

Geohydraulische Nachweise zur Standsicherheit tiefer Baugruben

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eugen Perau

Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Bauwissenschaften, Fachgebiet Geotechnik, eugen.perau@uni-due.de

Zusammenfassung

Der Untergrund im Bereich der für den Abwasserkanal Emscher zu erstellenden tiefen Baugruben weist teilweise sehr hohe Grundwasserstände auf. Diese führen infolge der Unterströmung der Verbauwände zu einer hohen Beanspruchung des Bodens innerhalb der Baugruben durch aufwärts gerichtete Strömungskräfte. Die Größe und der Verlauf dieser Strömungskräfte kann durch Entspannungsbohrungen günstig beeinflusst werden, so dass die Einbindetiefe der Verbauwände erheblich reduziert werden kann und die Baugrubenkonstruktion somit wirtschaftlicher wird.

Es wird ein Konzept vorgestellt, nach dem entsprechende Nachweise zur Standsicherheit von Baugruben mit Entspannungsbohrungen in der Baugrubensohle auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) geführt werden können.

Anhand einfacher Beispiele werden einige exemplarische Ergebnisse dieses Nachweisverfahrens vorgestellt. Abschließend werden zwei auf den Beispielen basierende Parameterstudien präsentiert.

1. Einführung

Beim Bau und Betrieb des Abwasserkanals Emscher werden für die Aufnahme von Pumpwerken, für den Zugang von Inspektionsgeräten zum Abwasserkanal sowie für den unterirdischen Rohrvortrieb eine größere Anzahl Baugruben erforderlich. Diese haben in der Regel einen kreisförmigen Grundriss mit Durchmessern von wenigen Metern bis hin zu etwa 40 m. Die erforderlichen Aushubtiefen der Baugruben reichen ebenfalls von wenigen Metern bis hin zu etwa 40 m.

Der Baugrund lässt sich grob folgendermaßen skizzieren: im Westen liegen an der Geländeoberfläche Auffüllungen und quartäre Deckschichten auf tertiären Sedimenten. In weiten Bereichen, beginnend in Oberhausen bis an das östliche Ende des geplanten Abwasserkanals werden unterhalb der Auffüllungen und dem Quartär kreidezeitliche Mergelschichten des münsterländer Kreidebeckens angetroffen, die bis in große Tiefen reichen. In östlicher Richtung gelangt diese Mergelschicht tendenziell weiter in Richtung Geländeoberfläche und der Mergel wird fester. Die für die Bemessung relevanten Grundwasserstände reichen in vielen Bereichen bis in Höhe der Geländeoberfläche.

Bei einem großen Teil der Baugruben reichen die Verbauwände bereits planmäßig bis in den Mergel, der im Vergleich zu den quartären Deckschichten sowie den Auffüllungen als relativ schwach durchlässig eingestuft werden kann. An diesen Stellen wird es in der Regel ausreichen, das über die Sohle in die Baugrube eindringende Grundwasser über eine Restwasserhaltung zu fassen und abzuleiten. Von besonderem Interesse hinsichtlich der hier behandelten geohydraulischen Nachweise sind die mit gestaffelten Bohrpfahlwänden ausgebildeten Verbauwände. Bei diesen wird auch in der Zwischenebene, in der sich die beiden Wandstaffeln überschneiden, zumindest temporär eine Restwasserhaltung erforderlich.

Über die zur Haltung und Ableitung des Grundwassers erforderliche Berechnung der eindringenden Wassermengen sind auch statische Gesichtspunkte zu beachten:

- a) Das strömende Grundwasser wirkt sich infolge des Porenwasserdrucks sowie der veränderten Erddruckbelastungen und Erdwiderstände auf die statische Beanspruchung der Verbauwände aus.
- b) Infolge der Restwasserhaltung und der damit verbundenen Absenkung des Grundwasserspiegels innerhalb der Baugrube kann es zu Überdrücken unter etwaig vorhandenen relativ schwach durchlässigen Baugrundsichten unterhalb der Baugrubensohle kommen, so dass hier ein mögliches Aufschwimmen dieser Schichten untersucht werden muss.
- c) Die Umströmung der Verbauwände ist mit aufwärts gerichteten Strömungen im Inneren der Baugruben verbunden, die dort das Eigengewicht des Baugrunds neutralisieren und dabei die Standsicherheit der Baugrubenkonstruktion ungünstig beeinflussen könnten. Hiervon ist grundsätzlich die gesamte Baugrubensohle betroffen; insbesondere jedoch sind die wandnahen Bereiche sowie bei den gestaffelten Verbauwänden die Bereiche im Übergang der Wandstaffelung gefährdet.

Diesen potenziellen Versagensmechanismen ist durch entsprechend ausgerichtete konstruktive Maßnahmen sowie zugehörige rechnerische Standsicherheitsnachweise Rechnung zu tragen.

2. Aufgabenstellung

Bei den meisten der Baugruben für den Abwasserkanal Emscher kommt es infolge der mit der Restwasserhaltung verbundenen unterschiedlichen Grundwasserstände außen und innen zu einer Unterströmung der Verbauwände. Da die Durchlässigkeit des Mergels, in den die Verbauwände einbinden, relativ schwach ist im Vergleich zu den ihn überlagernden quartären Schichten, baut sich das Potenzial im Wesentlichen innerhalb der Mergelschicht ab. Dabei entstehen im Bereich der Sohle und hier vor allem in Wandnähe unweigerlich die bereits im vorangehenden Abschnitt zuletzt unter c) genannten aufwärts gerichteten Strömungskräfte, die sich ungünstig auf die Standsicherheit auswirken.

Gemäß Eurocode 7 (EN 1997-1) sind in Übereinstimmung mit DIN 1054:2005-01 für derartige Situationen geohydraulische Nachweise zu führen, bei denen die aufwärts gerichteten Strömungskräfte in der Baugrubensohle den Gewichtskräften des Bodens gegenüberzustellen sind.

Die Vorgaben des Eurocodes 7 werden in DIN 1054:2005-01 näher ausgeführt. Dies geschieht in Rückgriff auf das Versagensmodell gegen hydraulischen Grundbruch nach Terzaghi und Peck (1956). Dabei wird ein rechteckiger Untersuchungsbereich zugrunde gelegt, der sich über die Höhe der Einbindetiefe und deren halbe Breite erstreckt (Bild 1a). Für diesen Bereich wird - basierend auf Terzaghis Untersuchungen - die Strömungskraft ausgewertet und der Gewichtskraft des Bodens unter Auftrieb gegenübergestellt. Nach DIN 1054:2005-01 dürfen dabei keine Widerstände, insbesondere keine Scherwiderstände an den Rändern des Untersuchungsbereichs angesetzt werden.

Eine Nachweisführung gegen Versagen durch hydraulischen Grundbruch streng nach DIN 1054:2005-01 - also mit dem rechteckigen Bruchkörper nach Terzaghi/Peck unter Außerachtlassung der Scherwiderstände - wäre auch bei den Baugruben für den Abwasserkanal Emscher grundsätzlich möglich. Dieser Nachweis würde jedoch für die Verbauwände zu Einbindetiefen in den Mergel führen, die je nach geometrischer Situation

und Grundwasserstand deutlich über 10 m betragen würden. Bereits intuitiv lässt sich nachvollziehen, dass diese "übergroße" Einbindetiefe vor allem mit der normgerechten Vernachlässigung der hohen Kohäsion des Mergels zusammenhängt.

Erfahrungsgemäß kann hier alternativ die Anordnung von Entspannungsbohrungen in der Baugrubensohle hilfreich sein. Diese beeinflussen das Strömungsfeld im Untergrund, so dass die aufwärts gerichteten Strömungskräfte in der Baugrubensohle und hier vor allem die im Nahbereich der Verbauwände abgelenkt werden und sich weniger ungünstig auswirken. Die Wirkungsweise der Entspannungsbohrungen ließ sich also intuitiv leicht erkennen - unklar war zunächst:

- A) Wie sollten die Entspannungsbohrungen in Anzahl, Lage, Durchmesser sowie Bohransatzhöhe und Bohrtiefe bemessen werden?
- B) Wie sieht der nach DIN 1054 geforderte Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch dann aus?
- C) Welche Bruchmechanismen werden in derartigen Fällen (kohäsiver Boden, Anordnung von Entspannungsbohrungen) maßgeblich?

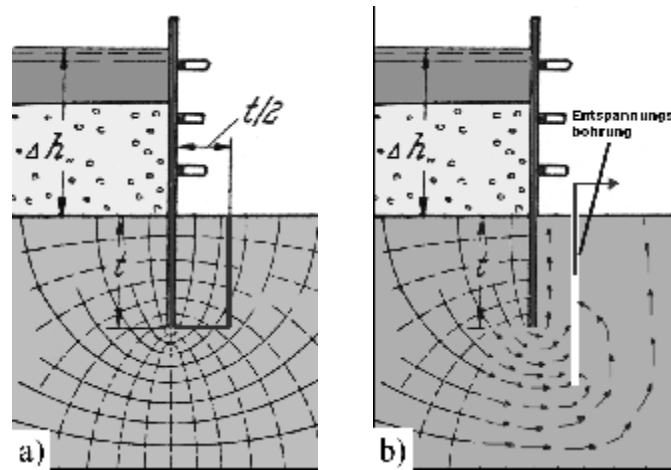


Bild 1: a) Standardlösung nach DIN 1054: mit Terzaghis Untersuchungsbereich für den Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch bei *nichtbindigen Böden* und klassischem Strömungsbild, b) vom Standard abweichende Situation im Bereich des AK Emscher mit *kohäsivem Boden* (Mergel) und einem durch Entspannungsbohrungen veränderten Strömungsfeld (Perau u.a., 2009)

Jedenfalls war bereits zu Beginn der Untersuchungen klar, dass das klassische Nachweisverfahren nach DIN 1054, basierend auf dem Verfahren von Terzaghi/Peck hier nicht zum Erfolg - zumindest nicht zu einem wirtschaftlich vertretbaren Erfolg - führen würde. Sowohl die zwangsweise Vernachlässigung der Kohäsion als auch das von dem

Terzaghi-Modell abweichende Strömungsfeld schlossen das klassische, in der DIN 1054 als Standard festgeschriebene Lösungsverfahren aus.

3. Mechanische Modelle

Eine Lösung für die zuvor skizzierte Aufgabenstellung bestand darin, die beiden im vorangehenden Abschnitt formulierten Fragen A) und B) miteinander zu verbinden, also den von der DIN 1054 grundsätzlich geforderten Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch auf die Dimensionierung der Entspannungsbohrungen anzuwenden.

Schwieriger schien zunächst die Frage C) nach dem maßgeblichen Versagensmechanismus zu lösen. Hierbei wurde auf die Finite-Elemente-Methode (FEM) zurückgegriffen, die bekanntlich *keine Vorgabe* für das Aussehen eines maßgeblichen Mechanismus erfordert; hier stellt der maßgebliche Versagensmechanismus ein Ergebnis der Berechnung dar (Perau und Haubrichs, 2006).

Für die Anwendung der FEM sprach auch, dass ihr Einsatz bereits zur Berechnung der Potenzialverteilung und damit der Strömungskräfte erforderlich war. Es lag daher nahe, die Berechnung auf die erforderliche Standsicherheitsberechnung auszuweiten (vgl. z.B. Perau und Haubrichs (2006), Perau u.a. (2009)). Zum Nachweis der Standsicherheitsbereich war demnach ein Stoffgesetz zu verwenden, das die begrenzte Beanspruchbarkeit des Materials Boden durch einen Ansatz von Plastizität berücksichtigt. Als Fließbedingung wurde das in der Bodenmechanik übliche Mohr-Coulombsche Bruchgesetz mit den Scherparametern φ' und c' verwendet. Darüber hinaus wurde für das Bodenmaterial angesetzt, dass dieses keine Zugspannungen aufnehmen kann. Angesichts möglicher feiner Risse oder Klüfte im Bereich des Mergels wurde die ansonsten sicherlich vorhandene Zugfestigkeit des Mergels also vernachlässigt.

4. Nachweiskonzept

Es wurde ein Konzept zum Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch auf Basis der FEM entwickelt, das bereits an anderer Stelle (Perau und Haubrichs (2006), Perau u.a. (2009)) publiziert wurde und daher hier nur in seinen Grundzügen skizziert wird. Es basiert auf

Überlegungen zur Anwendung der FEM für geohydraulische Standsicherheitsnachweise von Perau (2005) oder Wudtke und Witt (2006) sowie Gutjahr und Perau (2006). Demnach ist der Bauablauf in all seinen relevanten Phasen sukzessive zu modellieren und die Konstruktion dabei hinsichtlich seiner Standsicherheit zu bewerten.

Stets ist dem statischen Nachweis für eine Phase eine Strömungsberechnung vorgeschaltet, in der das Strömungsfeld mit der Geometrie der Konstruktion (Verbauwand, Aushub, Bohrungen) und den geohydraulischen Randbedingungen (Grundwasserstände, Randzuflüsse usw.) modelliert wird. Die daraus berechneten Strömungskräfte gehen dann in den statischen Standsicherheitsnachweis als Belastung ein, wo sie sich bekanntlich ungünstig auswirken. Tabelle 1 enthält einen typischen Simulationsablauf für eine einfache Baugrube.

Tabelle 1: Typischer Simulationsablauf für eine einfache Baugrube (Perau u.a., 2009)

Phase	Simulationsschritt
0	Initialzustand: Spannungen und Porenwasserdrücke zu Beginn (vor der Bautätigkeit)
1	Herstellung der Verbauwand
2	Aushub und Entwässerung innerhalb der Baugrube <u>ohne</u> dass zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden
3	Abteufen von Entspannungsbohrung und Auffüllung mit Drainagematerial
4	Aushub und Entwässerung innerhalb der Baugrube bis zur Endtiefe

Bei gestaffelten Verbauwänden gestaltet sich der Ablauf prinzipiell nach dem gleichen Schema; hier ist jedoch zu beachten, dass auch die Zwischenebene, an der sich die beiden Staffeln überschneiden, gegen Hydraulischen Grundbruch gefährdet sein kann. Hier kann sich bereits die Herstellung der unteren Staffel negativ auf die Standsicherheit des Zwickels zwischen den Staffeln auswirken weil sie den Grundwasserstrom dorthin ablenkt.

Da die DIN 1054 für den Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch in ihrem Standardverfahren nach Terzaghi/Peck nicht den Ansatz von Scherwiderständen erlaubt und dementsprechend auch keine Teilsicherheitsbeiwerte dazu vorgibt, konnte - normgerecht - nur ein Rückgriff auf die in DIN 1054:2005-01, Abschnitt 11.5(3) erlaubten aber nicht spezifizierten "genaueren Untersuchungen" erfolgen. Dieser Rückgriff ist auch bei strenger Auslegung der Norm erlaubt, da die einzige Bedingung, die an die Verwendung der genaueren Untersuchungen geknüpft ist, bei einem Nachweis mit der FEM eingehalten wird;

nämlich andere mögliche Begrenzungen des Bodenkörpers als die nach Terzaghi/Peck zu berücksichtigen.

Für das vorgeschlagene Nachweisverfahren auf Basis der FEM waren noch Teilsicherheitsbeiwerte festzulegen, die vor allem aus pragmatischen Gründen möglichst gut mit denen der aktuellen DIN 1054 übereinstimmen sollten. Die Definition eines Sicherheitswerts über eine ϕ -c-Reduktion nach Brinkgreve und Bakker (1991), die in vielen Fragestellungen der Geotechnik zweckdienlich ist, führt im vorliegenden Fall nicht zum Erfolg, da die maßgeblichen Einflussfaktoren hier nicht die Scherparameter des Bodens sondern dessen Wichten sind (Perau 2005). Dies kommt auch durch die Ungleichung für den Nachweis der Standsicherheit gegen Hydraulischen Grundbruch nach DIN 1054 - siehe Ungleichung (1) - zum Ausdruck.

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

Neben der Abminderung der Wichten des Bodens (G'_k) durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{G,stab}$ sind nach DIN 1054 auch die ungünstig wirkenden Kräfte zu erhöhen. Ungünstig wirken hier die aufwärts gerichteten Strömungskräfte S'_k in der Baugrubensohle, die deshalb im Nachweis nach Gleichung (1) mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_H multipliziert werden müssen.

Da das zur Verfügung stehende FEM-Programm PLAXIS eine Erhöhung der Strömungskräfte nicht ohne weiteres erlaubt, musste die Ungleichung (1) entsprechend so umgeformt werden, dass sie die Strömungskräfte nur als charakteristische Werte enthält. Daraus entsteht die mathematisch gleichwertige Ungleichung (2).

$$S'_k \leq G'_k \cdot \gamma_{G,stab} / \gamma_H \quad (2)$$

Hier spiegelt der Ausdruck $\gamma_{G,stab} / \gamma_H$ den Faktor wider, mit dem die charakteristischen Werte der Wichten des Bodens beim FEM-gestützten Nachweis zu multiplizieren sind. Dieser beträgt im LF 2: $0,95/1,35 = 0,70$.

Da in dem klassischen Nachweis - im Gegensatz zu den FEM-gestützten Nachweisen - gemäß Ungleichung (1) die Scherfestigkeit nicht eingeht, enthält die DIN 1054 keine Teilsicherheiten für die Scherparameter. Für das hier angewendete Nachweiskonzept wurden die Teilsicherheitsbeiwerte angelehnt an die Nachweise zur Gesamtstandsicherheit (GZ 1C) - genauso wird beim physikalisch vergleichbaren Nachweis der Standsicherheit von

Böschungen mit ungünstig wirkenden Strömungskräften umgegangen. Da im vorliegenden Fall auch die Wandreibung und -adhäsion herangezogen werden sollte, wurden gemäß Gleichung (3) die Scherparameter einheitlich mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_\varphi = 1,4$ bzw. $\gamma_c = 1,4$ reduziert.

$$\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / 1,4 \quad \text{und} \quad c_d = c_k / 1,4 \quad (3)$$

Bei der Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte wurde berücksichtigt, dass mit dem vorgeschlagenen Nachweisverfahren derzeit noch wenig praktische Erfahrungen vorliegen, so dass diese bewusst vorsichtig, "auf der sicheren Seite" liegend angesetzt wurden. Allenfalls wurde angesetzt, dass es sich beim Mergel, zumindest bei einem aufliegenden Flächenfilter um einen "günstigen Untergrund" nach DIN 1054:2005-01, Abschnitt 11.5 (5) handelt, bei dem die Gefahr eines Erosionsgrundbruchs *nicht* besteht. Der Gedanke, dass ein Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch im Mergel - etwa durch die pauschale Vorgabe einer Mindesteinbindetiefe - grundsätzlich entfallen könnte, wurde bewusst nicht weiterverfolgt.

Die FEM-Berechnungen für die Schächte des AK Emschers wurden auf Basis der zuvor geschilderten Grundlagen durchgeführt. Dabei wurden die für die jeweilige Phase zunächst berechneten Porenwasserdrücke und Strömungskräfte als Belastung auf den Untergrund und die Wandkonstruktion angesetzt und diese so in den FEM-Nachweis der Standsicherheit einbezogen.

Wenn bei der FEM-Berechnung mit den Bemessungswerten als Materialparameter *in allen Phasen* der Gleichgewichtszustand nachgewiesen werden kann, gilt der Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch für die untersuchte Baugrube als erfüllt. Kann der Gleichgewichtszustand nicht in allen Phasen nachgewiesen werden, sollten zunächst die Bohrungen in ihrer Lage und Tiefe verändert werden. Führt auch das nicht zum Erfolg, so ist die Einbindetiefe der Wand zu verändern, bis eine Konstruktion entsteht, die sich in allen Phasen im Gleichgewichtszustand befindet.

Bei der zuletzt noch erforderlichen Dimensionierung der Querschnitte der Entspannungsbohrungen selber sind verschiedene Kriterien zu beachten, die im Einzelnen in Perau u.a. (2009) aufgeführt sind. Der erforderliche Durchmesser und der Abstand der Bohrungen untereinander richten sich zum Beispiel nach der erforderlichen Ergiebigkeit der Bohrungen. Zur Rechtfertigung der unterstellten Rotationssymmetrie bei den FEM-

Berechnungen darf ein anhand eines geometrischen Kriteriums aufgestellter Maximalabstand der Bohrungen untereinander nicht überschritten werden.

5. Beispiele

Im Folgenden werden zwei einfache Beispiele gezeigt, an denen sich die Auswirkungen einer Bemessung mit dem vorgestellten Nachweiskonzept - auch im Vergleich zu einem Nachweis nach Terzaghi/Peck - erkennen lassen.

Bild 2 (Perau und Haubrichs, 2006) zeigt die exemplarisch untersuchte kreisförmige Baugrube mit 20 m Durchmesser und 20 m Tiefe. Der Baugrund besteht bis in 21 m Tiefe aus einem Boden, der als quartärer Sand angesetzt wurde. Darunter steht bis in große Tiefe Mergel an, der eine deutlich geringere Durchlässigkeit als das Quartär und eine nennenswert hohe Kohäsion aufweist. Die angesetzten Bodenparameter sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Das Grundwasser steht außerhalb der Baugrube 19 m höher als innerhalb an. Die umgebende Schlitzwand bindet in den Mergel ein und nimmt sowohl den Erddruck wie den Porenwasserdruck auf.

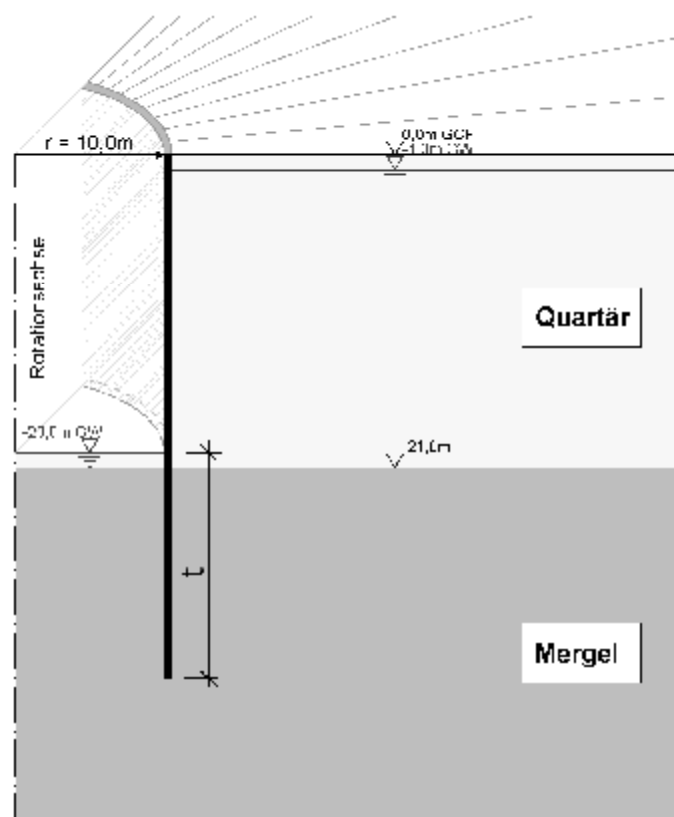


Bild 2: Beispiel 1 - Kreisrunde Baugrube, deren Verbauwand in den Mergel einbindet - ohne Anordnung von Entspannungsbohrungen

Tabelle 2: Charakteristische Bodenparameter für die Beispiele 1 und 2

Parameter	Sand	Mergel
Wichte γ'_k / γ_k [kN/m ³]	11 / 19	12 / 21
φ'_k / c'_k [kN/m ²] / σ'_{zug} [kN/m ²]	35° / 0 / 0	25° / 50 / 0
Wandreibung und -adhäsion		
$R = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi'} = \frac{a'}{c'}$	0,5	0,2
Durchlässigkeit k [m/s]	1×10^{-3}	1×10^{-6}
Steifemoduln [MN/m ²]	E_{sI} / E_{sII}	E_{sI} / E_{sII}
bei $\sigma' = 100$ kN/m ²	50 / 150	80 / 240
bei $\sigma' = 200$ kN/m ²	70 / 210	90 / 270
bei $\sigma' = 500$ kN/m ²	110 / 330	130 / 390

Ein entsprechender Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch gemäß dem Standard-Verfahren der DIN 1054 nach **Terzaghi/Peck** führt hier auf eine erforderliche Einbindetiefe von **t = 16 m**. Diese erforderliche Einbindetiefe ergäbe sich auch, wenn es sich bei der unteren Bodenschicht statt des kohäsiven Mergels z.B. um einen tertiären Feinsand handelt, der zusammen mit dem auflagernden Quartär als "günstiger Untergrund" eingestuft worden wäre. Dies liegt daran, dass die Scherparameter und damit auch die Wandreibung und -adhäsion hier keinen Einfluss auf den Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch haben. Die Breite des Untersuchungsbereichs für den gefährdeten Bereich innerhalb der Baugrube spielt dabei praktisch keine Rolle mehr, da die Potenzielllinien im Bereich der Wandunterkante nahezu horizontal verlaufen. Der "Bruchkörper" würde somit den gesamten Bereich des Bodens zwischen den Baugrubenwänden einnehmen.

Alternativ dazu wurden nun FEM-Berechnungen mit dem Programmsystem PLAXIS 2D, Version 8 (PLAXIS 2D, 2002) durchgeführt. Der zu dem Beispiel gehörige **FEM**-gestützte Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch führte mit den in Tabelle 2 wiedergegebenen Parametern zu einer erforderlichen Einbindetiefe von **t = 11,5 m**. Der sich dabei einstellende Bruchkörper sieht praktisch genauso aus wie der oben beschriebene nach der klassischen Vorgehensweise. Die geringere Einbindetiefe ergibt sich aus der angesetzten Wandreibung und -adhäsion. Die Einbindetiefe fällt nur wenig geringer aus, weil die Scherfestigkeit des Baugrunds - bis auf die Wandreibung und -adhäsion - auch hier nicht aktiviert wird, da der gesamte Boden im Bereich zwischen den Baugrubenwänden zum Bruchkörper gehört und insbesondere auch an dessen Unterkante keine Zugfestigkeit berücksichtigt wurde. Wirtschaftliche Vorteile verspricht ein FEM-gestützter Nachweis gegen den Hydraulischen

Grundbruch bei einer derart schmalen Baugrube also nur dann, wenn Wandreibung, -adhäsion angesetzt oder Zugspannungen im Untergrund zugelassen werden.

Um zu einer wirtschaftlichen Lösung zu kommen, bietet es sich an, Entspannungsbohrungen abzuteufen, die ab einer gewissen Aushubtiefe wirksam sein müssten. Dadurch werden die geohydraulischen Verhältnisse deutlich verändert. Die Bohrungen, die erfahrungsgemäß bis wenige Meter unterhalb der Verbauwände reichen, müssen lediglich mit einem dränierenden Material aufgefüllt und an die Restwasserhaltung angeschlossen werden. Dadurch kommt es zu einer Umlenkung der Grundwasserströmung und damit auch der Strömungskräfte, so dass die geohydraulische Belastung des Untergrunds günstiger gestaltet wird und Einbindetiefe bei der Baugrubenwand eingespart werden kann. Ein aktiver Betrieb von Pumpen zur Absenkung des Potenzials ist insbesondere auch innerhalb der Bohrungen nicht erforderlich. Pumpen sind dabei lediglich zur Förderung des gefassten Grundwassers aus der Baugrubensohle an die Geländeoberfläche erforderlich.

In Bild 3 ist eine derartige Situation dargestellt. Die Wände binden hier $t = 3 \text{ m}$ in den Baugrund ein, davon liegen 2 m innerhalb der relativ schwach durchlässigen Mergelschicht. Es werden Entspannungsbohrungen angeordnet, die einen Abstand von 1 m zur Verbauwand haben. Als Parameter für den Baugrund wurden ebenfalls die Werte aus Tabelle 2 zugrunde gelegt.

Das Beispiel wurde unter Ansatz von Rotationssymmetrie berechnet; das heißt, die Bohrungen wurden als ein dünner Schlitz modelliert, der eine relativ hohe Durchlässigkeit ($k = 10^{-4} \text{ m/s}$) besitzt. Die zugehörigen Berechnungen wurden ebenfalls mit PLAXIS 2D (Version 8) durchgeführt. Dabei ergaben sich aus der Berechnung der einzelnen Phasen unter anderem folgende Erkenntnisse:

- a) Der Aushub kann *ohne* weitere Maßnahmen bis zu einer Tiefe von 5 m oberhalb des Endaushubs vorgenommen werden
- b) Bei einem Aushub über eine Tiefe von 5 m oberhalb des Endaushubs hinaus müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden und wirksam sein
- c) Mit Entspannungsbohrungen, die 5 m über den Endaushub hinaus reichen ($t_E = 5 \text{ m}$ nach Bild 3) kann der Endaushub ausreichend sicher durchgeführt werden

Bild 4 zeigt mit dünnen Linien die von den Entspannungsbohrungen erzwungenen Potenzielllinien. Letztere gehen in der Nähe der Entspannungsbohrungen mit hohen, hauptsächlich horizontal gerichteten hydraulischen Gradienten einher. Desweiteren verringern die Entspannungsbohrungen die aufwärts gerichteten Komponenten des hydraulischen Gradienten und somit auch die der Strömungskräfte. Dies führt dazu, dass größere Bereiche im Untergrund in den Bruchkörper einbezogen werden. Die sich als maßgeblich herausgestellte Bruchfigur reicht daher bis etwa 5 m unterhalb der Unterkante der Verbauwand. Der Bruchmechanismus nach Terzaghi/Peck hat sich hier also als absolut *unzutreffend* erwiesen. Da er auf der unsicheren Seite liegt, darf er beim Nachweis gegen Hydraulischen Grundbruch hier keinesfalls zugrunde gelegt werden.

Die Entspannungsbohrungen haben die geohydraulische Situation des Untergrunds derart günstig beeinflusst, dass die Einbindetiefe von $t = 11,5$ m auf $t = 3,0$ m reduziert werden kann (Perau und Haubrichs, 2006).

6. Parameterstudien

An den vorangehend geschilderten Beispielen wurden inzwischen weitere Parameterstudien durchgeführt (Perau u.a., 2009). Dabei wurden der Einfluss der Kohäsion des Mergels sowie dessen Zugfestigkeit untersucht. Ansonsten wurden die Parameter gemäß Bild 3 und Tabelle 2 beibehalten.

Die Variation der Kohäsion führte zu folgenden Erkenntnissen:

- a) bei einer Kohäsion von $c'_k < 30$ kN/m² führen die Entspannungsbohrungen nach Bild 3 nicht zu einem erfolgreichen Nachweis, selbst wenn diese sehr tief ausgeführt würden; hier müsste die Einbindetiefe der Wand vergrößert werden
- b) bei einer Kohäsion von $c'_k > 30$ kN/m² führen die Entspannungsbohrungen stets zu einem erfolgreichen Nachweis, wobei mit zunehmender Kohäsion die erforderliche Tiefe der Entspannungsbohrungen abnimmt
- c) auch bei einer Kohäsion von $c'_k = 200$ kN/m² ist noch eine Tiefe der Entspannungsbohrungen von etwa $t_E \approx 4$ m erforderlich; dies zeigt, wie begrenzt der Einfluss der Kohäsion ist

Alternativ zu tieferen Bohrungen können - zumindest bei Baugruben mit größeren Durchmessern - Entspannungsbohrungen in der Mitte bzw. eine weitere Staffel von Entspannungsbohrungen zweckmäßiger sein.

In einer weiteren Parameterstudie wurden für den Mergel Zugfestigkeiten zugelassen, die passend zu den jeweils angesetzten Werten für ϕ'_d und c'_d dem Mohr-Coulombschen Bruchgesetz entsprechen. Genau wie in der vorangehend geschilderten Studie wurde dabei die Kohäsion variiert; die Zugfestigkeit ändert sich dabei entsprechend dem Mohr-Coulombschen Bruchgesetz automatisch. Dabei ergaben sich unter Ansatz der Zugfestigkeit die folgenden Erkenntnisse:

- a) bei einer Kohäsion von $c'_k < 30 \text{ kN/m}^2$ führt der Ansatz der Zugfestigkeit zu keiner entscheidenden Verbesserung der Situation
- b) bei einer Kohäsion von $30 \text{ kN/m}^2 < c'_k < 50 \text{ kN/m}^2$ sind Entspannungsbohrungen weiterhin erforderlich, diese müssen jeweils bis zu einer gewissen Tiefe reichen, welche mit zunehmender Kohäsion abnimmt
- c) bei einer Kohäsion von $c'_k > 50 \text{ kN/m}^2$ kann der Nachweis erfolgreich *ohne* Entspannungsbohrungen geführt werden

Die beiden Parameterstudien zeigen, dass die Größe der Kohäsion eine wichtige Rolle bei der Festlegung der Erfordernis sowie der Tiefe der Entspannungsbohrungen spielt. Entscheidender könnte darüber hinaus jedoch der Ansatz einer zulässigen Zugspannung sein.

Literatur

DIN 1054: DIN 1054:2005-01, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau sowie deren Berichtigungen und Änderungen

Eurocode 7: EN 1997-1: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004

Gutjahr, St. und Perau, E. (2006): Failure of cohesive soil by heave due to seepage in excavations pits. Plaxis User Meeting 8.-10.11.2006 at BAW in Karlsruhe (unveröffentlicht)

Perau, E. (2005): Hydraulischer Grundbruch und Versagen des Erdwiderlagers von Baugrubenwänden, Die Bautechnik 82, Heft 9, S. 605-613

- Perau, E. und Haubrichs, K. (2006): Numerische Berechnungen zum Nachweis der Standsicherheit tiefer Baugruben. In: Vorträge der Baugrundtagung 2006 in Bremen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), S. 111-118
- Perau, E., Gutjahr, St., Hammacher, M. (2009): Design of relief boreholes for relaxation of pore-water pressure at the bottom of excavations, Proc. 17th Int. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ICSMGE, Alexandria, Egypt, October 2009, volume 3, pp. 2479-2482
- PLAXIS 2D (2002): PLAXIS 2D – version 8, Manual, Brinkgreve R.B.J., ed. Delft University of Technology & PLASIX b.v.
- Terzaghi, K. und Peck, R. (1956): Soil Mechanics in Engineering Practice, 9th ed., New-York: Wiley & Sons
- Wudtke, R.-B. und Witt, K. J. (2006): A static Analysis of Hydraulic Heave in Cohesive Soil. Proc. 3rd Int. Conf. on Scour and Erosion, Amsterdam CURNET, pp. 251-257