

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

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit.....	2
<b>2. Baugrubenumschließungen</b>	<b>3</b>
2.1 Randbedingungen .....	3
2.2 Unterteilung von Baugrubenumschließungen.....	5
2.3 Berechnung von Baugrubenumschließungen .....	8
<b>3. Berechnung von senkrechten Baugrubenumschließungen mit Stabwerksmodellen</b>	<b>9</b>
3.1 Erddruckformen .....	9
3.2 Bewegungen von Stützkonstruktionen .....	10
3.3 Erddruckbelastungen der aktiven Verbauseite.....	11
3.3.1 Erdruhedruck.....	11
3.3.2 Aktiver Erddruck .....	12
3.3.2.1 Mindesterdruhedruck .....	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 Erdauflager 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 Erdauflager 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
<b>4.</b>	<b>Berechnung von Baugruben-umschließungen mittels FEM</b>	<b>49</b>
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
<b>5.</b>	<b>Klassische Berechnungsverfahren von Baugrubenumschließungen</b>	<b>63</b>
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

<b>6. Normative Regelungen und Regelwerke für die Berechnung von Baugrubenumschließungen</b>	<b>73</b>
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

<b>7. Nachweisverfahren</b>	<b>111</b>
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
<b>8. Vergleichsberechnungen anhand von Praxisbeispielen</b>	<b>125</b>
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
<b>9.</b>	<b>Resümee</b> .....	<b>209</b>
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

<b>10. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>	<b>221</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>225</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>231</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>235</b>
<b>Anhang A</b>	<b>245</b>
A.1. Zusammenhänge Reibungswinkel – Sondierungen .....	245
<b>Anhang B – Tunnel Rannersdorf</b>	<b>247</b>
<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
<b>Anhang C – BEG Startbaugrube West</b>	<b>263</b>
<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