

Diploma Thesis

Evaluation of design methods for deep excavations

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Evaluierung von Berechnungsverfahren für Umschließungen von tiefen Baugruben

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Philipp Schwarzl

Matr.Nr.: 01125955

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Johannes Pistol**

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/220/2, A-1040 Wien

Wien, im April 2018

Danksagung

Mein Dank gilt allen Personen, die mich auf dem Weg durch mein Studium begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, durch dessen Betreuung und fachkritische Anmerkungen diese Diplomarbeit entstehen konnte.

Ein spezieller Dank gebührt auch Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Pistor für die Betreuung meiner Arbeit.

Ganz herzlich möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Firma Ste.p - ZT bedanken, im Speziellen bei Herrn Dipl.-Ing. Günther Hampel, Dipl.-Ing. Bernhard Schreitel und Frau Dipl.-Ing. Ilse Gartner, deren Engagement und Interesse wesentlich zum Gelingen dieser Diplomarbeit beitrugen. Sie hatten stets ein offenes Ohr für meine Probleme und waren als Diskussionspartner immer zur Stelle.

Meinen Eltern Hildegard und Ernst Schwarzl danke ich für das Ermöglichen meiner schulischen und universitären Ausbildung und für ihre Geduld in schwierigen Phasen.

Mein größter Dank gebührt jedoch meiner lieben Freundin Agnes Kittel, die mich durch alle Höhen und Tiefen dieser Arbeit begleiten musste. Ihr stetiger Zuspruch und ihre Unterstützung waren ein maßgeblicher Grund für den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit.

Kurzfassung

Im Zuge der Herstellung einer vertikalen Baugrubenwand in Lockergesteinsböden ist es erforderlich, den anstehenden Untergrund mithilfe eines Verbaukörpers zu stützen. Das Verhalten einer Baugrubenwand lässt sich durch die vorhandene Interaktion zwischen dem anstehenden Boden und der Baugrubenwand rechnerisch nur schwer erfassen.

In dieser Arbeit werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Berechnung einer Baugrubenwand anhand eines Stabwerksmodells erarbeitet. Neben den einwirkenden Belastungen auf die Baugrubenwand (Erddruck, Wasserdruck etc.) werden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur mechanischen Modellierung des Bodenaufagers näher beschrieben. Abgesehen davon werden die Grundlagen zur Modellierung einer Baugrube mittels eines Finite-Elemente-Modells erklärt. So wird neben der Beschreibung eines typischen Berechnungsablaufes auch der theoretische Hintergrund von in der Geotechnik bewährten Stoffmodellen (Mohr Coloumb und Hardening Soil) erläutert. Zudem werden die derzeit gültigen normativen Regelungen für eine Berechnung von Baugrubenumschließungen angeführt.

Für die Beurteilung der unterschiedlichen Berechnungsverfahren werden zwei ausgewählte Praxisbeispiele herangezogen. Die sich aufgrund der Berechnungsverfahren ergebenden Biegelinien werden mittels der vorliegenden Inklinometermessungen evaluiert. Anhand dieser Ergebnisse wird versucht, mögliche Schwächen und Stärken der einzelnen Berechnungsverfahren/-modelle zu eruieren.

Abschließend werden die verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten evaluiert und mögliche Gründe für von der Realität abweichende Schnittgrößenverläufe erarbeitet.

Abstract

The construction of deep excavations in soil usually requires a support of the natural ground using pit walls. The interaction between pit wall and natural ground challenges the prediction of the pit wall behaviour.

In the presented thesis, the theoretical background for the calculation and design of pit wall are explained by means of simple (frames and) truss models. The various loads on a pit wall (earth pressure, water pressure, etc.) and different approaches for mechanically modelling the soil reaction are described in detail. Moreover, the fundamentals for modelling a deep excavation with pit walls using the finite element method (FEM) are explained. The typical calculation process is described as well as the theoretical background of widely used material models for soil (Mohr Coulomb and Hardening Soil). Furthermore, the standards and guidelines currently used for the calculation and design of pit walls are outlined.

Two selected case studies are used for a review of the various design approaches. The deflection curves as a result of the different calculation methods are compared to inclinometer measurements. Strengths and weaknesses of the calculation methods are compared and discussed based on the mentioned comparisons.

Finally, the calculation methods are evaluated and reasons for differences between calculations and moreover between calculations and measurements are revealed.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit.....	2
2. Baugrubenumschließungen	3
2.1 Randbedingungen	3
2.2 Unterteilung von Baugrubenumschließungen.....	5
2.3 Berechnung von Baugrubenumschließungen	8
3. Berechnung von senkrechten Baugrubenumschließungen mit Stabwerksmodellen	9
3.1 Erddruckformen	9
3.2 Bewegungen von Stützkonstruktionen	10
3.3 Erddruckbelastungen der aktiven Verbauseite.....	11
3.3.1 Erdruchedruck.....	11
3.3.2 Aktiver Erddruck	12
3.3.2.1 Mindesterdruddruck	13
3.3.2.2 Erddruck aus Bodeneigengewicht.....	14
3.3.2.3 Erddruck infolge flächiger Auflast.....	15
3.3.2.4 Erddruck infolge begrenzter Auflasten	15
3.3.3 Erddruckansätze	17
3.3.4 Erddruckumlagerung.....	17
3.4 Auflagerung von Baugrubenwänden im Untergrund (Erdwiderstand).....	19
3.4.1 Erdaulager mittels punktueller Auflagerung.....	21
3.4.1.1 Die glatte, starre, einfach verankerte, im Boden frei aufgelagerte Wand $t = t_{min}$	23
3.4.1.2 Die glatte, elastische, einfach verankerte, teilweise in den Boden eingespannte Wand $t_{min} < t < t_{eingespannt}$	24
3.4.1.3 Die glatte, elastische, einfach verankerte, voll im Boden eingespannte Wand $t = t_{eingespannt}$	25
3.4.1.4 Die glatte, elastische, unverankerte, voll in den Boden eingespannte Wand $t = t_{unverankert}$	26
3.4.1.5 Die glatte, elastisch, nachgiebig verankerte, voll in den Boden eingespannte Wand $t_{eingespannt} < t < t_{unverankert}$	27
3.4.2 Erdaulager mittels einer elastischen Bettung – Bettungsmodulverfahren	27
3.4.2.1 Theorie des Bettungsmodulverfahrens.....	27
3.4.2.2 Bettungsmodul	29

3.5	Wirkung des Wassers.....	39
3.5.1	Wasserdruck.....	40
3.5.1.1	Nicht umströmte Baugrubenwände.....	40
3.5.1.2	Umströmte Baugrubenwände.....	41
3.5.2	Hydraulischer Grundbruch.....	42
3.5.3	Einfluss des Wassers auf die Erddruckspannungen.....	43
3.5.3.1	Nicht umströmte Baugrubenwände.....	43
3.5.3.2	Umströmte Baugrubenwände.....	43
3.6	Berücksichtigung typischer Bauzustände.....	44
3.6.1	Baugruben außerhalb des Grundwasserkörpers.....	44
3.6.2	Baugruben innerhalb des Grundwasserkörpers.....	45
3.6.2.1	Unterwasseraushub.....	45
3.6.2.2	Grundwasserhaltung.....	46
3.7	Berücksichtigung etwaiger Vorbelastungen in der Baugrubensohle.....	46
4.	Berechnung von Baugruben-umschließungen mittels FEM	49
4.1	Allgemeines.....	49
4.2	Berechnungsablauf.....	50
4.2.1	Modellierung des Baugrundes.....	51
4.2.2	Modellierung des Verbaukörpers.....	51
4.2.3	Modellierung der Stützmittel.....	51
4.2.4	Modellierung des Baufortschrittes.....	52
4.3	Gebräuchliche Stoffmodelle.....	52
4.3.1	Allgemeines.....	52
4.3.2	Lineare Elastizität.....	53
4.3.3	Elastoplastizität.....	54
4.3.3.1	Mohr Coulomb – MC.....	54
4.3.3.2	Hardening Soil Modell – HS-Modell.....	57
4.3.4	Anelastizität.....	62
4.3.4.1	Hypoplastizität.....	62
5.	Klassische Berechnungsverfahren von Baugrubenumschließungen	63
5.1	Verfahren nach Blum.....	63
5.1.1	Allgemeines.....	63
5.1.2	Systemgedanke.....	63
5.1.3	Fall I: einfach verankert, unten vollkommen eingespannt.....	65
5.1.4	Fall II: unverankert, unten vollkommen eingespannt.....	68
5.1.5	Fall III: einfach verankert, unten frei aufliegend (Balken auf zwei Stützen).....	69
5.1.6	Fall IV: oben eingespannt.....	70
5.1.7	Fall V: oben und unten eingespannt.....	71

6. Normative Regelungen und Regelwerke für die Berechnung von Baugrubenumschließungen	73
6.1 ÖNORM B4434.....	73
6.1.1 Allgemeines	73
6.1.2 Erddruckbeanspruchung der aktiven Seite.....	73
6.1.2.1 Ergänzende Bestimmungen zur Erddruckberechnung	73
6.1.2.2 Erddruckumlagerungen	74
6.1.3 Erddruckbeanspruchung der passiven Seite (Erdwiderlager)	75
6.1.3.1 Möglichkeiten zur Modellierung des Erdwiderlagers.....	76
6.1.4 Wirkung des Wassers.....	79
6.2 RVS 09.01.41.....	80
6.2.1 Allgemeines	80
6.2.2 Erddruckbeanspruchung der aktiven Seite.....	80
6.2.2.1 Ergänzende Bestimmung zur Erddruckbestimmung.....	80
6.2.2.2 Erddruckumlagerung.....	80
6.2.3 Erddruckbeanspruchung der passiven Seite (Erdwiderlager)	81
6.2.3.1 Möglichkeiten zur Modellierung des Erdwiderlagers.....	81
6.2.4 Wirkung des Wassers.....	85
6.2.4.1 Hydrostatische Wirkung des Wassers	85
6.2.4.2 Wasserdruck infolge der Umströmung des Wandfußes	86
6.3 DIN 1054	86
6.3.1 Allgemeines	86
6.3.2 Erddruckbeanspruchung der aktiven Seite.....	87
6.3.2.1 Ergänzende Bestimmung zur Erddruckberechnung.....	87
6.3.2.2 Erddruckumlagerung.....	88
6.3.3 Erddruckbeanspruchung der passiven Seite (Erdwiderlager)	88
6.3.3.1 Möglichkeiten zur Modellierung des Erdwiderlagers.....	90
6.3.4 Wirkung des Wassers.....	91
6.4 EAB – EB 102 – 5. Auflage	91
6.4.1 Allgemeines	91
6.4.2 Erddruckbeanspruchung der aktiven Seite.....	91
6.4.2.1 Ergänzende Bestimmung zur Erddruckberechnung.....	91
6.4.2.2 Erddruckumlagerung.....	94
6.4.3 Erddruckbeanspruchung der passiven Seite (Erdwiderlager)	95
6.4.3.1 Möglichkeiten zur Modellierung des Erdwiderlagers:.....	95
6.4.4 Wirkung des Wassers.....	99
6.5 EAU – 4. Auflage	102
6.5.1 Allgemeines	102
6.5.2 Erddruckbeanspruchung der aktiven Seite.....	102
6.5.2.1 Ergänzende Bestimmung zur Erddruckberechnung.....	102
6.5.2.2 Erddruckumlagerung.....	104
6.5.3 Erddruckbeanspruchung der passiven Seite (Erdwiderlager)	105
6.5.3.1 Möglichkeiten zur Modellierung des Erdwiderlagers.....	107
6.5.4 Wirkung des Wassers.....	107

7. Nachweisverfahren	111
7.1 Globales Sicherheitskonzept.....	111
7.2 Teilsicherheitskonzept nach EC 7.....	112
7.2.1 Wichtige Begriffe der ÖNORM EN 1997-1 bzw. ÖNORM B 1997-1.....	114
7.2.1.1 Geotechnische Kategorie.....	114
7.2.1.2 Bemessungssituationen	115
7.2.1.3 Schadensfolgeklasse.....	116
7.2.2 Nachweisführung vertikaler Baugrubenwände nach Eurocode 7	116
7.2.2.1 Belastungen und Widerstände	118
7.2.2.2 Nachweise für den Grenzzustand der Tragfähigkeit von vertikalen Baugrubenwänden.....	118
7.2.2.3 Nachweise für den Grenzzustand der Tragfähigkeit von Verankerungen – Tiefe Gleitfuge.....	121
7.2.2.4 Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	121
7.2.2.5 Nachweis des Widerstandes gegen hydraulischen Grundbruch.....	122
8. Vergleichsberechnungen anhand von Praxisbeispielen	125
8.1 Tunnel Rannersdorf	126
8.1.1 Projektübersicht	126
8.1.2 Geologische Situation	126
8.1.3 Bauvorhaben/Bauverfahren.....	127
8.1.4 Berechnungsquerschnitt.....	128
8.1.5 Betrachtete Lastfälle	129
8.1.6 Berechnungsvarianten.....	131
8.1.7 Berechnungsannahmen	133
8.1.7.1 Berechnung mittels Stabwerkmodellen.....	133
8.1.7.2 Berechnung mittels FEM	133
8.1.8 Boden-/Modellparameter	134
8.1.8.1 Festgelegte Bodenkennwerte gemäß Geotechnischem Gutachten	135
8.1.8.2 Beispielhafte Berechnung von modifizierten Reibungswinkeln nach Hegerl [39]	135
8.1.8.3 Bestimmung der Modellparameter für das HS-Modell.....	139
8.1.8.4 Bestimmung des Bettungsmoduls und der Bettungsmodulverläufe.....	141
8.1.9 Gegenüberstellung der ermittelten Bettungsmodulverläufe.....	146
8.1.10 Berechnung von Verformungen mithilfe von Mobilisierungsfunktionen.....	148
8.1.10.1 ÖNORM B4434 – Berechnungsvariante Ö6.....	148
8.1.10.2 EAB – EB 102 – Berechnungsvariante E5/E6	150
8.1.11 Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsverfahren und deren Interpretation	153
8.1.11.1 Verfahren nach Blum	153
8.1.11.2 ÖNORM B4434	154
8.1.11.3 RVS 09.01.41	156
8.1.11.4 EAB – EB 102.....	158
8.1.11.5 Finite Elemente Berechnung	160

8.1.12	Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse	160
8.2	BEG Unterinntal Baulos H7-Startbaugrube West	169
8.2.1	Projektübersicht	169
8.2.2	Geologische Situation	169
8.2.3	Bauvorhaben/Bauverfahren	171
8.2.4	Berechnungsquerschnitt.....	171
8.2.5	Betrachtete Lastfälle	172
8.2.6	Berechnungsvarianten.....	174
8.2.7	Berechnungsannahmen	176
8.2.7.1	Berechnung mittels Stabwerkmodellen.....	176
8.2.7.2	Berechnung mittels FEM	176
8.2.8	Boden-/Modellparameter	177
8.2.8.1	Festgelegte Bodenkennwerte gemäß Geotechnischem Gutachten.....	177
8.2.8.2	Beispielhafte Berechnung von modifizierten Reibungswinkeln gemäß Hegert [39]	177
8.2.8.3	Berechnung der Modellparameter für das HS-Modell.....	179
8.2.8.4	Bestimmung der Bettungsmoduln.....	181
8.2.9	Gegenüberstellung der ermittelten Bettungsmodulverläufe.....	186
8.2.10	Berechnung von Verformungen mithilfe von Mobilisierungsfunktionen.....	187
8.2.10.1	ÖNORM B4434 – Berechnungsvariante Ö6.....	188
8.2.10.2	EAB – EB 102 – Berechnungsvariante E5 und E6	190
8.2.11	Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsverfahren und deren Interpretation.....	193
8.2.11.1	Verfahren nach Blum	193
8.2.11.2	ÖNORM B4434	194
8.2.11.3	RVS 09.01.41	196
8.2.11.4	EAB – EB 102.....	197
8.2.11.5	Finite Elemente Berechnung	199
8.2.12	Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse	200
9.	Resümee	209
9.1	Evaluierung der Berechnungsverfahren.....	209
9.1.1	Verfahren nach Blum	209
9.1.2	ÖNORM B4434	209
9.1.3	RVS 09.01.41	210
9.1.4	EAB – EB 102	211
9.1.5	Finite Elemente Berechnung	212
9.2	Einflussfaktoren auf die Genauigkeit von Berechnungsverfahren für Baugrubenumschließungen.....	213
9.2.1	Einfluss von Größe und Verlauf des Bettungsmoduls	213
9.2.2	Einfluss der Berücksichtigung von Erdruehdruk- und Bettungsspannungen auf der aktiven Verbauseite.....	215
9.2.3	Einfluss der Reibungswinkel	217

10. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	221
Literaturverzeichnis	225
Tabellenverzeichnis	231
Abbildungsverzeichnis	235
Anhang A	245
A.1. Zusammenhänge Reibungswinkel – Sondierungen	245
Anhang B – Tunnel Rannersdorf	247
<i>B.1. Durchgeführte Rammsondierungen.....</i>	247
<i>B.2. Durchgeführte Ödometer-Versuche</i>	248
<i>B.3. Relevante Bohrprofile.....</i>	249
<i>B.4. Inklinometermessung.....</i>	252
<i>B.5. Rückrechnung des Bettungsmoduls aus der Inklinometermessung</i>	253
<i>B.6. Mobilisierungsfunktionen</i>	253
<i>B.6.1 Erddruckspannungen.....</i>	253
<i>B.6.2. Mobilisierungsansatz gemäß ÖNORM B4434</i>	257
<i>B.6.3. Mobilisierungsansatz von Besler.....</i>	258
Anhang C – BEG Startbaugrube West	263
<i>C.1. Inklinometermessung.....</i>	264
<i>C.2. Rückrechnung des Bettungsmoduls aus der Inklinometermessung</i>	266
<i>C.3. Mobilisierungsfunktionen.....</i>	266
<i>C.3.1. Erddruckspannungen</i>	266
<i>C.3.2. Mobilisierungsansatz gemäß ÖNORM B4434</i>	269
<i>C.3.3. Mobilisierungsansatz von Besler.....</i>	270