



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit



Die Verformungen von
Spritzbetonnagelwänden

Lukas Markus Riepler, BSc

Mai 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 15.04.2019



Unterschrift Verfasser/in
Lukas Markus, Riepler
Matrikelnummer: 01335106

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei all jenen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht und mich während meines Studiums in vielerlei Hinsicht unterstützt haben.

Herrn Dipl.-Ing. Schuller Erik und Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Galler Robert danke ich für die aufgebrauchte Zeit und Unterstützung seitens des Lehrstuhles für Subsurface Engineering.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Račanský Václav bedanke ich mich für das interessante Thema dieser Arbeit und die Unterstützung bei der Durchführung. Vielen Dank für die lehrreichen Diskussionen und Ratschläge.

Ein großes Dankeschön gilt ebenfalls den Mitarbeitern der Firma Keller Grundbau Slowakei, die mich mit den notwendigen Unterlagen der untersuchten Bauvorhaben versorgt haben. Den Mitarbeitern der Keller Grundbau am Standort Eben im Pongau danke ich für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes in ihrem Büro.

Kurzfassung

Spritzbetonnagelwände haben die Aufgabe durch den Einbau von stabförmigen Bewehrungen (Bodennägeln) die Zug- und Scherfestigkeit des anstehenden Bodens zu erhöhen. Durch die Ausbildung von Zugkräften in den Bodennägeln entsteht ein Verbundkörper aus dem gewachsenen Boden, welcher die Standfestigkeit der gesicherten Böschungen erhöht.

Diese Bauausführungstechnik hat häufig wirtschaftliche Vorteile gegenüber anderen Verbauarten und wird deshalb bei geeigneten Bodenverhältnissen für die Sicherung von Böschungen bei z.B. Einschnitten, Baugruben etc. eingesetzt. Um dieses Verfahren auch in unmittelbarer Nähe von setzungsempfindlichen Bauwerken anzuwenden, sind die Verformungen im Einflussbereich dieser Bauausführungstechnik von entscheidender Bedeutung. Maßgeblich für das Verformungsverhalten einer Spritzbetonnagelwand sind die Kopfverschiebungen und die Verformungsfigur der Wand einschließlich der sich dadurch hinter der Wand ausbildenden Setzungsmulde.

Da Bodennägel ohne Vorspannung (passiv) in den Baugrund eingebracht werden, ist eine initiale Relativbewegung zwischen Boden und Nägel notwendig, um die Reibungskräfte entlang der Bodennägel zu mobilisieren.

Um das Verformungsverhalten von Spritzbetonnagelwänden näher zu untersuchen, werden sie mit einem geotechnischen Finite-Elemente-Programm modelliert. Die Ergebnisse der Verschiebungen aus den numerischen Simulationen werden mit den Ergebnissen von analytischen Ansätzen zur Verschiebungsabschätzung verglichen. Die Sicherheitsfaktoren aus einem geotechnischen Bemessungsprogramm auf Basis von Grenzgleichgewichtsbetrachtungen werden mit den Sicherheitsfaktoren aus den FEM Berechnungen gegenübergestellt.

Zusätzlich stehen die Ergebnisse von 3D-Verschiebungsmessungen einer für eine als Baugrubensicherung ausgeführten Spritzbetonnagelwand zur Verfügung. Mithilfe der Messungen erfolgt eine Anpassung der Baugrundkennwerte der numerischen Modelle.

Der Vergleich der Verschiebungen und der berechneten Sicherheitsfaktoren aus den numerischen Modellen, den analytischen Abschätzungen und den 3D-Verschiebungsmessungen zeigen gute Übereinstimmung.

Die Abschätzung der Verschiebungen von Nagelwänden mit analytischen und numerischen Methoden liefert durchaus realitätsnahe Ergebnisse.

Abstract

Soil nailed walls increase the tensile and shear strength of surrounding soil by the installation of rod-shaped reinforcements (soil nails). Through the formation of tensile forces in the soil nails, a composite body of the grown soil is developed, which increases the stability of the secured slopes.

This construction technique often has economic advantages over other types of installations and is therefore suitable for securing slopes (e.g. at incisions, excavations etc.) at suitable ground conditions. In order to apply this method in the immediate vicinity of settlement-sensitive structures, it is crucial to note the deformations in the area of influence of this construction technique. The head displacements and the deformation figure of the wall including the reduction pit forming behind the wall caused by the horizontal wall displacements are factors which influence the overall displacement behavior of a soil nailed wall.

As soil nails are installed into the subsoil without prestressing (passive), an initial relative movement between soil and nails is necessary to mobilize the frictional forces along the soil nails.

A geotechnical finite element program is used to further investigate the deformation behavior of soil nailed walls. The results of the displacements from the numerical simulations are compared with the results of analytical approaches for the estimation of displacements. The safety factors from a geotechnical design program based on limit equilibrium considerations are compared with the safety factors from the FEM calculations.

In addition, the results of 3D-displacement measurements are available for a soil nailed wall designed as a construction pit securing. The measurements are used to adjust the ground characteristics of the numerical models.

The comparison of the displacements and the calculated safety factors from the numerical models, the analytical estimates and the 3D-displacement measurements show good agreement.

The analytical and numerical estimates of displacements of soil nailed walls provide quite realistic results.

Inhaltsverzeichnis

LISTE DER VERWENDETEN SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	1
1 EINLEITUNG.....	5
1.1 AUFGABENSTELLUNG UND MOTIVATION	5
1.2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	6
1.2.1 Grundlagen der Konstruktion	6
1.2.2 Anwendungsbereiche von Spritzbetonnagelwänden	8
1.2.3 Bodennagelsysteme.....	12
1.2.4 Boden/Nagel Interaktion.....	15
1.2.5 Unterschied Verpressanker - Bodennagel.....	17
1.2.6 Einfluss des Nagellayouts auf die Verformungen	18
1.2.7 Lebensdauer der Konstruktion und Korrosionsschutz	19
1.2.8 Grundlagen der Bemessung	21
1.2.9 Aufgaben der Frontalusbildung	26
1.2.10 Versagensformen.....	30
1.2.11 Vergleich mit anderen Bauverfahren	34
2 ANALYTISCHE ANSÄTZE ZUR VERFORMUNGSABSCHÄTZUNG	35
2.1 ALLGEMEINES	35
2.2 EINFLÜSSE AUF DIE VERFORMUNGEN	35
2.3 VERFORMUNGSVERHALTEN WÄHREND DER BAUAUSFÜHRUNG	38
2.4 VERFORMUNGSABSCHÄTZUNG MUSTERNAGELWAND.....	38
2.4.1 Allgemeine Informationen	38
2.4.2 Abschätzung der Verschiebungen.....	39
2.5 BAUVORHABEN BELLA VITA, BRATISLAVA.....	40
2.5.1 Allgemeine Informationen	40
2.5.2 Geologische Beschreibung	42
2.5.3 Abschätzung der Verschiebungen.....	42

3	GGU-STABILITY	44
3.1	ALLGEMEINES	44
3.2	MUSTERNAGELWAND.....	46
3.3	BELLA VITA.....	51
4	NUMERISCHE MODELLIERUNG MIT PLAXIS	55
4.1	ALLGEMEINES	55
4.2	MUSTERNAGELWAND.....	60
4.3	BELLA VITA.....	71
5	VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN	81
5.1	GEODÄTISCHER BERICHT BELLA VITA.....	81
5.2	AUSWERTUNG.....	83
6	VERGLEICH DER VERFAHREN	90
6.1	MUSTERNAGELWAND.....	90
6.1.1	<i>Vergleich der Verschiebungen</i>	90
6.1.2	<i>Vergleich der Sicherheitsfaktoren</i>	91
6.2	BELLA VITA.....	93
6.2.1	<i>Vergleich der Verschiebungen</i>	93
6.2.2	<i>Vergleich der Sicherheitsfaktoren</i>	94
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	97
	QUELLENVERZEICHNIS	99
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	101
	TABELLENVERZEICHNIS	105
	ANHANG A – FOTODOKUMENTATION BELLA VITA	107
	ANHANG B – ABSCHÄTZUNG DER MANTELREIBUNG	115
	ANHANG C – ERGEBNISSE GGU-STABILITY	118

Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Großbuchstaben

Symbol	Einheit	Begriff bzw. Bezeichnung
E_{50}^{ref}	kN/m ²	Sekantenmodul bei 50 % der max. Deviatorspannung
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	Ödometermodul
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	Ent- und Wiederbelastungsmodul
F_{Max}	kN/m ²	Spitzendruck
H	m	Höhe der Spritzbetonnagelwand
K_{ag}	-	Aktiver Erddruckbeiwert
K_{ac}	-	Erddruckbeiwert infolge Kohäsion
L	m	Länge des Bodennagels
L_p	m	Länge des Bodennagels im passiven Bereich
L_a	m	Länge des Bodennagels im aktiven Bereich
N	-	Verhältniszahl der Vorbemessung
N_p	kN	Maximal aufnehmbare Zugkraft
M_p	kN	Maximal aufnehmbares Biegemoment
$R_{p,k}$	kN	Charakteristische Bruchkraft der Bodennägel
S_h	m	Horizontaler Nagelabstand
S_v	m	Vertikaler Nagelabstand
T_L	kN	Ausziehwiderstand Bodennagel
T_{Lat}	kN/m	Lateraler Mantelwiderstand
T_{Skin}	kN/m ²	Mantelreibung
F_{Max}	kN	Spitzendruck

X	mm	Verschiebungen in X-Richtung
ΔX	mm	Differentielle Verschiebungen in X-Richtung
Y	mm	Verschiebungen in Y-Richtung
ΔY	mm	Differentielle Verschiebungen in Y-Richtung
Z	mm	Verschiebungen in Z-Richtung
ΔZ	mm	Differentielle Verschiebungen in Z-Richtung

Kleinbuchstaben

Symbol	Einheit	Begriff bzw. Bezeichnung
c	kN/m ²	Kohäsion
c'	kN/m ²	Effektive Kohäsion
c_{mob}	kN/m ²	Mobilisierte Kohäsion
d	m	Nageldurchmesser
s	m	Stärke der Spritzbetonschale
m	-	Exponent zur Beschreibung der spannungsabhängigen Steifigkeit

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Begriff bzw. Bezeichnung
α	$^{\circ}$	Geländeneigung hinter der Böschung
γ	kN/m^3	Wichte
δ	$^{\circ}$	Erddruckneigungswinkel
δ_0	mm	Horizontale Verschiebung hinter dem vernagelten Bodenkörper
δ_h	mm	Horizontale Verschiebung am Wandkopf
δ_v	mm	Vertikale Verschiebung am Wandkopf
ε	$^{\circ}$	Einfallswinkel der Nägel (zwischen Horizontaler und Nagel)
η	$^{\circ}$	Böschungsneigung bzw. Neigung der Frontalausbildung
κ	-	Faktor zur Bestimmung der Länge des Einflussbereiches (λ)
λ	m	Länge des Einflussbereiches hinter der Wand
μ	-	Ausnutzungsgrad
σ_n	kN/m^2	Normalspannung
τ_f	kN/m^2	Maximal aufnehmbare Scherspannungen
τ	kN/m^2	Vorhandene Scherspannung
Ψ	$^{\circ}$	Dilatanzwinkel
φ^*	$^{\circ}$	Effektiver innerer Reibungswinkel
φ_{mob}	$^{\circ}$	Mobilisierter innerer Reibungswinkel
φ	$^{\circ}$	Innerer Reibungswinkel

Abkürzungen

BG	Baugrube
BGS	Baugrubensohle
EBR	Eingebettete Trägerreihe (embedded beam row)
FEM	Finite Elemente Methode
F	Sicherheitsfaktor nach Gigan, J.P (1986)
FoS	Sicherheitsfaktor
FoS _{PLAXIS}	Sicherheitsfaktor PLAXIS
FoS _{GGU}	Sicherheitsfaktor GGU-STABILITY
GGB	Grenzgleichgewichtsbetrachtung
HS	Hardening soil
MC	Mohr-Coulomb
MSP	Messspiegel
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Spritzbetonnagelwände stellen häufig ein wirtschaftliches und rasches Verfahren zur Böschungssicherung bei z.B. Einschnitten, Baugruben etc. dar. Um die Einsatzmöglichkeiten dieser Bauausführungstechnik zu erweitern, sind die Verformungen, die bedingt durch dieses Verfahren auftreten, abzuschätzen.

Daher wird im Rahmen dieser Arbeit das Verformungsverhalten von Spritzbetonnagelwänden genauer untersucht.

Dazu zählen vor allem:

- Die totalen Kopfverschiebungen im Verhältnis zur Wandhöhe.
- Die Verformungsfigur der mit Spritzbeton und Gittermatten versiegelten freien Oberfläche - der sogenannten „Frontalausbildung“ (Siehe Abschnitt 1.2.9).
- Die Setzungsmulde hinter der Wand bzw. dem vernagelten Bodenkörper.

Mit den Erkenntnissen über das Verformungsverhalten von Spritzbetonnagelwänden besteht die Möglichkeit, den Einfluss auf angrenzende Bauwerke bzw. das Gelände hinter dem vernagelten Bodenkörper (Straßen, Gebäude etc.) genauer abzuschätzen.

1.2 Theoretische Grundlagen

Die Aufgabe von Spritzbetonnagelwänden bzw. Bodenvernagelungen ist die Sicherstellung der Standfestigkeit von steilen Böschungen ($\eta = 60^\circ - 90^\circ$). Diese Bauausführungstechnik wird angewendet, um eine ausreichende Sicherheit gegen ein mögliches Versagen zu gewährleisten. Erreicht wird dies durch den Einbau von passiven (nicht vorgespannten) Bodennägeln aus gerippten Stahlzuggliedern, die in ein ausgemörteltes Bohrloch eingebracht werden. Nach einer initialen Bewegung der Frontalausbildung samt den Bodennägeln in Richtung der Aushubseite werden Reibungskräfte entlang der Bodennägel mobilisiert, welche zur Ausbildung von Zugkräften in den Bodennägeln führen. Zwischen den Nägeln bilden sich Druckgewölbe aus, die zu einer Verbundwirkung des vernagelten Bodenkörpers (Bodenmonolith) führen, welche die Stabilität der Böschung erhöht.

Das Design und die Bemessung einer Spritzbetonnagelwand (Nagelraster, Nagellängen, Neigung der Frontalausbildung, Höhe der Aushubschritte etc.) wird an die vorliegenden Baugrundverhältnisse angepasst. Die Kohäsion des anstehenden Bodens ermöglicht die Ausbildung einer senkrechten, ungestützten Böschung (freie Standhöhe - Gleichung 1) und ist somit maßgebend für die Höhe der Aushubschritte. Daher wird dieses Verfahren bevorzugt in bindigen Böden ausgeführt.

Bei dauerhaften Bauwerken und bei aggressiven Bodenbedingungen (z.B. Böden mit hohem organischem Anteil) ist zusätzlich ein besonderes Augenmerk auf die Korrosionsbeständigkeit der Nägel zu richten. [4]

1.2.1 Grundlagen der Konstruktion

Für den Bau von Spritzbetonnagelwänden wird der anstehende Boden abschnittsweise ausgehoben. Nach jedem Aushubschritt werden die Bodennägel in den Boden eingebracht und die freie Wandfläche mit Gittermatten und Spritzbeton versiegelt. Diese Versiegelung wird Frontalausbildung genannt. Dabei entsteht Schritt für Schritt ein bewehrter Bodenkörper. [2]

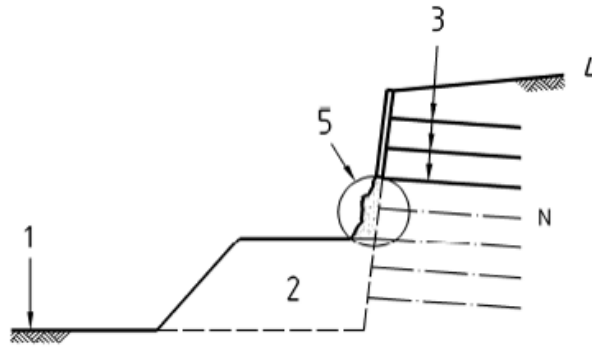


Abbildung 1: Ausbildung eines bewehrten Bodenkörpers [4]

1. Aushubsohle
 2. Berme
 3. Bereits eingebrachte Bodennägel
 4. Gelände hinter der Spritzbetonnagelwand
 5. Unversiegelter Bereich - Aushubschritt
- N Nachfolgend zu installierende Bodennägel

Um die Standsicherheit von Baugruben- bzw. Hangsicherungen zu gewährleisten, werden die Zyklen der Bodenvernagelung (Aushub, Installation der Nägel, Spritzbetonversiegelung) an die anstehenden Bodenverhältnisse angepasst. Dabei ist darauf zu achten, dass die Höhe eines Aushubschrittes vor Installation der Nägel und Auftragen der Spritzbetonversiegelung nicht so groß gewählt wird, um ein Versagen des Baugrundes zu vermeiden. Diese Höhe ist hauptsächlich von der Scherfestigkeit des Bodens – insbesondere von der Kohäsion - abhängig und liegt typischerweise im Bereich zwischen einem und zwei Metern. Zur Berechnung der Höhe eines Aushubschrittes wird unter anderem die Gleichung zur Ermittlung der freien Standhöhe (Gleichung 1) verwendet. Des Weiteren sind die Arbeitsabläufe, die Arbeitssicherheit und die verwendeten Baustellengeräte ausschlaggebend für die Wahl der Aushubhöhe. [4]

Gleichung 1: Berechnung der freien Standhöhe a) $\alpha=\beta=\delta=0$ b) $\delta \neq 0$ [4]

$$\text{a) } h_c = \frac{4 * c}{\gamma * \sqrt{K_{ag}}} \quad \text{b) } h_c = \frac{2 * c * K_{ac}}{\gamma * K_{ag}}$$

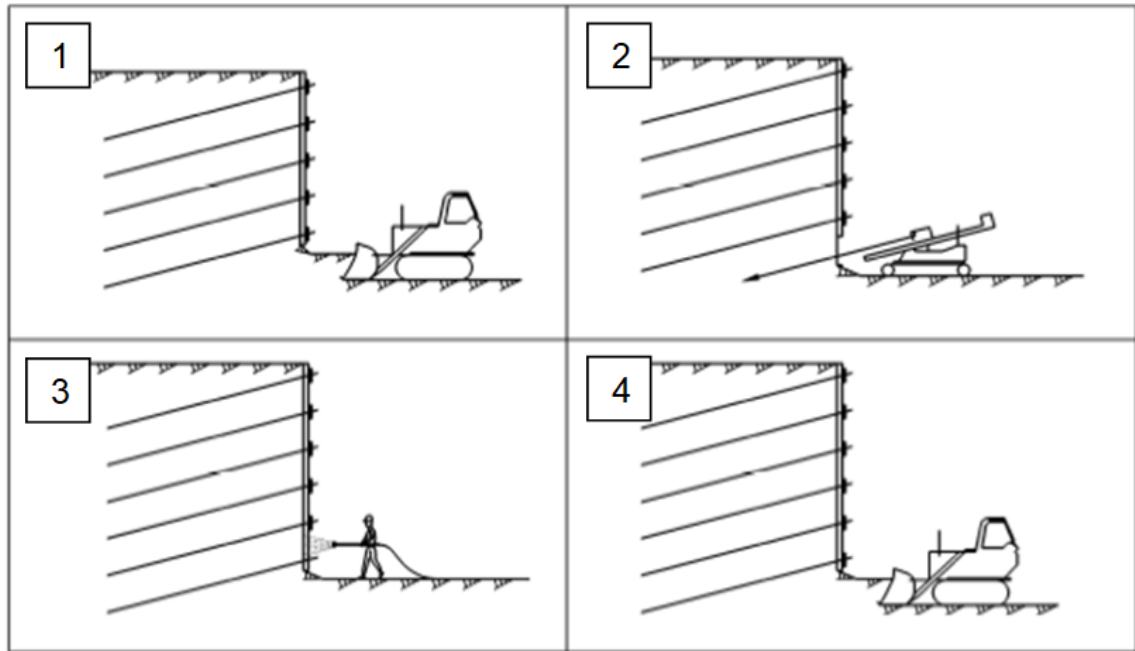


Abbildung 2: Bauablauf eines Aushubschrittes [5]

1. Aushub
2. Installation der Bodennägel
3. Versiegelung der Oberfläche mit Gittermatten und Spritzbeton
4. Nachfolgender Aushubschritt

1.2.2 Anwendungsbereiche von Spritzbetonnagelwänden

Das breite Anwendungsgebiet von Spritzbetonnagelwänden reicht von der temporären Baugrubensicherung bis zur dauerhaften Sicherung von Einschnitten.

Spritzbetonnagelwände werden zur Sicherung von steilen Geländesprüngen (Böschungsneigungen von $\eta = 60^\circ - 90^\circ$) verwendet.

Das Verfahren ist bei steilen Geländesprüngen auf Böden begrenzt, die zumindest schwach bindige Eigenschaften aufweisen. Eine gewisse Kohäsion ist erforderlich, um die Standfestigkeit des ungesicherten Böschungsbereiches eines Aushubschrittes vor dem Installieren der Nägel und dem Aufbringen des Spritzbetons zu gewährleisten.

Ein vorhandener Grundwasserspiegel ist zur Sicherstellung der Standsicherheit immer bis unter die Baugrubensohle abzusenken. Dies wird unter anderem durch ein entsprechendes Drainagesystem erreicht.

Vorteile von Spritzbetonnagelwänden

- Die verwendeten Baugeräte (Bagger, Bohrgerät und gegebenenfalls Spritzbetonmobil) sind im Vergleich mit der Gerätschaft anderer Verbauarten (Bohrpfahlwände, Schlitzwände etc.) kleiner und mobiler, wodurch sie auch bei schwierigen Untergrundverhältnissen der Baustelle (unebenes Gelände, wenig tragfähiger Untergrund, beengte Zugänglichkeit etc.) ohne aufwendige Vorbereitungsarbeiten einzusetzen sind. [2]
- Heterogene Bodenverhältnisse sind einfach zu beherrschen, da die Höhen der Aushubabschnitte, die Nagellängen und der Nagelraster an die jeweiligen Verhältnisse leicht anzupassen sind. [2]
- Die Geschwindigkeit Dieses Verfahrens ist höher als bei anderen Verfahren der Böschungssicherung, da die unterschiedlichen Arbeitsschritte örtlich getrennt und parallel ausgeführt werden. [2]

Nachteile von Spritzbetonnagelwänden

Angrenzende Bauwerke

Beim Bau von Spritzbetonnagelwänden treten vertikale und horizontale Verschiebungen der Frontalausbildung und Verformungen im Boden durch Kornumlagerungen auf, welche unter Umständen zu Setzungsschäden bei angrenzenden Bauwerken führen.

Die Verformungen der Frontalausbildung resultieren hauptsächlich durch den fortschreitenden Aushub. Nach Abschluss des Aushubes und Fertigstellung der Wand sind Kriechverformungen im Boden möglich.

Die Größe bzw. das Ausmaß der Verschiebungen/Verformungen ist u.a. abhängig von:

- Wandhöhe

-
- Neigung der Frontalausbildung
 - Nagelraster
 - Bodennägel (Länge, Durchmesser, Stahlqualität, Rauigkeit der Oberfläche)
 - Verfahren zur Bodenvernagelung (Siehe Abschnitt 1.2.3)
 - Einpressen in ein vorgebohrtes verrohrtes oder unverrohrtes Bohrloch
 - Selbstbohrende Bodennägel mit verlorener Krone
 - Baugrundeigenschaften (Scherparameter des anstehenden Bodens, Grundwasserverhältnisse etc.)
 - Qualität der Ausführung
 - Zeit zwischen Aushub und Einbringung der Stützmittel (Nägel, Gittermatten und Spritzbetonversiegelung)

Die Setzungen an der GOK nehmen mit zunehmendem Abstand zur Frontalausbildung ab. Falls sich setzungsempfindliche Bauwerke (z.B. Altbauten, bereits vorgeschädigte Bauwerke, Gasleitungen etc.) im Einflussbereich der Wände befinden, werden zusätzlich zu den Bodennägeln vorgespannte Anker im oberen Wandbereich ausgeführt. Diese Verbauart wird kombiniertes Verfahren (mixed structures) genannt und ist in Abschnitt 1.2.5 genauer beschrieben. [2]

Ungeeignete Baugrundverhältnisse

Das Verfahren der Bodenvernagelung ist für zahlreiche, unterschiedliche Bodenarten geeignet.

Nachfolgend sind beispielhaft einige Bodenarten aufgelistet, bei denen die wirtschaftlichen Vorteile der Bodenvernagelung im Vergleich zu anderen Verfahren der Baugruben- und Böschungssicherung (Bohrpfahlwand, Spundwand, et cetera) nicht gegeben sind.

Zu diesen Böden zählen u.a.:

- Granulare, trockene Böden, die keine Kohäsion aufweisen und somit die Stabilität des ungesicherten Wandbereiches nach einem Aushubschritt nicht gegeben ist. Dazu zählen z.B. trockene Sande. Durch bodenverbessernde Maßnahmen (z.B. Injektionen) ist eine Umsetzung möglich, jedoch verliert damit das Verfahren der Bodenvernagelung gegenüber anderen schnell seine wirtschaftlichen Vorteile.
- Breiige und weiche bindige Böden, bei welchen die Mantelreibung zwischen den Bodennägeln und dem anstehenden Boden nicht ausreichend mobilisiert wird.
- Frostempfindlichen Böden, in denen sich aufgrund von Eislinsenbildung im vernagelten Bodenkörper hohe Kräfte in den Nägeln und der Frontalausbildung aufbauen. Das sind vor allem feinkörnige Böden mit hoher Kapillarwirkung, die bei entsprechendem Wassernachschub Wasser aus der Umgebung ansaugen. Das ist durch entsprechende Maßnahmen, wie z.B. Entwässerung oder Bauausführung in der frostfreien Periode, zu verhindern.
- Korrosive Böden, die entweder den Stahl der Bodennägel und/oder den Beton der Frontalausbildung schädigen (Stahl- bzw. Betonkorrosion). Solche Schädigungen sind besonders bei Dauerbauwerken von Bedeutung und entsprechend zu berücksichtigen. Durch eine Ausführung mit entsprechend hohem Korrosionswiderstand werden Bodenvernagelungen auch in korrosiven Böden ausgeführt.

Ungünstig hohe Grundwasserspiegel

Die Ausführung von Spritzbetonnagelwänden unterhalb des Grundwasserspiegels führt zu zahlreichen negativen Auswirkungen. Unter anderem sind die Höhen der Aushubschritte entsprechend zu reduzieren und zutretendes Wasser ist zu fassen und abzuleiten. Weiters wird die Abrostungsrate der Bodennägel aufgrund der vorhandenen Feuchtigkeit erhöht. Durch eine entsprechende Drainung wird sichergestellt, dass der Baugrund entwässert und sich hinter der Frontalausbildung kein Wasserdruck aufbaut. [2]

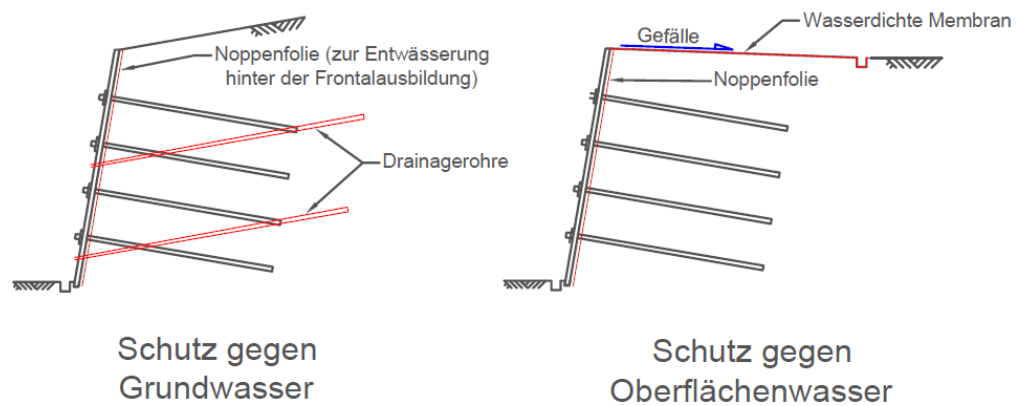


Abbildung 3: Maßnahmen zum Schutz gegen Wasser [2]

1.2.3 Bodennagelsysteme

Die Aufgaben der Bodennägel bestehen vor allem darin,

- die geforderten Bemessungslasten aufzunehmen,
- die auftretenden Verschiebungen zu begrenzen und
- die Standsicherheit der Wand über die gesamte Lebensdauer zu gewährleisten.

Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Ausführung der Arbeiten zu legen. Der Nageleinbau hat innerhalb der zulässigen Abweichungen hinsichtlich Position und Länge zu erfolgen und Erschwernisse beim Bohren sind zu dokumentieren. [4]

Zulässige Abweichungen laut ÖNORM EN14490:2010 sind:

- Position der Bodennägel: ± 100 mm von der geplanten Position
- Neigung und Ausrichtung der Bodennägel: $\pm 5^\circ$ von der geplanten Neigung und Ausrichtung
- Bohrlochabweichung maximal ein Dreißigstel der Bohrlochlänge

In der Literatur werden drei unterschiedliche Verfahren für den Einbau von Bodennägeln beschrieben (Abbildung 4). Die Auswahl des Verfahrens erfolgt unter Berücksichtigung der Baugrundeigenschaften und die Auslegung der Nägel

(Durchmesser, Länge, Raster) auf Grundlage bodenmechanischer Kenngrößen (z.B. Scherparameter).

Einbauverfahren durch Rammen

Das Einbauen erfolgt bei diesem Verfahren durch Einrammen der Nägel. Bei dieser Art des Einbringens wird der Boden seitlich um den Nagel verdrängt. Der Bodennagel befindet sich direkt in Kontakt mit dem Baugrund. [4]

Um eine zu große Durchbiegung der Bewehrungsstäbe beim Einbau zu verhindern, sind eine ausreichende Steifigkeit und Führung der Nägel während des Einrammens erforderlich. [4]

Einbauverfahren durch Bohren und Einpressen (Abbildung 4a)

Bei diesem Verfahren werden die Bohrlöcher drehend und/oder schlagend hergestellt, die Nägel eingesetzt und anschließend wird Mörtel durch die Nägel bei Hohlstabnägeln oder mithilfe eines im Bohrloch mitgeführten Injektionsschlauchs bei Vollquerschnittsnägeln in das Bohrloch eingepresst. Bei nicht standfesten Bohrlöchern wird verrohrt gebohrt und nach dem Ziehen des Bohrgestänges die Verrohrung mit Mörtel gefüllt. Nach dem Einführen der Bodennägel wird die Verrohrung gezogen.

Um den erforderlichen Bohrlochdurchmesser über die gesamte Länge der Nägel bei nicht verrohrten Bohrungen sicherzustellen, sind Bohrkronen mit entsprechenden Durchmessern zu verwenden. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass bis in eine Tiefe gebohrt wird, die den Einbau der Bodennägel mit den erforderlichen Längen ermöglicht.

Um eine ausreichende und gleichmäßige Betondeckung der Nägel zu erreichen, werden Abstandhalter an den Nägeln (Abbildung 4) angebracht. Dadurch werden ein zentrisches Einbringen der Nägel und ein entsprechender Ringraum gewährleistet. Die Betondeckung hat die Aufgabe den Verbund zwischen Bodennägeln und Baugrund sicherzustellen und dient zusätzlich als Korrosionsschutz für die Nägel.

Das Einpressen des Mörtels erfolgt während des Einbringens der Nägel und/oder danach. Unterschieden wird zwischen Schwerkraft- und Druckeinpressen. Bei letzterem wird durch den Überdruck der umliegende Boden verdichtet und somit, durch

eine bessere Verspannung der Bodennägel, der Auszieh Widerstand der Nägel erhöht. Für das Einpressmittel wird nach ÖNORM-14490:2010 eine charakteristische Mindestfestigkeit des Mörtels von 5 MPa empfohlen, bevor eine Last auf den Bodennagel einwirkt. Für eine charakteristische Festigkeit nach 28 Tagen ist eine Mindestfestigkeit von 25 MPa einzuhalten. [4]

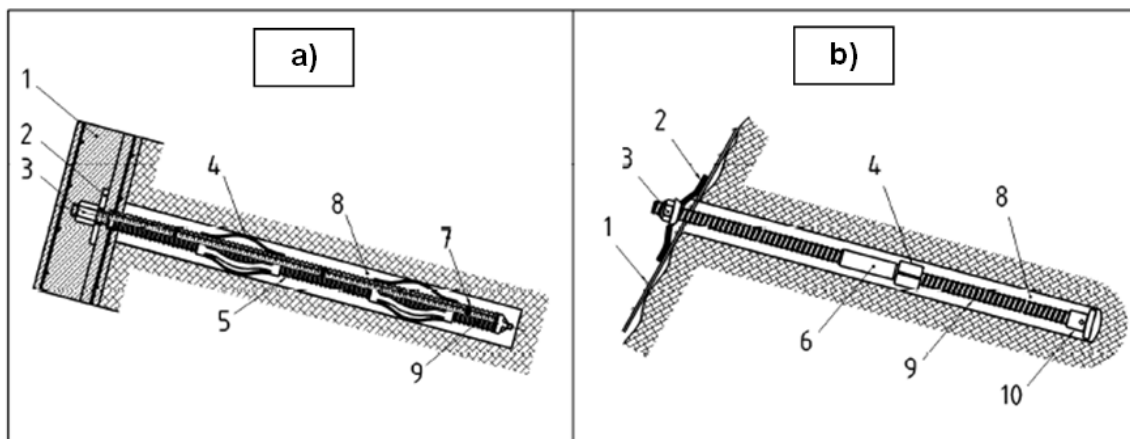


Abbildung 4: a) Vorgebohrtes Bohrloch mit eingepresstem Bodennagel b) selbstbohrender Bodennagel mit nachgiebiger Frontalausbildung [4]

- | | |
|---------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Frontalausbildung | 6. Muffe |
| 2. Kopfplatte | 7. Zugglied (Bewehrungsstab) |
| 3. Sicherungsmutter | 8. Einpressmittel |
| 4. Abstandhalter zur Zentrierung des Nagels | 9. Bodennagel (Stahlzugglied) |
| 5. Bohrloch | 10. Verlorene Bohrkronen |

Selbstbohrende Hohlstab-Bodennägel (Abbildung 4b)

Bei diesem Verfahren wird mit verlorenen Bohrkronen häufig drehschlagend gebohrt. Um den erforderlichen Bohrlochdurchmesser bei diesem Verfahren zu erhalten, ist darauf zu achten, dass die Bohrgeschwindigkeit, der Einpressdruck und die Durchflusgeschwindigkeit an die vorliegenden Baugrundverhältnisse angepasst werden. Durch die Wahl von z.B. zu hohen Einpressdrücken oder Durchflusgeschwindigkeiten der Bohrspülung werden vermehrt Bodenteilchen aus der Bohrlochwandung ausgespült, wodurch die Durchmesser der Bohrlöcher größer

werden. Dies führt einerseits zu Auflockerungen entlang der Bohrlochwand und andererseits zu einem erhöhten Mörtelbedarf.

Werkstoffe der Bodennägel (Zugglieder)

Bodennägel bestehen im Allgemeinen aus profilierten oder gerippten Stahlstäben mit Durchmessern im Bereich von 16 mm bis 32 mm. Nach ÖNORM 14490:210 sind hochfeste Stähle mit einer Dehngrenze von über 600 MPa zu verwenden. Faserverstärkte Kunststoffe, Geokunststoffe und Kohlestofffasern werden ebenfalls als Zugglieder verwendet. Diese sind leichter als Stahlstäbe und haben zum Teil einen erhöhten Korrosionswiderstand.

1.2.4 Boden/Nagel Interaktion

Bei Bodenvernagelungen werden aufgrund von Relativverschiebungen Schubspannungen zwischen den Nägeln und dem angrenzenden Boden mobilisiert, welche zu Zugspannungen in den Nägeln führen.

Bei weiteren Verschiebungen der Frontalausbildung versagt der Boden hinter der Wand (Abbildung 5). Die sich ausbildende gekrümmte Scherfläche im Bodenkörper verläuft vom Fußpunkt der Wand durch die Nägel bis zur GOK. Die Bewegung des monolithischen Bodenkörpers entlang dieser Scherfläche führt zu Biegemomenten und Scherkräften in den Nägeln.

Die Länge der Bodennägel ist so zu wählen, dass die erforderlichen Verankerungslängen in der passiven Zone erreicht werden, um ein Ausziehen der Nägel zu verhindern.

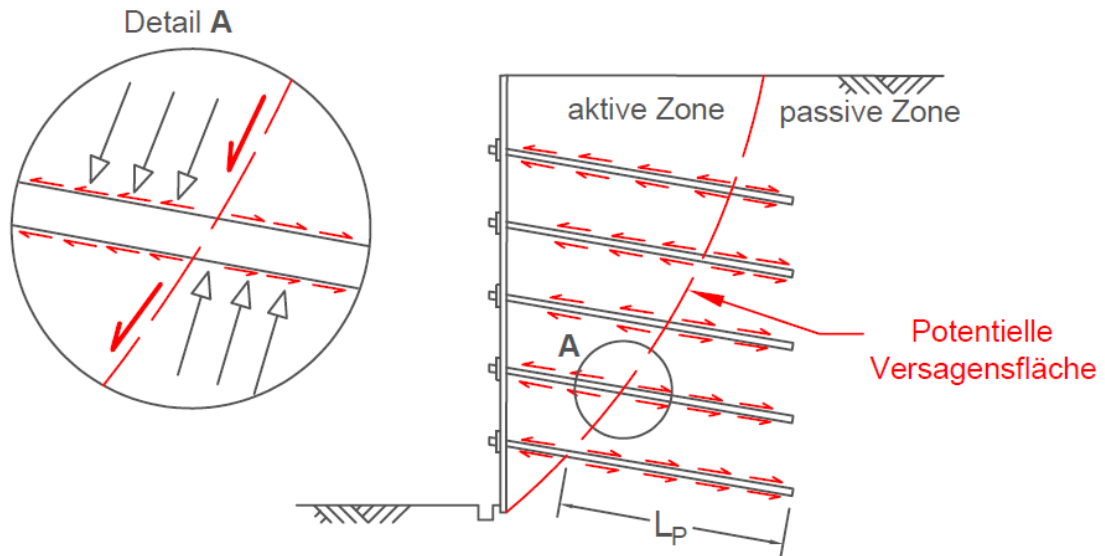


Abbildung 5: Boden-Nagel Interaktion [1]

Die Größe der Mantelreibung wird im Allgemeinen mit in situ Ausziehversuchen ermittelt. Sie ist auch mithilfe von Erfahrungswerten für vergleichbare Baugrundverhältnisse oder anhand von Literaturangaben abzuschätzen.

Die Mantelreibung von Bodennägeln hängt maßgeblich von folgenden Parametern ab:

- **Einpressdruck des Mörtels:** Dieser führt über eine Erhöhung der Normalspannung auf den Bodennagel und dem angrenzenden Boden zu einer Erhöhung der Mantelreibung.
- **Wassergehalt im Baugrund:** Versuche haben gezeigt, dass sich die maximalen Ausziehkräfte um rund 50 % verringern, wenn der Wassergehalt im Baugrund vom Proctorwassergehalt auf den maximal möglichen Wassergehalt des Bodens ansteigt. [2]
- **Neigungswinkel der Bodennägel:** Dieser beeinflusst die Mobilisierung der Zug- und Scherspannungen in den Nägeln. Bei flach eingebrachten Nägeln ($\varepsilon < 15^\circ$) bilden sich geringere Biegemomente und Scherbelastungen aus, als bei steileren Ausführungen. Dies hat einen positiven Effekt auf die Verschiebungen der Frontalausbildung und die Gesamtstandfestigkeit der Spritzbetonnagelwand. [2]

1.2.5 Unterschied Verpressanker - Bodennagel

Bodennägel sind Bewehrungsstäbe, welche ohne Vorspannung (passiv) in den Boden eingebracht werden. Im Gegensatz zum Anker werden Zugkräfte im Bodennagel erst durch die Mobilisierung von Scherkräften entlang der Mantelfläche (Mantelreibung) infolge einer initialen Relativbewegung aktiviert.

Bei kombinierten Bauverfahren (sogenannten „mixed structures“) werden Bodennägel gemeinsam mit anderen Stützmittel ausgeführt. Dazu zählen z.B Spritzbetonnagelwände mit vorgespannten Ankern im oberen Wandbereich und vernagelte Trägerbohlenwände (Berliner Verbau).

Ziel der kombinierten Bauverfahren (Abbildung 6) ist, die Verformungen zu verringern und die Gesamtstandfestigkeit der Wand zu erhöhen. Anwendung finden kombinierte Verfahren bei sehr hohen Wänden ($H > 10$ m) und bei setzungsempfindlichen Strukturen in unmittelbarer Nähe.

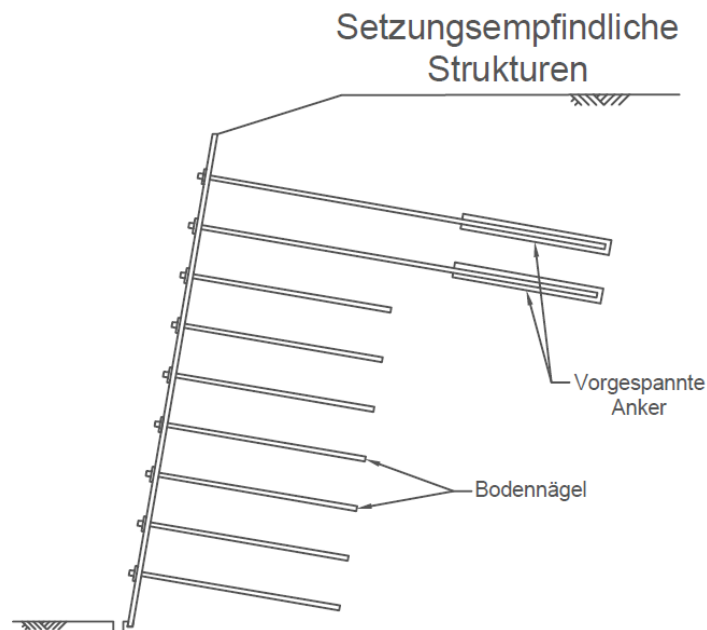


Abbildung 6: Kombinierte Bauverfahren zur Reduzierung von Setzungen [2]

1.2.6 Einfluss des Nagellayouts auf die Verformungen

Die Wahl der Nägellänge, des Einfallwinkels der Nägel und des Nagelrasters hängen von vielen unterschiedlichen Faktoren ab. Dazu zählen u.a. die Höhe (H) und der Böschungswinkel der Spritzbetonnagelwand (γ), der Nageltyp und die Baugrundverhältnisse. [4]

In [2] werden Richtwerte für Nagellängen bei vertikalen Wänden ($\gamma = 90^\circ$) genannt:

- $(0,5 - 0,7) * H$ für gerammte Nägel mit einem Rasterabstand von 0,5 m – 1,0 m
- $(0,8 - 1,2) * H$ für gebohrte Nägel mit einem Rasterabstand von 2,5 m – 6 m

Zu beachten ist, dass gerammte Nägel - im Vergleich zu gebohrten - aufgrund des dichten Rasters zu einer höheren Gesamtlänge der Nägel führen. Durch den engen Raster wird jedoch die Frontalausbildung schlanker und weniger bewehrt ausgeführt, da die auftretenden Momente in der Spritzbetonschale zwischen den Nägeln geringer sind. [2]

Häufig werden Spritzbetonnagelwände mit konstanter Nägellänge errichtet, da dies logistische Vorteile hat.

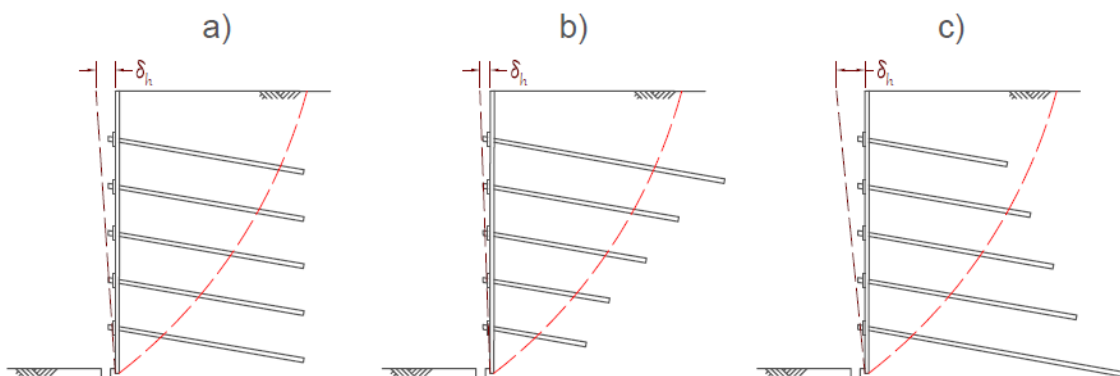


Abbildung 7: Einfluss des Nagellayouts auf die Verformungen. a) Konstante Nagellänge
b) abnehmende Nagellänge c) zunehmende Nagellänge [2]

Falls spezielle Randbedingungen, wie z.B. Hindernisse im Baugrund oder verringerte Kopferschiebungen zu beachten sind, werden auch andere Layouts verwendet.

Das Einbringen längerer Nägel im oberen Bereich der Wand (Abbildung 7 b) findet oft bei großen Wandhöhen ($H > 10$ m) Anwendung. Die Verschiebungen am Wandkopf werden dadurch reduziert.

Mit der Tiefe zunehmende Nagellängen (Abbildung 7 c) haben günstige Auswirkungen auf die Gesamtstandsicherheit der Konstruktion und sind gegebenenfalls aufgrund benachbarter, unterirdischer Gebäudeteile und Einbauten, wie z.B. Garagen, Kellerräume, Leitungen etc. erforderlich. [2]

Aus gerätetechnischen Gründen sind die Bodennägel leicht nach unten ($\varepsilon = 5^\circ - 10^\circ$) geneigt. Versuche haben gezeigt, dass die horizontalen Verschiebungen des Wandkopfes geringer ausfallen, je flacher die Nägel eingebracht werden (vgl. Abschnitt 1.2.4). Im Allgemeinen werden sämtliche Nägel mit derselben Neigung ausgeführt.

1.2.7 Lebensdauer der Konstruktion und Korrosionsschutz

Bei Bewehrungsstäben aus Stahl ist Korrosion die Hauptursache der Materialermüdung. Bodennägel aus Kunststoff und Schutzrohre für Stahlzugglieder unterliegen ebenfalls durch Oxidation und Rissbildung dem Alterungsprozess. Die Karbonatisierung von Beton und Mörtel führen auch zu einer Reduktion der Lebensdauer.

Die Geschwindigkeit der Degradation hängt vor allem von den Grundwasser- und Baugrundverhältnissen, den verwendeten Werkstoffen und den vorherrschenden Temperaturen ab. Auf Grundlage der Korrosivität des anstehenden Bodens und der Belastungsart des Nagels (Zug-, Druck-, Scher- und Momentbelastung) wird die Art und der Grad des Korrosionsschutzes festgelegt. [4]

Die Korrosivität des Baugrundes hängt maßgeblich von den folgenden Randbedingungen ab:

- Bodenart
- Leitfähigkeit
- Wassergehalt
- pH-Wert

Bei Bodennägeln aus Stahl werden die nachfolgenden Maßnahmen zur Erhöhung der Einsatzdauer angewendet:

- Korrosionszugabe (Überdimensionierung des Querschnittes unter Berücksichtigung der Lebensdauer)
- Einkapselung mit einem Einpressmittel (Mörtel oder Beton)
- Oberflächenbeschichtung der Stahlzuglieder
- Geripptes Hüllrohr mit Einpressmittel (Abbildung 8)
- Kombinationen der genannten Maßnahmen [4]

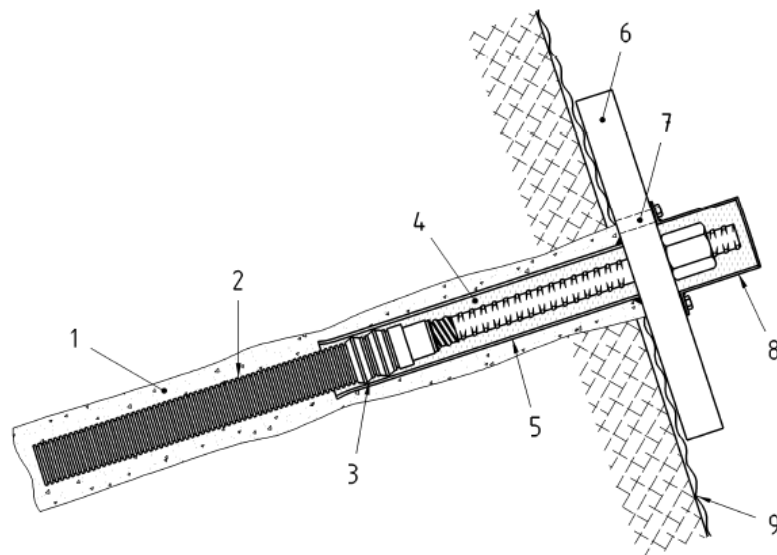


Abbildung 8: Korrosionsschutz mit geripptem Kunststoffrohr [4]

- | | |
|------------------------------|---------------------------------------------|
| 1 Einpressmittel | 6 Nagelkopfplatte |
| 2 Kunststoffhüllrohr gerippt | 7 Öffnung zum Einfüllen des Einpressmittels |
| 3 Dichtungsringe | 8 Abdeckung für den Nagelkopf |
| 4 Korrosionsschutzmasse | 9 Nachgiebige Frontausbildung |
| 5 Schutzrohr aus Stahl | |

Das Versetzen von Bodennägeln mit einem gerippten Kunststoffrohr als Korrosionsschutz erfolgt in ein vorgebohrtes Bohrloch, in welches die Nägel samt Korrosionsschutzmasse und Kunststoffhüllrohr versetzt werden. Der verbleibende Ringraum wird anschließend mit Mörtel verfüllt.

1.2.8 Grundlagen der Bemessung

Der Nachweis der Gesamtstandsicherheit von Spritzbetonnagelwänden erfolgt auf Grundlage von Grenzgleichgewichtsbetrachtungen. Bei diesen werden die treibenden Kräfte (Eigengewicht der Konstruktion, Auflasten etc.) den vorhandenen Widerständen (Scherwiderstand des Bodens und rücktreibende Nagelkräfte) im Versagensfall (Grenzgleichgewicht) gegenübergestellt. Von unterschiedlichen Versagensmechanismen und Versagensgeometrien wird die maßgebende Gleitfläche mit der geringsten Sicherheit gesucht. Für das Versagen wird angenommen, dass der Gleitkörper ein Monolith ist, welcher entlang einer Gleitfläche abrutscht.

Sind die mobilisierten Widerstände größer als die treibenden Kräfte, ist die Gesamtstandfestigkeit der Spritzbetonnagelwand gewährleistet. Zahlreiche Stabilitätsbetrachtungen basieren auf diesem Prinzip. [16]

Neben dem Scherwiderstand des Bodens werden auch die rückhaltenden Kräfte der Nägel angesetzt. Bei Bildung einer Scherfläche, die durch die Nägel verläuft, bilden sich neben den Zugkräften zusätzliche Scherkräfte und Biegemomente aus. Die Mehrheit der Berechnungsverfahren berücksichtigt dabei lediglich die Zugfestigkeit der Bodennägel (z.B. [2] [15]). Bei einigen werden zusätzlich die Scherfestigkeit und der Biege­widerstand der Bodennägel herangezogen (z.B. [2]). [16]

Die unterschiedlichen Verfahren zum Nachweis der Gesamtstandsicherheit unterscheiden sich in der Form der Versagensfläche und dem Versagensmechanismus (Rotation, Translation), den Gleichgewichtsbetrachtungen (Momenten- und Kräftegleichgewicht) und der Definition der Sicherheit. Die wichtigsten Verfahren zum rechnerischen Nachweis der Gesamtstandfestigkeit sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Tabelle 1: Verfahren zur Berechnung der Sicherheit gegen Böschungsbruch [20] [21]

Methode	Kreisförmige Versagensfläche	Nicht kreisförmige Versagensfläche	Momentengleichgewicht erfüllt	Kräftegleichgewicht erfüllt
BISHOP vereinfacht	✓	-	✓	(*)
JANBU vereinfacht	-	✓	-	✓
JANBU GPS	✓	✓	(**)	✓
Lower-Karafiath	-	✓	-	✓
Corps of Eng.	-	✓	-	✓
SARMA	✓	✓	✓	✓
SPENCER	✓	-	✓	✓
MORGENSTERN-PRICE	✓	✓	✓	✓

(*) Erfüllt vertikales Kräftegleichgewicht für die Normalkraft der Unterseite der Scheibe

(**) Erfüllt das Momentengleichgewicht für dünne Scheiben (JANBU 1957, GRANDE 1997)

Die maximal aufnehmbaren Scherspannungen des Bodens werden üblicherweise, wie folgt, nach Mohr Coulomb ermittelt:

Gleichung 2: Geradengleichung der Bruchgerade nach Mohr-Coulomb

$$\tau_f = c' + \sigma'_n * \tan(\varphi')$$

Die maximal aufnehmbare Scherspannung des Bodens (τ_i) ist mithilfe der effektiven Scherparameter (φ' und c') und der effektiven Normalspannung (σ_n') ermittelbar. Der mobilisierte Scherwiderstand ist von den treibenden Kräften abhängig. Der Sicherheitsfaktor (η_{MC}) ist der Quotient aus den vorhandenen Scherspannungen dividiert durch die maximal aufnehmbaren. Der Kehrwert des Sicherheitsfaktors (η_{MC}) ist der Ausnutzungsgrad (μ).

Unabhängig von der Berechnungsmethode aus Tabelle 1 werden die Sicherheitsfaktoren über eine Festigkeitsreduktion auf Basis der sogenannten Fellenius-Regel ($\eta_{Fellenius}$) ermittelt.

Gleichung 3: Sicherheitsfaktor nach Mohr Coulomb

$$\eta_{MC} = \frac{\tau}{\tau_f}$$

Gleichung 4: Sicherheitsfaktor nach Fellenius

$$\eta_{Fellenius} = \frac{\tan(\varphi_{vorhanden})}{\tan(\varphi_{erforderlich})} = \frac{c_{vorhanden}}{c_{erforderlich}}$$

Vorbemessung

Für die Vorbemessung (preliminary design) stehen Bemessungstabellen von Gigan, J.P. (1986) [6] zur Verfügung. Damit werden Längen, Durchmesser und Abstände der Nägel abgeschätzt. Des Weiteren werden sie zur Ermittlung der internen und externen Standsicherheit der Struktur verwendet. Diesen Tabellen liegen zahlreiche Vereinfachungen zugrunde. Dazu zählen u.a. homogene Baugrundverhältnisse, konstante Nagellängen und Nagelabstand, vorgegebener Einfallswinkel der Nägel ($\varepsilon = 20^\circ$). Diese Diagramme sind für unterschiedliche Verhältnisse von Nagellänge zu Wandhöhe (L/H-Verhältnis) vorhanden.

Bei der Vorbemessung wird lediglich die Zugfestigkeit der Bodennägel berücksichtigt. Scher- und Biege­widerstand werden vernachlässigt.

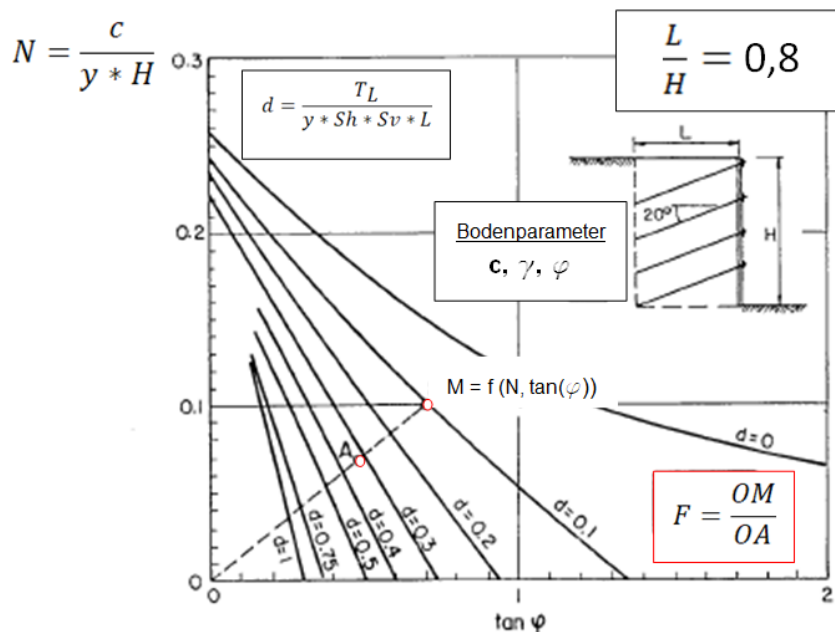


Abbildung 9: Bemessungsdiagramm von Gigan, J.P. (1986) für L/H = 0,8 [6]

Gleichung 5: Nageldichte d (Einheitenlos) nach Gigan, J.P (1986) [6]

$$d = \frac{T_L}{\gamma * S_h * S_v * L}$$

Gleichung 6: Verhältniszahl N (Einheitenlos) nach Gigan, J.P (1986) [6]

$$N = \frac{c}{\gamma * H}$$

In **Tabelle 2** sind selbstgewählte Berechnungsbeispiele für die Vorbemessung von unterschiedlichen Wandhöhen angeführt. Mithilfe der Eingabegrößen werden die Nageldichte d und die Verhältniszahl N anhand der Gleichungen fünf und sechs berechnet. Der Punkt A in Abbildung 9 gibt für einen bestimmten Reibungswinkel ($\tan \varphi$) den dazugehörigen Wert der Verhältniszahl N an. Der Ursprung des Diagrammes wird mit Punkt A verbunden (Strecke OA) und entsprechend verlängert. Mit dem Schnittpunkt dieser Geraden mit der Kurve der jeweiligen Nageldichte d wird die Strecke OM ermittelt. Der Quotient der Strecken OM/OA ist der Sicherheitsfaktor für die Gesamtstandfestigkeit der Spritzbetonnagelwand.

Tabelle 2: Rechenbeispiele zur Vorbemessung

Bezeichnung	Symbol	Beispiel 1*	Beispiel 2	Beispiel 3	Einheit	Ermittlung Parameter
Wandhöhe	H	10	10	5	m	Eingabegröße
Nagellänge	L	8	8	4	m	Verhältnis L/H
Kohäsion	c	20	10	10	kN/m ²	Eingabegröße
Innerer Reibungswinkel	φ	35	33	33	°	Eingabegröße
Bodenwichte	γ	20	18	18	kN/m ³	Eingabegröße
Horizontaler Nagelabstand	S_h	1,5	1,5	1,5	m	Eingabegröße
Vertikaler Nagelabstand	S_v	1,5	1,5	1,5	m	Eingabegröße
Neigung Bodennagel	ε	20	20	20	°	Eingabegröße
Ausziehwiderstand Bodennagel	T_L	118,8**	100,0	100,0	kN	Eingabegröße
Nageldichte	d	0,33	0,31	0,62	-	Gleichung 5
Verhältniszahl	N	0,10	0,06	0,11	-	Gleichung 6
Tangens von φ	$\tan \varphi$	0,70	0,65	0,65	-	Tangens von φ
Sicherheitsfaktor	F	1,47	1,15	2,02	-	Verhältnis OM/OA
* Beispiel aus Clouterre 1991 [2] (Punkte A und M eingetragen in Abbildung 9)						
** [17]						
Bei den Beispielen zwei und drei handelt es sich um fiktive Spritzbetonnagelwände.						

Ansatz nach GÄSSLER

Bei diesem Ansatz werden die Standsicherheitsnachweise auf Regelprofile und homogene Bodenverhältnisse eingegrenzt.

Für Regelprofile wird angenommen, dass die Nägel nur auf Zug infolge der Mantelreibung belastet werden. GÄSSLER hat bei Großversuchen festgestellt, dass die Zugkräfte in den Nägeln im passiven Bereich der Wand (Abbildung 5) annähernd linear bis zum Nagelende auf null abnehmen. Daher wird für den Versagenszustand eine konstante Grenzschubkraft T_m (kN pro m Nagel) entlang der Nägel im passiven Bereich angesetzt. Die Grenzschubkraft wird durch in situ Ausziehversuche bestimmt oder mithilfe von Erfahrungswerten abgeschätzt. Diese Versuche ergeben eine Grenzzugkraft, die dividiert durch die Nagellänge die Grenzschubkraft in kN/m ist. [8]

GÄSSLER unterscheidet zwischen zwei Versagenstypen eines Regelquerschnittes. Translation (Blockgleitverfahren) mit einem oder zwei monolithischen Bruchkörpern und Rotation. Durch Variation der Geometrien der möglichen Bruchkörper wird der maßgebende Sicherheitsfaktor gesucht.

Ansatz nach BISHOP

Dieser Ansatz zählt zu den Lamellenverfahren mit kreisförmigen Gleitlinien. Der von einem Gleitkreis mit einem Kreismittelpunkt M und einem Radius r begrenzte Bruchkörper wird in vertikale Lamellen unterteilt. Für jede dieser Lamellen ist das Gleichgewicht der Kräfte nachzuweisen. Die Ursprünge dieses Verfahren gehen auf KREY (1926) und BISHOP (1952) zurück. [9]

Folgende Annahmen werden bei diesem Verfahren getroffen:

- Belastung der Nägel nur auf Zug (keine Schub- und Momentenbelastung)
- Kräfte zwischen den Lamellen sind horizontal gerichtet
- Vertikale Kräfte zwischen den Scheiben (Scherkräfte) werden vernachlässigt
- Porenwasserdruck wird vernachlässigt

Bei dem Verfahren nach BISHOP wird lediglich das Momentengleichgewicht betrachtet. Die Sicherheit gegen das Versagen wird ermittelt, in dem das resultierende Moment aus den Einwirkungen dem resultierenden Moment aus den Widerständen um den Gleitkreismittelpunkt gegenübergestellt wird. Da die Schubkräfte zwischen den Lamellen die Ergebnisse der Standsicherheitsberechnung nur sehr gering beeinflussen, sind die Ergebnisse dieses Verfahrens hinreichend genau. [4]

Weitere Verfahren

Beim **Blockgleitverfahren** werden abhängig von der Bodenschichtung drei bis fünf Teilgleitkörper mit senkrechten Lamellengrenzen untersucht. Ein Krafteck aus Einwirkungen und Widerständen wird an den Teilgleitkörpern konstruiert. Bei einem Gleichgewicht zwischen treibenden und rückhaltenden Kräften ist das Krafteck geschlossen. Liegt kein Gleichgewicht vor, wird eine Zusatzkraft zum Schließen des Krafteckes benötigt. Wirkt die Zusatzkraft treibend (in Richtung der Gleitbewegung des monolithischen Bodenkörpers), ist die Sicherheit größer als 1,0 und wirkt sie rücktreibend, ist sie kleiner als 1,0. [8]

Das Verfahren der zusammengesetzten Bruchmechanismen mit geraden Gleitlinien unterscheidet sich vom Blockgleit-Verfahren insoweit, dass die Gleitlinien zwischen den einzelnen Gleitkörpern geneigt verlaufen.

Für weitere Ausführungen der Grenzgleichgewichtsbetrachtungen von Spritzbetonnagelwänden wird hier auf [8] und [16] verwiesen.

1.2.9 Aufgaben der Frontalausbildung

Die Frontalausbildung stützt den anstehenden Boden und verhindert oberflächennahe Auflockerungen. Des Weiteren leitet sie die Kräfte, welche von den Nägeln auf die Kopfplatte übertragen werden in die Spritzbetonschale ein.

Der Erddruck hinter der Frontalausbildung ist schwierig zu ermitteln, da die Verformungen der Frontalausbildung im Vorhinein nicht genau genug bestimmbar sind. Sie sind maßgeblich von der Biegesteifigkeit der Schale, der Höhe der Aushubschritte und den Baugrundeigenschaften abhängig. Aufgrund der Ausbildung von Druckzonen zwischen den Nägeln bildet sich im vernagelten Bodenkörper ein Gewölbeeffekt aus,

welcher eine Verbundwirkung in diesem hervorruft und somit die Stabilität der Böschung erhöht. [2]

Befindet sich Wasser im anstehenden Baugrund, trägt die Entwässerung des vernagelten Bodenkörpers hinter der Frontalausbildung einen wesentlichen Teil zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und Gesamtstandfestigkeit des Bauwerkes bei. Sie verhindert das Aufbauen von Wasserdruck und die Ausbildung von Eislinen, welche zusätzliche Belastungen für die Frontalausbildung darstellen. Die Entwässerung des vernagelten Bodenkörpers erfolgt über Drainagerohre und Noppenfolien hinter der Frontalausbildung (Abbildung 3).

Des Weiteren wird die Frontalausbildung entsprechend gestaltet, um bei Böschungssicherungen, welche über einen längeren Zeitraum sichtbar bleiben, eine ästhetische Eingliederung in die Umgebung zu ermöglichen. Sie wird oft zur Befestigung von Paneelen zur Verdeckung der Spritzbetonschale oder zur Installation von technischer Ausrüstung, wie z.B. Verkehrsschilder, Beleuchtung etc. verwendet.

Frontalausbildungen werden vertikal, geneigt oder mit schmalen Bermen ausgeführt. Ausführungen mit Bermen erleichtern bei hohen Wänden die Zugänglichkeit für Wartung und Überwachung.

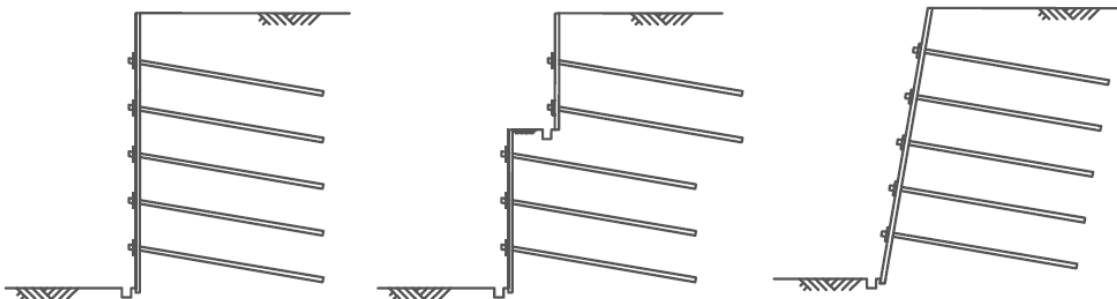


Abbildung 10: Unterschiedliche Ausführungen der Frontalausbildung [4]

Je nach erforderlicher Steifigkeit werden Frontalausbildungen unterschiedlich ausgeführt. In manchen Fällen werden Böschungen auch ohne Frontalausbildung gesichert.

Die Auswahl hängt vor allem vom

- Böschungswinkel der Wand,
- dem inneren Reibungswinkel des Bodens,
- der Böschungshöhe und
- der zu erwartenden Belastung an der GOK

ab.

Weiche Frontalausbildung

Die Hauptaufgaben der weichen Frontalausbildung sind der Erosionsschutz, sowie der Schutz gegen das Aufreißen der Böschungsoberfläche. Zur Anwendung kommen zum Beispiel Viereck- oder Sechseckgefächte aus Draht, welche die Böschungsoberfläche vorübergehend oder auf Dauer bewehren. In diesem Fall dienen die Nägel hauptsächlich zur Befestigung der Frontalausbildung. [4]

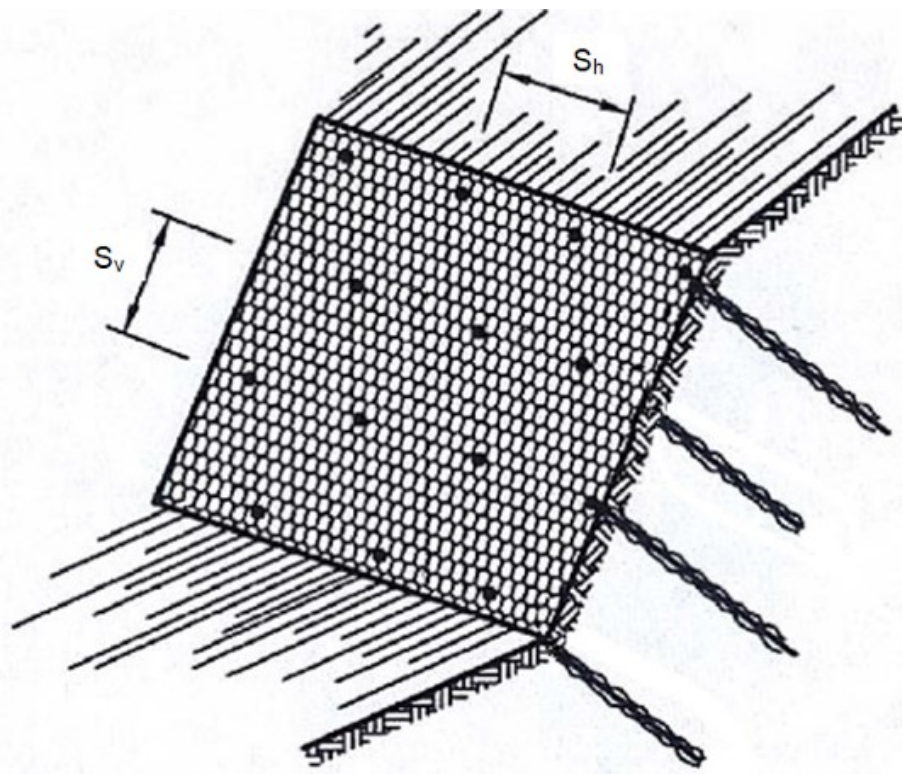


Abbildung 11: Weiche Frontalausbildung [5]

Bedingt nachgiebige Frontalausbildung

Durch diese Ausführung wird die Oberflächenerosion der Böschung ebenfalls reduziert. Bedingt nachgiebige Frontalausbildungen besitzen ein geringes Maß an Biegesteifigkeit und stützen dadurch die freie Oberfläche der Böschung. Gängige Ausführungen bestehen aus Geogittern oder Geokunststoffen. Erforderlich sind sie bei allen Böden (z.B. Feinsand, Grobschluff), welche einen geringen Widerstand gegen Erosion aufweisen. [4]

Starre Frontalausbildung

Starre Frontalausbildungen (Abbildung 10) stabilisieren die Böschungsbereiche zwischen den Nägeln durch eine vollständige Versiegelung der Böschung. Sie bestehen üblicherweise aus einer oder zwei Lagen Bewehrungsgitter mit einer rund 10 cm bis 20 cm dicken Spritzbetonschale. Neben der Unterbindung der Oberflächenerosion werden die Verformungen zwischen den Nägeln aufgrund der Biegesteifigkeit dieser Ausführung reduziert. [4]

Diese Ausführung ist bei einem steilen Böschungswinkel der Frontalausbildung ($\eta = 60^\circ - 90^\circ$) erforderlich und stellt den höchsten bautechnischen Aufwand dar.

1.2.10 Versagensformen

Bei Spritzbetonnagelwänden wird grundsätzlich zwischen innerer und äußerer Standsicherheit unterschieden. Die innere wird aufgrund der Einwirkungen auf die Nägel und Frontalausbildung (z.B. Scherbeanspruchungen und Biegebelastungen) ermittelt. Bei der externen verhält sich der vernagelte Bodenkörper wie ein monolithischer Körper, der entlang einer Scherfläche abgleitet. Mischformen aus innerer und äußerer Standsicherheit treten ebenfalls auf.

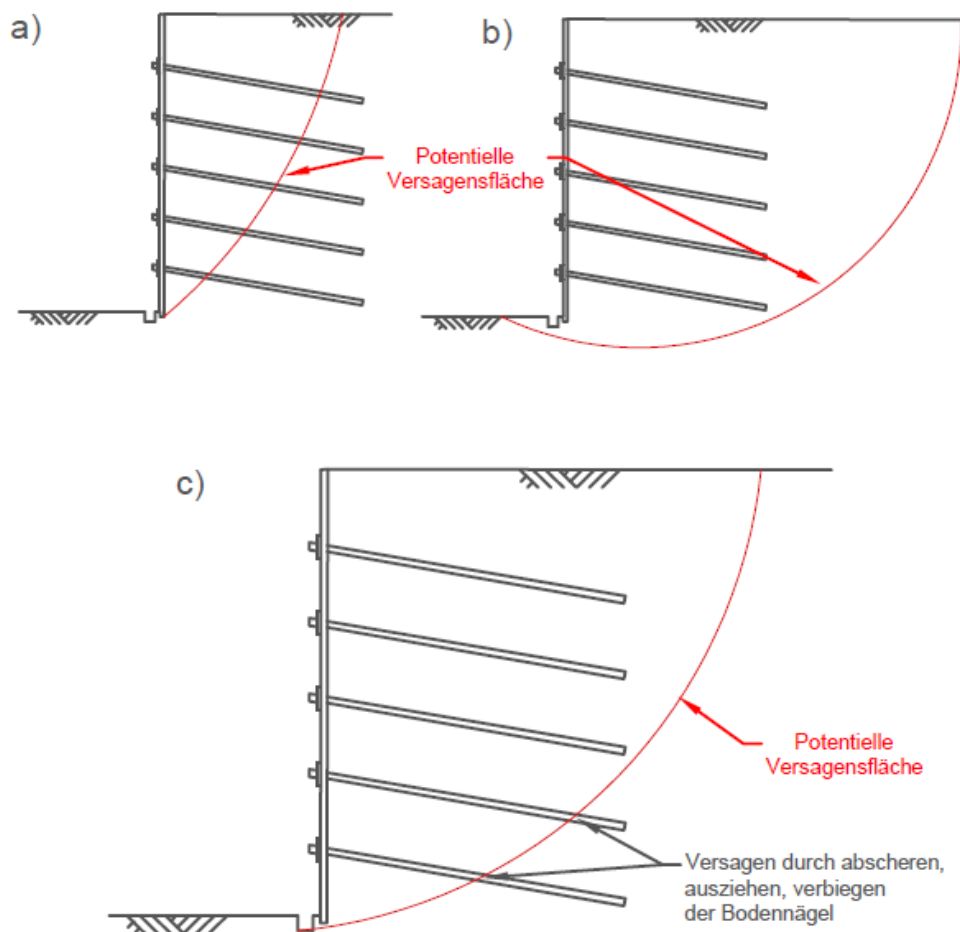


Abbildung 12: a) innere Standsicherheit b) äußere Standsicherheit c) Mischform [2]

Innere Standsicherheit

Im Bereich einer möglichen Versagensfläche, welche durch die Nägel verläuft (Abbildung 12 a), wirken Scherkräfte und Biegemomente auf die Nägel ein.

Die Biegesteifigkeit der Nägel verhindert das Ausbilden einer klar definierten Scherfläche und führt zur Ausbildung einer Scherzone (Abbildung 13).

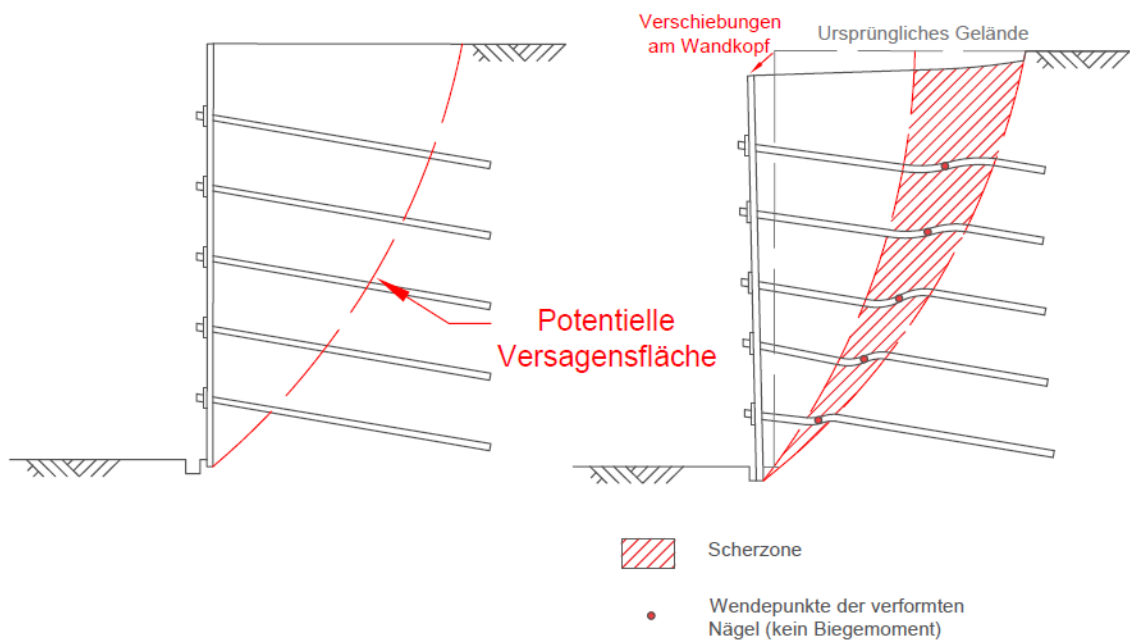


Abbildung 13: Innere Standsicherheit [2]

Ein solches Versagen tritt u.a. ein, wenn

- die Querschnitte der Nägel unterdimensioniert sind oder durch Korrosion geschwächt werden.
- eine nicht planmäßige, zusätzliche Auflast an der GOK auftritt, welche bei der Bemessung nicht berücksichtigt wurde.
- aufgrund von Infiltration durch Oberflächen- oder Grundwasser eine Sättigung des Bodens stattfindet.
- durch Eislinsenbildung in frostempfindlichen Böden zusätzliche Zugkräfte in den Nägeln aufgebaut werden und Beschädigungen der Frontalausbildung stattfinden.

Innere Standsicherheit durch ausziehen der Nägel

Dieses Versagen tritt auf, wenn z.B. die Mantelreibung zwischen Stahlzugglied und Mörtel oder Mörtel und anstehendem Boden im Rahmen der Bemessung überschätzt wird oder die Zugfestigkeit der Nägel unterschritten wird. Die Qualität des Mörtels und des Einpressvorganges tragen maßgebend zum Auszieh Widerstand der Nägel bei.

Ursache für diese Versagensart ist eine unzureichende Verankerungslänge der Nägel in der passiven Zone (Abbildung 5). Die Nägel werden aus dem Baugrund gezogen, was zum Verlust der Standsicherheit der Wand führt.

Dieses Versagen kündigt sich bereits während der Bauphase durch überdurchschnittlich große Verformungen des vernagelten Bodenkörpers an und tritt meist in mittelplastischen bis ausgeprägt plastischen, tonigen Böden auf. [2]

Versagen des Baugrundes durch zu große Aushubsschritte

Durch zu große Aushubsschritte wird der ungestützte Bereich der Böschung immer höher, was sich negativ auf das Tragverhalten der Wand auswirkt. Bei diesem Versagenstyp beginnt sich der Boden hinter der Frontalausbildung aufgrund der hohen Verformungen aufzulockern und der Gewölbeeffect, der sich zwischen Baugrubensohle (BGS) und dem vernagelten Bodenkörper ausgebildet hat, geht verloren. Die bereits eingebrachten Bodennägel gleiten samt der Frontalausbildung in die Baugrube. Die Nägel werden dadurch auf Biegung und Scherung beansprucht und stark verformt oder abgeschert. [2]

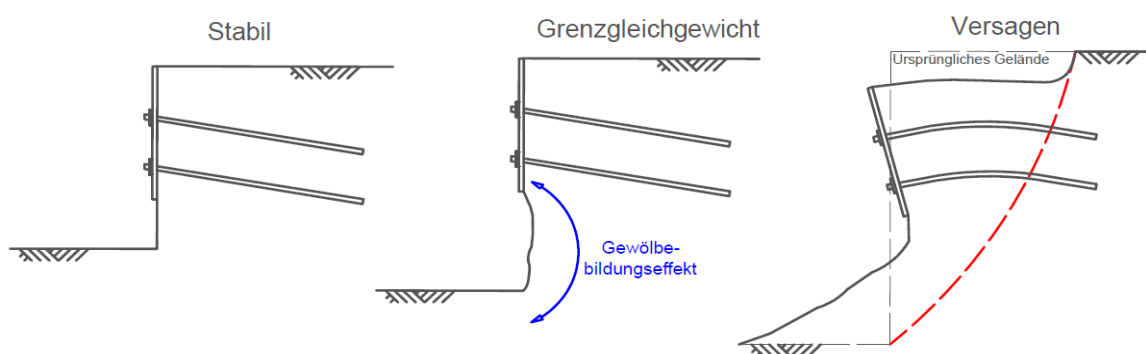


Abbildung 14: Versagen bei zu großem Aushubsschritt [2]

Äußere Standsicherheit und Mischformen

Bei der äußeren Standsicherheit – Verlust der Gesamtstandfestigkeit – bildet sich eine Scherfläche hinter dem vernagelten Bodenkörper aus. Entlang dieser gleitet der Bodenkörper einschließlich der Nägel und Frontalausbildung als Monolith ab (Abbildung 12 b). [2]

Ausgelöst wird dieses Versagen z.B. durch:

- Zu kurze Bodennägel
- Versagen des Entwässerungssystems

Bei **Mischformen** (Abbildung 12 c) der inneren und äußeren Standsicherheit treten beide Versagensformen auf. Der vernagelte Bodenkörper gleitet entlang einer Scherfläche, welche im unteren Bereich einen Teil der Nägel schneidet und im oberen hinter dem vernagelten Bodenkörper verläuft, ab. Dadurch werden die unteren Bodennägel abgeschert, verformt, verbogen oder ausgezogen. [2]

1.2.11 Vergleich mit anderen Bauverfahren

Zum Vergleich gängiger Verfahren zur Böschungssicherung sind in Tabelle 3 maßgebende Eigenschaften ausgewählter Bauausführungstechniken zusammengefasst.

Tabelle 3: Vergleich gängiger Verfahren zur Baugrubensicherung [11]

	Verformbarkeit	Wasserdurchlässigkeit	Wiedergewinnbarkeit	Kosten allgemein
Trägerbohlenverbau (TBV)	biegeweiches System	durchlässig	Wiedergewinnbar (Träger und Holz- oder Betonfertigteilausfachung) verbleibend (Spritzbetonausfachung)	wirtschaftliche Variante
Spundwand (SpW)	biegeweiches System	undurchlässig	wiedergewinnbar	teurer als TBV
Bohrpfahlwand	Verformungsarm	undurchlässig (überschnitten) durchlässig (aufgelöst oder tangierend)	verbleibend	teurer als TBV und SpW
Schlitzwand	Verformungsarm	undurchlässig	verbleibend	erst ab 7500 m ² rentabel
Spritzbeton - Nagelwand (SNW)	biegeweiches System	durchlässig (Entwässerung zwingend erforderlich)	verbleibend	wirtschaftliche Variante

Diese Gegenüberstellung ist rein qualitativ, da die Randbedingungen bei jedem Bauvorhaben unterschiedlich sind und somit nicht pauschal das wirtschaftlich und technisch geeignetste Verfahren ermittelbar ist.

2 Analytische Ansätze zur Verformungsabschätzung

2.1 Allgemeines

Die analytischen Ansätze zur qualitativen Abschätzung der Verformungen sind in der Literatur zurzeit begrenzt vorhanden, da bislang wenige Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Spritzbetonnagelwänden durchgeführt wurden.

Eine Ausnahme stellt das französische Forschungsprojekt CLOUTERRE [2] dar, bei welchem u.a. auch das Verformungsverhalten von Spritzbetonnagelwänden genau beobachtet wurde. Im Rahmen dieses Projektes wurden zahlreiche Bauvorhaben und Großversuche mit Messspiegeln für 3D Verschiebungsmessungen instrumentiert, um den Verlauf der Verformungen zu überwachen. Aus den gewonnenen Daten wurden analytische Ansätze zur Abschätzung der Verschiebungen entwickelt, welche nachfolgend im Detail vorgestellt werden.

2.2 Einflüsse auf die Verformungen

Aus [2] geht hervor, dass die zu erwartenden Verformungen einer vertikalen Spritzbetonnagelwand ($\eta = 90^\circ$) mit horizontalem Gelände hinter der Wand ($\alpha = 0^\circ$) durch drei kennzeichnende Größen beschrieben werden.

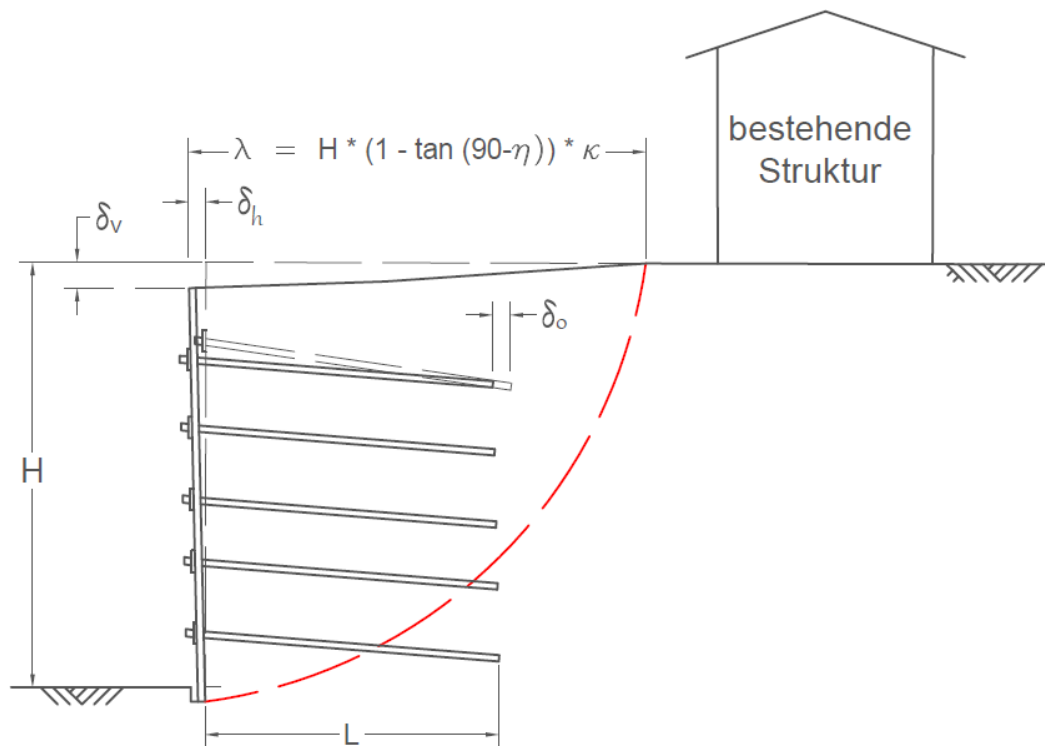


Abbildung 15: Verformte Spritzbetonnagelwand mit den maßgebenden Einflussgrößen [2]

Zu den kennzeichnenden Größen zählen:

δ_o *horizontale Verschiebung am Nagelfuß*

δ_h *horizontale Verschiebung des Wandkopfs (u_x)*

δ_v *vertikale Verschiebung des Wandkopfs (u_y)*

Gleichung 7: Berechnung der Länge des Einflussbereiches [2]

$$\lambda = H * (1 - \tan(90 - \eta)) * \kappa$$

Bei den beobachteten Bauvorhaben und Großversuchen aus [2] wurde festgestellt, dass die horizontalen Verschiebungen δ_h am Wandkopf in etwa die gleiche Größe hatten, wie die vertikalen Verschiebungen δ_v .

Erfahrungswerte zur Abschätzung der Verschiebungen und der Länge des Einflussbereiches aus [2] befinden sich in **Tabelle 4**.

Die Verschiebungen am Nagelfuß δ_0 liegen im Allgemeinen zwischen 0,4 und 0,5 Promille der Wandhöhe, wobei dieser Wert maßgebend vom H/L-Verhältnis (Abbildung 15) und den Baugrundeigenschaften abhängig ist. [2]

Die Verformungen der Frontalausbildung werden maßgeblich von folgenden Einflussfaktoren beeinflusst:

- Zeit zwischen Aushub und dem Einbringen der Stützmittel
- Höhe der Aushubschritte
- Nagelraster
- Zugfestigkeit der Bodennägel
- Sicherheitsfaktor der Gesamtstandfestigkeit
- Verhältnis der Wandhöhe zur Länge der Bodennägel (H/L)
- Einfallen der Nägel (ε)
- Baugrundeigenschaften (z.B. Scherparameter)

Ein geringeres Ausmaß an Verschiebungen tritt auf, wenn ein hoher Sicherheitsfaktor und ein niedriges H/L – Verhältnis ($< 1,5$) vorliegen. Das Einfallen der Nägel hat einen signifikanten Einfluss auf die Verschiebungen. Ein flaches Einfallen der Nägel ($\varepsilon \leq 10^\circ$) führt dazu, dass sich mehr Zugspannungen und geringere Biege- und Scherbelastungen in den Nägeln ausbilden. Dieser Umstand verringert die auftretenden Verschiebungen.

Tabelle 4: Schätzwerte für die Kopfverschiebungen und des Faktors κ [2]

	Verwittertes Festgestein	Sand	Ton
$\delta_v = \delta_h = u_x = u_y$	1H / 1000	2H / 1000	4H / 1000
κ	0,80	1,25	1,50

2.3 Verformungsverhalten während der Bauausführung

Während der Aushubsschritte werden die Mantelkräfte entlang der Nägel durch Verschiebungen im Boden mobilisiert und dadurch Zugkräfte in den Nägeln aktiviert. Dieser Prozess dauert im Allgemeinen die nachfolgenden drei bis vier Aushubsschritte.

Die horizontalen und vertikalen Verschiebungen des Wandkopfes (δ_h und δ_v) nehmen mit der Aushubtiefe aufgrund des steigenden H/L-Verhältnis überproportional zu. [2]

Entscheidend bei der Errichtung von Spritzbetonnagelwänden ist die Stabilität des ungestützten Böschungsbereichs unmittelbar nach einem Aushub. Ab dem zweiten Aushubschritt bildet sich bei nicht zu hohen Aushubhöhen ein Gewölbe zwischen der Baugrubensohle und dem mit Spritzbeton gesicherten Wandbereich (Abbildung 14) aus. Dieses trägt maßgebend zur Stabilität des ungestützten Böschungsbereichs bei. Damit sich in diesem Bereich ein Gewölbe ausbildet, ist die Höhe der Aushubsschritte an die Baugrundeigenschaften anzupassen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass kein Wasser durch diesen Böschungsbereich sickert (Drainagierung). [2]

Die genannten Punkte zählen zu einer fachgerechten Arbeitsweise und sind vom ausführenden Baustellenpersonal und der Bauleitung abhängig.

2.4 Verformungsabschätzung Musternagelwand

2.4.1 Allgemeine Informationen

Anhand dieses selbstgewählten Beispiels wird das Verschiebungsverhalten einer Spritzbetonnagelwand mit homogenem Bodenaufbau abgeschätzt.

Eine 10 m hohe, vertikale Wand, die als Baugrubensicherung dient, wird betrachtet. Der Bodenaufbau besteht aus einer 20 m mächtigen Bodenschicht aus schluffigem Sand. Der Grundwasserspiegel befindet sich unterhalb der Baugrubensohle und hat keinen Einfluss auf das Verhalten der Spritzbetonnagelwand.

Die Kennwerte zu diesem Beispiel sind in **Tabelle 5** angeführt.

Tabelle 5: Parameter der Musternagelwand

Bezeichnung	Symbol	Wert *	Einheit
Wandhöhe	H	10	m
Nagellänge	L	8	m
Wandneigungswinkel	η	90	°
Geländeneigung hinter der Böschung	α	0	°
Einfallen der Bodennägel	ε	10	°
Kohäsion	c	20	kN/m ²
Innerer Reibungswinkel	φ	35	°
Charakt. Mantelreibung	$q_{s,k}$	200	kN/m ²
Bodenwichte	γ	20	kN/m ³
Horizontaler Nagelabstand	S_h	1,5	m
Vertikaler Nagelabstand **	S_v	1,5	m
Bohrungsdurchmesser	D	0,14	m
Nageldurchmesser [17]	d	0,018	m
Stärke der Spritzbetonschale	s	0,10	m
Charakt. Bruchkraft Nagel [17]	$R_{p,k}$	204	kN
Sicherheitsfaktor nach Gigan, J.P (1986) ***	F	1,47	-

* Werte aus Tabelle 2, Beispiel 1
 **Die Nägel sind direkt untereinander angeordnet
 ***aus Abschnitt 1.2.8

2.4.2 Abschätzung der Verschiebungen

Nach den Schätzwerten aus Tabelle 4 ergeben sich für die horizontale und vertikale Kopfverschiebung folgende Werte:

$$u_x = u_y = \delta_v = \delta_h = 2 * H / 1000 \text{ (mm)}$$

$$u_x = u_y = \delta_v = \delta_h = 2 * 10,0 \text{ m} / 1000 = 0,020 \text{ m} = \underline{20 \text{ mm}}$$

Für die Länge des Bruchkörpers λ ergibt sich nach Tabelle 4 und Gleichung 7:

$$\lambda = 10,0 * (1 - \tan(90 - 90)) * 1,25 = \underline{12,5 \text{ m}}$$

2.5 Bauvorhaben Bella Vita, Bratislava

2.5.1 Allgemeine Informationen



Abbildung 16: Bauvorhaben Bella Vita, Bratislava [7]

Beim Bauvorhaben Bytový dom Bella Vita Residence in Bratislava werden sechs fünfgeschossige Gebäude mit insgesamt 120 Wohneinheiten und zwei unterirdische Tiefgaragen errichtet. Das Grundstück befindet sich in Hanglage (Abbildung 53) und die Baugrubensicherung erfolgt Bergseitig hinter den beiden Wohnblöcken mit bis zu 6,8 m hohen Spritzbetonnagelwänden. Der Grundwasserspiegel befindet sich unterhalb der Baugrubensohle und hat somit keinen Einfluss auf das Bauvorhaben.

Informationen zu den Kenngrößen der Wand befinden sich in Tabelle 6 und Tabelle 7, sowie in Abbildung 18.

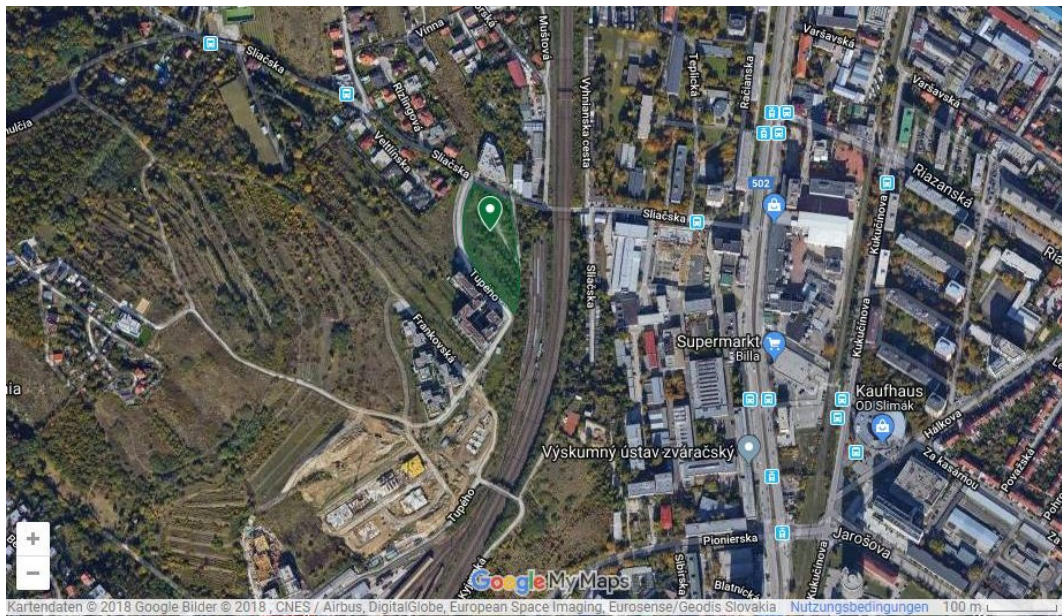


Abbildung 17: Lage des Bauvorhabens in Bratislava [7]

Das Bauvorhaben liegt im nördlichen Stadtteil Nové Mesto in Bratislava. Das unbebaute Grundstück befindet sich auf einer nach Osten einfallenden, flachen Böschung.

Tabelle 6: Parameter Spritzbetonnagelwand – Bella Vita

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Wandhöhe	H	6,8	m
Nagellängen	L	3, 4, 6, 5 *	m
Wandneigungswinkel	η	75	°
Gelände hinter der Wand	α	0	°
Inklination der Bodennägel	ε	20	°
Horizontaler Nagelabstand	S_h	2	m
Vertikaler Nagelabstand	S_v	1,7	m
Bohrungsdurchmesser	D	0,14	m
Nageldurchmesser	d	0,018	m
Stärke der Spritzbetonschale	s	0,10	m
Char. Bruchkraft Nagel [17]	$R_{p,k}$	204	kN
* Nagellängen von unten nach oben (Abbildung 18)			

Die geometrischen Eigenschaften des Bauvorhabens Bella Vita sind in **Abbildung 18** dargestellt.

2.5.2 Geologische Beschreibung

Aufgrund des massiven Einschnittes, welcher für die fünfgeschossigen Gebäude mit Keller und Tiefgarage erforderlich ist, wurden in der Erkundungsphase sechs Kernbohrungen ausgeführt. Während der Bohrarbeiten wurden Proben der verschiedenen Lithologien (Sand feinkörnig, Sand grobkörnig, Fels verwittert, Granit) entnommen und die geotechnischen Parameter (u.a. φ , c_k , γ_k , E-Modul, Durchlässigkeit) anhand dieser bestimmt. Die geotechnischen Parameter und der Bodenaufbau sind in Tabelle 7 und Abbildung 18 dargestellt. Die charakteristische Mantelreibung wurde mithilfe von Literaturwerten (Anhang B) abgeschätzt. [13]

Tabelle 7: Bodenparameter Bella Vita aus [13]

Bodenparameter Bella Vita						
Bezeichnung	Symbol	Einheit	Sand fein	Sand grob	Fels verw.	Granit
Innerer Reibungswinkel	φ	°	26	31	33	43
Charakt. Kohäsion	c_k	kN/m ²	14	6	12	40000
Charakt. Bodenwichte	γ_k	kN/m ³	18	18,5	18,5	26
Charakt. Mantelreibung	$q_{s,k}$	kN/m ²	150	200	400	500

Das Bauvorhaben befindet sich in einem peripheren Sedimentationsgebiet der kleinen Karpaten und besitzt kleinräumig wechselnde Lithologien. Unter einer ca. 10 – 30 cm mächtigen anthropogenen Aufschüttung treten u.a. Granodiorite (kohlenstoffhaltiger Muscovit) und pegmatitreiche Granodiorite (Bratislava Typ) auf. [13]

2.5.3 Abschätzung der Verschiebungen

Die Höhe H der Wand beträgt 6,79 m. Aufgrund der vorhandenen Sand- und Felsschichten wird der Schätzwert aus **Tabelle 4** zwischen diesen beiden Bodenarten interpoliert ($1,5 \cdot H / 1000$).

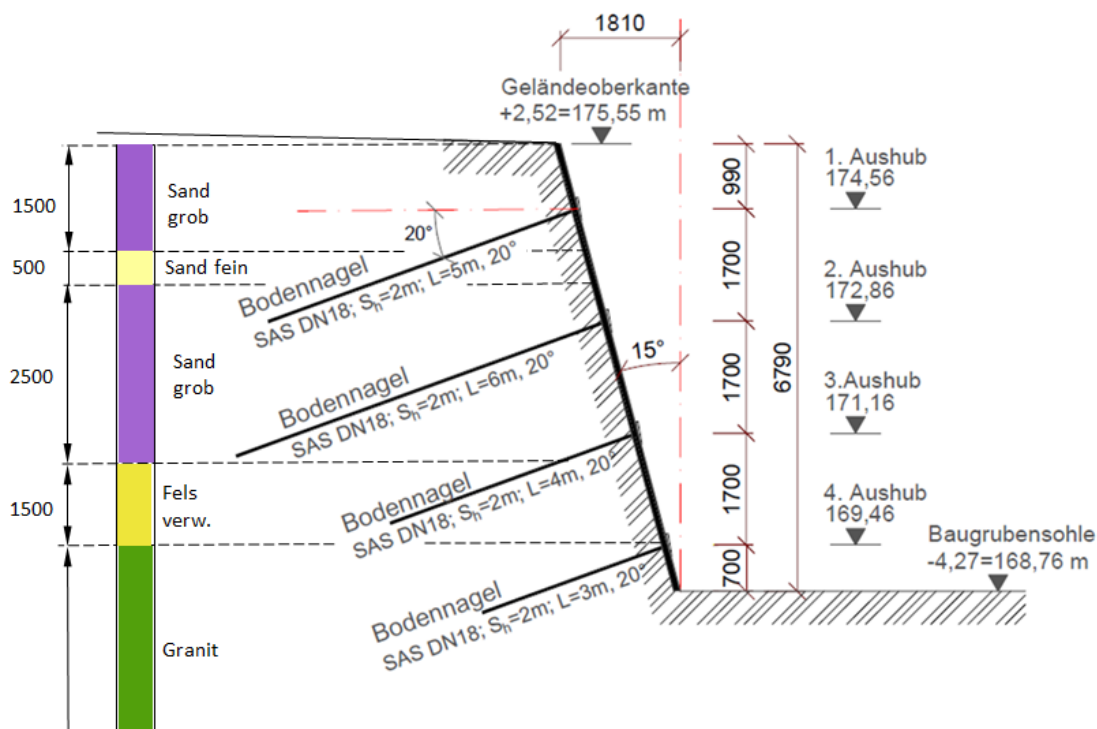


Abbildung 18: Instrumentierter Querschnitt der Baugrube (übersetzt von Keller Grundbau Slowakei)

Nach den Schätzwerten aus Tabelle 4 ergeben sich für die horizontale und vertikale Kopfverschiebung folgende Werte:

$$u_x = u_y = \delta_v = \delta_h = 1,5 \cdot H / 1000$$

$$u_x = u_y = \delta_v = \delta_h = 1,5 \cdot 6,8 \text{ m} / 1000 = 0,0102 \text{ m} = \underline{10 \text{ mm}}$$

Für die Verschiebung des obersten Nagelkopfes des instrumentierten Querschnittes (5,8 m über der BGS) ergibt sich nach Tabelle 4:

$$u_x = u_y = \delta_v = \delta_h = 1,5 \cdot 5,8 \text{ m} / 1000 = 0,0087 \text{ m} = \underline{9 \text{ mm}}$$

Für die Länge des Bruchkörpers λ ergibt sich nach Gleichung 7:

$$\lambda = 6,8 \cdot (1 - \tan(90 - 75)) \cdot 1,25 = \underline{6,22 \text{ m}}$$

Bei den ermittelten Ergebnissen ist festzuhalten, dass es sich um die Anwendung von Erfahrungswerten aus [2] handelt und diese lediglich für eine erste Abschätzung verwendet werden.

3 GGU-STABILITY

3.1 Allgemeines

Die Ermittlung der Standsicherheitsfaktoren der untersuchten Spritzbetonnagelwände erfolgt mithilfe des geotechnischen Bemessungsprogrammes GGU-STABILITY. Dieses zweidimensionale Programm wurde aufgrund der fundierten theoretischen Berechnungsmethoden (z.B. nach GÄSSLER) und der Verfügbarkeit ausgewählt. Böschungsbruchberechnungen, Berechnungen von Bodenvernagelungen und Bewehrte-Erde-Wänden werden nach

- DIN 4084:1981
- DIN 4084:1996
- DIN 4084:2009 und
- DIN EN1997-1:2014 (Eurocode 7)

durchgeführt.

Mögliche Gleitflächen werden vom Programmanwender vorgegeben und die maßgebende Gleitfläche mit der geringsten Sicherheit gegen Böschungs- bzw. Geländebruch wird ermittelt. Die Ermittlung der Sicherheitsfaktoren wird in Abschnitt 1.2.8 bzw. in [8] und [16] genauer beschrieben. [10]

Die Bemessung von Bodenvernagelungen erfordert folgende sechs Einzelnachweise:

- **Nachweis der inneren Sicherheit** (nach JANBU und BISHOP, Starrkörper-Bruchmechanismus, Blockgleitmethode)
- **Nachweis der Gleitsicherheit**
- **Nachweis der Kippsicherheit**
- **Nachweis der Grundbruchsicherheit**
- **Nachweis der Geländebruchsicherheit**
- **Nachweis der Sicherheit gegen Versagen der Betonschale (Spritzbeton)**

[10]

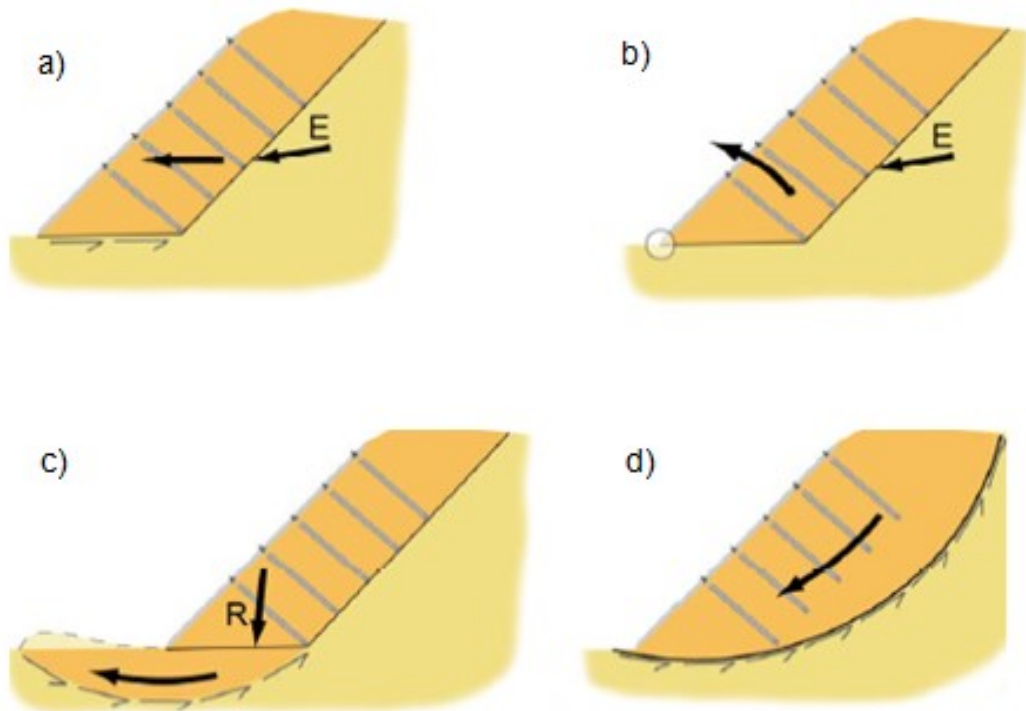


Abbildung 19: Einzelnachweise a) Gleiten, b) Kippen, c) Grundbruch, d) Geländebruch [14]

Für detailliertere Informationen zum Programm wird auf das Handbuch von GGU-STABILITY verwiesen.

Um eine Vergleichbarkeit der Sicherheitsfaktoren aus GGU-STABILITY (Grenzgleichgewichtsbetrachtung) und PLAXIS (φ -c-Reduktion) zu erhalten, werden die Teilsicherheitsbeiwerte in GGU-STABILITY auf 1,0 gesetzt. Dies ist notwendig, da eine Abminderung der effektiven Scherparameter bzw. eine Vergrößerung der Einwirkungen zu zu kleinen Sicherheitsfaktoren mit GGU-STABILITY führt. Die Ergebnisse der GGU-STABILITY Berechnungen befinden sich in **Anhang C**.

Die Sicherheitsfaktoren der beiden Beispiele (Musternagelwand und Bella Vita) werden mittels Böschungsbruchuntersuchungen mit polygonalen Gleitflächen z.B. nach JANBU und der Blockgleitmethode durchgeführt. Jene mit Gleitkreisflächen werden nach BISHOP ermittelt.

3.2 Musternagelwand

Die Parameter für die Berechnungen mit GGU-STABILITY sind in **Tabelle 5** (Abschnitt 2.4.1) zusammengefasst. Die Neigung der Frontalausbildung η wird mit $89,99^\circ$ eingegeben, da ein direktes Übereinanderliegen der Bodennägel aus programmtechnischen Gründen nicht zulässig ist.

Generierung der polygonalen Gleitflächen

Die Generierung der Gleitflächen für die Verfahren **JANBU**, **Starrkörper-Bruchmechanismus** und **Blockgleitmethode** erfolgt mit den Standardeinstellungen des Programms (Abbildung 20).

Die ersten Punkte der Gleitflächen ergeben sich aus den Schnittpunkten von horizontalen Linien, welche 0,5 m unterhalb der Nagelköpfe liegen, mit der Frontalausbildung. Die zweiten Punkte befinden sich auf den darüber liegenden Bodennägeln, welche in fünf gleich große Stücke zu je 1,6 m unterteilt werden. Die Winkel zwischen der Horizontalen und den dritten Punkten betragen 45° , 51° , 57° , 63° , 69° und 75° . Diese Unterteilung resultiert aus der Differenz zwischen der maximalen und minimalen Neigung gebrochen durch die Anzahl der Unterteilungen ($(75^\circ - 45^\circ) / 5$). Auf diese Weise werden 210 Gleitkörper generiert und für jeden dieser Gleitkörper wird der Sicherheitsfaktor (FoS_{GGU}) berechnet.

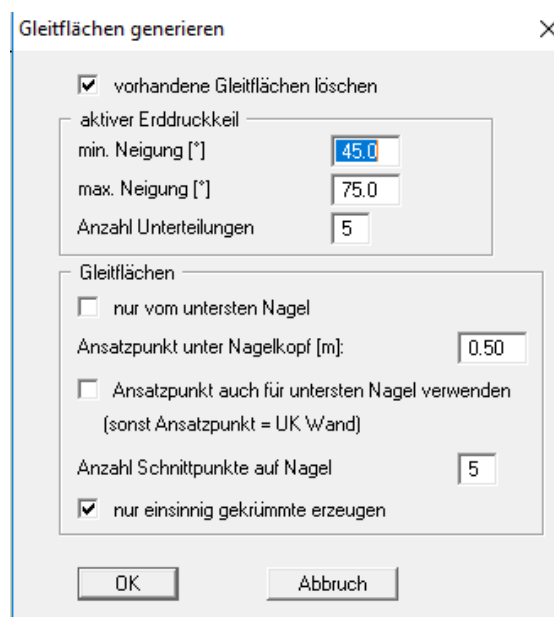


Abbildung 20: Standardwerte zur Generierung von Gleitflächen

Generierung der kreisförmigen Gleitflächen

Durch die Eingabe der Anzahl der Kreismittelpunkte (20 horizontal und 20 vertikal) und Auswahl des Bereiches, in dem die Kreismittelpunkte liegen (Abbildung 24), werden die unterschiedlichen Gleitkreise für das Verfahren nach BISHOP erzeugt.

Berechnungsergebnisse

Bei den nachfolgenden Darstellungen der Ergebnisse sind die Untersuchungen der Gesamtstandsicherheit mit polygonalen und kreisförmigen Gleitflächen abgebildet. Die Abweichungen der Ergebnisse resultieren u.a. aus den unterschiedlichen Berechnungsmethoden.

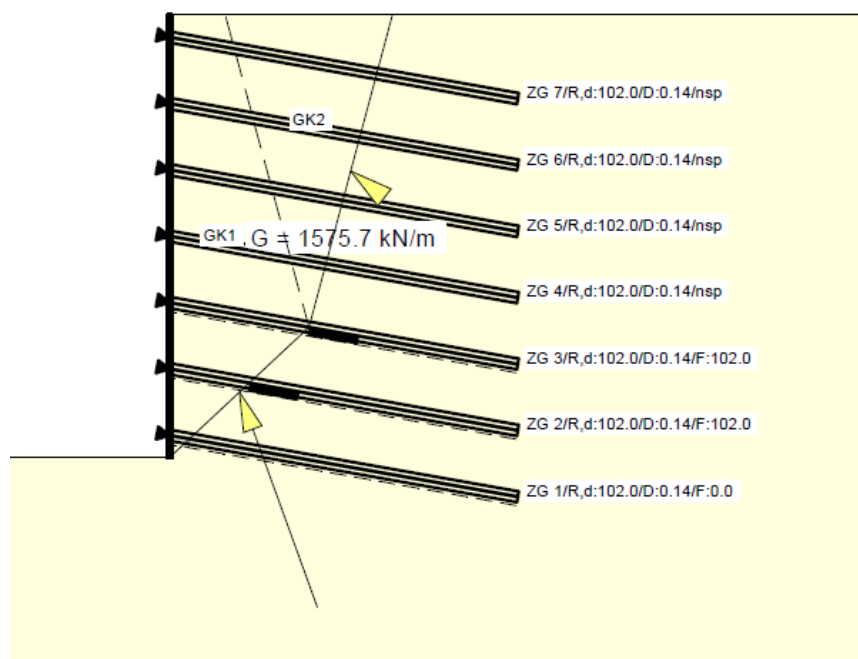


Abbildung 21: Musternagelwand - Starrkörper Bruchmechanismus $\mu = 0,61$

Die Bezeichnung der Zugglieder erfolgt von unten nach oben mit ZG 1 bis ZG 7. Zusätzliche Informationen (Zugfestigkeit, Bohrlochdurchmesser) der Bodennägel sind rechts der Nägel angegeben. Die resultierenden Erddruckkräfte, welche an den Gleitkörpern angreifen, sind mit gelben Pfeilen dargestellt.

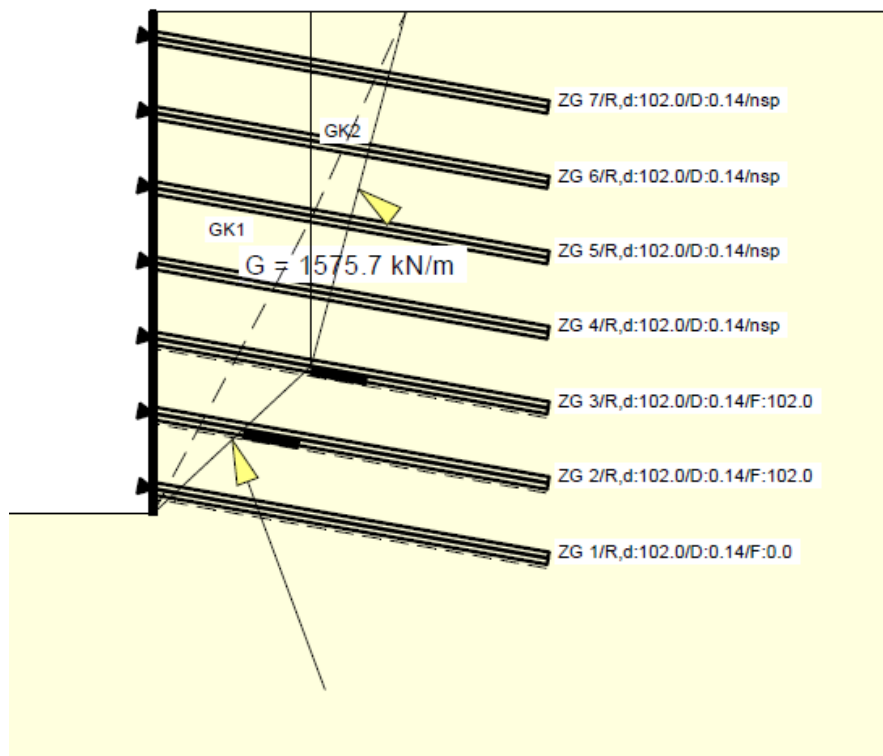


Abbildung 22: Musternagelwand – Blockglieitmethode $\mu = 0,60$

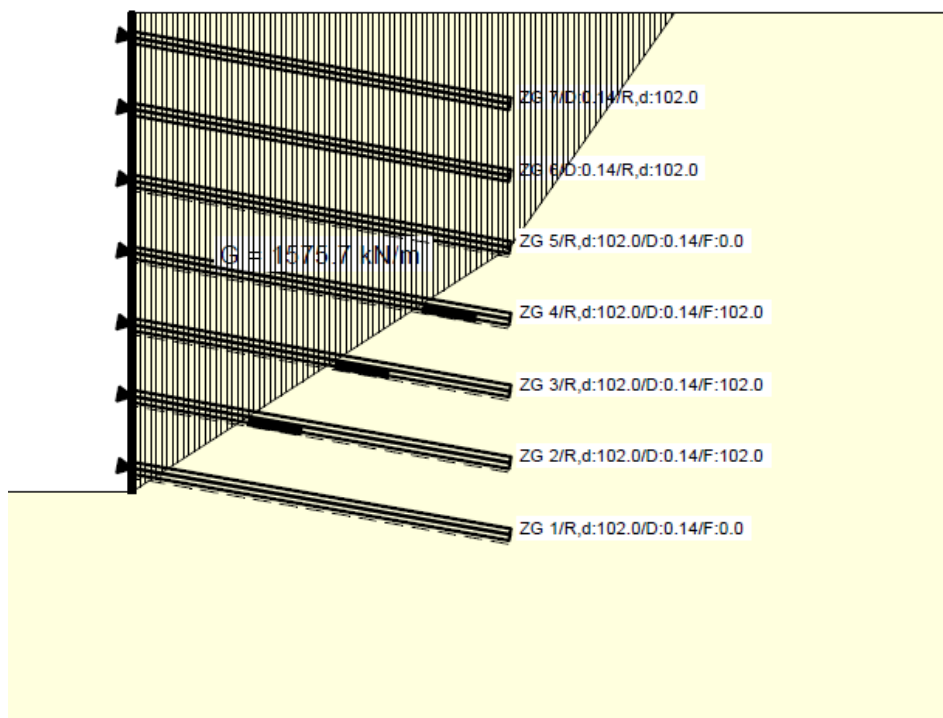
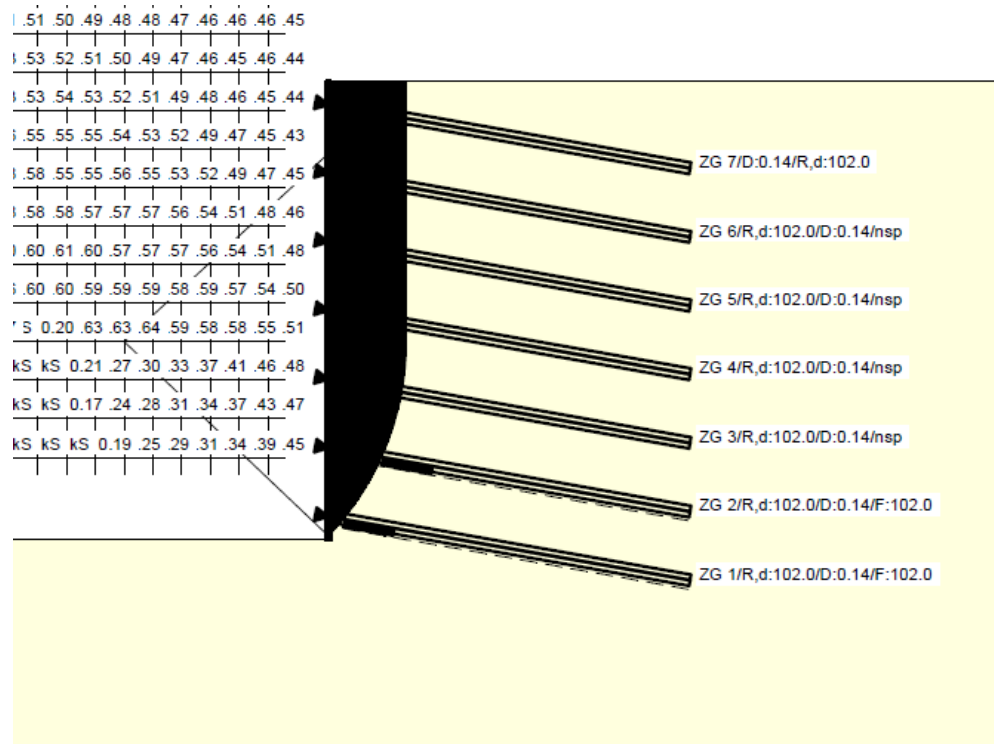


Abbildung 23: Musternagelwand – JANBU $\mu = 0,55$

Abbildung 24: Musternagelwand – BISHOP $\mu = 0,64$

Auswertung der Berechnungsergebnisse

Tabelle 8: Vergleich der Ausnutzungsgrade und Sicherheitsfaktoren - Musternagelwand

Verfahren	Ausnutzungsgrad μ	Sicherheitsfaktor FoS_{GGU}
BISHOP	0,63	1,59
JANBU	0,55	1,82
Blockgleitmethode	0,60	1,67
Starrkörper- Bruchmechanismus	0,61	1,64
Vorbemessung nach Gigan, J.P (1986)*	0,68	1,47
* Aus Abschnitt 1.2.8		

Die Sicherheitsfaktoren der unterschiedlichen Verfahren liegen in einem Bereich von 1,59 bis 1,82, wobei der kleinste aus GGU-STABILITY, jener mit dem Verfahren nach BISHOP ist. Die Abschätzung des Sicherheitsfaktors nach Gigan, J.P (1986) zur Vorbemessung ist mit 1,47 noch geringer.

Aufgrund der ähnlichen Bruchkörpergeometrie der Blockgleitmethode (Abbildung 22) und dem Starrkörper-Bruchmechanismus (Abbildung 21) ergibt sich nur eine geringe Abweichung der Sicherheitsfaktoren.

Tabelle 9: Maximale Zugkräfte der Nägel (GGU-STABILITY) - Musternagelwand

Verfahren	Nagelkräfte in kN						
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
BISHOP	64,91	64,91	61,73	59,50	56,88	54,59	52,46
JANBU		55,65	55,65	55,65	55,19	52,68	48,72
Blockgleitmethode		60,77	60,77	56,62	48,85	41,31	38,23
Starrkörper-Bruchmechanismus		62,01	62,01	56,86	48,89	43,51	40,78
Die Bezeichnung erfolgt von unten nach oben							

Da die Nagelkräfte der untersten Nagelreihen bei sämtlichen Berechnungsverfahren mit polygonalen Gleitflächen null sind, ist jener Bauzustand vor Einbringen dieser Nagelreih maßgebend (geringste Standsicherheit). Dies resultiert aus dem Umstand, dass bei den Verfahren die Sicherheitsfaktoren der Zwischenbauzustände ebenfalls ermittelt werden. Beim Verfahren nach BISHOP mit kreisförmigen Gleitflächen werden keine Zwischenbauzustände berücksichtigt. Die Sicherheitsfaktoren werden an den vorgegebenen Gleitkreisen im Endbauzustand der Spritzbetonnagelwand untersucht.

Dieser maßgebende Bauzustand ist von großer Bedeutung, da bei diesem die φ -c-Reduktionen der numerischen Modelle durchgeführt werden. Dies ermöglicht den Vergleich der Sicherheitsfaktoren aus GGU-STABILITY und PLAXIS.

3.3 Bella Vita

Generierung der Gleitflächen

Die Generierung der **polygonalen Gleitflächen** für die Verfahren JANBU, Starrkörper-Bruchmechanismus und Blockgleitmethode erfolgen mit den Standardeinstellungen des Programmes (Abschnitt 3.2). Für die Berechnungen werden 120 Gleitflächen erzeugt.

Die **kreisförmigen Gleitflächen** für das Verfahren nach BISHOP werden durch Eingabe der Anzahl der Kreismittelpunkte (20 horizontal und 20 vertikal) und die Auswahl des Bereiches, in dem die Kreismittelpunkte liegen (Abbildung 28), erzeugt.

Berechnungsergebnisse

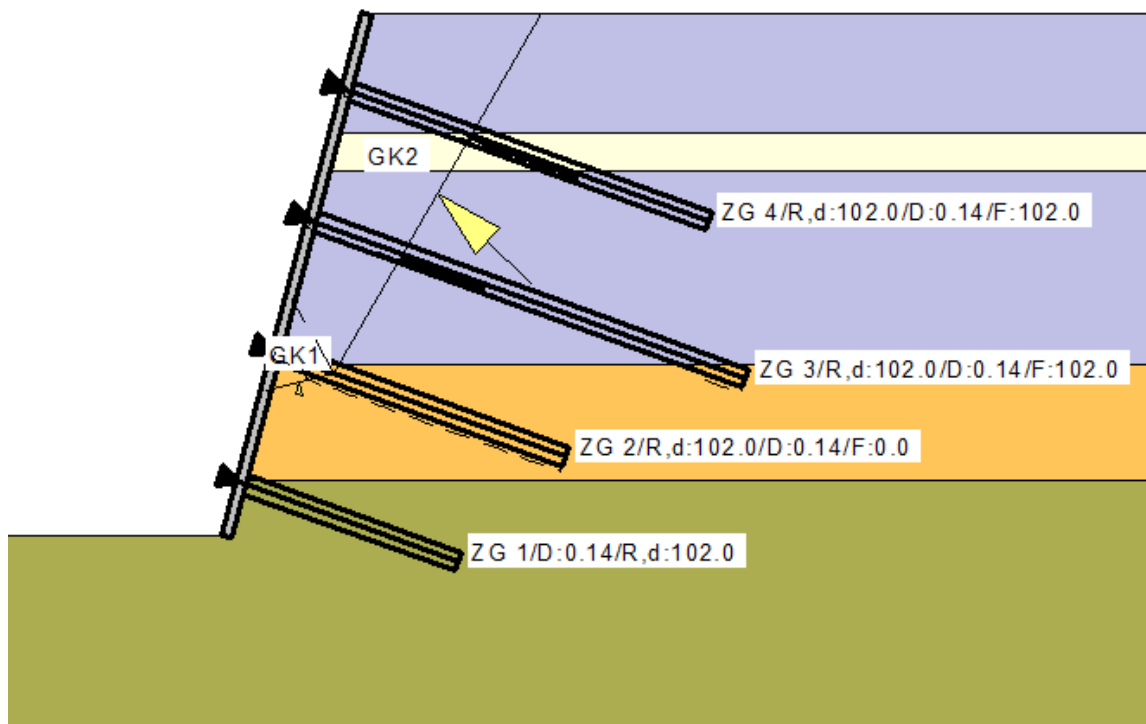
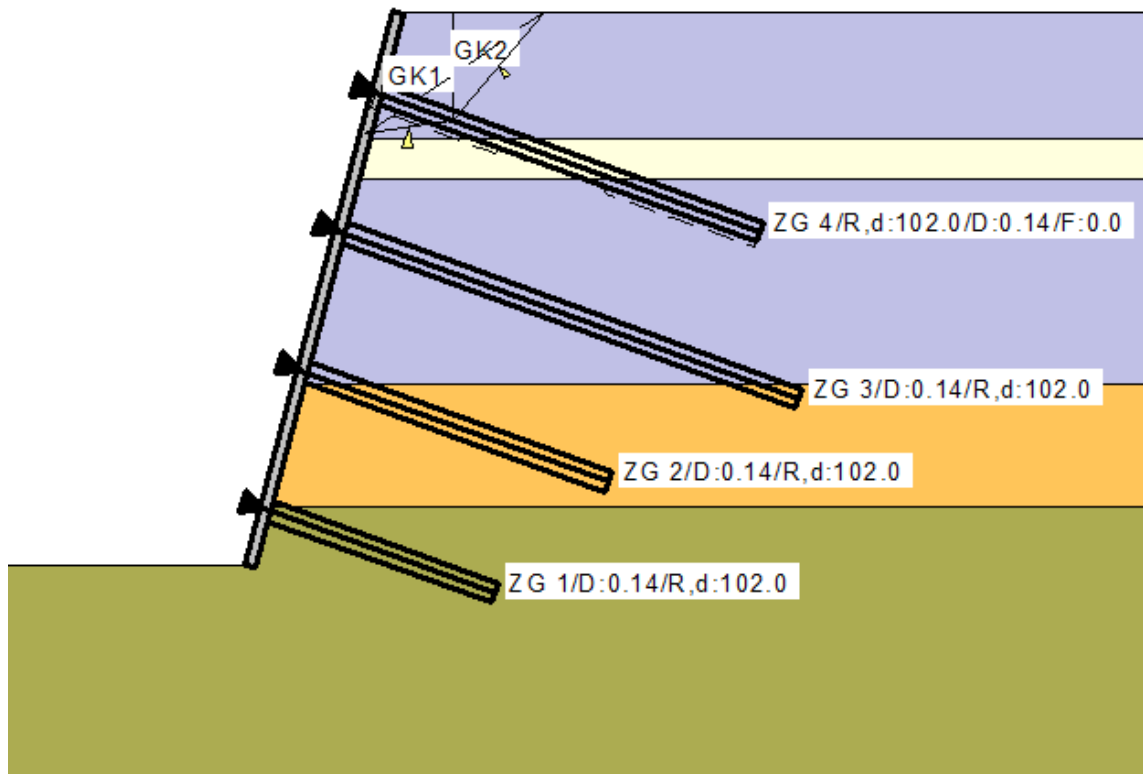
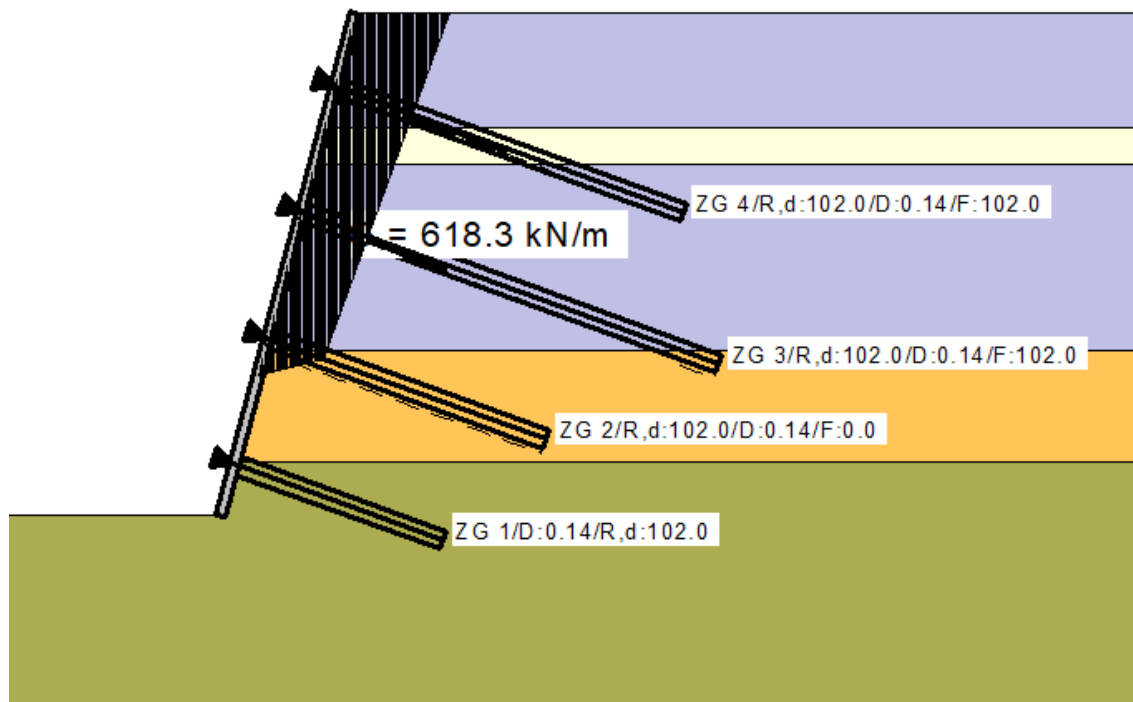


Abbildung 25: Bella Vita - Starrkörper-Bruchmechanismus $\mu = 0,43$

Abbildung 26: Bella Vita – Blockgleitmethode $\mu = 0,43$ Abbildung 27: Bella Vita – JANBU $\mu = 0,50$

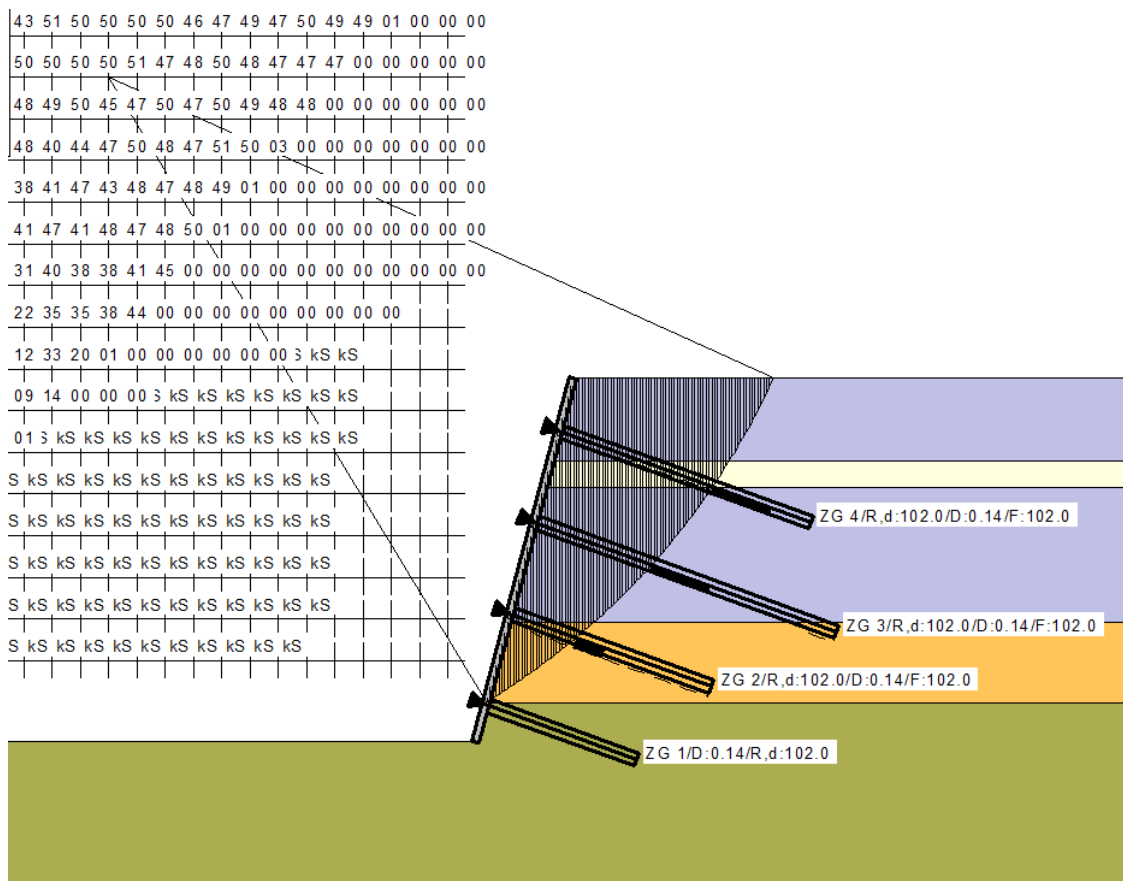


Abbildung 28: Bella Vita – BISHOP $\mu = 0,51$

Auswertung der Berechnungsergebnisse

Tabelle 10: Vergleich der Ausnutzungsgrade und Sicherheitsfaktoren – Bella Vita

Verfahren	Ausnutzungsgrad μ	Sicherheitsfaktor FoS_{GGU}
BISHOP	0,51	1,96
JANBU	0,50	2,00
Blockgleitmethode	0,43	2,33
Starrkörper-Bruchmechanismus	0,43	2,33

Die Sicherheitsfaktoren der unterschiedlichen Verfahren liegen in einem Bereich von 1,96 bis 2,33, wobei der kleinste Sicherheitsfaktor jener nach **BISHOP** ist. Die Versagensfläche aus dem Verfahren nach BISHOP beginnt – wie zu erwarten – oberhalb der sehr steifen Granitschicht und schneidet die Bodennägel 2, 3 und 4.

Die Bruchkörper aus den Verfahren Starrkörper-Bruchmechanismus und JANBU weisen ähnliche Geometrien auf. Durch die unterschiedlichen Ansätze der Lamellenkräfte (Abschnitt 1.2.8) ergeben sich die unterschiedlichen Sicherheitsfaktoren der beiden Verfahren.

Bei der Blockgleitmethode ist jener Bauzustand maßgebend, bei dem der erste Aushub erfolgt ist und die erste Nagelreihe noch nicht versetzt wurde.

Tabelle 11: Maximale Zugkräfte der Nägel (GGU-STABILITY) – Bella Vita

Verfahren	Nagelkräfte in kN			
	1.	2.	3.	4.
BISHOP	3,68	52,13	52,13	52,13
JANBU	-	00,57	50,62	50,62
Blockgleitmethode	-	-	39,47	33,73
Starrkörper-Bruchmechanismus	-	-	43,44	43,44
Die Bezeichnung erfolgt von unten nach oben				

Da die Nagelkräfte der untersten beiden Nagelreihen bei den Verfahren Blockgleitmethode und Starrkörper-Bruchmechanismus null sind, ist bei diesen Verfahren jener Bauzustand nach dem dritten Aushub maßgebend.

Dies resultiert aus dem Umstand, dass bei den Böschungsbruchuntersuchungen mit polygonalen Gleitflächen die Sicherheitsfaktoren der Zwischenbauzustände ebenfalls ermittelt werden. Beim kreisförmigen Versagen nach BISHOP werden keine Zwischenbauzustände berücksichtigt. Bei dieser Methode werden die Sicherheitsfaktoren an den vorgegebenen Gleitkreisen im Endbauzustand der Spritzbetonnagelwand untersucht.

4 Numerische Modellierung mit PLAXIS

4.1 Allgemeines

PLAXIS ist ein Finite-Elemente-Methode-Programm (FEM), welches für 2D und 3D Analysen von

- Verformungen,
- Standsicherheit,
- dynamischen Vorgängen (z.B. Erdbeben) und
- Vorgängen unter Grundwassereinfluss

in der Geotechnik entwickelt wurde. Aufgrund von nicht-linearen, zeitabhängigen und anisotropen Verhalten von Boden und Fels erfordern geotechnische Fragestellungen oftmals höherwertige Stoffgesetze. Die Modellierung von Zwischenbauzuständen ist ebenso möglich, wie die Modellierung von Kombinationen von verschiedenen Bauverfahren, komplexe Geometrien etc.. Des Weiteren ist die Interaktion Baugrund-Bauwerk auswertbar. Damit sind Einwirkungen bzw. Lasten gemeint, die aus einem Bauwerk in den Baugrund eingeleitet werden, welche Verformungen des Untergrundes verursachen, die sich wiederum auf das statische Verhalten des Bauwerks auswirken (z.B. Schrägstellungen). [12]

Die **Modellbildung** beginnt mit der Eingabe der Modellgröße. Anschließend werden die Bodenschichten definiert und die Parameter für diese festgelegt. Die Geometrien der Aushubschritte und die Bodennägel werden modelliert und die Kennwerte der Stützmittel eingegeben. Nach Zuweisung der Parameter-Sets für die Stützmittel (Bodennägel und Spritzbeton), sowie der Interfaces zwischen den Stützmitteln und dem Boden wird mit der Modellierung der einzelnen Bauphasen begonnen. Bei der Modellierung des Bauablaufes werden in den jeweiligen Phasen die ausgehobenen Bodenelemente deaktiviert und die eingebrachten Stützmittel aktiviert. Nach den Simulationen erfolgt die Auswertung der Ergebnisse. Die auftretenden Verschiebungen spezieller Punkte der Frontalausbildung (z.B. Wandkopf, oberster Nagelkopf) werden in horizontaler und vertikaler Richtung den Berechnungsschritten in Diagrammen gegenübergestellt. Des Weiteren werden Diagramme mit den Sicherheitsfaktoren auf

Basis von φ -c-Reduktionen und den absoluten Verschiebungen des Wandkopfes erstellt.

Die Entstehung von PLAXIS begann 1987 an der Universität Delft. Das Ziel war, ein bedienerfreundliches Werkzeug zur 2D Analyse von Unterwasserböschungen in weichen Böden bereit zu stellen. In den darauffolgenden Jahren wurde das Programm laufend erweitert und deckt nun zahlreiche Fragestellungen der Geotechnik ab. Die erste 2D Version für Windows erschien 1998 und 2010 wurde die 3D Version veröffentlicht. [12]

Das Programm PLAXIS wurde entwickelt, um Ingenieuren ein Werkzeug für Finite-Elemente-Analysen von geotechnischen Fragestellungen zur Verfügung zu stellen. Weltweit wird dieses Programm von geotechnischen Büros für Bemessungszwecke, Abschätzungen von Verformungen etc. verwendet. [12]

Theoretische Grundlagen

Aufgrund der großen Längsausdehnungen der betrachteten Bauwerke, werden die Berechnungen mithilfe eines **ebenen Verzerrungszustandes** (plane strain) durchgeführt. [12]

Die Ermittlung der **Sicherheitsfaktoren** erfolgt mittels Festigkeitsreduktion (φ -c-Reduktion). Dabei werden die Scherparameter des Bodens (Innerer Reibungswinkel und Kohäsion) soweit abgemindert, bis das Bruchkriterium auf Grundlage eines linear elastisch – perfekt plastischen Materialgesetzes erfüllt wird. [12]

Das **Finite-Elemente-Netz** wird vom Programm nach der Auswahl der Netzfeinheit (grob - fein) automatisch generiert. Dabei besteht die Möglichkeit lokale Verfeinerungen vorzunehmen. An Stellen, wo kleinräumig hohe Änderungen von z.B. Dehnungen und/oder Spannungen zu erwarten sind, wird das Netz feiner ausgeführt. In Bereichen, wo sich keine hohen Gradienten ausbilden, ist ein gröberes Netz ausreichend, was zu einer Reduzierung der Rechenzeit führt. [12]

In PLAXIS stehen zahlreichen Typen von Elementen zur Auswahl. Dabei kommen 6-knotige oder 15-knotige, dreieckige Elemente (Abbildung 29) zur Anwendung. Der Elementtyp hat Einfluss auf die erforderliche Speicherkapazität des Rechners, die Rechenzeit und die Genauigkeit der Berechnung. Im Zuge dieser Arbeit werden

15-knotige Elemente verwendet, um eine höhere Genauigkeit der Berechnungen zu erreichen.



Knoten

Spannungspunkte

a) 15 knotige Dreiecke



Knoten

Spannungspunkte

b) 6 knotige Dreiecke

Abbildung 29: a) 15-knotige und b) 6-knotige, dreieckige Elemente in PLAXIS [12]

Stoffgesetz

Um das Spannungs-Dehnungsverhalten von Boden realitätsnahe abzubilden, stehen in PLAXIS verschiedene Stoffgesetze zur Verfügung. Je höherwertig ein Stoffgesetz ist, umso mehr Eingabeparameter sind erforderlich.

Da diese Arbeit das Ziel verfolgt die absoluten Verschiebungen der Spritzbetonnagelwände realistisch abzuschätzen, wird das **Hardening Soil (HS)** Modell verwendet.

Das **HS Modell** ist ein höherwertiges Stoffgesetz zur Modellierung von Böden. Dieses elastoplastische Stoffgesetz mit hyperbolischer Spannungs-Dehnungs-Beziehung berücksichtigt u.a. eine Verfestigung durch Scherbeanspruchung. Des Weiteren wird eine Druckverfestigung des Bodens ermöglicht, um plastische Verformungen aufgrund des Primärspannungszustandes zu simulieren. Mit diesem Modell wird das realitätsnahe Verhalten von vielen Böden, wie z.B. Kiese, Sande, weiche Schluffe und Tone simuliert. [12]

Die Vorteile von diesem Stoffgesetz sind u.a.:

- Die Simulationen von unterschiedlichen Steifigkeiten des Bodens bei Erst- und Wiederbelastung
- Die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten unterhalb des Versagenskriteriums
- Die Berücksichtigung spannungsabhängiger Steifigkeiten
- Das Auftreten von plastischen Verformungen für isotrope Spannungspfade
- Die Simulation von nichtkonstanter Dilatanz

Modellierung der Stützmittel

Für die zweidimensionale Modellierung von stabförmigen Elementen (z.B. Bodennägeln) stehen in PLAXIS folgende Elementtypen zur Verfügung:

- Geogitter (geogrids)
- Plattenelemente (plates)
- Volumenelemente (volume elements)
- Eingebettete Trägerreihe (embedded beam row)

Vor der Implementierung der eingebetteten Trägerreihe (embedded beam row - EBR) wurden Bodennägel hauptsächlich mit Plattenelementen oder Geogittern modelliert. Mit diesen Elementtypen ist jedoch das 3D Verhalten in 2D Analysen nicht simulierbar. Aus diesem Grund wurde der Elementtyp EBR entwickelt. Auf die Modellierung von Bodennägeln mit Volumenelementen wird aufgrund der komplexen Modellerstellung im Folgenden nicht eingegangen.

Grenzflächen (interfaces) werden verwendet, um Relativverschiebungen zwischen Boden und den Strukturen (Bodennägel, Frontalausbildung) zu ermöglichen und auszuwerten. Um eine Analyse der Spannungen und Dehnungen der Grenzflächenelemente zu erhalten, wird ein Newton-Cotes Integralschema implementiert. Für weitere Informationen wird an dieser Stelle auf [25] verwiesen.

Geogitter (geogrids) sind Linienelemente mit einer definierten Dehnsteifigkeit, jedoch ohne Biegesteifigkeit. Diese Elemente sind weder auf Biegung, noch auf Druck belastbar. Da Bodennägel hauptsächlich auf Zug beansprucht werden, sind Geogitter zur Modellierung von Bodennägeln geeignet. [12]

Einstelloptionen und Eingabeparameter für Geogitter:

- Auswahl von elastischem/elastoplastischem Verhalten
- Auswahl von isotropen/anisotropen Steifigkeitsverhalten
- Dehnsteifigkeit $E \cdot A$ (kN/m)
- Maximal aufnehmbare Zugkraft bei elastoplastischem Verhalten (kN)

Plattenelemente (plates) sind ebenfalls Linienelemente und haben vergleichbare Eigenschaften wie Geogitter. Zusätzlich zur Dehnsteifigkeit besitzen diese Elemente auch eine Biegesteifigkeit ($E \cdot I$).

Einstelloptionen und Eingabeparameter für Plattenelemente:

- Auswahl von elastischem/elastoplastischem Verhalten
- Auswahl von isotropen/anisotropen Steifigkeitsverhalten
- Dehnsteifigkeit $E \cdot A$ (kN/m)
- Biegesteifigkeit $E \cdot I$ (kNm²/m)
- Maximal aufnehmbare Zugkraft N_p (kN) und maximales Biegemoment M_p (kNm) bei elastoplastischem Verhalten

Die **eingebettete Trägerreihe (embedded beam row - EBR)** wurde in PLAXIS implementiert, um die in einem Raster angeordneten, stabförmigen Elemente (z.B. Bodennägel), welche außerhalb des betrachteten Querschnittes (out-of-plane) liegen, zweidimensional zu modellieren.

Die EBR-Elemente sind in der Lage axiale Kräfte und Biegemomente aufzunehmen. Durch ihre speziellen Grenzflächen (line-to-line interfaces) sind diese Elemente nicht direkt mit dem FE-Berechnungsnetz verbunden. Dieser Umstand ermöglicht die Ausbildung eines kontinuierlichen Netzes ohne Unterbrechungen entlang der Stützmittel und die Berücksichtigung von Mantelreibung. Die axiale Tragfähigkeit der Nägel wird durch die Mantelreibung (T_{Skin}) und den Spitzendruck (F_{Max}) bestimmt.

Elastisches und elastoplastisches Verhalten werden mit diesen Elementen modelliert. Durch die Änderung des seitlichen (lateralen) Widerstandes (T_{Lat}) werden 3D Effekte simuliert. Für weitere Informationen wird an dieser Stelle auf [25] verwiesen.

Einstelloptionen und Eingabeparameter für EBR:

- Auswahl von elastischem/elastoplastischem Verhalten
- Auswahl der Balkenart (z.B. quadratisch oder kreisförmig)
- E-Modul E (kN/m²)
- Wichte γ (kN/m³)
- Durchmesser d der stabförmigen Elemente (m)
- Abstand aus der Ebene (out-of-plane spacing) L_S bzw. S_H (m)
- Maximal aufnehmbare Zugkraft N_p (kN) und maximales Biegemoment M_p (kNm) bei elastoplastischem Verhalten
- Axialer Mantelwiderstand (Mantelreibung) T_{Skin} (kN/m)
- Lateraler Mantelwiderstand T_{Lat} (kN/m)
- Spitzendruck F_{Max} (kN/m)

Die Bodennägel der numerischen Modelle mit PLAXIS werden mit unterschiedlichen Strukturelementen ausgeführt. Plattenelemente, Geogitter und eingebettete Trägerreihen (EBR) werden verwendet, um den Einfluss der unterschiedlichen Strukturelemente auf die Sicherheitsfaktoren und Verschiebungen zu erfassen.

4.2 Musternagelwand

Eingabeparameter

Die Bodenkennwerte der numerischen Modelle wurden auf Grundlage von [27] abgeschätzt. E_{50}^{ref} ist der Sekantenmodul für deviatorische Erstbelastung bei 50 % der max. Deviatorspannung unter einem Referenzdruck von 100 kPa. [28]

Tabelle 12: Bodenparameter PLAXIS - Musternagelwand

Parameter	Symbol	Sand, schluffig	Einheit
Bodenwichte	γ	20	kN/m ³
Sekantenmodul	E_{50}^{ref}	40000	kN/m ²
Ödometermodul	E_{oed}^{ref}	40000	kN/m ²
Ent- und Wiederbelastungsmodul	E_{ur}^{ref}	120000	kN/m ²
Exponent	m	0,5	-
Kohäsion	c	20	kN/m ²
Reibungswinkel	φ	35	°
Dilatanzwinkel	ψ	0	°
Festigkeitsreduktion der Grenzflächen (interface strength reduction)	R_{inter}	1	-

Tabelle 13: Stützmittelparameter (Spritzbeton, Bodennägel) - Musternagelwand

Spritzbeton			
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Stärke	d	0,1	m
E-Modul	E	20	GPa
Biegesteifigkeit	$E \cdot I$	1666,7	kNm ² / m
Dehnsteifigkeit	$E \cdot A$	2000000	kN / m
Bodennägel - Parameterermittlung nach [19]			
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Durchmesser Stahlzugglied	d_{st}	0,018	m
Durchmesser Bohrung	d_m	0,139	m
Horizontalabstand Bodennägel	S_n	1,500	m
Querschnittsfläche Bewehrung + Mörtel	A	0,015	m ²
Querschnittsfläche Nagel	A_n	0,0003	m ²
Querschnittsfläche Mörtel (grout)	A_g	0,015	m ²
E-Modul Stahl	E_{st}	210	GPa
E-Modul Mörtel	E_m	30	GPa
Äquivalenter E-Modul	$E_{\text{äq}}$	33,018	GPa
Äquivalenter Durchmesser	$d_{\text{äq}}$	0,120	m
Dehnsteifigkeit	$E \cdot A$	334029,839	kN / m
Biegesteifigkeit	$E \cdot I$	403,362	kNm ² / m

Tabelle 14: Eingabeparameter der Stützmittel (PLAXIS) - Musternagelwand

Spritzbetonversiegelung			
Plattenelemente			
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Biegesteifigkeit	$E \cdot I$	1666,7	kNm^2 / m
Dehnsteifigkeit	$E \cdot A$	2000000	kN / m
Eigengewicht	w	2,5	$\text{kN} / \text{m} / \text{m}$
Bodennägel			
Plattenelemente			
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Biegesteifigkeit	$E \cdot I$	403,4	kNm^2 / m
Dehnsteifigkeit	$E \cdot A$	334000	kN / m
Eigengewicht	w	0,2566	$\text{kN} / \text{m} / \text{m}$
Geogitter			
Dehnsteifigkeit	$E \cdot A$	334000	kN / m
Eingebettete Trägerreihe (EBR)			
E-Modul	E	$2,10\text{E}+07$	kN / m^2
Wichte	γ	25	kN / m^3
Durchmesser	d	0,14	m
Horizontalabstand der Nägel	S_h	1,5	m
Mantelreibung Start, Max	$T_{\text{skin,start,max}}$	100	kN / m
Mantelreibung Ende, Max	$T_{\text{skin,end,max}}$	100	kN / m
Spitzendruck	F_{max}	0	kN / m

Bei sämtlichen Strukturelementen (Spritzbetonversiegelung und Bodennägeln) wurde ein elastisches und isotropes Materialverhalten ausgewählt.

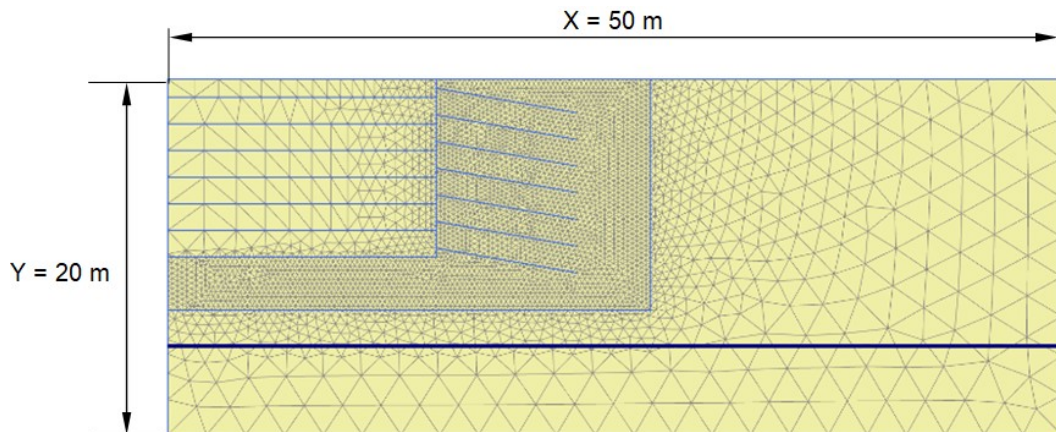


Abbildung 30: FE-Berechnungsnetz – Musternagelwand

Die Netzgenerierung erfolgt mit der Einstellung *fein (fine)* und im Bereich der Bodennägel wurde das Netz noch dichter ausgeführt. Die beiden Modelle mit Plattenelementen und Geogittern bestehen aus je 8072 Elementen und 67046 Knoten. Das Modell mit den EBR besteht aus 8072 Bodenelementen und 66129 Knoten. Die Modellgröße beträgt 50 m mal 20 m (Abbildung 30) und die Berechnungen erfolgen im ebenen Verzerrungszustand.

Modellierungsphasen

Um den Bauablauf realitätsnah nachzubilden, werden alle Bauzustände in einzelnen Phasen modelliert. Zu Beginn (Phase 0) wird der Initialspannungszustand mit einem K_0 -Prozedere, welches die Belastungsgeschichte des Bodens berücksichtigt, generiert. Für höherwertige Stoffgesetze, wie z.B. das HS Modell, werden außer der Beziehung nach JACKY ($K_0 = 1 - \sin(\varphi)$) auch eine mögliche Überkonsolidierung (overconsolidation ratio OCR) oder eine Vorbelastungsspannung (pre-overburden pressure POP) berücksichtigt. In den Phasen 1 – 20 werden die einzelnen Aushubschritte und der Einbau der Stützmittel modelliert. Nach Erreichen eines numerischen Gleichgewichts für die jeweilige Phase wird die Berechnung mit der nächsten fortgesetzt. Die Berechnung der Sicherheitsfaktoren für den Zustand nach

dem letzten Aushub und für den Endbauzustand (Phase 21 und 22) werden mit Hilfe einer φ -c-Reduktion durchgeführt. Bei der Ermittlung der Sicherheitsfaktoren werden die Festigkeitseigenschaften des Bodens so lange reduziert, bis das Bruchkriterium erfüllt wird.

Tabelle 15: Modellphasen- Musternagelwand

Phase	Schritttyp	Anmerkung
0	K0 procedure	Ausgangsspannungszustand
1	Plastic	1. Aushub
2	Plastic	1. Nagelreihe
3	Plastic	1. Versiegelung
4 - 6	Plastic	2. Aushubschritt
7 - 9	Plastic	3. Aushubschritt
10 - 12	Plastic	4. Aushubschritt
13 - 15	Plastic	5. Aushubschritt
16 - 18	Plastic	6. Aushubschritt
19 - 20	Plastic	7. Aushubschritt
21	Safety	FoS _{PLAXIS} Endzustand
22	Safety	FoS _{PLAXIS} nach dem 7. Aushubschritt

Die Berechnung des Sicherheitsfaktors nach dem 7. Aushubschritt erfolgt in PLAXIS nach jenem des Endzustandes, da diese Phase erst nachträglich im Modell erstellt wurde.

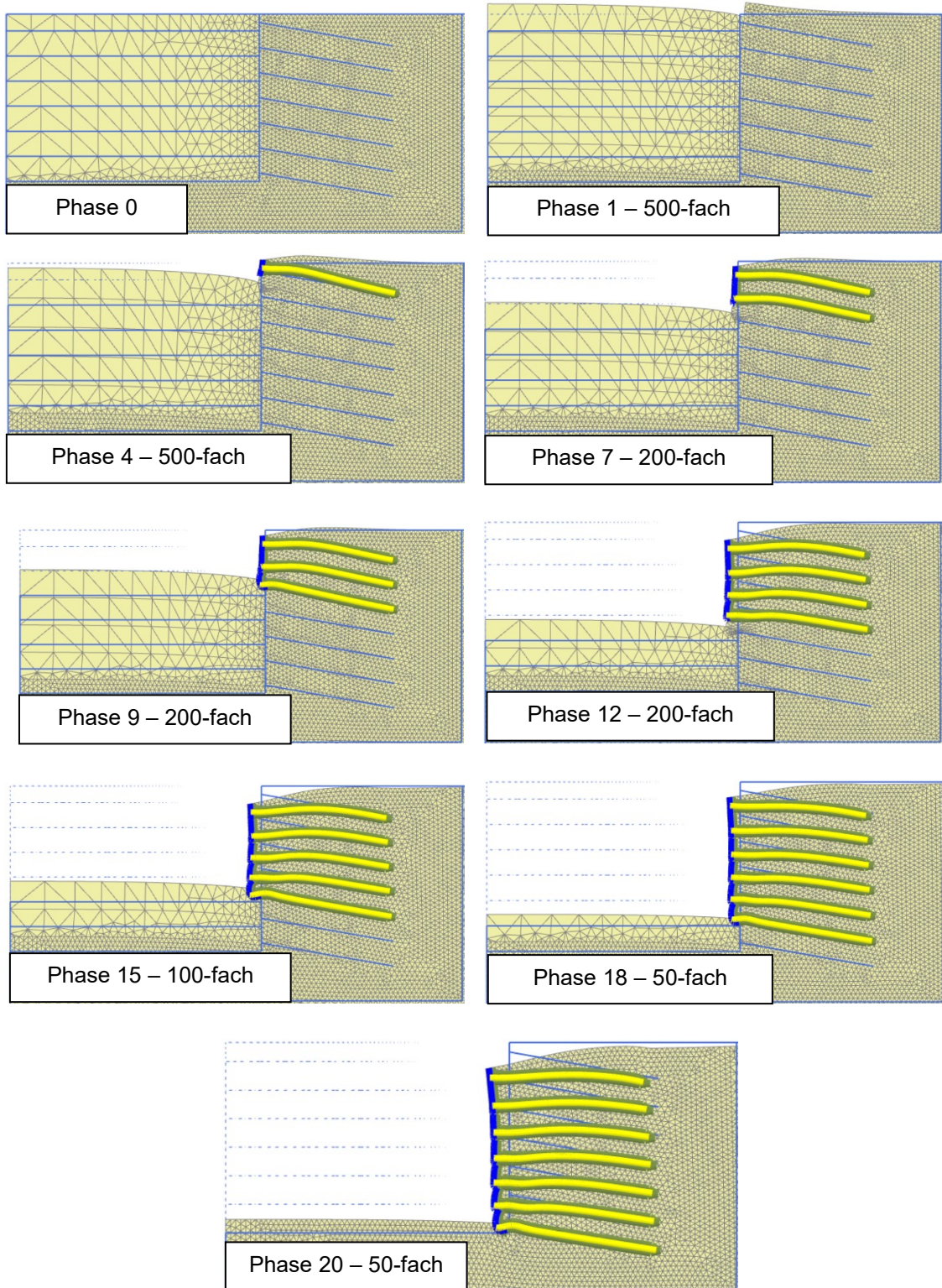
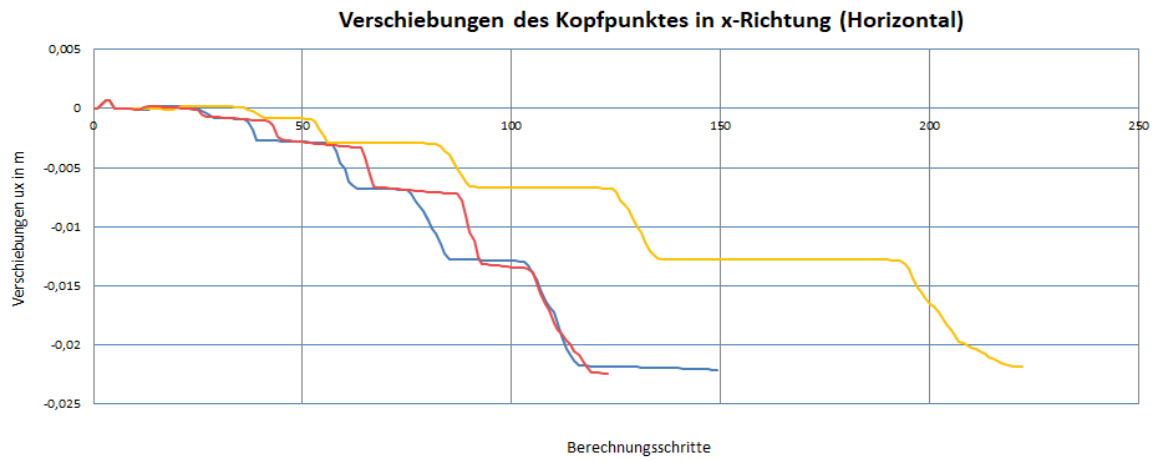
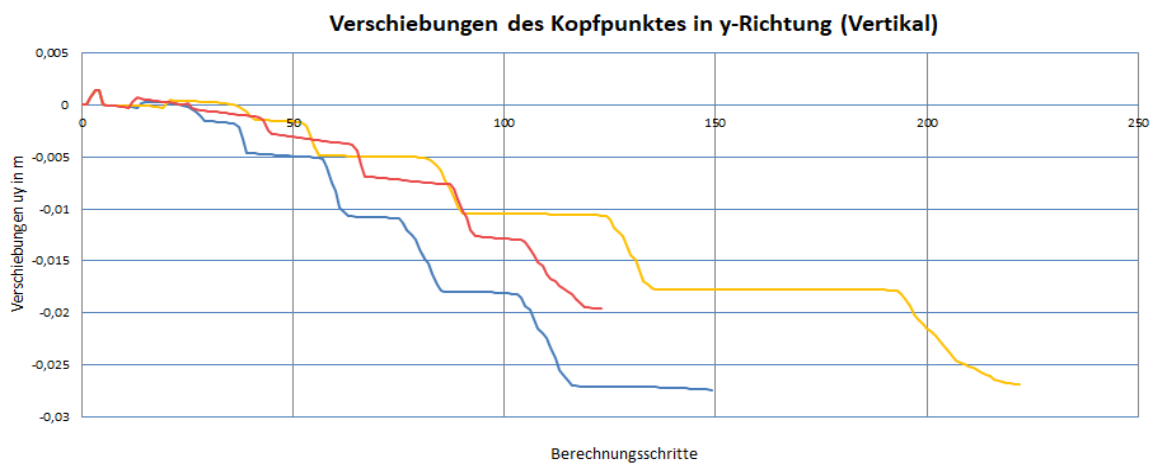


Abbildung 31: Überhöhte Darstellung der Verschiebungen - Musternagelwand

Auswertung Musternagelwand

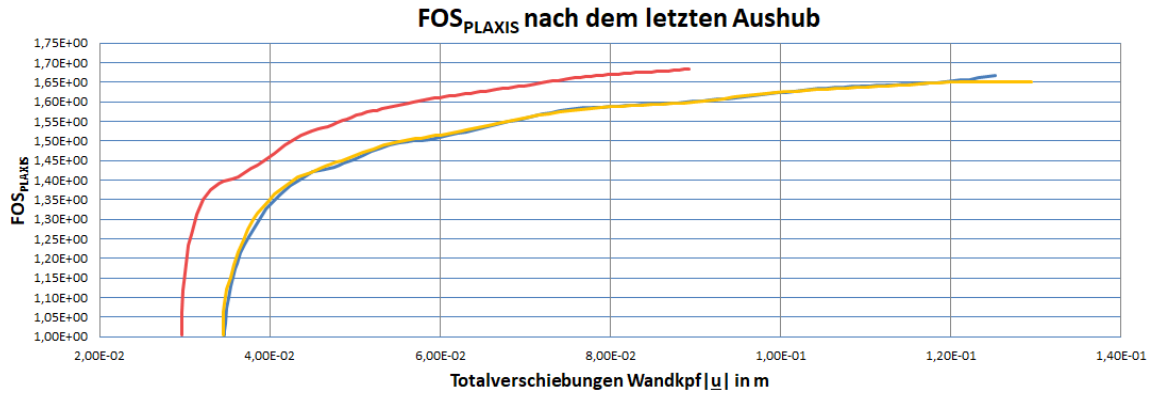


Strukturelement	u_x in mm
Plattenelemente	-22
Geogitter	-22
EBR	-22

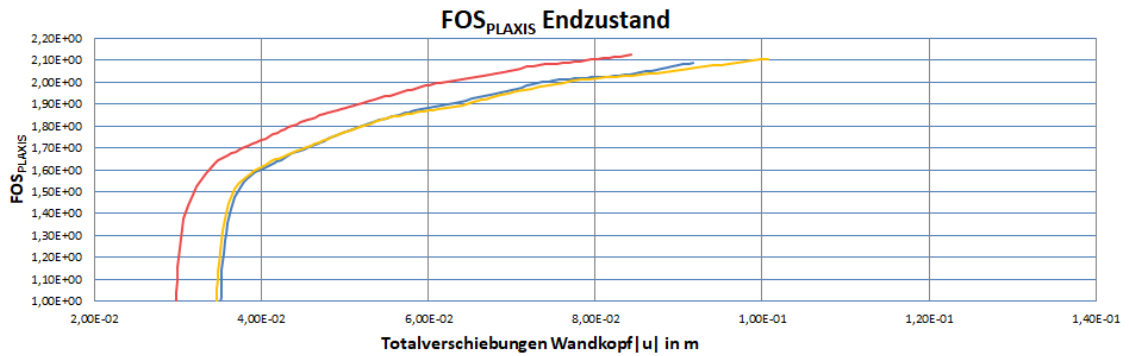


Strukturelement	u_y in mm
Plattenelemente	-28
Geogitter	-27
EBR	-20

Abbildung 32: Verlauf der Verschiebungen in Abhängigkeit der Berechnungsschritte -
Musternagelwand



Strukturelement	FoS_{PLAXIS}
Plattenelemente	1,67
Geogitter	1,65
EBR	1,68



Strukturelement	FoS_{PLAXIS}
Plattenelemente	2,09
Geogitter	2,10
EBR	2,12

Abbildung 33: Sicherheitsfaktoren (FoS_{PLAXIS}) in Abhängigkeit der Totalverschiebungen am Wandkopf - Musternagelwand

Die einzelnen Bauzustände der Spritzbetonnagelwand sind anhand des verformten Netzes in Abbildung 31 dargestellt. Die Bodennägel sind in dieser Abbildung mit Geogittern modelliert.

In Abbildung 31 ist deutlich zu erkennen, dass bei den ersten beiden Aushubschritten - aufgrund der Entlastung - Hebungen in der Baugrube (ca. 1 mm) und hinter der Spritzbetonnagelwand auftreten. Ab dem dritten Aushubschritt verschiebt sich die gesamte Frontalausbildung nach unten und in Richtung Baugrube. Hinter der Wand bildet sich dadurch eine Setzungsmulde aus. Die Verschiebungen der Frontalausbildung und die Setzungsmulde hinter der Wand nehmen mit jeder Bauphase zu. Da um die Bodennägel aufgrund der rückhaltenden Kräfte geringere Verformungen auftreten als zwischen den Nägeln, führt dies zu einer Durchbiegung der Frontalausbildung.

In Abbildung 32 sind auf den Abszissen die Berechnungsschritte und auf den Ordinaten die horizontalen und vertikalen Verschiebungskomponenten u_x und u_y des Wandkopfes aufgetragen. Der Aushub jedes Abschnitts führt zu entsprechend großen Verschiebungen, während der Einbau der Nägel und das Auftragen des Spritzbetons relativ Verformungsarm ablaufen. Die Ergebnisse der Verschiebungen sind für Plattenelemente, Geogitter und EBR nahezu gleich, obwohl die Modellierung der Bodennägel mit Geogittern eine größere Anzahl an Berechnungsschritten zur Erreichung eines numerischen Gleichgewichts benötigt.

Die Ergebnisse der Verschiebungskomponenten u_x und u_y des Wandkopfes mit unterschiedlich modellierten Bodennägeln korrelieren in horizontaler Richtung sehr gut. In vertikaler Richtung ist die Übereinstimmung der Verschiebungen bei Geogittern und Plattenelementen ebenfalls gut, lediglich die EBR weisen einen um sieben bzw. acht Millimeter geringeren Wert auf.

Auch die Sicherheitsfaktoren der Modelle mit unterschiedlich modellierten Bodennägeln (Abbildung 33) stimmen gut überein. Der maßgebende Bauzustand (kleinster FoS) ist jener nach dem letzten Aushubschritt (vor der Aktivierung der Bodennägel und des Spritzbetons). Nach dem Einbringen der untersten Nagelreihe und Auftragen des Spritzbetons steigt der Sicherheitsfaktor z.B. beim Modell mit Plattenelementen um 20,1 % (Abbildung 33) von 1,67 auf 2,09 wieder an.

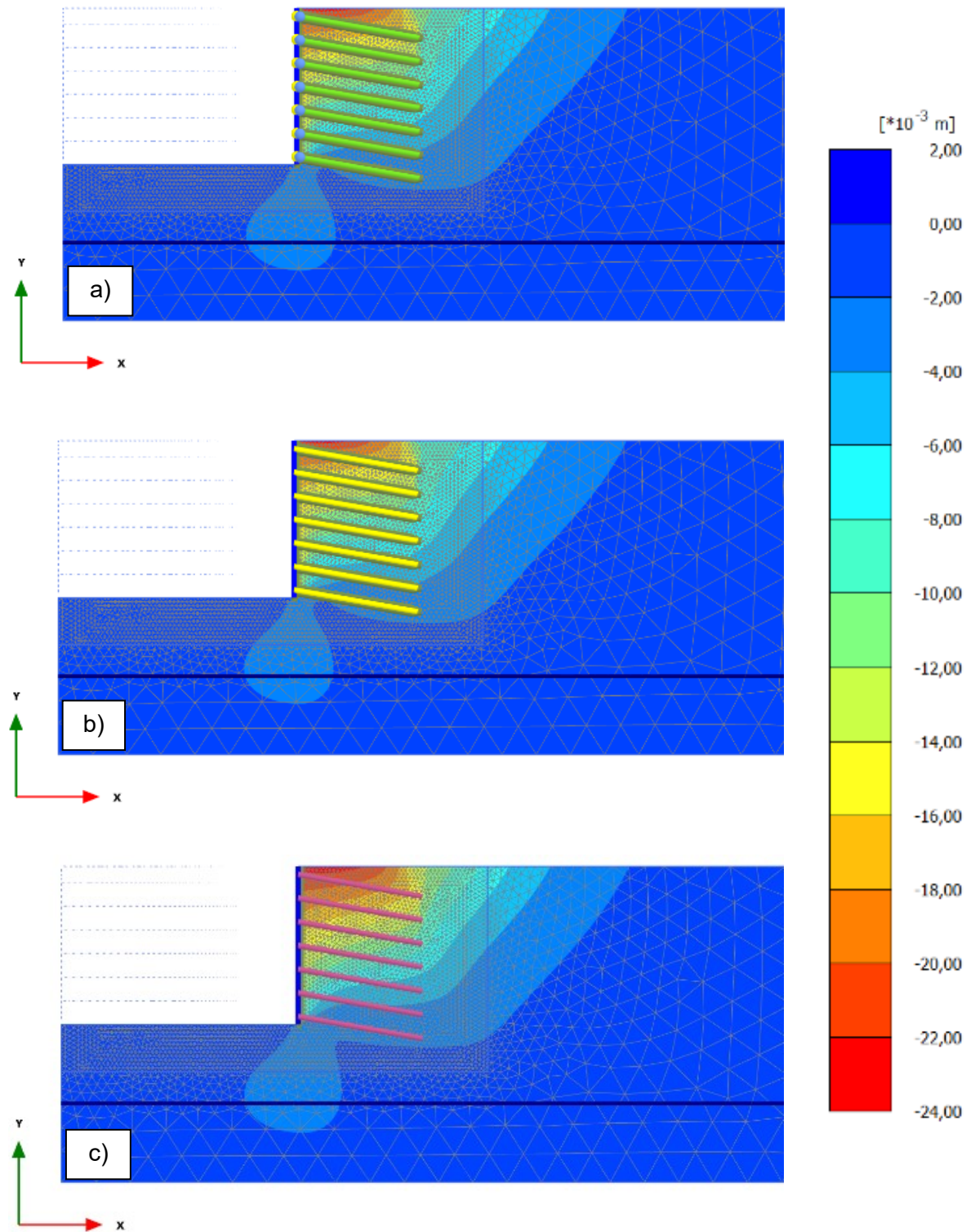


Abbildung 34: Horizontalverschiebungen Musternagelwand a) Plattenelemente, b) Geogitter, c) EBR

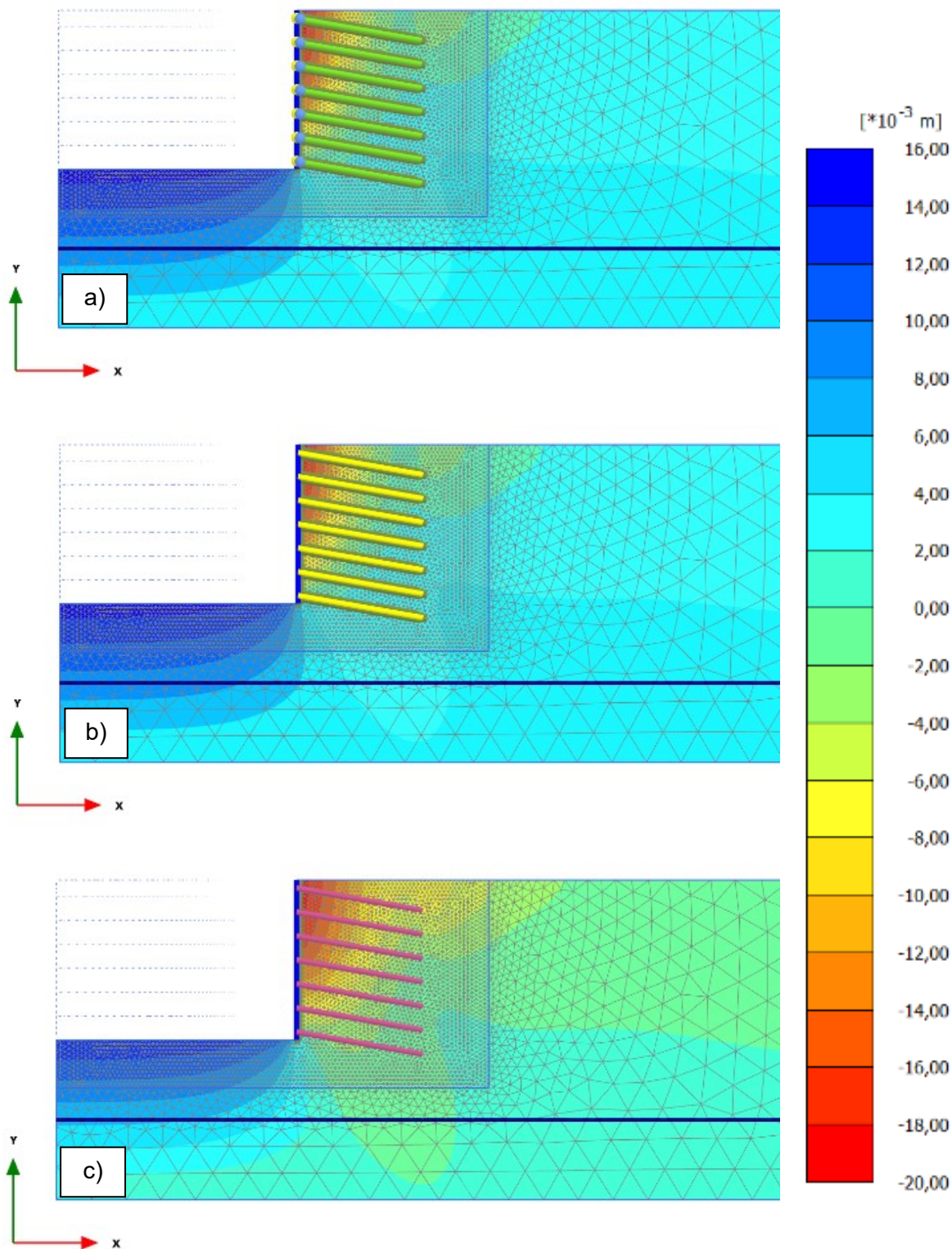


Abbildung 35: Vertikalverschiebungen Musternagelwand a) Plattenelemente, b) Geogitter, c) EBR

In Abbildung 34 und Abbildung 35 sind die horizontalen und vertikalen Verschiebungen aus Phase 20 (Endbauzustand Spritzbetonnagelwand) dargestellt. Bei den Berechnungsnetzen der Modelle mit Plattenelementen und Geogittern ist eine

vergleichbare Ausbreitung der Verschiebungen im Baugrund zu erkennen. Das Modell mit den EBR weist einen größeren verformten Bereich der Vertikalverschiebungen innerhalb des vernagelten Bodenkörpers auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die EBR (Abschnitt 4.1) über Federelemente mit dem Netz verbunden sind und dieses somit nicht unterbrochen wird.

Die maximalen Hebungen der Baugrubensohle im Endbauzustand betragen ca. 16 mm (Abbildung 35).

4.3 Bella Vita

Eingabeparameter Bella Vita

Tabelle 16: Bodenparameter PLAXIS - Bella Vita

Parameter	Symbol	Sand grob	Sand fein	Fels verw.	Granit*	Einheit
Bodenwichte	γ	18,5	18	18,5	26	kN / m ³
Sekantenmodul	E_{50}^{ref}	40000	35000	70000	200000	kN / m ²
Ödometermodul	E_{oed}^{ref}	40000	35000	70000	-	kN / m ²
Ent- und Wiederbelastungsmodul	E_{ur}^{ref}	120000	105000	210000	-	kN / m ²
Exponent	m	0,5	0,6	0,4	-	-
Kohäsion	c	6	14	12	50	kN / m ²
Reibungswinkel	φ	31	26	33	43	°
Dilatanzwinkel	ψ	0	0	0	13	°
Festigkeitsreduktion der Grenzflächen (interface strength reduction)	R_{inter}	1	1	1	1	-
* beim Granit wurde ein MC-Stoffgesetz verwendet und der Sekantenmodul ist in diesem Fall der E-Modul						

Tabelle 17: Eingabeparameter der Stützmittel (PLAXIS) - Bella Vita

Bodennägel			
Plattenelemente			
Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Biegesteifigkeit	$E \cdot I$	302,5	kNm^2 / m
Dehnsteifigkeit	$E \cdot A$	250522	kN / m
Eigengewicht	w	0,1924	$\text{kN} / \text{m} / \text{m}$
Geogitter			
Dehnsteifigkeit	$E \cdot A$	250522	kN / m
EBR			
E-Modul	E	2,10E+07	kN / m^2
Wichte	γ	25	kN / m^3
Durchmesser	d	0,14	m
Horizontaler Nagelabstand	S_h	2	m
Mantelreibung Start, Max	$T_{\text{skin,start,max}}$	100	kN / m
Mantelreibung Ende, Max	$T_{\text{skin,end,max}}$	100	kN / m
Spitzendruck	F_{max}	0	kN / m

Die Eingabeparameter der Spritzbetonversiegelung sind mit denen der Musternagelwand ident und in Tabelle 14 angegeben.

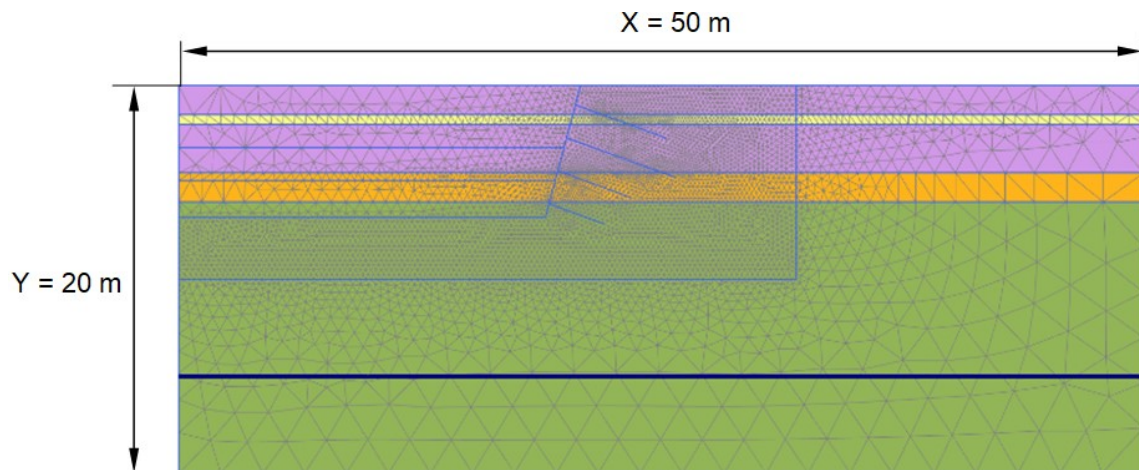


Abbildung 36: FE-Berechnungsnetz - Bella Vita

Tabelle 18: Anzahl der Bodenelemente und Knoten (PLAXIS) - Bella Vita

Strukturelement	Plattenelemente	Geogitter	EBR
Anzahl der Bodenelemente	11611	11347	11347
Anzahl der Knoten	94468	92284	91840

Die Netzgenerierung erfolgte mit der Einstellung *fein (fine)* und im Bereich der Bodennägel wurde das Netz verfeinert. Die Modellgröße beträgt ebenfalls 50 m mal 20 m (Abbildung 36) und die Berechnungen erfolgen im ebenen Verzerrungszustand.

Modellierungsphasen

Um den Bauablauf realitätsnah nachzubilden, werden alle Bauzustände in einzelnen Phasen modelliert. Zu Beginn (Phase 0) wird der Initialspannungszustand mit einem K_0 -Prozedere, welches die Belastungsgeschichte des Bodens berücksichtigt, generiert. In den Phasen 1 – 12 werden die einzelnen Aushubschritte und der Einbau der Stützmittel modelliert. Nach Erreichen eines numerischen Gleichgewichts für die jeweilige Phase wird die Berechnung mit der nächsten fortgesetzt. Die Berechnung der Sicherheitsfaktoren erfolgt ebenfalls mit Hilfe einer φ -c-Reduktion.

Tabelle 19: Phasen der Modellbildung - Bella Vita

Phase	Schritttyp	Anmerkung
0	K0 procedure	Ausgangsspannungszustand
1	Plastic	1. Aushub
2	Plastic	1. Nagelreihe
3	Plastic	1. Versiegelung
4 - 6	Plastic	2. Aushubschritt
7 - 9	Plastic	3. Aushubschritt
10 - 12	Plastic	4. Aushubschritt
13	Safety	FoS Endzustand
14	Safety	FoS nach dem letzten Aushub

Die Berechnung des Sicherheitsfaktors nach dem letzten Aushubschritt erfolgt in PLAXIS nach jenem des Endzustandes, da diese Phase erst nachträglich im Modell erstellt wurde.

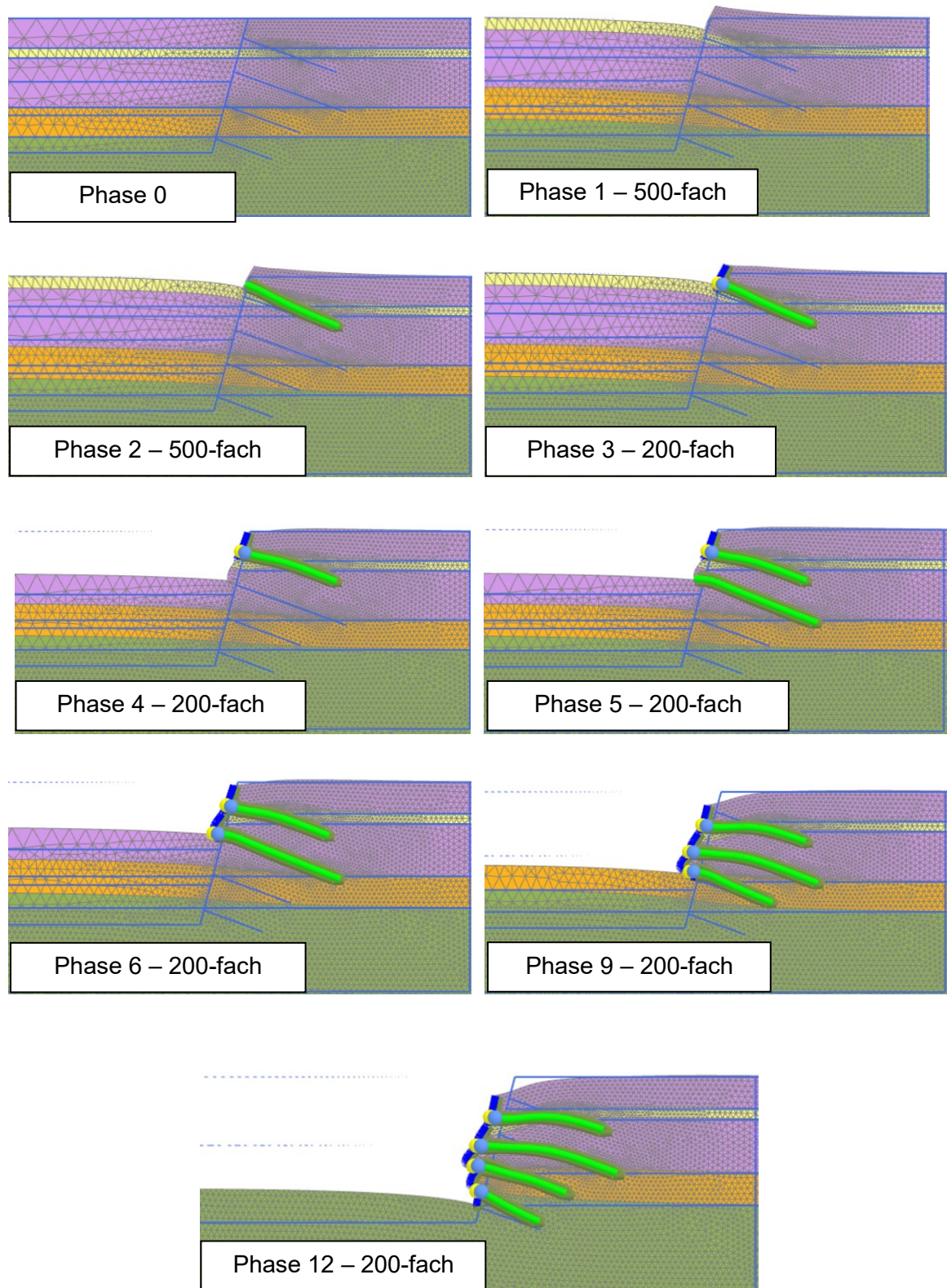
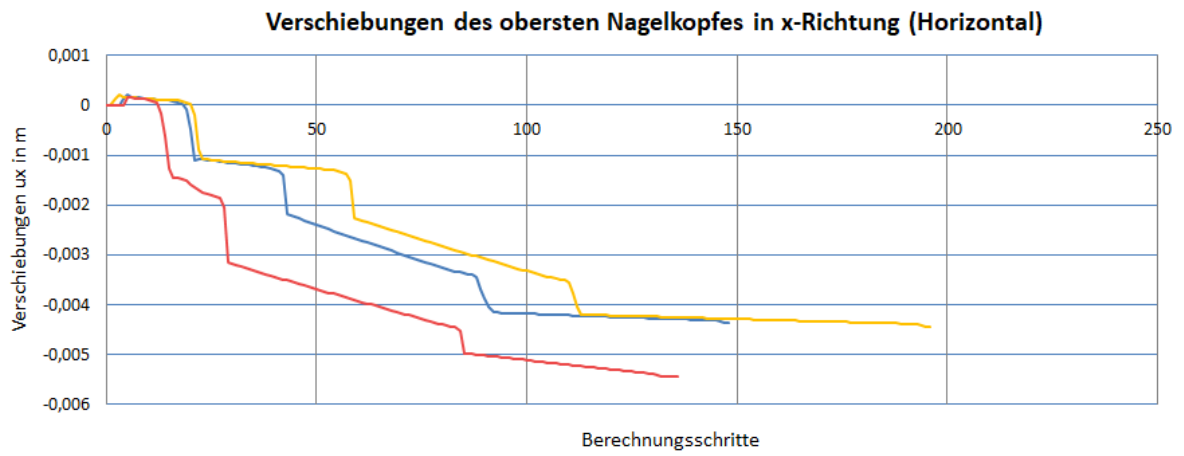
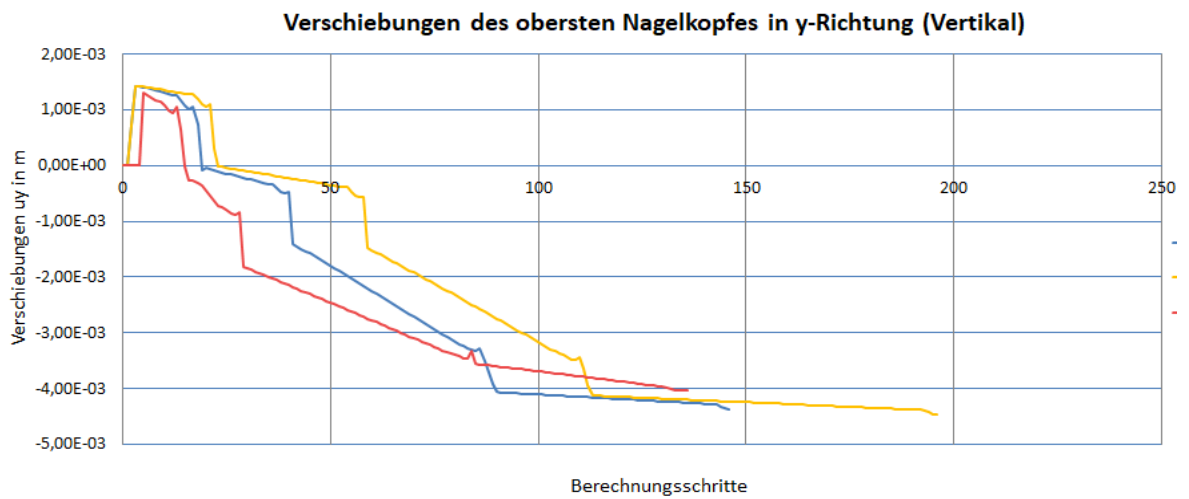


Abbildung 37: Überhöhte Darstellung der Verschiebungen - Bella Vita

Auswertung Ergebnisse Bella Vita

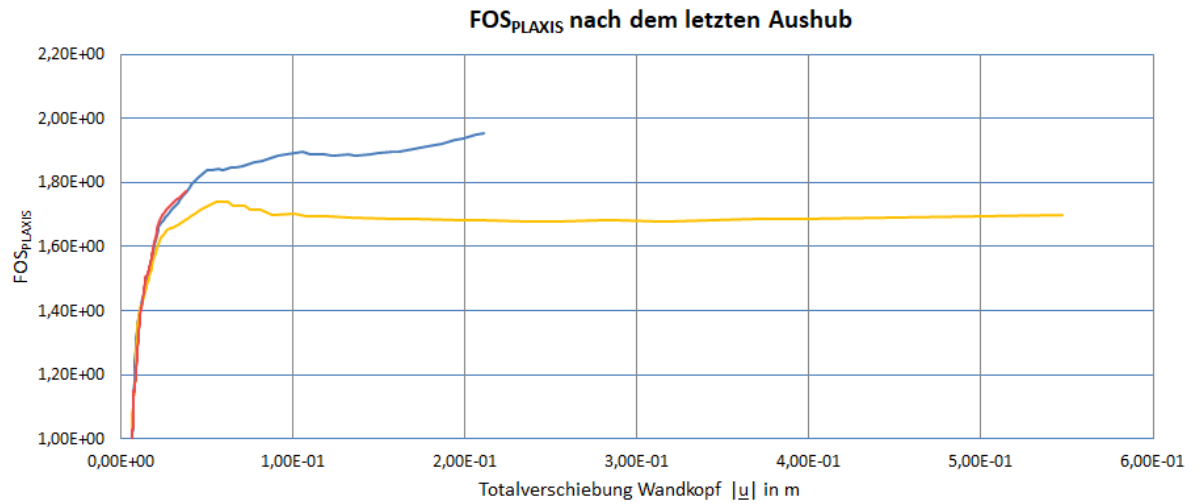


Strukturelement	u_x in mm
Plattenelemente	-4
Geogitter	-4
EBR	-5

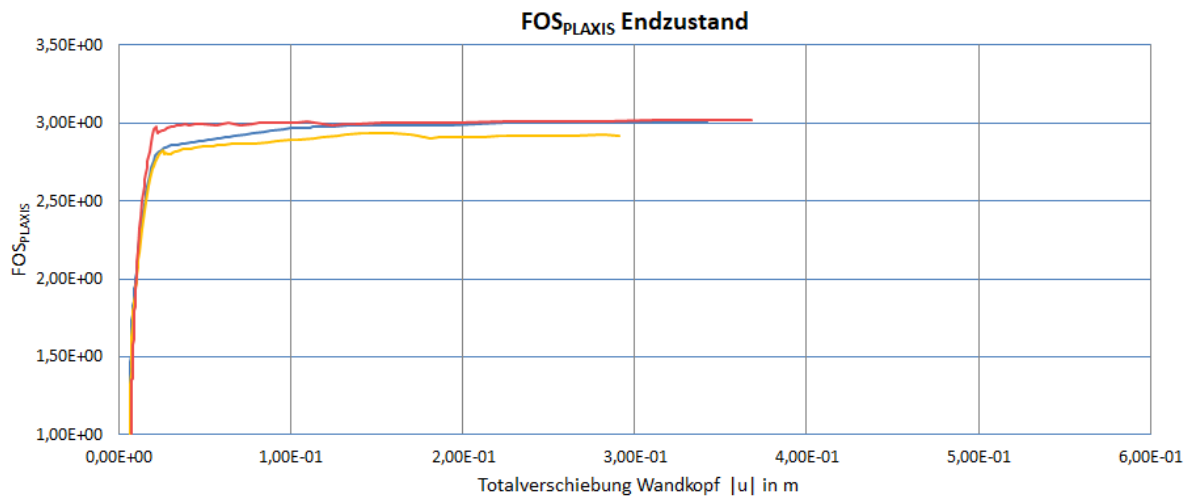


Strukturelement	u_y in mm
Plattenelemente	-4
Geogitter	-4
EBR	-4

Abbildung 38: Verlauf der Verschiebungen in Abhängigkeit der Berechnungsschritte - Bella Vita



Strukturelement	FoS _{PLAXIS}
Plattenelemente	1,95
Geogitter	1,70
EBR	1,77



Strukturelement	FoS _{PLAXIS}
Plattenelemente	3,01
Geogitter	2,92
EBR	3,02

Abbildung 39: Sicherheitsfaktoren (FoS_{PLAXIS}) in Abhängigkeit der Totalverschiebungen am Wandkopf - Bella Vita

Die einzelnen Bauzustände der Spritzbetonnagelwand sind anhand des verformten Netzes in Abbildung 37 dargestellt. Die Bodennägel in dieser Abbildung werden mit Plattenelementen, welche durch Gelenke mit der Frontalausbildung verbunden sind, modelliert.

In Abbildung 37 ist deutlich zu erkennen, dass bei den ersten beiden Aushubschritten - aufgrund der Entlastung - Hebungen in der Baugrube (ca. 1 mm) und hinter der Spritzbetonnagelwand auftreten. Ab dem dritten Aushubschritt verschiebt sich die gesamte Frontalausbildung nach unten und in Richtung Baugrube. Hinter der Wand bildet sich dadurch eine Setzungsmulde aus. Da um die Bodennägel aufgrund der rückhaltenden Kräfte geringere Verformungen auftreten als zwischen den Nägeln, führt dies zu einer Durchbiegung der Frontalausbildung.

In Abbildung 38 sind auf den Abszissen die Berechnungsschritte und auf den Ordinaten die horizontalen und vertikalen Verschiebungskomponenten u_x und u_y des Wandkopfes aufgetragen. Der Aushub jedes Abschnitts führt zu entsprechend großen Verschiebungen, während der Einbau der Nägel und das Auftragen des Spritzbetons relativ Verformungsarm ablaufen.

Die Ergebnisse der Verschiebungskomponenten u_x und u_y des Wandkopfes mit unterschiedlich modellierten Bodennägeln korrelieren in horizontaler und vertikaler Richtung sehr gut.

Auch die Sicherheitsfaktoren der Modelle mit unterschiedlich modellierten Bodennägeln (Abbildung 39) stimmen gut überein. Der maßgebende Bauzustand (kleinster FoS) ist jener nach dem letzten Aushubschritt (vor der Aktivierung der Bodennägel und des Spritzbetons). Nach dem Einbringen der untersten Nagelreihe und Auftragen des Spritzbetons steigt der Sicherheitsfaktor z.B. beim Modell mit Geogittern um 41,8 % (Abbildung 39) von 1,70 auf 2,92 an.

Die Sicherheitsfaktoren der Modelle mit unterschiedlich modellierten Bodennägeln (Abbildung 39) zeigen keine gute Übereinstimmung für die Phase nach dem letzten Aushubschritt. Für den Endbauzustand stimmen sie merkbar besser überein.

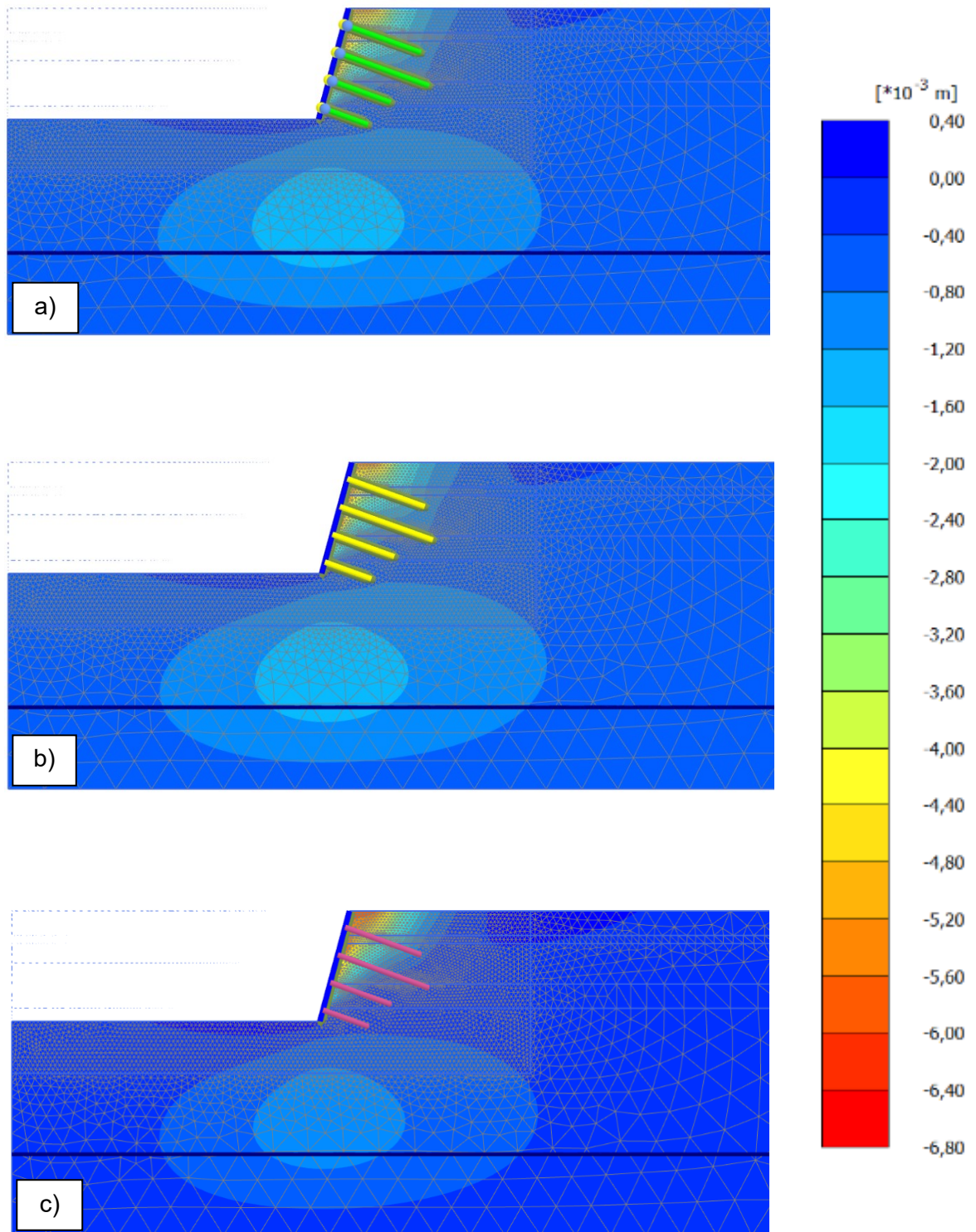


Abbildung 40: Horizontalverschiebungen Bella Vita a) Plattenelemente, b) Geogitter, c) EBR

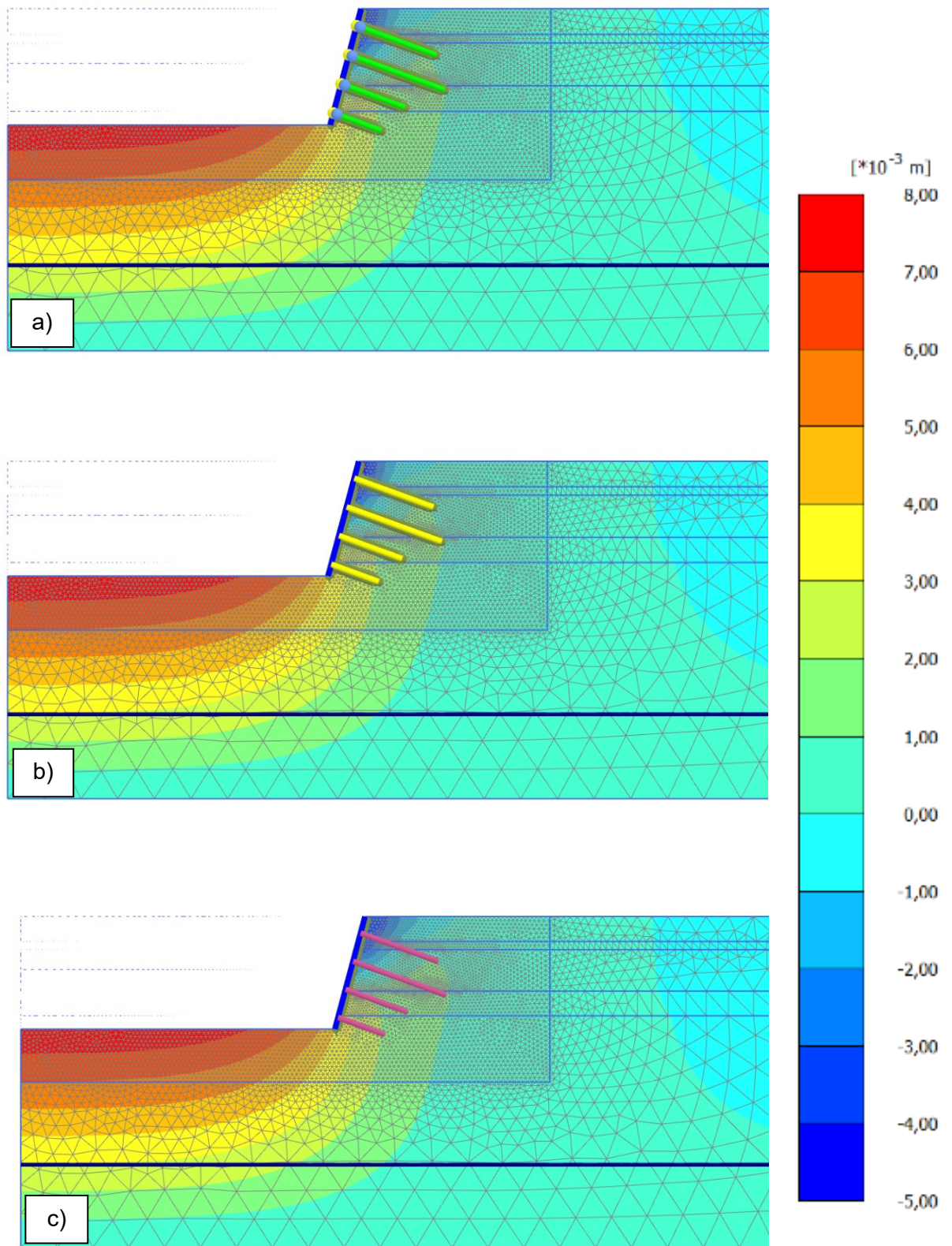


Abbildung 41: Vertikalverschiebungen Bella Vita a) Plattenelemente, b) Geogitter, c) EBR

In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die horizontalen und vertikalen Verschiebungen aus Phase 12 (Endbauzustand) dargestellt. Bei den Berechnungsnetzen der Modelle mit unterschiedlich modellierten Bodennägeln ist eine vergleichbare Ausbreitung der Verschiebungen im Baugrund zu erkennen.

Die maximalen Hebungen der Baugrubensohle im Endbauzustand betragen ca. 8 mm (Abbildung 41).

5 Verschiebungsmessungen

5.1 Geodätischer Bericht Bella Vita

Um die tatsächlich auftretenden Verschiebungen der Spritzbetonnagelwand zu ermitteln, werden beim Bauvorhaben Bella Vita während der Bauphase Messbolzen gesetzt und mithilfe von Messspiegeln laufend vermessen. Die Bolzen (Abbildung 42) werden an den Bewehrungsmatten der Frontalausbildung befestigt und eingespritzt. An diesen werden die Messspiegel für die 3D-Verschiebungsmessungen angebracht. Die Nullmessung der obersten Nagelreihe erfolgt nach Möglichkeit direkt nach dem ersten Aushubschritt. Die weiteren Messbolzen werden auf Höhe der nachfolgenden Nagelreihen montiert. Nach jedem Aushubschritt (Aushub, Einbau der Nägel und dem Auftrag des Spritzbetons) wird wieder gemessen, um das zeitliche Verschiebungsverhalten der Messpunkte zu erfassen.



Abbildung 42 Messbolzen an Bewehrungsgitter

Der Zeitraum der Messungen war vom 21.11.2018 bis zum 09.01.2019. Das genaue Intervall ist in den Tabellen 21 bis 26 angegeben.

Verwendet wurde eine Totalstation Leica TC 1203. Mit diesem Gerät werden gleichzeitig elektronisch die Winkel und elektro-optisch Distanzen gemessen.

Die Präzision der Totalstation beträgt:

Horizontale und Zenitrichtung $s_u = 0,5 \text{ mgon}$

Horizontale Länge $s_d = 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$

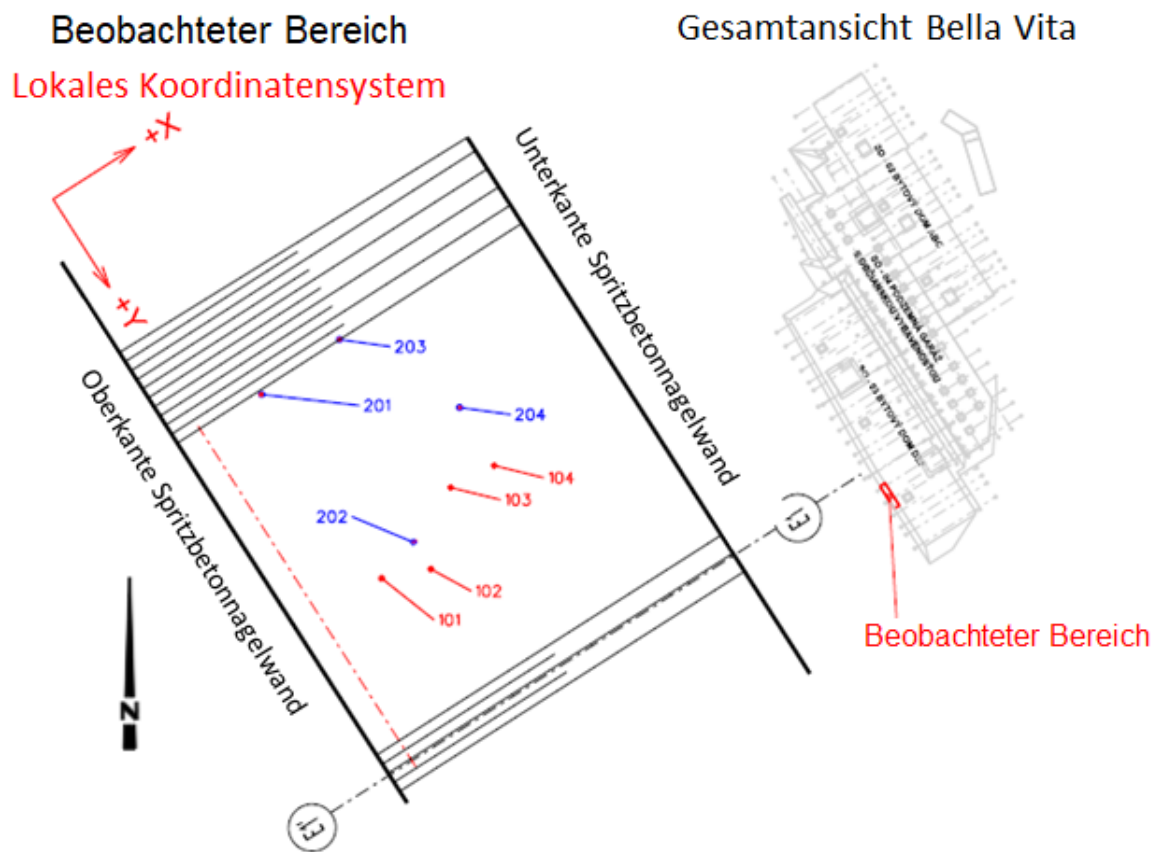


Abbildung 43: Position und Nummerierung der Messpunkte im Grundriss [18]

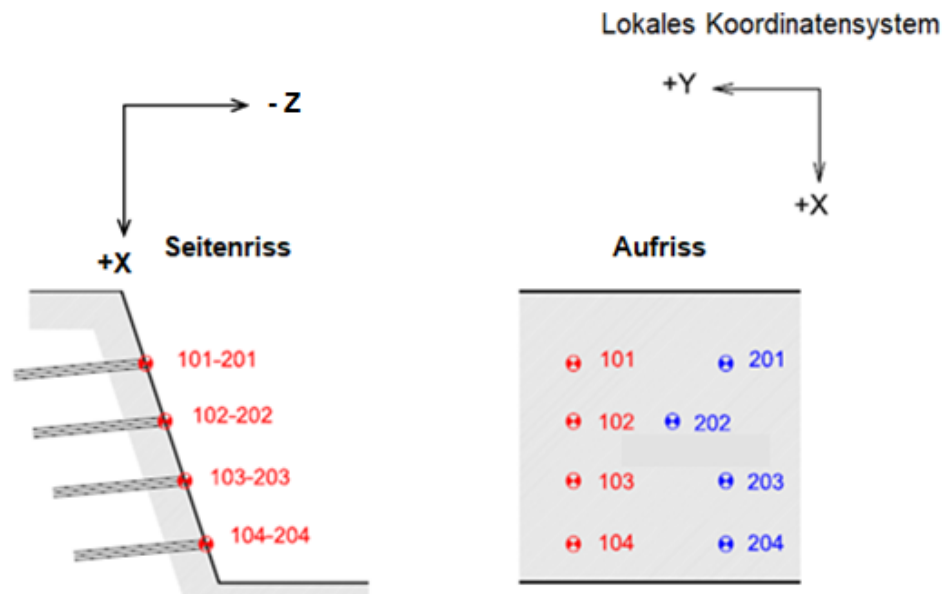


Abbildung 44: Position und Nummerierung der Messpunkte im Seiten- und Aufriss [18]

5.2 Auswertung

In **Anhang A** sind die Bauzustände zu den Zeitpunkten der Verschiebungsmessungen abgebildet. Aus organisatorischen Gründen erfolgte die Nullmessung erst am 21.11.2018. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits zwei Aushubschritte ausgeführt. Daher konnten die Verschiebungen der oberen beiden Nagelreihen messtechnisch nicht vollständig erfasst werden.



Abbildung 45: Messbolzen nach zwei Aushubschritten (Foto: Keller Grundbau Slowakei)

Legende zu Tabelle 20 - 23

- Y Verschiebungen in Y-Richtung in mm (Abbildung 44)
- ΔY Differentielle Verschiebungen zwischen den Messungen in Y-Richtung in mm
- X Verschiebungen in X-Richtung in mm (Abbildung 44)
- ΔX Differentielle Verschiebungen zwischen den Messungen in X-Richtung in mm
- Z Verschiebungen in Z-Richtung in mm (Abbildung 44)
- ΔZ Differentielle Verschiebungen zwischen den Messungen in Z-Richtung in mm

Tabelle 20: Ergebnisse der Verschiebungsmessungen MSP 101, 201 [18]

Messspiegel 101							Messspiegel 201						
	Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ		Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ
Datum	mm						Datum	mm					
21.11.2018	0		0		0		21.11.2018	0		0		0	
		1		7		-3			2		6		-2
26.11.2018	1		7		-3		26.11.2018	2		6		-2	
		0		-2		-1			-1		0		-2
29.11.2018	1		5		-4		29.11.2018	1		6		-4	
		1		5		-1			1		4		0
04.12.2018	2		10		-5		04.12.2018	2		10		-4	
		0		-1		-1			0		-1		-1
10.12.2018	2		9		-6		10.12.2018	2		9		-5	
		-2		1		1			-3		1		0
20.12.2018	0		10		-5		20.12.2018	-1		10		-5	
		2		-1		1			3		0		1
09.01.2019	2		9		-4		09.01.2019	2		10		-4	

Tabelle 21: Ergebnisse der Verschiebungsmessungen MSP 102, 202 [18]

Messspiegel 102							Messspiegel 202						
	Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ		Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ
Datum	mm						Datum	mm					
21.11.2018	0		0		0		21.11.2018	0		0		0	
		2		7		-2			1		6		-2
26.11.2018	2		7		-2		26.11.2018	1		6		-2	
		-1		-2		-1			-2		-1		-2
29.11.2018	1		5		-3		29.11.2018	-1		5		-4	
		1		4		-1			2		5		-1
04.12.2018	2		9		-4		04.12.2018	1		10		-5	
		0		0		-1			0		-1		-1
10.12.2018	2		9		-5		10.12.2018	1		9		-6	
		-2		2		0			-1		1		1
20.12.2018	0		11		-5		20.12.2018	0		10		-5	
		2		-2		2			1		0		1
09.01.2019	2		9		-3		09.01.2019	1		10		-4	

Tabelle 22: Ergebnisse der Verschiebungsmessungen MSP 103, 203 [18]

Messspiegel 103							Messspiegel 203						
	Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ		Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ
Datum	mm						Datum	mm					
29.11.2018	0		0		0		29.11.2018	0		0		0	
		2		5		0			3		4		-1
04.12.2018	2		5		0		04.12.2018	3		4		-1	
		-1		-1		-1			0		-1		0
10.12.2018	1		4		-1		10.12.2018	3		3		-1	
		-1		1		0			-3		2		0
20.12.2018	0		5		-1		20.12.2018	0		5		-1	
		1		-1		1			2		-1		1
09.01.2019	1		4		0		09.01.2019	2		4		0	

Tabelle 23: Ergebnisse der Verschiebungsmessungen MSP 104, 204 [18]

Messspiegel 104						Messspiegel 204							
	Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ		Y	ΔY	X	ΔX	Z	ΔZ
Datum	mm						Datum	mm					
10.12.2018	0		0		0		10.12.2018	0		0		0	
		0		5		-1			-3		2		0
20.12.2018	0		5		-1		20.12.2018	-3		2		0	
		-1		-4		2			3		0		1
09.01.2019	-1		1		1		09.01.2019	0		2		1	

Tabelle 24: Verschiebungsmessungen in Y-Richtung [18]

Verschiebungen in Y-Richtung								
Datum	MSP 101	MSP 201	MSP 102	MSP 202	MSP 103	MSP 203	MSP 104	MSP 204
21.11.2018	0	0	0	0	0	0	0	0
26.11.2018	1	2	2	1	0	0	0	0
29.11.2018	1	1	1	-1	0	0	0	0
04.12.2018	2	2	2	1	2	3	0	0
10.12.2018	2	2	2	1	1	3	0	0
20.12.2018	0	-1	0	0	0	0	0	-3
09.01.2019	2	2	2	1	1	2	-1	0

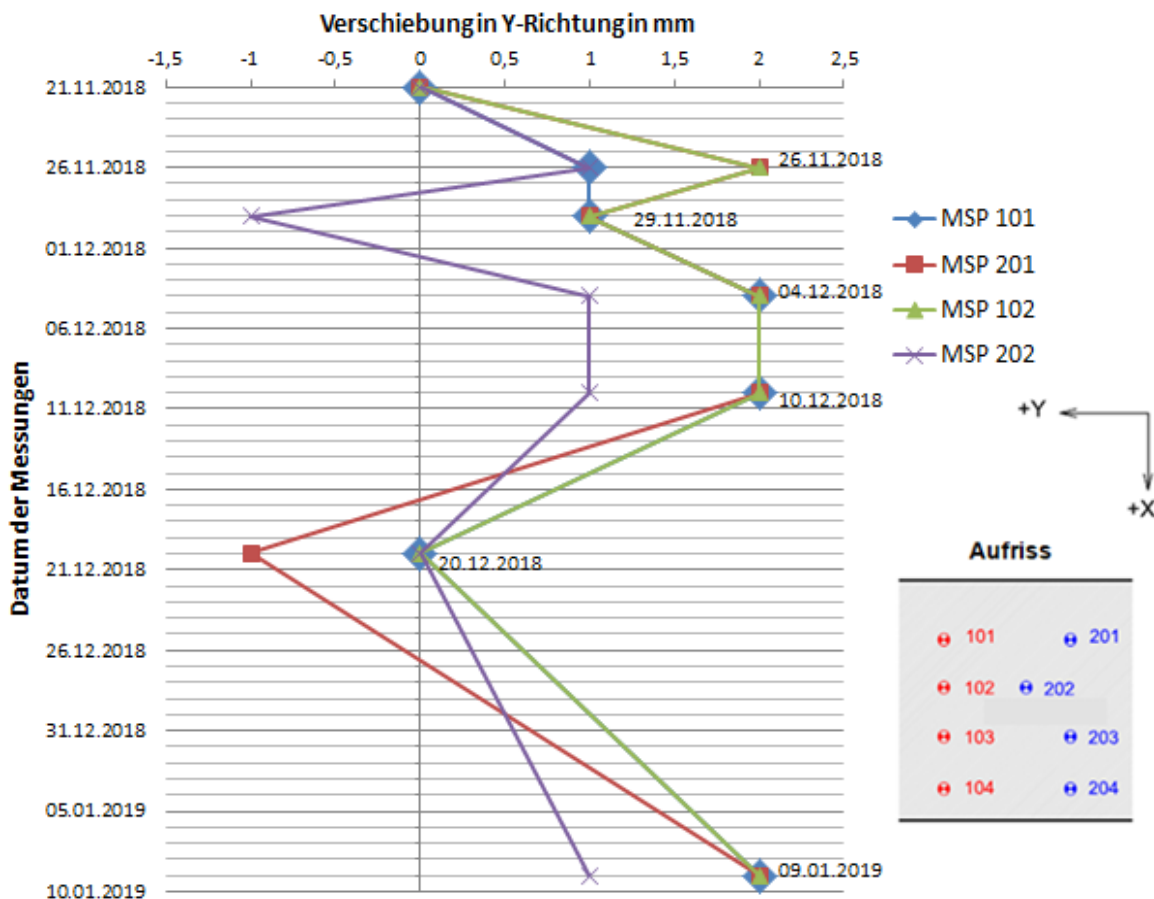


Abbildung 46: Verschiebungen in Y-Richtung

Bei den horizontalen Verschiebungen in Y-Richtung treten bei den Messpunkten der oberen beiden Nagelreihen maximale Werte von **2 mm** auf. Da diese innerhalb der Messgenauigkeit liegen, sind diese Horizontalverschiebungen von untergeordneter Bedeutung für das Verformungsverhalten. Die Messspiegel der unteren beiden Nagelreihen wurden nicht ausgewertet, da die Verschiebungsmessungen erst nach Fertigstellung der Wand durchgeführt und somit das Verformungsverhalten während der Bauphase nicht erfasst wurden.

Tabelle 25: Verschiebungsmessungen in X-Richtung [18]

Verschiebungen in X-Richtung								
Datum	MSP 101	MSP 201	MSP 102	MSP 202	MSP 103	MSP 203	MSP 104	MSP 204
21.11.2018	0	0	0	0	0	0	0	0
26.11.2018	7	6	7	6	0	0	0	0
29.11.2018	5	6	5	5	0	0	0	0
04.12.2018	10	10	9	10	5	4	0	0
10.12.2018	9	9	9	9	4	3	0	0
20.12.2018	10	10	11	10	5	5	5	2
09.01.2019	9	10	9	10	4	4	1	2

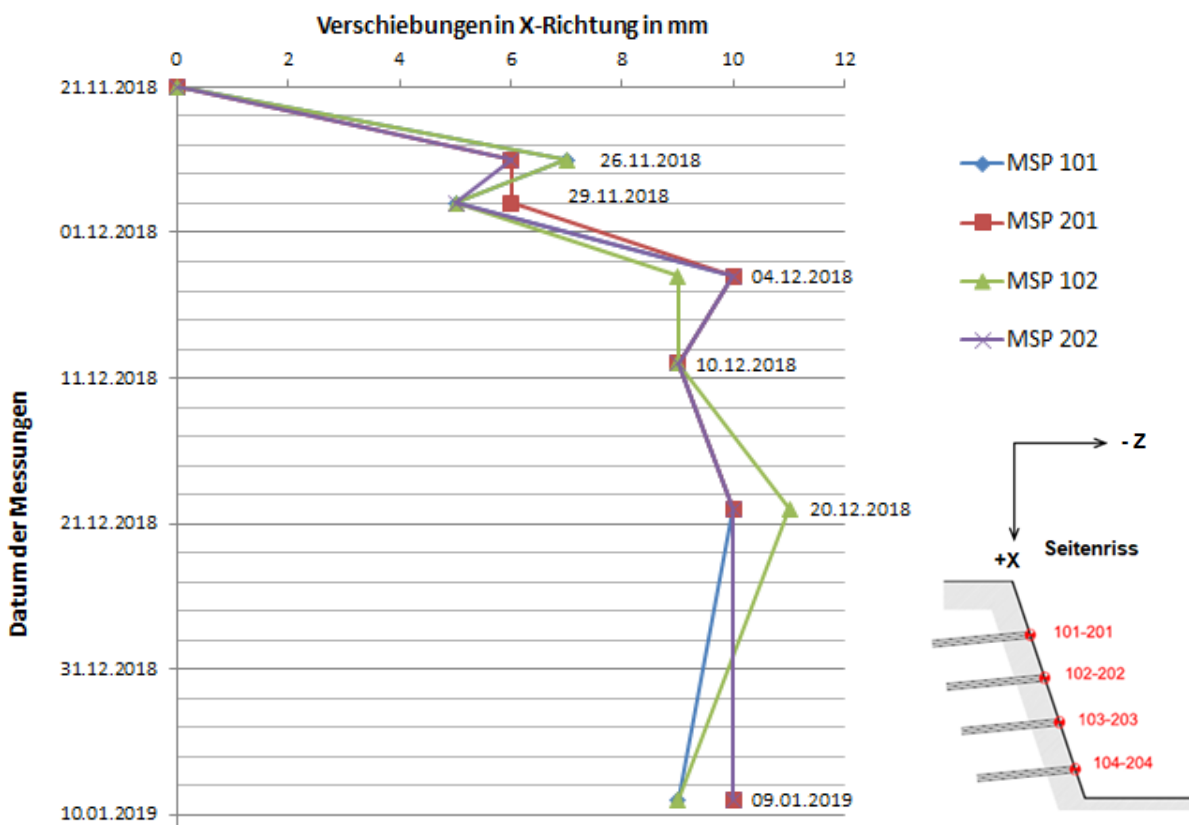


Abbildung 47: Verschiebungen in X-Richtung

Die Verschiebungen in X-Richtung (Vertikal) sind alle samt positiv. Der Maximalwert beträgt **11 mm**. Dieser Wert stimmt gut mit der analytischen Verschiebungsabschätzung aus Abschnitt 2.5.2 mit **9 mm** überein.

Die Hebungen zwischen den Messungen sind die Folge der Aushubentlastung. Aufgrund der erreichbaren Messgenauigkeit ist dieser Effekt zu vernachlässigen.

Tabelle 26: Verschiebungsmessungen in Z-Richtung [18]

Verschiebungen in Z-Richtung								
Datum	MSP 101	MSP 201	MSP 102	MSP 202	MSP 103	MSP 203	MSP 104	MSP 204
21.11.2018	0	0	0	0	0	0	0	0
26.11.2018	-3	-2	-2	-2	0	0	0	0
29.11.2018	-4	-4	-3	-4	0	0	0	0
04.12.2018	-5	-4	-4	-5	0	-1	0	0
10.12.2018	-6	-5	-5	-6	-1	-1	0	0
20.12.2018	-5	-5	-5	-5	-1	-1	-1	0
09.01.2019	-4	-4	-3	-4	0	0	1	1

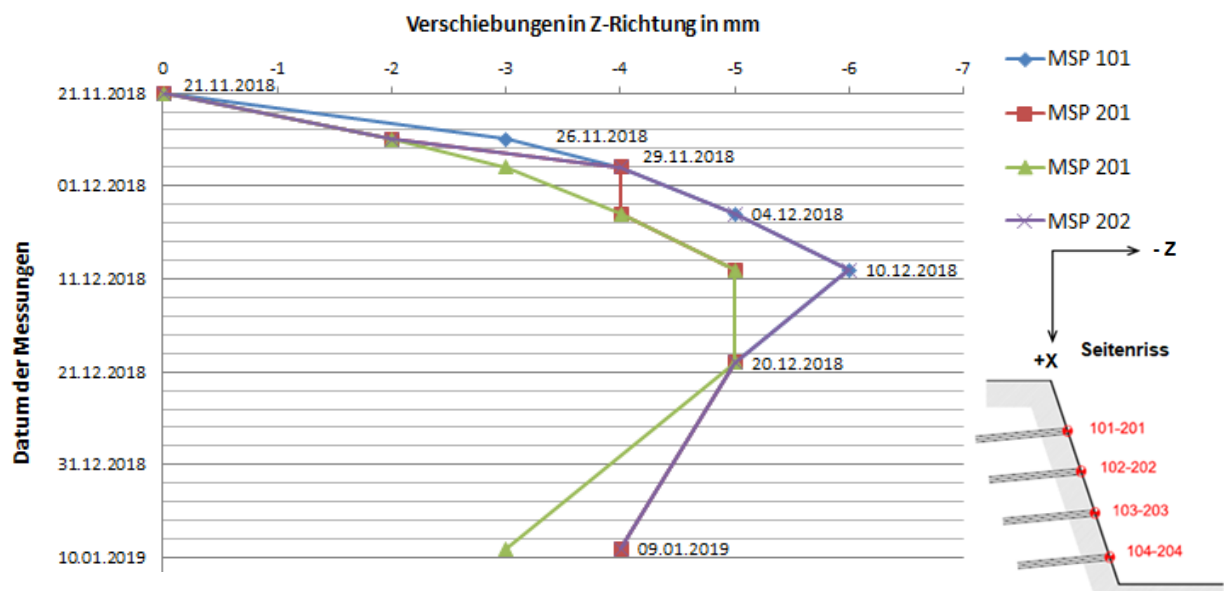


Abbildung 48: Verschiebungen in Z-Richtung

Die Verschiebungen in Z-Richtung betragen maximal **6 mm**. Die Verschiebungen in positiver Richtung ab dem 10.12.2018 liegen innerhalb der Messgenauigkeit. Sie beginnen erst nach der Fertigstellung der Wand.

6 Vergleich der Verfahren

6.1 Musternagelwand

6.1.1 Vergleich der Verschiebungen

Tabelle 27: Vergleich der Verschiebungen am Wandkopf - Musternagelwand

Verfahren		δ_h	δ_v
Analytik (Abschnitt 2.4.2)		20	20
Numerik	Plattenelemente	22	28
	Geogitter	22	27
	EBR	22	20

Die Ergebnisse der Verschiebungen aus den numerischen Modellen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den analytischen Methoden zur Verformungsabschätzung.

In horizontaler Richtung beträgt der Unterschied nur **2 mm** (9,1%). Hinsichtlich der Verschiebungen in vertikaler Richtung ergeben sich je nach verwendetem Strukturelement zur Modellierung der Bodennägel z.T. deutliche Unterschiede. Die Ergebnisse der Verschiebungen in vertikaler Richtung aus Analytik und Numerik mit EBR stimmen überein. Die Abweichungen bei den Plattenelementen bzw. Geogittern und der Numerik weisen Unterschiede von **7 mm** bzw. **8 mm** (25,9% bzw. 36,4%) auf.

6.1.2 Vergleich der Sicherheitsfaktoren

Tabelle 28: Vergleich der Sicherheitsfaktoren - Musternagelwand

Verfahren		FoS
Vorbemessung - Gigan, J.P. (1986)		1,47
GGU-STABILITY	Blockgleitmethode	1,67
	Starrkörper-Bruchmechanismus	1,64
	JANBU	1,82
	BISHOP	1,59
PLAXIS	Letzter Aushubschritt	
	Plattenelemente	1,65
	Geogitter	1,67
	EBR	1,68
	Endzustand	
	Plattenelemente	2,09
	Geogitter	2,10
	EBR	2,12

In Tabelle 28 sind die Sicherheitsfaktoren, welche mit unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden, angeführt.

Der Sicherheitsfaktor von 1,47 für die Vorbemessung nach Gigan, J.P. ist der geringste und dient lediglich für eine erste Abschätzung.

Die Werte, welche mit **GGU-STABILITY** ermittelt werden, reichen von **1,59** bis **1,82**. Diese Schwankungsbreite ergibt sich aus den unterschiedlichen Ansätzen, welche in Abschnitt 1.2.8 genauer beschrieben sind.

Die Sicherheitsfaktoren mit **PLAXIS** nach dem letzten Aushubschritt reichen von **1,65** bis **1,68**. Nach dem Einbau der untersten Nagelreihe und Aufbringen der Spritzbetonversiegelung steigen sie auf **2,09** bis **2,12** an. Die Sicherheitsfaktoren für die Gesamtstandfestigkeiten aus **PLAXIS** zeigen für die unterschiedlichen Strukturelemente geringe Abweichungen.

Da die mit **GGU-STABILITY** ermittelten Sicherheitsfaktoren mit denen der Numerik nach dem letzten Aushub verglichen werden, herrscht ebenfalls eine gute Übereinstimmung.

Nachfolgend (Abbildung 49) ist ein Vergleich der Geometrien der Bruchkörper von GGU-STABILITY und PLAXIS dargestellt.

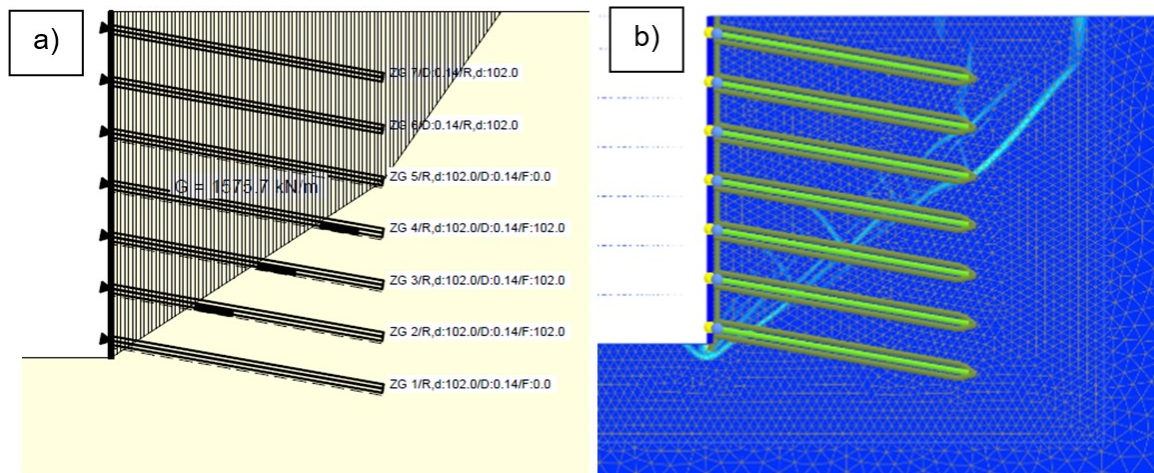


Abbildung 49: Bruchkörpergeometrie a) GGU-STABILITY (JANBU), b) PLAXIS mit Plattenelementen

Die Geometrie des Bruchkörpers des numerischen Modells mit Plattenelemente weist eine gute Übereinstimmung mit jener aus GGU-STABILITY (JANBU) auf (Abbildung 49).

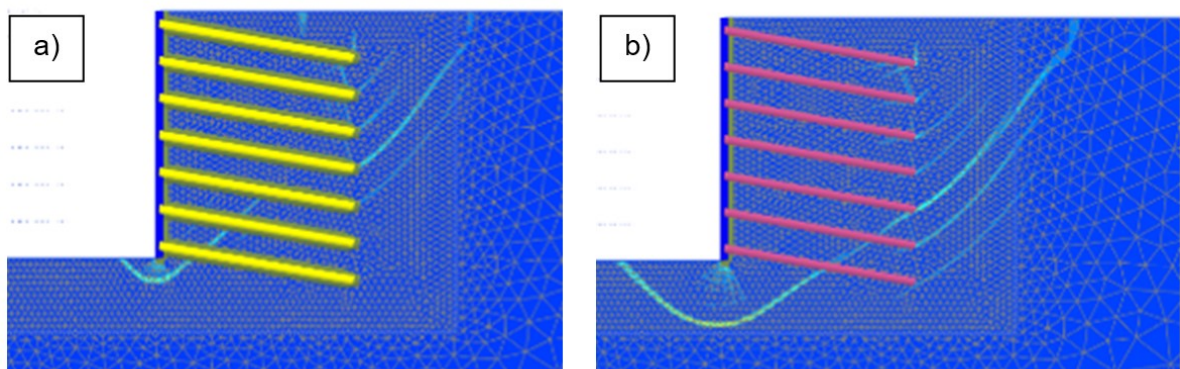


Abbildung 50: Bruchkörpergeometrie PLAXIS mit a) Geogitter, b) EBR

6.2 Bella Vita

6.2.1 Vergleich der Verschiebungen

Tabelle 29: Vergleich der Verschiebungen des obersten Nagelkopfes - Bella Vita

Verfahren		δ_h	δ_v
Analytik (Abschnitt 2.5.3)		9	9
Numerik	Plattenelemente	4	4
	Geogitter	4	4
	EBR	5	4
3D-Verschiebungsmessung bei MSP 101		4	10

Da bei der Spritzbetonnagelwand von Bella Vita die Verschiebungen auf Höhe der obersten Nagelreihe gemessen wurden, erfolgt auch in der Numerik die Auswertung auf dieser Höhe. Die Ergebnisse zeigen in horizontaler Richtung eine gute Übereinstimmung zwischen den Verschiebungen der numerischen Modelle und der 3D-Verschiebungsmessungen. Die Analytik überschätzt in diesem Fall die horizontalen Verschiebungen. Die Abweichung beträgt **5 mm**. Da die Verschiebungen jedoch sehr geringe Werte aufweisen, ist die Aussagekraft der Verschiebungsmessung aufgrund der Messgenauigkeit gering.

Die vertikalen Verschiebungen hingegen werden bei den numerischen Modellen unterschätzt. Hier ist eine geringe Abweichung der Werte zwischen der Analytik und der 3D-Verschiebungsmessung erkennbar. Da jedoch die Nullmessung erst nach dem zweiten Aushub erfolgt ist, wurden Hebungen durch die Aushubentlastung nicht erfasst.

Tabelle 30: Vergleich der vertikalen Differenzverschiebungen

Aushub-schritt	3-D Messung MSP 101 mm	Diff. Versch. mm	3-D Messung MSP 201 mm	Diff. Versch. mm	Plattenelemente mm	Diff. Versch. mm	Geogitter mm	Diff. Versch. mm	EBR mm	Diff. Versch. mm
Zwei	0		0		0		1		1	
		7		6		4		3		2
Drei	7		6		4		4		3	
		-2		0		0		0		1
Vier	5		6		4		4		4	

Tabelle 31: Vergleich der horizontalen Differenzverschiebungen

Aushub-schritt	3-D Messung MSP 101 mm	Diff. Versch. mm	3-D Messung MSP 201 mm	Diff. Versch. mm	Platten- elemente mm	Diff. Versch. mm	Geogitter mm	Diff. Versch. mm	EBR mm	Diff. Versch. mm
Zwei	0		0		-1		-1		-2	
		-3		-2		-3		-3		-3
Drei	-3		-2		-4		-4		-5	
		-1		-2		0		0		0
Vier	-4		-4		-4		-4		-5	

Der Vergleich der Differenzverschiebungen zwischen den Aushubschritten zeigt ein ähnliches Bild wie die totalen. Gute Übereinstimmung liegt in horizontaler Richtung vor, während die vertikalen Verschiebungen merkbar abweichen.

6.2.2 Vergleich der Sicherheitsfaktoren

Tabelle 32: Vergleich der Sicherheitsfaktoren - Bella Vita

Verfahren		FoS
GGU-STABILITY	Blockgleitmethode	2,33
	Starrkörper-Bruchmechanismus	2,33
	JANBU	2,00
	BISHOP	1,96
PLAXIS	Letzter Aushubschritt	
	Plattenelemente	1,95
	Geogitter	1,70
	EBR	1,77
	Endzustand	
	Plattenelemente	3,01
	Geogitter	2,92
	EBR	3,02

In Tabelle 32 sind die Sicherheitsfaktoren aus den unterschiedlichen Methoden für Bella Vita angeführt. Die Werte aus **GGU-STABILITY** liegen in einem Bereich von **1,96** bis **2,33** (15,9%).

Die Sicherheitsfaktoren aus **PLAXIS** nach dem letzten Aushubschritt liegen in einem Bereich von **1,70** bis **1,95** (12,8%) und steigen nach der Installation der untersten Nagelreihe und Spritzbetonversiegelung auf **2,92** bis **3,02** an.

Da die mit GGU-STABILITY ermittelten Sicherheitsfaktoren mit denen aus der Numerik nach dem letzten Aushub verglichen werden, herrscht ebenfalls eine gute Übereinstimmung.

Nachfolgend (Abbildung 51) ist ein Vergleich der Geometrien der Bruchkörper von GGU-STABILITY und PLAXIS dargestellt.

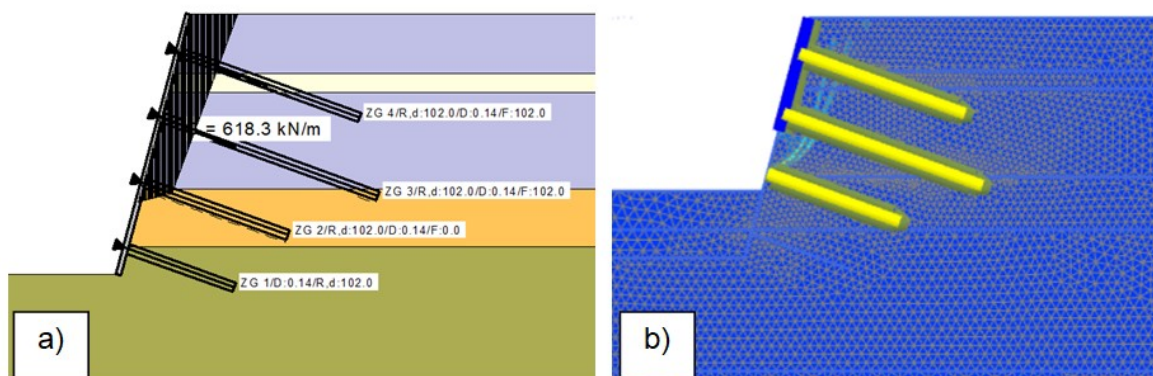


Abbildung 51: Bruchkörpergeometrie a) GGU-Stability (JANBU), b) PLAXIS mit Geogittern

Die Geometrie des Bruchkörpers aus GGU-STABILITY (JANBU) weist eine gute Übereinstimmung mit jener des numerischen Modells mit Geogittern auf.

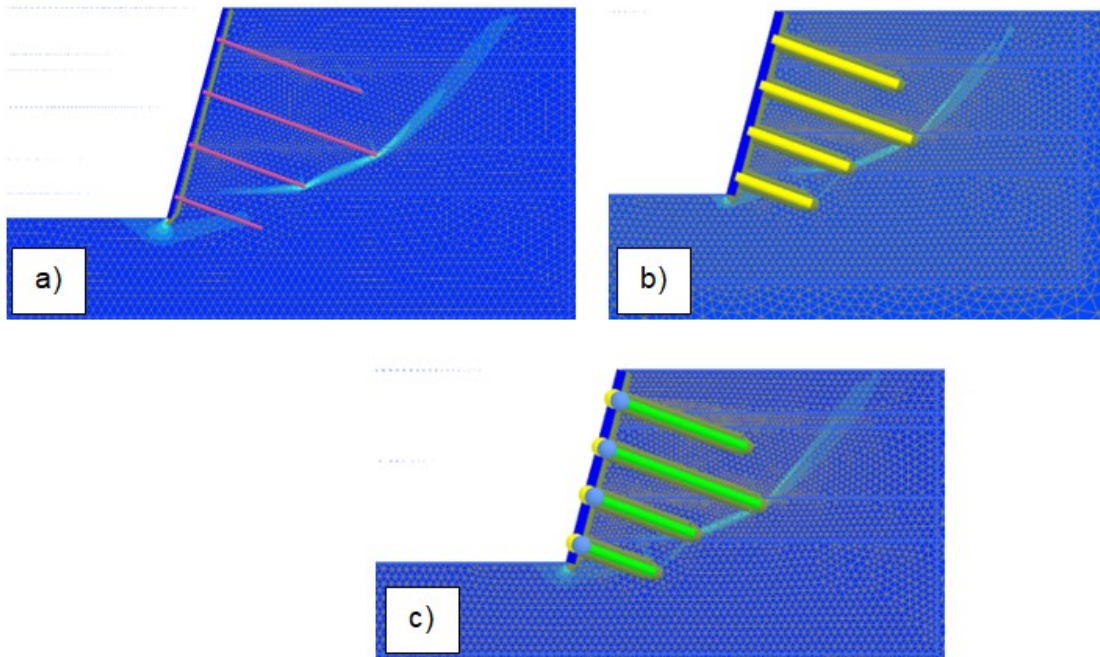


Abbildung 52: Bruchkörpergeometrie PLAXIS mit a) EBR, b) Geogitter, c) Plattenelemente

Die gute Übereinstimmung der Sicherheitsfaktoren der numerischen Modelle mit unterschiedlich modellierten Bodennägeln im Endbauzustand zeigt sich auch in den ähnlichen Ausbildungen der Scherflächen wieder.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Spritzbetonnagelwände verfügen über ein breites Anwendungsspektrum. Bei geeigneten Bodenverhältnissen weisen sie oft wirtschaftliche Vorteile gegenüber anderen Bauausführungstechniken auf. Um dieses Verfahren auch in der Nähe von setzungsempfindlichen Strukturen einzusetzen, wird in dieser Arbeit das Verformungsverhalten der Wände untersucht.

Ein selbstgewähltes numerisches Modell (Musternagelwand) wird erstellt, um Vergleiche der Verschiebungen aus der Numerik und den analytischen Methoden zur Verschiebungsabschätzung zu erhalten. Die Musternagelwand hat eine Höhe von 10 m und einen homogenen Bodenaufbau. Des Weiteren werden mit Hilfe der Daten von 3D-Verschiebungsmessungen einer ca. 6,8 m hohen Spritzbetonnagelwand in Bratislava die Kennwerte eines numerischen Modells dieser Wand entsprechend angepasst. Das Ziel ist eine realitätsnahe Modellierung der Spritzbetonnagelwände. Dazu zählen u.a. eine gute Übereinstimmung der Sicherheitsfaktoren aus Analytik und Numerik, sowie vergleichbare Werte der Verschiebungen aus analytischen Abschätzungen, Numerik und den tatsächlich aufgetretenen Verschiebungen. Für die numerischen Modelle werden unterschiedliche Elemente verwendet, um das Verhalten der Bodennägel zu simulieren. Neben Plattenelementen und Geogittern, werden ebenfalls eingebettete Trägerreihen (EBR) verwendet, um die in einem Raster angeordneten, stabförmigen Elemente, welche außerhalb des betrachteten Querschnittes (out-of-plane) liegen, zweidimensional zu modellieren.

Die Sicherheit gegen Böschungsbruch (FoS) der untersuchten Beispiele werden mit dem geotechnischen Bemessungsprogramm GGU-STABILITY ermittelt und mit jenen aus der Numerik verglichen. Dabei ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, dass die Sicherheitsfaktoren der maßgebenden Bauzustände (kleinste Sicherheit) miteinander verglichen werden. Die Vergleiche der maßgebenden Bauzustände aus GGU-STABILITY und PLAXIS zeigen lediglich geringe Abweichungen. Diese werden auf die unterschiedlichen Berechnungsmethoden der Analytik zurückgeführt.

Großteils werden gute Übereinstimmungen der Verschiebungen zwischen den analytischen Methoden, der Numerik und der 3D-Verschiebungsmessungen festgestellt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der Abschätzung des Verschiebungsverhaltens mittels analytischer und numerischer Methoden

durchaus aussagekräftige Werte liefern, welche während der Bauausführung zu überwachen sind.

Das Verschiebungsverhalten von Spritzbetonnagelwänden ist von zahlreichen Einflussfaktoren, wie z.B. der Erfahrung des Baustellenpersonals, des anstehenden Bodens, der Höhe der Aushubschritte, der Zeit zwischen Aushub und Einbringung der Stützmittel etc. abhängig. Daher wird an dieser Stelle empfohlen weitere Vermessungsdaten zu sammeln, um mehr Erfahrungen über das Verformungsverhalten zu sammeln. Um 3D Effekte des Bauablaufes realitätsnahe zu berücksichtigen, sind numerische Modelle in 3D zu erstellen.

Quellenverzeichnis

- [1] FHWA: Geotechnical Engineering Circular No.7: Soil Nail Walls, Columbia, Maryland: GeoSyntec Consults, 2003
- [2] CLOUTERRE. French National Research Project, recommendations; CLOUTERRE (English Translation). Soil nailing recommendations – 1991. Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026, 1991
- [3] Brandl, H.: Stützbauwerke und konstruktive Hangsicherungen in GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 3, Witt, K.J. (Hrsg.), 7. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin, 2009, S. 861-869
- [4] Von Wolffersdorff, P.A.; Schweiger, H.F.: Numerische Verfahren in der Geotechnik in GRUNDBAU-TASCHENBUCH Teil 1, Witt, K.J. (Hrsg.), 7. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2008, S. 540-556
- [5] ÖNORM EN 14490:2010-06, Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bodenvernagelung (EN 14490:2010-06), 2010
- [6] Gigan, J.P.: "Application of soil nailing for retaining structures: conception, design parameters for structures. Bulletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussees No.143, Mai-Juin., 1986
- [7] K projektom na Kolibe pribudne Bella Vita, <http://reality.etrend.sk/byvanie/k-projektom-na-kolibe-pribudne-bella-vita.html> (am 07.12.2018)
- [8] Binder, D.: Bodenvernagelung, Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Subsurface Engineering, 2014
- [9] Schmidt, H.H.: Grundlagen der Geotechnik. Bodenmechanik – Grundbau – Erdbau. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1996
- [10] Buß, J.: Böschungsbruchberechnungen und Berechnungen von Bodenvernagelungen und Bewehrte- Erde- Wänden nach DIN 4084 und EC 7, Handbuch GGU-Stability, Steinfeld, Civil Service, 2013
- [11] Buja, H.: Handbuch des Spezialtiefbaus, Geräte und Verfahren. 2. Auflage, Düsseldorf, Werner Verlag, 2001
- [12] Brinkgreve, R., et al.: PLAXIS 2D 2018 - User Manual, Delft, The Netherlands, Plaxis bv., 2018
- [13] Szilárd, F.: Geologischer Bericht Bella Vita, RNDr. Varjú Zoltán, GEO Komario, 2018
- [14] Rudolf, R.: Entwurf & Konstruktion in der Geotechnik – Vorlesungsteil Verankerungen, ETH Zürich, Institut für Geotechnik, 2010

-
- [15] Gässler, G.: Vernagelte Geländesprünge – Tragverhalten und Standsicherheit, Universität Fridericana Karlsruhe, PhD thesis, 1987
- [16] Mosser, C.: Numerical Study on the Behavior of Soil Nails, Master's thesis, Graz University of Technology, Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2016
- [17] ANP-Systems: Zulassung ANP-Endstabanker SAS 670, BMVIT-327.120/0015-IV/ST2, 2015
- [18] Šille, M.; Trefa R.: Geodätischer Bericht, GEOsys s.r.o., Rezedová 25/B, 821 01 Bratislava, 2018
- [19] Sivakumar, B.; Vikas P.: Simulation of Soil Nail Structures using PLAXIS 2D, Plaxis Bulletin, Seite 16 -21, 2009
- [20] Krishna Prasad Aryal: Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods, Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, 2006
- [21] Abramson et al.: Slope Stability and Stabilisation Methods, JOHN WILEY & SONS, INC., 2002
- [22] Ostermayer, H.: Verpreßanker. Grundbau-Taschenbuch, 4. Auflage, Teil 2 . Ernst & Sohn, Berlin, 1991
- [23] DIN V 1054-100:1996-04 Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Teil 100: Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten (DIN V 1054-100:1996-04), 1996
- [24] Elias, V.; Juran, I.: Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations. Technical Report FHWA-RD-89- 198, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C, 1991
- [25] Tschuchnigg, F.: 3D Finite Element Modelling of Deep Foundations Employing an Embedded Pile Formulatio, Dissertation, Technische Universität Graz, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, 2012
- [26] Bauer Spezialtiefbau: Bodenvernagelung, http://www.bauer-spezialtiefbau.at/de/construction_methods/bodenvernagelung/ (am 12.05.2019)
- [27] Benz, T.: Small-Strain Stiffness of Soils and ist Numerical Consequences, Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, 2007
- [28] Zentner, V.M.: Numerische Studien zum Tragverhalten von kombinierten Pfahl-Plattengründungen, Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, 2015

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: AUSBILDUNG EINES BEWEHRTEN BODENKÖRPERS [4].....	7
ABBILDUNG 2: BAUABLAUF EINES AUSHUBSCHRITTES [5].....	8
ABBILDUNG 3: MAßNAHMEN ZUM SCHUTZ GEGEN WÄSSER [2]	12
ABBILDUNG 4: A) VORGEBOHRTES BOHRLOCH MIT EINGEPRESSTEM BODENNAGEL B) SELBSTBOHRENDER BODENNAGEL MIT NACHGIEBIGER FRONTALAUSBILDUNG [4].....	14
ABBILDUNG 5: BODEN-NAGEL INTERAKTION [1].....	16
ABBILDUNG 6: KOMBINIERTER BAUVERFAHREN ZUR REDUZIERUNG VON SETZUNGEN [2].....	17
ABBILDUNG 7: EINFLUSS DES NAGELAYOUTS AUF DIE VERFORMUNGEN. A) KONSTANTE NAGELLÄNGE B) ABNEHMENDE NAGELLÄNGE C) ZUNEHMENDE NAGELLÄNGE [2]	18
ABBILDUNG 8: KORROSIONSSCHUTZ MIT GERIPPTEM KUNSTSTOFFROHR [4]	20
ABBILDUNG 9: BEMESSUNGSDIAGRAMM VON GIGAN, J.P. (1986) FÜR $L/H = 0,8$ [6]	23
ABBILDUNG 10: UNTERSCHIEDLICHE AUSFÜHRUNGEN DER FRONTALAUSBILDUNG [4].....	27
ABBILDUNG 11: WEICHE FRONTALAUSBILDUNG [5].....	28
ABBILDUNG 12: A) INNERE STANDSICHERHEIT B) ÄUßERE STANDSICHERHEIT C) MISCHFORM [2]	30
ABBILDUNG 13: INNERE STANDSICHERHEIT [2].....	31
ABBILDUNG 14: VERSAGEN BEI ZU GROßEM AUSHUBSCHRITT [2].....	32
ABBILDUNG 15: VERFORMTE SPRITZBETONNAGELWAND MIT DEN MAßGEBENDEN EINFLUSSGRÖßEN [2].....	36
ABBILDUNG 16: BAUVORHABEN BELLA VITA, BRATISLAVA [7].....	40
ABBILDUNG 17: LAGE DES BAUVORHABENS IN BRATISLAVA [7]	41
ABBILDUNG 18: INSTRUMENTIERTER QUERSCHNITT DER BAUGRUBE (ÜBERSETZT VON KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	43
ABBILDUNG 19: EINZELNACHWEISE A) GLEITEN, B) KIPPEN, C) GRUNDBRUCH, D) GELÄNDEBRUCH [14].....	45
ABBILDUNG 20: STANDARDWERTE ZUR GENERIERUNG VON GLEITFLÄCHEN.....	46

ABBILDUNG 21: MUSTERNAGELWAND - STARRKÖRPER BRUCHMECHANISMUS $M=0,61$	47
ABBILDUNG 22: MUSTERNAGELWAND – BLOCKGLEITMETHODE $M = 0,60$	48
ABBILDUNG 23: MUSTERNAGELWAND – JANBU $M = 0,55$	48
ABBILDUNG 24: MUSTERNAGELWAND – BISHOP $M = 0,64$	49
ABBILDUNG 25: BELLA VITA - STARRKÖRPER-BRUCHMECHANISMUS $M = 0,43$	51
ABBILDUNG 26: BELLA VITA – BLOCKGLEITMETHODE $M = 0,43$	52
ABBILDUNG 27: BELLA VITA – JANBU $M = 0,50$	52
ABBILDUNG 28: BELLA VITA – BISHOP $M = 0,51$	53
ABBILDUNG 29: A) 15-KNOTIGE UND B) 6-KNOTIGE, DREIECKIGE ELEMENTE IN PLAXIS [12]	57
ABBILDUNG 30: FE-BERECHNUNGSNETZ – MUSTERNAGELWAND	63
ABBILDUNG 31: VERFORMTES FE-BERECHNUNGSNETZ - MUSTERNAGELWAND.....	65
ABBILDUNG 32: VERLAUF DER VERSCHIEBUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT DER BERECHNUNGSSCHRITTE - MUSTERNAGELWAND	66
ABBILDUNG 33: SICHERHEITSAKTOREN (FOS_{PLAXIS}) IN ABHÄNGIGKEIT DER TOTALVERSCHIEBUNGEN AM WANDKOPF - MUSTERNAGELWAND.....	67
ABBILDUNG 34: HORIZONTALVERSCHIEBUNGEN MUSTERNAGELWAND A) PLATTENELEMENTE, B) GEOGITTER, C) EBR.....	69
ABBILDUNG 35: VERTIKALVERSCHIEBUNGEN MUSTERNAGELWAND A) PLATTENELEMENTE, B) GEOGITTER, C) EBR.....	70
ABBILDUNG 36: FE-BERECHNUNGSNETZ - BELLA VITA	72
ABBILDUNG 37: VERFORMTES FE-BERECHNUNGSNETZ - BELLA VITA.....	74
ABBILDUNG 38: VERLAUF DER VERSCHIEBUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT DER BERECHNUNGSSCHRITTE - BELLA VITA	75
ABBILDUNG 39: SICHERHEITSAKTOREN (FOS_{PLAXIS}) IN ABHÄNGIGKEIT DER TOTALVERSCHIEBUNGEN AM WANDKOPF - BELLA VITA	76

ABBILDUNG 40: HORIZONTALVERSCHIEBUNGEN BELLA VITA A) PLATTENELEMENTE, B) GEOGITTER, C) EBR.....	78
ABBILDUNG 41: VERTIKALVERSCHIEBUNGEN BELLA VITA A) PLATTENELEMENTE, B) GEOGITTER, C) EBR	79
ABBILDUNG 42 MESSBOLZEN AN BEWEHRUNGSGITTER	81
ABBILDUNG 43: POSITION UND NUMMERIERUNG DER MESSPUNKTE IM GRUNDRISS (ÜBERSETZT UND ADAPTIERT AUS [18])	82
ABBILDUNG 44: POSITION UND NUMMERIERUNG DER MESSPUNKTE IM SEITEN- UND AUFRISS BELLA VITA (ÜBERSETZT UND ADAPTIERT AUS [18])	83
ABBILDUNG 45: MESSBOLZEN NACH ZWEI AUSHUBSCHRITTEN (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI)	83
ABBILDUNG 46: VERSCHIEBUNGEN IN Y-RICHTUNG.....	87
ABBILDUNG 47: VERSCHIEBUNGEN IN X-RICHTUNG.....	88
ABBILDUNG 48: VERSCHIEBUNGEN IN Z-RICHTUNG	89
ABBILDUNG 49: A) VERSAGENSGEOMETRIE AUS GGU-STABILITY (JANBU) B) INKREMENTELLE DEVIATORISCHE SPANNUNGEN AUS PLAXIS ΔY_s (500 FACH VERGRÖßERT) MIT PLATTENELEMENTEN	92
ABBILDUNG 50: INKREMENTELLE DEVIATORISCHE SPANNUNGN AUS PLAXIS ΔY_s (500 FACH VERGRÖßERT) A) GEOGITTER B) EBR.....	92
ABBILDUNG 51: A) VERSAGENSGEOMETRIE AUS GGU-STABILITY (JANBU) UND B) INKREMENTELLE DEVIATORISCHE SPANNUNGN AUS PLAXIS ΔY_s (500 FACH VERGRÖßERT) MIT GEOGITTERN	95
ABBILDUNG 52: INKREMENTELLE DEVIATORISCHE SPANNUNGN DY_s AUS PLAXIS (500 FACH VERGRÖßERT) A) EBR B) GEOGITTER UND C) PLATTENELEMENTE	96
ABBILDUNG 53: URGELÄNDE VOR BEGINN DER BAUMAßNAHMEN AM 25.10.2018 – BLICKRICHTUNG WESTEN	107
ABBILDUNG 54: URGELÄNDE VOR BEGINN DER BAUMAßNAHMEN AM 25.10.2018 - BLICKRICHTUNG SÜDEN.....	107
ABBILDUNG 55: AUSHUBBEGINN AM 12.11.2018 – SÜDLICHER ABSCHNITT (FOTO KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	108

ABBILDUNG 56: AUSHUBBEGINN AM 12.11.2018 – NÖRDLICHER ABSCHNITT (FOTO KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	108
ABBILDUNG 57: SPRITZBETONARBEITEN NACH DEM ERSTEN AUSHUBSCHRITT AM 12.11.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI)	109
ABBILDUNG 58: BEGINN DER BOHRARBEITEN FÜR DIE NÄGEL AM 13.11.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	109
ABBILDUNG 59: ZWEITER AUSHUBSCHRITT FERTIG GESTELLT AM 21.11.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	110
ABBILDUNG 60 MESSBOLZEN NACH ZWEI AUSHUBSCHRITTEN AM 21.11.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	110
ABBILDUNG 61: SPRITZBETONARBEITEN NACH DEM DRITTEN AUSHUBSCHRITT AM 23.11.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI)	111
ABBILDUNG 62: VIERTER AUSHUBSCHRITT AM 26.11.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI)...	111
ABBILDUNG 63: FERTIGSTELLUNG VIERTER SPRITZBETONVERSIEGELUNG AM 28.11.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI)	112
ABBILDUNG 64: ENDBAUZUSTAND DER SPRITZBETONNAGELWAND AM 18.12.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	112
ABBILDUNG 65: MESSQUERSCHNITT DER SPRITZBETONNAGELWAND IM ENDZUSTAND AM 18.12.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU)	113
ABBILDUNG 66: ENDBAUZUSTAND DER SPRITZBETONNAGELWAND AM 20.12.2018 (FOTO: KELLER GRUNDBAU SLOWAKEI).....	114
ABBILDUNG 67: ENDBAUZUSTAND DER SPRITZBETONNAGELWAND AM 09.01.2019	114
ABBILDUNG 68: GRENZLAST VON BODENANKERN IN NICHTBINDIGEN BÖDEN [22]	115
ABBILDUNG 69: GRENZLAST VON VERPRESSTEN BODENANKERN IN BINDIGEN BÖDEN [22].....	115
ABBILDUNG 70: GRENZLAST NICHT VERPRESSTEN BODENANKERN IN BINDIGEN BÖDEN [22]	116

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VERFAHREN ZUR BERECHNUNG DER SICHERHEIT GEGEN BÖSCHUNGSBRUCH [20] [21]	22
TABELLE 2: RECHENBEISPIELE ZUR VORBEMESSUNG	24
TABELLE 3: VERGLEICH GÄNGIGER VERFAHREN ZUR BAUGRUBENSICHERUNG [11]	34
TABELLE 4: SCHÄTZWERTE FÜR DIE KOPFVERSCHIEBUNGEN UND DES FAKTORS K [2]	37
TABELLE 5: PARAMETER DER MUSTERNAGELWAND.....	39
TABELLE 6: PARAMETER SPRITZBETONNAGELWAND – BELLA VITA.....	41
TABELLE 7: BODENPARAMETER BELLA VITA AUS [13]	42
TABELLE 7: VERGLEICH DER AUSNUTZUNGSGRADE UND SICHERHEITSFAKTOREN - MUSTERNAGELWAND	49
TABELLE 8: MAXIMALE ZUGKRÄFTE DER NÄGEL (GGU-STABILITY) - MUSTERNAGELWAND.....	50
TABELLE 10: VERGLEICH DER AUSNUTZUNGSGRADE UND SICHERHEITSFAKTOREN – BELLA VITA.....	53
TABELLE 11: MAXIMALE ZUGKRÄFTE DER NÄGEL (GGU-STABILITY) – BELLA VITA	54
TABELLE 12: BODENPARAMETER PLAXIS - MUSTERNAGELWAND	61
TABELLE 13: STÜTZMITTELPARAMETER (SPRITZBETON, BODENNÄGEL) - MUSTERNAGELWAND.....	61
TABELLE 14: EINGABEPARAMETER DER STÜTZMITTEL (PLAXIS) - MUSTERNAGELWAND.....	62
TABELLE 15: MODELLPHASEN- MUSTERNAGELWAND	64
TABELLE 16: BODENPARAMETER PLAXIS - BELLA VITA	71
TABELLE 17: EINGABEPARAMETER DER STÜTZMITTEL (PLAXIS) - BELLA VITA.....	72
TABELLE 18: ANZAHL DER BODENELEMENTE UND KNOTEN (PLAXIS) - BELLA VITA.....	72
TABELLE 19: PHASEN DER MODELLBILDUNG - BELLA VITA	73
TABELLE 20: ERGEBNISSE DER VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN MSP 101, 201 [18].....	84
TABELLE 21: ERGEBNISSE DER VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN MSP 102, 202 [18].....	85
TABELLE 22: ERGEBNISSE DER VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN MSP 103, 203 [18].....	85

TABELLE 23: ERGEBNISSE DER VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN MSP 104, 204 [18].....	86
TABELLE 24: ABSOLUTWERTE DER VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN IN Y-RICHTUNG [18].....	86
TABELLE 25: ABSOLUTWERTE DER VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN IN X-RICHTUNG [18].....	88
TABELLE 26: ABSOLUTWERTE DER VERSCHIEBUNGSMESSUNGEN IN Z-RICHTUNG [18].....	89
TABELLE 27: VERGLEICH DER VERSCHIEBUNGEN AM WANDKOPF - MUSTERNAGELWAND	90
TABELLE 28: VERGLEICH DER SICHERHEITSAKTOREN - MUSTERNAGELWAND.....	91
TABELLE 29: VERGLEICH DER VERSCHIEBUNGEN DES OBERSTEN NAGELKOPFES - BELLA VITA.....	93
TABELLE 30: VERGLEICH DER DIFFERENTIELLEN VERTIKALEN VERSCHIEBUNGEN	93
TABELLE 31: VERGLEICH DER DIFFERENTIELLEN HORIZONTALEN VERSCHIEBUNGEN	94
TABELLE 32: VERGLEICH DER SICHERHEITSAKTOREN - BELLA VITA.....	94
TABELLE 33: RICHTWERTE FÜR DIE MANTELREIBUNG VON FELSANKERN IN MN/M ² FÜR VERSCHIEDENE GESTEINSARTEN [22].....	116
TABELLE 34: ERFAHRUNGSWERTE FÜR DIE CHARAKTERISTISCHE PFAHL-MANTELREIBUNG FÜR BOHRPFÄHLE IN A) BINDIGE UND B) NICHTBINDIGE BÖDEN [23]	117
TABELLE 35: MANTELREIBUNG FÜR VERMÖRTELTE BODENNÄGEL IN LOCKER- UND FESTGESTEIN FÜR UNTERSCHIEDLICHE BOHRVERFAHREN – GEKÜRZT [24]	117

Anhang A – Fotodokumentation Bella Vita



Abbildung 53: Urgelände vor Beginn der Baumaßnahmen am 25.10.2018 – Blickrichtung Westen



Abbildung 54: Urgelände vor Beginn der Baumaßnahmen am 25.10.2018 - Blickrichtung Süden



Abbildung 55: Aushubbeginn am 12.11.2018 – südlicher Abschnitt (Foto Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 56: Aushubbeginn am 12.11.2018 – nördlicher Abschnitt (Foto Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 57: Spritzbetonarbeiten nach dem ersten Aushubschritt am 12.11.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 58: Beginn der Bohrarbeiten für die Nägel am 13.11.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 59: Zweiter Aushubschritt fertig gestellt am 21.11.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 60 Messbolzen nach zwei Aushubschritten am 21.11.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 61: Spritzbetonarbeiten nach dem dritten Aushubschritt am 23.11.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 62: Vierter Aushubschritt am 26.11.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 63: Fertigstellung vierter Spritzbetonversiegelung am 28.11.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 64: Endbauzustand der Spritzbetonnagelwand am 18.12.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 65: Messquerschnitt der Spritzbetonnagelwand im Endzustand am 18.12.2018 (Foto: Keller Grundbau)



Abbildung 66: Endbauzustand der Spritzbetonnagelwand am 20.12.2018 (Foto: Keller Grundbau Slowakei)



Abbildung 67: Endbauzustand der Spritzbetonnagelwand am 09.01.2019

Anhang B – Abschätzung der Mantelreibung

Zu den nachfolgenden Erfahrungs- bzw. Richtwerten für die Abschätzung der Mantelreibung von Bodennägeln ist anzumerken, dass diese Tabellen und Diagramme keine Ausziehversuche für ein Bauvorhaben ersetzen. Da die Mantelreibung von zahlreichen Faktoren abhängt, sind Ausziehversuche für eine genaue Ermittlung der Mantelreibung erforderlich.

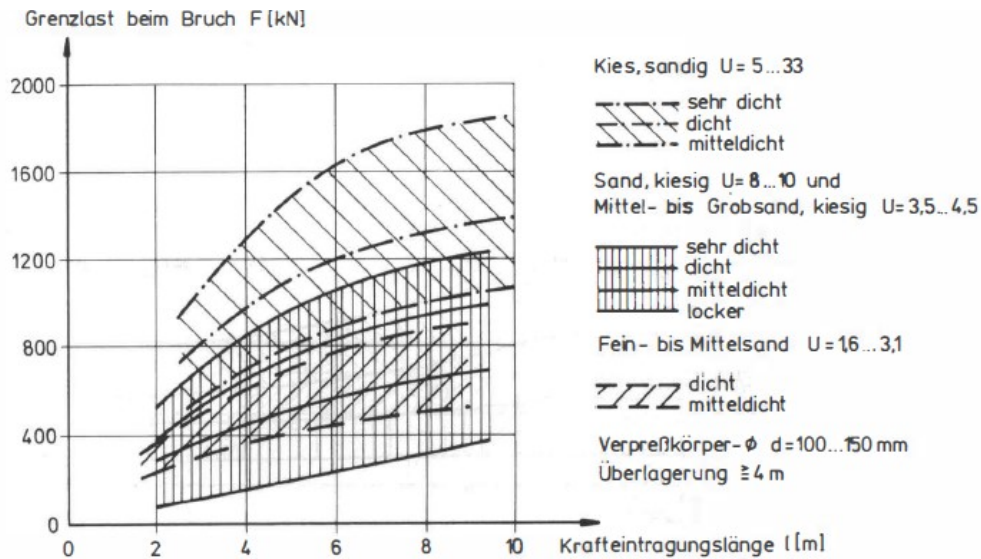


Abbildung 68: Grenzlast von Bodenankern in nichtbindigen Böden [22]

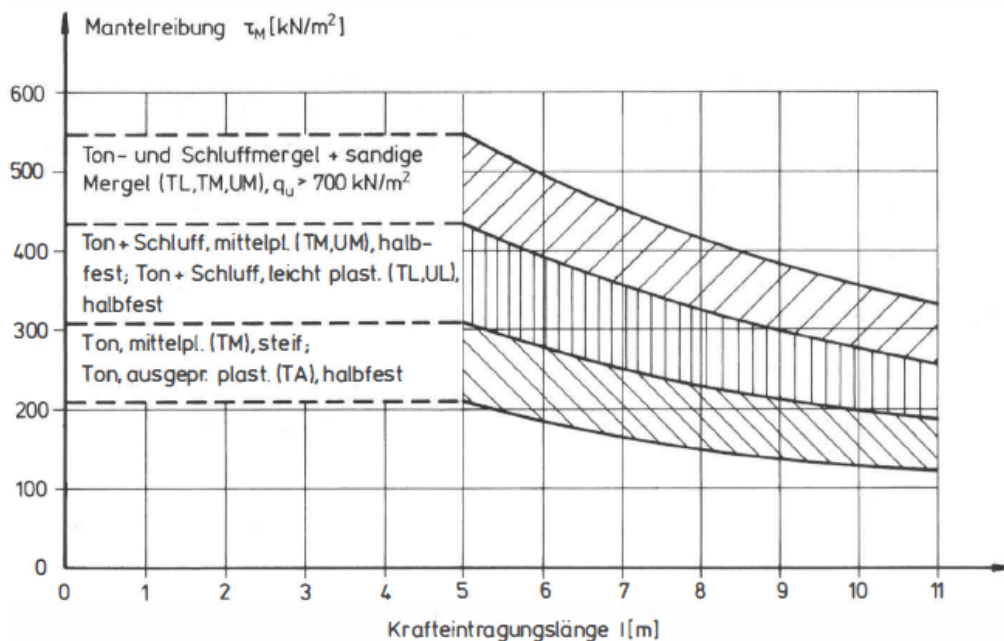


Abbildung 69: Grenzlast von verpressten Bodenankern in bindigen Böden [22]

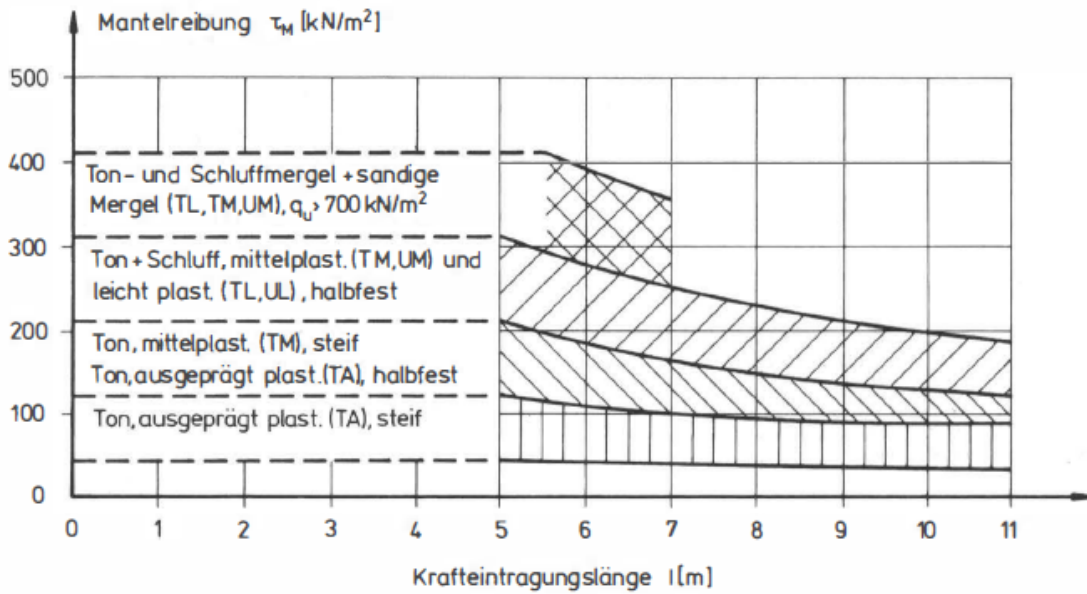


Abbildung 70: Grenzlast nicht verpressten Bodenankern in bindigen Böden [22]

Tabelle 33: Richtwerte für die Mantelreibung von Felsankern in MN/m^2 für verschiedene Gesteinsarten [22]

	Gesteinsart		
	Massige Erstarrungs- und Umwandlungsgesteine, z.B. Granite, Diorite, Gneise, Basalte, Porphyre, Quarzite, Gabbro, Melaphyre, Diabase	Feste Sedimentgesteine: Konglomerate, Brekzien, Arkosen, Sandsteine, Kalksteine, Dolomite, Tonschiefer, Grauwacken	Weichere oder veränderlich feste Sedimentgesteine: Mergelsteine, Schluffsteine, Tonsteine
a) unverwittert b) sehr gute mineralische Bindung c) größer 0,5 bis 1,0 m	1,5	1,0	0,7
a) angewittert b) gute mineralische Bindung c) im Dezimeterbereich (0,1 bis 0,2 m)	1,0	0,7	0,4
a) stark verwittert b) mäßige mineralische Bindung c) im cm-Bereich	0,5	0,3	0,15 (oder Werte für bindigen Boden mit Sicherheitsbeiwert)

Tabelle 34: Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahl-Mantelreibung für Bohrpfähle in a) bindigen und b) nichtbindigen Böden [23]

<p>a)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Festigkeit des nichtbindigen Bodens bei einem mittleren Sondierspitzenwiderstand q_{ck} in MN/m²</th> <th style="width: 50%;">Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m²*</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">0,04</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">0,08</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≥ 15</td> <td style="text-align: center;">0,12</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="font-size: small;">*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.</td> </tr> </table>	Festigkeit des nichtbindigen Bodens bei einem mittleren Sondierspitzenwiderstand q_{ck} in MN/m ²	Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m ² *	0	0	5	0,04	10	0,08	≥ 15	0,12	*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.		<p>b)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Festigkeit des bindigen Bodens bei einer Scherfestigkeit im undrännierten Zustand $c_{u,k}$ in MN/m²</th> <th style="width: 50%;">Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m²*</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,025</td> <td style="text-align: center;">0,025</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,1</td> <td style="text-align: center;">0,04</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≥ 0,2</td> <td style="text-align: center;">0,06</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="font-size: small;">*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.</td> </tr> </table>	Festigkeit des bindigen Bodens bei einer Scherfestigkeit im undrännierten Zustand $c_{u,k}$ in MN/m ²	Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m ² *	0,025	0,025	0,1	0,04	≥ 0,2	0,06	*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.	
Festigkeit des nichtbindigen Bodens bei einem mittleren Sondierspitzenwiderstand q_{ck} in MN/m ²	Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m ² *																						
0	0																						
5	0,04																						
10	0,08																						
≥ 15	0,12																						
*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.																							
Festigkeit des bindigen Bodens bei einer Scherfestigkeit im undrännierten Zustand $c_{u,k}$ in MN/m ²	Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m ² *																						
0,025	0,025																						
0,1	0,04																						
≥ 0,2	0,06																						
*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.																							

Tabelle 35: Mantelreibung für vermörtelte Bodennägel in Locker- und Festgestein für unterschiedliche Bohrverfahren – gekürzt [24]

Bohrverfahren	Bodenart	Mantelreibung τ_m in kN/m ²
Schneckenbohrverfahren	Löß	25 – 75
	Mittelplastischer Ton	20 – 30
	Steifer Ton	40 – 60
	Toniger Schluff	40 – 100
	Kalkhaltiger sandiger Ton	90 – 140
	Schluffiger Sand	15 – 20
Drehbohrverfahren	Kalk	300 – 400
	Dolomit	400 – 600
	Verwitterter Sandstein	200 – 300
	Verwitterter Schiefer	100 – 150
	Basalt	500 – 600
	Schluffiger Sand	100 – 150
	Schluff	60 – 75

Anhang C – Ergebnisse GGU-STABILITY

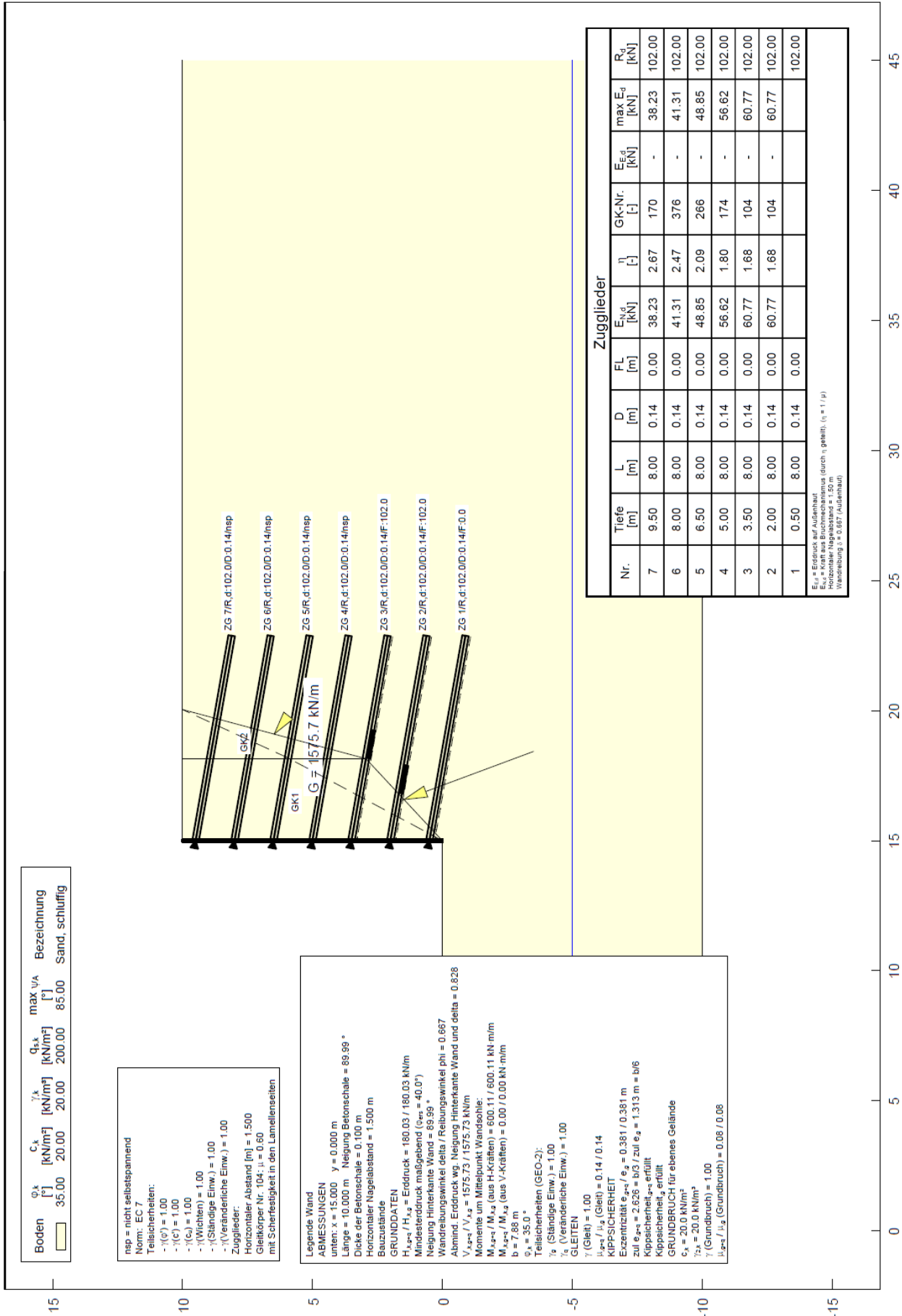
1. Musternagelwand

- 1.a) Blockgleitmethode
- 1.b) Starrkörper-Bruchmechanismus
- 1.c) Janbu
- 1.d) Bishop

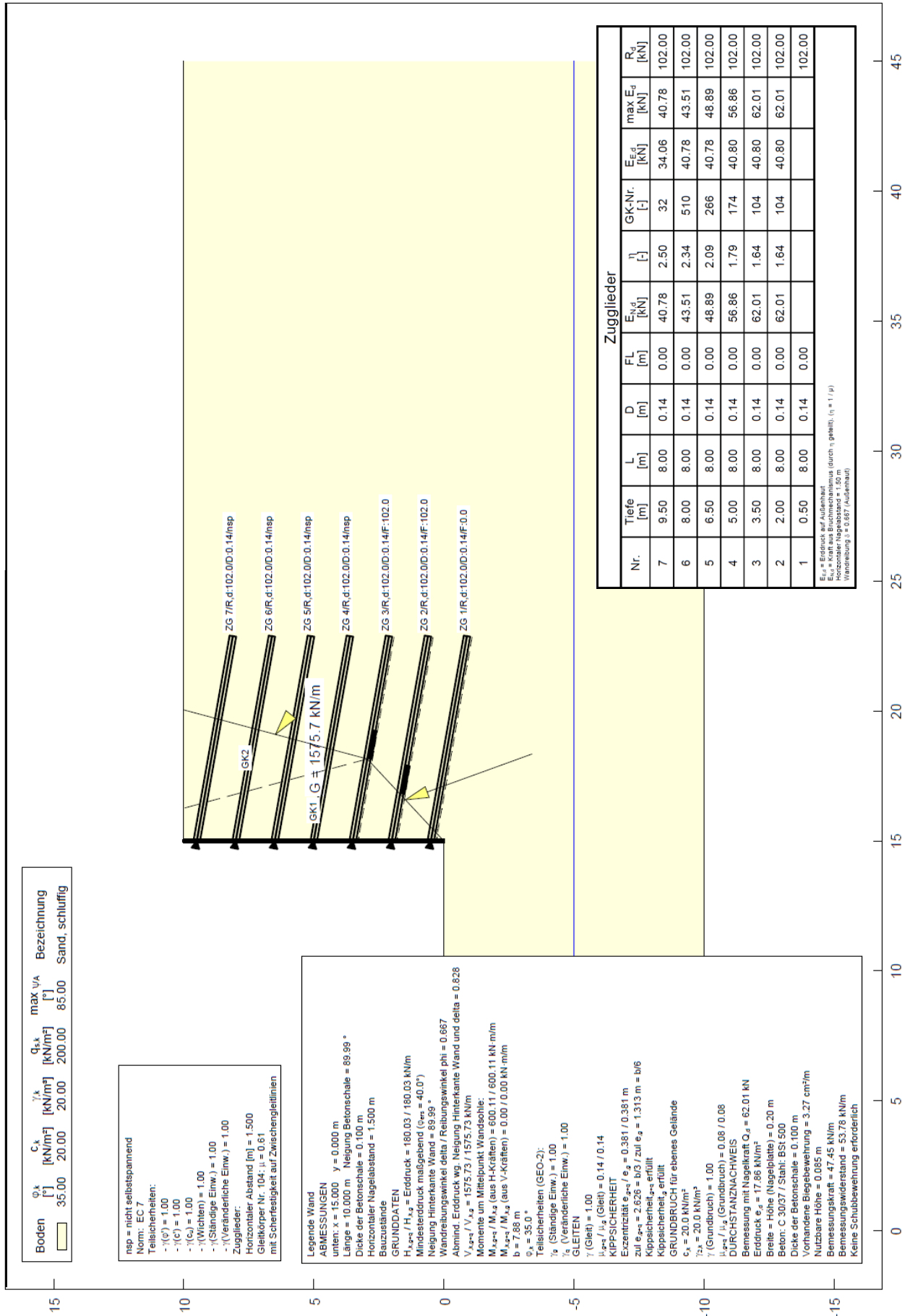
2. Bella Vita, Bratislava

- 2.a) Blockgleitmethode
- 2.b) Starrkörper-Bruchmechanismus
- 2.c) Janbu
- 2.d) Bishop

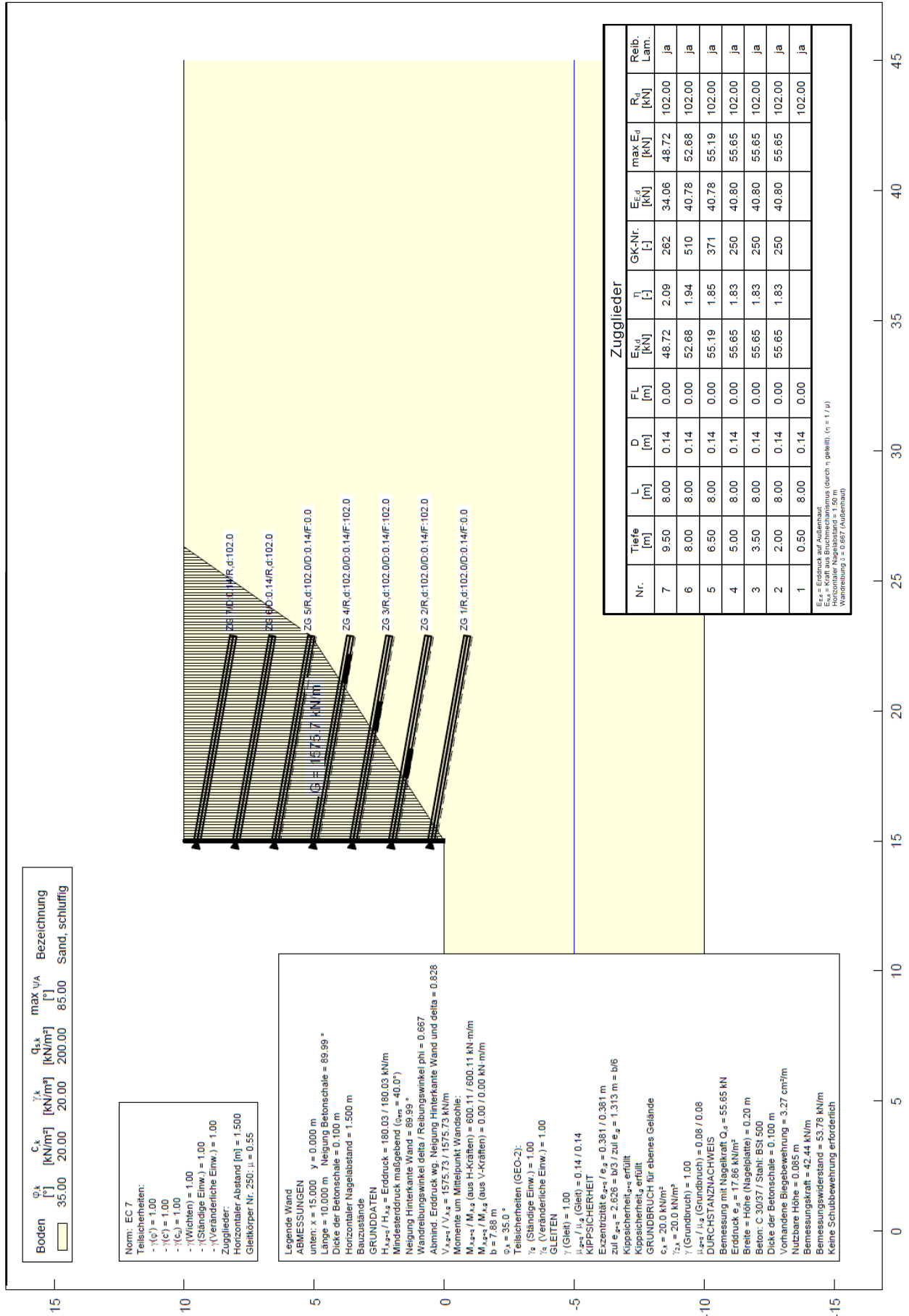
1.a) Musternagelwand - Blockgleitmethode



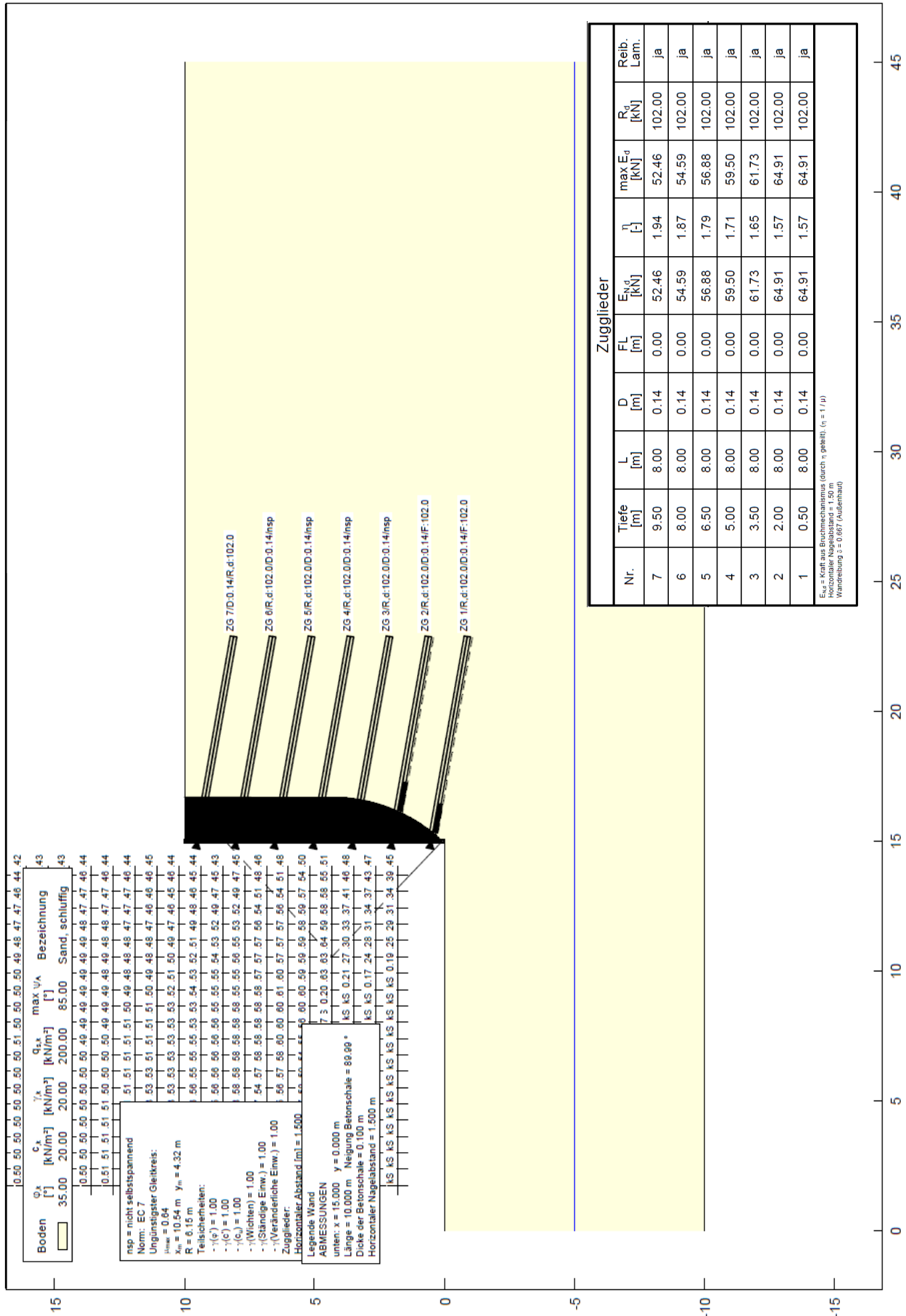
1.b) Musternagelwand – Starrkörper-Bruchmechanismus



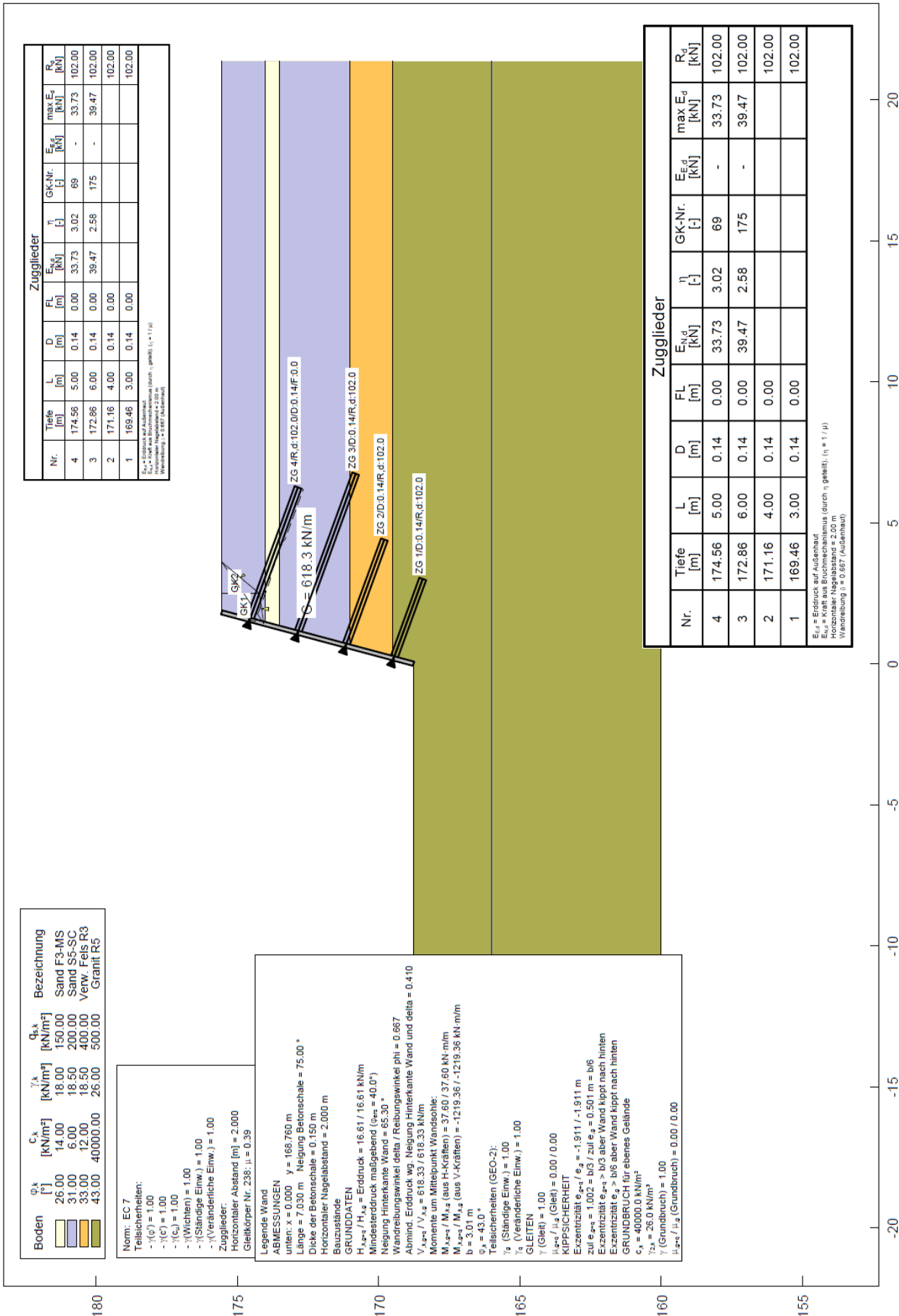
1.c) Musternagelwand – JANBU



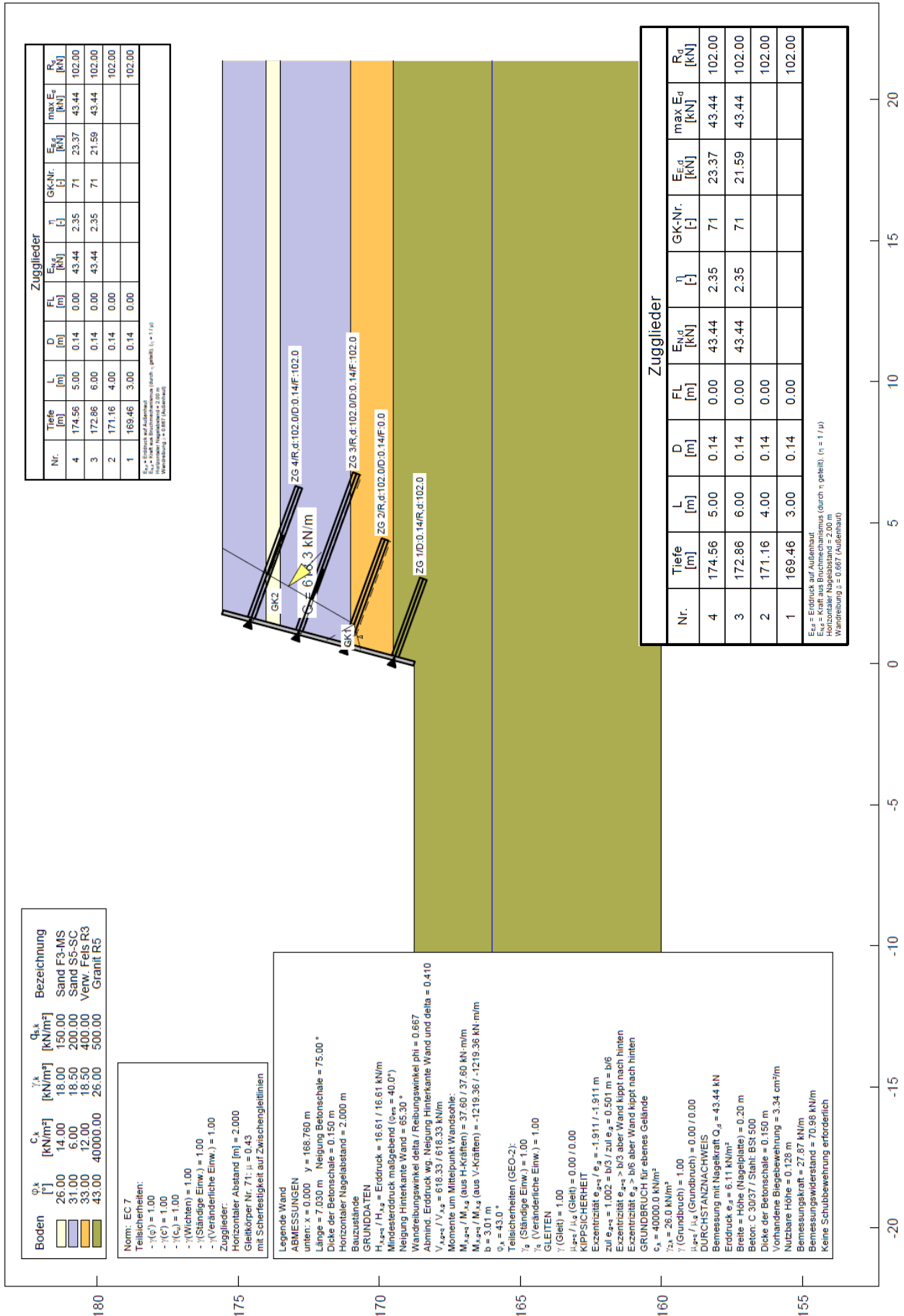
1.d) Musternagelwand – BISHOP



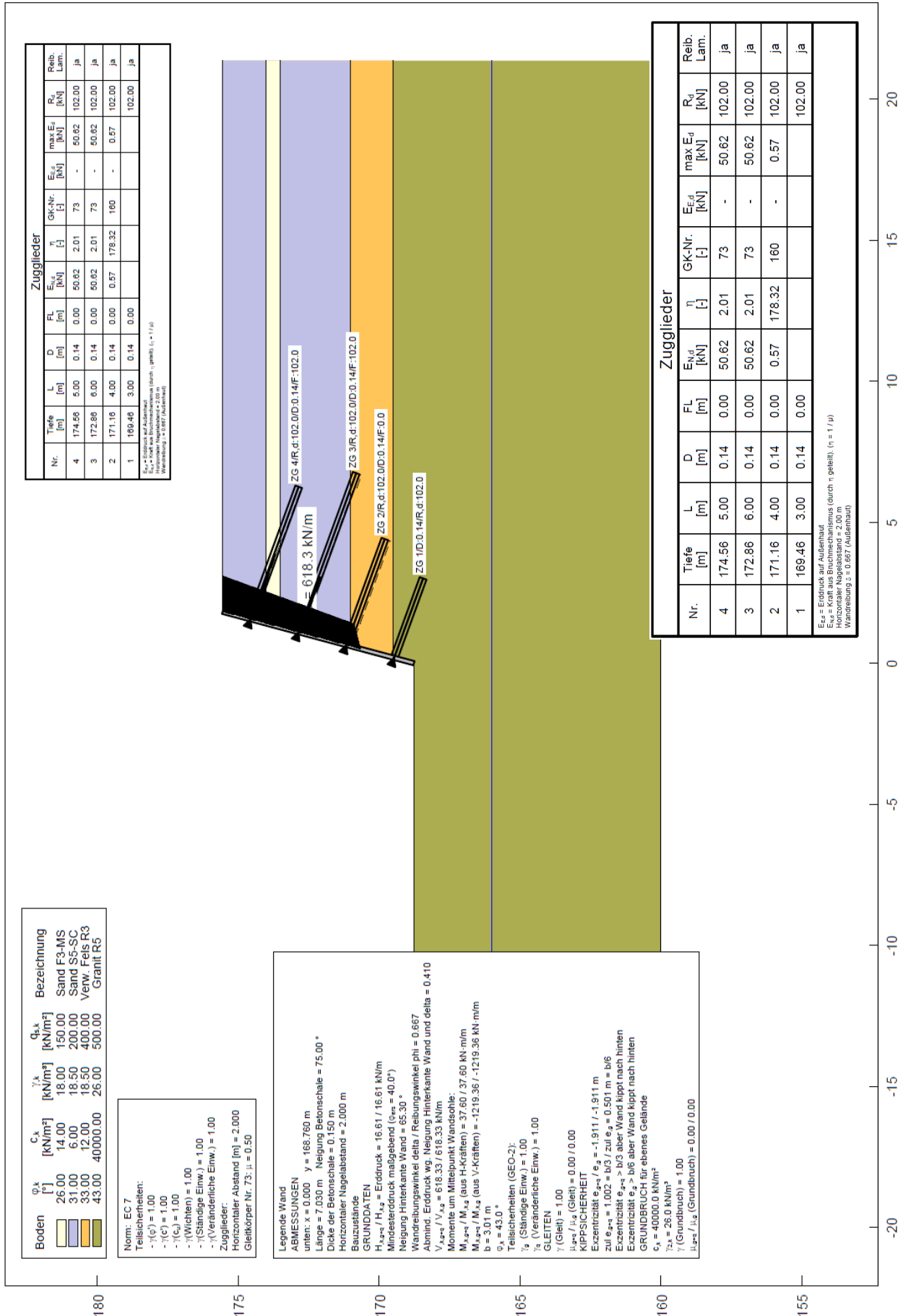
2.a) Bella Vita – Blockgleitmethode



2.b) Bella Vita – Starrkörper-Bruchmechanismus



2.c) Bella Vita – JANBU



2.d) Bella Vita – BISHOP

