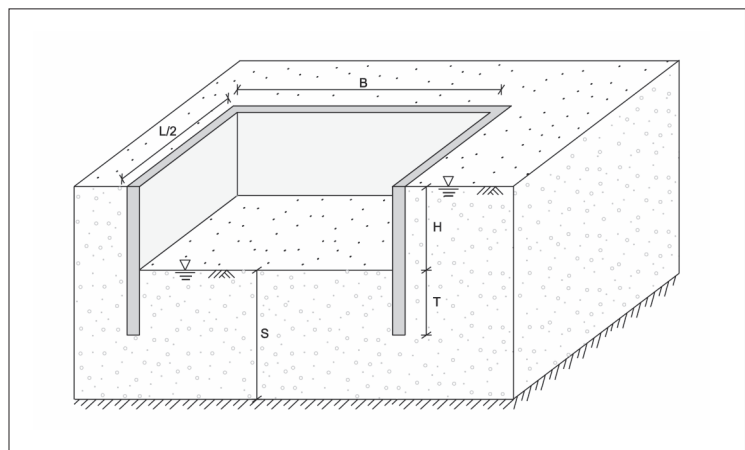


Bild 2: Systemskizze einer Baugrube mit den zugehörigen geometrischen Abmessungen

Die Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte (vgl. Abschnitt 4) obliegt den einzelnen Ländern und erfolgt in Deutschland durch den Nationalen Anhang DIN EN 1997-1N/A 2010 zu DIN EN 1997-1 und die ergänzenden Regelungen in DIN 1054, 2010. Eine Besonderheit von DIN 1054 liegt in der Unterscheidung von günstigem und ungünstigem Baugrund und daraus resultierenden unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten (vgl. Bild 6). Kies, Kiessand, mindestens mitteldicht gelagerter Sand mit Korngrößen über 0,2 mm und mindestens steifer toniger bindiger Boden werden als günstiger Baugrund definiert, während locker gelagerter Sand, Feinsand, Schluff und weicher bindiger Boden ungünstigem Baugrund zugeordnet werden.

Da Versagen durch hydraulischen Grundbruch ein typisches Problem bei der Berechnung von Baugrubenverbauten darstellt, erfolgt die Nachweisführung in den meisten Fällen in der vorübergehenden Bemessungssituation BS-T (transient situations). Entsprechend der kürzlich erschienene Ergänzung der nationalen Regelungen DIN 1054/A2:2015 beträgt der Teilsicherheitsbeiwert für die Strömungskraft  $\gamma_H = 1,45$  für günstigen und  $\gamma_H = 1,90$  für ungünstigen Baugrund (bisher: 1,30 und 1,60). Der Teilsicherheitsbeiwert für ständige stabilisierende Einwirkungen wurde nicht verändert und beträgt nach wie vor für alle Bemessungssituationen  $\gamma_{G;stb} = 0,95$ .

Nach DIN EN 1997-1 erfolgt der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch durch Vergleich der stabilisierenden und destabilisierenden Kräfte in jedem relevanten Bodenprisma. Ergänzend dazu empfiehlt DIN 1054 im Falle einer vertikal nach oben gerichteten Strömungskraft vor Verbauwänden den Nachweis an einem Bodenprisma zu führen, dessen Breite der halben Einbindetiefe entspricht. Dieser sogenannte Terzaghi-Körper wurde auch im Rahmen eigener Voruntersuchungen als sehr gute Näherung für den maßgebenden Bruchkörper identifiziert [2],[3] und schließlich den weiteren Untersuchungen zu Grunde gelegt.

Die Berechnung der erforderlichen Einbindetiefe T erfolgte für eine Vielzahl an Kombinationen der eingangs geschilderten Randbedingungen. Dabei wurde die Einbindetiefe iterativ so lange angepasst, bis die Bedingungen aus Formeln (1) bzw. (2) nach DIN EN 1997-1 und DIN 1054 gerade erfüllt waren und somit ein Ausnutzungsgrad  $\mu_d$

$$\mu_d = S_{dst;d} / G'_{stb;d} \quad (3)$$

von exakt  $\mu_d = 1,0$  erreicht wurde.

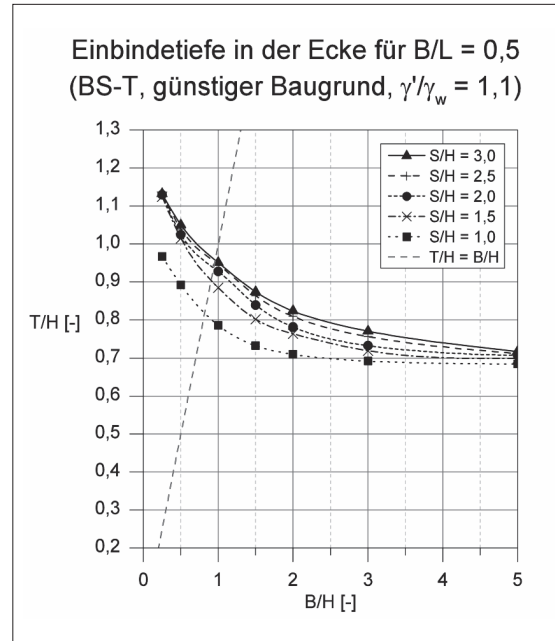


Bild 3: Bemessungsdiagramm für den Eckbereich in homogenem, isotropem Baugrund ( $\gamma_H = 1,30$ )

### 3 Bemessungsdiagramme

Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen wurden zunächst dimensionslose Bemessungsdiagramme erstellt. Durch den direkten (T/H, B/H, S/H) bzw. indirekten (B/L) Bezug der geometrischen Randbedingungen auf die Wasserspiegeldifferenz H sind die Diagramme auf Baugruben jeder Größe anwendbar und die erforderliche Einbindetiefe T/H kann direkt abgelesen bzw. T mittels Multiplikation mit der Wasserspiegeldifferenz H einfach bestimmt werden.

Die **Bilder 3 bis 5** enthalten Bemessungsdiagramme für günstigen, homogenen und isotropen Baugrund mit einer Wichte unter Auftrieb von  $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ . In Bezug auf die Lage entlang der Verbauwand wird bei den Diagrammen zwischen der Ecke, der Längsseite und der Stirnseite unterschieden. Diese Unterscheidung ist insofern wichtig, als dass in den Eckbereichen einer Baugrube aufgrund des räumlichen Zuflusses höhere Strömungskräfte auftreten als an den Baugrubenseiten [2]. Weitere zahlreiche Diagramme für andere Wichten sowie für ungünstigen, anisotropen oder geschichteten Baugrund können [1] entnommen werden.

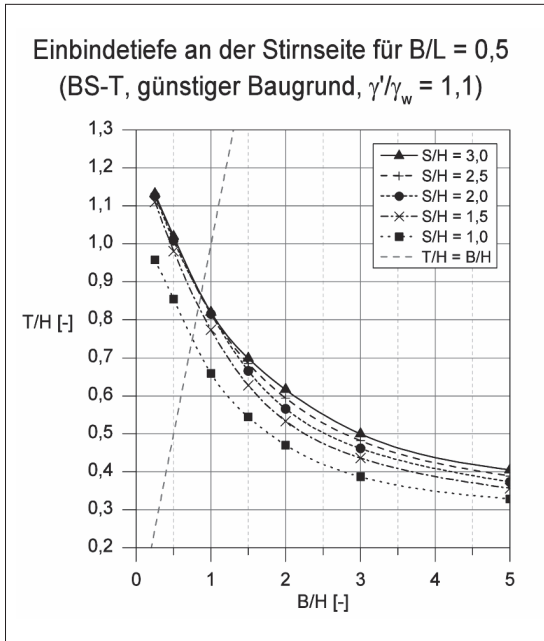


Bild 4: Bemessungsdiagramm für die Stirnseite in homogenem, isotropem Baugrund ( $\gamma_H = 1,30$ )

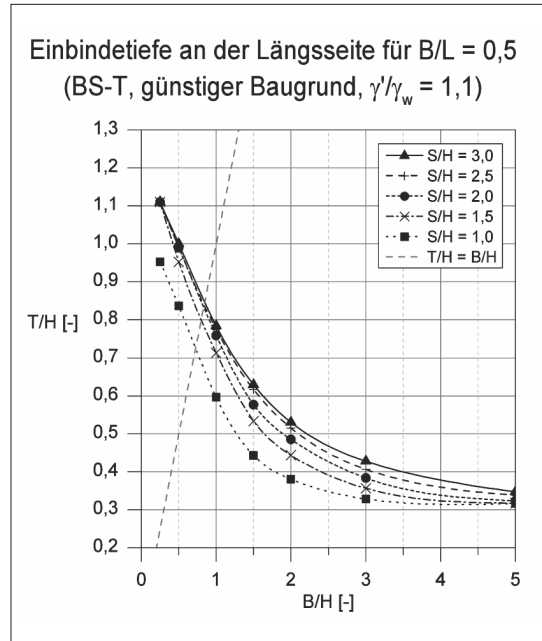


Bild 5: Bemessungsdiagramm für die Längsseite in homogenem, isotropem Baugrund ( $\gamma_H = 1,30$ )

#### 4 Bemessungsformel

Insgesamt wurden 120 Bemessungsdiagramme erstellt, um sowohl alle geometrischen Randbedingungen als auch verschiedene Baugrundeigenschaften abzudecken [1]. Da die große Anzahl an Bemessungsdiagrammen allerdings unhandlich in der praktischen Anwendung ist, wurde alternativ eine Bemessungsformel Schritt für Schritt entwickelt, mit der die erforderliche Einbindetiefe ebenfalls bestimmt werden kann. In einem ersten Schritt wurde zunächst eine Formel für den ebenen Fall mit einer konstanten Aquifermächtigkeit  $S/H = 3,0$  und einer variablen Breite  $B$  entwickelt. Der Baugrund wurde hierfür zunächst als günstig, homogen und isotrop und die Wichte unter Auftrieb mit  $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$  angenommen. Hierzu konnte auf der einen Seite durch Anwendung von Gl. (2) und unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054:2012 die maximal erforderliche Einbindetiefe  $T/H_{\max}$  für eine infinitesimal kleine Baugrube ermittelt werden, deren Breite  $B$  gegen Null geht.

$$\frac{H}{T} \cdot \gamma_w \cdot V \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot V \cdot \gamma_{G, \text{stb}}; \quad (4)$$

$$\frac{T}{H_{\max}} \geq \frac{\gamma_w \cdot \gamma_H}{\gamma' \cdot \gamma_{G, \text{stb}}} = \frac{10 \text{ kN/m}^3 \cdot 1,30}{11 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,95} = 1,244. \quad (5)$$

Auf der anderen Seite wurde die minimal erforderliche Einbindetiefe aus den numerischen Ergebnissen zu  $T/H_{\min} = 0,32$  bestimmt. Auf Basis dieser beiden Extremwerte und unter der Berücksichtigung des Zusammenhangs der Baugrubenbreite und der Wasserspiegeldifferenz aus den numerischen Untersuchungen kann die erforderliche Einbindetiefe mit Hilfe einer Abklingfunktion nach Gl. (7) bestimmt werden

$$\frac{T}{H} = 0,32 + (1,244 - 0,32) \cdot e^{\left(\frac{-B/H}{0,883}\right)}. \quad (6)$$

In einem weiteren Schritt wurde die Formel durch die Implementierung einer variablen Aquifermächtigkeit  $S/H$  erweitert.

$$\frac{T}{H} = 0,32 + (1,244 - 0,32) \cdot e^{\left(\frac{-B/H}{0,541 + 0,395 \cdot (1 - e^{-(1-S/H)})}\right)}. \quad (7)$$

Im Fall einer räumlichen Anströmung kann die erforderliche Einbindetiefe sowohl für die Seiten als auch in den Eckbereichen durch Gl. (8) berechnet werden. Allerdings ist die Anwendung dieser Formel noch auf lange Baugruben mit  $B/L \geq 0,3$  begrenzt.

$$\frac{T}{H} = 0,32 \cdot A + (1,244 - 0,32 \cdot A) \cdot e^{\left(\frac{-B/H}{U \cdot (0,541 + 0,395 \cdot (1 - e^{-(1-S/H)})}\right)}. \quad (8)$$

Die erweiterte Formel in Gl. (8) enthält die Faktoren A und U, mit deren Hilfe zwischen der Ecke, der Stirn- und der Längsseite unterschieden werden kann. Die entsprechenden Werte sind der Tabelle in Bild 7 zu entnehmen. Zusätzlich können durch die Wahl geeigneter Zuschläge für den Faktor A auch anisotrope oder geschichtete Baugrundverhältnisse berücksichtigt werden [1].

Die o. g. Formeln wurden zunächst nur für günstigen Baugrund nach DIN 1054 mit einer Wichte unter Auftrieb von  $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$  entwickelt. Durch eine Umrechnung entsprechend Gl. (9) ist es jedoch möglich, beliebige Auftriebswichten  $\gamma'_i$  des anstehenden Bodens zu berücksichtigen.

$$\frac{T}{H}(\gamma'_i) = \frac{T}{H}(\gamma'_{ref, \text{günstig}}) \cdot \left( \frac{\gamma'_{ref} = 11 \text{ kN/m}^3}{\gamma'_i \cdot 0,902 + 1,078 \text{ kN/m}^3} \right)^{\sqrt{2}} \quad (9)$$

Wie eingangs beschrieben, wurden alle Untersuchungen nach den Vorgaben der DIN 1054 durchgeführt, sodass den Gl. (8) und (9) bereits die Teilsicherheitsbeiwerte der zum Zeitpunkt ihrer Entwicklung gültigen Fassung der DIN 1054:2010 zugrunde liegen und somit die ermittelten Einbindetiefen bereits als Bemessungswerte zu verstehen sind. Allen Berechnungen liegt damit eine globale Referenzsicherheit  $\eta_{ref}$  zugrunde, die als Quotient aus den Teilsicherheitsbeiwerten der Strömungskraft bei günstigem Untergrund und der stabilisierenden Einwirkungen gebildet werden kann.

$$\eta_{ref} = \frac{\gamma_H}{\gamma_{G, stb}} \quad (10)$$

Für die verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte der Bemessungssituation BS-T ergibt sich eine globale Referenzsicherheit von  $\eta_{ref} = 1,30/0,95 = 1,368$  (vgl. DIN 1054:2010).

Um darüber hinaus die erforderliche Einbindetiefe für ein beliebiges Sicherheitsniveau berechnen zu können, wurde eine weitere Modifikation der Formel in Gl. (10) vorgenommen.

$$\frac{T}{H}(\gamma'_i) = \frac{T}{H}(\gamma'_{ref, \text{günstig}}) \cdot \left( \frac{\gamma'_{ref} = 11 \text{ kN/m}^3}{\gamma'_i \cdot 0,902 + 1,078 \text{ kN/m}^3} \cdot \frac{\eta_i}{\eta_{ref}} \right)^{\sqrt{2}} \quad (11)$$

mit:  $\eta_{ref}$  globale Referenzsicherheit  
 $\eta_i$  erforderliches Sicherheitsniveau

Der fett gedruckte Term in Gl. (11) beschreibt dabei das Verhältnis der geforderten globalen Sicherheit  $\eta_i$  zur globalen Referenzsicherheit  $\eta_{ref}$ . Damit ist es schließlich möglich, die erforderliche Einbindetiefe auch für die neuen Teilsicherheitsbeiwerte der kürzlich erschienenen Änderung DIN 1054A/2:2015 (**Bild 6**) zu berechnen.

Auf Basis der aktuellen Werte ergibt sich für BS-T eine geforderte globale Sicherheit von  $\eta_i = 1,45/0,95 = 1,526$ , die in Gleichung (11) einzusetzen ist. Dadurch erhöht sich die erforderliche Einbindetiefe um den Faktor  $(\eta_i/\eta_{ref})^{\sqrt{2}} = (1,526/1,368)^{\sqrt{2}} = 1,167$  bzw. um ca. 17 %.

Die vorgestellten Formeln und ihre Erweiterungen wurden schließlich verknüpft und zur endgültigen Formel in **Bild 7** derart ergänzt, dass sie auch auf ein beliebiges Verhältnis der Breite zur Länge B/L anwendbar ist [1].

Die endgültige Formel in Bild 7 für homogenen und isotropen Boden enthält außerdem den Bemessungsfaktor  $Be$ , der Abweichungen der ursprünglichen Formeln von den exakten Ergebnissen der numerischen Berechnungen bzw. von den Bemessungsdiagramme korrigiert, sodass diese auf der sicheren Seite liegen. So ergibt sich bspw. eine durchschnittliche Abweichung der mit Hilfe der Formel erhaltenen Ergebnisse von den FE-Berechnungen in Höhe von  $\Delta T/H \approx 9\%$  für günstigen und  $\Delta T/H \approx 12,5\%$  für ungünstigen Baugrund. Ohne den Bemessungsfaktor  $Be$  wären die Beträge der Abweichungen mit  $\Delta T/H \approx 2,5\%$  für günstigen und  $\Delta T/H \approx 6\%$  für ungünstigen Baugrund zwar geringer, jedoch lägen die Ergebnisse teilweise auf der unsicheren Seite [1].

Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F$  bzw.  $\gamma_E$  für Einwirkungen und Beanspruchungen nach **DIN 1054/A2**

| Einwirkung bzw. Beanspruchung  | Formelzeichen     | Bemessungssituation |             |      |
|--|-------------------|---------------------|-------------|------|
|  |                   | BS-P                | BS-T        | BS-A |
| <b>HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen</b> |                   |                     |             |      |
| Stabilisierende ständige Einwirkungen  | $\gamma_{G, stb}$ | 0,95                | 0,95        | 0,95 |
| Strömungskraft bei günstigem Untergrund  | $\gamma_H$        | 1,45                | <b>1,45</b> | 1,25 |
| Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund  | $\gamma_H$        | 1,90                | 1,90        | 1,45 |

Bild 6:

Auszug aus DIN 1054/A2: 2015-11, geänderte Teilsicherheitsbeiwerte für die Strömungskraft bei günstigem und ungünstigem Untergrund

### Bemessungsformel für homogenen, isotropen Baugrund

$$\frac{T}{H} = Be \cdot \left[ 0,32 \cdot A + (1,244 - 0,32 \cdot A) \cdot e^{\left( \frac{\frac{B}{H}}{U \cdot \left( 0,541 + 0,395 \cdot \left( 1 - e^{\left( 1 - \frac{S}{H} \right)} \right) \right) \cdot \left( 1 + \left( \frac{B}{L} - 0,3 \right) \cdot (3,156 - 1,564 \cdot U) \right)} \right)} \right] \cdot \left( \frac{\gamma'_{ref}}{\gamma_i \cdot 0,902 + 1,078} \cdot \frac{\eta_i}{\eta_{ref}} \right)^{\sqrt{2}}$$

mit: Be Bemessungsbeiwert

A Faktor für die räumliche Anströmung

U Faktor für den Einfluss des Umfeldes

L Länge der Baugrube

B Breite der Baugrube

H Wasserspiegeldifferenz

S Aquifermächtigkeit

$\gamma'_{ref}$  Referenzwichte unter Auftrieb

$$= 11 \text{ kN/m}^3$$

$\gamma_i$  Wichte unter Auftrieb

$\eta_{ref}$  Referenzglobalsicherheit

$$= 1,368 = 1,30/0,95$$

$\eta_i$  geforderte globale Sicherheit

DIN 1054 (2010)  $\rightarrow$  Be = 1,065

| Faktoren    | A    | U    |
|-------------|------|------|
| Ebener Fall | 1,00 | 1,00 |
| Längsseite  | 1,00 | 1,32 |
| Stirnseite  | 1,04 | 1,99 |
| Ecke        | 2,08 | 1,69 |

Anwendungsbereich:

$$T/H < 0,75 \cdot S/H$$

$$S/H \geq 1,0$$

$$B/L \geq 0,3$$

Bild 7:  
Bemessungsformel für homogenen, isotropen Baugrund

## 5 Fazit

Im Zuge der Untersuchungen wurden umfangreiche numerische Berechnungen durchgeführt und basierend auf den Ergebnissen zahlreiche Bemessungsdiagramme erstellt, mit deren Hilfe die erforderliche Einbindetiefe für die Sicherheit gegen Versagen durch hydraulischen Grundbruch direkt abgelesen werden kann. Dabei werden sowohl die maßgebenden geometrischen Randbedingungen - wie bspw. die Wasserspiegeldifferenz, die Aquifermächtigkeit, die Breite und die Länge der Baugrube oder die Lage innerhalb der Baugrube (Ecke, Stirn- oder Längsseite) - als auch Eigenschaften des anstehenden Bodens berücksichtigt.

Darüber hinaus wurde schrittweise eine Formel entwickelt, die ebenfalls eine schnelle

und einfache Berechnung der erforderlichen Länge basierend auf den vorgenannten Randbedingungen ermöglicht. Die zwangsläufig entstehenden Abweichungen zwischen den Ergebnissen der numerischen Berechnungen und denen der Formel sind im Allgemeinen sehr gering.

Die so erhaltene und in Bild 7 dargestellte Formel kann direkt in statische Rechenprogramme implementiert werden, sodass die parallele Anwendung von hydraulischen und statischen Programmen zur Berechnungen der erforderlichen Einbindetiefe entfällt. Diese Berechnung in einem Schritt war im Vorfeld nur durch die Verwendung stark vereinfachter Näherungslösungen möglich, wodurch die Ergebnisse durch die Vernachlässigung maßgebender Randbedingungen aber teilweise auf der unsicheren Seite lagen.

Die Implementierung der Formel in Statikprogramme wurde bereits von zwei namhaften Softwareanbietern vorgenommen. Darüber hinaus wurde seitens ZAI ein einfaches Softwareprogramm ZAI-HYD entwickelt, in dem die hydraulisch erforderliche Einbindetiefe auf Basis der Formel bestimmt werden kann. ZAI-HYD kann kostenlos angefordert werden unter [www.zai-ingenieure.de/kontakt/anfrage](http://www.zai-ingenieure.de/kontakt/anfrage).

### 6 Literatur

[1] Aulbach, B. 2013: Hydraulischer Grundbruch – Zur erforderlichen Einbindetiefe bei Baugruben in nichtbindigem Baugrund: Dissertation. Aachen: RWTH Aachen University.

[2] Aulbach, B. & Ziegler, M. 2013: Simplified design of excavation support and shafts for safety against hydraulic heave, *Geomechanics and Tunneling* 6(4): 362–374.

[3] Aulbach, B. & Ziegler, M. 2014: Versagensform und Nachweisformat beim hydraulischen Grundbruch – Plädoyer für den Terzaghi-Körper, *Geotechnik* 37 (Heft 1): 6–18.

[4] DIN EN 1997-1:2009-09: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Berlin: Beuth Verlag, 2009.

[5] 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. Berlin: Beuth Verlag, 2010.

[6] DIN 1054:2010-12: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Berlin: Beuth Verlag, 2010.

[7] DIN 1054/A2:2015-11: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1; Änderung 2. Berlin: Beuth Verlag, 2015.

### 7 Danksagung

Die Entwicklung der Formel basiert größtenteils auf den Ergebnissen zweier Forschungsprojekte, die vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) gefördert wurden. Daher sei an dieser Stelle allen Förderern der beiden Forschungsvorhaben, namentlich dem DIBt, der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, der Emscher-genossenschaft, der Hamburg Port Authority AÖR und der ICG Düsseldorf GmbH & Co. KG für die finanzielle Unterstützung gedankt. Weiterer Dank gilt dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen für die Zusammenarbeit bei der Entwicklung eines Interface Software Moduls.