

Sicherheitsnachweise für den Hydraulischen Grundbruch

T 3211

T 3211

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8066-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

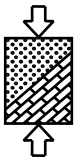
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Zeichen:
Zie/Au

Datum:
19.03.09

Abschlussbericht

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

Vorwort

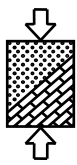
Die Untersuchungen wurden vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) gefördert. Der vom DIBt zur Beratung der forschenden Stelle eingesetzten Betreuungsgruppe gehören

Frau Dipl.-Ing. Annette Gandyra und

Herr Dipl.-Ing. Wolfram Faller

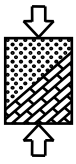
an. Dem Deutschen Institut für Bautechnik und den Mitgliedern der Betreuungsgruppe sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Ebenso gedankt sei der Firma Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, die das Vorhaben finanziell unterstützte, und der Firma Sofistik AG für die kostenlose Bereitstellung der Lizenz des Programmsystems Sofistik-HYDRA.



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Veranlassung	1
1.3	Ziel des Forschungsvorhabens	2
2	Stand der Kenntnis	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Nachweisführung nach DIN 1054	3
2.3	EAB und EAU	5
2.4	Näherungsverfahren zur Bestimmung der Strömungskraft	6
2.4.1	Linearer Potentialabbau	6
2.4.2	Verfahren nach Brinch Hansen und Hessner	7
2.4.3	Verfahren nach Brinch Hansen	8
2.4.4	Verfahren nach Harza und Dachler	8
2.4.5	Verfahren nach McNamee – Harza - Davidenkoff	9
2.4.6	Verfahren von Davidenkoff und Franke	11
2.4.7	Verfahren nach Knaupe	12
2.4.8	Numerische Berechnungen von Schmitz	14
2.5	Berücksichtigung der räumlichen Anströmung	15
3	Numerische Berechnungen	16
3.1	Ebene Berechnungen	17
3.1.1	Voruntersuchungen zur maßgebenden Bruchkörperbreite	17
3.1.2	Voruntersuchungen zur notwendigen Modellbreite	22
3.1.3	Voruntersuchung zum Einfluss der Verbauwanddicke	24
3.1.4	Bestimmung der maßgebenden Einbindetiefe	25
3.2	Räumliche Berechnungen	28
3.2.1	Voruntersuchungen zur maßgebenden Bruchkörperbreite und –form	30
3.2.2	Bestimmung der maßgebenden Einbindetiefe	33
3.3	Vergleichs- und Kontrollrechnungen	36
3.3.1	Vergleichsrechnung	36
3.3.2	Kontrollrechnungen für den ebenen Fall	39
3.3.3	Kontrollrechnungen für den räumlichen Fall	40



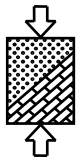
4	Auswertung	42
4.1	Bemessungsdiagramme für den ebenen Fall	42
4.2	Bemessungsdiagramme für den räumlichen Fall	45
4.3	Abtreppung der Verbauwände mit Hilfe der Bemessungsdiagramme	48
4.4	Faktorisierung für unterschiedliche Wichten	52
5	Berechnungsbeispiele	56
5.1	Randbedingungen	57
5.2	Vereinfachtes Beispiel ohne Baugrundsichtung	58
5.2.1	Randbedingungen	58
5.2.2	Nachweis mit den Bemessungsdiagrammen	59
5.2.3	Nachweis mit Näherungsverfahren	61
5.3	Beispiel „Haltestelle-Rathaus“ unter Berücksichtigung der Baugrundsichtung	62
5.3.1	Sicherheitskonzept nach DIN 1054	62
5.3.2	Nachweis der Filterstabilität	63
5.3.3	Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch durch Auswertung eines auf FE-Berechnungen basierenden Strömungsnetzes	66
5.4	Vergleich der Beispielrechnungen	68
5.4.1	Vergleich der Verfahren für das vereinfachte Modell	68
5.4.2	Vergleich realitätsnahes und vereinfachtes Baugrundmodell	69
6	Zusammenfassung	71
7	Abstimmung mit der Betreuungsgruppe und Empfehlungen	72

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

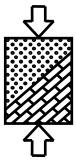
Anhang



Bezeichnungen und Begriffe

Große Lateinische Buchstaben

B	Breite der Baugrube	m
G'_k	Charakteristische Eigenlast unter Auftrieb des durchströmten Bodenkörpers	kN
K_0	Erdruchdruckbeiwert	-
K_{ph}	Erddruckbeiwert für den Erdwiderstand	-
H	Wasserspiegeldifferenz zwischen außer- und innerhalb der Baugrube	m
L	Länge der Baugrube	m
R	Breite des rechten Berechnungsmodellausschnitts	m
R_k	charakteristische Reibungskraft	kN
S	Mächtigkeit der wasserführenden Schicht unterhalb der Baugrubensohle	m
S'_k	Charakteristische Strömungskraft im durchströmten Bodenkörper	kN
T	Einbindetiefe	m
V	Volumen	m ³

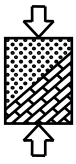


Kleine Lateinische Buchstaben

b	Breite des Boden-/Bruchkörpers	m
d	Dicke der Verbauwand	m
f	Maßstabsfaktor	-
f_s	Strömungskraft	kN/m^3
Δh	abzubauender Potentialunterschied	m
i	hydraulischer Gradient	-
Δl	durchströmte Länge	m

Griechische Buchstaben

$\gamma_{G, \text{stb}}$	Teilsicherheitsbeiwert für günstige ständige Einwirkungen im Grenzzustand GZ1A	-
γ_H	Teilsicherheitsbeiwert für die Strömungskraft bei günstigem bzw. ungünstigem Untergrund im Grenzzustand GZ1A	-
γ'	Wichte unter Auftrieb	kN/m^3
γ_r	Wichte des wassergesättigten Bodens	kN/m^3
γ_w	Wichte des Wassers	kN/m^3
η	globale Sicherheit (nach altem Nachweiskonzept)	-
μ	Ausnutzungsgrad	-
φ	Reibungswinkel des Bodens	°
φ_s	abzubauendes Restpotential am Spundwandfuß	-
ω	Funktion zur Ermittlung der Sicherheit nach Knaupe	-
ε_k	Eckvertiefungsverhältnis nach Knaupe	-
σ'_h	Horizontalspannung	kN/m^2
σ'_v	Vertikalspannung	kN/m^2
τ	Schubspannung	kN/m^2



1 Einführung

1.1 Allgemeines

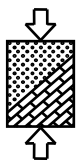
Der hydraulische Grundbruch zählt zu den gefährlichsten Versagensmechanismen im Bereich der Geotechnik. Dies liegt daran, dass durch rückschreitende Erosion der hydraulische Grundbruch ohne große Vorankündigung eintritt (EAU, E 116 [5]) und es innerhalb kürzester Zeit zum schlagartigen großflächigen Aufbrechen der Baugrubensohle kommt. Ein solches System weist keine Duktilität im Sinne von DIN 1054 [1], 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. Aber auch andere Näherungsverfahren, die im Regelfall auf der sicheren Seite liegen, können bei bestimmten Konstellationen unsichere Ergebnisse liefern. Die gängigen Vorschriften und Empfehlungen zur Berechnung von Baugruben im Grundwasser beschränken sich hinsichtlich der Geometrieabhängigkeit und der dreidimensionalen Strömungsverhältnisse auf verbale Hinweise und Literaturverweise (z.B. EB 61 in [3]), ohne eine konkrete Berechnungsvorschrift anzugeben.

1.2 Veranlassung

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.

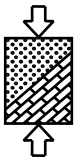
Bei den dichten Schlitzwandbaugruben der Haltestellen dient das Tertiär als unterer, nahezu wasserdichter Sohlabschluss. Mit den vorliegenden, außergewöhnlichen Randbedingungen wie anisotroper, geschichteter Baugrund, Innenabmessungen der Baugrube von ca. $L/B/H = 90/6,5/20,5$ m und Wasserdruckdifferenzen von ca. 16 m, erwiesen sich übliche Berechnungsverfahren und die Ergebnisse einiger der verwendeten Rechenprogramme z. T. entweder als unwirtschaftlich oder als auf der unsicheren Seite liegend.



Aus den mittels der Finiten Elemente Methode (FEM) durchgeführten Nachweisen gegen hydraulischen Grundbruch wurden Einbindetiefen ins Tertiär von bis zu 6,0 m ermittelt. Erste Berechnungen mit Näherungsverfahren bzw. Rechenprogrammen, welchen der oft angenommene lineare Potentialabbau zugrunde lag, ergaben dagegen, dass die in der Ausschreibung vorgegebene Mindesteinbindetiefe von 2,0 m z. T. ausreichend gewesen wäre.

1.3 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, zunächst die bodenmechanischen und hydraulischen Zusammenhänge unter Auswertung der vorhandenen Literatur transparent darzustellen, um den Anwender im Hinblick auf das von ihm gewählten Nachweisverfahren urteilsfähig zu machen. Mit umfangreichen zwei- und dreidimensionalen Strömungsberechnungen sollen zunächst die maßgebenden Bruchkörpergeometrien während des hydraulischen Grundbruchs herausgefunden werden, um darauf aufbauend dann für typische Baugrundsituationen und Baugruben Bemessungsdiagramme aufstellen zu können, die es dem Anwender erlauben, den Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch unter Beachtung der Baugrubengeometrie und der hydraulischen Randbedingungen schnell und sicher führen zu können. Ausgewählte Beispielrechnungen in Zusammenarbeit mit dem mit forschenden und mit unterstützenden Industriepartner sollen die Anwendung erläutern und deutlich machen, welches Unsicherheitspotential in den üblichen, vereinfachten Verfahren liegt.



2 Stand der Kenntnis

2.1 Allgemeines

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. Die Größe der volumenbezogenen Strömungskraft f_s ergibt sich aus dem hydraulischen Gradienten i multipliziert mit der Wichte des Wassers γ_w zu:

$$f_s = i \cdot \gamma_w = \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot \gamma_w \quad (1)$$

mit: Δh Wasserspiegeldifferenz
 Δl durchströmte Länge

Die in dem betrachteten Volumen wirkende Strömungskraft S'_k ergibt sich daraus zu:

$$S'_k = f_s \cdot V = i \cdot \gamma_w \cdot V = \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot \gamma_w \cdot V \quad (2)$$

Ist diese Strömungskraft 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.

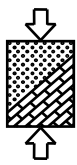
2.2 Nachweisführung nach DIN 1054

Der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ist dem Grenzzustand GZ1A zugeordnet. Im Grenzzustand GZ1A werden in den Grenzzustandsbedingungen die Bemessungswerte von günstigen und ungünstigen Einwirkungen gegenübergestellt. Widerstände treten im Grenzzustand GZ1A nicht auf [1]. Die Grenzzustandsbedingung lautet:

$$S'_k \cdot \gamma_H \leq G'_k \cdot \gamma_{G, \text{stb}} \quad (3)$$

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



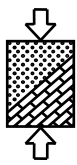
Die Teilsicherheitsbeiwerte ergeben sich in Abhängigkeit des jeweiligen Lastfalls aus Tabelle 2 der DIN 1054 [1]. Zur DIN 1054 vom Januar 2005 sind mittlerweile mehrere Berichtigungen erschienen, im Zuge derer sich auch Änderungen bezüglich der Teilsicherheitsbeiwerte ergeben haben. Die aktuell gültigen Teilsicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch können der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Einwirkung bzw. Beanspruchung	Formelzeichen	Lastfall		
		LF 1	LF 2	LF 3
<u>GZ 1A: Grenzzustand des Verlustes der Lagesicherheit</u>				
Günstige ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,stab}$	0,95	0,95	0,95
Strömungskraft bei günstigem Untergrund	γ_H	1,35	1,30	1,20
Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund	γ_H	1,80	1,60	1,35

Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 2 DIN 1054 Ber4:2008-10

Die Lastfälle ergeben sich aus der Einwirkungskombination EK und der Sicherheitsklasse SK nach Kapitel 6.3 der DIN 1054 [1]. Die Einwirkungskombination berücksichtigt mögliche Einwirkungen nach Ursache, Größe, Richtung und Häufigkeit, die Sicherheitsklasse den unterschiedlichen Sicherheitsanspruch bei den Widerständen in Abhängigkeit von Dauer und Häufigkeit der maßgebenden Einwirkung. Für Baugruben ergibt sich im GZ1A in der Regel der Lastfall LF 2. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens angestellten Untersuchungen wurden für Baugrubenkonstruktionen durchgeführt und gehören somit dem Lastfall LF 2 an. Als günstiger Untergrund sind Kies, Kiessand und mindestens mitteldicht gelagerter Sand mit Korngrößen über 0,2 mm sowie mindestens steifer toniger bindiger Boden anzusehen, als ungünstiger Untergrund locker gelagerter Sand, Feinsand, Schluff und weicher bindiger Boden. Bei ungünstigem Untergrund dürfen die für günstigen Untergrund angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte verwendet werden, wenn eine filtergerechte Schutzschicht von mindestens 0,3 m Dicke aufgebracht wird [1].

Nach DIN 1054 ist die Strömungskraft S'_k 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 [1].

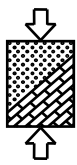


Weiterhin ist, wenn der Boden vor dem Fuß einer Stützwand von unten nach oben durchströmt wird, die Strömungskraft in einem Bodenkörper zu betrachten, dessen Breite in der Regel gleich der halben Einbindetiefe der Stützwand angenommen werden darf. Bei genaueren Untersuchungen sind auch andere mögliche Begrenzungen des Bodenkörpers zu untersuchen [1].

2.3 EAB und EAU

Der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ist in den Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ - EAB [3] in der Empfehlung EB 61 geregelt. Im Wesentlichen entsprechen die dort getroffenen Aussagen der DIN 1054 [1]. Allerdings besagt die EAB, dass, wenn die Voraussetzungen für eine räumliche Wirkung gegeben sind, eine Erhöhung des aufwärtsgerichteten Strömungsdruckes 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 [3]. Zur Ermittlung der Strömungsdrücke wird auf die Empfehlung EB 59 verwiesen. Darin wird empfohlen, den Strömungsdruck entweder in Anlehnung an die Empfehlung E 113 der Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ - EAU [5], durch ein Strömungsnetz zu ermitteln oder aber auf Kurven- und Zahlentafeln bzw. einfache rechnerische Ansätze zurückzugreifen. Weiterhin ist auch eine Rückrechnung aus der Veränderung der Wichte infolge von Strömungsdruck nach Empfehlung E 114 der EAU [5] gemäß Empfehlung EB 59 der EAB [3] möglich.

Auch die EAU [5] gibt in der entsprechenden Empfehlung „Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch“ (E 115) als erste Möglichkeit zur Ermittlung der Strömungskraft die Auswertung eines Strömungsnetzes an, lässt jedoch auch die vereinfachte Ermittlung nach Brinch Hansen zu. In der Empfehlung E 114, auf welche in der EAB [3] verwiesen wird, sind Näherungsformeln für die Änderung der Wichte sowohl auf der aktiven als auch auf der passiven Seite angegeben. Gemäß EAB lässt sich auch daraus der Strömungsdruck zurückrechnen.



2.4 Näherungsverfahren zur Bestimmung der Strömungskraft

Wie oben dargestellt empfehlen zwar sowohl die DIN 1054 [1] als auch die EAB [3] und die EAU [5] die Ermittlung der Strömungskraft durch Auswertung eines Strömungsnetzes, welches entweder zeichnerisch, durch Modellversuche oder durch numerische Berechnungen zu erstellen ist, jedoch lassen alle drei auch die Anwendung von Näherungsverfahren zu. Im Folgenden sollen daher die gängigsten Näherungsverfahren kurz erläutert werden. Die Bezeichnungen innerhalb der angegebenen Näherungsverfahren werden dabei jeweils so umbenannt, dass sie Abbildung 1 und damit auch den durchgeführten numerischen Berechnungen entsprechen.

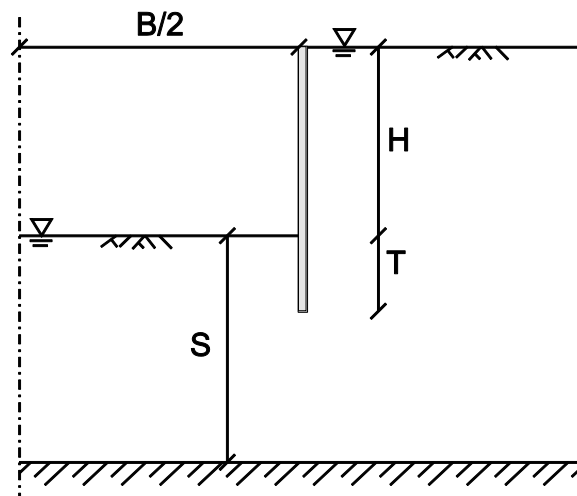


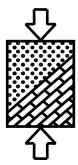
Abbildung 1: Systemskizze Baugrube

Neben den in den Standardwerken [3], [5] und [23] enthaltenen Näherungsverfahren werden auch die in weiterführender Literatur enthaltenen Ansätze aufgezeigt.

2.4.1 Linearer Potentialabbau

Das einfachste Modell zur Ermittlung der Strömungskraft bzw. des am Spundwandfuß noch abzubauenen Potentials ist die Annahme eines linearen Potentialabbaus auf einem Stromfaden entlang der Verbauwand. Laut Grundbau-Taschenbuch [23] liegt dieser Ansatz bei breiten und zugleich langen Baugruben in der Regel auf der sicheren Seite. Dass dies nicht der Fall ist, wird in 5.4 gezeigt. Das am Spundwandfuß noch abzubauenende Potential berechnet sich mit diesem Ansatz zu:

$$\Delta h = \frac{H \cdot T}{H + 2 \cdot T} \quad (4)$$



Eingesetzt in (3) erhält man:

$$\frac{H \cdot T}{\frac{H+2 \cdot T}{T}} \cdot \gamma_w \cdot V \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot V \cdot \gamma_{G, \text{stb}} \quad (5)$$

Durch entsprechende Umformung folgt schließlich ein Verhältnis von T/H zu:

$$\frac{T}{H} = \frac{\gamma_w \cdot \gamma_H}{2 \cdot \gamma' \cdot \gamma_{G, \text{stb}}} - \frac{1}{2} \quad (6)$$

Für eine Wichte unter Auftrieb von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ ergibt sich damit für günstigen Baugrund ein konstantes Verhältnis von:

$$\frac{T}{H} = 0,12 \quad (7)$$

2.4.2 Verfahren nach Brinch Hansen und Hessner

Nach [23] erhält man das Druckgefälle genauer, wenn man den in Brinch Hansen und Hessner [7] enthaltenen Ansatz nach Bent Hansen verwendet. Danach bestimmt sich das hydraulische Gefälle auf der Baugrubenseite zu:

$$i_p = -\frac{0,70 \cdot h_{\ddot{u}}}{t + \sqrt{h_w + t}} = -\frac{0,70 \cdot H}{T + \sqrt{(H+T) \cdot T}} \quad (8)$$

Weiterhin ergibt sich nach [23] die Sicherheit nach dem alten Sicherheitskonzept zu:

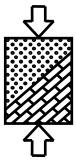
$$\eta = \frac{\gamma'}{i_p \cdot \gamma_w} \quad (9)$$

Überführt man Formel (9) in das neue Teilsicherheitskonzept, so erhält man:

$$i_p \cdot \gamma_w \cdot V \cdot \gamma_H = \frac{0,70 \cdot H}{T + \sqrt{(H+T) \cdot T}} \cdot \gamma_w \cdot V \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot V \cdot \gamma_{G, \text{stb}} \quad (10)$$

Durch entsprechende Umformung und Einsetzen der Teilsicherheiten für günstigen Baugrund sowie einer Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ folgt ein konstantes Verhältnis von:

$$\frac{T}{H} = 0,28 \quad (11)$$



2.4.3 Verfahren nach Brinch Hansen

Einen weiteren Näherungsansatz enthält die EAU. Dort wird vorgeschlagen, das am Spundwandfuß noch abzubauen Potential mit einem Ansatz nach Brinch Hansen zu ermitteln:

$$h_r = \frac{h_{wu} \cdot \sqrt{h_{so}} + h_{wo} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{h_{so}} + \sqrt{t}} - h_{wu} = \frac{T \cdot \sqrt{H+T} + (H+T) \cdot \sqrt{T}}{\sqrt{H+T} + \sqrt{T}} - T = \Delta h \quad (12)$$

Eingesetzt in (3) lautet die Grenzzustandsbedingung dann:

$$\frac{T \cdot \sqrt{H+T} + (H+T) \cdot \sqrt{T}}{T \cdot \sqrt{H+T} + T \cdot \sqrt{T}} - \frac{T}{T} \leq \frac{\gamma' \cdot \gamma_{G, stb}}{\gamma_w \cdot \gamma_H} \quad (13)$$

Durch entsprechendes Umformen ergibt sich auch hier ein konstantes Verhältnis T/H. Für günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ erhält man:

$$\frac{T}{H} = 0,44 \quad (14)$$

2.4.4 Verfahren nach Harza und Dachler

In [11] beschreibt Davidenkoff, dass sich die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch nach einem Verfahren von Harza [13] folgendermaßen ergibt:

$$\eta = \frac{\gamma_a}{\gamma_w \cdot J_k} = \frac{\gamma'}{\gamma_w \cdot J_k} \quad (15)$$

Hierbei berechnet sich das größte Standrohrspiegelgefälle J_k nach einer Formel von Dachler [8] zu:

$$J_k = \frac{H}{\pi \cdot s} = \frac{H}{\pi \cdot T} \quad (16)$$

Die von Dachler aufgestellte Formel gilt eigentlich für eine Spundwand in einem Flussbett, also mit gleicher Geländehöhe auf beiden Seiten und lediglich verschiedenen Wasserständen (vgl. Abbildung 2). Betrachtet man nun eine Baugrube mit unterschiedlichen Geländehöhen inner- und außerhalb, dann ist die für den Potentialabbau zur Verfügung stehende Strecke auf der Geländeseite größer als auf der Baugrubenseite. Somit ist in diesem Fall in Höhe des Spundwandfußes weniger Potential abzubauen und der hydraulische Gradient geringer als für den von Dachler betrachteten Fall. Folglich müsste die unter Verwendung der oben genannten Ansätze erhaltene Einbindetiefe auf der sicheren Seite liegen.

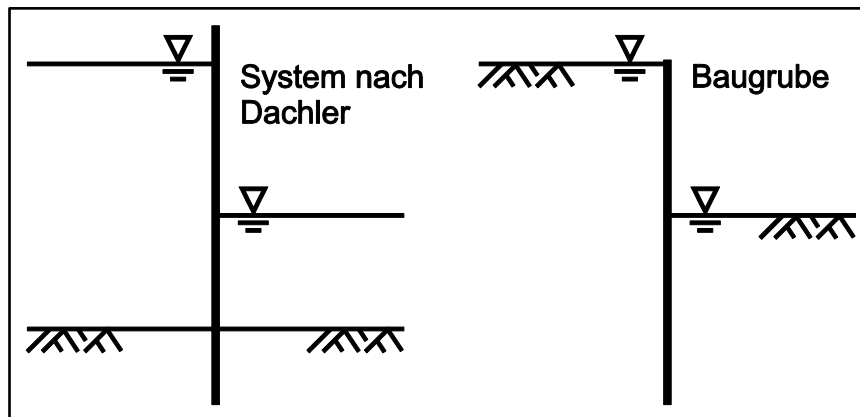
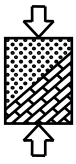


Abbildung 2: Skizze Spundwand in einem Flussbett nach Dachler und Baugrube

Überträgt man die Ansätze nach (15) und (16) in die Grenzzustandsbedingung nach dem Teilsicherheitskonzept erhält man:

$$\frac{H}{T \cdot \pi} \cdot \gamma_w \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot \gamma_{G, \text{stb}} \quad (17)$$

Durch Umformen folgt für günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ das Verhältnis:

$$\frac{T}{H} = 0,40 \quad (18)$$

2.4.5 Verfahren nach McNamee – Harza - Davidenkoff

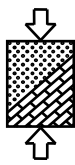
Im Grundbau-Taschenbuch [23], [22] wird das Verfahren nach McNamee beschrieben, welches im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren die Breite der Baugrube durch Beiwerte berücksichtigt. Das hydraulische Gefälle ergibt sich dabei zu:

$$i_A = f_{iA} \cdot \frac{h_{\bar{u}}}{h_d} = f_{iA} \cdot \frac{H}{H} = f_{iA} \quad (19)$$

$$i_F = f_{iF} \cdot \frac{t}{h_d} = f_{iF} \cdot \frac{T}{H} \quad (20)$$

Dabei ist i_A das hydraulische Gefälle an der Austrittsstelle und i_F das hydraulische Gefälle am Spundwandfuß.

Nach dem Kriterium von Harza, ist für dicht gelagerten Boden, also günstige Baugrundverhältnisse, i_A maßgebend, während nach dem Kriterium von Davidenkoff



für lockerst gelagerte Böden i_F maßgebend wird. Das jeweilige Gefälle lässt sich nach [22] mit Hilfe von Abbildung 3 ermitteln.

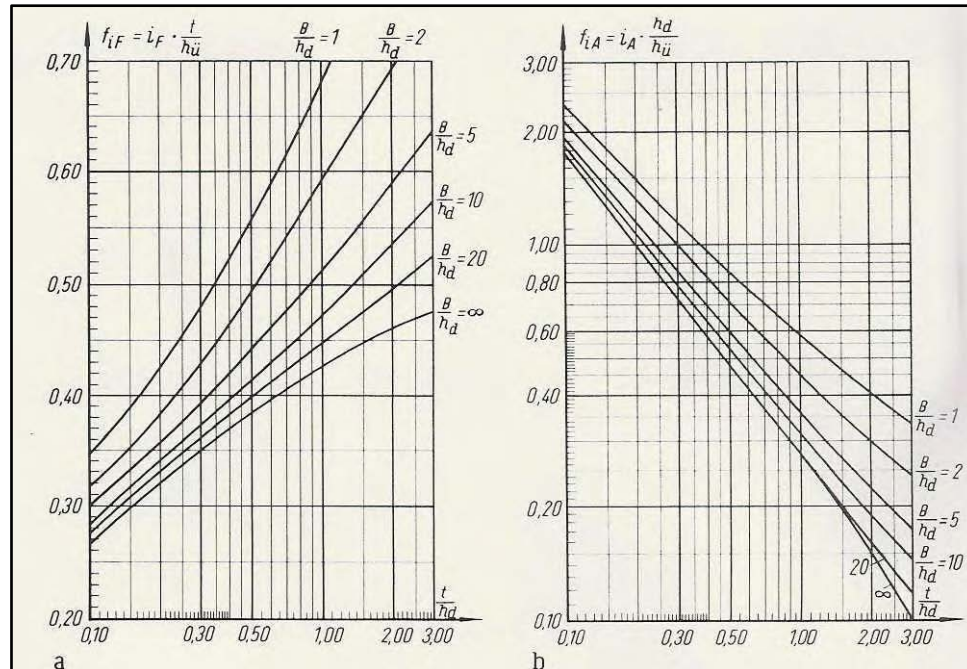


Abbildung 3: Beiwerte zur Ermittlung des Druckgefälles aus [22]

Der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch lautet dann nach (3) für ungünstigen

$$\frac{1}{f_F} \cdot f_{iF} \cdot \frac{T}{H} \cdot \gamma_w \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot \gamma_{G, \text{stb}} \quad (21)$$

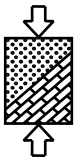
bzw. für günstigen Baugrund

$$\frac{1}{f_F} \cdot f_{iA} \cdot \gamma_w \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot \gamma_{G, \text{stb}} \quad (22)$$

Dabei ist f_F ein Formfaktor zu Berücksichtigung der Baugrubenform, welcher bei langgestreckten Baugruben und damit im ebenen Fall $f_F = 1,0$ beträgt. Auf die Abminderung des Formfaktors im räumlichen Fall wird in 2.5 noch eingegangen.

Trotz der verschiedenen hydraulischen Gefälle i_A und i_F wird γ_H weiterhin mit unterschiedlichen Werten nach Tabelle 1 angesetzt.

Die erforderliche Einbindetiefe T/H ist bei diesem Ansatz eine Funktion der Baugrubenbreite und lässt sich daher nicht wie bei den bisherigen Ansätzen nur mit einer Zahl ausdrücken.



2.4.6 Verfahren von Davidenkoff und Franke

Sowohl in [3] als auch in [23] wird auf die Untersuchungen von Davidenkoff und Franke [9], [10] verwiesen. Nach [9] lässt sich die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch zu

$$\eta = \frac{\gamma_a \cdot s_2}{\gamma_w \cdot h \cdot \varphi_s} = \frac{\gamma' \cdot T}{\gamma_w \cdot H \cdot \varphi_s} \quad (23)$$

mit φ_s abzubauenendes Restpotential am Spundwandfuß

berechnen. Übertragen auf das neue Teilsicherheitskonzept ergibt sich daraus:

$$\gamma_w \cdot H \cdot \varphi_s \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot T \cdot \gamma_{G, \text{stb}} \quad (24)$$

Die erforderliche Einbindetiefe T/H erhält man also für günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ zu:

$$\frac{T}{H} \geq \frac{\gamma_w \cdot \varphi_s \cdot \gamma_H}{\gamma' \cdot \gamma_{G, \text{stb}}} = 1,244 \cdot \varphi_s \quad (25)$$

Das noch abzubauenende Restpotential lässt sich nach Abbildung 4 ermitteln.

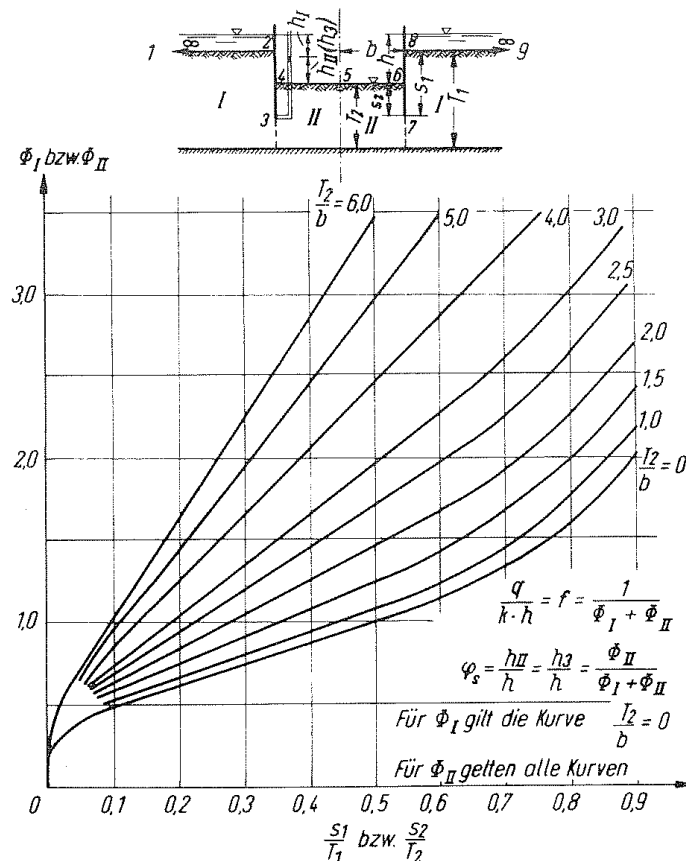
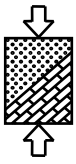


Abbildung 4: Diagramm zur Berechnung des Potentials am Spundwandfuß nach [9]



2.4.7 Verfahren nach Knaupe

In [3] wird in Zusammenhang mit erhöhten Strömungsdrücken bei räumlicher Anströmung auf Knaupe verwiesen. Dieser hat auf der Grundlage von Modellversuchen Formeln und Diagramme entwickelt, mit welchen sich die kritische hydraulische Druckhöhe h_{wk} ermitteln lässt. Die kritische hydraulische Druckhöhe stellt hierbei diejenige Wasserspiegeldifferenz H dar, bei welcher es bei vorgegebener Einbindetiefe T zum hydraulischen Grundbruch kommt. Sie bestimmt sich zu:

$$h_{wk} = \frac{\gamma_a}{\gamma_w} \cdot \omega_n \cdot t_i = H = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \cdot \omega_n \cdot T \quad (26)$$

Weiterhin bietet Knaupe die Möglichkeit die Reibung des Bodens zu berücksichtigen. Die kritische hydraulische Druckhöhe hierfür ergibt sich dann zu:

$$h_{wk}^* = \frac{\gamma_a}{\gamma_w} \cdot \omega_n^* \cdot t_i \quad (27)$$

Die jeweiligen Funktionen zur Berechnung des hydraulischen Grundbruchs ω_n bzw. ω_n^* können mit Hilfe von verschiedenen Diagrammen und Formeln ermittelt werden. Dabei ist zwischen breiten (ω_3) und schmalen (ω_4) Baugruben, sowie Baugruben im Übergangsbereich (ω_5) zu unterscheiden.

Stellt man Gleichung (26) um und erweitert diese um die Teilsicherheitsbeiwerte, so erhält man gemäß Gleichung (3) folgende Grenzzustandsbedingung:

$$\gamma_w \cdot \frac{H}{T \cdot \omega_n} \cdot \gamma_H \leq \gamma' \cdot \gamma_{G, stb} \quad (28)$$

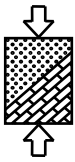
Die erforderliche Einbindetiefe ergibt sich daraus zu:

$$\frac{T}{H} = \frac{\gamma_w \cdot \gamma_H}{\gamma' \cdot \omega_n \cdot \gamma_{G, stb}} \quad (29)$$

Für günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ folgt schließlich:

$$\frac{T}{H} = 1,244 \cdot \frac{1}{\omega_n} \quad (30)$$

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Funktionen ω_n selbst von der Einbindetiefe T abhängig sind. Das Verfahren erfordert demnach eine iterative Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe.



Beispielhaft ist in Abbildung 5 ein Nomogramm nach Knaupe abgebildet, mit dem ω bzw. ω^* für breite Baugruben ermittelt werden kann. Es kann auch direkt das Verhältnis der Wichte unter Auftrieb zur Wichte des Wassers berücksichtigt werden und man erhält ω^* . Dann sind die Wichten bei der weiteren Berechnung der Sicherheit oder der Einbindetiefe nicht mehr zu berücksichtigen.

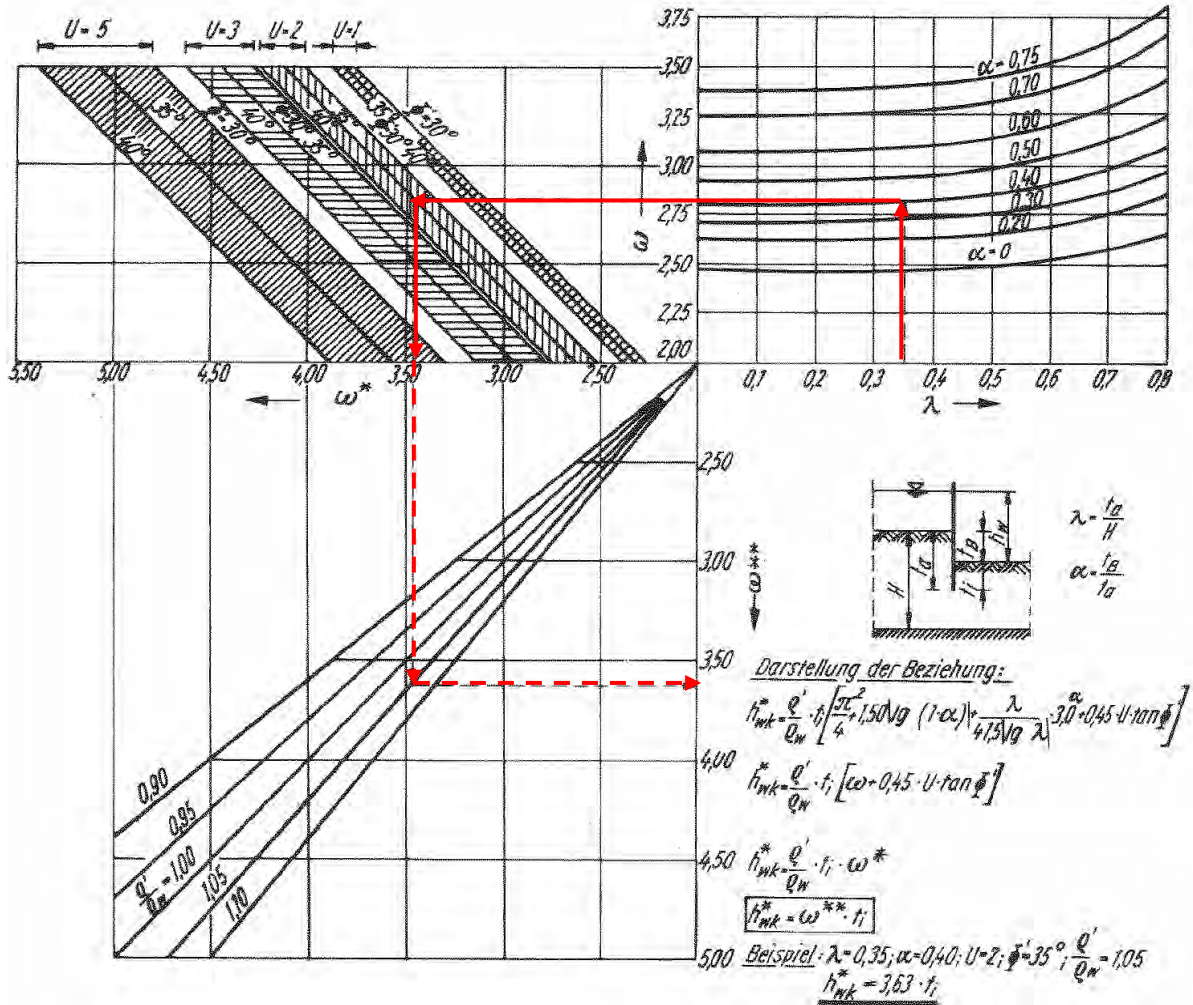
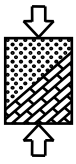


Abbildung 5: Bemessungsnomogramm zur Ermittlung von ω nach [15]



2.4.8 Numerische Berechnungen von Schmitz

In seiner Dissertation [18] stellt Schmitz die Ergebnisse zahlreicher von ihm durchgeführter numerischer Berechnungen zur erforderlichen Einbindetiefe vor. Schmitz weist darauf hin, dass sich seine Ergebnisse grundsätzlich auf das Stabilitätskriterium von Davidenkoff beziehen, d.h. den Berechnungen wurde ein Stromfaden entlang der Verbauwand zugrundegelegt, und damit hinsichtlich des Ansatzes des Strömungsdruckes gegenüber anderen Verfahren stets auf der sicheren Seite liegen [18]. Aus seinen Berechnungen hat er zahlreiche Diagramme entwickelt, von denen eines in Abbildung 6 zu sehen ist.

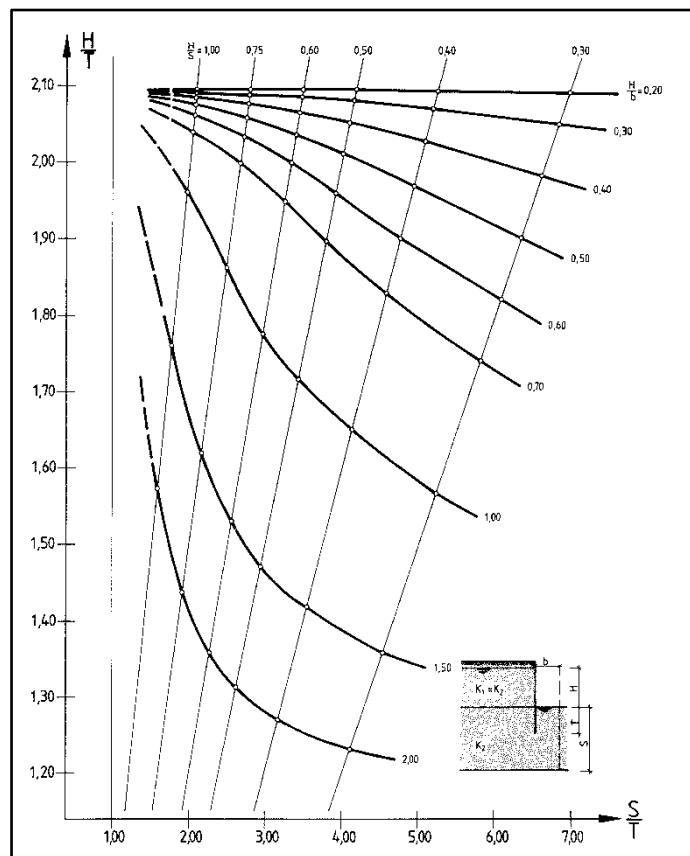
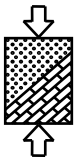


Abbildung 6: Erforderliche Einbindetiefe für den ebenen Fall nach [18]

Die von Schmitz entwickelten Diagramme wurden unter der Voraussetzung einer globalen Sicherheit von $\eta = 1,5$ aufgestellt und entsprechen daher nicht dem gültigen Teilsicherheitskonzept. Weiterhin liegt allen Berechnungen eine Wichte von $\gamma' = 11,0 \text{ kN/m}^3$ zugrunde. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass Schmitz in [18] durchaus Hinweise zur Berücksichtigung einer abweichenden Wichte gibt sowie Korrekturkoeffizienten für eine Sicherheit von $\eta = 2,0$ vorschlägt.



2.5 Berücksichtigung der räumlichen Anströmung

Bezüglich der Berücksichtigung einer räumlichen Anströmung beschränkt sich die DIN 1054 auf den Hinweis, dass die räumliche Wirkung bei schmalen, runden oder rechteckigen Baugruben zu berücksichtigen sei [1]. Die EAB besagt weiterhin, dass die Baugrubenwände an den Ecken und gegebenenfalls an den Schmalseiten tiefer zu führen sind als im mittleren Bereich der Längsseiten, sofern die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch an allen Stellen einer rechteckigen Baugrube gleich groß sein soll [3]. Sie verweist hierzu auf das Grundbau-Taschenbuch. Auf das darin [22] enthaltene Verfahren nach McNamee – Harza – Davidenkoff wurde bereits in 2.4.5 eingegangen. Die Berücksichtigung der räumlichen Anströmung findet hier nach [22] derart statt, dass die Strömungskraft durch den Formfaktor f_F dividiert wird. Dieser beträgt für die Mitte langgestreckter Baugruben $f_F = 1,0$, bei runden und für die Mitten kleiner Baugruben $f_F = 0,8$ und für die Eckbereiche $f_F = 0,6$. Dadurch ergibt sich in den Ecken oder bei kleinen Baugruben eine größere erforderliche Einbindetiefe. Auch Knaupe hat die Eckbereiche näher untersucht und gibt ein Eckvertiefungsverhältnis ε_k an. Analog zu der Vorgehensweise nach 2.4.7 unterscheidet er auch hier zwischen schmalen und breiten Baugruben. Die Ermittlung der Eckvertiefungsverhältnisse erfolgt nach Abbildung 7.

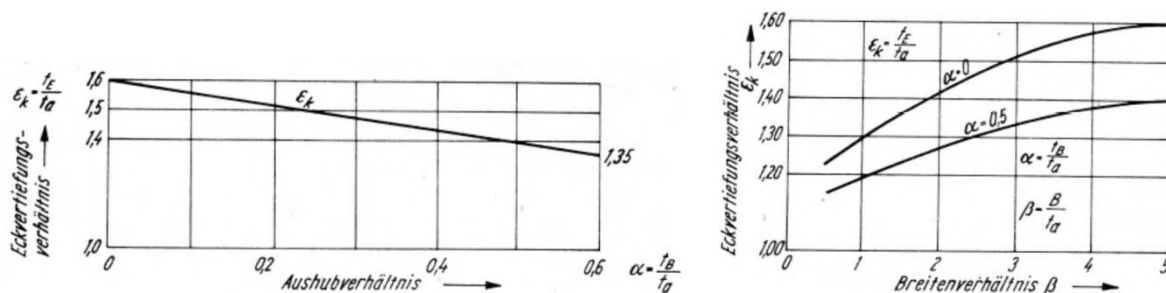
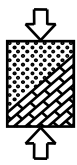


Abbildung 7: Eckvertiefungsverhältnis für breite (links) und für schmale (rechts) Baugruben nach [16]

Darin sind t_a die äußere Einbindetiefe, also $T+H$ gemäß Abbildung 1, und t_e die gesuchte erforderliche äußere Einbindetiefe in der Ecke, also $T_{\text{Ecke}}+H$ gemäß Abbildung 1. Für den Übergangsbereich von der Eckvertiefung zur konstanten Einbindetiefe in Baugrubenmitte schlägt Knaupe eine Neigung von 1:4 oder flacher für breite Baugruben und 1:3 oder flacher für schmale Baugruben vor.

Auch Davidenkoff gibt in [11] Korrekturkoeffizienten ε zur Erhöhung der Einbindetiefe im räumlichen Fall an. Für runde Baugruben schlägt er $\varepsilon = 1,3$ sowie für quadratische Baugruben in der Mitte $\varepsilon = 1,3$ und in der Ecke $\varepsilon = 1,7$ vor. Aussagen zu rechteckigen Baugruben werden von ihm nicht getroffen.

Schmitz gibt in [18] Einbindetiefen für die Ecke und die Mitte sowie im Abstand $1/8$ bzw. $1/4$ von der Baugrubenecke, jeweils bezogen auf die halbe Baugrubenlängsseite, an und schlägt eine sich daraus ergebende Abtrepfung vor. Auf die von den eigenen Untersuchungen abweichenden Voraussetzungen wurde in 2.4.8 bereits hingewiesen.



3 Numerische Berechnungen

Gemäß DIN 1054 ist die Strömungskraft in der Regel durch Auswertung eines Strömungsnetzes und nur in überschaubaren Fällen durch Näherungsverfahren zu ermitteln. Ein Strömungsnetz erhält man neben zeichnerischen Lösungen und Modellversuchen durch 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.

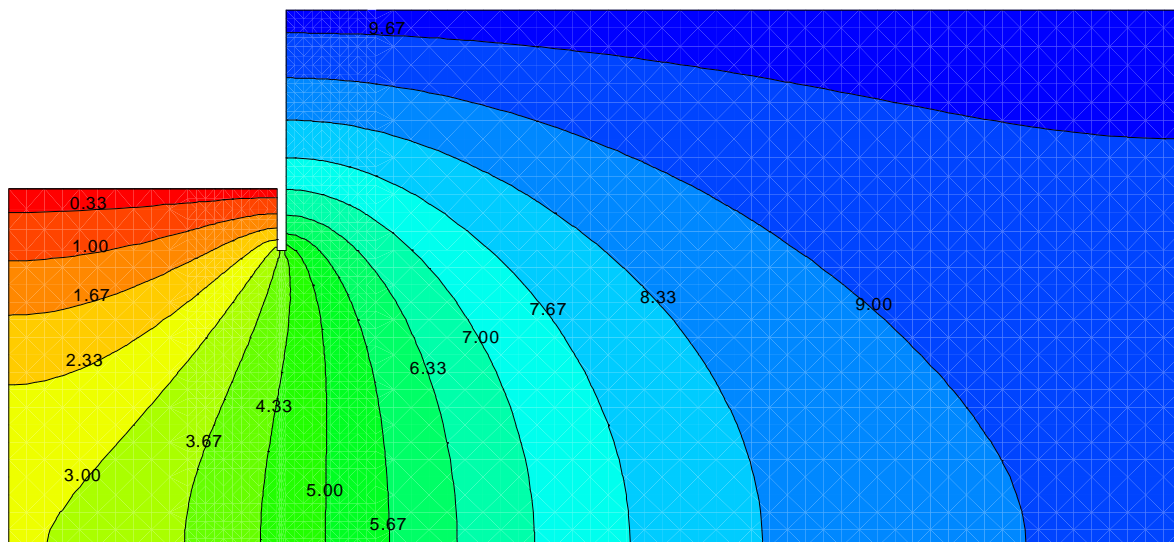
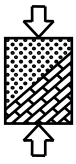


Abbildung 8: Potentialliniennetz berechnet mit GGU-SS-Flow2D

In Abbildung 8 ist beispielhaft ein berechnetes Potentialliniennetz dargestellt. Dabei kann, neben der Darstellung des ganzen Systems, für jeden Netzknoten das Potential einzeln ausgelesen werden und somit eine genaue Auswertung bzw. Ermittlung der Strömungskraft erfolgen.

Die Strömungskraft wird dadurch erhalten, dass zunächst in Höhe des Verbauwandfußes das noch abzubauen Restpotential Δh ermittelt wird. Daraus wird mittels Division durch die Länge $\Delta l = T$ (vgl. Abbildung 1) der hydraulische Gradient erhalten mit dem sich dann gemäß Gleichung (2) die Strömungskraft berechnen lässt. Auf den hierfür und für die anschließende Nachweisführung zugrundegelegten Bodenkörper wird in 3.1.1 noch näher eingegangen.



3.1 Ebene Berechnungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zahlreiche ebene Berechnungen mit dem Ziel durchgeführt, für möglichst viele verschiedene Situationen die erforderliche Einbindetiefe zu ermitteln und daraus Bemessungsdiagramme aufzustellen. Die Berechnungen werden im Folgenden beschrieben und deren Ergebnisse aufgeführt.

3.1.1 Voruntersuchungen zur maßgebenden Bruchkörperbreite

Nach DIN 1054 ist die Strömungskraft in einem Bodenkörper zu betrachten, dessen Breite b in der Regel gleich der halben Einbindetiefe T der Stützwand angenommen werden darf [1].

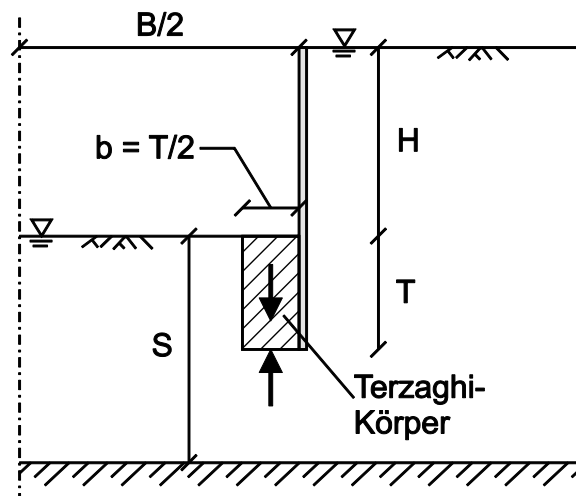


Abbildung 9: Systemskizze mit Bruchkörper nach Terzaghi

Der in der DIN 1054 beschriebene maßgebende Bodenkörper beruht auf Beobachtungen von Terzaghi [20] und ist in Abbildung 9 schraffiert dargestellt. Wenn man jedoch, wie in [1] gefordert, keine Reibungskräfte beim Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ansetzt, so wäre eigentlich ein infinitesimal kleiner Streifen bzw. Stromfaden entlang der Verbauwand maßgebend. Dies beruht auf der Tatsache, dass direkt an der Verbauwand das noch abzubauen Potential und damit auch die Strömungskraft am größten ist (vgl. Abbildung 8). Tatsächlich wirkt aber immer eine Reibungskraft. Diese nimmt mit zunehmender Breite des Bruchkörpers zwar zu, im Verhältnis zu den flächenbezogenen Gewichts- und Strömungskräften jedoch ab. Das ebenfalls günstig wirkende Gewicht des Bodenkörpers nimmt mit zunehmender Breite des Bruchkörpers zu, die ungünstig wirkende Strömungskraft jedoch in stärkerem Maß ab. Aus diesem Grund wurden Voruntersuchungen angestellt, die sich mit der Frage der maßgebenden Bruchkörperbreite befassen. Dabei wurde innerhalb der Scherfuge zwischen Bruchkörper und Boden eine Reibungskraft R_k angesetzt, die aus den Schubspannungen τ infolge der Horizontalspannungen σ_h im Boden resultiert (vgl. Abbildung 10). Diese wiederum wird mit den effektiven Vertikalspannungen über den Erddruckbeiwert K_0 gekoppelt.

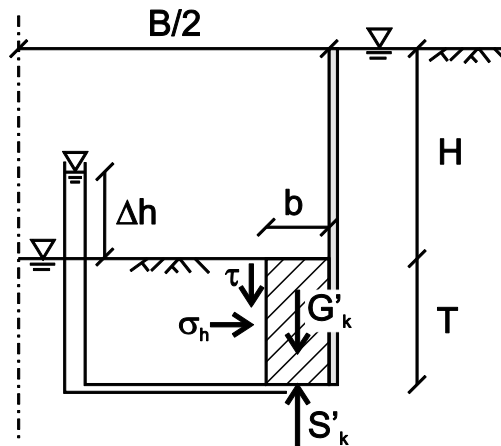
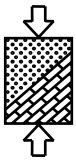


Abbildung 10: Systemskizze mit Spannungen auf den Bodenkörper

Die Schubspannung berechnet sich dabei aus den folgenden Beziehungen (31) bis (34).

$$\sigma'_v(T) = T \cdot \gamma_r - (T + \Delta h) \cdot \gamma_w = T \cdot \gamma' - \Delta h \cdot \gamma_w \quad (31)$$

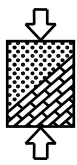
mit: σ'_v Vertikalspannung
 γ_r Wichte des wassergesättigten Bodens

$$\sigma'_h(T) = K_0 \cdot \sigma'_v(T) \quad (32)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (33)$$

mit: K_0 Erdruhedruckbeiwert
 φ Reibungswinkel

$$\tau(T) = \sigma'_h(T) \cdot \tan \varphi \quad (34)$$



Vereinfacht wird angenommen, dass die Reduzierung des noch abzubauenen Restpotentials Δh und damit auch die Schubspannung in vertikaler Richtung linear verläuft. Dann ergibt sich die Reibungskraft zu:

$$R_k = \tau(T) \cdot \frac{T}{2} \quad (35)$$

Die auf den Bruchkörper wirkende Strömungskraft beträgt:

$$S'_k = \gamma_w \cdot \frac{T + \Delta h}{T} \cdot T \cdot b \quad (36)$$

Das Gewicht des Bruchkörpers erhält man aus:

$$G'_k = \gamma' \cdot T \cdot b \quad (37)$$

Für den Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ergibt sich mit Ansatz der Reibung die folgende Grenzzustandsbedingung:

$$S'_k \cdot \gamma_H \leq (G'_k + R_k) \cdot \gamma_{G, stb} \quad (38)$$

Die Überprüfung der maßgebenden Bruchkörperbreite erfolgt über den Ausnutzungsgrad μ . Dieser ergibt sich für den Nachweis nach Gleichung (38) zu:

$$\mu = \frac{S'_k \cdot \gamma_H}{(G'_k + R_k) \cdot \gamma_{G, stb}} = \frac{\gamma_w \cdot \gamma_H \cdot (T + \Delta h) \cdot b}{(\gamma' \cdot T \cdot b + \frac{1}{2} \cdot K_0 \cdot T \cdot (\gamma' \cdot T - \Delta h \cdot \gamma_w) \cdot \tan \varphi) \cdot \gamma_{G, stb}} \quad (39)$$

Je größer der Ausnutzungsgrad ist, umso unsicherer ist ein System. Daraus folgt, dass die maßgebende Bruchkörperbreite diejenige ist, welche den größten Ausnutzungsgrad aufweist.

In der folgenden Abbildung 11 ist der Ausnutzungsgrad für verschiedene Einbindetiefen über der Breite b des betrachteten Bruchkörpers aufgetragen. Den Berechnungen hierfür liegt der Ansatz der Reibung gemäß den zuvor gemachten Ausführungen sowie günstiger Baugrund mit $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ zugrunde.

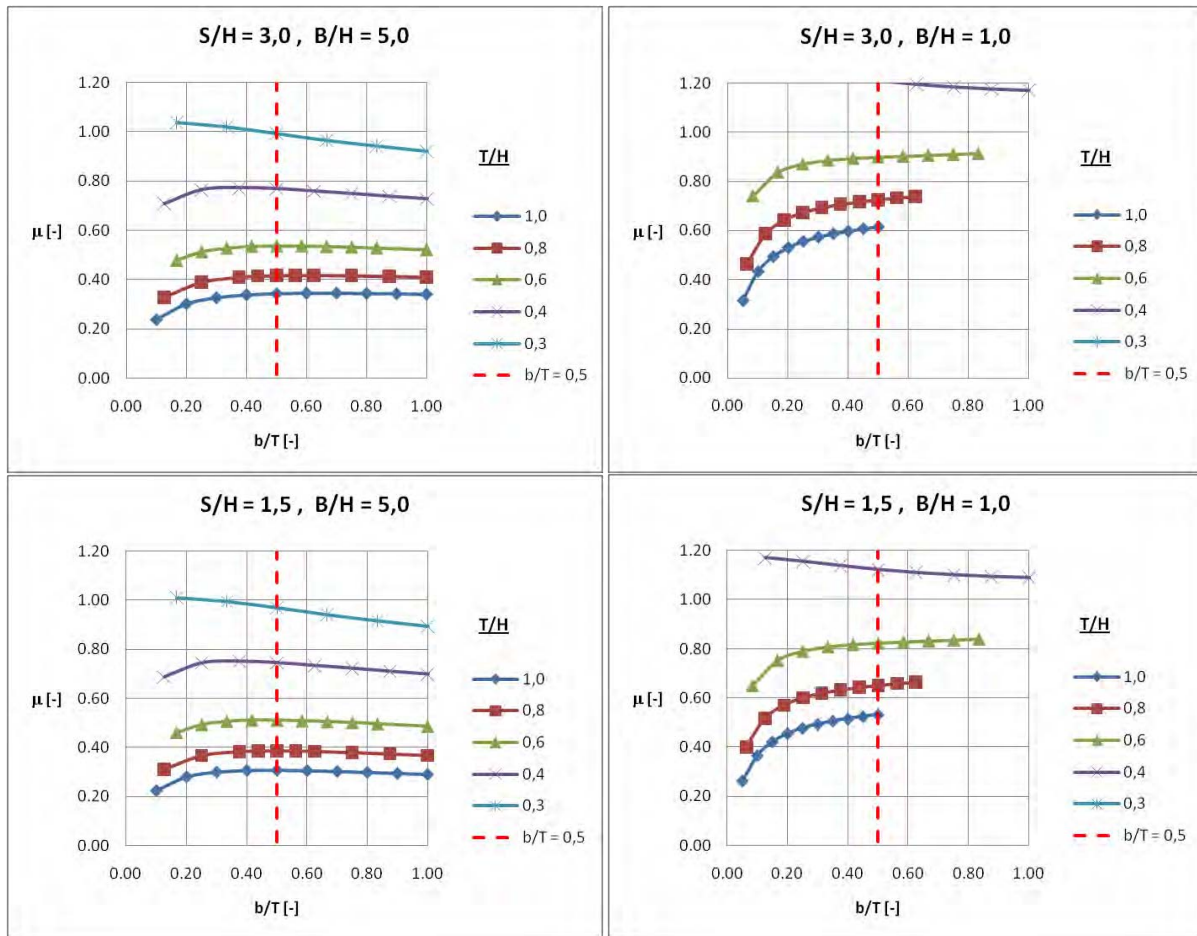
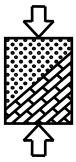
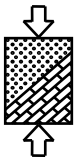


Abbildung 11: Ausnutzungsgrad μ für verschiedene Einbindetiefen T/H über der Breite b/T des betrachteten Körpers bei Ansatz von Reibung für unterschiedliche Baugrubenbreiten B/H und Mächtigkeiten des Grundwasserleiters S/H

Man erkennt, dass der Ausnutzungsgrad bei einer Bruchkörperbreite von $b/T < 0,2$ stark abfällt. Dies liegt darin begründet, dass zwar die volumen- bzw. im ebenen Fall flächenbezogene Strömungskraft ansteigt, der Einfluss der Reibung wegen der verringerten Bruchkörperfläche aber überproportional stärker eingeht. Da die angesetzte Reibung spannungsabhängig ist, gilt dies aber nicht mehr für so geringe Einbindetiefen, bei denen die effektive Wichte gegen Null geht oder gar negativ wird und der Boden dadurch quasi gewichtslos wird. Dies ist jedoch erst dann der Fall, wenn der Ausnutzungsgrad $\mu \geq 1,0$ wird (vgl. Abbildung 11, rechts), was nur bei kleinen Einbindetiefen $T/H < 0,40$ auftritt.

Weiterhin erkennt man, dass die Annahme einer maßgebenden Bruchkörperbreite von $b = T/2$ eine brauchbare Näherung darstellt. Zwar steigt der Ausnutzungsgrad bei den schmalen Baugruben ($B/H = 1,0$) für $b/T > 0,5$ teilweise noch weiter an, jedoch nur noch in sehr geringem Maß. Außerdem nimmt dieser Effekt mit steigendem Ausnutzungsgrad ab, was anhand der Kurven für $T/H = 0,4$ erkennbar ist. Für breite Baugruben ($B/H = 5,0$) liegt das Maximum bei einer etwas geringeren Breite als $b = T/2$, wobei der Wert für $b = T/2$ aber nur geringfügig überschritten wird.



Geht man jedoch davon aus, dass Verbauwände gewissen Verformungen unterliegen und dadurch die Spannungen in horizontaler Richtung erhöht werden, ergäbe sich auch eine entsprechend höhere Reibung. Aus diesem Grund wurde in Abbildung 12 statt K_0 der Beiwert für den passiven Erddruck K_{ph} zugrundegelegt. Es steht außer Frage, dass dieser Ansatz zu günstig ist. Dennoch eignet er sich, um zu zeigen, dass sich das Maximum mit wachsenden Horizontalspannungen zu größeren Werten von b/T verschiebt.

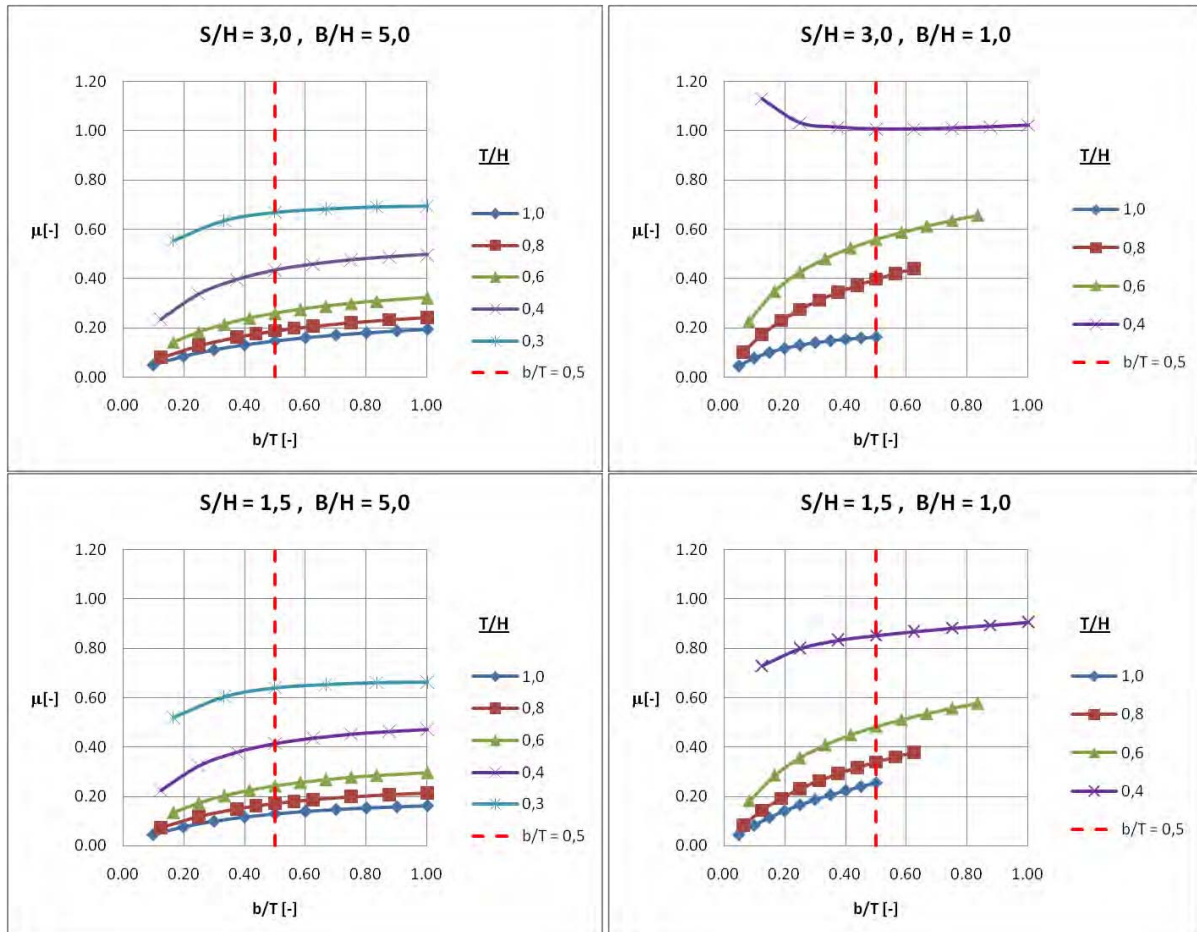
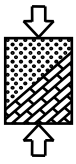


Abbildung 12: Ausnutzungsgrad μ für verschiedene Einbindetiefen T/H über der Breite b/T des betrachteten Körpers bei Ansatz der Reibung mit K_{ph} statt K_0

Die tatsächlichen Horizontalspannungen werden irgendwo zwischen den betrachteten Extremfällen liegen, jedoch wohl näher an den Werten, die für den Erdruhedruckbeiwert K_0 erhalten werden.

Damit bestätigen die Voruntersuchungen die aus Beobachtungen von Terzaghi resultierende maßgebende Breite von $b = T/2$.

Aufgrund dessen wurden alle weiteren ebenen Berechnungen auf einen Körper der Breite $b = T/2$ bezogen.



3.1.2 Voruntersuchungen zur notwendigen Modellbreite

Um eine Beeinflussung der Berechnungen durch die Modellränder auszuschließen, wurden vorab Berechnungen mit unterschiedlich großen Systemen durchgeführt. Die Modellhöhe $H+S$ (vgl. Abbildung 13) ist durch die jeweils vorgegebene Mächtigkeit des Aquifers S gegeben ebenso wie aus Symmetriegründen die Breite der linken Modelhälfte durch die halbe Breite der Baugrube $B/2$ festgelegt ist. Nicht bekannt ist jedoch zunächst, wie breit die rechte Modelhälfte sein muss, um eine Beeinflussung durch den Rand zu vermeiden.

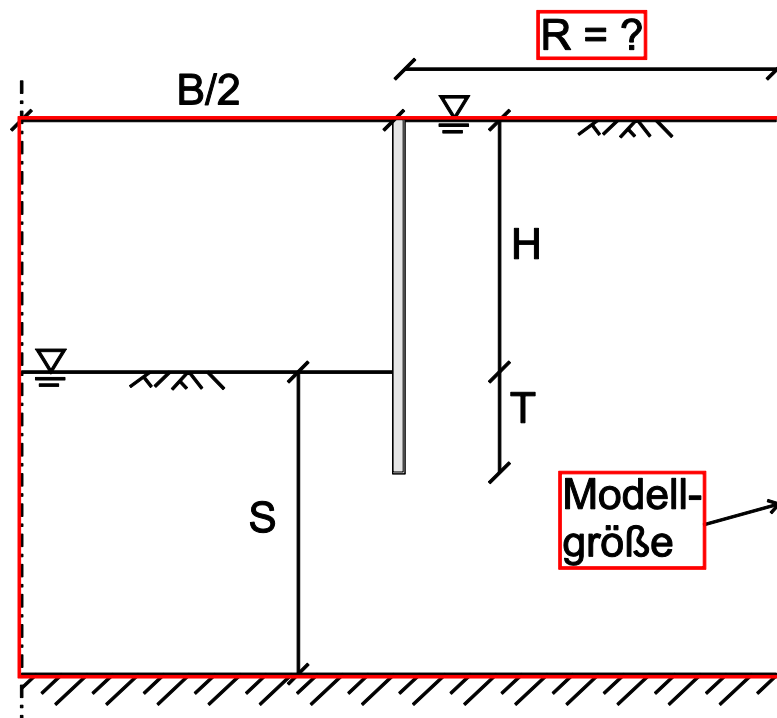


Abbildung 13: Modellgröße des Berechnungssystem

Daher wurden die Breite der rechten Modelhälfte R variiert und für eine feste Einbindetiefe die zugehörigen Ausnutzungsgrade ermittelt. In Abbildung 14 sind die Ergebnisse dieser Berechnungen dargestellt.

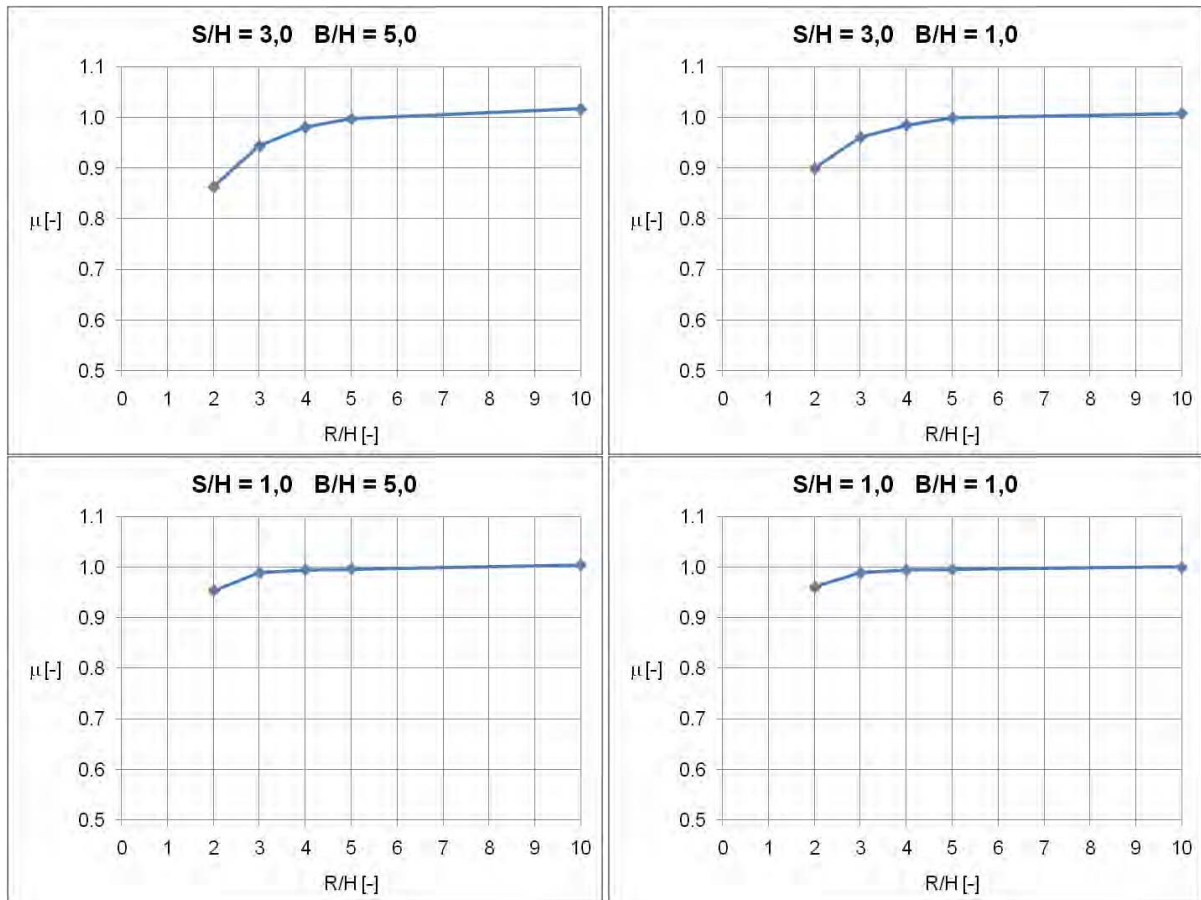
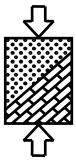
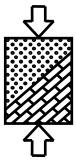


Abbildung 14: Ausnutzungsgrad für verschieden große Berechnungsmodelle

Man erkennt, dass sich der Ausnutzungsgrad für mächtige Grundwasserleiter ($S/H = 3,0$) ab einem Verhältnis von $R/H \geq 5,0$ kaum noch ändert. Für geringmächtige Grundwasserleiter gilt dies sogar bereits ab $R/H \geq 3,0$.

Aufgrund dieser Erkenntnis wurden alle weiteren Berechnungen mit einer Breite der rechten Modellhälfte von $R/H = 5,0$ ausgeführt.



3.1.3 Voruntersuchung zum Einfluss der Verbauwanddicke

Bei sämtlichen Untersuchungen werden die Größen B , S und T auf die Wasserspiegeldifferenz H bezogen, um so eine dimensionslose Auswertung zu ermöglichen. Die Wasserspiegeldifferenz in den Berechnungsmodellen beträgt dabei $H = 10$ m und die Verbauwanddicke $d = 0,5$ m, was einer schmalen Schlitzwand entspricht. Vorab galt es jedoch, den Einfluss der Dicke der Verbauwand zu untersuchen. Hierzu wurden verschiedene Berechnungen angestellt, bei denen d im Bereich von $0,03 \leq d/H \leq 0,07$ variiert wurde. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

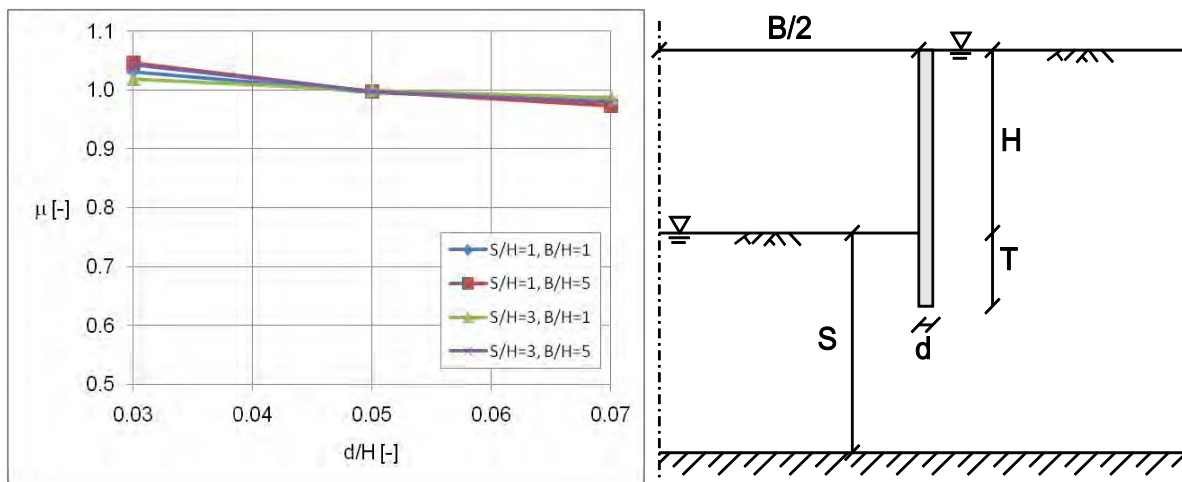
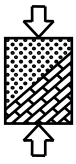


Abbildung 15: Ausnutzungsgrad für verschiedene Verhältnisse d/H

Anhand von Abbildung 15 erkennt man, dass sich für die verschiedenen Dicken d geringfügig unterschiedliche Ausnutzungsgrade ergeben. Dies liegt darin begründet, dass mit größerem d/H mehr Potentialabbau unterhalb der Verbauwand aufgrund des horizontal verlängerten Sickerweges stattfindet und daher weniger Potential auf der vertikalen Strecke T innerhalb der Baugrube abgebaut werden muss. Dies hat zur Folge, dass der Ausnutzungsgrad bei vorgegebener Einbindetiefe T und bei einer im Verhältnis zu H dickeren Verbauwand kleiner, bei einer im Verhältnis zu H schmalen Verbauwand größer wird. Für Schlitzwände liegen damit die Untersuchungsergebnisse auf der sicheren Seite, da in der Regel das Verhältnis $d/H > 0,05$ ist. Auf der anderen Seite wäre bei Spundwänden gegebenenfalls ein kleiner Sicherheitszuschlag zu berücksichtigen. Wie man jedoch sieht, ist der Einfluss der Verbauwanddicke eher von untergeordneter Bedeutung.

Alle folgenden Untersuchungen gelten für $H = 10$ m und $d = 0,5$ m und weisen damit ein Verhältnis von $d/H = 0,05$ auf.



3.1.4 Bestimmung der maßgebenden Einbindetiefe

Wie bereits erwähnt ist es Ziel des Vorhabens für möglichst viele Situationen die erforderliche Einbindetiefe zu ermitteln und in Form von Bemessungsdiagrammen aufzubereiten. Hierfür wurde die Breite der Baugrube B und die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht S variiert. Der untersuchte Wertebereich kann Tabelle 2 entnommen werden.

S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	x	x	x	x	x	x
0,50	x	x	x	x	x	x
0,75	x	x	x	x	x	x
1,00	x	x	x	x	x	x
1,50	x	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x	x
3,00	x	x	x	x	x	x
5,00	x	x	x	x	x	x

Tabelle 2: Wertebereich der ebenen Berechnungen

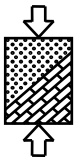
Weiterhin wurden sowohl die Wichte variiert, als auch zum einen günstiger und zum anderen ungünstiger Baugrund mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten angesetzt. Dadurch ergeben sich gemäß Tabelle 3 insgesamt 8 verschiedene Baugrundsituationen.

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 3: Untersuchte Wichtenverhältnisse

Die Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe T erfolgte für jedes der Systeme iterativ. Dabei wurde jedes System mit einer ersten geschätzten Einbindetiefe berechnet und analog zu 3.1.1 der Ausnutzungsgrad ermittelt. Allerdings wurde dabei, im Gegensatz zur Vorgehensweise bei den Voruntersuchungen zur Bruchkörperbreite, entsprechend DIN 1054 keine Reibung angesetzt. Der Ausnutzungsgrad ergibt sich dann zu:

$$\mu = \frac{S'_k \cdot \gamma_H}{G'_k \cdot \gamma_{G, \text{stb}}} \quad (40)$$



Je nach Ausnutzungsgrad wurde die Einbindetiefe verringert oder vergrößert und das System neu berechnet. Dieser Vorgang wurde jeweils so oft wiederholt, bis der Ausnutzungsgrad $\mu = 1,0$ betrug. Die so ermittelte Einbindetiefe entspricht der nach DIN 1054 erforderlichen Mindesteinbindetiefe, um die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch nachzuweisen.

Auf diesem Weg ergeben sich die in den folgenden Tabellen enthaltenen auf die Wasserspiegeldifferenz bezogenen Einbindetiefen T/H für günstigen Baugrund und unterschiedliche Wichten.

Einbindetiefe T/H (günstig, $\gamma'/\gamma_w=1,2$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,475	0,800	0,870	0,885	0,890	0,897
0,50	0,398	0,612	0,675	0,700	0,720	0,725
0,75	0,331	0,477	0,540	0,565	0,585	0,590
1,00	0,301	0,395	0,450	0,475	0,490	0,500
1,50	0,281	0,325	0,360	0,385	0,395	0,403
2,00	0,277	0,298	0,322	0,340	0,352	0,357
3,00	0,275	0,283	0,292	0,302	0,311	0,315
5,00	0,275	0,280	0,281	0,285	0,285	0,287

Tabelle 4: a) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,2$

Einbindetiefe T/H (günstig, $\gamma'/\gamma_w=1,1$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,483	0,867	0,962	0,984	0,992	1,000
0,50	0,431	0,685	0,770	0,805	0,815	0,825
0,75	0,366	0,541	0,620	0,656	0,670	0,680
1,00	0,330	0,450	0,520	0,555	0,570	0,579
1,50	0,311	0,370	0,415	0,442	0,457	0,470
2,00	0,304	0,335	0,366	0,387	0,400	0,410
3,00	0,303	0,317	0,330	0,341	0,353	0,360
5,00	0,303	0,314	0,316	0,320	0,321	0,325

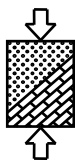
b) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,1$

Einbindetiefe T/H (günstig, $\gamma'/\gamma_w=1,0$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,486	0,920	1,065	1,095	1,105	1,115
0,50	0,442	0,755	0,870	0,910	0,930	0,938
0,75	0,395	0,610	0,710	0,750	0,780	0,790
1,00	0,367	0,510	0,600	0,635	0,660	0,675
1,50	0,340	0,415	0,470	0,507	0,525	0,537
2,00	0,335	0,380	0,415	0,443	0,460	0,470
3,00	0,333	0,360	0,375	0,390	0,400	0,412
5,00	0,332	0,355	0,357	0,360	0,365	0,370

Tabelle 5: a) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,0$

Einbindetiefe T/H (günstig, $\gamma'/\gamma_w=0,9$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,490	0,957	1,200	1,240	1,250	1,260
0,50	0,462	0,828	0,990	1,045	1,070	1,075
0,75	0,423	0,690	0,825	0,880	0,910	0,915
1,00	0,398	0,585	0,695	0,750	0,780	0,800
1,50	0,380	0,480	0,555	0,600	0,625	0,635
2,00	0,375	0,432	0,480	0,515	0,550	0,556
3,00	0,375	0,408	0,430	0,450	0,475	0,475
5,00	0,375	0,403	0,407	0,415	0,420	0,420

b) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 0,9$



Die vier nachfolgenden Tabellen enthalten die entsprechenden Werte T/H für ungünstigen Baugrund.

Einbindetiefe T/H (ungünstig, $\gamma'/\gamma_w=1,2$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,487	0,930	1,100	1,130	1,140	1,150
0,50	0,448	0,770	0,900	0,935	0,955	0,970
0,75	0,405	0,630	0,735	0,780	0,800	0,820
1,00	0,375	0,530	0,620	0,660	0,685	0,700
1,50	0,356	0,430	0,490	0,525	0,545	0,560
2,00	0,344	0,395	0,430	0,460	0,480	0,490
3,00	0,342	0,370	0,385	0,405	0,415	0,425
5,00	0,342	0,365	0,370	0,373	0,377	0,380

Tabelle 6: a) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,2$

Einbindetiefe T/H (ungünstig, $\gamma'/\gamma_w=1,1$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,490	0,960	1,210	1,250	1,265	1,270
0,50	0,462	0,830	1,000	1,050	1,070	1,080
0,75	0,423	0,695	0,830	0,890	0,915	0,930
1,00	0,400	0,590	0,700	0,760	0,790	0,800
1,50	0,382	0,480	0,560	0,600	0,625	0,640
2,00	0,378	0,440	0,485	0,520	0,540	0,560
3,00	0,377	0,410	0,435	0,455	0,470	0,480
5,00	0,377	0,405	0,410	0,415	0,420	0,425

b) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,1$

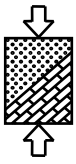
Einbindetiefe T/H (ungünstig, $\gamma'/\gamma_w=1,0$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,492	0,976	1,320	1,390	1,410	1,420
0,50	0,473	0,887	1,110	1,185	1,210	1,230
0,75	0,445	0,765	0,940	1,010	1,050	1,070
1,00	0,425	0,660	0,800	0,870	0,910	0,930
1,50	0,408	0,540	0,635	0,690	0,725	0,745
2,00	0,405	0,495	0,550	0,600	0,625	0,640
3,00	0,404	0,465	0,490	0,515	0,530	0,550
5,00	0,404	0,455	0,465	0,470	0,480	0,485

Tabelle 7: a) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,0$

Einbindetiefe T/H (ungünstig, $\gamma'/\gamma_w=0,9$)						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,494	0,985	1,415	1,560	1,590	1,595
0,50	0,481	0,930	1,230	1,340	1,380	1,400
0,75	0,463	0,830	1,060	1,160	1,210	1,230
1,00	0,447	0,735	0,920	1,020	1,060	1,090
1,50	0,435	0,610	0,730	0,810	0,845	0,870
2,00	0,431	0,560	0,635	0,695	0,730	0,750
3,00	0,430	0,520	0,560	0,590	0,615	0,620
5,00	0,430	0,515	0,525	0,535	0,545	0,555

b) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 0,9$

Die Aufbereitung der so erhaltenen Ergebnisse folgt in 4.1.



3.2 Räumliche Berechnungen

Neben den vorab beschriebenen zahlreichen ebenen Berechnungen wurden auch umfangreiche räumliche Berechnungen durchgeführt. Eine entsprechende Systemskizze zeigt Abbildung 16.

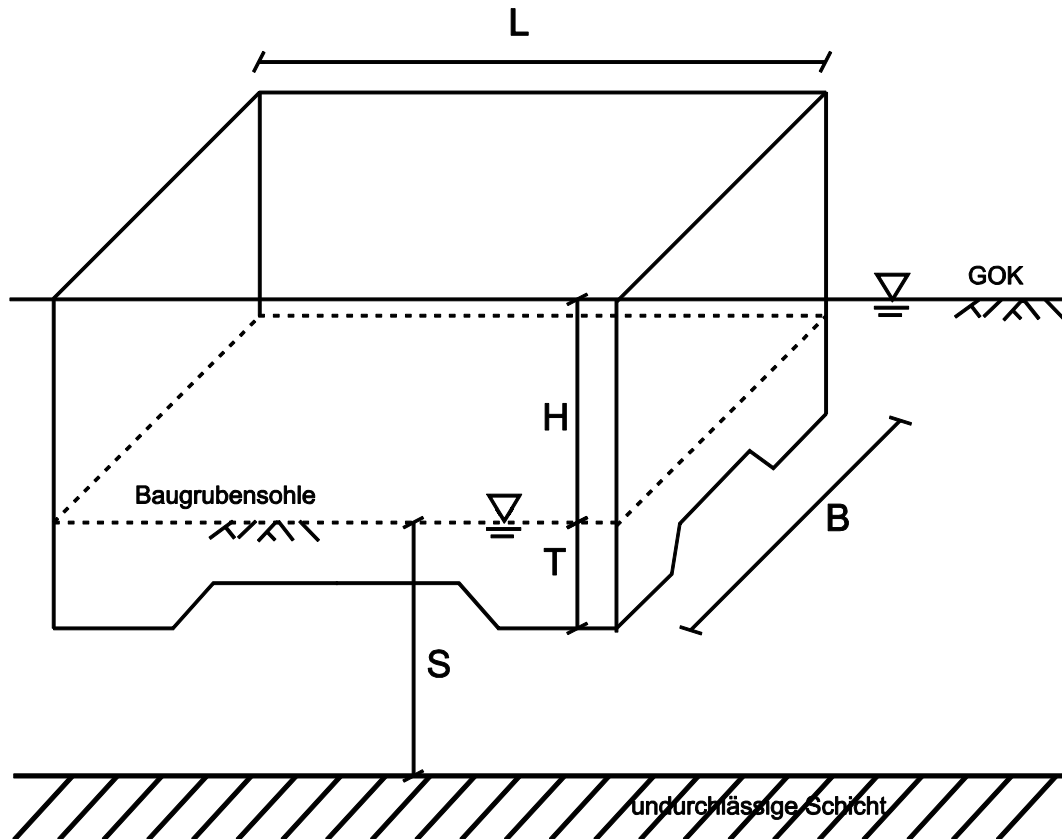


Abbildung 16: Systemskizze für den räumlichen Fall

Die Bezeichnungen im räumlichen Fall entsprechen denen im ebenen Fall (vgl. Abbildung 1). Zusätzlich kommt jedoch die Länge der Baugrube L als weitere zu variierende Größe hinzu. Die in Abbildung 16 angedachte Abtreppung des Verbaus wurde in den folgenden Berechnungen zunächst noch nicht in Ansatz gebracht.

Die Notwendigkeit räumlicher Berechnungen ergibt sich daraus, dass es in den Ecken von Baugruben aufgrund der räumlichen Anströmung zu einem größeren Potentialabbau und damit zu einer erhöhten Strömungskraft kommt. Dies wird anhand von Abbildung 17 deutlich. Dargestellt ist die Potentialverteilung in einem Schnitt entlang einer Verbauwand im Inneren der Baugrube für eine konstante Einbindetiefe.

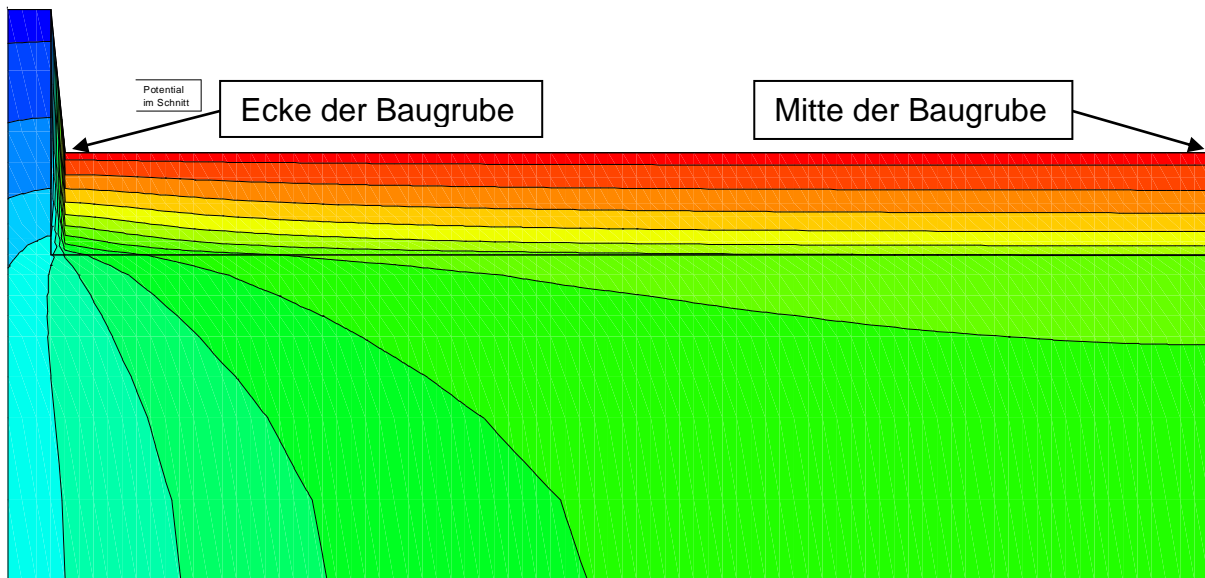
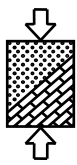
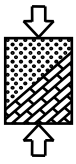


Abbildung 17: Potentiale im Schnitt entlang der Verbauwand auf der Baugrubeninnenseite

Man erkennt, dass es im Eckbereich zu einer Verdichtung bzw. Erhöhung der Anzahl der Potentiallinien kommt. Dies wiederum ist gleichbedeutend mit der oben genannten Vergrößerung der Strömungskraft.

Analog zu den ebenen Berechnungen waren auch für den räumlichen Fall Voruntersuchungen notwendig. Bezüglich des Modellrandes und des Maßstabeffektes bzw. des Einflusses der Verbauwanddicke wurden jedoch keine weiteren Berechnungen durchgeführt, da es keinen Grund zu der Annahme gab, dass die in 3.1.2 und 3.1.3 vorgestellten Ergebnisse nicht auch für den räumlichen Fall gültig sein sollten.



3.2.1 Voruntersuchungen zur maßgebenden Bruchkörperbreite und -form

Bei der Untersuchung des maßgebenden Bruchkörpers im räumlichen Fall stellt sich nicht nur die Frage nach der maßgebenden Bruchkörperbreite b , sondern auch nach der maßgebenden Bruchkörperform in den Baugrubenecken.

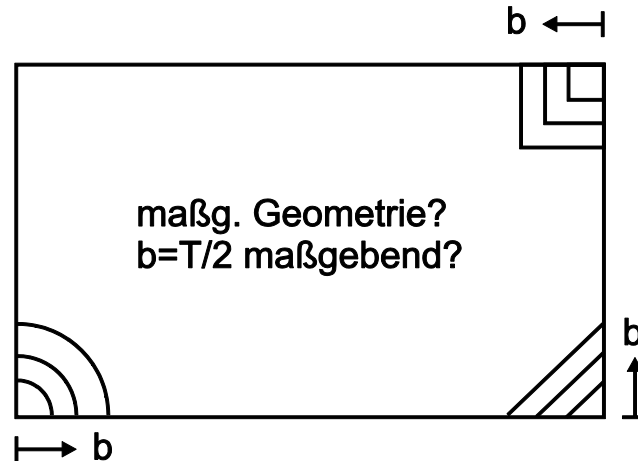


Abbildung 18: Maßgebender Bruchkörper im räumlichen Fall (Grundriss)

Gemäß Abbildung 18 wurden Viertelkreise, Quadrate und Dreiecke unterschiedlicher Kantenlänge im Grundriss untersucht. Die Vorgehensweise entspricht der im ebenen Fall nach 3.1.1. Der Ansatz der Reibungskraft erfolgt hierbei jeweils in der bzw. beim Quadrat in den Boden-Boden-Fugen und die Ermittlung des Ausnutzungsgrades ist nicht auf eine Fläche im Schnitt, sondern auf das Volumen des betrachteten Körpers zu beziehen.

In Abbildung 19 sind die Ausnutzungsgrade für verschiedene Bruchkörper bei einer quadratischen Baugrube - $B/L = 1,0$ - aufgetragen, in Abbildung 20 die Ausnutzungsgrade bei einer langgestreckten Baugrube - $B/L = 0,1$. Weitere Diagramme für etwa $B/L = 0,5$ sowie für andere Werte von B/H und S/H sind im Anhang enthalten. Zur besseren Übersichtlichkeit sind hier nicht wie im ebenen Fall die Ergebnisse für mehrere, sondern je System nur für diejenige Einbindetiefe dargestellt, bei welcher der maximale Ausnutzungsgrad etwa $\mu \approx 1,0$ beträgt.

Analog zu den Voruntersuchungen im ebenen Fall gelten die Diagramme für günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$.

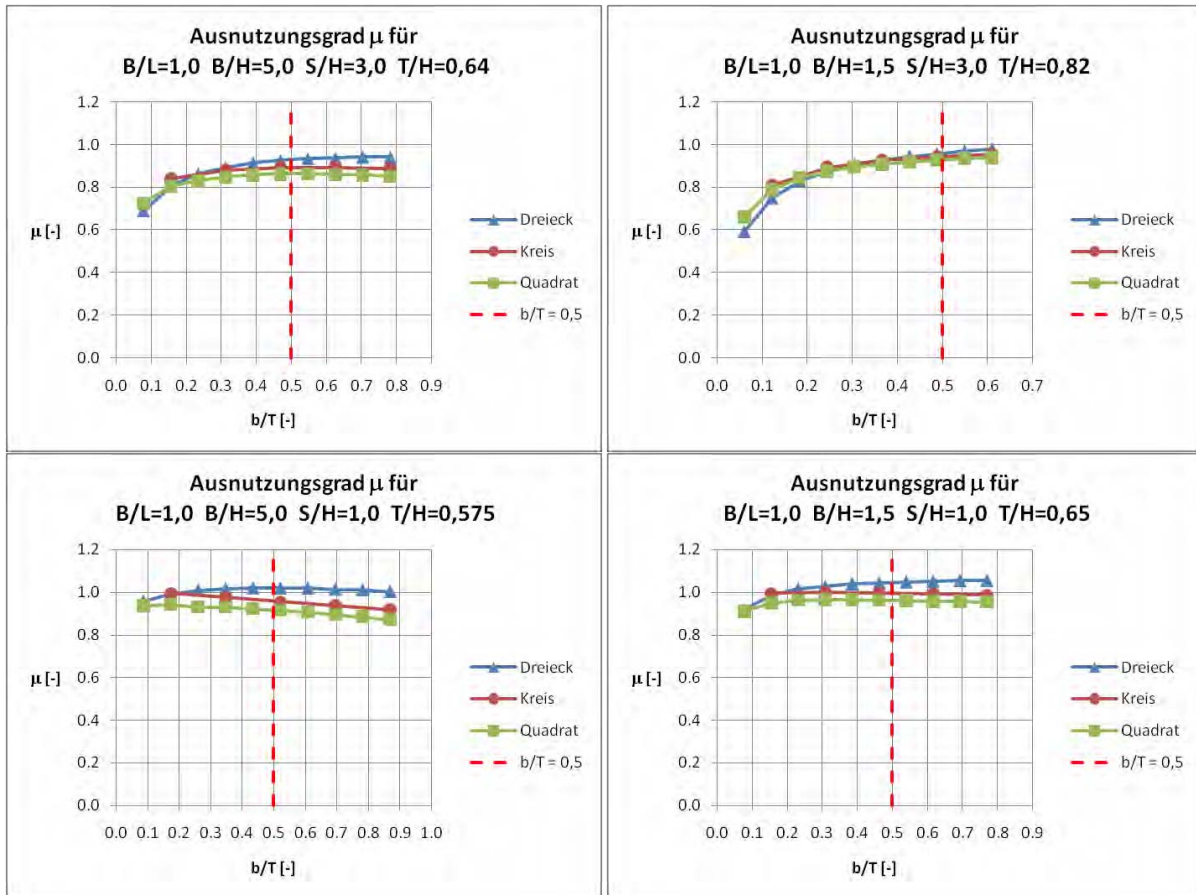
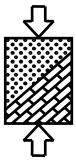


Abbildung 19: Ausnutzungsgrad für verschieden breite Körper unterschiedlicher Form bei quadratischen Baugruben

Man erkennt zunächst, dass die Verläufe der Ausnutzungsgrade denen im ebenen Fall sehr ähnlich sind. Weiterhin wird deutlich, dass die maßgebende Bruchkörperform das Dreieck ist, da hier die Ausnutzungsgrade am größten sind. Bezüglich der Kantenlänge zeigt sich auch im räumlichen Fall, dass der Ansatz von $b = 0,5 \cdot T$ zutreffend ist.

Dies gilt auch für langgestreckte Baugruben wie Abbildung 20 zeigt.

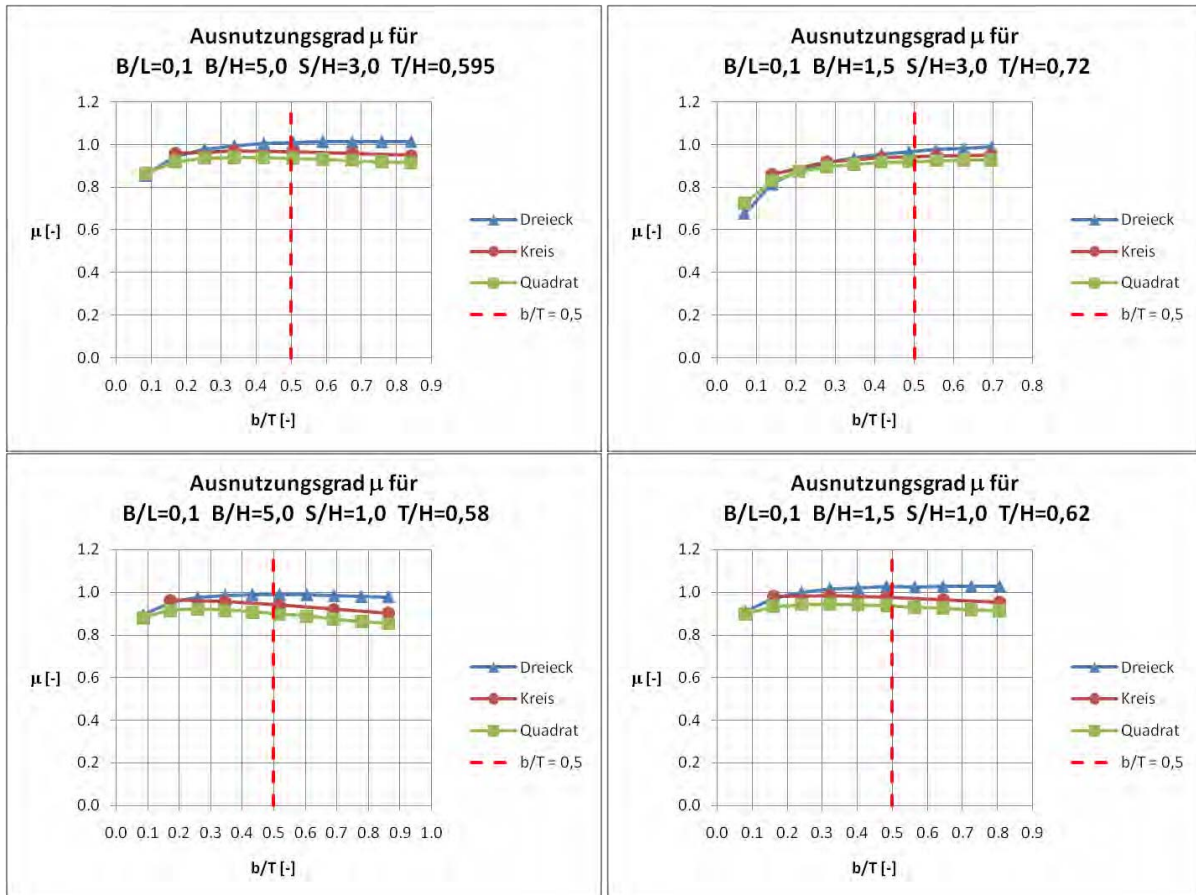
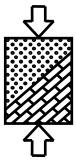
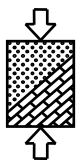


Abbildung 20: Ausnutzungsgrad für verschieden breite Bruchkörper unterschiedlicher Form bei langgestreckten Baugruben

Aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen wurde allen räumlichen Berechnungen sowie Bemessungsdiagrammen ein im Grundriss dreieckiger Bruchkörper zugrundegelegt, dessen Kathetenlänge $b = 0,5 \cdot T$ beträgt.



3.2.2 Bestimmung der maßgebenden Einbindetiefe

Analog zum ebenen Fall wurden auch im räumlichen Fall die Breite der Baugrube B sowie die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht S variiert. Der Wertebereich der Untersuchungen geht aus Tabelle 8 hervor.

B/L	0,3 / 0,5 / 1,0				
S/H	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
B/H	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	x	x	x	x	x
0,50	x	x	x	x	x
1,00	x	x	x	x	x
1,50	x	x	x	x	x
2,00	x	x	x	x	x
3,00	x	x	x	x	x
5,00	x	x	x	x	x

Tabelle 8: Wertebereich 3D-Berechnungen

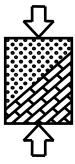
Alle Ergebnisdarstellungen erfolgen auch hier dimensionslos, indem sämtliche Größen auf die Wasserspiegeldifferenz H bezogen werden.

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. Für die Baugrube als Ganzes bedeutet dies, dass bei Ansatz einer konstanten Einbindetiefe das System mit der Einbindetiefe für die Ecke sicher und mit der Einbindetiefe an den Seiten, zumindest in den Ecken unsicher ist. Auf die sich daraus ergebende Konsequenz, bei der Ausführung eine Abtreppung der Einbindetiefe vorzunehmen, wird in 4.3 noch eingegangen.

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

Bei der quadratischen Baugrube mit $B/L = 1,0$ entfällt die Unterscheidung zwischen Stirn- und Längsseite, so dass hierfür nur zwei Einbindetiefen je Kombination aus B/H und S/H zu ermitteln waren.



In den folgenden Tabellen sind die berechneten Werte für T/H im räumlichen Fall enthalten.

Einbindetiefe Ecke T/H mit B/L = 1,0						Einbindetiefe Stirn- gleich Längsseite T/H					
S/H B/H	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	S/H B/H	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	*)	1,130	1,140	1,143	1,147	0,25	*)	Entspricht			
0,50	*)	1,051	1,068	1,070	1,073	0,50	*)	Einbindetiefe T/H _{Ecke}			
1,00	*)	0,949	0,990	1,001	1,004	1,00	*)	0,848	0,883	0,895	0,901
1,50	0,776	0,860	0,897	0,921	0,926	1,50	0,586	0,706	0,749	0,764	0,776
2,00	0,723	0,796	0,835	0,857	0,869	2,00	0,492	0,584	0,630	0,649	0,659
3,00	0,688	0,731	0,763	0,783	0,794	3,00	0,390	0,451	0,493	0,517	0,531
5,00	0,673	0,697	0,710	0,720	0,730	5,00	0,333	0,361	0,384	0,408	0,415

*) Einbindung sinnvollerweise bis in Wasserstauer

Tabelle 9: Einbindetiefe für quadratische Baugruben

a) B/L = 1,0 (Ecke)

b) B/L = 1,0 (Stirn- und Längsseite)

Bei geringmächtiger wasserführender Schicht ($S/H = 1,0$) und sehr schmalen Baugruben ($B/H < 1,5$) erreicht die Einbindetiefe T Werte, welche annähernd der Mächtigkeit S entsprechen. In diesem Fall ist die Verbauwand sinnvoller Weise bis in den Grundwasserstauer einbinden zu lassen und so die Gefahr eines hydraulischen Grundbruchs zu verhindern. Daher wurde für diese Fälle auf die Ermittlung der erforderlichen Tiefe verzichtet (vgl. Tabelle 9). Weshalb die Einbindetiefen in den oberen Zeilen der Tabelle 9 b) den Einbindetiefen der Ecke entsprechen, wird im Folgenden noch erläutert.

Bei sehr schmalen Baugruben ($B/H < 1,0$) überschreitet die Kantenlänge T/2 des nach den Voruntersuchungen anzusetzenden Bruchkörpers die halbe Baugrubenbreite B/2 (vgl. Abbildung 21). Die losgelöste Betrachtung einer einzelnen Ecke ist daher nicht mehr möglich und es wird in diesen Fällen ein quadratischer Bruchkörper der Breite B/2 angesetzt. Bei quadratischen Baugruben ist dies gleichbedeutend mit einer Betrachtung der gesamten Baugrube, bei langgestreckten Baugruben mit einer Betrachtung eines Streifens der Breite B/2 an den Stirnseiten.

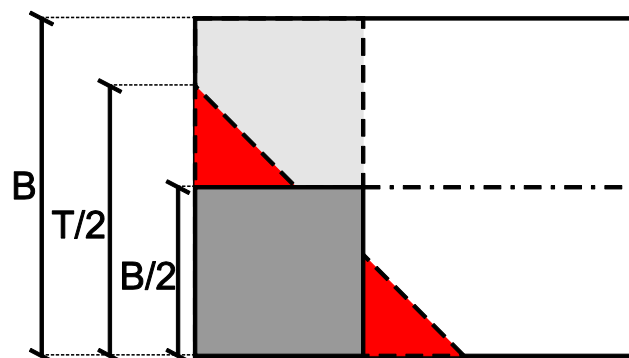
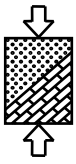


Abbildung 21: Bruchkörper bei sehr schmalen Baugruben



3.3 Vergleichs- und Kontrollrechnungen

Die Berechnungen der erforderlichen Einbindetiefen erfolgten am Lehrstuhl für Geotechnik der RWTH Aachen mit den Programmen GGU-SS-Flow2D und GGU-SS-Flow3D und bei der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG mit dem Programm Sofistik-Hydra. Zur Überprüfung der erhaltenen Ergebnisse bzw. Einbindetiefen wurden durch die jeweils andere forschende Stelle stichprobenartig Kontrollrechnungen durchgeführt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass damit auch gleichzeitig der Nachweis erbracht werden kann, dass die Ergebnisse programmunabhängig sind.

3.3.1 Vergleichsrechnung

Da die verschiedenen Programme unterschiedliche Möglichkeiten der Netzdiskretisierung aufweisen, wurde vorab ein nicht nur bezüglich der geometrischen Abmessungen, sondern auch bezüglich des Netzes möglichst identisches System berechnet. Die Randbedingungen können Tabelle 13 entnommen werden.

	Sofistik	GGU		Sofistik	GGU
B/L	0,5	0,5	System:		
B/H	1,0	1,0	Breite	125,0	128,0
S/H	2,0	2,0	Länge	150,0	152,0
T/H	0,8	0,8	Baugrube:		
H	10,0	10,0	Breite	10,0	10,0
Elemente:			Länge	20,0	20,0
max. Breite	4,0	4,0	Wandbreite	0,5	0,5

Tabelle 13: Randbedingungen für Vergleichsrechnung GGU und Sofistik

Darin sind sowohl die Abmessungen der Baugrube und der Verbauwand als auch die Größe des gesamten Modells bzw. Systems enthalten.

Innerhalb des Programms Sofistik erfolgt die Netzeinteilung automatisch, während in GGU die Verfeinerung händisch vorzunehmen ist. Welche Unterschiede zwischen den Netzen bestehen zeigt Abbildung 22.

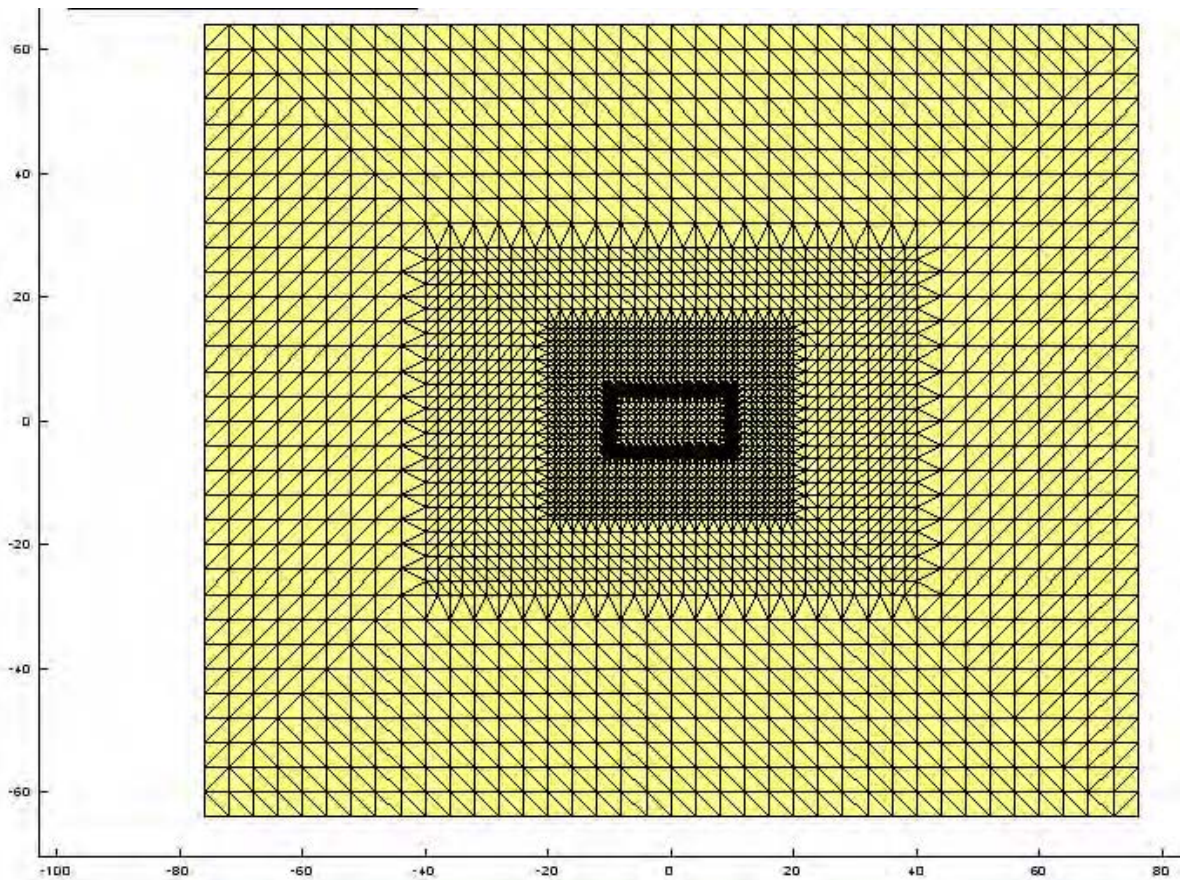
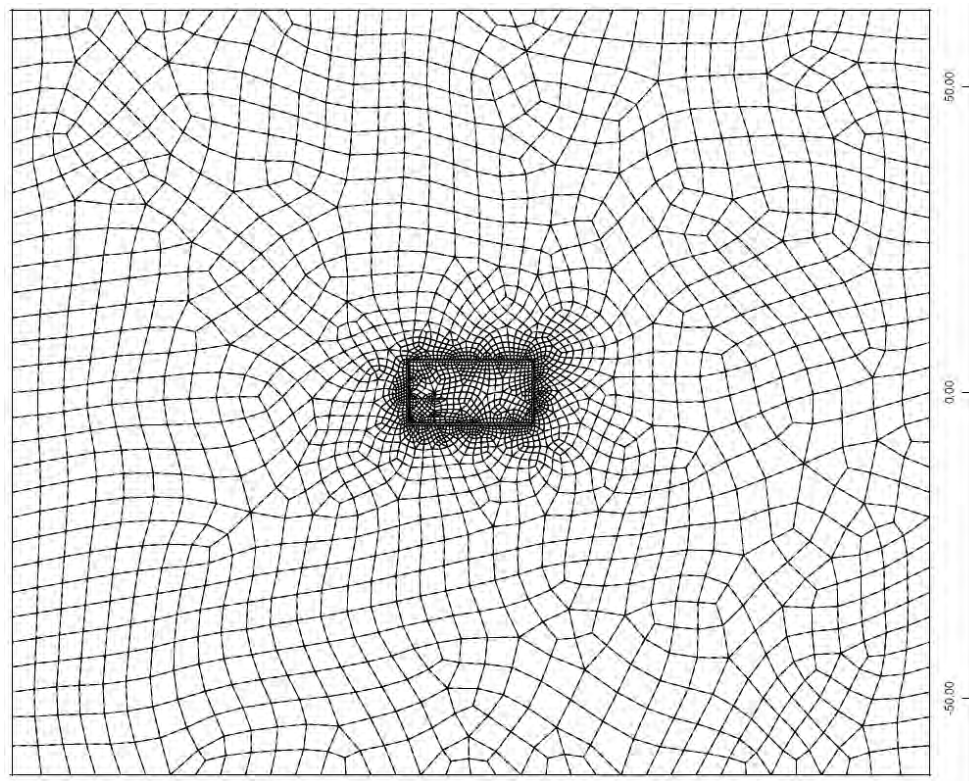
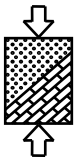
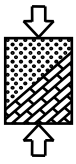


Abbildung 22: FE-Netz im Grundriss in Sofistik (oben) und in GGU (unten)



Zum Vergleich der beiden Berechnungen wurden die Potentiale an den in Abbildung 23 markierten Stellen gegenübergestellt.

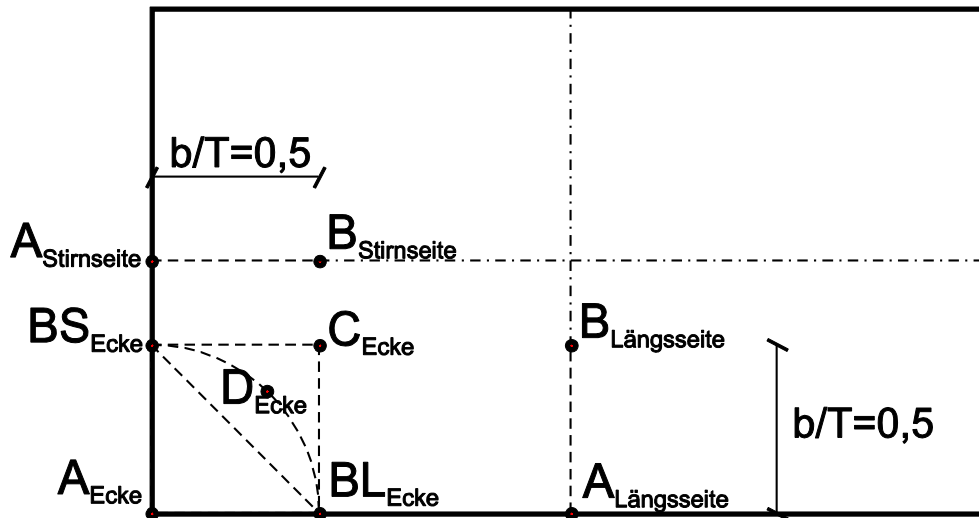


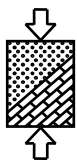
Abbildung 23: Punkte für Vergleich der Potentiale nach GGU und Sofistik

Die Vergleichsrechnung hat gezeigt, dass bei nahezu identischem System mit beiden Programmen die gleichen Ergebnisse erhalten werden.

Vergleichs- punkte	Sofistik	GGU	GGU - Sofistik	
	Potential		Differenz	Abweichung
Ecke:	[m]		[m]	[%]
A	7,859	7,905	0,046	0,59
BL	6,946	6,960	0,014	0,20
BS	7,084	7,095	0,011	0,16
C	5,933	5,930	-0,003	-0,05
D	6,186	/	/	/
Längsseite:				
A	6,713	6,730	0,017	0,25
B	5,651	5,650	-0,001	-0,02
Stirnseite:				
A	7,008	7,075	0,067	0,96
B	5,899	5,910	0,011	0,19

Abbildung 24: Vergleich der Ergebnisse mit GGU und Sofistik

Nach Abbildung 24 liegt die Abweichung der mit den beiden Programmen ermittelten Potentiale an den betrachteten Stellen stets unter 1 %. Für die weiteren Kontrollrechnungen bedeutete dies, dass eventuelle Abweichungen bei den nachfolgend noch vorgestellten Ergebnissen nicht auf der Nutzung unterschiedlicher Programme beruhen, sondern in Unterschieden bei der Modellerstellung begründet sind.



3.3.2 Kontrollrechnungen für den ebenen Fall

Die ebenen Berechnungen wurden am Lehrstuhl für Geotechnik durchgeführt und durch die Wayss & Freytag Ingenieurbau AG kontrolliert. Die Kontrolle erfolgte dabei dermaßen, dass für die mit GGU ermittelten erforderlichen Einbindetiefen das entsprechende System in Sofistik berechnet und der Ausnutzungsgrad ermittelt wurde. Dieser sollte möglichst $\mu \approx 1,0$ betragen.

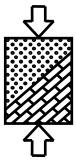
μ		günstig, $\gamma'/\gamma_w = 0,9$						μ		günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,0$					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25								0,25							
0,50		1,03					1,01	0,50		1,03					1,01
0,75								0,75							
1,00		1,00					1,01	1,00		1,00					1,01
1,50								1,50							
2,00				1,01				2,00				1,01			
3,00								3,00							
5,00		0,98					1,02	5,00		1,00					1,01

μ		günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,1$						μ		günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,2$					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25								0,25							
0,50		0,99					1,01	0,50		1,02					1,01
0,75								0,75							
1,00		1,01					1,02	1,00		1,00					1,02
1,50								1,50							
2,00				1,00				2,00				1,01			
3,00								3,00							
5,00		1,00					1,01	5,00		0,99					1,02

Abbildung 25: Aus Kontrollrechnungen erhaltene Ausnutzungsgrade im ebenen Fall für günstigen Baugrund

In Abbildung 25 sind die aus Kontrollrechnungen mit Sofistik erhaltenen Ausnutzungsgrade für günstigen Baugrund im ebenen Fall (grün hinterlegt) dargestellt. Blau hinterlegt sind sämtliche Situationen, für welche die erforderliche Einbindetiefe mit GGU zwar ermittelt, allerdings keine Kontrollrechnung durchgeführt wurde. Man erkennt, dass die mit GGU erhaltenen Ergebnisse sehr gut bestätigt werden, da die mit Sofistik ermittelten Ausnutzungsgrade allesamt nahezu $\mu \approx 1,0$ betragen. Die Abweichungen sind sehr gering, wenn auch nicht ganz so klein wie bei der nach 3.3.1 durchgeführten Vergleichsrechnung.

Auch die Ergebnisse der Kontrollberechnungen für ungünstigen Baugrund zeigen eine gute Übereinstimmung, wie die erhaltenen Ausnutzungsgrade von $\mu \approx 1,0$ in Abbildung 26 zeigen.



μ ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 0,9$							μ ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,0$								
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25								0,25							
0,50			1,01				1,01	0,50			1,01				1,00
0,75								0,75							
1,00			1,01				1,01	1,00			1,01				1,00
1,50								1,50							
2,00					1,01			2,00					1,01		
3,00								3,00							
5,00			1,00				1,01	5,00			0,99				1,01

μ ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,1$							μ ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,2$								
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25								0,25							
0,50			1,01				1,01	0,50			1,01				1,01
0,75								0,75							
1,00			1,02				1,00	1,00			1,01				1,00
1,50								1,50							
2,00					1,01			2,00					1,01		
3,00								3,00							
5,00			1,00				1,01	5,00			0,99				1,01

Abbildung 26: Aus Kontrollrechnungen erhaltene Ausnutzungsgrade im ebenen Fall für ungünstigen Baugrund

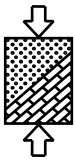
Insgesamt bestätigen die Kontrollrechnungen mit Sofistik die mittels GGU berechneten Einbindetiefen sehr gut.

3.3.3 Kontrollrechnungen für den räumlichen Fall

Die räumlichen Berechnungen wurden durch die Wayss & Freytag Ingenieurbau AG durchgeführt und am Lehrstuhl für Geotechnik kontrolliert. Die Vorgehensweise ist dabei die gleiche wie im ebenen Fall.

Die hierbei erhaltenen Ausnutzungsgrade können der folgenden Abbildung 27 entnommen werden. Die mit Sternchen (*) versehenen Ausnutzungsgrade wurden an Systemen ermittelt, deren Wanddicke nicht exakt dem eigentlich festen Wert von $d = 0,05 \cdot H$ entspricht. Dabei steht ein rotes Sternchen (*) für $d = 0,042 \cdot H$ und ein lila Sternchen (*) für $d = 0,10 \cdot H$. Der Einfluss der Wanddicke wurde bereits in 3.1.3 näher untersucht und erläutert.

Man erkennt, dass auch im räumlichen Fall die berechneten Ergebnisse durch die Kontrollrechnungen bestätigt werden.



μ		B/L = 1,0 Ecke(Dreieck)					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25					1,02*		
0,50						1,02	
0,75							
1,00				1,03			1,02
1,50							
2,00					1,02		
3,00							
5,00			1,05				1,03

μ		B/L = 1,0 Mitte					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25							
0,50							
0,75							
1,00				1,02			1,02
1,50							
2,00					1,02		
3,00							
5,00			1,01				1,03

μ		B/L = 0,5 Ecke(Dreieck)					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25					1,01*		
0,50						1,02	
0,75							
1,00			1,04				1,02
1,50							
2,00					1,02		
3,00							
5,00			1,03				1,01

μ		B/L = 0,5 Mitte Längsseite					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25					1,02*		
0,50						1,02	
0,75							
1,00			1,03				1,02
1,50							
2,00					1,03		
3,00							
5,00			1,03				0,99

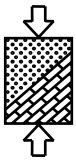
μ		B/L = 0,5 Mitte Stirnseite					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25							
0,50							
0,75							
1,00			1,02				1,00
1,50							
2,00					1,02		
3,00							
5,00			1,04				1,03

μ		B/L = 0,3 Ecke(Dreieck)					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25					1,02*		
0,50						1,02*	
0,75							
1,00			1,02				1,01
1,50							
2,00					1,03		
3,00							
5,00			0,97*				0,99*

μ		B/L = 0,3 Mitte Längsseite					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25					1,02*		
0,50						1,02*	
0,75							
1,00			1,01				1,03
1,50							
2,00					1,02		
3,00							
5,00			0,96*				0,94*

μ		B/L = 0,3 Mitte Stirnseite					
B/H	S/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25							
0,50							
0,75							
1,00			1,02				1,03
1,50							
2,00					1,02		
3,00							
5,00			0,97*				0,98*

Abbildung 27: Aus Kontrollrechnungen erhaltene Ausnutzungsgrade im räumlichen Fall



4 Auswertung

4.1 Bemessungsdiagramme für den ebenen Fall

Ein wesentliches Ziel des Forschungsvorhabens ist es, mit Hilfe der zahlreichen Berechnungen Bemessungsdiagramme aufzustellen. Diese sollen es dem Anwender erlauben, für typische Baugrundsituationen den Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch unter Beachtung der Baugrubengeometrie und der hydraulischen Randbedingungen schnell und sicher führen zu können. Für den ebenen Fall lassen sich gemäß Tabelle 3 acht Baugrundsituationen unterscheiden, für die jeweils ein Bemessungsdiagramm aufgestellt wurde. Diese sind in den folgenden Abbildungen enthalten.

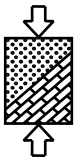
Aufgetragen ist jeweils das Verhältnis der Einbindetiefe T zur Wasserspiegeldifferenz H über der Breite der Baugrube B , welche ebenfalls auf die Wasserspiegeldifferenz bezogen ist. Die verschiedenen Kurven berücksichtigen unterschiedliche Mächtigkeiten S der wasserführenden Schicht.

Rechts der gestrichelt eingetragenen Grenze wurde die Einbindetiefe am in 3.1.1 beschriebenen 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. Veranschaulicht wurde dieser Sonderfall in 3.2.2.

Die Anwendung der Diagramme erfolgt nach folgendem Schema:

1. Wahl des Diagramms aufgrund der Wichte γ' und der Unterscheidung, ob günstiger oder ungünstiger Baugrund vorliegt.
2. Wahl der Kurve für die vorhandene Mächtigkeit S/H der wasserführenden Schicht
3. Ablesen des Verhältnisses T/H in Abhängigkeit der auf die Wasserspiegeldifferenz bezogenen Breite der Baugrube B/H
4. Gegebenenfalls Interpolation zwischen zwei Kurven
5. Berechnung der erforderlichen Einbindetiefe T durch Multiplikation mit der Wasserspiegeldifferenz H

Auf die Darstellung der Werte für $S/H = 0,5$ in den Diagrammen wurde bewusst verzichtet, da es in den meisten Fällen sinnvoller erscheint, bei solch geringmächtigen Aquiferen die Verbauwand bis in den Grundwasserstauer einbinden zu lassen. Für sehr große Wasserspiegeldifferenzen können aber dennoch auf der sicheren Seite liegend die Werte für $S/H = 1,0$ abgelesen werden.



Aus den Diagrammen ist deutlich zu erkennen, dass die erforderliche Einbindetiefe bei schmalen Baugruben überproportional ansteigt.

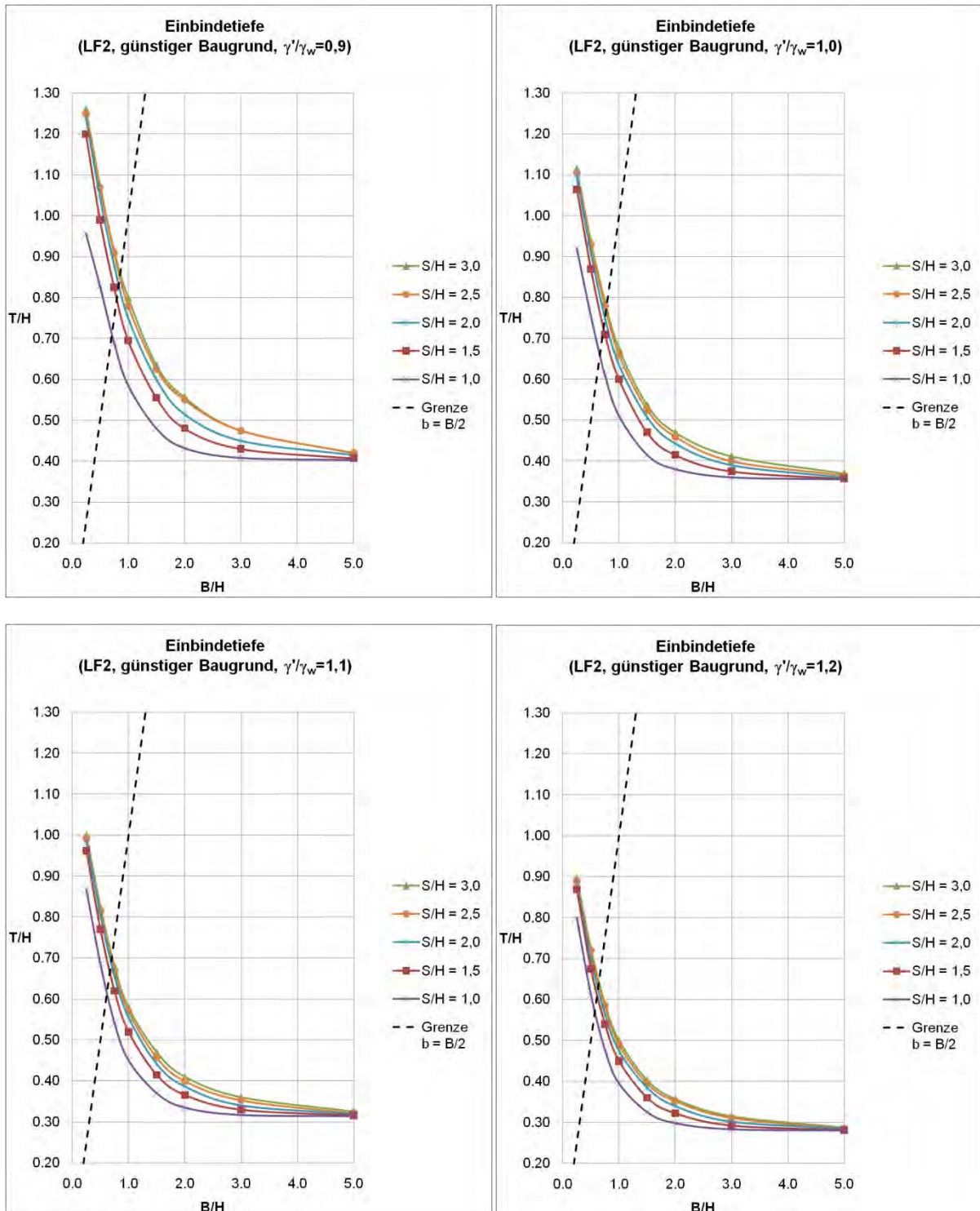


Abbildung 28: Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für günstigen Baugrund im ebenen Fall

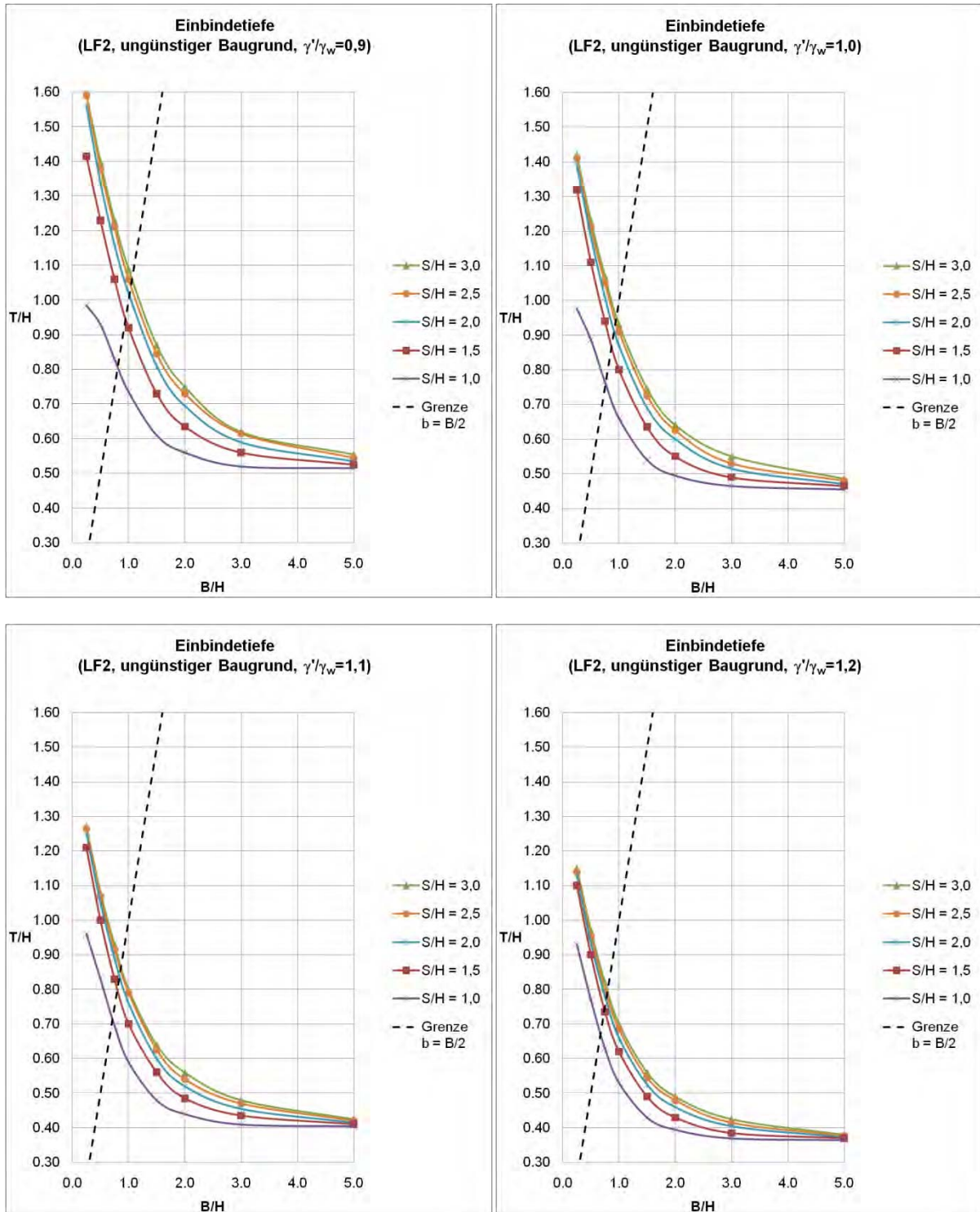
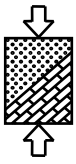
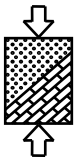


Abbildung 29: Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für ungünstigen Baugrund im ebenen Fall



4.2 Bemessungsdiagramme für den räumlichen Fall

Analog zum ebenen wurden auch für den räumlichen Fall Bemessungsdiagramme aufgestellt. Die verschiedenen Diagramme 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.

Die Vorgehensweise bei der Anwendung der Diagramme entspricht dem Schema nach 4.1.

In Abbildung 30 sind zunächst die beiden Diagramme für quadratische Baugruben enthalten.

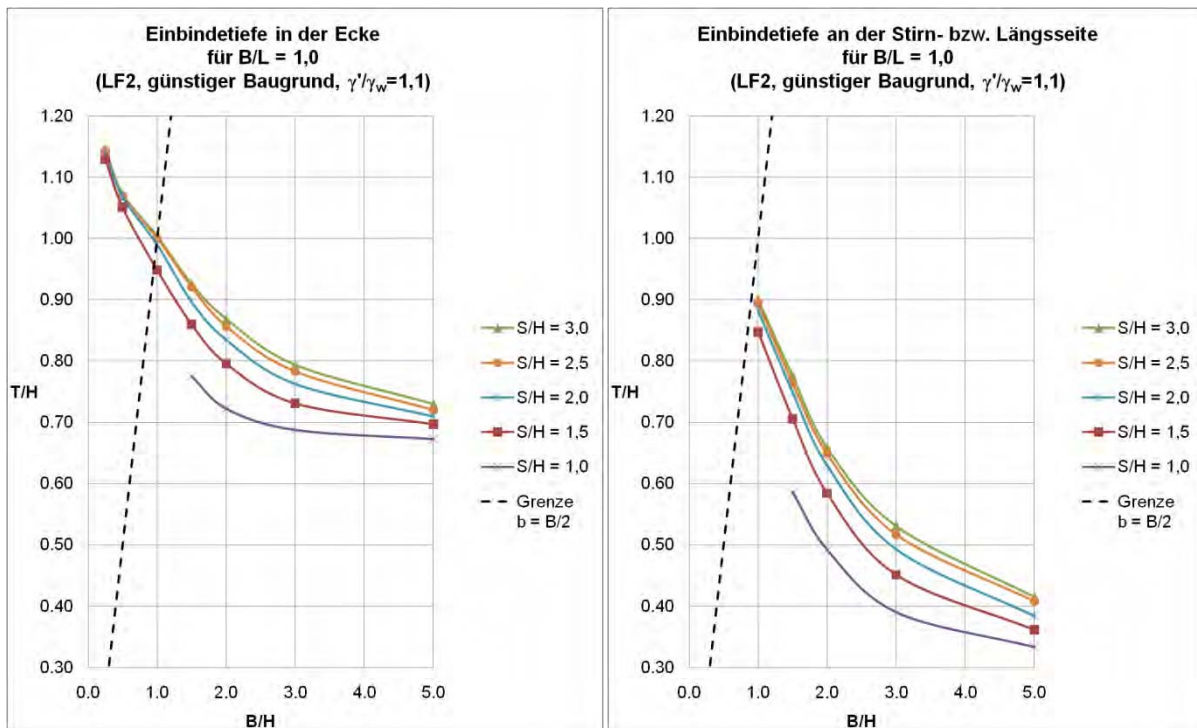
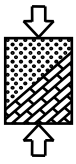


Abbildung 30: Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für quadratische Baugruben mit $B/L = 1,0$

Wie in 3.2.2 beschrieben konnte für sehr schmale Baugruben nicht der sonst betrachtete Bruchkörper mit $b = T/2$, sondern lediglich ein maximal verfügbarer Bruchkörper der Breite $b = B/2$ angesetzt werden. Hieraus resultiert der Verlauf mit veränderter Steigung links der gestrichelt eingetragenen Grenze (erkennbar am Knick in Abbildung 30 links). Weshalb für die Seiten bei sehr schmalen Baugruben keine Werte ermittelt wurden, ist ebenfalls in 3.2.2 beschrieben. Hier empfiehlt es sich, keine Unterscheidung zwischen Seite und Ecke vorzunehmen und generell den Wert für die Ecke anzusetzen. Dies gilt nicht nur für die Seiten quadratischer, sondern auch für die Stirnseiten rechteckiger Baugruben mit $B/L = 0,5$ und $B/L = 0,3$.



Sowohl in den vorstehenden als auch in den nachfolgenden Diagrammen zeigt sich, dass mit abnehmender Breite B die erforderliche Einbindetiefe stark ansteigt.

Abbildung 31 zeigt die Diagramme für rechteckige Baugruben mit $B/L = 0,5$.

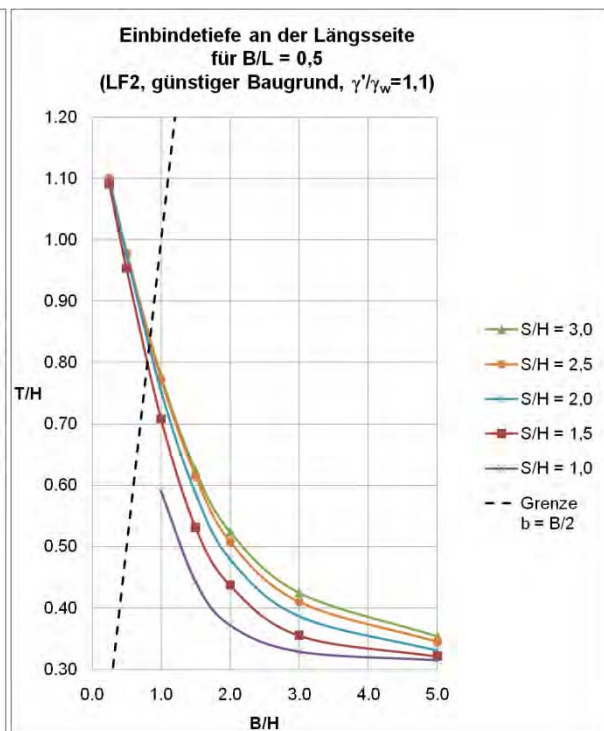
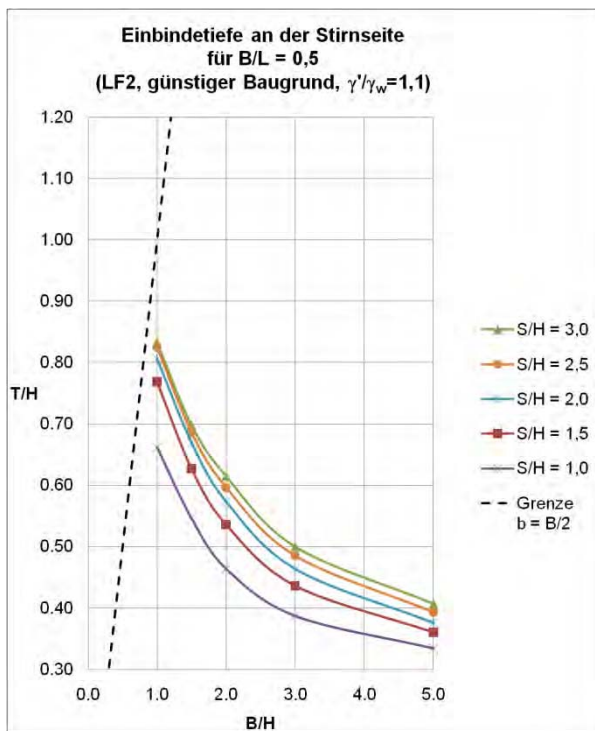
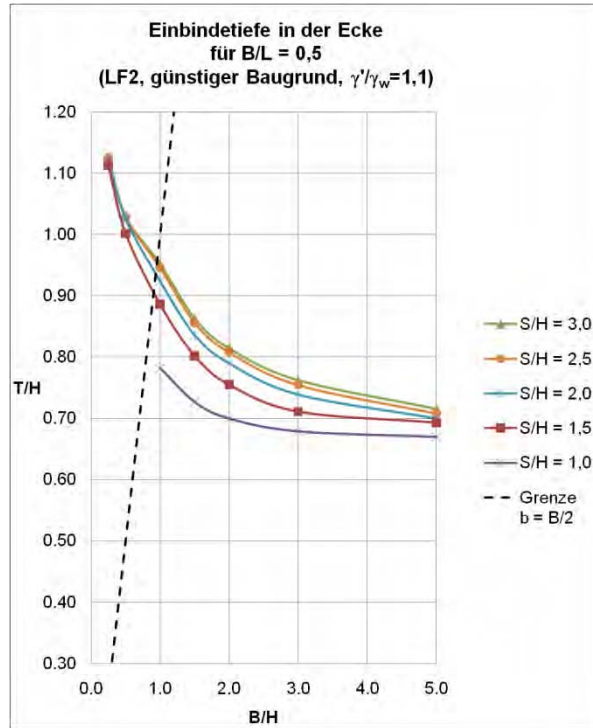
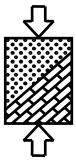


Abbildung 31: Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für rechteckige Baugruben mit $B/L = 0,5$



In Abbildung 32 sind die Diagramme für langgestreckte Baugruben mit $B/L = 0,3$ enthalten.

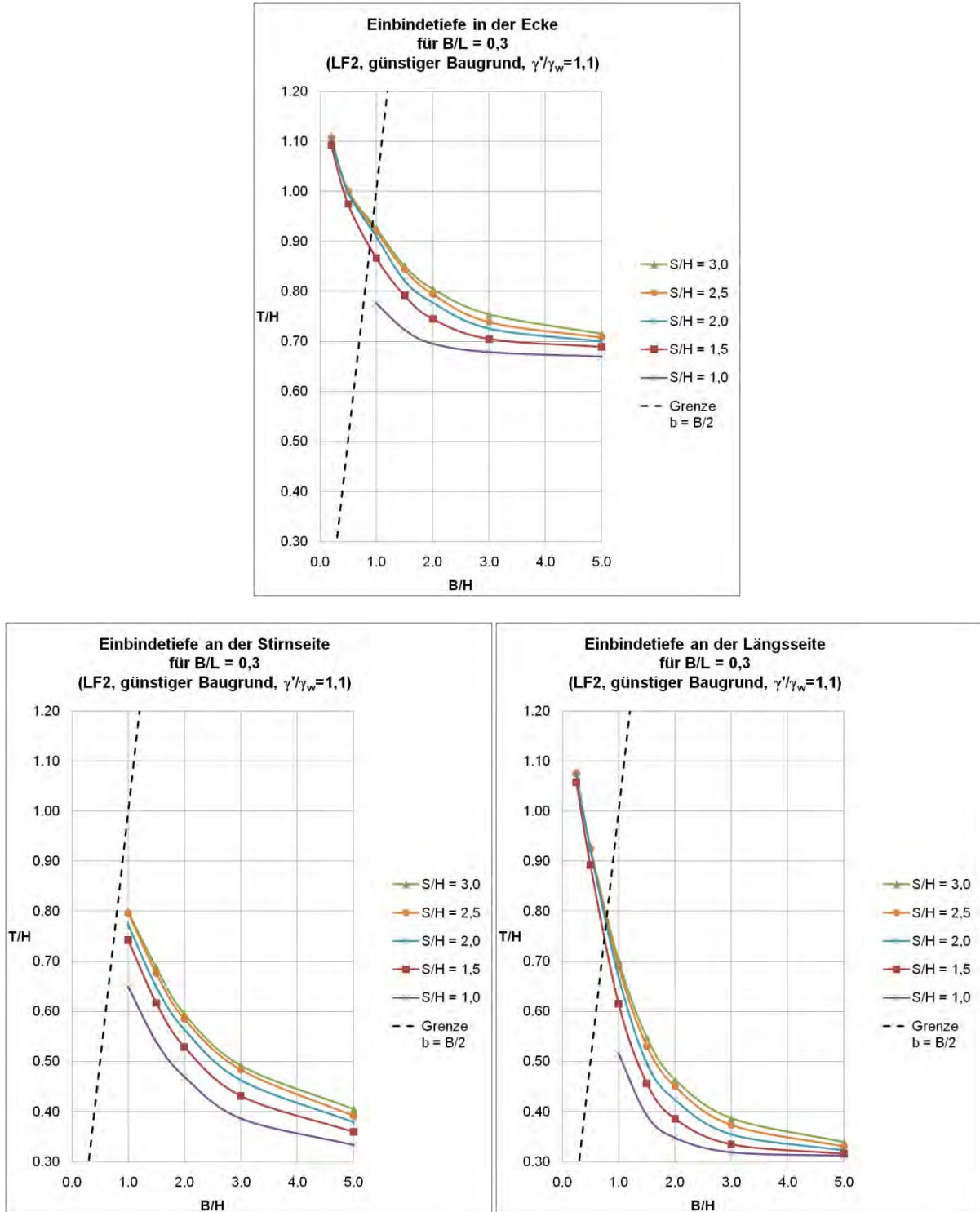
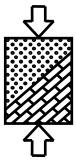


Abbildung 32: Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für langgestreckte Baugruben mit $B/L = 0,3$



4.3 Abtreppung der Verbauwände mit Hilfe der Bemessungsdiagramme

Mit den in 4.2 enthaltenen Diagrammen ist es 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. Abbildung 33 zeigt den Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand für eine konstante Einbindetiefe T/H nach Abbildung 31.

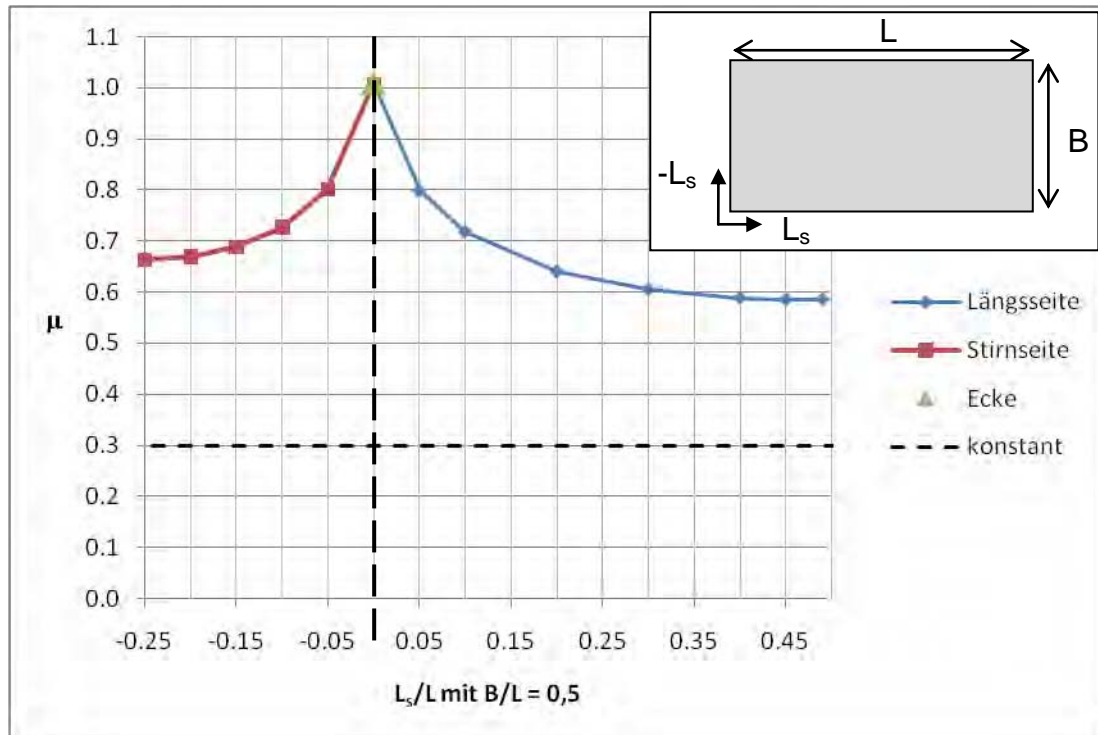


Abbildung 33: Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand bei konstanter Einbindetiefe

Man erkennt, dass der Ausnutzungsgrad zu den Seitenmitten hin sehr schnell zurückgeht. Dies bedeutet nichts anderes, als dass die vorhandene Einbindetiefe größer als die erforderliche Einbindetiefe ist. Bei großen Baugruben kann diese Lösung somit unwirtschaftlich sein.

Deshalb wurden weitere Untersuchungen angestellt.

In einem ersten Schritt wurde für eine ausgewählte Baugrube die erforderliche Einbindetiefe entlang der Stirn- und Längsseite und nicht nur in deren Mitten bestimmt. Die Vorgehensweise hierbei war analog zu 3.2.2. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Abbildung 34 dargestellt.

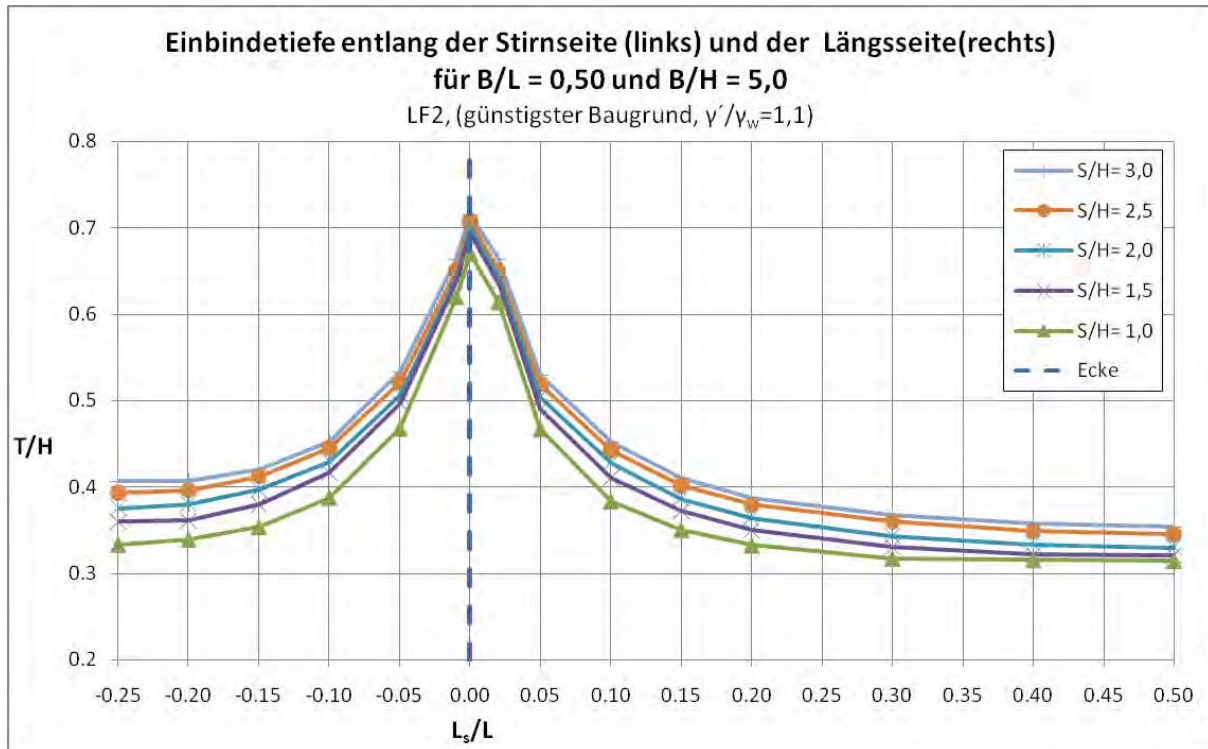
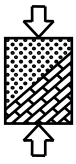


Abbildung 34: Erforderliche Einbindtiefe entlang der Verbauwand

Es wäre sicher unrealistisch zu glauben, dass man in der Praxis eine Verbauwand herstellt, welche den hier berechneten Verläufen entspricht. Vielmehr wird es so sein, dass man von der Ecke ausgehend in einem gewissen Abstand die Einbindtiefe durch eine Stufe verringert. Anhand der dargestellten Verläufe erkennt man, dass die erforderliche Einbindtiefe entlang der Seiten ab einem Verhältnis von $L_s/L = 0,2$ an der Stirnseite bzw. $L_s/L = 0,4$ an der Längsseite annähernd konstant bleibt. Eine klare Aussage wo eine Abtreppung anzuordnen ist, lässt sich aufgrund dieser Ergebnisse jedoch nicht treffen. Deshalb wurden weitere Berechnungen mit abgetrepten Verläufen angestellt.

Hierbei zeigte sich, dass für die untersuchten Verhältnisse (vgl. 3.2.2 bzw. 4.2) mit einer Abtreppung bei $0,3 \cdot B$ auf der Stirn- bzw. $0,3 \cdot L$ auf der Längsseite die Ausnutzung optimal wird, wie die folgenden Abbildungen zeigen. Darin sind die qualitativen Verläufe der Spundwand gestrichelt dargestellt. Die Größe der jeweiligen Einbindtiefe T/H kann den Legenden entnommen werden.

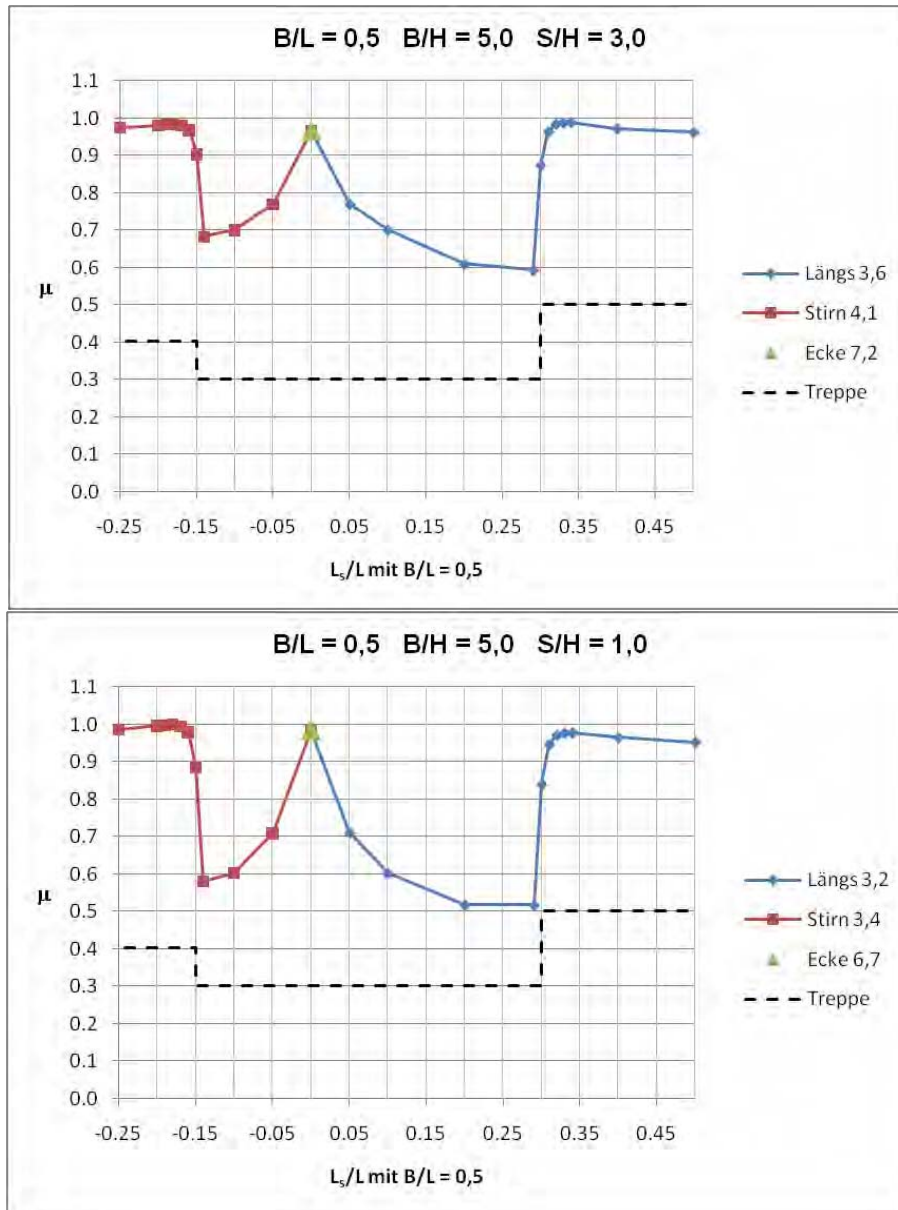
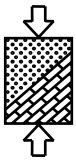
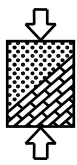


Abbildung 35: Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand für Stufen bei 0,3-B und 0,3-L für $B/L=0,5$ und $B/H=5,0$

Man erkennt, dass der Ausnutzungsgrad im Bereich der Stufe gerade unter $\mu = 1,0$ bleibt. Eine weitere Verkürzung der Eckvertiefung bei Einhaltung der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ist also mit den nach 4.2 erhaltenen Einbindetiefen nicht möglich. Weiterhin ist zu sehen, dass der Ausnutzungsgrad zunächst stärker zurückgeht als für eine konstante Einbindetiefe nach Abbildung 33. Das liegt daran, dass sich durch die kürzere Einbindetiefe in den Seitenmitten die Wasserwege hin zu dem kürzeren Weg und damit auch die Potentiallinien verschieben. Die geringe Abweichung des Ausnutzungsgrades von $\mu = 1,0$ resultiert daraus, dass die Einbindetiefen nicht den exakten Werten nach 3.2.2 entsprechen, sondern auf eine Nachkommastelle aufgerundet wurden.



Wie bereits erwähnt macht eine Abtreppung lediglich bei großen Baugruben wirtschaftlich Sinn. Dennoch wurden auch kleine Baugruben ($B/H = 1,0$) mit der zuvor ermittelten Position der Stufe berechnet.

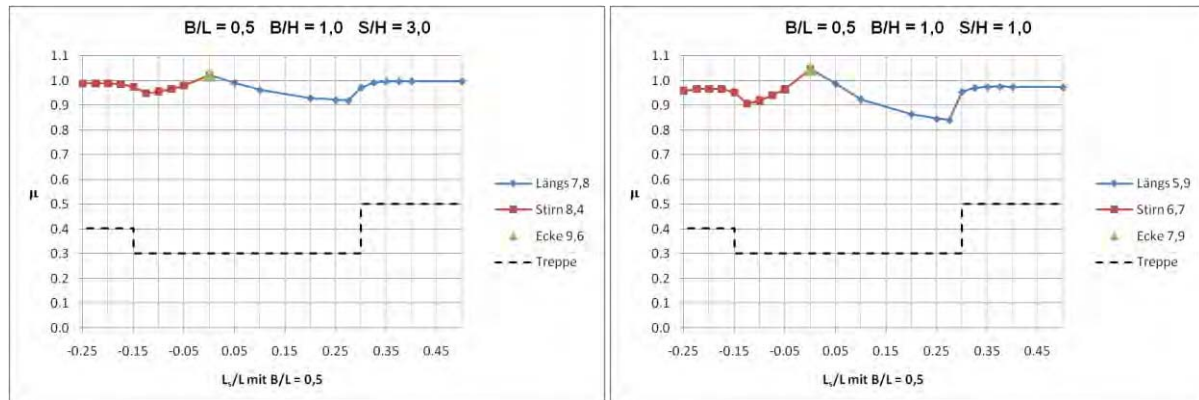
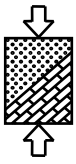


Abbildung 36: Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand für Stufen bei $0,3 \cdot B$ und $0,3 \cdot L$ für $B/L=0,5$ und $B/H=1,0$

Man sieht, dass die Ausnutzungsgrade auch für diesen Fall im Bereich der Stufen etwa $\mu = 1,0$ betragen. Dass im Bereich der Ecken die Ausnutzungsgrade μ geringfügig größer 1,0 werden, liegt daran, dass der den Ecken zugrundegelegte Bruchkörper über die Stufe hinaus geht, da $b = T/2 > 0,3 \cdot B$ ist. Somit kommt es in diesem Bereich zu einer erhöhten Strömungskraft. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Abtreppungen bei $0,3 \cdot B$ bzw. $0,3 \cdot L$ für die Ecke zu Ausnutzungsgraden führen, die prinzipiell über 1,0 liegen. Dennoch zeigen die Abbildung 35 und Abbildung 36, dass der Ansatz mit Stufen bei $0,3 \cdot B$ und $0,3 \cdot L$ für größere Baugruben mit $B/H > 1,0$ und $b = T/2 < 0,3 \cdot B$ ohnehin, aber auch für kleine Baugruben zu einer wirtschaftlichen und noch akzeptabel sicheren Lösung führen wird.

Die gleichen Berechnungen wurden auch für $B/L = 1,0$ und $B/L 0,3$ angestellt. Die entsprechenden Diagramme sind im Anhang enthalten. Diese bestätigen den gefundenen Ansatz für $B/L = 0,3$. Für quadratische Baugruben liegt der Ausnutzungsgrad teilweise etwas über $\mu = 1,0$, so dass hier die Stufen etwas weiter in Baugrubenmitte oder aber größere Einbindetiefen zu wählen sind.

Die hier gefundene Abtreppung stellt eine sehr gute Lösung dar, wenn die in den Bemessungsdiagrammen nach 4.2 enthaltenen Einbindetiefen verwendet werden. Generell kann jedoch die Position der Stufe den vor Ort herrschenden Verhältnissen angepasst und variiert werden. So ist es z.B. möglich, die Stufe näher an der Baugrubenecke anzuordnen, wenn im Gegenzug die Einbindetiefen an den Seiten vergrößert werden. Hierzu ist im Einzelfall abzuwägen, ob tiefere Wände mit kürzeren Eckvertiefungen zu einer besseren Lösung führen.



4.4 Faktorisierung für unterschiedliche Wichten

Mit den Bemessungsdiagrammen nach 4.1 sind zahlreiche Baugrundverhältnisse im ebenen Fall abgedeckt worden. Anhand der Ergebnisse wurde eine Interpolationsfunktion gefunden, welche es ermöglicht, aus den Ergebnissen für eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ direkt auf die erforderliche Einbindetiefe für andere Wichten zu schließen.

Man erhält die erforderliche Einbindetiefe für beliebige Wichten nach:

$$\frac{T}{H}(\gamma') = \frac{T}{H}(\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3) \cdot \left(\frac{11 \text{ kN/m}^3}{\gamma'} \right)^{\sqrt{2}} \quad (41)$$

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

In Abbildung 37 sind beispielhaft die Verläufe, welche durch numerische Berechnungen erhalten wurden, den Ergebnissen bei Anwendung von Gleichung (41) gegenübergestellt.

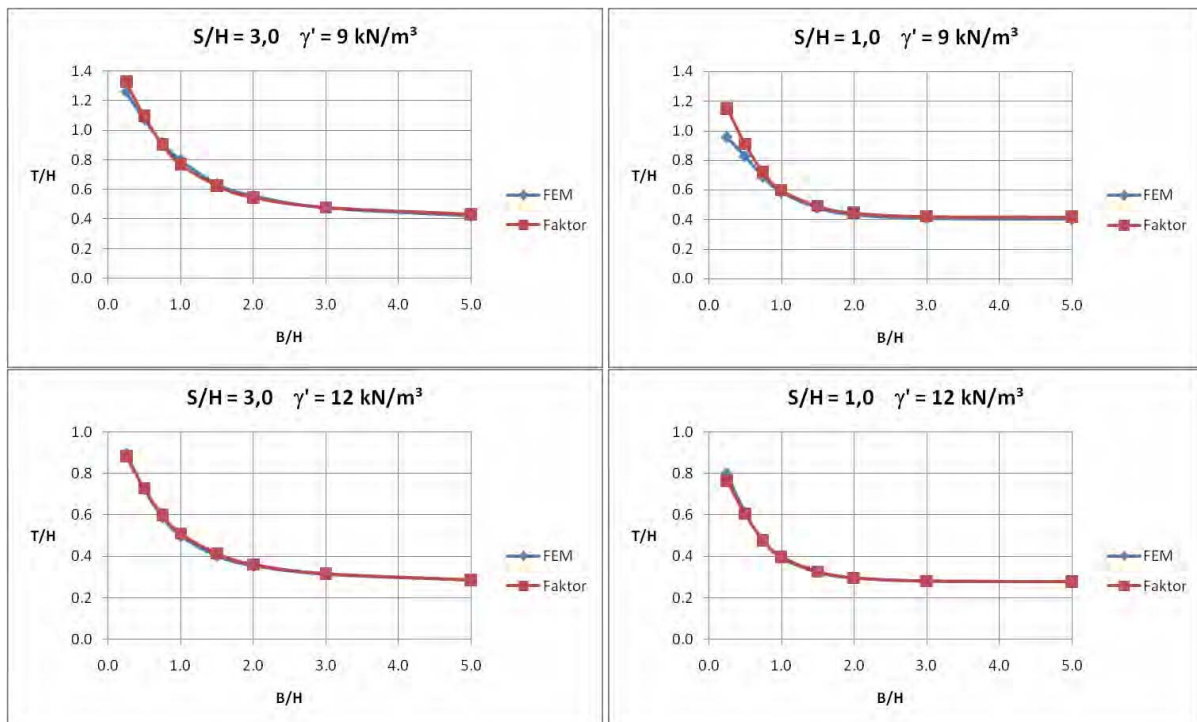
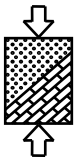


Abbildung 37: Vergleich der erforderlichen Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für günstigen Baugrund

Man erkennt, dass die Werte sehr gut übereinstimmen. Einzig im Diagramm rechts oben für $S/H = 1,0$ kommt es bei schmalen Baugruben zu Abweichungen. Dies liegt jedoch daran, dass hier die Einbindetiefe die Größenordnung der Mächtigkeit der wasserführenden Schicht erreicht. Darauf, dass hier ohnehin die Verbauwand



sinnvollerweise besser bis in den Grundwasserstauer einzubinden ist, wurde bereits in 4.1 verwiesen.

In Abbildung 38 sind für die gleichen Verhältnisse die entsprechenden Verläufe für ungünstigen Baugrund enthalten.

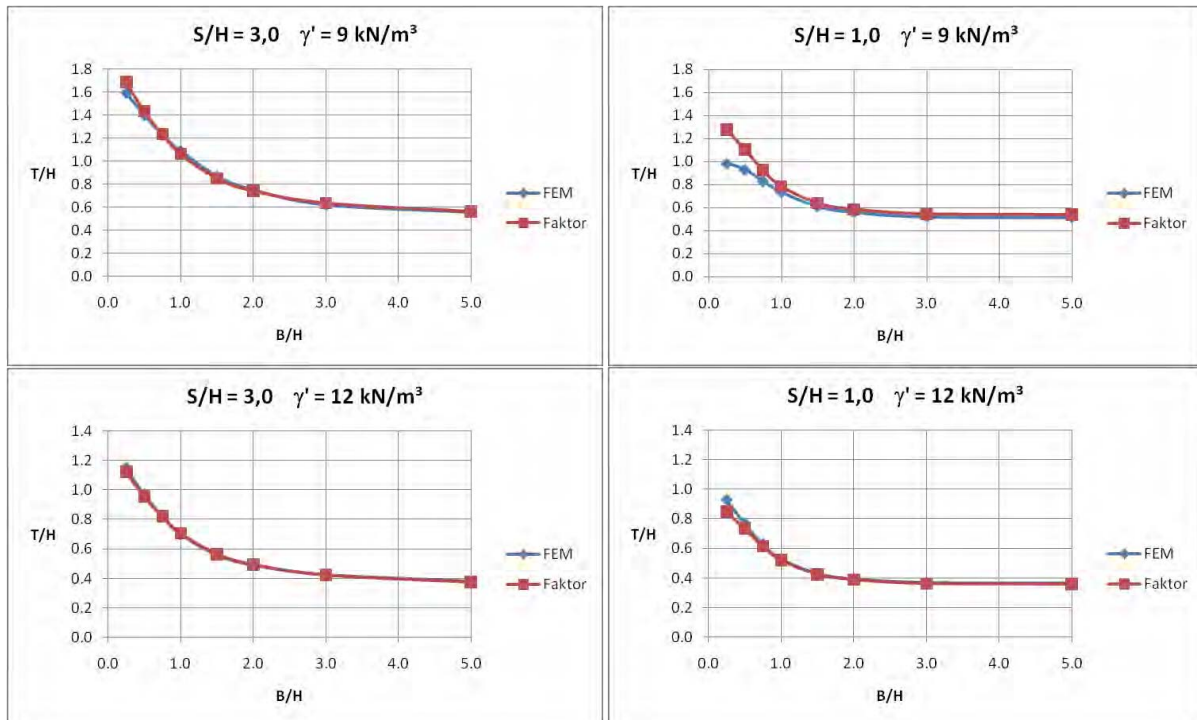
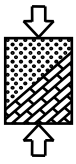


Abbildung 38: Vergleich erforderlichen der Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für ungünstigen Baugrund

Auch hier sind, abgesehen von schmalen Baugruben für $S/H = 1,0$, kaum Abweichungen festzustellen.

Im Anhang sind die dazugehörigen Zahlenwerte inklusive der Abweichungen in % sowie weitere Diagramme für $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ und für $S/H = 2,0$ enthalten.

Insgesamt lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass die Interpolationsfunktion nach Gleichung (41) für den ebenen Fall, bis auf den Ausnahmefall schmale Baugrube in Kombination mit geringmächtigem Aquifer, eine sehr gute Näherung darstellt. Dort ist aber wie bereits erwähnt, die Spundwand sinnvollerweise ohnehin besser bis in den Grundwasserstauer zu führen.



Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden im räumlichen Fall Berechnungen für günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ angestellt. Damit lässt sich eine Überprüfung der Beziehung nach Gleichung (41) nicht durchführen. Allerdings wurden zusätzlich einzelne Berechnungen für eine Wichte von $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$ durchgeführt. Der Vergleich dieser Berechnungen mit den durch Gleichung (41) erhaltenen Werte ist für quadratische Baugruben in der folgenden Abbildung enthalten.

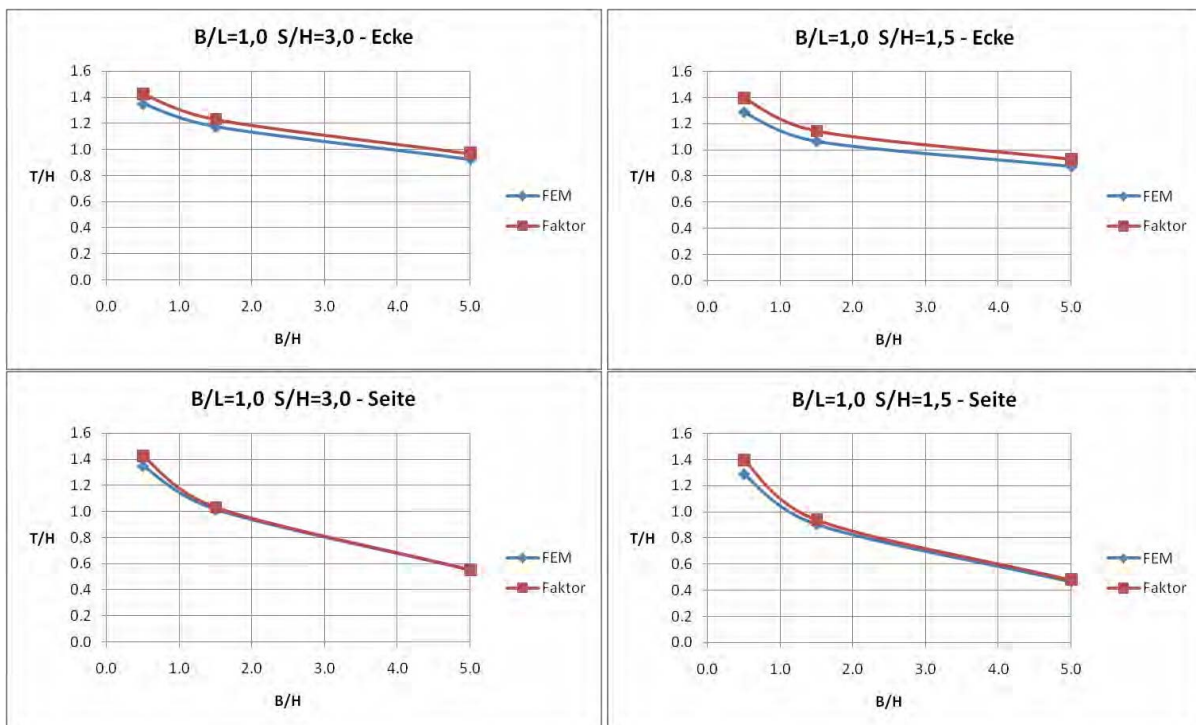


Abbildung 39: Vergleich der erforderlichen Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für $B/L = 1,0$

Dass die Werte für $B/H = 0,5$ in der Ecke und an den Seiten gleich groß sind, liegt daran, dass hier der Einflussbereich der Ecke bis in die Mitte der Seite reicht. Hierauf wurde bereits in 3.2.2 eingegangen.

Die Ergebnisse für $B/L = 0,3$ können Abbildung 40 entnommen werden. Dort ist die soeben beschriebene Übereinstimmung nur an der Stirnseite vorhanden.

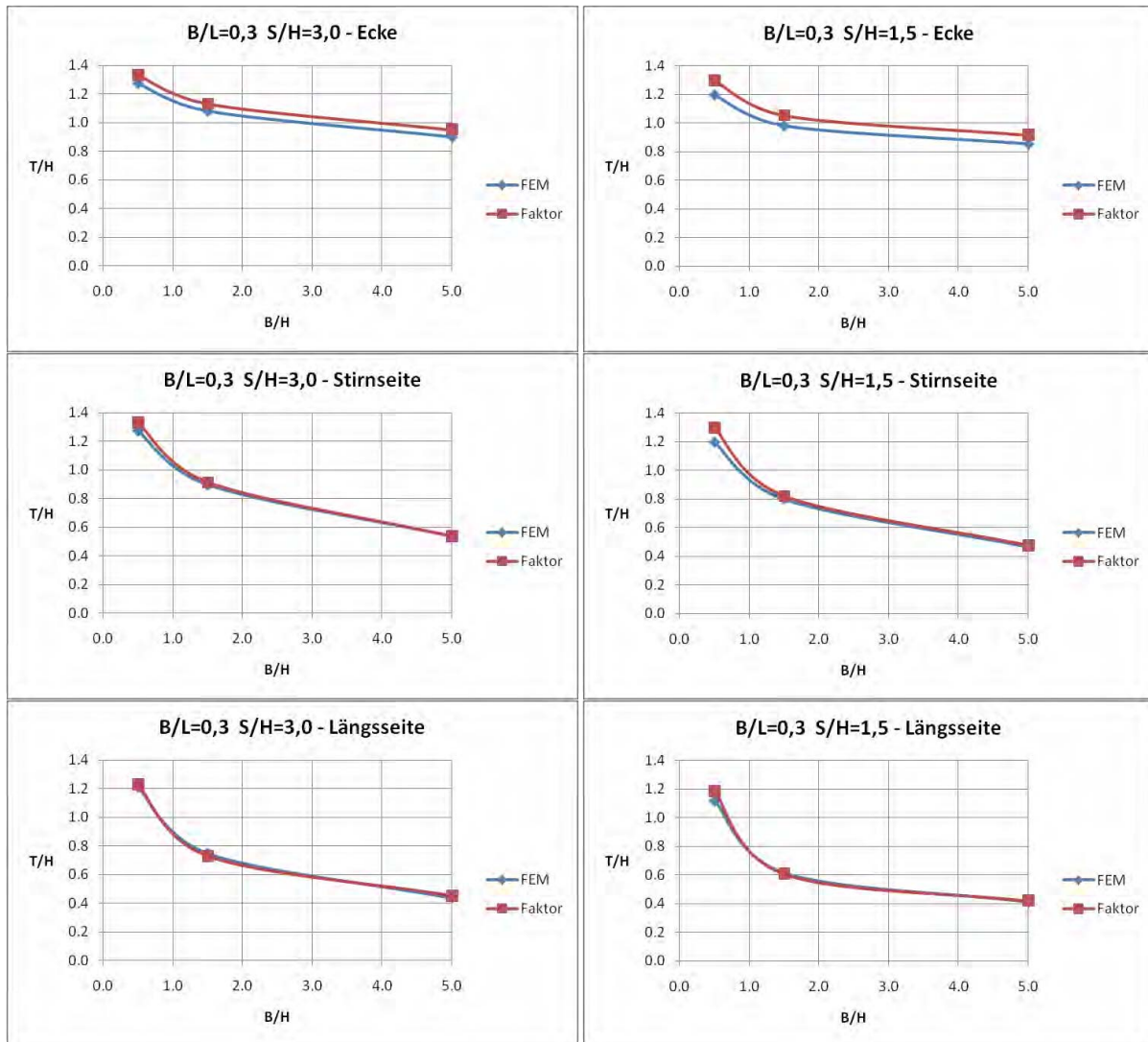
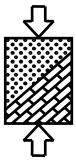
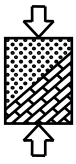


Abbildung 40: Vergleich der erforderlichen Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für $B/L = 0,3$

Die Diagramme in Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen, dass für die betrachteten Situationen auch im räumlichen Fall eine gute Übereinstimmung zwischen numerisch berechneter und durch Faktorisierung erhaltener Einbindetiefe besteht.

Daraus lässt sich folgern, dass sich auch für Zwischenwerte von B/H und γ' die erforderlichen Einbindetiefen mit genügender Genauigkeit ermitteln lassen. Bei größeren Wichten von $\gamma' > 11 \text{ kN/m}^3$ können auf der sicheren Seite liegend die Einbindetiefen für $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ verwendet werden.

Zur Verifizierung der Beziehung im räumlichen Fall sind jedoch 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.



5.1 Randbedingungen

Die „Haltestelle-Rathaus“ als unterirdischer Bahnhof ist Teil der U-Bahn-Linie „Nord-Süd Stadtbahn Köln“, welche den Kölner Süden mit insgesamt 8 Haltestellen an das Zentrum um den Dom anbindet. Die rund 4 km lange Strecke der Kölner Verkehrsbetriebe AG (KVB) mit den beiden eingleisigen Tunnelröhren verläuft dabei von der Marktstraße im Süden bis zur Haltestelle Breslauer Platz nördlich des Hauptbahnhofs.

Für die Erstellung der lang gestreckten Stahlbetonkonstruktion der „Haltestelle-Rathaus“ in offener Bauweise wurde eine dichte Schlitzwand-Baugrube mit den Innenabmessungen von ca. $L/B/H = 90/6,5/20,5$ m erstellt. Die Wasserdrukddifferenz zwischen dem Bemessungswasserstand HGW (41,5 müNN) außerhalb der Baugrube und unterhalb der Baugrubensohle (GW bei 25,4 müNN) betrug ca. 16 m (vgl. Abbildung 42).

Gemäß Baugrundgutachten stehen von der Geländeoberkante (ca. 47,5 müNN) aus Auffüllungen an, welche sehr heterogen zusammengesetzt sind. Diese bestehen aus Kulturschutt, Bauwerksresten und Siedlungsabfällen. Die anschließend anstehende Quartärschicht (ca. 36,1 - 13,0 müNN) enthält als Hauptbodenart Kies, welcher mit Sand vermischt ist. Das Tertiär, in welches die dichte Baugrubenwand einbindet, dient als unterer, nahezu wasserdichter Sohlabschluss.

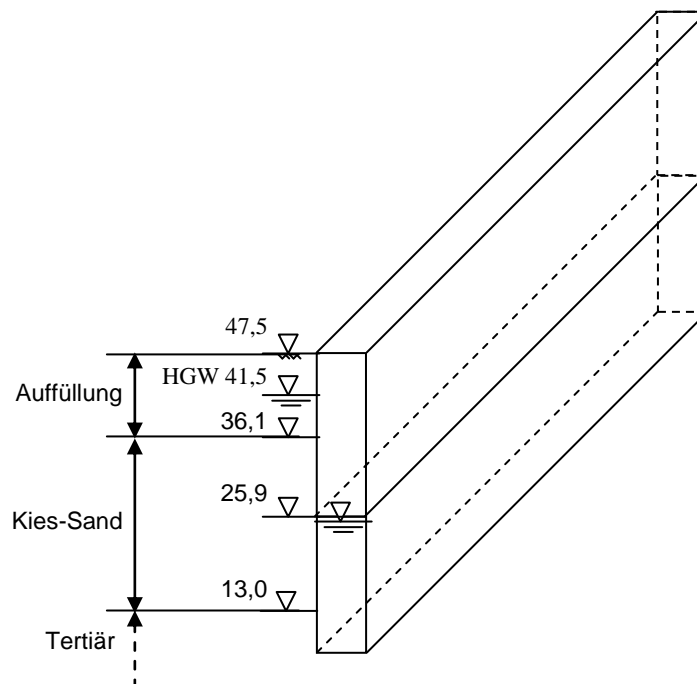
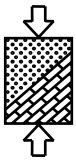


Abbildung 42: Skizze der Schlitzwandbaugrube „Haltestelle Rathaus“



Der anisotrope Baugrund weist die folgenden Durchlässigkeiten auf:

Quartär: $k_v = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
 $k_h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Tertiär: $k_v = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
 $k_h = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Die Wichten betragen in beiden Schichten $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ bzw. $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$.

5.2 Vereinfachtes Beispiel ohne Baugrundsichtung

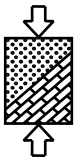
Die Baumaßnahme „Haltestelle-Rathaus“ ist ein Beispiel für eine Baugrube mit sehr geringer Breite im Vergleich zur Wasserspiegeldifferenz. Dass für solche geometrischen Verhältnisse die erforderliche Einbindetiefe überproportional ansteigt, haben die vorab dargestellten Untersuchungen (vgl. Abbildung 28 ff) bereits gezeigt. Wie bereits erwähnt, liegt im Bereich der Baumaßnahmen Nord-Süd-Stadtbahn anisotroper, geschichteter Baugrund vor. Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens sowie die gängigen Näherungsverfahren beschränken sich jedoch auf isotropen und homogenen Baugrund. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein vereinfachtes, auf der „Haltestelle-Rathaus“ basierendes Beispiel betrachtet, um die Anwendung der Bemessungsdiagramme aufzuzeigen. Weiterhin wird für dieses Beispiel die mit den Bemessungsdiagrammen erhaltene Einbindetiefe den in 2.4 vorgestellten Näherungsverfahren gegenübergestellt.

5.2.1 Randbedingungen

Die geometrischen Abmessungen der Baugrube $B = 6,5 \text{ m}$ und $L = 90 \text{ m}$ bleiben gegenüber 5.1 unverändert. Allerdings wird für das vereinfachte Beispiel angenommen, dass der Grundwasserstand innerhalb der Baugrube bei 25,9 müNN und damit auf Höhe der Baugrubensohle liegt. Der Grundwasserstand außerhalb der Baugrube liegt weiterhin bei 41,5 müNN. Die Wasserspiegeldifferenz beträgt demnach $H = 15,6 \text{ m}$.

Es wird außerdem angenommen, dass der Baugrund isotrop und homogen ist und eine Wichte unter Auftrieb von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ besitzt.

Weiterhin wird nur der Eckbereich betrachtet.



5.2.2 Nachweis mit den Bemessungsdiagrammen

Als Eingangswert für die neu erstellten Diagramme ergibt sich das Verhältnis der Breite zur Länge der Baugrube zu $B/L = 6,5 \text{ m} / 90 \text{ m} = 0,07$. Für dieses geometrische Verhältnis liegt kein Diagramm vor. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass sich für die Eckbereiche für $B/L \leq 0,30$ keine weiteren reduzierenden Einflüsse durch eine noch größere Entfernung zwischen den gegenüber liegenden Stirnseiten ergeben. Demnach kann mit hinreichender Genauigkeit und auf der sicheren Seite liegend das Bemessungsdiagramm für $B/L = 0,30$ verwendet werden.

Weiterhin wird mit einer Mächtigkeit der wasserführenden Schicht gleich der 3-fachen Wasserdruckdifferenz ($S/H = 3,0$) gerechnet. Dieser Ansatz ist ausreichend, da sich die erforderliche Einbindetiefe T für die hier vorhandene, größere Aquifermächtigkeit nur noch marginal gegenüber dem Fall mit $S/H = 3,0$ ändert.

Das Verhältnis der Baugrubenbreite zur Wasserdruckdifferenz ergibt sich zu $B/H = 6,5 \text{ m} / 15,6 \text{ m} = 0,42$.

Damit sind alle Eingangswerte bestimmt, um das entsprechende Diagramm auszuwählen und die erforderliche Einbindetiefe abzulesen.

Aus dem Bemessungsdiagramm in Abbildung 43 ergibt sich daraus $T/H = 1,04$. Mit $H = 15,6 \text{ m}$ beträgt die erforderliche Einbindetiefe somit $T = 16,23 \text{ m}$.

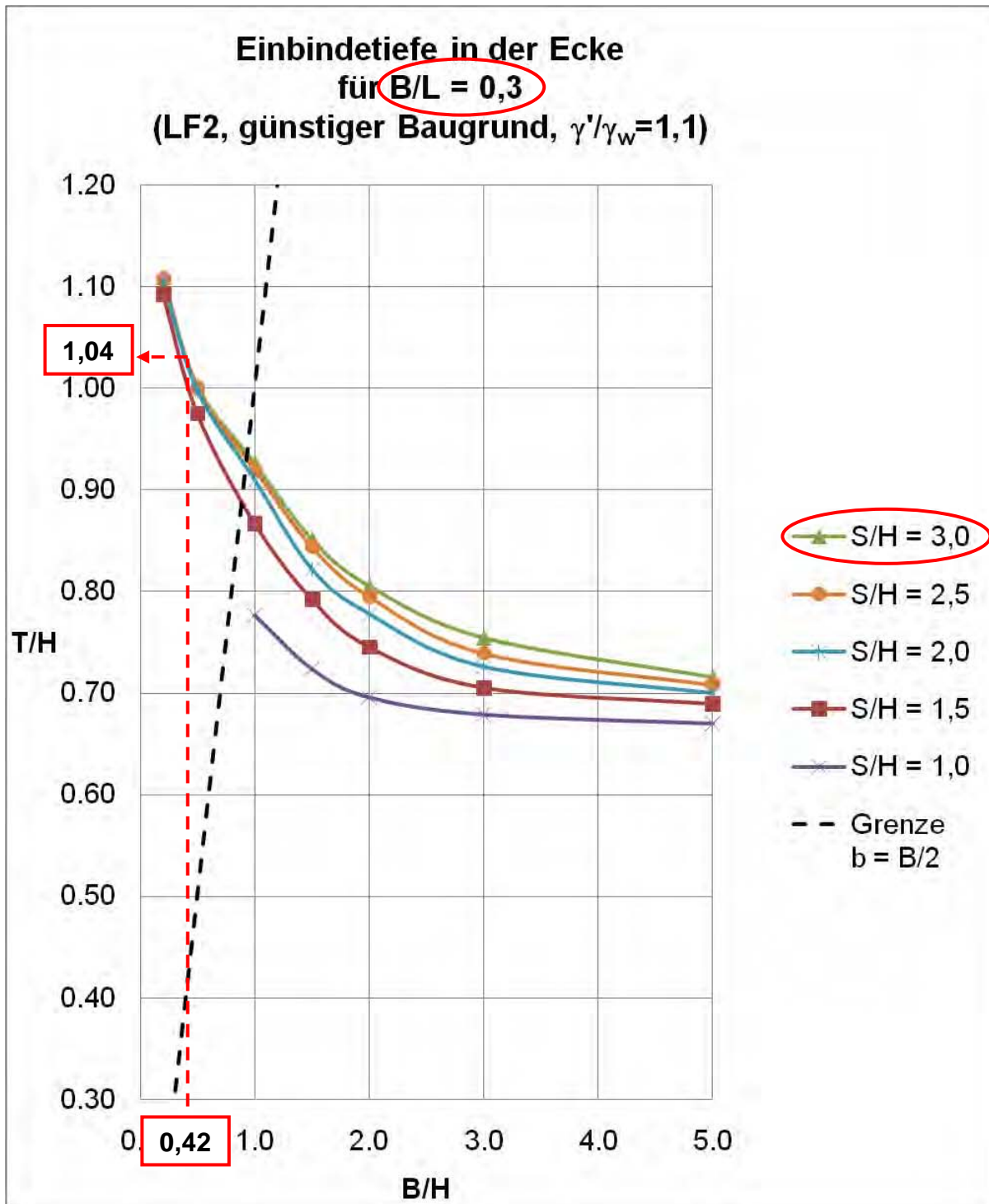
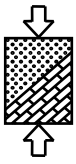
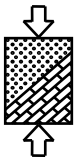


Abbildung 43: Bemessungsdiagramm zur Ermittlung der Einbindtiefe in der Ecke



5.2.3 Nachweis mit Näherungsverfahren

Im Folgenden wird die erforderliche Einbindetiefe mit Hilfe der in 2.4 beschriebenen Näherungsverfahren ermittelt. Für die Verfahren, welche weder die Geometrie der Baugrube, noch die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht oder eine räumliche Anströmung berücksichtigen, ergeben sich folgende Einbindetiefen:

Linearer Potentialabbau: $T = 0,12 \cdot H = 0,12 \cdot 15,6 \text{ m} = 1,87 \text{ m}$

Brinch Hansen und Hessner: $T = 0,28 \cdot H = 0,28 \cdot 15,6 \text{ m} = 4,37 \text{ m}$

Brinch Hansen: $T = 0,44 \cdot H = 0,44 \cdot 15,6 \text{ m} = 6,86 \text{ m}$

Harza und Dachler: $T = 0,40 \cdot H = 0,40 \cdot 15,6 \text{ m} = 6,24 \text{ m}$

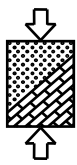
Diese häufig in kommerziellen Rechenprogrammen implementierten Ansätze liegen damit - insbesondere für den Fall des linearen Potentialabbaus - deutlich unter dem eigenen Ansatz, in dem die Geometrie der Baugrube und die Eckanströmung berücksichtigt ist (Näheres siehe 5.4).

In 2.4 wurden weiterhin die Verfahren nach McNamee-Harza-Davidenkoff, nach Davidenkoff und Franke sowie nach Knaupe vorgestellt. Diese berücksichtigen sowohl die Breite der Baugrube als auch die Mächtigkeit des Grundwasser-Aquifers und bieten zudem Ansätze zur Berücksichtigung der räumlichen Anströmung.

Die Anwendung des Verfahrens nach McNamee-Harza-Davidenkoff ist im vorliegenden Fall jedoch nicht möglich. Das Diagramm nach McNamee-Harza (Abbildung 3) liefert nur Einbindetiefen für $B/H \geq 1,0$, sodass es bei der hier vorliegenden, sehr schmalen Baugrube mit $B/H = 0,42$ keine Anwendung finden kann.

Um innerhalb der Anwendungsgrenzen des Diagramms nach Davidenkoff und Franke (Abbildung 4) zu bleiben, wird von dem maximal möglichen Verhältnis $S/(B/2) = 6,0$ ausgegangen. Dies entspricht einer Mächtigkeit des Grundwasserleiters von $S = 19,5 \text{ m}$ bzw. $S/H = 1,25$. Die Auswertung des Diagramms mittels Iteration liefert die erforderliche Einbindetiefe für den ebenen Fall dann zu $T = 13,6 \text{ m}$. Durch Berücksichtigung des Korrekturkoeffizienten ε nach 2.5 ergibt sich schließlich:

Davidenkoff und Franke: $T = 13,6 \text{ m} \cdot 1,7 = 23,12 \text{ m}$



Knaupe verweist für sehr schmale Baugruben mit

$$\beta = \frac{B}{H+T} = 0,22 \leq 0,50 \quad (42)$$

auf oben genanntes Diagramm von Davidenkoff und Franke. Somit beträgt auch hierfür die erforderliche Einbindetiefe im ebenen Fall $T = 13,6$ m. Das Eckvertiefungsverhältnis zur Berücksichtigung der räumlichen Anströmung in der Ecke ergibt sich nach Abbildung 7 mittels Extrapolation zu $\varepsilon_k = 1,1$ und damit die Einbindetiefe zu:

Knaupe: $T = 1,1 \cdot (13,6 \text{ m} + 15,6 \text{ m}) - 15,6 \text{ m} = 16,52 \text{ m}$

5.3 Beispiel „Haltestelle-Rathaus“ unter Berücksichtigung der Baugrundsichtung

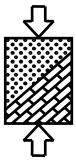
Um die Anwendung der Bemessungsdiagramme und Näherungsverfahren zu ermöglichen, wurde ein vereinfachtes System betrachtet. Die tatsächlichen Baugrundverhältnisse stellen sich jedoch komplizierter dar. Im Folgenden sollen die kompletten erforderlichen Nachweisschritte für die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch unter Berücksichtigung der Baugrundsichtung durchlaufen werden. Die hierfür angesetzten Randbedingungen entsprechen den Ausführungen in 5.1.

5.3.1 Sicherheitskonzept nach DIN 1054

Die Mindestanforderung an Umfang und Qualität der geotechnischen Untersuchungen, Berechnungen und Überwachungsmaßnahmen richtet sich nach der Geotechnischen Kategorie (GK). Bei der hier vorhandenen Baugrube mit räumlicher Zuströmung liegt die GK3 vor, so dass die Standsicherheit ingenieurmäßig auf der Grundlage vertiefter geotechnischer Kenntnisse und zusätzlicher Untersuchungen rechnerisch nachgewiesen werden muss.

Der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch erfolgt dabei für den Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ1A nach DIN-1054: 2005-01, Abschnitt 11.5 (vgl. 2.2).

Die vorhandene Bemessungssituation ist vorübergehend, so dass der Lastfall 2 maßgebend ist. Dieser ergibt sich aus der Verbindung der Sicherheitsklasse SK2 für Bauzustände mit der Einwirkungsklasse EK1 mit ständig bzw. regelmäßig auftretenden Einwirkungen.



Nach DIN 1054 (vgl. 2.2) ist die quartäre Kiesschicht als günstiger Baugrund einzustufen. Dies gilt auch für das Tertiär, wenn dieses durch eine filtergerechte Schutzschicht von mindestens 0,3 m Dicke überdeckt ist [1]. Der Nachweis der Filterstabilität des Quartärs wird in 5.3.2 erbracht.

Die Teilsicherheitsbeiwerte ergeben sich daher gemäß Tabelle 1 für den LF2 und günstigen Untergrund zu $\gamma_{G, stb} = 0,95$ und $\gamma_H = 1,30$.

5.3.2 Nachweis der Filterstabilität

Bei der vorliegenden Baugrundsituation, der Überlagerung einer relativ undurchlässigen Schicht durch eine durchlässigere Schicht, ist zusätzlich zum Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch der Nachweis der Filterstabilität zu erbringen. Dieser stellt sicher, dass es nicht zu einer Auspülung der Feinkornanteile aus dem Tertiär in die quartäre Grobschicht kommt.

Die Filterstabilität wird in der Regel mit den folgenden Filterkriterien nach Terzaghi nachgewiesen:

$$\frac{d_{f15}}{d_{e85}} \leq 4 \quad (43)$$

$$\frac{d_{f15}}{d_{e15}} \geq 4 \quad (44)$$

Die für den Nachweis erforderlichen Korndurchmesser können aus den im Baugrundgutachten enthaltenen Körnungslinien nach Abbildung 44 ermittelt werden.

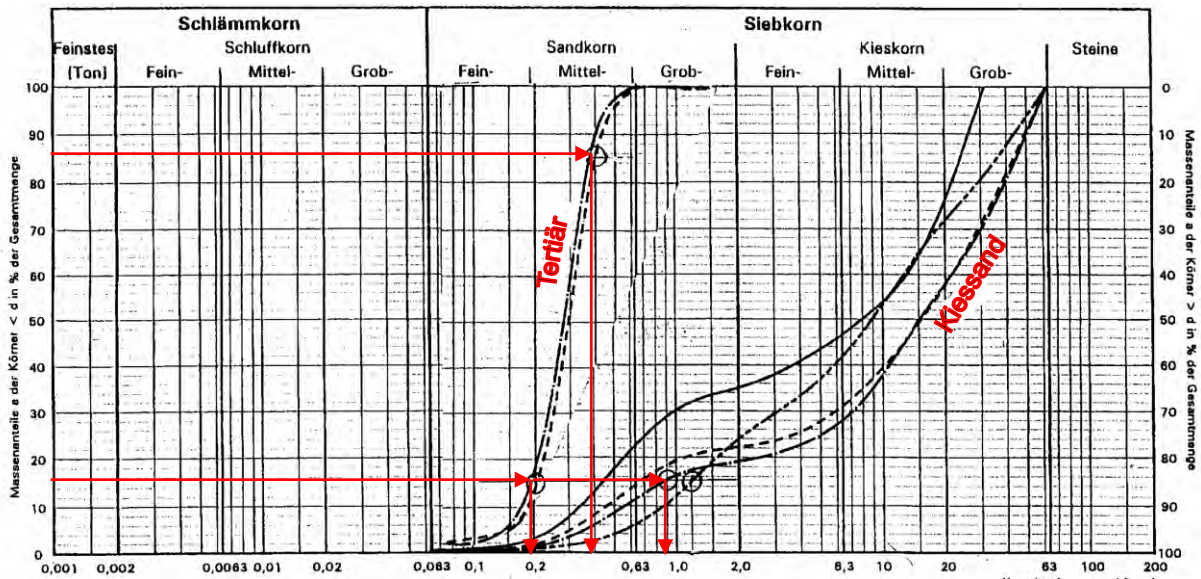
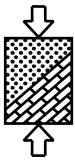


Abbildung 44: Körnungslinien des Baugrundes an der „Haltestelle Rathaus“

Aus Abbildung 44 folgen die Korndurchmesser des zu entwässernden Bodens $d_{e15} = 0,2 \text{ mm}$ und $d_{e85} = 0,4 \text{ mm}$ sowie des Filters $d_{f15} = 0,9 \text{ mm}$.

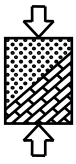
Eingesetzt in (43) und (44) erhält man:

$$\frac{d_{f15}}{d_{e85}} = \frac{0,9}{0,4} = 2,25 \leq 4 \leq 4,5 = \frac{0,9}{0,2} = \frac{d_{f15}}{d_{e15}} \quad (45)$$

Der Nachweis der Filterstabilität nach dem Kriterium von Terzaghi ist somit erbracht.

Allerdings gilt das Filterkriterium nach Terzaghi strenggenommen nur dann, wenn die Körnungslinien des abzufilternden Bodens und des Filtermaterials sowohl steil als auch einigermaßen parallel verlaufen. Da dies hier augenscheinlich nicht zutrifft, wird die Filterstabilität zusätzlich mit dem Filterkriterium nach Cistin / Ziems überprüft.

Dieses Kriterium bietet den Vorteil, dass der abzufilternde Boden und der Filter eine unterschiedliche Körnungscharakteristik haben können. Die Filterregeln liefern das zulässige Abstandsverhältnis A_{50} als Funktion der Ungleichförmigkeit U_I des abzufilternden Bodens sowie der Ungleichförmigkeit U_{II} des Filters bestimmt wird und damit auch unterschiedlich eng oder weit gestufte Körnungslinien zulässig sind.



Die Ungleichförmigkeiten betragen für die vorliegenden Böden:

$$U_I = \frac{d_{60,I}}{d_{10,I}} = \frac{0,3}{0,18} = 1,7 \quad (46)$$

$$U_{II} = \frac{d_{60,II}}{d_{10,II}} = \frac{15}{0,5} = 30 \quad (47)$$

Das zulässige Abstandsverhältnis zur A_{50} ergibt sich aus Abbildung 45.

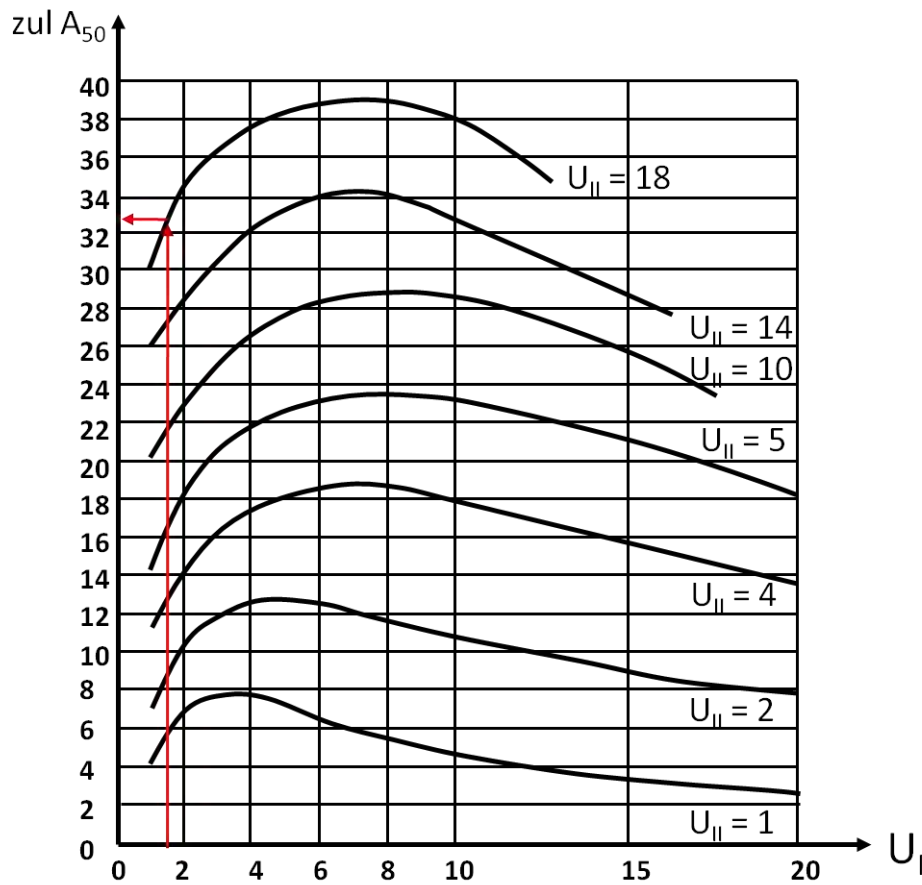
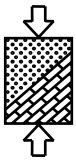


Abbildung 45: Zulässige Abstandsverhältnisse nach Cistin / Ziems nach [6]

Das in Abbildung 45 enthaltene Diagramm deckt eigentlich nur Ungleichförmigkeiten des Filters bis $U_{II} = 18$ ab.



Hierfür ergibt sich zu $A_{50} = 33$. Das vorhandene Abstandsverhältnis beträgt

$$A_{50} = \frac{d_{50,II}}{d_{50,I}} = \frac{12}{0,3} = 40 \quad (48)$$

und ist damit größer. Für den tatsächlich vorhandenen Ungleichförmigkeitsgrad U_{II} dürfte das zulässige Abstandsverhältnis bei entsprechender Extrapolation des Diagramms jedoch über dem vorhandenen Wert von 40 liegen.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Filterstabilität gewährleistet ist. Auch wenn dies rechnerisch doch nicht der Fall sein sollte, ist aufgrund der sehr großen Mächtigkeit des Filters dennoch nicht zu erwarten, dass es zum Ausspülen von Feinanteilen an der Baugrubensohle kommt.

5.3.3 Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch durch Auswertung eines auf FE-Berechnungen basierenden Strömungsnetzes

Für den Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch wurde der hydraulische Gradient für die Strömungskraft anhand eines Finite-Elemente-Modells mit dem Programm GGU-SS-Flow3D ermittelt. Dabei wurde aus Symmetriegründen nur eine Baugrubenhälfte samt Halbraum abgebildet (vgl. Abbildung 46).

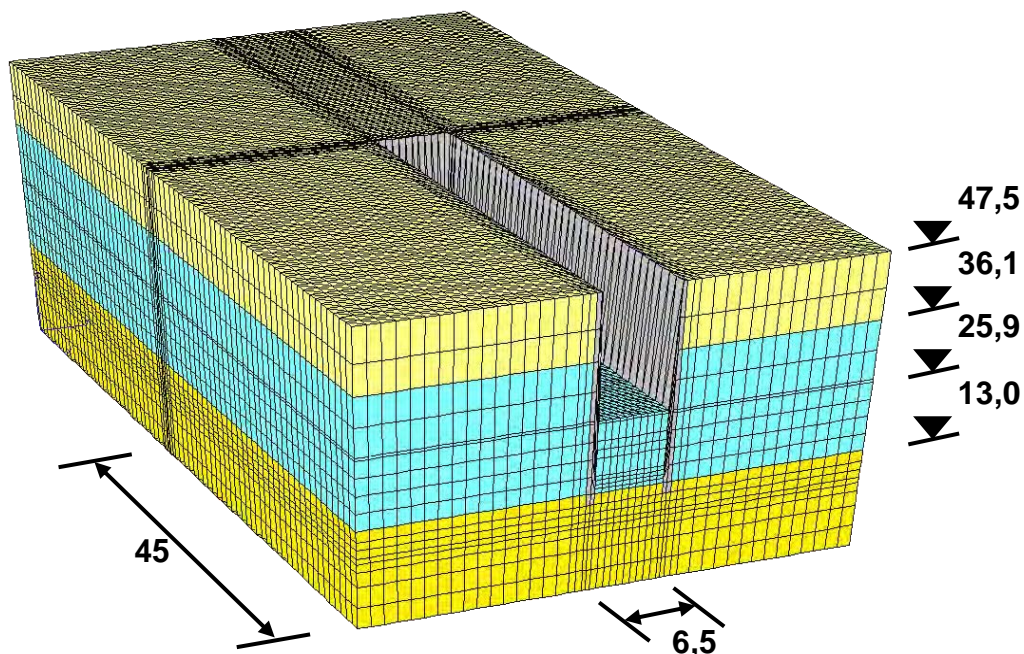
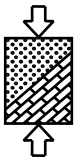


Abbildung 46: FEM-Modell „Haltestelle Rathaus“

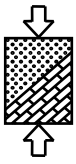


Aus der Iteration der Einbindetiefen für den Nachweis noch nach alter Norm DIN 1054 mit globalem Sicherheitsbeiwert ($\eta = 1,5$) ergab sich eine erforderliche Einbindetiefe im Eckbereich bzw. an der Stirnseite von ca. 19 m (ca. 6 m im Tertiär). An der Längsseite war die Mindesteinbindetiefe ins Tertiär von 2,0 m maßgebend, was einer Gesamteinbindetiefe von ca. 15 m entspricht.

Aus der Berechnung ergab sich in der Baugrubenecke an der Unterseite des Bruchkörpers (Dreieck) ein Restpotential von $\Delta h_m = 14,2$ m. Berechnet man damit den Ausnutzungsgrad μ in der Ecke nach DIN 1054: 2005-01, d.h. unter Berücksichtigung des neuen Teilsicherheitskonzeptes, so erhält man:

$$\mu = \frac{S'_k \cdot \gamma_H}{G'_k \cdot \gamma_{G, \text{stb}}} = \frac{(10 \cdot 14,2) \cdot 1,3}{(0,5 \cdot 20 + 18,4 \cdot 11) \cdot 0,95} = 0,92 \quad (49)$$

Das heißt, man könnte die Einbindetiefe nach neuem Konzept geringfügig reduzieren.



5.4 Vergleich der Beispielrechnungen

5.4.1 Vergleich der Verfahren für das vereinfachte Modell

Für das vereinfachte Baugrundmodell nach 5.2 wurde die erforderliche Einbindetiefe sowohl mit Hilfe der Bemessungsdiagramme als auch mit gängigen Näherungsverfahren ermittelt. In Abbildung 47 sind hierfür die Ergebnisse der einzelnen Verfahren gegenübergestellt.

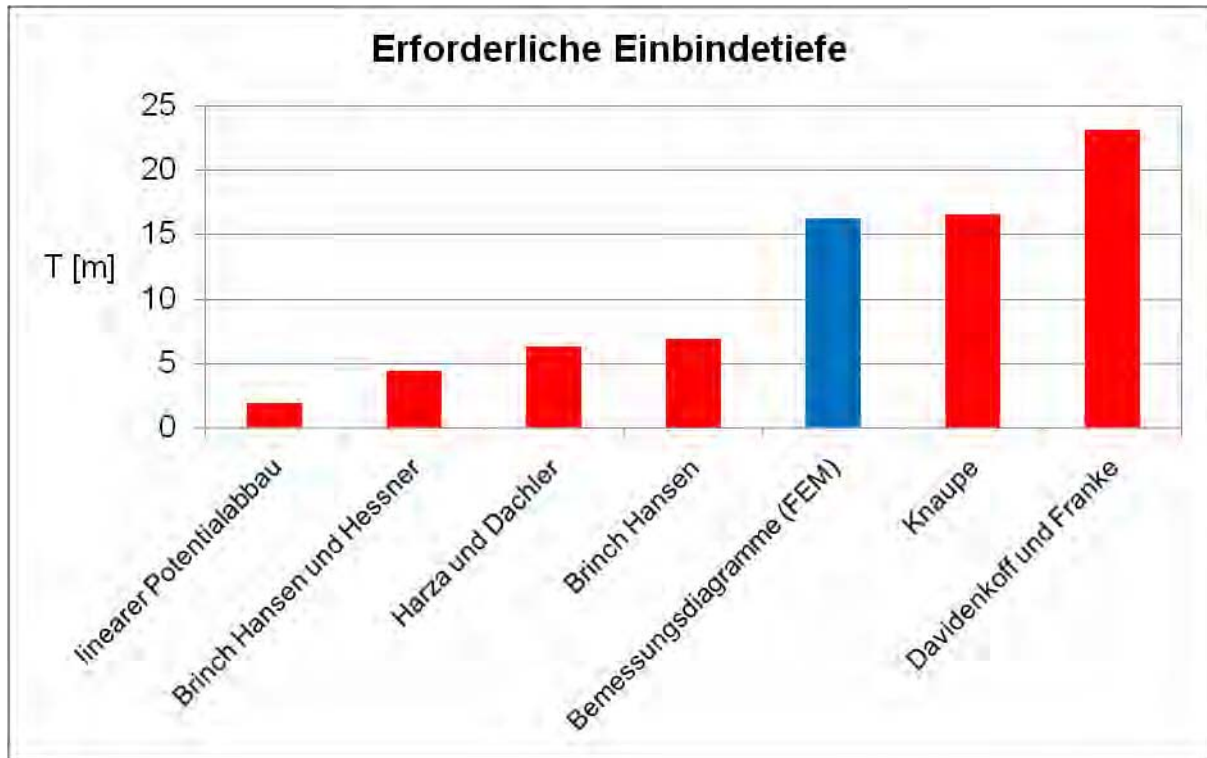
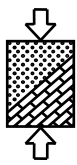


Abbildung 47: Vergleich gängiger Näherungsverfahren und der Bemessungsdiagramme

Man erkennt, dass gerade diejenigen Verfahren, welche nicht die Geometrie der Baugrube, die Mächtigkeit des Aquifers und die räumliche Anströmung berücksichtigen, 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.



5.4.2 Vergleich realitätsnahes und vereinfachtes Baugrundmodell

Der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch wurde für die „Haltestelle-Rathaus“ auf der Grundlage zweier unterschiedlicher Baugrundmodelle geführt.

Mit der nach Abbildung 43 erhaltenen Einbindetiefe für das vereinfachte Baugrundmodell würde die Schlitzwand noch ca. 3,3 m in das Tertiär einbinden. Die numerische Berechnung für die tatsächliche Baugrundsituation nach 5.3.3 unter Berücksichtigung der Bodenschichtung ergab eine Einbindetiefe in das Tertiär von ca. 6 m. Berücksichtigt man den Ausnutzungsgrad nach (49) von $\mu = 0,92$, so verbleibt eine geschätzte Differenz von etwa $\Delta T \approx 2,5$ m.

Bei der tatsächlich vorliegenden Baugrundsichtung wird das Potential überwiegend erst im Tertiär abgebaut, das im Vergleich zur Kies-Sand-Schicht deutlich undurchlässiger ist. Es zeigt sich demnach, dass der Ansatz von homogenem Boden anstelle von geschichtetem Baugrund zu Ergebnissen führen kann, welche auf der unsicheren Seite liegen. Bei solchen Baugrundsituationen ist demnach eine genauere Untersuchung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Durchlässigkeitsbeiwerte erforderlich.

Der Vergleich verschiedener Näherungsverfahren für das vereinfachte Modell erfolgte in 5.4.1. An dieser Stelle soll jedoch nochmals gezeigt werden, welches unsichere Ergebnis der Ansatz eines linearen Potentialabbaus bei Berücksichtigung der Schichtung liefert.

Hierzu wird vereinfacht und auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass der Potentialabbau nur in der weniger durchlässigen Tertiärschicht stattfindet (vgl. Abbildung 48).

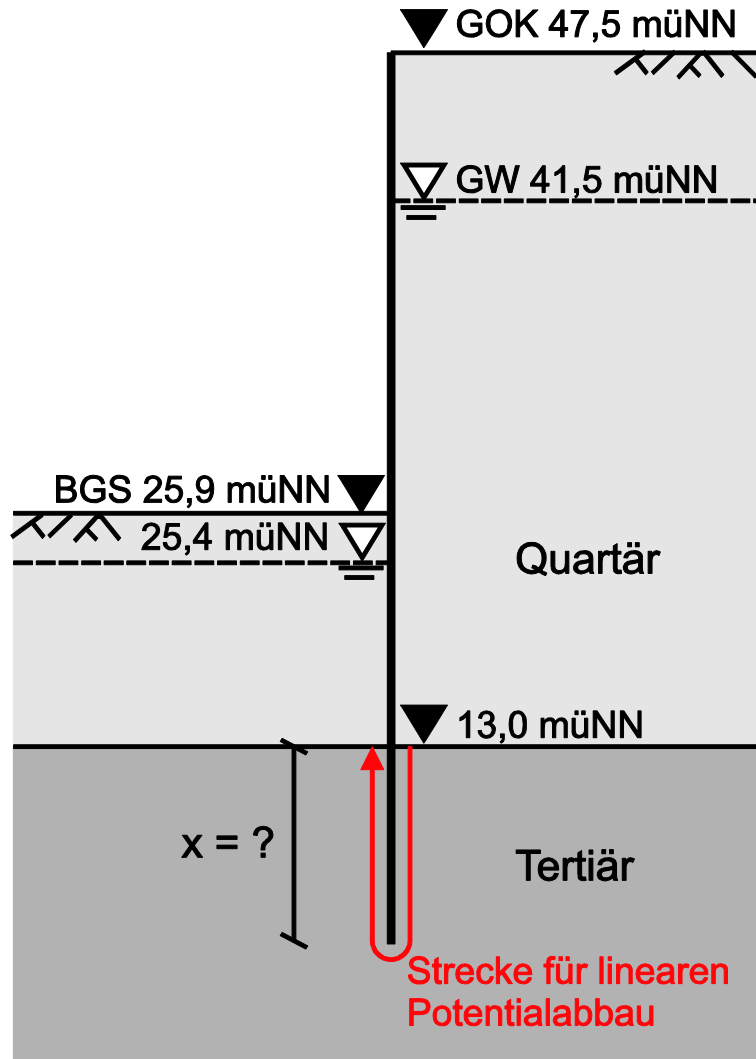
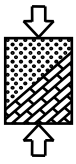


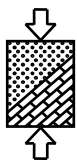
Abbildung 48: Systemskizze „Haltestelle Rathaus“ mit Ansatz von linearem Potentialabbau

Die Grenzzustandsbedingung nach Gleichung (3) lautet dann:

$$8,05\text{m} \cdot 10\text{kN/m}^3 \cdot 1,30 \leq (0,5\text{m} \cdot 20\text{kN/m}^3 + 12,4\text{m} \cdot 11\text{kN/m}^3 + x \cdot 11\text{kN/m}^3) \cdot 0,95 \quad (50)$$

Aufgelöst nach x ergibt sich eine erforderliche Einbindetiefe ins Tertiär von $T_{\text{Tertiär}} = x = -3,29 \text{ m}$. Danach wäre also keine Einbindung ins Tertiär notwendig.

Der Vergleich der beiden Systeme hat gezeigt, dass bei vorhandener Baugrundsichtung nähere Untersuchungen anzustellen sind. Weiterhin hat die Beispielrechnung mit linearem Potentialabbau nochmals verdeutlicht, dass einfache Näherungsverfahren äußerst unsichere Ergebnisse liefern können.



6 Zusammenfassung

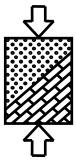
In der Praxis werden oftmals Näherungsverfahren zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe zur Gewährleistung der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch angewandt. Nach den gängigen Normen ist dies jedoch eigentlich nur in einfachen Fällen zulässig. Vielmehr sollte die erforderliche Einbindetiefe durch Auswertung eines Strömungsnetzes ermittelt werden.

In Kapitel 2 dieses Berichts wird zunächst ein Überblick über den Stand der Kenntnis gegeben. Dieser beinhaltet neben den in DIN 1054 und EAB sowie EAU enthaltenen Regeln und Empfehlungen die Beschreibung gängiger Näherungsverfahren, die oftmals die Geometrie der Baugrube, die Mächtigkeit des Aquifers und die räumliche Zuströmung im Eckbereich nicht berücksichtigen.

In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der eigenen numerischen Berechnungen vorgestellt, die die vorgenannten Einschränkungen nicht enthalten. Es werden jeweils für den ebenen und den räumlichen Fall sowohl die Voruntersuchungen und Kontrollrechnungen, als auch die eigentlichen Berechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe beschrieben und die Ergebnisse tabellarisch dargestellt.

Die Auswertung der Berechnungen erfolgt in Kapitel 4. Aus den erhaltenen Ergebnissen werden dimensionslose Bemessungsdiagramme erstellt, mit denen die erforderliche Einbindetiefe in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen direkt abgelesen werden kann. Für den ebenen Fall stehen dem Anwender insgesamt acht Diagramme zur Verfügung, welche sich durch günstigen und ungünstigen Baugrund sowie durch die Größe der Bodenwichte unterscheiden. Im räumlichen Fall beschränken sich die Diagramme auf günstigen Baugrund und eine Wichte von $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$. Durch die Differenzierung zwischen Baugrubenecke, Stirn- und Längsseite sowie quadratischer, rechteckiger und langgestreckter Baugruben ergeben sich auch hierfür acht Diagramme. Weiterhin wird auf Grundlage detaillierter Untersuchungen eine Empfehlung zur Abtreppung der Verbauwand auf Basis der ermittelten Einbindetiefen ausgesprochen.

Zusätzlich wird eine Interpolationsfunktion vorgestellt, die im ebenen Fall eine sehr gute Näherung darstellt, um von den Ergebnissen für $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$ auf die erforderliche Einbindetiefe für andere Wichten zu schließen. Erste Kontrollrechnungen bestätigen dies zwar auch für den räumlichen Fall, aber zur Verifizierung wären weitergehende Untersuchungen notwendig.

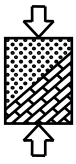


In Kapitel 5 wird die Anwendung der Bemessungsdiagramme an einem konkreten Beispiel demonstriert. Hierfür wird zunächst ein vereinfachtes System ohne Baugrundsichtung betrachtet. Weiterhin wird die erforderliche Einbindetiefe auch mit den in Kapitel 2 vorgestellten Näherungsverfahren ermittelt. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse verdeutlicht das große Unsicherheitspotential, welches zumindest in einigen Verfahren steckt. Abschließend wird der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch an diesem Beispiel inklusive Berücksichtigung der Bodenschichtung geführt. Hierbei zeigt sich, dass bei vorhandener Baugrundsichtung weitergehende Untersuchungen notwendig sind.

7 Abstimmung mit der Betreuungsgruppe und Empfehlungen

Die Ergebnisse wurden mit den Mitgliedern der Betreuungsgruppe Frau Dipl.-Ing. Annette Gandyra und Herrn Dipl.-Ing. Wolfram Faller abgestimmt. Dabei ergaben sich folgende Ergänzungen und Anmerkungen:

- 1) Das den Untersuchungen zugrunde liegende Verhältnis der Wanddicke d zur Wasserspiegeldifferenz H beträgt $d/H = 0,05$. Für eine 20 m tiefe Baugrube entspricht dies einer Wanddicke von 1 m, was für Schlitz- und Bohrpfahlwände üblich ist. Es wurde die Frage gestellt, ob sich die Ergebnisse für eine deutlich dünnere Spundwand wesentlich ändern würden. Erläuterungen hierzu wurden in Kapitel 3.1.3 eingearbeitet.
- 2) Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass eine Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse sowie der räumlichen Anströmung zwingend notwendig ist. Mit den vorliegenden Diagrammen ist dies auf einfache Weise möglich. Die Ergebnisse sollen dem Deutschen Institut für Normung e.V. sowie den nachgeordneten Gremien wie dem Arbeitskreis 2.2 „Ufereinfassungen“ und dem Arbeitskreis 2.4 „Baugruben“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. zur Verfügung gestellt werden, damit diese die Möglichkeit haben, die aus den Untersuchungen gewonnenen Kenntnisse in zukünftigen Normungen und Empfehlungen einzuarbeiten. Aus Sicht der forschenden Stelle sowie der Betreuungsgruppe scheint es sinnvoll, dass innerhalb der DIN 1054 auf die Bedeutung der Geometrie und der räumlichen Wirkung deutlicher als bisher hingewiesen wird und die entwickelten Bemessungsdiagramme in den ergänzenden Empfehlungen als Bemessungshilfen aufgenommen werden. Außerdem sollen die Ergebnisse in anerkannten Fachzeitschriften veröffentlicht werden, um sie einem breiten Anwenderkreis zugänglich zu machen.
- 3) Zur Vervollständigung der bisherigen Untersuchungen sollte auf Vorschlag der Betreuungsgruppe eine Fortsetzung der Forschungsarbeiten erfolgen. Diese sollten zum Ziel haben, auch für ungünstige Baugrundverhältnisse



Bemessungsdiagramme für den räumlichen Fall aufzustellen. Weiterhin sollten Untersuchungen für geschichteten Baugrund angestellt werden, da sich die erforderliche Einbindetiefe im Fall der Überlagerung einer wenig durchlässigen Schicht durch eine durchlässigere Schicht (vgl. Abbildung 49) gegenüber den bisher betrachteten homogenen Verhältnissen vergrößert. Dies liegt an der gegenüber homogenem Baugrund verkürzten Strecke für den Potentialabbau.

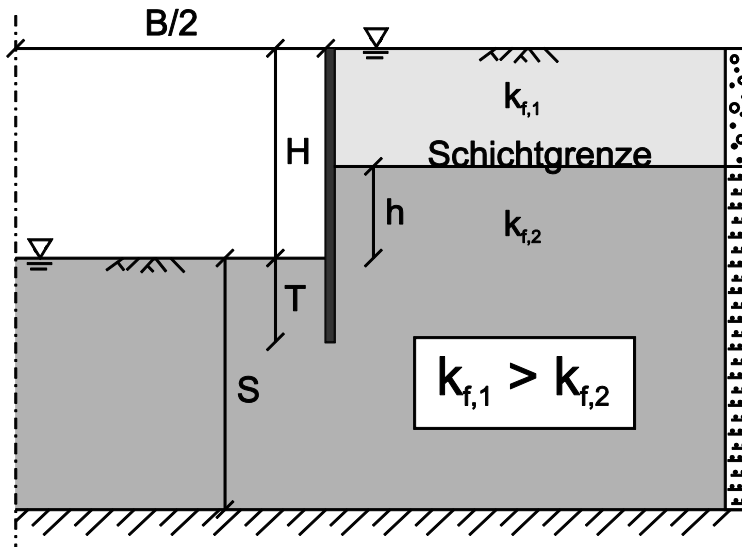


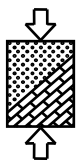
Abbildung 49: Systemskizze für geschichteten Baugrund

Aufgrund der zusätzlichen Variablen h/H und $k_{f,1}/k_{f,2}$ ergeben sich eine Vielzahl von möglichen Baugrundsituationen. Ziel der weiterführenden Untersuchungen für geschichteten Baugrund kann nicht sein, alle möglichen Situationen zu erfassen. Vielmehr sollen exemplarisch für bestimmte Randwerte der vorgenannten Variablen auf der sicheren Seite liegende Bemessungshilfen erarbeitet werden. Diese liefern für den bei komplizierten Baugrundverhältnissen im Einzelfall zu führenden Nachweis realitätsnahe Eingangswerte, was den Iterationsaufwand zur Bestimmung der Einbindetiefe T deutlich begrenzt. Sie dienen aber auch der schnellen Überprüfung der Plausibilität.

Aachen, den _____

(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler)

(Dipl.-Ing. Benjamin Aulbach)



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Systemskizze Baugrube	6
Abbildung 2:	Skizze Spundwand in einem Flussbett nach Dachler und Baugrube	9
Abbildung 3:	Beiwerte zur Ermittlung des Druckgefälles aus [22]	10
Abbildung 4:	Diagramm zur Berechnung des Potentials am Spundwandfuß nach [9]	11
Abbildung 5:	Bemessungsnomogramm zur Ermittlung von ω nach [15]	13
Abbildung 6:	Erforderliche Einbindetiefe für den ebenen Fall nach [18]	14
Abbildung 7:	Eckvertiefungsverhältnis für breite (links) und für schmale (rechts) Baugruben nach [16]	15
Abbildung 8:	Potentialliniennetz berechnet mit GGU-SS-Flow2D	16
Abbildung 9:	Systemskizze mit Bruchkörper nach Terzaghi	17
Abbildung 10:	Systemskizze mit Spannungen auf den Bodenkörper	18
Abbildung 11:	Ausnutzungsgrad μ für verschiedene Einbindetiefen T/H über der Breite b/T des betrachteten Körpers bei Ansatz von Reibung für unterschiedliche Baugrubenbreiten B/H und Mächtigkeiten des Grundwasserleiters S/H	20
Abbildung 12:	Ausnutzungsgrad μ für verschiedene Einbindetiefen T/H über der Breite b/T des betrachteten Körpers bei Ansatz der Reibung mit K_{ph} statt K_0	21
Abbildung 13:	Modellgröße des Berechnungssystem	22
Abbildung 14:	Ausnutzungsgrad für verschieden große Berechnungsmodelle	23
Abbildung 15:	Ausnutzungsgrad für verschiedene Verhältnisse d/H	24
Abbildung 16:	Systemskizze für den räumlichen Fall	28
Abbildung 17:	Potentiale im Schnitt entlang der Verbauwand auf der Baugrubeninnenseite	29
Abbildung 18:	Maßgebender Bruchkörper im räumlichen Fall (Grundriss)	30
Abbildung 19:	Ausnutzungsgrad für verschieden breite Körper unterschiedlicher Form bei quadratischen Baugruben	31
Abbildung 20:	Ausnutzungsgrad für verschieden breite Bruchkörper unterschiedlicher Form bei langgestreckten Baugruben	32
Abbildung 21:	Bruchkörper bei sehr schmalen Baugruben	34
Abbildung 22:	FE-Netz im Grundriss in Sofistik (oben) und in GGU (unten)	37
Abbildung 23:	Punkte für Vergleich der Potentiale nach GGU und Sofistik	38
Abbildung 24:	Vergleich der Ergebnisse mit GGU und Sofistik	38
Abbildung 25:	Aus Kontrollrechnungen erhaltene Ausnutzungsgrade im ebenen Fall für günstigen Baugrund	39
Abbildung 26:	Aus Kontrollrechnungen erhaltene Ausnutzungsgrade im ebenen Fall für ungünstigen Baugrund	40

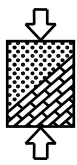
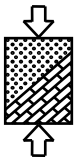
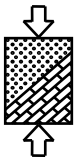


Abbildung 27:	Aus Kontrollrechnungen erhaltene Ausnutzungsgrade im räumlichen Fall	41
Abbildung 28:	Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für günstigen Baugrund im ebenen Fall	43
Abbildung 29:	Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für ungünstigen Baugrund im ebenen Fall	44
Abbildung 30:	Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für quadratische Baugruben mit $B/L = 1,0$	45
Abbildung 31:	Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für rechteckige Baugruben mit $B/L = 0,5$	46
Abbildung 32:	Bemessungsdiagramme zur Bestimmung der erforderlichen Einbindetiefe für langgestreckte Baugruben mit $B/L = 0,3$	47
Abbildung 33:	Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand bei konstanter Einbindetiefe.....	48
Abbildung 34:	Erforderliche Einbindetiefe entlang der Verbauwand	49
Abbildung 35:	Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand für Stufen bei $0,3 \cdot B$ und $0,3 \cdot L$ für $B/L=0,5$ und $B/H=5,0$	50
Abbildung 36:	Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand für Stufen bei $0,3 \cdot B$ und $0,3 \cdot L$ für $B/L=0,5$ und $B/H=1,0$	51
Abbildung 37:	Vergleich der erforderlichen Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für günstigen Baugrund	52
Abbildung 38:	Vergleich erforderlichen der Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für ungünstigen Baugrund	53
Abbildung 39:	Vergleich der erforderlichen Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für $B/L = 1,0$	54
Abbildung 40:	Vergleich der erforderlichen Einbindetiefe aus FEM-Berechnung und mittels Faktorisierung für $B/L = 0,3$	55
Abbildung 41:	Quer- und Längsschnitt durch die „Haltestelle Rathaus“ [http://www.nord-sued-stadtbahn.de/].....	56
Abbildung 42:	Skizze der Schlitzwandbaugrube „Haltestelle Rathaus“	57
Abbildung 43:	Bemessungsdiagramm zur Ermittlung der Einbindetiefe in der Ecke	60
Abbildung 44:	Körnungslinien des Baugrundes an der „Haltestelle Rathaus“	64
Abbildung 45:	Zulässige Abstandsverhältnisse nach Cistin / Ziems nach [6]	65
Abbildung 46:	FEM-Modell „Haltestelle Rathaus“	66
Abbildung 47:	Vergleich gängiger Näherungsverfahren und der Bemessungsdiagramme.....	68
Abbildung 48:	Systemskizze „Haltestelle Rathaus“ mit Ansatz von linearem Potentialabbau	70
Abbildung 49:	Systemskizze für geschichteten Baugrund.....	73



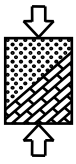
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 2 DIN 1054 Ber4:2008-10	4
Tabelle 2: Wertebereich der ebenen Berechnungen	25
Tabelle 3: Untersuchte Wichtenverhältnisse	25
Tabelle 4: a) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,2$ b) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,1$	26
Tabelle 5: a) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,0$ b) T/H für günstig, $\gamma'/\gamma_w = 0,9$	26
Tabelle 6: a) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,2$ b) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,1$	27
Tabelle 7: a) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 1,0$ b) T/H für ungünstig, $\gamma'/\gamma_w = 0,9$	27
Tabelle 8: Wertebereich 3D-Berechnungen	33
Tabelle 9: Einbindetiefe für quadratische Baugruben a) B/L = 1,0 (Ecke) b) B/L = 1,0 (Stirn- und Längsseite)	34
Tabelle 10: Einbindetiefe für den Eckbereich bei rechteckigen Baugruben a) B/L = 0,5 b) B/L = 0,3	35
Tabelle 11: Einbindetiefe für die Mitte der Stirnseite bei rechteckigen Baugruben a) B/L = 0,5 b) B/L = 0,3	35
Tabelle 12: Einbindetiefe für die Mitte der Längsseite bei rechteckigen Baugruben a) B/L = 0,5 b) B/L = 0,3	35
Tabelle 13: Randbedingungen für Vergleichsrechnung GGU und Sofistik	36

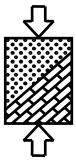


Literaturverzeichnis

- [1] DIN 1054: Baugrund, Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau.
Berlin, Beuth Verlag GmbH, Januar 2005
- [2] Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ EAB
3. Auflage 1994
Verlag Ernst & Sohn
- [3] Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ EAB
4. Auflage 2006
Verlag Ernst & Sohn
- [4] Empfehlungen des Arbeitskreises „Ufereinfassungen, Häfen und
Wasserstraßen“ EAU
9. Auflage 1996
Verlag Ernst & Sohn
- [5] Empfehlungen des Arbeitskreises „Ufereinfassungen, Häfen und
Wasserstraßen“ EAU
10. Auflage 2004
Verlag Ernst & Sohn
- [6] Merkblatt „Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen“ MAK
Bundesanstalt für Wasserbau, 1989
- [7] Brinch Hansen, J. und Hessner, J.
Geotesniske Beregninger
Tekniske Forlag, Kopenhagen 1959
- [8] Dachler, R.
Grundwasserströmung
Verlag von Julius Springer, 1936
- [9] Davidenkoff, R. und Franke, L.
Untersuchung der räumlichen Sickerströmung in eine umpundete Baugrube
in offenen Gewässern
Die Bautechnik 42, S. 298-307, 1965
- [10] Davidenkoff, R. und Franke, L.
Räumliche Sickerströmung in eine umpundete Baugrube im Grundwasser
Die Bautechnik 43, S. 401-409, 1966



- [11] Davidenkoff, R.
Unterläufigkeit von Stauwerken
Werner Verlag 1970
- [12] GGU mbH
Am Hafen 22
38112 Braunschweig
- [13] Harza, L.F.
Uplift and seepage under dams on sand
Transactions American Soc. of Civ. Eng., Vol. 100, S. 1532-1406, 1935
- [14] Kastner, H.
Über die Standsicherheit von Spundwänden in strömendem Grundwasser
Die Bautechnik, Jahrgang 21, Heft 8/9, S. 66-70, 1943
- [15] Knaupe, W.
Hydraulischer Grundbruch an Baugrubenumschließungen
Deutsche Bauakademie Berlin 1968
- [16] Knaupe, W.
Baugrubensicherung und Wasserhaltung
2. Auflage 1983
Verlag für Bauwesen
- [17] McNamee, J.
Seepage into a Sheeted Excavation
Géotechnique, Vol. 1, Nr. 4, S. 229-241, 1949
- [18] Schmitz, S.
Hydraulische Grundbruchsicherheit bei räumlicher Anströmung
Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik
Universität-Gesamthochschule-Essen 1989
Verlag Glückauf GmbH
- [19] Sofistik AG
Bruckmannring 38
85764 Oberschleissheim
- [20] Terzaghi, K. und Peck, R. B.
Soil Mechanics in Engineering Practice
Second Edition 1967
John Wiley & Sons, Inc.

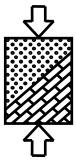


- [21] Terzaghi, K. und Peck, R. B.
Die Bodenmechanik in der Baupraxis
Springer-Verlag, 1961

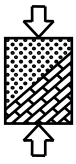
- [22] Weißenbach, A.
Baugrubensicherung
Grundbau – Taschenbuch, Teil 3
4. Auflage 1992
Verlag Ernst & Sohn

- [23] Weißenbach, A.
Baugrubensicherung
Grundbau – Taschenbuch, Teil 3
6. Auflage 2001
Verlag Ernst & Sohn

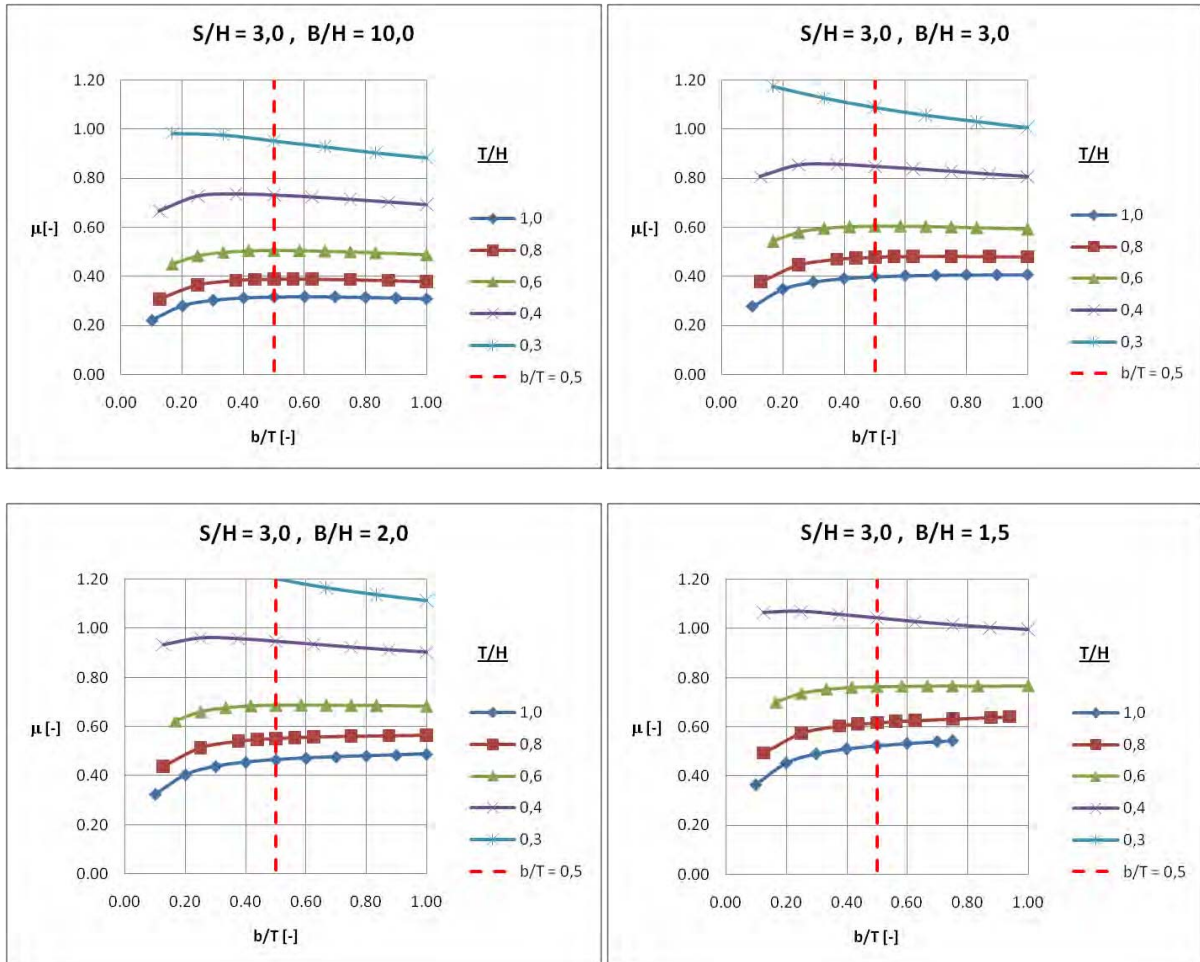
- [24] Ziegler, M.
Geotechnische Nachweise nach DIN 1054
Einführung mit Beispielen
2. Auflage 2006
Verlag Ernst & Sohn

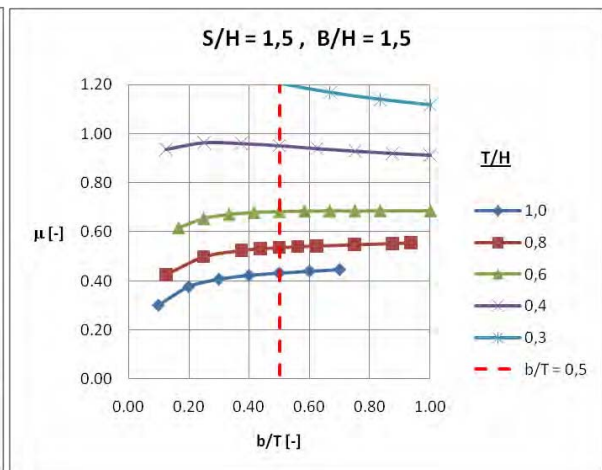
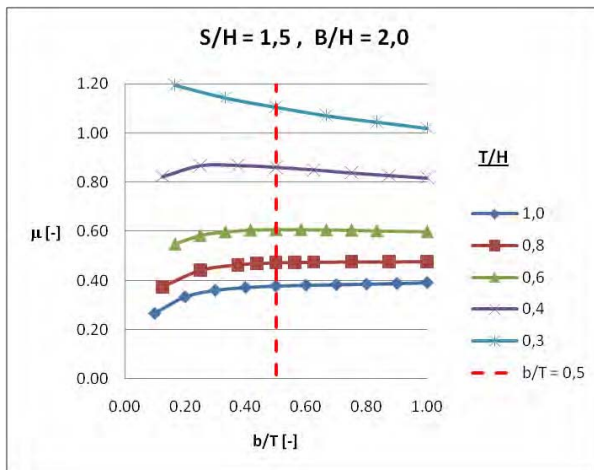
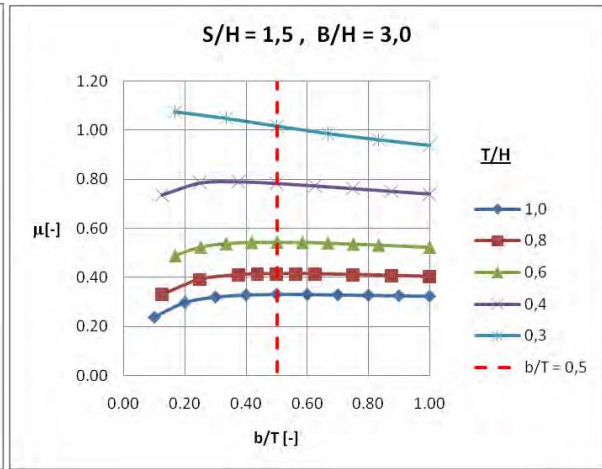
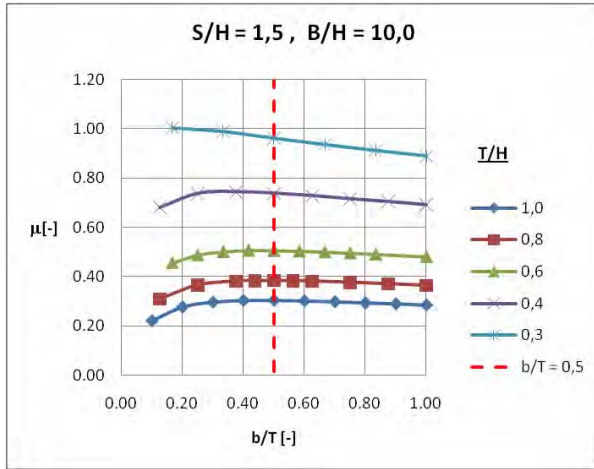
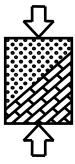


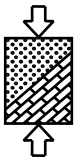
Anhang



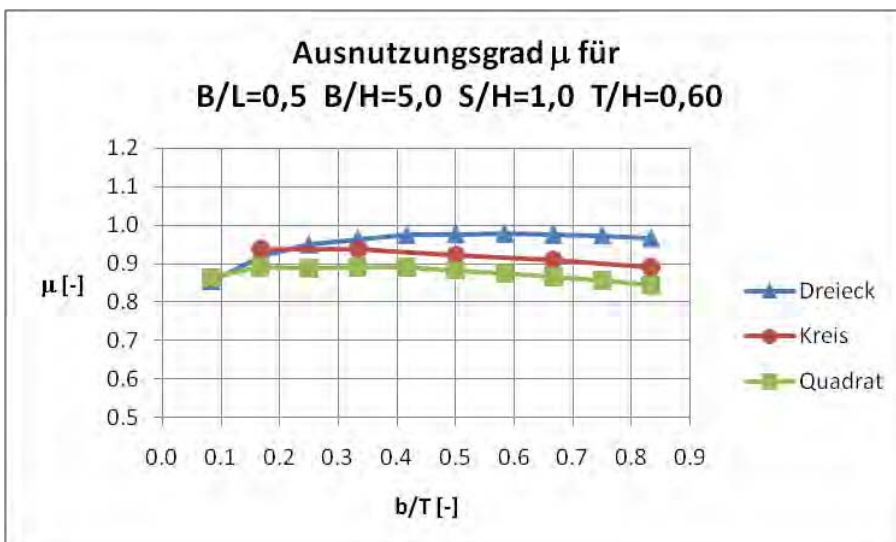
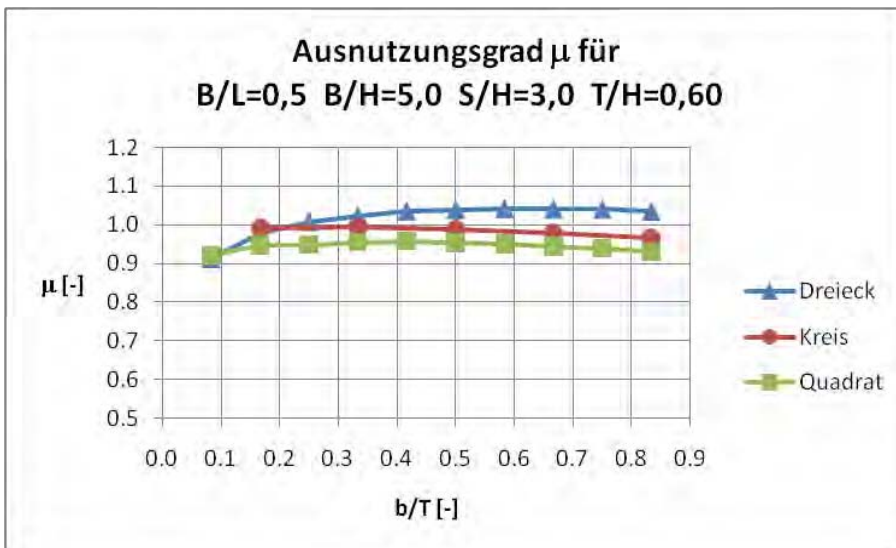
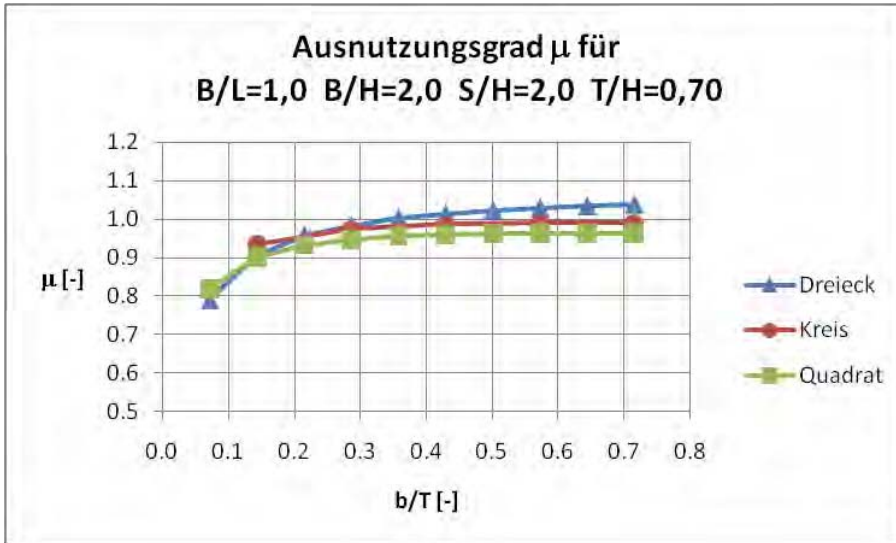
Anhang A1: Ausnutzungsgrad für verschiedene Bruchkörper im ebenen Fall und günstigen Baugrund mit $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$

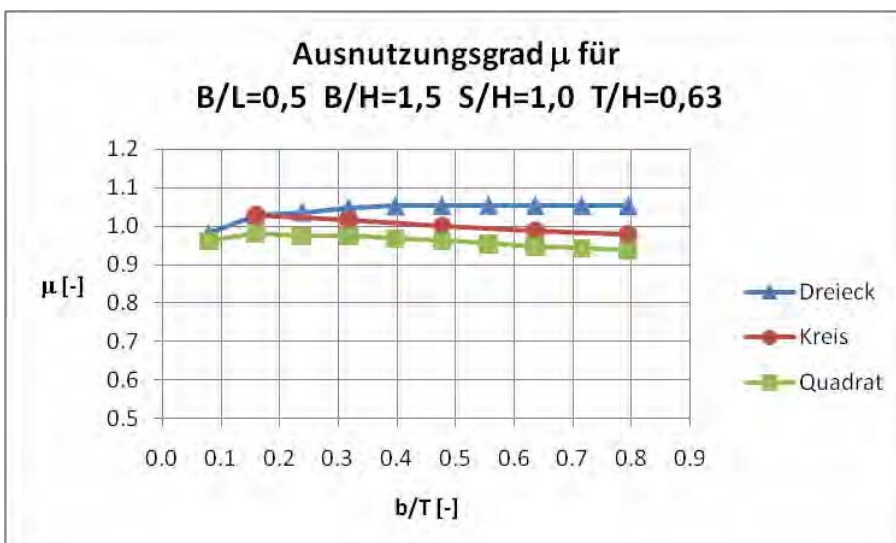
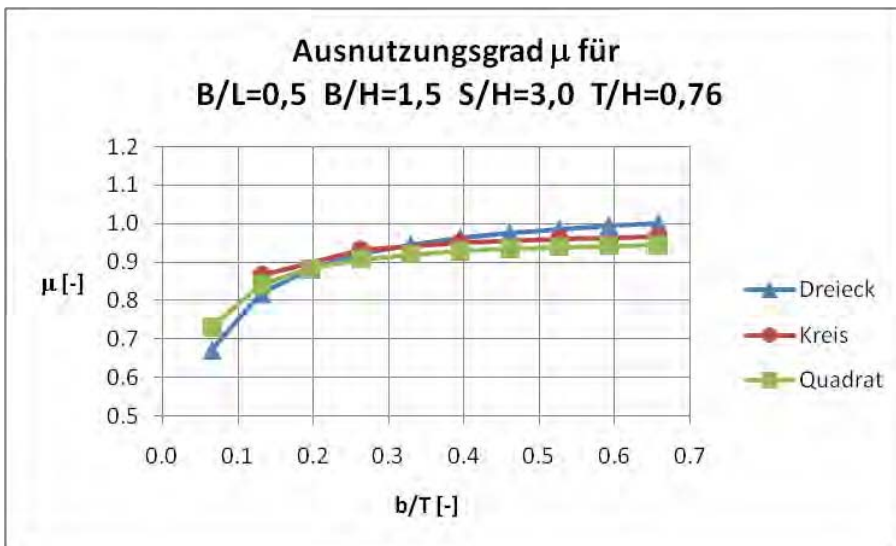
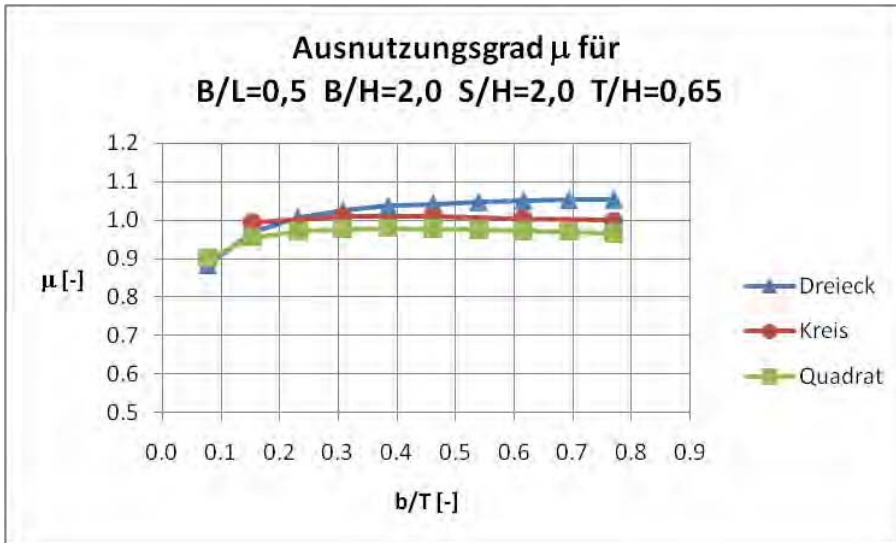
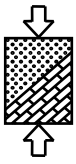


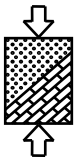




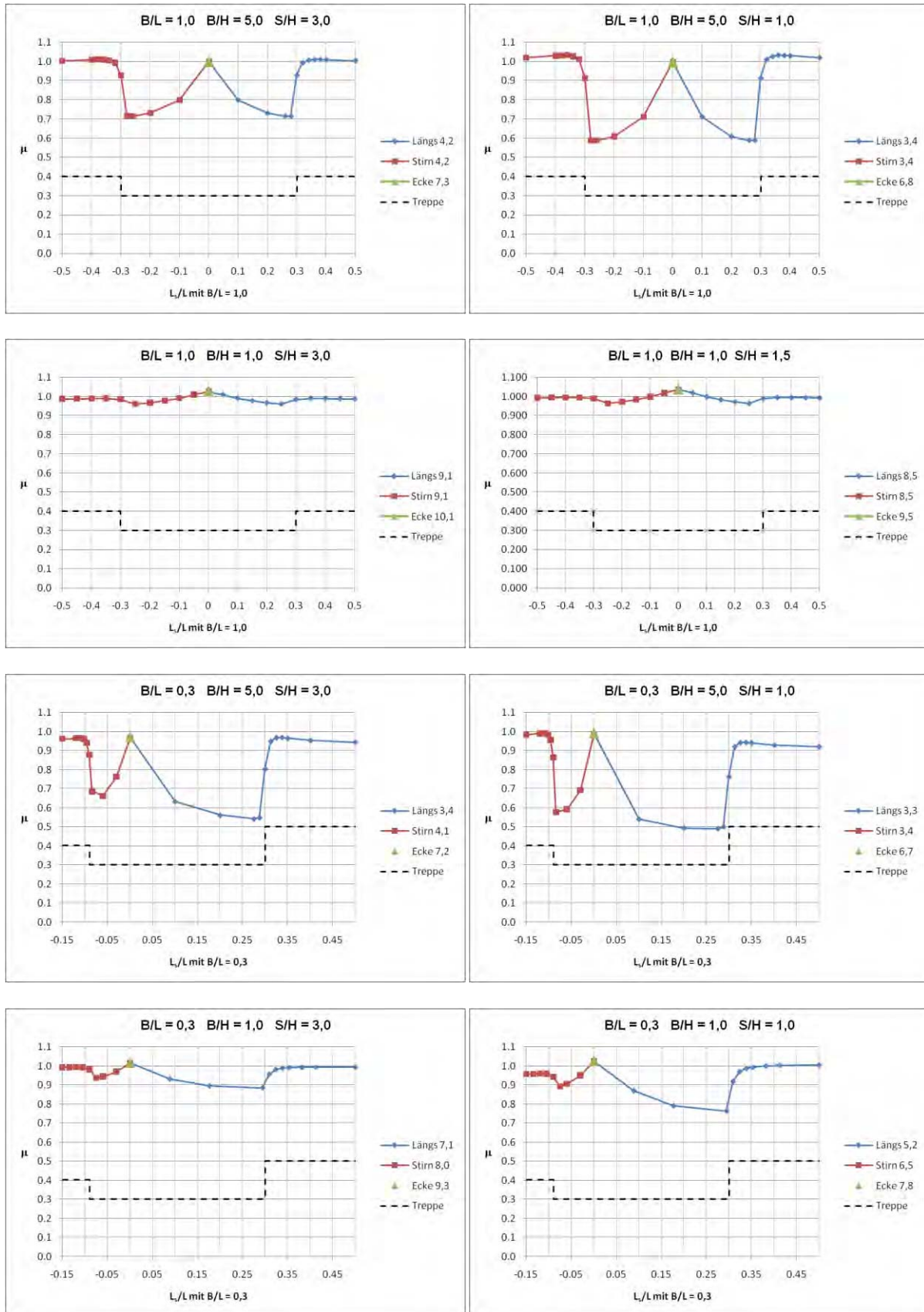
Anhang A2: Ausnutzungsgrad für verschiedene Bruchkörper im räumlichen Fall und günstigen Baugrund mit $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$

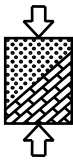






Anhang A3: Ausnutzungsgrad entlang der Verbauwand





Anhang A4: Vergleich der berechneten und durch Faktorisierung erhaltenen Einbindetiefen

9,00 LF2, günstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=0,9$

Faktor: $f = (11/\gamma')^2$

Abweichung:

T/H	Einbindetiefe					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,490	0,957	1,200	1,240	1,250	1,260
0,50	0,462	0,828	0,990	1,045	1,070	1,075
0,75	0,423	0,690	0,825	0,880	0,910	0,915
1,00	0,398	0,585	0,695	0,750	0,780	0,800
1,50	0,380	0,480	0,555	0,600	0,625	0,635
2,00	0,375	0,432	0,480	0,515	0,550	0,556
3,00	0,375	0,408	0,430	0,450	0,475	0,475
5,00	0,375	0,403	0,407	0,415	0,420	0,420

T/H	Einbindetiefe					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,641	1,152	1,278	1,307	1,318	1,328
0,50	0,572	0,910	1,023	1,069	1,082	1,096
0,75	0,486	0,719	0,823	0,871	0,890	0,903
1,00	0,438	0,598	0,691	0,737	0,757	0,769
1,50	0,413	0,491	0,551	0,587	0,607	0,624
2,00	0,404	0,445	0,486	0,514	0,531	0,545
3,00	0,402	0,421	0,438	0,453	0,469	0,478
5,00	0,402	0,417	0,420	0,425	0,426	0,432

Abweichung in % von H						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	15,2	19,5	7,8	6,7	6,8	6,8
0,50	11,1	8,2	3,3	2,4	1,2	2,1
0,75	6,3	2,9	-0,2	-0,9	-2,0	-1,2
1,00	4,0	1,3	-0,4	-1,3	-2,3	-3,1
1,50	3,3	1,1	-0,4	-1,3	-1,8	-1,1
2,00	2,9	1,3	0,6	-0,1	-1,9	-1,1
3,00	2,7	1,3	0,8	0,3	-0,6	0,3
5,00	2,7	1,4	1,3	1,0	0,6	1,2

10,00 LF2, günstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=1,0$

T/H	Einbindetiefe					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,486	0,920	1,065	1,095	1,105	1,115
0,50	0,442	0,755	0,870	0,910	0,930	0,938
0,75	0,395	0,610	0,710	0,750	0,780	0,790
1,00	0,367	0,510	0,600	0,635	0,660	0,675
1,50	0,340	0,415	0,470	0,507	0,525	0,537
2,00	0,335	0,380	0,415	0,443	0,460	0,470
3,00	0,333	0,360	0,375	0,390	0,400	0,412
5,00	0,332	0,355	0,357	0,360	0,365	0,370

T/H	Einbindetiefe					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,553	0,992	1,101	1,126	1,135	1,144
0,50	0,493	0,784	0,881	0,921	0,933	0,944
0,75	0,419	0,619	0,709	0,751	0,767	0,778
1,00	0,378	0,515	0,595	0,635	0,652	0,663
1,50	0,356	0,423	0,475	0,506	0,523	0,538
2,00	0,348	0,383	0,419	0,443	0,458	0,469
3,00	0,347	0,363	0,378	0,390	0,404	0,412
5,00	0,347	0,359	0,362	0,366	0,367	0,372

Abweichung in % von H						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	6,7	7,2	3,6	3,1	3,0	2,9
0,50	5,1	2,9	1,1	1,1	0,3	0,6
0,75	2,4	0,9	-0,1	0,1	-1,3	-1,2
1,00	1,1	0,5	-0,5	0,0	-0,8	-1,2
1,50	1,6	0,8	0,5	-0,1	-0,2	0,1
2,00	1,3	0,3	0,4	0,0	-0,2	-0,1
3,00	1,4	0,3	0,3	0,0	0,4	0,0
5,00	1,5	0,4	0,5	0,6	0,2	0,2

11,00 LF2, günstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=1,1$

T/H	Einbindetiefenverhältnis					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,483	0,867	0,962	0,984	0,992	1,000
0,50	0,431	0,685	0,770	0,805	0,815	0,825
0,75	0,366	0,541	0,620	0,656	0,670	0,680
1,00	0,330	0,450	0,520	0,555	0,570	0,579
1,50	0,311	0,370	0,415	0,442	0,457	0,470
2,00	0,304	0,335	0,366	0,387	0,400	0,410
3,00	0,303	0,317	0,330	0,341	0,353	0,360
5,00	0,303	0,314	0,316	0,320	0,321	0,325

T/H	Einbindetiefenverhältnis					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,483	0,867	0,962	0,984	0,992	1,000
0,50	0,431	0,685	0,770	0,805	0,815	0,825
0,75	0,366	0,541	0,620	0,656	0,670	0,680
1,00	0,330	0,450	0,520	0,555	0,570	0,579
1,50	0,311	0,370	0,415	0,442	0,457	0,470
2,00	0,304	0,335	0,366	0,387	0,400	0,410
3,00	0,303	0,317	0,330	0,341	0,353	0,360
5,00	0,303	0,314	0,316	0,320	0,321	0,325

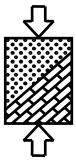
Abweichung in % von H						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

12,00 LF2, günstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=1,2$

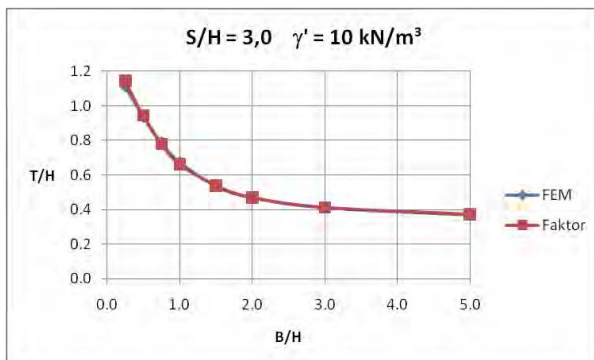
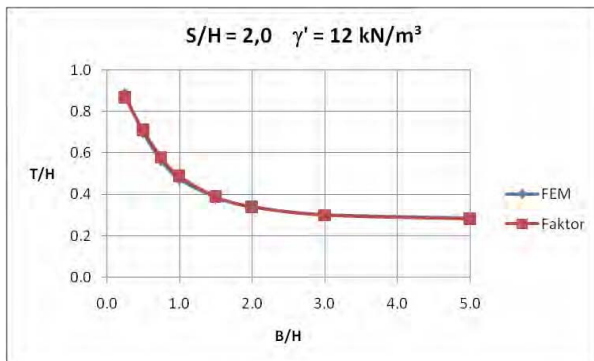
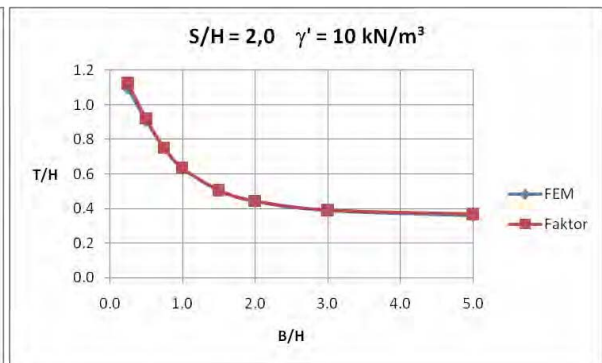
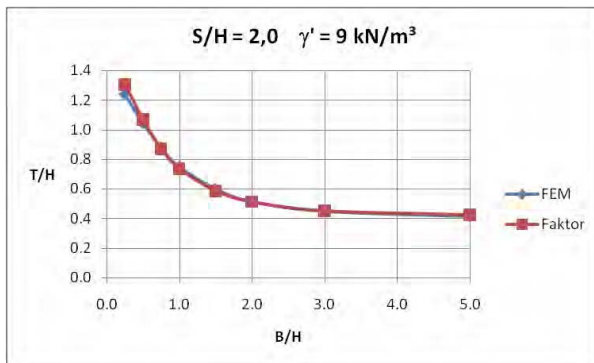
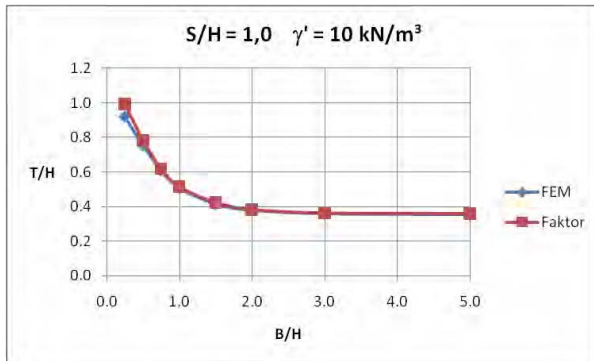
T/H	Einbindetiefe					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,475	0,800	0,870	0,885	0,890	0,897
0,50	0,398	0,612	0,675	0,700	0,720	0,725
0,75	0,331	0,477	0,540	0,565	0,585	0,590
1,00	0,301	0,395	0,450	0,475	0,490	0,500
1,50	0,281	0,325	0,360	0,385	0,395	0,403
2,00	0,277	0,298	0,322	0,340	0,352	0,357
3,00	0,275	0,283	0,292	0,302	0,311	0,315
5,00	0,275	0,280	0,281	0,285	0,285	0,287

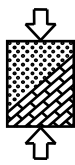
T/H	Einbindetiefe					
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,427	0,767	0,851	0,870	0,877	0,884
0,50	0,381	0,606	0,681	0,712	0,721	0,729
0,75	0,324	0,478	0,548	0,580	0,592	0,601
1,00	0,292	0,398	0,460	0,491	0,504	0,512
1,50	0,275	0,327	0,367	0,391	0,404	0,416
2,00	0,269	0,296	0,324	0,342	0,354	0,363
3,00	0,268	0,280	0,292	0,302	0,312	0,318
5,00	0,268	0,278	0,279	0,283	0,284	0,287

Abweichung in % von H						
S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	-4,8	-3,3	-3,9	-1,5	-1,3	-1,3
0,50	-1,7	-0,6	0,6	1,2	0,1	0,4
0,75	-0,7	0,1	0,8	1,5	0,7	1,1
1,00	-0,9	0,3	1,0	1,6	1,4	1,2
1,50	-0,6	0,2	0,7	0,6	0,9	1,3
2,00	-0,8	-0,2	0,2	0,2	0,2	0,6
3,00	-0,7	-0,3	0,0	0,0	0,1	0,3
5,00	-0,7	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	0,0



Grafische Darstellung für günstigen Baugrund:





0,90 LF2, ungünstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=0,9$

Faktor: $f = (11/\gamma')^2$

Abweichung:

T/H	Einbindetiefe					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,494	0,985	1,415	1,560	1,590	1,595
0,50	0,481	0,930	1,230	1,340	1,380	1,400
0,75	0,463	0,830	1,060	1,160	1,210	1,230
1,00	0,447	0,735	0,920	1,020	1,060	1,090
1,50	0,435	0,610	0,730	0,810	0,845	0,870
2,00	0,431	0,560	0,635	0,695	0,730	0,750
3,00	0,430	0,520	0,560	0,590	0,615	0,620
5,00	0,430	0,515	0,525	0,535	0,545	0,555

T/H	Einbindetiefe					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,651	1,275	1,607	1,660	1,680	1,687
0,50	0,614	1,102	1,328	1,395	1,421	1,434
0,75	0,562	0,923	1,102	1,182	1,215	1,235
1,00	0,531	0,784	0,930	1,009	1,049	1,063
1,50	0,507	0,638	0,744	0,797	0,830	0,850
2,00	0,502	0,584	0,644	0,691	0,717	0,744
3,00	0,501	0,545	0,578	0,604	0,624	0,638
5,00	0,501	0,538	0,545	0,551	0,558	0,564

S/H B/H	Abweichung in % von H					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	15,7	29,0	19,2	10,0	9,0	9,2
0,50	13,3	17,2	9,8	5,5	4,1	3,4
0,75	9,9	9,3	4,2	2,2	0,5	0,5
1,00	8,4	4,9	1,0	-1,1	-1,1	-2,7
1,50	7,2	2,8	1,4	-1,3	-1,5	-2,0
2,00	7,1	2,4	0,9	-0,4	-1,3	-0,6
3,00	7,1	2,5	1,8	1,4	0,9	1,8
5,00	7,1	2,3	2,0	1,6	1,3	0,9

1,00 LF2, ungünstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=1,0$

T/H	Einbindetiefe					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,492	0,976	1,320	1,390	1,410	1,420
0,50	0,473	0,887	1,110	1,185	1,210	1,230
0,75	0,445	0,765	0,940	1,010	1,050	1,070
1,00	0,425	0,660	0,800	0,870	0,910	0,930
1,50	0,408	0,540	0,635	0,690	0,725	0,745
2,00	0,405	0,495	0,550	0,600	0,625	0,640
3,00	0,404	0,465	0,490	0,515	0,530	0,550
5,00	0,404	0,455	0,465	0,470	0,480	0,485

T/H	Einbindetiefe					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,560	1,099	1,385	1,430	1,448	1,453
0,50	0,529	0,950	1,144	1,202	1,224	1,236
0,75	0,484	0,795	0,950	1,018	1,047	1,064
1,00	0,458	0,675	0,801	0,870	0,904	0,915
1,50	0,437	0,549	0,641	0,687	0,715	0,732
2,00	0,433	0,503	0,555	0,595	0,618	0,641
3,00	0,431	0,469	0,498	0,521	0,538	0,549
5,00	0,431	0,463	0,469	0,475	0,481	0,486

S/H B/H	Abweichung in % von H					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	6,9	12,3	6,5	4,0	3,8	3,3
0,50	5,6	6,3	3,4	1,7	1,4	0,6
0,75	3,9	3,0	1,0	0,8	-0,3	-0,6
1,00	3,3	1,5	0,1	0,0	-0,6	-1,5
1,50	2,9	0,9	0,6	-0,3	-1,0	-1,3
2,00	2,8	0,8	0,5	-0,5	-0,7	0,1
3,00	2,7	0,4	0,8	0,6	0,8	-0,1
5,00	2,7	0,8	0,4	0,5	0,1	0,1

1,10 LF2, ungünstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=1,1$

T/H	Einbindetiefenverhältnis					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,490	0,960	1,210	1,250	1,265	1,270
0,50	0,462	0,830	1,000	1,050	1,070	1,080
0,75	0,423	0,695	0,830	0,890	0,915	0,930
1,00	0,400	0,590	0,700	0,760	0,790	0,800
1,50	0,382	0,480	0,560	0,600	0,625	0,640
2,00	0,378	0,440	0,485	0,520	0,540	0,560
3,00	0,377	0,410	0,435	0,455	0,470	0,480
5,00	0,377	0,405	0,410	0,415	0,420	0,425

T/H	Einbindetiefenverhältnis					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,490	0,960	1,210	1,250	1,265	1,270
0,50	0,462	0,830	1,000	1,050	1,070	1,080
0,75	0,423	0,695	0,830	0,890	0,915	0,930
1,00	0,400	0,590	0,700	0,760	0,790	0,800
1,50	0,382	0,480	0,560	0,600	0,625	0,640
2,00	0,378	0,440	0,485	0,520	0,540	0,560
3,00	0,377	0,410	0,435	0,455	0,470	0,480
5,00	0,377	0,405	0,410	0,415	0,420	0,425

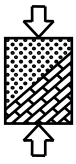
S/H B/H	Abweichung in % von H					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1,20 LF2, ungünstiger Baugrund, $\gamma'/\gamma_w=1,2$

T/H	Einbindetiefe					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,487	0,930	1,100	1,130	1,140	1,150
0,50	0,448	0,770	0,900	0,935	0,955	0,970
0,75	0,405	0,630	0,735	0,780	0,800	0,820
1,00	0,375	0,530	0,620	0,660	0,685	0,700
1,50	0,356	0,430	0,490	0,525	0,545	0,560
2,00	0,344	0,395	0,430	0,460	0,480	0,490
3,00	0,342	0,370	0,385	0,405	0,415	0,425
5,00	0,342	0,365	0,370	0,373	0,377	0,380

T/H	Einbindetiefe					
	S/H B/H	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,25	0,433	0,849	1,070	1,105	1,119	1,123
0,50	0,409	0,734	0,884	0,928	0,946	0,955
0,75	0,374	0,615	0,734	0,787	0,809	0,822
1,00	0,354	0,522	0,619	0,672	0,699	0,707
1,50	0,338	0,424	0,495	0,531	0,553	0,566
2,00	0,334	0,389	0,429	0,460	0,477	0,495
3,00	0,333	0,363	0,385	0,402	0,416	0,424
5,00	0,333	0,358	0,363	0,367	0,371	0,376

S/H B/H	Abweichung in % von H					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0,25	-5,4	-8,1	-3,0	-2,5	-2,1	-2,7
0,50	-3,9	-3,6	-1,6	-0,7	-0,9	-1,5
0,75	-3,1	-1,5	-0,1	0,7	0,9	0,2
1,00	-2,1	-0,8	-0,1	1,2	1,4	0,7
1,50	-1,8	-0,6	0,5	0,6	0,8	0,6
2,00	-1,0	-0,6	-0,1	0,0	-0,3	0,5
3,00	-0,9	-0,7	0,0	-0,3	0,1	-0,1
5,00	-0,9	-0,7	-0,7	-0,6	-0,6	-0,4



Grafische Darstellung für ungünstigen Baugrund:

