



Paul Lehner, BSc

# **UNTERSUCHUNGEN ZUM TRAGVERHALTEN VON BODENNÄGEL**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

## **Statutory declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....

.....  
(signature)

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Freunden und Studienkollegen bedanken, die mich während meiner Ausbildungszeit und bei der Anfertigung meiner Masterarbeit tatkräftig unterstützt haben.

Vorrangig gebührt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte für die hervorragende Betreuung meiner Arbeit und die vielen spannenden, konstruktiven Diskussionen. Ebenso bedanke ich mich recht herzlich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Tschuchnigg, der sich immer für mich Zeit genommen hat und mir bei Problemen und bei der Fehlersuche im FEM-Programm Plaxis sehr behilflich war.

Sehr bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei meiner Freundin Eva Reichenberger für die mentale Unterstützung während meiner gesamten Studienzeit und im Endspurt meiner Arbeit.

Besonderer Dank gebührt ebenso meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben und die mich mit finanziellen Mitteln und dem Rückhalt in jeder Lebenslage immer unterstützen.

Danke!

## Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wird das Tragverhalten von Bodennägeln eingehend untersucht. Bodenvernagelungen werden häufig als Stütz- oder Sicherungsmaßnahmen bei Böschungen oder Geländesprüngen eingesetzt. Baupraktisch werden die Nägel rasterförmig mit gleicher Neigung in den Boden eingebracht. Dadurch entsteht eine Gruppenwirkung und es bildet sich eine Art monolithischer Stützkörper aus.

Nach einer detaillierten Literaturrecherche über Bodennägel werden in weiterer Folge Bemessungsansätze zur Dimensionierung von Bodenvernagelungen verglichen. Auch das Verbundverhalten zwischen Stahlzugglied, Suspensionsmittel und Boden wird analysiert und im Hinblick auf eine Querschnittsoptimierung geprüft.

Der Hauptbestandteil dieser Arbeit beinhaltet die Untersuchung des Gesamttragverhaltens eines vernagelten Bodenkörpers. Es werden unterschiedliche Modelle entwickelt, um eine Bodenvernagelung als Gewichtsmauer betrachten und bemessen zu können. Dies ist im Hinblick auf ein weiteres Forschungsprojekt am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz, bei dem das Stahlzugglied durch einen Holznagel ersetzt werden soll, von großer Bedeutung.

Mit Hilfe einer abgeänderten Anordnung der Bodennägel wird eine günstige Beanspruchung dieser angestrebt. Zudem werden mit den Bemessungsprogrammen Slide und GGU-Stability und dem FEM-Programm Plaxis 2D weitere Untersuchungen zum Thema „Tragverhalten der Bodennägel“ angestellt. Eine weitere Betrachtungsweise für eine Bodenvernagelung wird mit einem neu entwickelten Fachwerksmodell im RuckZuck 6.0 ermöglicht. Mit der Bemessung einer Nagelwand nach Eurocode 7 werden die Untersuchungen abgeschlossen.

Die erworbenen Kenntnisse über die Bodenvernagelung werden genutzt, um ein verbessertes Bemessungsmodell zu entwickeln. Ziel dieses Modells ist eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, woraus sich ein ressourcenschonender Einsatz dieser Konstruktionsmöglichkeit ergeben soll.

Schlagwörter: Tragverhalten, Bodennagel, Gewichtskörper, Holznagel, Fachwerksmodell, Grundbau

## **Abstract**

This master's thesis deals with the load-bearing behavior of soil nailing. In many cases, soil nailings are used to stabilize landslides or excavations. In general, the nails are installed into the ground in form of a grid-shaped array with the same inclination. The result is a group interaction between the nails, forming a kind of a monolithic body.

After a detailed literature research regarding soil nails, the work compares different approaches for the design of a soil nailing structure. Furthermore the bond behavior between nail, concrete and soil will be analysed with regard to optimize the suspension body.

The main part of this thesis contains the investigation of the overall load-bearing behavior of the nailed soil body. Different models will be developed to analyse a soil nail structure as a gravity dam and to be able to design it. This is important for another research project at the Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering at the Technical University of Graz, in which the steel tendon shall be replaced with a wooden tendon.

By means of a modified arrangement of the nails, a favorable stress on the nails will be purposed. In addition to that, further investigations for the structural behavior of soil nails are made with the design programs Slide and GGU-Stability and the FE-program Plaxis 2D. Another point of view for soil nails becomes possible with a new framework model in RuckZuck 6. Finally, a complete assessment of a soil nail structure according to the Eurocode 7 completes the research.

The knowledge acquired is used to improve the design modes for soil nails, with the goal to increase efficiency and consequently lead to a more ressource-saving use of this technique.

Keywords: load-bearing behavior, soil nailing, gravity dam, wooden nail, framework model, soil engineering

# Inhalt

1	Einleitung .....	1
2	Bodenvernagelung .....	2
2.1	Allgemein .....	2
2.1.1	Herstellung.....	3
2.1.2	Tragverhalten.....	4
2.2	Nageleinbau (ÖNorm EN 14490, 2010).....	5
2.2.1	Rammen .....	5
2.2.2	Bohren .....	5
2.3	Vernagelungssysteme.....	6
2.3.1	Dywidag - Systems International (DSI).....	8
2.3.2	Ischebeck - Verpresspfahl TITAN (Friedr. Ischebeck GmbH, 2014) .....	13
2.3.3	ANP - Systems GmbH (ANP Systems GmbH, 2015) .....	16
2.3.4	Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG (SAH - Stahlwerk Annahütte) .....	20
2.3.5	BBV Systems (BBV Systems GmbH, 2015) .....	21
2.3.6	Spinnanker (Spinnanker GmbH, 2015).....	22
2.3.7	Soil Nail Launcher™ (GSI - GeoStabilisation International, 2015) .....	25
2.4	Frontausbildung .....	27
2.5	Dauerhaftigkeit von Bodenvernagelungen.....	30
2.5.1	Temporärnagel.....	30
2.5.2	Permanentnagel.....	30
2.5.3	Entwässerung .....	30
2.5.4	Nagelprüfung .....	32
2.6	Berechnungsverfahren.....	36
2.6.1	Ansatz nach Gässler .....	36
2.6.2	Ansatz nach Bishop .....	44
2.6.3	Ansatz nach Bang.....	45
2.6.4	Ansatz nach Janbu.....	49

2.6.5	Vergleich der Ansätze .....	51
2.7	Verbundverhalten von Nagel, Suspension und Boden .....	62
2.7.1	Bodennagel aus Stahl .....	64
2.7.2	Bodennagel aus Holz .....	66
3	Feuchtegehalt im Boden .....	70
3.1	Ofentrocknung .....	70
3.2	Mikrowellentrocknung .....	71
3.3	Calciumcarbid Verfahren.....	71
4	Ingenieurbiologie.....	72
4.1	Allgemein .....	72
4.2	Sicherungsmethoden .....	73
4.2.1	Deckbauweise.....	73
4.2.2	Stabilbauweise.....	73
4.2.3	Kombination .....	74
4.3	Bodenfestigkeitserhöhung durch Pflanzen .....	75
5	Untersuchung von Geländesprüngen .....	79
5.1	PLAXIS 2D.....	79
5.1.1	Berechnung des Körpers mit linear-elastischem Stoffgesetz (1. Variante) .....	82
5.1.2	Berechnung des Körpers mit Mohr-Coulomb'schen Stoffgesetz (2. Variante) .....	84
5.1.3	Probleme bei der Berechnung.....	85
5.1.4	Interpretation der Ergebnisse .....	87
5.2	Fachwerkmodelle .....	88
5.2.1	Fachwerkmodellbildung.....	88
5.2.2	Vergleich von Slide und Fachwerkmodell (RuckZuck) .....	89
5.2.3	Vergleich von Gässler Feldversuch mit dem Fachwerkmodell (RuckZuck) .....	99
6	Bemessung einer Nagelwand nach Eurocode 7 .....	102
6.1	Nachweise für den Grenzzustand der Tragsicherheit (ULS) .....	103

6.1.1	Gleitsicherheit (Nachweisverfahren 2).....	103
6.1.2	Kippsicherheit (Nachweisverfahren 2).....	103
6.1.3	Nachweis der Grundbruchsicherheit (Nachweisverfahren 2) .....	104
6.1.4	Nachweis der Gesamtstandsicherheit (Nachweisverfahren 3).....	104
6.1.5	Äußere Tragfähigkeit.....	105
6.1.5.1	Berechnung mit Gässler T2 (Nachweisverfahren 2).....	106
6.1.5.2	Berechnung mit Slide 6.0 (Nachweisverfahren 2) .....	109
6.1.6	Innere Tragfähigkeit .....	111
6.1.7	Nachweis der Außenhaut .....	112
6.2	Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS).....	112
7	Zusammenfassung.....	113
8	Literaturverzeichnis .....	115
9	Anhang.....	118

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Beanspruchung des Nagels (Marte & Supp, 2014).....	2
Abb. 2	Unterschiedliche Bodenvernagelungsarten (Witt, K.J., 2009) .....	3
Abb. 3	Arbeitsschritte bei einer Nagelwand (Witt, K.J., 2009) .....	3
Abb. 4	Schematische Darstellung des Tragverhaltens der Bodenvernagelung .....	5
Abb. 5	Dauernagel (Dywidag-Systems International, 2015).....	8
Abb. 6	Kurzzeitnagel (Dywidag-Systems International, 2015).....	9
Abb. 7	Drill Hohlstabnagel beim Einbau .....	10
Abb. 8	Drill Hohlstabnagel .....	11
Abb. 9	GFK Typen.....	11
Abb. 10	Direktbohren .....	13
Abb. 11	Nagelverpressung .....	14
Abb. 12	a) freigelegter Nagel und b) Querschnitt vom Bodennagel.....	14
Abb. 13	Hohlstabnägel.....	16
Abb. 14	Vollstabnägel.....	18
Abb. 15	SAS Bodennagel: a) Kurzzeitnagel (SCP) und b) Dauernagel (DCP) .....	20
Abb. 16	Kurzzeitnagel.....	21
Abb. 17	Dauernagel.....	21
Abb. 18	Spinnankersystem .....	22
Abb. 19	Spinnankermontagehilfe .....	23
Abb. 20	Beispiel für die übertragbaren Lasten des Spinnankers (Spinnanker GmbH, 2015) .....	24
Abb. 21	Soil Nail Launcher™ .....	25
Abb. 22	Starre Frontausbildung (ÖNorm EN 14490, 2010) .....	28
Abb. 23	Sicherung bestehender Stützbauwerke (ÖNorm EN 14490, 2010) .....	28
Abb. 24	Nagelkopf von a) Kurzzeitnagel und b) Dauernagel (BBV Systems GmbH, 2015) .....	29
Abb. 25	Varianten der Oberflächenentwässerung (ÖNorm EN 14490, 2010).....	31
Abb. 26	Entwässerungsvariation der Frontausbildung .....	31
Abb. 27	Unterirdische Drainage mit Drainagenagel (ÖNorm EN 14490, 2010) .....	32
Abb. 28	Schematische Darstellung einer Nagelprüfung (ÖNorm EN 14490, 2010) .....	33
Abb. 29	Prüfvorgang mit einem Lastzyklus ( $\Delta$ einer Be- und Entlastung) (Marte & Supp, 2014).....	35
Abb. 30	Regelprofil eines Geländesprung nach Gässler (Renk, 2011).....	37
Abb. 31	Translation mit einem Bruchkörper (Haas, 2004) .....	38
Abb. 32	Translation mit zwei Bruchkörpern (Gässler, 1987).....	39

Abb. 33	Vereinfachung: Translation mit zwei Bruchkörpern (Gässler, 1987).....	40
Abb. 34	Rotation mit einem Bruchkörper.....	41
Abb. 35	Kräfte am System (links) und Krafteck (rechts) bei ROT-I.....	42
Abb. 36	Kräfte am System (links) und Krafteck (rechts) bei ROT-II.....	43
Abb. 37	Kräfte am System nach Bishop (Renk, 2011) .....	45
Abb. 38	Gleitfugen nach Bang $a$ verläuft durch Verbundkörper Boden-Nagel und dem Boden $b$ verläuft ausschließlich im Verbundkörper .....	46
Abb. 39	Bruchkörper in zwei Lamellen geteilt und entsprechende Kräfte angesetzt	47
Abb. 40	Geometrische Bezeichnung zur Berechnung von $\sigma_n(i)$ .....	48
Abb. 41	An einer Lamelle angreifenden Kräfte.....	49
Abb. 42	Regelquerschnitt der Bodenvernagelung für den Vergleich der Ansätze....	52
Abb. 43	Fixierte Bruchfiguren für a) Gässler T1 b) Gässler T2 c) Gässler R1 .....	52
Abb. 44	Bruchfigur nach Gässler T1 .....	53
Abb. 45	Bruchfigur nach Gässler T1 mit Slide untersucht .....	53
Abb. 46	Bruchfigur nach Gässler T1 mit GGU untersucht .....	54
Abb. 47	Bruchfigur nach Gässler T2 .....	54
Abb. 48	Bruchfigur nach Gässler T2 mit Slide untersucht .....	55
Abb. 49	Bruchfigur nach Gässler T2 mit GGU untersucht .....	55
Abb. 50	Bruchfigur nach Gässler R1 .....	56
Abb. 51	Gässler R1 Berechnungshilfe .....	56
Abb. 52	Bruchfigur nach Gässler R1 mit Slide untersucht.....	57
Abb. 53	Bruchfigur nach Gässler R1 mit GGU untersucht.....	57
Abb. 54	Gleitkreis nach Bishop mit Slide untersucht .....	58
Abb. 55	Gleitkreis nach Bishop mit GGU untersucht.....	58
Abb. 56	Bruchfigur nach Janbu mit Slide untersucht.....	59
Abb. 57	Bruchfigur nach Janbu mit GGU untersucht.....	59
Abb. 58	Ausbreitung der durch Verbund eingeleiteten Druckspannungen; Sprenggrissbildung (Zilch & Zehetmaier, 2006) .....	62
Abb. 59	Verbundmechanismus im Stahlbetonbau (Zilch & Zehetmaier, 2006) .....	63
Abb. 60	Verbesserung des Verbundes zwischen Holz und Beton .....	63
Abb. 61	Verbundverhalten Bambus im Beton (Azadeh & Hassan Haji, 2014) .....	65
Abb. 62	Bemessungsmodell und Normalkraftverlauf für einen Bodennagel aus Stahl .....	65
Abb. 63	Verbundverhalten eines glatten Holznagels (Azadeh & Hassan Haji, 2014) . .....	67
Abb. 64	Bemessungsmodell und Normalkraftverlauf für einen Bodennagel aus Holz .....	68

Abb. 65	Calciumcarbid Drucktestset (Mobile CAD Surveying, 2015).....	71
Abb. 66	Deckbauweise (Adam, D., 2010) .....	73
Abb. 67	Stabilbauweise mit lebenden Flechtzäunen (Adam, D., 2010) .....	73
Abb. 68	Stabilbauweise mit Riefenbau (links) oder Hangfaschinen (rechts) (Adam, D., 2010) .....	74
Abb. 69	Begrünte Krainerwand (links) und bewehrte Erde (rechts) (Adam, D., 2010) .....	74
Abb. 70	Versagensmöglichkeiten der Wurzel (Tobias, 2003).....	75
Abb. 71	Zugversuch von Wurzeln in Abhängigkeit des Durchmessers (Katzenbach & Werner, 2007).....	76
Abb. 72	Wurzel beim Einbau und nach dem Abscheren (Katzenbach & Werner, 2007) .....	77
Abb. 73	Ergebnis der Scherfestigkeit an Ahorn- und Birkenpflanzen nach 1 und 2 Vegetationsperioden (Katzenbach & Werner, 2007) .....	77
Abb. 74	Modellabmessungen für Plaxis .....	80
Abb. 75	a) unerwünschtes und b) erwünschtes Versagensbild .....	82
Abb. 76	V1: totale Verschiebung I <sub>ul</sub> des 2.5 Modells (5-fache Skalierung) .....	82
Abb. 77	V1: inkrementelle deviatorische Dehnung des 2.5 Modells .....	83
Abb. 78	Einfluss der Wichte auf die Sicherheit.....	83
Abb. 79	V2: totale Verschiebung I <sub>ul</sub> des 2.5 Modells (5-fache Skalierung) .....	84
Abb. 80	V2: inkrementelle deviatorische Dehnung des 2.5 Modells .....	85
Abb. 81	Unterschied a) normal load control und b) Arc-length control.....	85
Abb. 82	a) Totale Verschiebung I <sub>ul</sub> und b) Plastische Punkte.....	86
Abb. 83	a) Totale Verschiebung I <sub>ul</sub> und b) Plastische Punkte.....	86
Abb. 84	a) Lastfall Eigengewicht und b) Lastfall Erddruck.....	89
Abb. 85	Entwurfsskizzen der Fachwerkmodelle .....	90
Abb. 86	Vergleich 1. Modell (Slide) mit Fachwerkmodell (RuckZuck).....	91
Abb. 87	Vergleich 7. Modell (Slide) mit Fachwerkmodell (RuckZuck).....	91
Abb. 88	Reduktionsvergleich .....	92
Abb. 89	1. und 4. Aushubschritt mit Zwangspunkt und Ansatz nach Bishop .....	93
Abb. 90	1. Modell mit 4,0m a) Aushubschritte in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräfte .....	95
Abb. 91	1. Modell mit 2,5 m a) Aushubschritte in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräften .....	96
Abb. 92	7. Modell mit 4,0 m a) 4. Aushubschritt in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräften .....	97

Abb. 93	7. Modell mit 2,5 m a) 4. Aushubschritt in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräften .....	98
Abb. 94	Großversuch A, B und C von Gässler (Gässler, 1987).....	99
Abb. 95	Schnitt und Ansicht von Großversuch B (Gässler, 1987) .....	99
Abb. 96	a) Lastfall Eigengewicht und b) Lastfall Erddruck.....	100
Abb. 97	Gegenüberstellung der Nagelkräfte von Gässler (links) und Fachwerkmodell (rechts) .....	101
Abb. 98	Regelquerschnitt der Bodenvernagelung für den Vergleich der Ansätze..	102
Abb. 99	Nachweis der Gleitsicherheit (RVS 09.01.41, 2013) .....	103
Abb. 100	Beispiel einer maßgebenden Geometrie für einen Grundbruchnachweis .. .....	104
Abb. 101	Gesamtstandsicherheit mit Slide 6.0 .....	105
Abb. 102	Normaler Ansatz von Gässler T2 .....	106
Abb. 103	Vereinfachung mit aktivem Erddruck.....	107
Abb. 104	Ungünstigste Bruchfigur zur Ermittlung der mobilisierten Mantelreibung ... .....	108
Abb. 105	Berechnungsergebnisse von Slide .....	109

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht der Nagelsysteme .....	7
Tab. 2	GEWI Bodennagel / Felsbolzen, Gewindestahl B500B & S555/700 (Dywidag-Systems International, 2015).....	8
Tab. 3	GEWI Plus-Bodennagel, Gewindestahl S670/800 (Dywidag-Systems International, 2015) .....	9
Tab. 4	Drill Hohlstabnagel .....	10
Tab. 5	GFK-Stäbe Typ CS, CH und CR .....	12
Tab. 6	GFK Rund- und Flachstäbe Typ MN .....	12
Tab. 7	Ischebeck TITAN.....	15
Tab. 8	SHS-Nagel.....	17
Tab. 9	ARI G55 .....	19
Tab. 10	SAS 670 .....	19
Tab. 11	SAS .....	20
Tab. 12	BBV-Bodennägel.....	21
Tab. 13	Daten und Fakten des Soil Nail Launcher™.....	26
Tab. 14	Zubehör für den Soil Nail Launcher™ .....	26
Tab. 15	Festlegung der Bodennagellastprüfung (ÖNorm EN 14490, 2010) .....	34
Tab. 16	Gegenüberstellung der Prüfverfahren (Marte & Supp, 2014) .....	35
Tab. 17	Kenngrößen des Regelprofils (Gässler, 1987) .....	37
Tab. 18	Boden- und Nagelparameter.....	51
Tab. 19	Vergleich der Sicherheiten der verschiedenen Ansätze .....	61
Tab. 20	Geometrie und Eigenschaft der Nagelwand.....	64
Tab. 21	Angaben zum Stahlnagel.....	65
Tab. 22	Nachweis des Stahlnagels.....	66
Tab. 23	Bemessungswerte der Verbundspannung $f_{bd}$ in N/mm <sup>2</sup> (Lohmeyer, 1994).. .....	67
Tab. 24	Nachweis des Holznagels.....	69
Tab. 25	Mindestmenge der Probe (ÖNORM B 4410:2009).....	70
Tab. 26	Bodenparameter.....	80
Tab. 27	Eingabeparameter in Plaxis 2D .....	80
Tab. 28	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Plaxis .....	87
Tab. 29	Eingabeparameter für die Stäbe der Fachwerke.....	90
Tab. 30	Boden- und Nagelparameter.....	91
Tab. 31	Nagelkräfte des 1. Modells (4,0 m) aus Slide-Iteration.....	95
Tab. 32	Nagelkräfte des 1. Modells (2,5 m) aus Slide-Iteration.....	96

Tab. 33	Nagelkräfte des 7. Modells (4 m) aus Slide-Iteration.....	97
Tab. 34	Nagelkräfte des 7. Modells (2,5 m) aus Slide-Iteration.....	98
Tab. 35	Bodenparameter.....	99
Tab. 36	Eingabeparameter für die Stäbe der Fachwerke.....	100
Tab. 37	Boden- und Nagelparameter.....	102
Tab. 38	Teilsicherheitsbeiwerte für Bodenkenngrößen ( $\gamma_M$ ) (ÖNORM B 1997-1-1:2013, 2013) .....	104
Tab. 39	Nagelangaben .....	111

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Große Buchstaben

$C$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Kohäsion des Bodens
$E'$	[MPa]	Steifemodul des Bodens
$E_a$	[kN]	Aktiver Erddruck
$G$	[kN]	Eigengewicht
$M_{sf}$	[-]	Standsicherheit in Plaxis 2D
$P$	[kN]	Auflast
$Q$	[kN]	Rückhaltende Kraft
$T_m$	[kN/m]	Grenzscherkraft zwischen Nagel und Boden pro Längeneinheit axial
$Z_g$	[kN]	Grenzzugkraft
$Z_{vorh}$	[kN]	Vorhandene Nagelzugkraft

## Kleine Buchstaben

$a$	[m]	Verbundlänge des Nagels
$c$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Kohäsion des Bodens
$h$	[m]	Wandhöhe
$t$	[m]	horizontaler Nagelabstand

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	[°]	Wandneigung zur Vertikalen
$\beta$	[°]	Geländeneigung an der Oberseite eines Geländesprungs
$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte des Bodens
$\delta$	[°]	Wandreibungswinkel
$\varepsilon$	[°]	Nagelneigung zur Horizontalen
$\eta$	[-]	Standsicherheitszahl
$\vartheta$	[°]	Neigung der Gleitfuge
$\mu$	[-]	Ausnutzungsgrad
$\nu'$	[-]	Poissonzahl
$\tau_m$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Mantelreibung zwischen Nagel und Boden
$\varphi$	[°]	Innerer Reibungswinkel des Bodens

## Abkürzungen

FEM	Finite Elemente Methode
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff

# 1 Einleitung

Bodenvernagelungen kommen häufig bei instabilen Böschungen oder Baugrubensicherungen in feinkörnigen Böden zum Einsatz. In Österreich können diese als permanente, semipermanente oder temporäre Sicherungen ausgeführt werden. Für temporäre Systeme wurden am Institut für Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Graz Untersuchungen mit Bambus und Buchenholz für Bodennägel begonnen (Ellmaier, 2014). Dabei wurden die in der Regel verwendeten Stahlnägel durch Holznägel ersetzt, welche in der Verwendung ökologischer und unter bestimmten Randbedingungen auch wirtschaftlicher sein können. Holz besitzt jedoch im Vergleich zu Stahl eine sehr geringe Scherfestigkeit. Aus diesem Grund ist mit den derzeitigen Bemessungsansätzen eine Bodenvernagelung aus Holz nicht ausreichend sicher nachweisbar. Es ist davon auszugehen, dass die maßgebenden Gleitfugen, die die Nägel schneiden eine Scherbeanspruchung dieser bewirken. Das Institut für Bodenmechanik und Grundbau untersucht ein neues Bemessungsmodell, bei dem der gesamte vernagelte Boden als eine Art Gewichtskörper betrachtet wird, wobei die Nägel das Verbundverhalten dieses Gewichtskörpers definieren.

In dieser Masterarbeit werden anfangs ausführliche Literaturrecherchen zum Thema Bodenvernagelungen vorgenommen und Geländesprünge mit unterschiedlichen Verfahren untersucht. Es soll zum einen ermöglichen, die Eigenschaften und zugrunde liegenden Annahmen der jetzigen Bemessungsverfahren besser zu verstehen und zum anderen deren Probleme aufzuzeigen. Mit Hilfe des FEM-Programmes Plaxis 2D wird die minimale Breite eines vernagelten Körpers und dessen Standsicherheit berechnet. Diesem Körper wird dabei eine verschmierte erhöhte Kohäsion zugewiesen, um den maßgebenden Versagensmechanismus außerhalb dieses „Verbundkörpers“ (Bereich mit erhöhter Kohäsion) zu erzwingen. Um diesen Gewichtskörper in Zukunft mit Nägel modellieren und bemessen zu können, erfolgt in einem weiteren Untersuchungsschritt unter Anwendung eines Fachwerkmodells die vereinfachte Betrachtung des Körpers mit Druck- und Zugstäben. Dazu werden mehrere Vergleiche angestellt.

Diese Arbeit soll eine umfangreiche Basis für weitere Untersuchungen in Bezug auf das Tragverhalten von Bodenvernagelungen bilden. Mit den bisher erworbenen Kenntnissen soll in Zukunft mit Hilfe weiterer Forschung ein neues, auch für die Praxis anwendbares, Bemessungskonzept für Bodenvernagelungen entwickelt werden.

## 2 Bodenvernagelung

### 2.1 Allgemein

Bodenvernagelungen werden häufig zur Stützung von Böschungen oder Baugruben im Lockergestein, als auch im Fels eingesetzt (Wichter & Meininger, 2000). Mit der Gruppenwirkung der Nägel (Zugglied), welche aus Stahl- oder Kunststoffstäben bestehen und in gebohrten Löchern mit Zementmörtel eingebaut werden, ist es möglich, einen Stützkörper herzustellen. Dabei ist ein nicht allzu großes Nagelraster erforderlich, um das kollektive Wirken der Nägel beziehungsweise einen Verbundkörper zwischen Boden und Nagel sicherzustellen. Bevor der Nagel rein auf Zug beansprucht wird, erfährt dieser im Allgemeinen zu Beginn eine zusätzlich Scherbeanspruchung in der Gleitfuge (siehe Abb. 1). (Witt, K.J., 2009)



Abb. 1 Beanspruchung des Nagels (Marte & Supp, 2014)

Im Anfangsstadium basierte die Dimensionierung von Bodenvernagelungen hauptsächlich auf Erfahrungen. In Europa wurde 1973 die erste Bodenvernagelung einer Steilböschung durchgeführt. Die Firma Bauer Spezialtiefbau startete 1975 mit der Universität Karlsruhe ein Projekt, bei dem die Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit der Bodenvernagelung mit Modell- und Großversuchen bestätigt wurde. (Wichter & Meininger, 2000)

Die Kombination aus Nägel und Spritzbeton mit Bewehrung (am Nagelkopf) nennt man Nagelwand und diese stellt eine gängige Sicherungsmethode im Grundbau da (siehe Abb. 2). Eine Nagelwand hat somit im Allgemeinen drei Hauptbestandteile.

1. Baugrund (Boden oder Fels)
2. Bodennägel (Stahl, Kunststoff oder Holz (Ellmaier, 2014))
3. Sicherung des Bodens an der Vorderseite (Spritzbeton mit Bewehrung, Stahlnetz, Fertigteillemente)

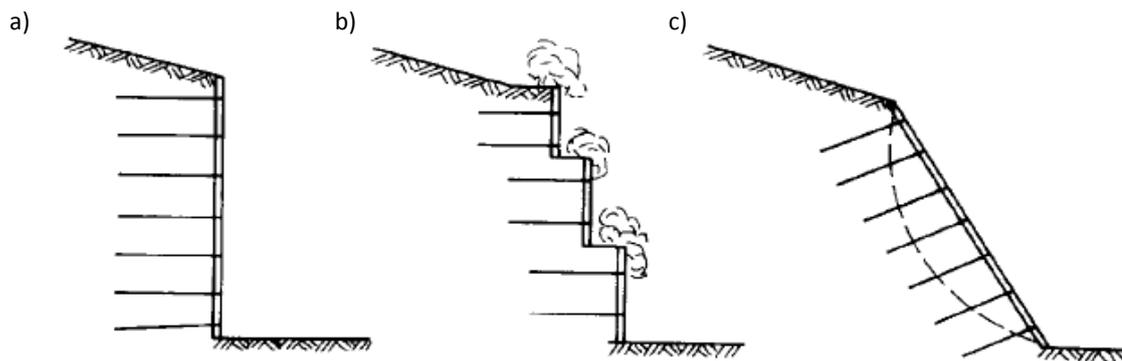


Abb. 2 Unterschiedliche Bodenvernagelungsarten (Witt, K.J., 2009)

In Abb. 2 a) ist eine Baugrubensicherung mittels Nagelwand ersichtlich. Diese Form kann auch abgestuft ausgeführt (Abb. 2 b) oder zur Sicherung einer Rutschung (Abb. 2 c) verwendet werden.

### 2.1.1 Herstellung

Im Vorfeld ist zu klären, ob der Baugrund bei Freilegen des ersten Abschnittes ohne Sicherungsmaßnahmen standsicher ist. Bei sehr lockergelagerten Böden ist dieses Verfahren nicht bzw. nur sehr kostenintensiv durchführbar.

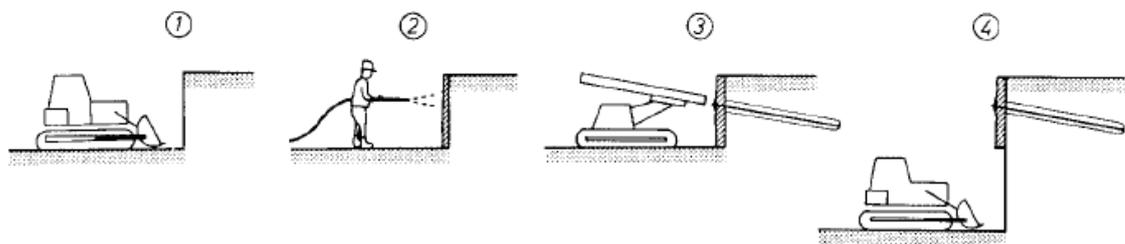


Abb. 3 Arbeitsschritte bei einer Nagelwand (Witt, K.J., 2009)

#### Verfahrensschritte:

##### 1. Baugrubenaushub Tiefe = 1,0 – 1,5 m (ohne Sicherung)

Schrittweise wird von der Geländeoberkante nach unten vorgearbeitet. Wie bereits erwähnt, ist der abschnittsweise Aushub von der Bodenart und den Baugrundverhältnissen abhängig. Je standsicher der freistehende Boden ist, umso größer kann die Aushubhöhe gewählt werden. Um die kollektive Wechselwirkung der Nägel gewährleisten zu können, ist der Abstand des Nagelrasters laut Literatur mit 1,5 m beschränkt. (Witt, K.J., 2009)

### 2. Spritzbetonsicherung (mit oder ohne Bewehrung)

Vor der Spritzbetonaufbringung wird die Bewehrung (Mattenbewehrung) zugeschnitten und am Erdkörper fixiert. Bei einer optimalen Wahl des Nagelrasters ist das Zuschneiden der Bewehrungsmatten nicht notwendig und erspart somit Zeit (Wietek, 2011). Anschließend wird der Spritzbeton aufgebracht. Für temporäre Zwecke beträgt die Spritzbetonschicht (einlagige Bewehrung) zwischen ca. 8 und 15 cm. Wird die Nagelwand für eine dauerhafte Sicherung herangezogen, ist eine Dicke von ca. 15 bis 25 cm (zweilagige Bewehrung) erforderlich. Eine Alternative zum Spritzbeton mit Bewehrung kann auch Faserspritzbeton sein. (Witt, K.J., 2009)

### 3. Nageleinbringen

Für diesen Arbeitsschritt gibt es verschiedene Systeme, welche im Kapitel 2.2 bzw. Kapitel 2.3 genauer behandelt werden. Grundsätzlich kann der Nagel gerammt, gebohrt (verrohrt oder unverrohrt bzw. auch selbstbohrend mit verlorener Bohrkronen) oder gepresst werden. Das Bohrverfahren ohne Verrohrung ist bei einem kohäsiven standfesten Boden möglich. (Wichter & Meininger, 2000)

Nach dem dritten Verfahrensschritt wiederholen sich die Vorgänge. Es besteht auch die Möglichkeit, den dritten Schritt (Nageleinbau) vor dem zweiten Schritt (Spritzbeton) auszuführen.

#### 2.1.2 Tragverhalten

Im Gegensatz zu einem Verpressanker (aktiv vorgespannt) wirken die Zugglieder (nicht oder nur leicht vorgespannt) einer Nagelwand als Gruppe. Das Erdreich zwischen der Vernagelung stützt sich bei ausreichend engem Nagelraster mit Hilfe der Gewölbewirkung am Nagel ab. Im Bereich des Nagelkopfes stützt sich das Erdreich zusätzlich noch gegen die Frontausbildung. Die dadurch auftretenden Nagelkräfte werden hinter der „Gleitfuge“ über Reibung in das Erdreich eingeleitet (in Abb. 4 schematisch dargestellt). (Witt, K.J., 2009)

Um Reibung an den Nägeln mobilisieren zu können, muss sich das System verformen. Das bedeutet, dass es an der Geländeoberfläche zu leichten Setzungen und Rissen kommen kann. Deswegen ist diese Methode bei Baugruben mit angrenzenden Bauwerken unter entsprechender Vorsicht auszuführen.

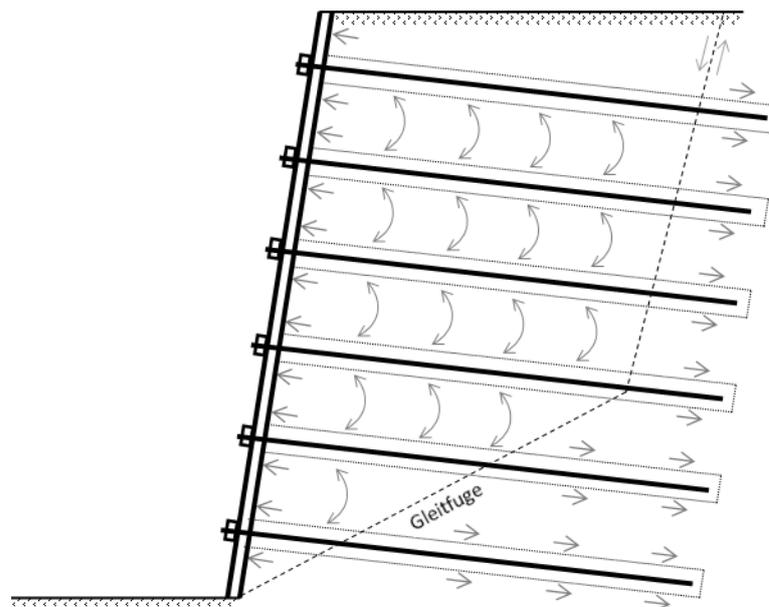


Abb. 4 Schematische Darstellung des Tragverhaltens der Bodenvernagelung

## 2.2 Nageleinbau (ÖNorm EN 14490, 2010)

Ein Nagel kann auf verschiedene Weise in den Baugrund eingebaut werden. Die häufigste Anwendung ist das Einbringen mittels Bohrverfahren.

### 2.2.1 Rammen

Bei einem Rammvorgang kann der Nagel mit Hub- oder Schraubbewegungen und schlagenden, einrüttelnden oder ballistischen Verfahren in den Baugrund eingebracht werden. Dabei ist zu beachten, dass die Steifigkeit des Nagels im Gegensatz zum Erdreich deutlich größer ist, um Probleme beim Rammvorgang zu vermeiden. Ist das nicht der Fall, ist davon auszugehen, dass sich der Nagel verbiegt oder von seiner geplanten Lage abweichen kann. Nach dem Einbau ist die Tragfähigkeit des Nagels sofort gegeben, da der Verbund zwischen Nagel und Erdreich von Beginn an vorliegt.

### 2.2.2 Bohren

Der Nageleinbau mittels Bohrvorgang wird in drei Verfahren unterteilt. Es gibt das Bohren mit oder ohne Verrohrung und den selbstbohrenden Hohlstab-Bodennagel. Bei jedem Einbau wird der Nagel entweder mittels Drehbohr- oder Drehschlagbohrverfahren in den Boden eingebracht. Im Hinblick auf den Korrosionsschutz muss bei jedem Verfahren der festgelegte Nennbohrlochdurchmesser über die gesamte Länge sichergestellt werden, um eine ausreichende Ummantelung des Nagels gewährleisten zu können.

### ***Unverrohrtes Bohren***

Unverrohrte Bohrverfahren werden bei tragfähigen Böden eingesetzt. Das Loch wird während dem Bohren im Allgemeinen mit Druckluft gespült. Bei nicht standsicheren Böden würde das Bohrloch ohne Stützung einbrechen. Aus diesem Grund wird dieses auch mit entsprechenden Stützmedien, wie zum Beispiel Wasser oder Bentonit-suspension gesichert.

### ***Verrohrtes Bohren und Bohren mit Hohlbohrschnecke***

Ist der Boden nicht standsicher, so muss das Bohrloch mit einer Verrohrung gestützt werden. Nach Erreichen der erwünschten Nagellänge wird das Loch mit dem Zementmörtel ausgefüllt und der Nagel eingebracht. Mithilfe von Abstandhaltern wird der Nagel zentrisch im Loch positioniert und anschließend die Verrohrung gezogen.

### ***Selbstbohrender Bodennagel***

Der selbstbohrende Bodennagel besteht aus einem hohlen Bewehrungsstab, an dem eine Bohrkronen befestigt ist. Es wird üblicherweise das Drehschlagbohrverfahren angewendet. Auch in einem nicht standsicheren Boden kann dieser Bodennagel eingebohrt werden, jedoch muss das Bohrloch mit einem Stützmedium gesichert werden. Parallel zum Bohrvorgang wird kontinuierlich mit Bentonitsuspension (oder unter gewissen Umständen mit Wasser oder Luft) das Bohrgut aus dem Bohrloch ausgetragen. Ist die erforderliche Nagellänge erreicht, werden der Nagel mit der verlorenen Bohrkronen und das Bohrloch mit Zementmörtel verfüllt.

Anmerkung: Baupraktisch wird im Allgemeinen die zum Spülen verwendete Zementsuspension auch für die Verfüllung benutzt. Daher gibt es keinen separaten Verfüllvorgang. Eine derartige Vorgehensweise entspricht nicht der Norm, da diese einen  $W/Z^1 \sim 0,5$  für Verfüllungen angibt, mit diesem aber nicht gespült werden kann.

## **2.3 Vernagelungssysteme**

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Systeme einzelner Firmen zusammengefasst und beschrieben. Bis auf den Spinnanker und dem Soil Nail Launcher sind die Herstellprozesse aller Nagelsysteme ähnlich.

---

<sup>1</sup> Der W/Z-Wert definiert das Verhältnis Anmachwasser zu Bindemittel des Betons.

Tab. 1 Übersicht der Nagelsysteme

Firma	Nagel				Dauerhaftigkeit		char. Bruchlast [kN]
	gebohrt	selbstbohrend	ballistisch	vermörtelt	temporär	permanent	
DSI-GEWI **	X			X	X <sup>1</sup>	X <sup>2</sup>	111 ÷ 3534
DSI-Drill Hohlstabnagel *		X		X	X <sup>1</sup>	X <sup>1a</sup>	210 ÷ 1900
DSI-GFK Anker und Felsnagel	X	X		X	X	X	190 ÷ 560
Ischebeck- Verpresspfahl TITAN		X		X	X	X	155 ÷ 2325
ANP- Hohlstabnägel **		X		X	X <sup>3</sup>	X <sup>4</sup>	210 ÷ 800
ANP- Vollstabnägel	X			X	X <sup>5</sup>	X <sup>6</sup>	187 ÷ 3535
SAH- Bodennagel **	X			X	X	X	110 ÷ 2215
BBV Systems	X			X	X	X	111 ÷ 1080
Spinnanker		X <sup>7</sup>			X	X	22 ÷ 200 <sup>8</sup>
GeoStabilisation International			X		X	X	8,9 ÷ 13,4 <sup>9</sup>

\* Nagelsysteme die in Österreich für Bundesstraßen laut BMIVT zugelassen sind. (Horvatits, 2015)  
 \*\* Abgelaufene oder auf Grund der neuen ÖNORM B 1997 -1-1: 2013 nicht mehr gültige Zulassung. (Horvatits, 2015)

<sup>1</sup> bis 2 Jahre  
<sup>1a</sup> erweiterbar bis 50 Jahre nach Absprache (Dywidag-Systems International, 2015)  
<sup>2</sup> 100+ Jahre (Dywidag-Systems International, 2015)  
<sup>3</sup> Kurzzeitnägel: Typ C bis 2 Jahre (ANP Systems GmbH, 2015)  
<sup>4</sup> Semipermanentnägel: Typ A und B blank oder feuerverzinkt bis 50 Jahre (ANP Systems GmbH, 2015)  
<sup>5</sup> Kurzzeitnägel: Typ C bis 2 Jahre; Typ B 2 bis 50 Jahre (ANP Systems GmbH, 2015)  
<sup>6</sup> Dauernägel: Typ A bis 100 Jahre (ANP Systems GmbH, 2015)  
<sup>7</sup> Nagel wird ohne Bohrkronen in den Boden eingedreht  
<sup>8</sup> Bruchlast für einen Anker des Spinnankersystems  
<sup>9</sup> bis zu 10-fach höherer Ausziehewiderstand als gedrückte oder vibrierte Bodennägel (US Department of Agriculture and Transportation, 1994)

Gibt es bei der Dauerhaftigkeit keine Beifügung, sind vom Hersteller keine genauen Zeiten angeführt worden.

### 2.3.1 Dywidag - Systems International (DSI)

Der Dauer- und Kurznagel wird zuerst mit oder ohne Verrohrung gebohrt und anschließend nach Einbringen des Stabes mit Zementmörtel verpresst.

#### **Dauernagel / Permanentnagel** (Dywidag-Systems International, 2015)

Tab. 2 GEWI Bodennagel / Felsbolzen, Gewindestahl B500B & S555/700 (Dywidag-Systems International, 2015)

Nenn-durchmesser $\varnothing$ [mm]	Streckgrenze/ Zugfestigkeit $f_{0,2k}/f_{tk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Querschnitts- fläche A [mm <sup>2</sup> ]	Last an der Streckgrenze $F_{yk}$ [kN]	Bruchlast $F_{tk}$ [kN]	Gewicht [kg/m]	Gewicht DKS [kg/m]	Zulassung
16	500/550	201	101	111	1,58	5,2	○
20	500/550	314	157	173	2,47	5,9	○
25	500/550	491	245	270	3,85	7,0	○
28	500/550	616	308	339	4,83	8,6	○
32	500/550	804	402	442	6,31	9,5	○
40	500/550	1.257	628	691	9,86	13,6	○
50	500/550	1.963	982	1.080	15,41	21,0	○
63,5	555/700	3.167	1.758	2.217	24,86	32,4	○

○ Deutschland: Z-20.1-106 Bodenvernagelung System DYWIDAG  
 X Österreich: BMVIT-327.120/0022-II/ST2/2006 GEWI® Plus-Bodennagel  
 △ Deutschland: Z-20.1-17 DYWIDAG-Dauereinstabanker

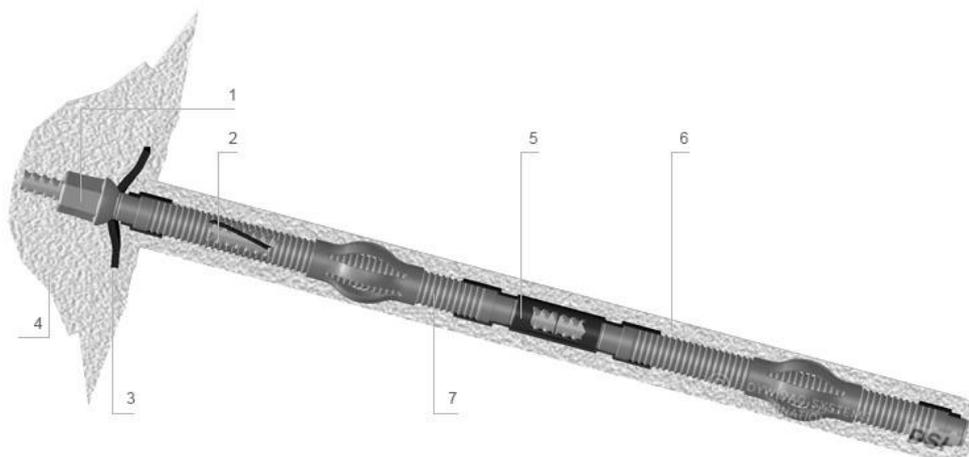


Abb. 5 Dauernagel (Dywidag-Systems International, 2015)

1. Kugelbundmutter
2. GEWI- bzw. GEWI Plus-Gewindestab
3. Kalottenplatte
4. Frontausbildung
5. Muffenverbindung
6. Zementsteinüberbrückung
7. zementverpresstes Ripprohr

**Kurzzeitnagel** (Dywidag-Systems International, 2015)

Tab. 3 GEWI Plus-Bodennagel, Gewindestahl S670/800 (Dywidag-Systems International, 2015)

Nenn-durchmesser $\varnothing$ [mm]	Streckgrenze/ Zugfestigkeit $f_{0,2k}/f_{tk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Querschnitts- fläche A [mm <sup>2</sup> ]	Last an der Streckgrenze $F_{yk}$ [kN]	Bruchlast $F_{tk}$ [kN]	Gewicht [kg/m]	Gewicht DKS [kg/m]	Zulassung
18	670/800	254	170	204	2,00	5,4	×
22	670/800	380	255	304	2,98	6,5	×
25	670/800	491	329	393	3,85	7,0	×
28	670/800	616	413	493	4,83	8,6	×
30	670/800	707	474	565	5,55	9,0	×
35	670/800	962	645	770	7,55	11,3	×
43	670/800	1.452	973	1.162	11,40	15,8	×
57,5	670/800	2.597	1.740	2.077	20,38	30,0	×
63,5	670/800	3.167	2.122	2.534	24,86	32,4	×
75	670/800	4.418	2.960	3.534	34,68	43,5	×

○ Deutschland: Z-20.1-106 Bodenvernagelung System DYWIDAG  
 × Österreich: BMVIT-327.120/0022-II/ST2/2006 GEWI® Plus-Bodennagel  
 △ Deutschland: Z-20.1-17 DYWIDAG-Dauereinstabanker

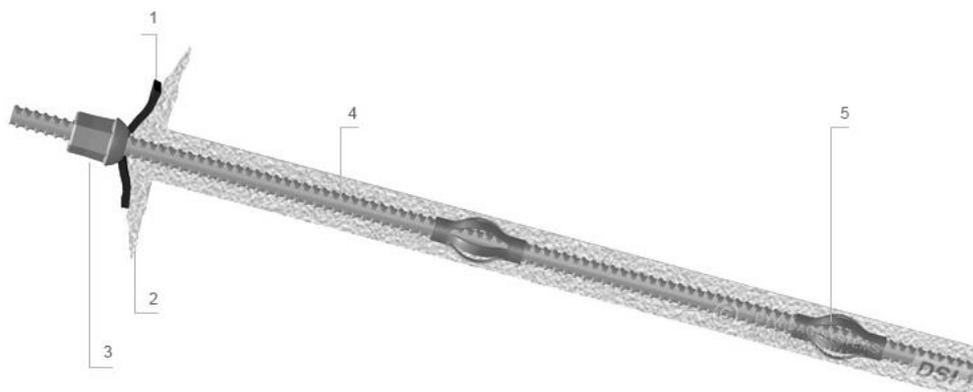


Abb. 6 Kurzzeitnagel (Dywidag-Systems International, 2015)

1. Kalottenplatte
2. Frontausbildung
3. Kugelbundmutter
4. GEWI- bzw. GEWI Plus-Gewindestab
5. Federkorabstandhalter

**Drill Hohlstabnagel** (Dywidag-Systems International, 2015)

Tab. 4 Drill Hohlstabnagel

Typ	Querschnitts- fläche A [mm <sup>2</sup> ]	Last an der Streck- grenze F <sub>yk</sub> [kN]	Bruchlast F <sub>tk</sub> [kN]	Gewicht [kg/m]	Zulassung		
					○	×	△
R32-210 (R32L)	340	160	210	2,65	○	×	△
R32-250	370	190	250	2,90	○	×	△
R32-280 (R32N)	410	220	280	3,20	○	×	△
R32-320	470	250	320	3,70	○	×	△
R32-360 (R32S)	510	280	360	4,00	○	×	△
R32-400	560	330	400	4,40	○	×	△
R38-420	660	350	420	5,15	○	×	△
R38-500 (R38N)	750	400	500	5,85	○	×	△
R38-550	800	450	550	6,25	○	×	△
R51-550 (R51L)	890	450	550	6,95	○	×	△
R51-660	970	540	660	7,65	○	×	△
R51-800 (R51N)	1.150	640	800	9,00	○	×	△
T76-1200 (T76L)	1.610	1.000	1.200	12,60			
T76-1600 (T76N)	1.990	1.200	1.600	15,60			
T76-1900 (T76S)	2.360	1.500	1.900	18,50			

Lieferlängen L = 2/3/4/6 m

○ Deutschland: Z-14.4-674 &amp; Z-34.13-208

× Österreich: BMVIT-327.120/0010-IV/ST2/2012

△ Europa: ETA-12/0603

Dieses Vernagelungssystem ist das einzige selbstbohrende Verfahren der Firma DSI. Wie in Abb. 7 sehr gut ersichtlich, befindet sich am Nagelende eine verlorene Bohrkronen. Eine Zementsuspension wird mittels Bohradapter in den Drill Hohlstab kontinuierlich zum Bohren eingepresst. Nach dem Austreten der Suspension an der Bohrkronen kann anschließend das Bohrgut mittels Rücklauf abtransportiert werden. Mit der Zementsuspension ist es möglich, auch in lockergelagerten, grobkörnigen Böden Nägel einzubringen und somit eine Bohrlochstützung zu gewährleisten. Ist die erforderliche Tiefe erreicht, wird das Bohrloch mit einem Verpressmörtel, welcher eine höhere Druckfestigkeit als die Suspension aufweist, ausgepresst.

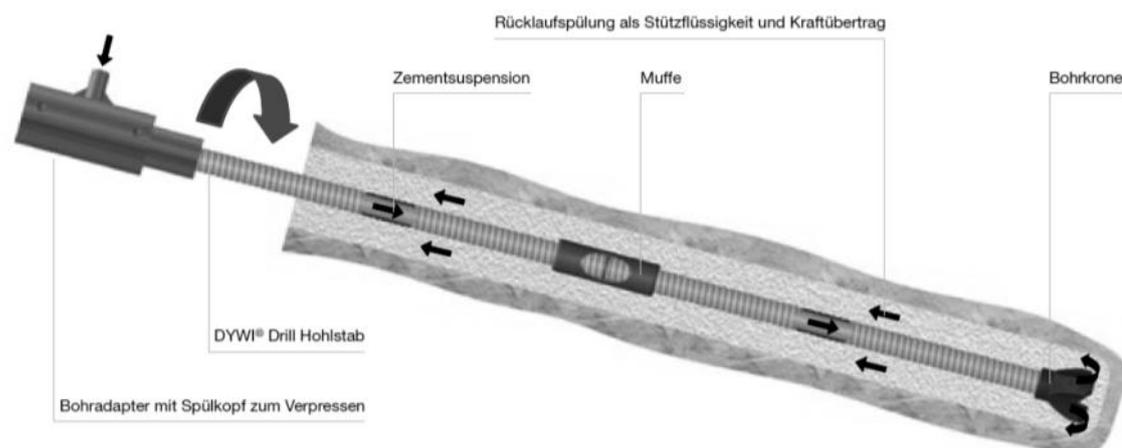


Abb. 7 Drill Hohlstabnagel beim Einbau

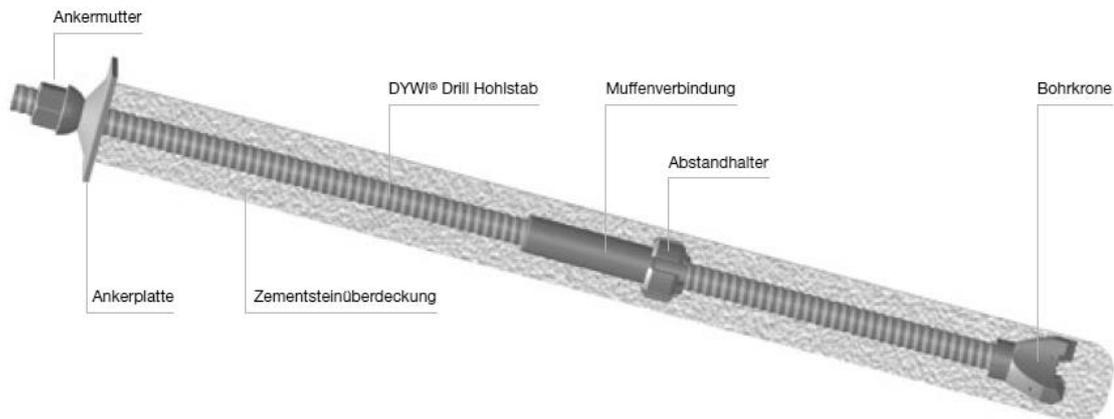


Abb. 8 Drill Hohlstabnagel

### **GFK - Anker und Felsbolzen** (Dywidag-Systems International, 2015)

Glasfaserverstärkte Kunststoffanker (GFK-Anker) und Felsbolzen werden hauptsächlich im Berg- und Tunnelbau verwendet. Bei Hang- oder Baugrubensicherungen ist es ebenfalls möglich, dieses System einzusetzen.

Dywidag hat vier unterschiedliche Arten entwickelt.

- Typ CS: gewindeprofiliertes Vollstab
- Typ CH: gewindeprofiliertes Hohlstab
- Typ CR: Selbstbohr-Hohlstab mit verbesserter Verbundstruktur
- Typ MN: Flach- und Rundstab



Abb. 9 GFK Typen

Bei diesen Varianten sind nicht nur die Nägel, sondern auch die Muttern und die Platten aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Das daraus resultierende geringere Einsatzgewicht erleichtert das Hantieren erheblich. Auch die hohe Zugfestigkeit und die Korrosionsbeständigkeit sowie eine hohe Resistenz gegen aggressive Böden sprechen für eine GFK-Vernagelung. Da glasfaserverstärkter Kunststoff eine hohe Zug- aber eine sehr geringe Querdruckfestigkeit aufweist, ist der Ankerkopf eine Schwachstelle für das System. Es kann in diesem Bereich durch die Kopfplatte oder -mutter zu Quetschungen des Stabes kommen. Auch bei diesem System wird das Bohrloch nach dem Einsetzen des Stabes entweder mit Beton, Zement- bzw. Ankermörtel oder Kunstharz ausgefüllt.

Tab. 5 GFK-Stäbe Typ CS, CH und CR

Nr.	Kennwert / Typ <sup>1)</sup>	Zeichen	Einheit	CS20-190	CS25-350	CS32-560	CH25-250	CH32-350	CR32-340
1	Nenndurchmesser	$D_{a,nom}$	[mm]	20	25	32	25	32	32
2	Nennquerschnitt <sup>2)</sup>	$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	186	346	580	230	340	340
3	Nennmasse <sup>2)</sup>	m	[kg/m]	0,56	0,90	1,30	0,64	0,95	0,95
4	Höchstkraft Stab <sup>3)</sup>	$F_{m,s,nom}$	[kN]	190	350	560	250	350	350
5	Zugfestigkeit Stab <sup>4)</sup>	$R_{m,s,nom}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1.000	1.000	960	1.000	1.000	1.000
6	Dehnung Stab <sup>5)</sup>	$A_{gt}$	[%]	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
7	Scherkraft Stab <sup>5)</sup>	$F_{S,nom}$	[kN]	90	160	230	110	140	140
8	Höchstkraft Stab-Mutter <sup>6)</sup>	$F_{m,n,nom}$	[kN]	–	–	130	–	130	130
9	Höchstkraft Stab-Muffe <sup>6)</sup>	$F_{m,c,nom}$	[kN]	–	–	160	–	160	160
10	Lieferlängen <sup>7)</sup>	L	[m]	1,0 - 6,0	1,0 - 6,0	1,0 - 6,0	1,0 - 6,0	1,0 - 6,0	1,0 - 6,0
11	Farbkennzeichnung Stab	–	–	SCHWARZ	SCHWARZ	SCHWARZ	GRÜN	GRÜN	ROT

1) Stand: 2012-08, Hinweise: Werte unterliegen laufenden Änderungen; andere Dimensionen bzw. Ausführungen sind auf Anfrage erhältlich; systemkonforme Platten laut Herstellerinformation

2) Charakteristischer Fraktilwert

3) Errechnet aus dem charakteristischen Wert der Zugfestigkeit und der Nennmasse, gerundet

4) E-Modul: 40.000 [N/mm<sup>2</sup>]

5) Entsprechend Herstellerangaben

6) Nennwert der Höchstkraft des Systems: Stab bzw. Hohlstab in Verbindung mit einer Stahlmutter bzw. Stahlmuffe DYWI® Drill R32 (Standardausführungen)

7) Standardlängen bis max. 6 [m], Sonderlängen bis 11 [m] auf Anfrage erhältlich

Tab. 6 GFK Rund- und Flachstäbe Typ MN

Kennwert / Typ <sup>1)</sup>	Zeichen	Einheit	MNR-200	MNR-250	MNR-280	MNR-440	MNF-280	MNF-320	MNF-360
Nenndurchmesser/Abmessungen	$D_{a,nom}$	[mm]	16	19	20	25	40 x 7	40 x 8	40 x 9
Nennmasse <sup>2)</sup>	m	[kg/m]	0,39	0,55	0,64	0,98	0,55	0,63	0,70
Höchstkraft Stab <sup>2)</sup>	$F_{m,s,nom}$	[kN]	200	250	280	440	280	320	360
Zugfestigkeit Stab <sup>3)</sup>	$R_{m,s,nom}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1.000	900	900	900	1.000	1.000	1.000
Dehnung Stab <sup>4)</sup>	$A_{gt}$	[%]							
Höchstkraft Verankerung <sup>4)</sup>	$F_{m,a,nom}$	[kN]	90	100	110	120	100	110	120

1) Stand: 2012-08, Hinweise: Werte unterliegen laufenden Änderungen; andere Dimensionen bzw. Ausführungen sind auf Anfrage erhältlich; systemkonforme Platten laut Herstellerinformation

2) Charakteristischer Fraktilwert

3) E-Modul: 40.000 [N/mm<sup>2</sup>]

4) Entsprechend Herstellerangaben

### 2.3.2 Ischebeck - Verpresspfahl TITAN (Friedr. Ischebeck GmbH, 2014)

Der Verpresspfahl TITAN ist für jeden Bodentyp geeignet und wird bei allen Bauverfahren (Gründungspfahl, Ankerpfahl oder Bodennagel) gleich hergestellt. Bei diesem System ist auch ein nachträgliches Verpressen nicht erforderlich.

Zuerst wird der IBO-Nagel (Injektionsbohr-Nagel) mittels Drehschlagbohrung abgeteuft und mit Zementsuspension, Wasser oder Luft gespült. Durch diese Bohrart wird das umliegende Material laut Angaben des Herstellers verdichtet und verdrängt, wodurch eine Art Bodenverbesserung wie bei einem Verdrängungspfahl entsteht. Damit werden höhere Reibungskräfte erreicht. Das Ausspülen der feinen Bodenpartikel rund um den Nagel führt (oftmals) zu einem positiven Effekt, weil dadurch der Verbund zwischen Boden und Zementmörtel verbessert und somit der Auszieh Widerstand erhöht wird. (siehe Abb. 10)

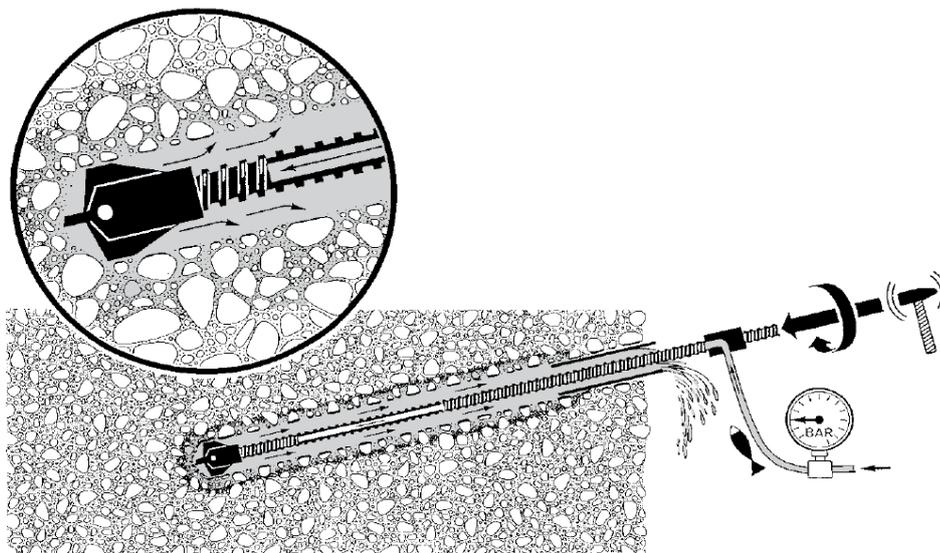


Abb. 10 Direktbohren

Im zweiten Schritt wird das gesamte Bohrloch mit Zementsuspension (W/Z-Wert kleiner als im ersten Schritt) bei kontinuierlicher Rotation von der Spitze bis zur Oberfläche verpresst.

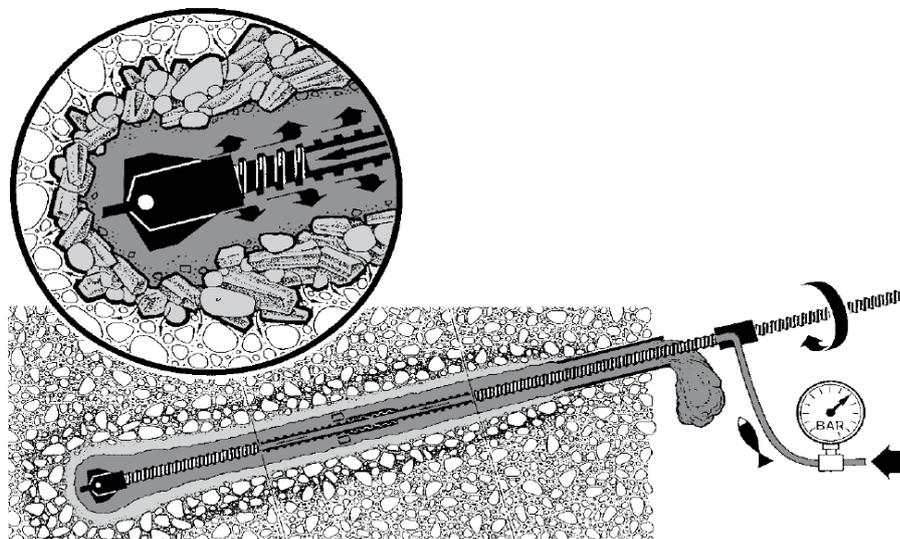


Abb. 11 Nagelverpressung

Die teilweise in das Erdreich verdrängte Spülflüssigkeit bildet einen Filterkuchen rund um den Zementmörtel (siehe Abb. 12).

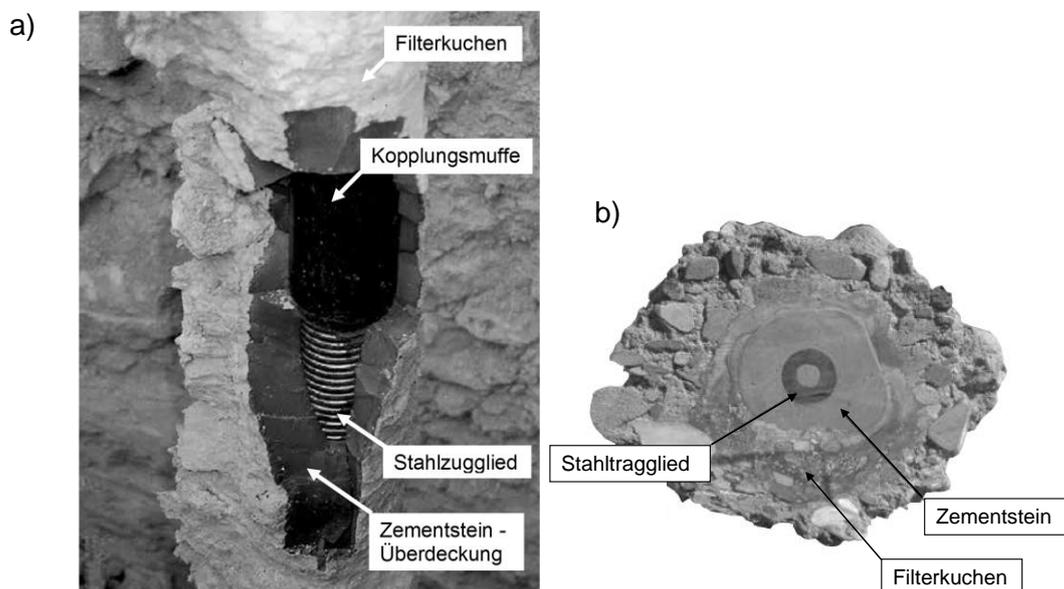


Abb. 12 a) freigelegter Nagel und b) Querschnitt vom Bodennagel

Das Einpressen wird bei einem Druck von  $\geq 5$  bar so lange durchgeführt, bis der Zementmörtel aus dem Bohrloch austritt. Je höher der Druck in der Endphase ist, desto besser wird der Nagel verpresst und umso höher ist der Auszieh Widerstand. Darum muss während dem Verpressvorgang der Druck immer aufgezeichnet und in einem Herstellprotokoll vermerkt werden. Steigt der Druck an, der Rücklauf bleibt

jedoch aus, ist das Risiko einer Verkläusung im Bohrloch gegeben. In diesem Fall ist es notwendig, den Nagel heraus- und hineinzubewegen, um diese zu lösen. Ansonsten würde der Zementmörtel unkontrolliert in das Erdreich gepresst werden.

Bei Ischebeck haben alle Bohrkronen eine seitliche Venturi-Spüldüse. Diese soll einen ähnlichen Effekt wie beim Düsenstrahlverfahren oder bei einer Injektionsverdichtung erzeugen. Mit dieser Düse kann eine gewisse Fußverbreiterung des Nagels durchgeführt werden. (siehe Abb. 11)

Tab. 7 Ischebeck TITAN

Bezeichnung	Einheit	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN	TITAN
		30/16	30/11	40/20	40/16	52/26	73/56	73/53	73/45	73/35	103/78	103/51	127/103
Nenndurchmesser außen $\varnothing$	mm	30	30	40	40	52	73	73	73	73	103	103	127
Nenndurchmesser innen $\varnothing$	mm	16	11	20	16	26	56	53	45	35	78	51	103
Charakteristische Tragfähigkeit $R_{T,k}$ gemäß deutscher Zulassung <sup>1)</sup>	kN	155 <sup>2)</sup>	225	372	465	620	695 <sup>2)</sup>	860	1218	1386	1550	2325	1800 <sup>2)</sup>
$F_{0,2,k}$ Kraft an der 0,2 % Dehngrenze (Mittelwert)	kN	190	260	425	525	730	830	970	1270	1430	1800	2670	2030

<sup>1)</sup> Zulassung Z-34.14-209: Bei Dauer-Zugbeanspruchungen und Zementstein-Überdeckungen  $c < 40$  mm sind ggfs. die Tragfähigkeiten entsprechend Zulassung Z-34.14-209 zu reduzieren.

<sup>2)</sup> Für diese Größen liegt noch keine Zulassung vor, für TITAN 30/16, 73/56 und 127/103 wurden die Werte analog zur Zulassung interpoliert.

## 2.3.3 ANP - Systems GmbH (ANP Systems GmbH, 2015)

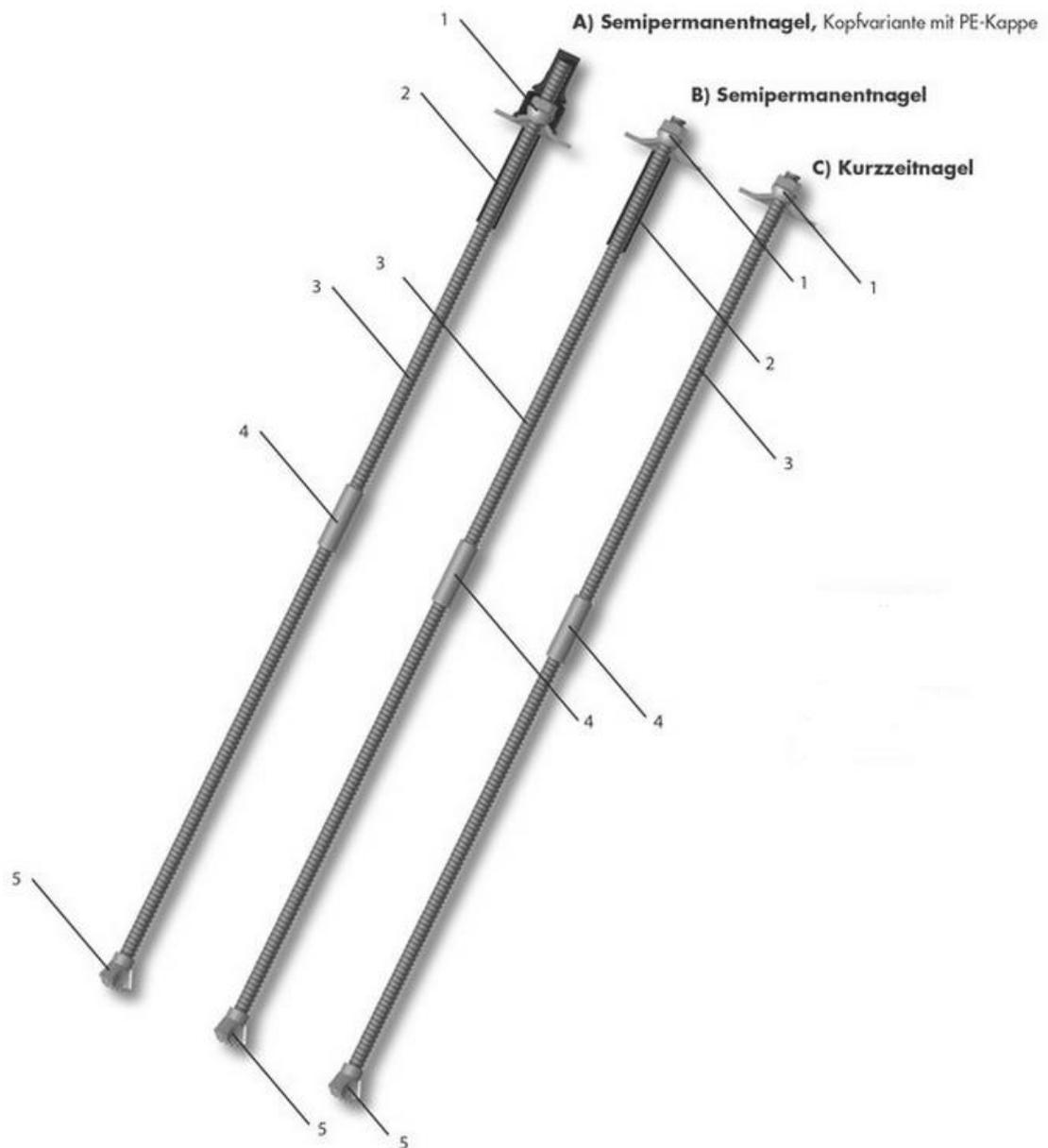
**Hohlstabnägel**

Abb. 13 Hohlstabnägel

1. Nagelkopf
2. Kunststoffrohr
3. SHS-Stab
4. Muffe
5. Verlorene Bohrkronen

Tab. 8 SHS-Nagel

Tragglied Ø [mm]	char. Bruchkraft $F_{pk}$ [kN]	Kraft an der 0,2% Dehngrenze $F_{p0,2}$ [kN]	Bemessungswert des Materialwiderstandes $R_d = F_{p0,2} / 1,15$ [kN]
H 0210-32	210	170	148
H 0250-32	250	190	165
H 0280-32	280	230	200
H 0360-32	360	280	243
H 0400-32	400	330	287
H 0420-38	420	350	304
H 0500-38	500	400	348
H 0630-51	630	530	461
H 0800-51	800	630	548

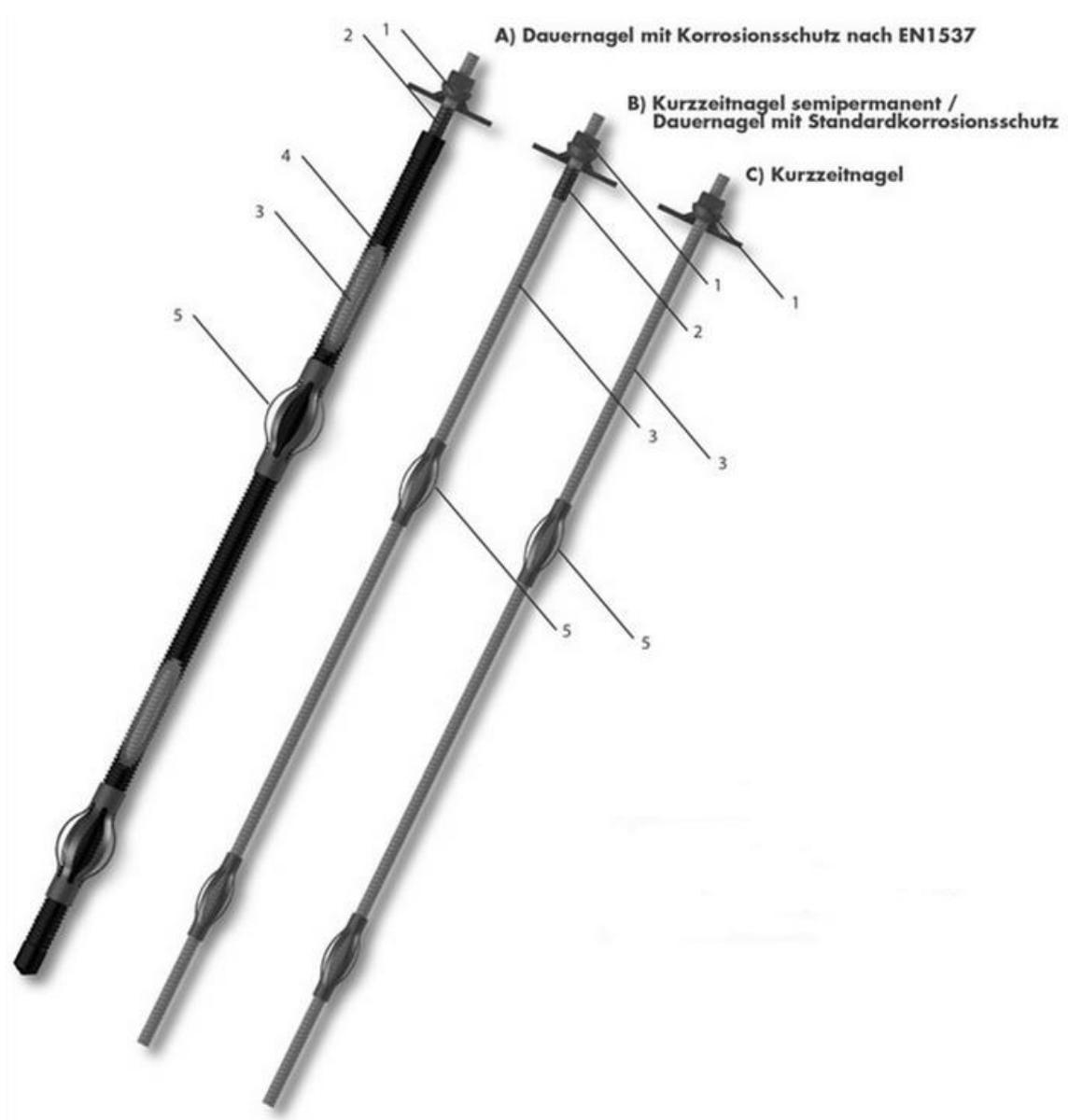
**Vollstabnagel**

Abb. 14 Vollstabnägel

1. Nagelkopf
2. Schrumpfschlauch
3. Stabstahl mit Gewinderippen
4. Hüllrohr gerippt und innerer Zementmörtel
5. Federkorbdistanzhalter

Tab. 9 ARI G55

Tragglied $d_s$ [mm]	char. Bruchkraft $F_m$ [kN]	char. Streckgrenz- kraft $F_e$ [kN]	Bemessungswert des Materialwiderstandes $R = F_e / 1,15$ [kN]
20	187	173	150
25	292	270	235
28	367	339	295
32	478	442	384
40	747	691	601
50	1167	1080	939
63,5	2215	1760	1530
Stabstahl Bst 550/620 mit Gewinderippen, $R_{p0,2} = 550$ N/mm <sup>2</sup> , $R_m = 620$ N/mm <sup>2</sup>			

Tab. 10 SAS 670

Tragglied $\emptyset$ [mm]	char. Bruchkraft $F_{pk}$ [kN]	Kraft an der 0,2% Dehngrenze $F_{p0,2}$ [kN]	Bemessungswert des Materialwiderstandes $R_d = F_{p0,2} / 1,15$ [kN]
18	204	170	148
22	304	255	222
25	393	329	286
28	493	413	359
30	565	474	412
35	770	645	561
43	1162	973	846
57,5	2077	1740	1513
63,5	2534	2122	1845
75	3535	2960	2574
Stabstahl S 670/800 mit Gewinderippen, $R_{p0,2} = 670$ N/mm <sup>2</sup> , $R_m = 800$ N/mm <sup>2</sup>			

### 2.3.4 Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG (SAH - Stahlwerk Annahütte)

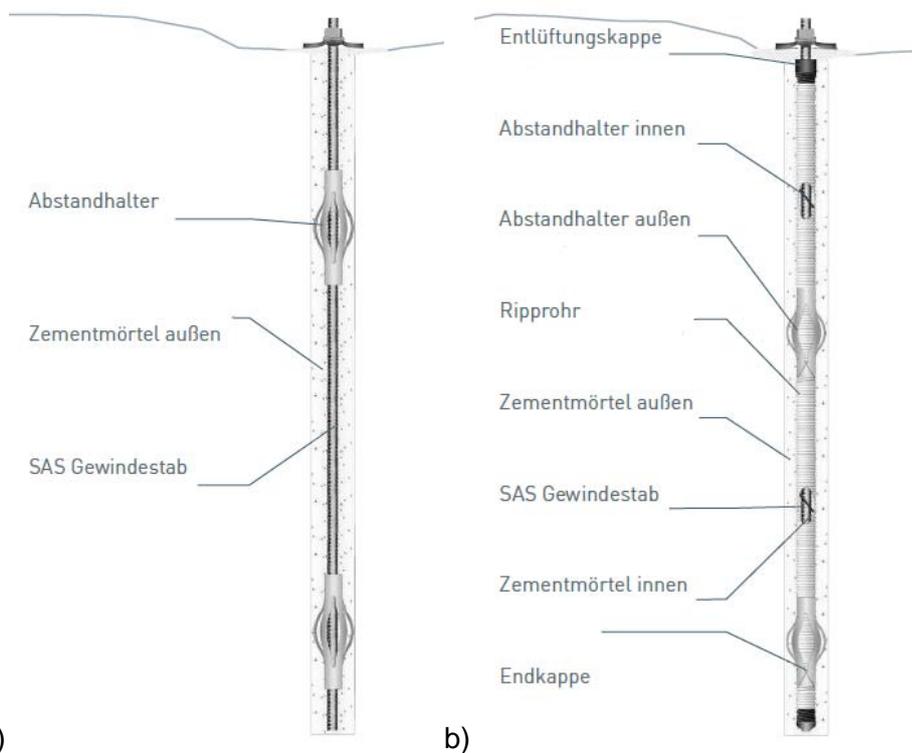


Abb. 15 SAS Bodennagel: a) Kurzzeitnagel (SCP) und b) Dauernagel (DCP)

Tab. 11 SAS

Güte	Nenndurchm. Ø [mm]	Strecklast [kN]	Bruchlast [kN]	Gewicht [kg/m]
<b>SAS 500/550</b>				
DIBt Zulassung	16	100	110	1,58
	20	160	175	2,47
	25	245	270	3,85
	28	310	340	4,83
	32	405	440	6,31
	40	630	690	9,87
	50	980	1080	15,40
<b>SAS 555/700</b>				
DIBt Zulassung	63,5	1760	2215	24,86

Weitere Nägel mit der Stahlgüte SAS 550/620 und SAS 670/800 werden auch produziert, haben aber keine Zulassung am Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt).

2.3.5 BBV Systems (BBV Systems GmbH, 2015)

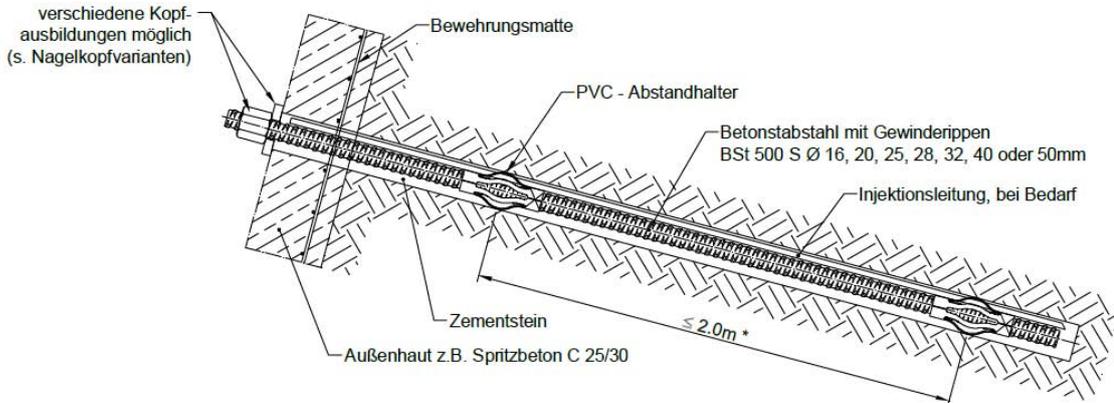


Abb. 16 Kurzzeitnagel

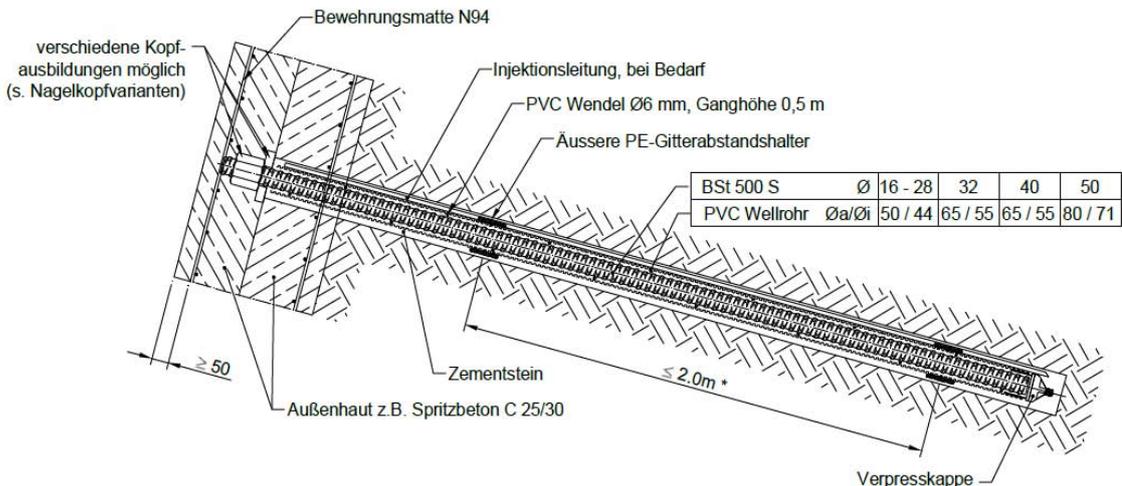


Abb. 17 Dauernagel

Tab. 12 BBV-Bodennägel

E-Modul: ca. 205kN/mm<sup>2</sup>

STAB-DURCHMESSER [mm]	STANDARD-GRÖSSEN	STAHL-GÜTE	STAHL-QUERSCHNITT (A <sub>t</sub> ) AS [mm <sup>2</sup> ]	STAHL-GEWICHT [kg/m]	LAST AN DER STRECKGRENZE (F <sub>t 0,2k</sub> ) F <sub>S</sub> = A <sub>S</sub> × β <sub>S</sub> [kN]	BRUCH-LAST P <sub>tk</sub> = A <sub>t</sub> × f <sub>tk</sub> [kN]	LAST NACH DIN 1054 2005 (NEU) R <sub>i,d</sub> (γ <sub>m</sub> =1,15) = (F <sub>t 0,2k</sub> )/1,15 [kN]	LAST NACH DIN 1054 1976 (ALT) F <sub>zul</sub> = F <sub>S</sub> / γ <sub>S</sub> γ <sub>S</sub> = 1,75 [kN]
16	■	BSt 500 S	201	1,58	101	111	88	58
20	■	BSt 500 S	314	2,47	157	173	137	90
25	■	BSt 500 S	490	3,85	245	270	213	140
28	■	BSt 500 S	615	4,83	308	338	268	176
32	■	BSt 500 S	804	6,31	402	442	350	230
40	■	BSt 500 S	1257	9,86	629	691	547	359
50	■	BSt 500 S	1963	15,40	982	1080	854	561

### 2.3.6 Spinnanker (Spinnanker GmbH, 2015)

Das Unternehmen Spinnanker GmbH hat sich für ihr System von der Natur inspirieren lassen und ist daher vergleichbar mit dem Wurzelsystem eines Baumes. Der Spinnanker kann wie ein Baum nicht nur Vertikal- und Horizontalkräfte, sondern auch Biegemomente in den Boden übertragen und besitzt in Bezug auf die Bodenvernagelung ein sehr analoges Tragverhalten. Bei einer klassischen Vernagelung, wie auch beim Spinnanker wird die Festigkeit des Bodens durch die kollektive Wirkung der Nägel, ähnlich wie durch die Verwurzelung bei Bäumen, erhöht. Die häufigsten Anwendungsgebiete des Spinnankers sind Fundierungen, Hangsicherungen oder Abspannungen.

Bei diesem System werden insgesamt 6 oder 12 Gewindestäbe mit einem Durchmesser von ca. 15 mm und einer Länge von 2,0 bis max. 8,0 m durch eine Montageplatte unvermörtelt in das Erdreich gedreht. Um eine plane Oberfläche zu erhalten, wird anschließend die Nivellier- und Aufbauplatte mit Gewindeschrauben eingerichtet. Diese kann alternativ als Schweißgrund adaptiert werden.

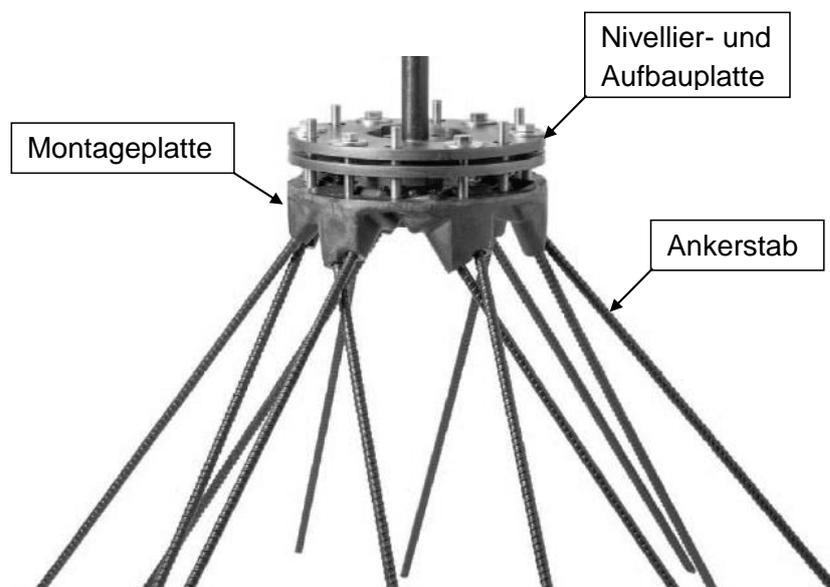


Abb. 18 Spinnankersystem

#### **Tragverhalten**

Wird nur ein einzelner Stab betrachtet, so verhält er sich wie ein Verdrängungspfahl mit sehr geringem Durchmesser. Dieses detaillierte Tragverhalten hat Herr Supp in seiner Dissertation an der Technischen Universität Graz genauer untersucht. (Supp, 2015) Ein wesentlicher Vorteil dieses Systems ist die sofortige und vollständige Tragfähigkeit nach Einbringen des letzten Nagels.

### **Montage**

An der gewünschten Position wird die Montagehilfe (Alpinanker) in das Erdreich eingedreht, auf welchen die Montageplatte gestülpt und fixiert wird (siehe Abb. 19). Damit kann die Spinnankerplatte beim Eindrehen der Stäbe nicht von seiner Position abweichen.

Der nächste Arbeitsschritt ist das Eindrehen der Gewindestäbe, wobei eine Handeindrehmaschine in eine speziell gefertigte Ausnehmung der Spinnankerplatte gesteckt wird, um Rotation zu vermeiden. Jeder einzelne Gewindestab wird in die Maschine gesteckt und in den Boden gedreht. Ist es nicht möglich, den Stab vollständig in den Boden zu versenken, wird das obere Ende abgeschnitten. Bevor dieser Anker eine Belastung erfährt, muss überprüft werden, ob mit der gekürzten Länge eine ausreichende Kraftübertragung gegeben ist. Sind alle Stäbe eingedreht, wird die Fixierung abgeschraubt und der Alpinanker entfernt.

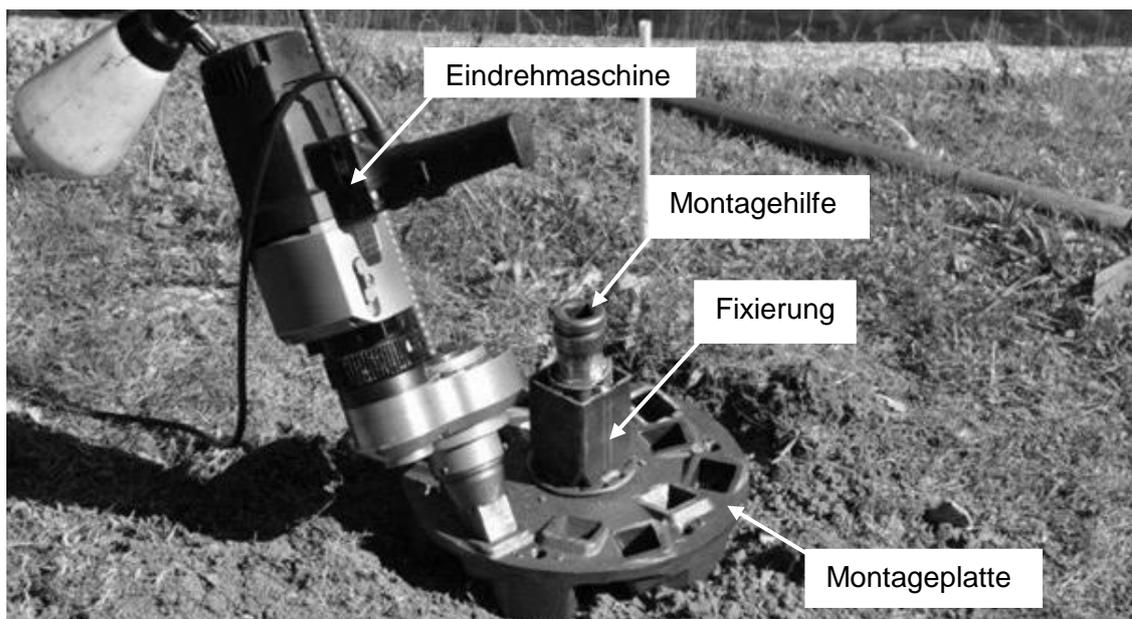


Abb. 19 Spinnankermontagehilfe

In Abb. 20 ist die charakteristische Tragfähigkeit für Zug- und Druckbelastung der unterschiedlichen Stabtypen abgebildet. „Die angegebenen Traglasten gelten für maximale Verschiebungen < 20 mm. An 10 %, mindesten jedoch an 3 Anker ist eine Abnahmeprüfung durchzuführen.“<sup>2</sup>

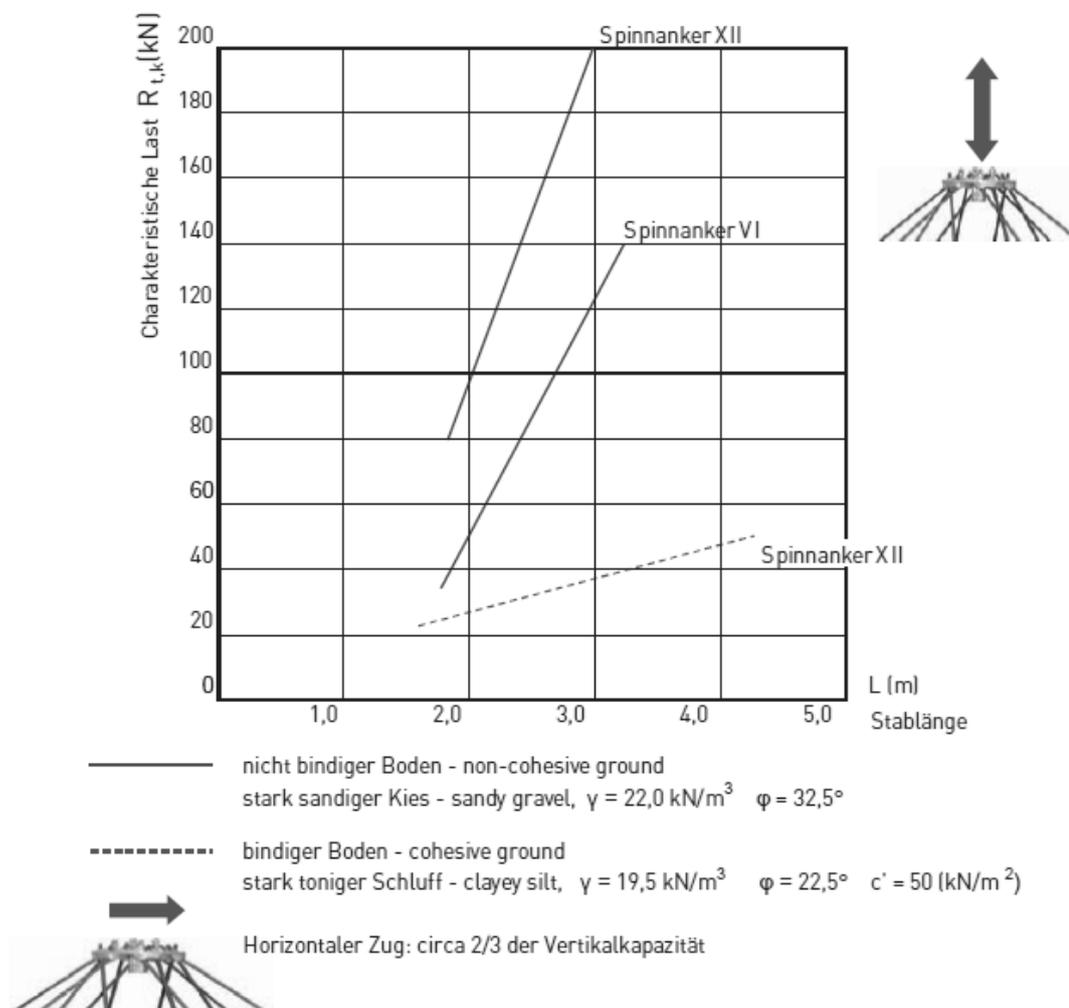


Abb. 20 Beispiel für die übertragbaren Lasten des Spinnankers (Spinnanker GmbH, 2015)

<sup>2</sup> (Spinnanker GmbH, 2015); Spinnanker Produktprospekt; S.7

### 2.3.7 Soil Nail Launcher™ (GSI - GeoStabilisation International, 2015)

Der Soil Nail Launcher™ wurde eigentlich vom britischen Militär entwickelt, um chemische Raketen abzufeuern, daher auch die spezielle Bezeichnung. Die wortwörtliche Übersetzung lautet „Boden-Nagel-Raketenwerfer“.



Abb. 21 Soil Nail Launcher™

Dieses System ist in den USA ein häufig angewandtes Verfahren, um Böschungen, Hangrutschungen oder Baugruben zu sichern. Dabei wird ein Stahl- oder Glasfaserstab mit einem Durchmesser von 38 mm und einer Länge von 6,5 m in den Boden geschossen. Der Stab erreicht dabei eine Geschwindigkeit von ca. 400 km/h.

#### ***Funktionsprinzip***

Durch die enorme Geschwindigkeit breitet sich beim Auftreffen des Stabes auf den Boden eine Druckwelle im Boden aus und verdrängt die Bodenpartikel an der Nagelspitze. Einer der Vorteile dieses Systems ist, dass trotz hoher Geschwindigkeit eine geringe Abrasion eintritt und somit der Korrosionsschutz der Nägel erhalten bleibt. Auch in sehr aggressiven Böden ist dieses Verfahren anwendbar, wobei statt des Stahlnagels ein Glasfasernagel verwendet wird.

Die einzelnen Bodenpartikel werden durch dieses Verfahren nicht zerstört. Es entsteht folglich eine lokale Verdichtung um den Nagel. Die daraus resultierende höhere Verbindung zwischen Boden und Nagel ergibt einen bis zu 10-fach erhöhten Ausziehungswiderstand im Vergleich zu gedrückten oder vibrierten Bodennägeln.

GeoStabilisation International hat auch einen perforierten Nagel entwickelt. Dieser kann einerseits für Drainagen verwendet werden, andererseits um den Stab und den anstehenden Boden nachträglich zu verpressen.

### **Daten und Fakten**

Tab. 13 Daten und Fakten des Soil Nail Launcher™

<b>NAGEL</b>	
<b>Art</b>	<b>Einheit</b>
Material	Stahl oder Glasfaser
Länge	6,5 m
Durchmesser	38 mm
Einschussgeschwindigkeit	400 km/h
Eindringtiefe	ca. 4,5 m (vom Boden abhängig)
Einbaugeschwindigkeit	15 Nägel / Stunde

Der spezielle Aufsatz des Soil Nail Launcher kann üblicherweise auf einen Bagger, aber auch auf einen LKW-Kran montiert werden. Um den entsprechenden Druck (ca. 207 bar) zu erreichen, wird ein zusätzlicher Kompressor benötigt. (US Department of Agriculture and Transportation, 1994)

Tab. 14 Zubehör für den Soil Nail Launcher™

<b>Zubehör</b>	
<b>Art</b>	<b>Einheit</b>
Kompressor	-
Aufsatz (Gewicht)	1,8 t

### 2.4 Frontausbildung

Eine Nagelwand besteht aus einer Frontausbildung (äußere Hülle) und den Boden-  
nägeln (Bewehrung), die in Kombination mit dem Baugrund einen Verbundkörper bilden.  
Es ist stets darauf zu achten, dass der kraftschlüssige Verbund zwischen Nagel und  
äußerer Hülle gewährleistet ist. Auch bestehende Stützbauwerke, deren Stand-  
sicherheit nicht mehr gegeben ist, können so mittels Nägeln gesichert werden. (siehe  
Abb. 23)

Die Außenhaut muss gewisse Verformungen aufnehmen und die Lasten in den Nagel  
leiten können. Um die Kraftumleitung ermöglichen zu können, werden verschiedene  
Verbauarten angewendet. (ÖNorm EN 14490, 2010)

**Starre Frontausbildung** (Stützbauwerke, Steinschichtung, Spritz- oder Ortbeton):  
Der Bereich zwischen den Nägeln wird dadurch gesichert, muss aber aufgrund der  
Starrheit hohe treibende Kräfte (Erddruck) aufnehmen können.

**Bedingt nachgiebige Frontausbildung** (Geogitter- oder Betonstahlmatten, Geo-  
kunststoffe oder Maschendraht):

Diese soll den Bereich zwischen den einzelnen Nägeln stabilisieren und einen  
Erosionsschutz bieten.

**Weiche Frontausbildung:**

Mit dieser Methode wird zusätzlich zum Erosionsschutz eine Sicherung gegen das  
Aufreißen der zu sichernden Oberfläche erreicht.

**Ohne Frontausbildung:**

Die Oberfläche ist stabil, die Böschung hat jedoch eine kritische Neigung, welche vom  
Boden- bzw. Felstyp abhängig ist. Wird diese überschritten, ist eine Ausführung  
unmöglich.

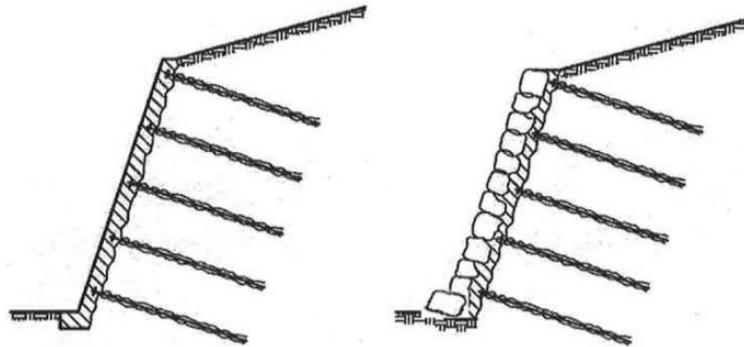


Abb. 22 Starre Frontausbildung (ÖNorm EN 14490, 2010)

In Abb. 22 ist eine starre Frontausbildung wie bei einer klassischen Bodenvernagelung mit Spritzbeton oder Ortbeton ersichtlich (linkes Bild). Ist die klassische Frontausbildung (z.B. mit Spritzbeton) nicht erwünscht, kann eine Steinschichtung vorgemauert werden, um dadurch eine schönere Frontansicht oder auch eine höhere Sicherheit gegen zum Beispiel Frosteinwirkung zu erhalten (Abb. 22 rechts).

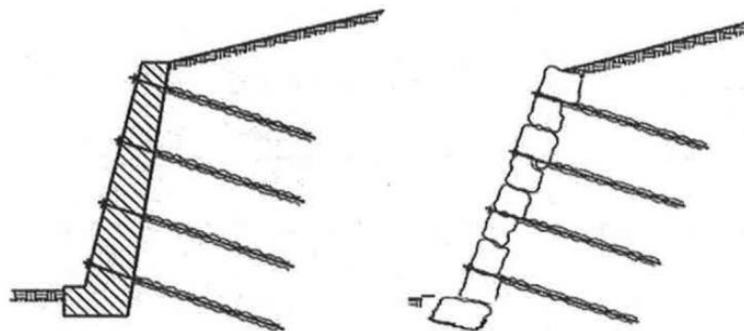


Abb. 23 Sicherung bestehender Stützbauwerke (ÖNorm EN 14490, 2010)

In Abb. 23 sind zwei Sanierungsmöglichkeiten bereits bestehender Stützbauwerke ersichtlich. Sowohl im linken (Stützmauer aus Stahlbeton), als auch im rechten Bild (bestehende Steinschichtung) wird die Mauer durchbohrt und mit Nägel gesichert.

Am Nagelkopf befindet sich eine Nagelplatte, die mit der Frontausbildung durch eine Mutter kraftschlüssig verbunden wird.

Diese unterschiedlichen Nagelkopfausbildungen sind ein wichtiges Detail der Frontausbildung und ermöglichen eine optimale Kraftübertragung zwischen den Nägeln und der Außenhaut. Mit diesen Verbindungen soll verhindert werden, dass der Nagel unter Belastung in die Wand hineingezogen wird. Die Art der Ausbildung ist entsprechend der gewünschten Dauerhaftigkeit des Nagels zu wählen. (siehe Abb. 24)

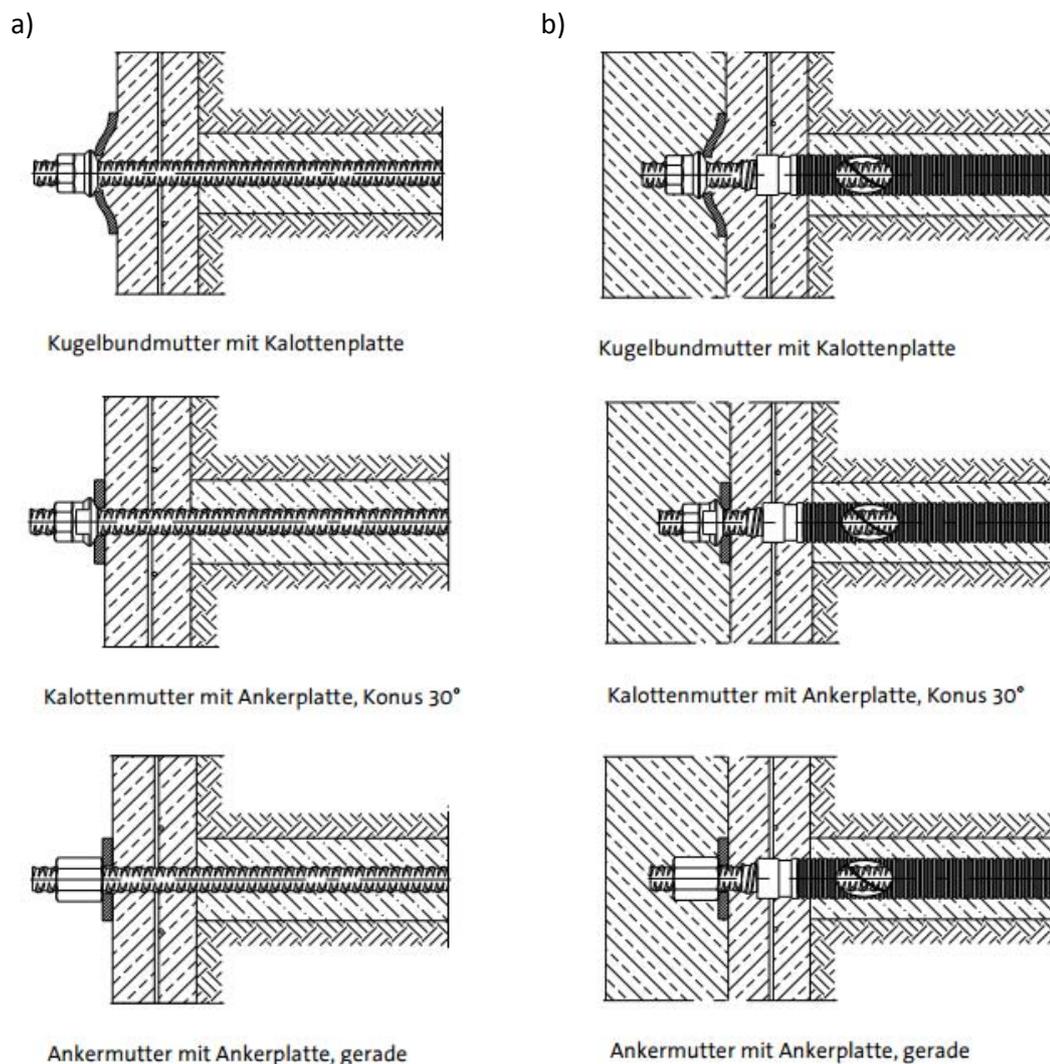


Abb. 24 Nagelkopf von a) Kurzzeitinagel und b) Dauernagel (BBV Systems GmbH, 2015)

## 2.5 Dauerhaftigkeit von Bodenvernagelungen

Die Dauerhaftigkeit einer Bodenvernagelung ist hauptsächlich von der Einbauart und -qualität abhängig. Diesbezüglich wurden im Kapitel 2.3 die Details der einzelnen Nagelarten (Kurzzeit- oder Dauernagel) dargestellt.

### 2.5.1 Temporärnagel

Bei einem temporären Nagel ist die maximale Gebrauchsdauer  $\leq 2$  Jahre. Ein weiteres Kriterium eines Kurzzeitnagels ist der einfache Korrosionsschutz. (Wichter & Meininger, 2000)

Diese Art von Nagel wird bei kurzzeitigen Baumaßnahmen eingesetzt, wie zum Beispiel bei Baugrubensicherungen.

### 2.5.2 Permanentnagel

Die Gebrauchsdauer eines Permanentnagels beträgt  $> 2$  Jahre. Wie in Tab. 1 ersichtlich, haben verschiedene Produkte unterschiedliche Einsatzdauern. Der Permanentnagel muss immer mit doppeltem Korrosionsschutz ausgeführt werden. (Wichter & Meininger, 2000)

Die Permanentnägel werden für Langzeitbauwerke, wie zum Beispiel für Hangrutschungen oder -sicherungen sowie für Sanierungen alter Stützbauwerke eingesetzt. In Österreich sind auch semipermanente Lösungen mit einfachem Korrosionsschutz unter Berücksichtigung der Abrostrate zulässig (ANP Systems GmbH, 2015).

### 2.5.3 Entwässerung

Die Entwässerung der Oberflächen- und Grundwässer darf bei einer Bodenvernagelung während der Baudurchführung und der gesamten Lebensdauer nicht außer Acht gelassen werden. Es gibt drei verschiedene Ausführungsarten:

#### 1. Oberflächenentwässerung

Werden die Oberflächenwässer nicht ordnungsgemäß abgeleitet, können diese Schäden in der Nagelwand verursachen oder sogar zum Versagen der gesamten Sicherungsmethode führen.

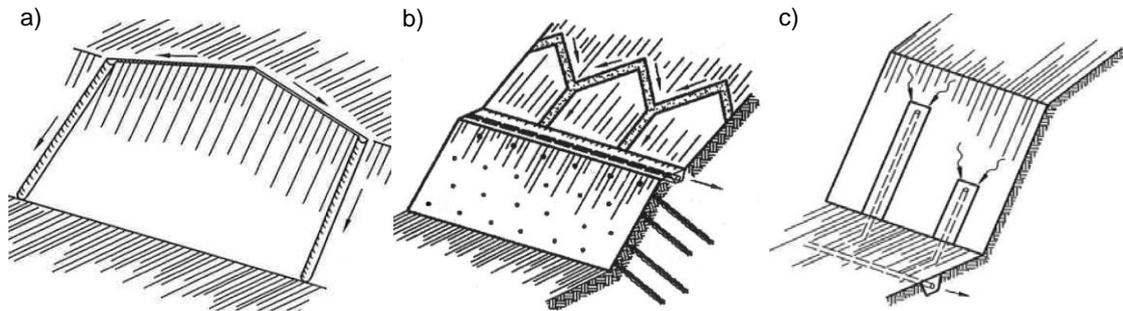


Abb. 25 Varianten der Oberflächenentwässerung (ÖNorm EN 14490, 2010)

Wie die Entwässerungsvarianten bei Böschungen ohne Verbau ausgeführt werden, ist in Abb. 25 a) und c) ersichtlich. Die übliche Ableitung der Oberflächenwässer bei einer Bodenvernagelung ist in Abb. 25 b) dargestellt. Dabei wird ein Entwässerungsgraben vor dem Geländesprung angelegt und der Niederschlag seitlich oder in der Nagelwand kontrolliert abgeleitet. (ÖNorm EN 14490, 2010)

## 2. Entwässerung der Frontausbildung

Ist Grund- oder Sickerwasser im Boden vorhanden, muss dieses unmittelbar hinter der Frontausbildung gesammelt und abgeleitet werden. Ansonsten könnte sich ein hydrostatischer Wasserdruck an der Front aufbauen. Wird dieser nicht in der Bemessung der Nagelwand berücksichtigt, würde dies zur Erhöhung der Belastung und in weiterer Folge zu Schäden führen.

Das Filtermaterial darf keine Kopplung zwischen Außenhaut und Boden verursachen, wobei ein geotextiles Filtergewebe Abhilfe schaffen kann. In Abb. 26 sind zwei Entwässerungssysteme ersichtlich. Diese können gegebenenfalls auch kombiniert werden. (ÖNorm EN 14490, 2010)

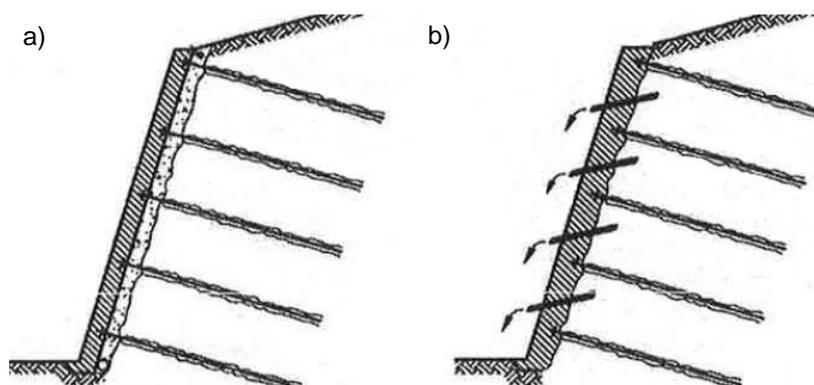


Abb. 26 Entwässerungsvariation der Frontausbildung

Im linken Bild wird das Wasser im Boden hinter der Frontausbildung mit Drainagevlies, -matten oder Filtermaterial gesammelt und am Fuß der Vernagelung in einem

Drainagerohr abgeleitet. Das rechte Bild zeigt Entwässerungsrohre, welche die Frontausbildung durchstoßen, um einen freien Abfluss des anstehenden Wassers zu gewährleisten. Die verwendeten Rohre müssen einen entsprechenden Innendurchmesser aufweisen, um das Wasser abführen zu können und gegebenenfalls eine Reinigung beziehungsweise Wartung zu ermöglichen. (ÖNorm EN 14490, 2010)

### 3. Unterirdische Drainage

Ist durch Bodenerkundungen eine ausgeprägte wasserführende Schicht ersichtlich, kann eine unterirdische Drainage (z.B. Tiefendrain) Abhilfe leisten (siehe Abb. 27). Dabei wird von der Außenseite ein Bodennagel mit  $\geq 10\%$  Neigung (steigend) in diese Schicht gebohrt. Die Neigung ist laut Norm vorgegeben, um ein problemloses Ableiten des Sickerwassers zu ermöglichen. Mit einer sorgfältigen Abdichtung der Tiefendrain vom umgebenden Boden soll verhindert werden, dass feine Bodenpartikel ausgespült werden. Tritt dies trotzdem ein, ist das Ausspülen zu dokumentieren und es müssen gegebenenfalls Zusatzmaßnahmen getroffen werden. (ÖNorm EN 14490, 2010)

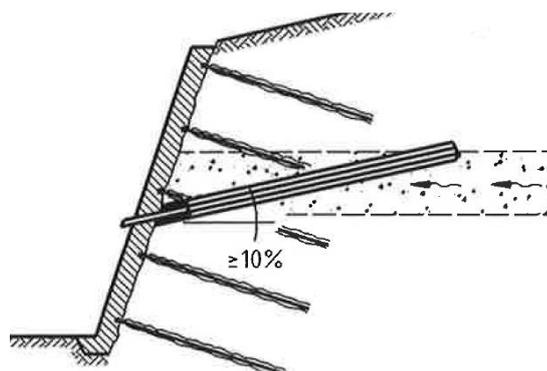


Abb. 27 Unterirdische Drainage mit Drainagenagel (ÖNorm EN 14490, 2010)

#### 2.5.4 Nagelprüfung

Die Nagelprüfung trägt zur Standsicherheit und somit auch zur Dauerhaftigkeit einer Bodenvernagelung wesentlich bei. Es wird damit sichergestellt, dass die Nägel ordnungsgemäß eingebaut sind und die Nagelwand planmäßig verwendet werden darf. Die Prüfung wird in zwei Arten unterschieden: (ÖNorm EN 14490, 2010)

- Bei Schadensfolgeklasse CC1 und CC2 müssen 2 % der eingebauten Nägel, aber mindestens 3 Nägel pro Gruppe mit gleicher Beanspruchung überprüft werden.
- Bei Schadensfolgeklasse CC3 müssen 3 % der eingebauten Nägel, aber mindestens 5 Nägel pro Gruppe mit gleicher Beanspruchung überprüft werden.

Die Prüflast  $P_P$  ergibt sich wie folgt. (Martak & Breit, 2014)

$$P_P \geq \max\{P_{i,d}\} * y_{n,t} * \xi_2 \quad (1)$$

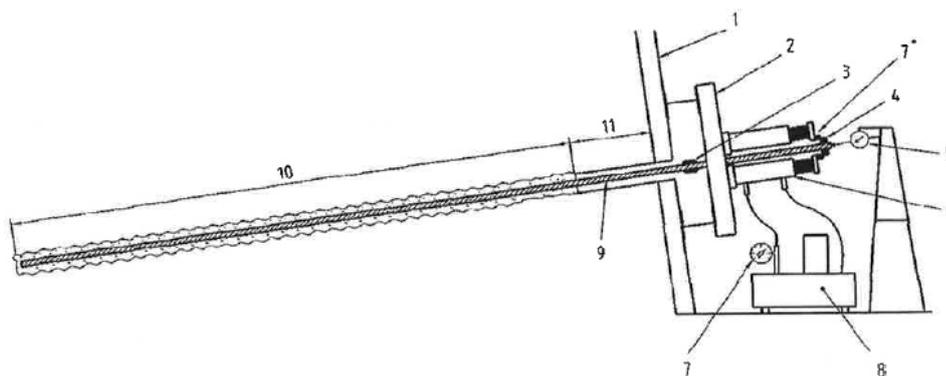
mit

$$P_{i,d} = T_{i,k} * a_i * y_E \quad (2)$$

$P_{i,d}$	[kN]	Bemessungswert des Nagels $i$
$T_{i,k}$	[kN/m]	charakteristischer Wert der in der statischen Berechnung gewählten übertragbaren Schubkraft zwischen dem Nagel $i$ und dem Baugrund
$a_i$	[m]	Verbundlänge des Nagels $i$
$y_E$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert gemäß ÖNORM B 1997-1-1:2013, Tabelle 11
$y_{n,t}$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert gemäß ÖNORM B 1997-1-1:2013, Tabelle 13
$\xi_2$	[-]	Streuungsfaktor gemäß ÖNORM B 1997-1-1:2013, Tabelle 8

### Prüfgerät und -einrichtung

In Abb. 28 ist die empfohlene Anordnung der Prüfgeräte und -einrichtungen ersichtlich. Um eine Kopplung zwischen Spannstuhl (2 und 6) und Bodennagel (9) ausschließen zu können, ist darauf zu achten, dass die ungebundene Länge (11) von Mörtel- und Bodenmaterial frei bleibt. Mit einem Freispülen des Bereiches oder Einbau eines PE-Rohres kann dies gewährleistet werden. (ÖNorm EN 14490, 2010)



#### Legende

- 1 Frontausbildung
- 2 starrer Reaktionsrahmen
- 3 Erweiterung des Bodennagels für die Prüfung
- 4 Sicherungsmutter und Platte auf dem Gegengewicht
- 5 Verschiebungsmessgerät an einem unabhängigen Halterahmen
- 6 Hydraulikpresse zum Spannen
- 7 kalibriertes Druckmessgerät zur Steuerung der Presskraft (alternativ kann eine Lastmessdose verwendet werden, siehe 7\* im Bild)
- 8 Pumpe
- 9 Bodennagel
- 10 Einbindelänge
- 11 ungebundene Länge

Abb. 28 Schematische Darstellung einer Nagelprüfung (ÖNorm EN 14490, 2010)

Die Bodenvernagelung kann in zwei Arten geprüft werden. Es gibt eine Prüfung der Opfer- oder Ausführungsnägel.

Opfernägel sind nicht Teil der geplanten Nagelwand. Sie werden zwischen den Ausführungsnägeln platziert und haben daher die gleichen Baugrundverhältnisse.

Tab. 15 Festlegung der Bodennagellastprüfung (ÖNorm EN 14490, 2010)

	Art der Bodennagellastprüfung	
	Prüfung von Opfernägeln	Prüfung von Ausführungsnägeln
<b>Zweck der Prüfung</b>	Verifizierung des bei der Konstruktion verwendeten Grenzbindungswiderstandes des Bodennagels zum Baugrund (1) Bindung im passiven Bereich (2) Bindung im aktiven Bereich (3) Bindung entlang der Gesamtlänge des Nagels	Nachweis der zufrieden stellenden Leistungsfähigkeit des Bodennagels bei einer vom Konstrukteur festgelegten Last  Die Prüfung wird über die gesamte Länge des Nagels durchgeführt.
<b>Wann geprüft</b>	Vor, während und nach den Ausführungsarbeiten	Während oder nach Fertigstellung der Ausführungsarbeiten
<b>Typ des verwendeten Nagels</b>	Opfernagel	Bauwerksnagel
<b>Maßnahme im Falle der Nicht-Übereinstimmung des Prüfergebnisses</b>	Erneute Überprüfung des Bodennageleinbauverfahrens und/oder Erwägung einer alternativen Bodennagellänge und -anordnung	Konstrukteur für Maßnahmen und Zustimmung zur Fortführung der Arbeiten zu Rate ziehen
<b>Bemerkungen</b>	Falls notwendig, bei jeder einzelnen Bodenschicht	Vorsicht bei der Prüfung der Ausführungsnägel, um die Bindung zwischen Nagel und Einpressmittel nicht zu überspannen oder den Korrosionsschutz zu beschädigen  Wird eine Frontausbildung eines Bauwerkes verwendet, sollte deren Verbindung zum Prüfnagel innerhalb des Einflussbereiches der Frontausbildung gelöst werden

Das Prüfverfahren läuft wie folgt ab. (siehe Abb. 29 und Tab. 16)

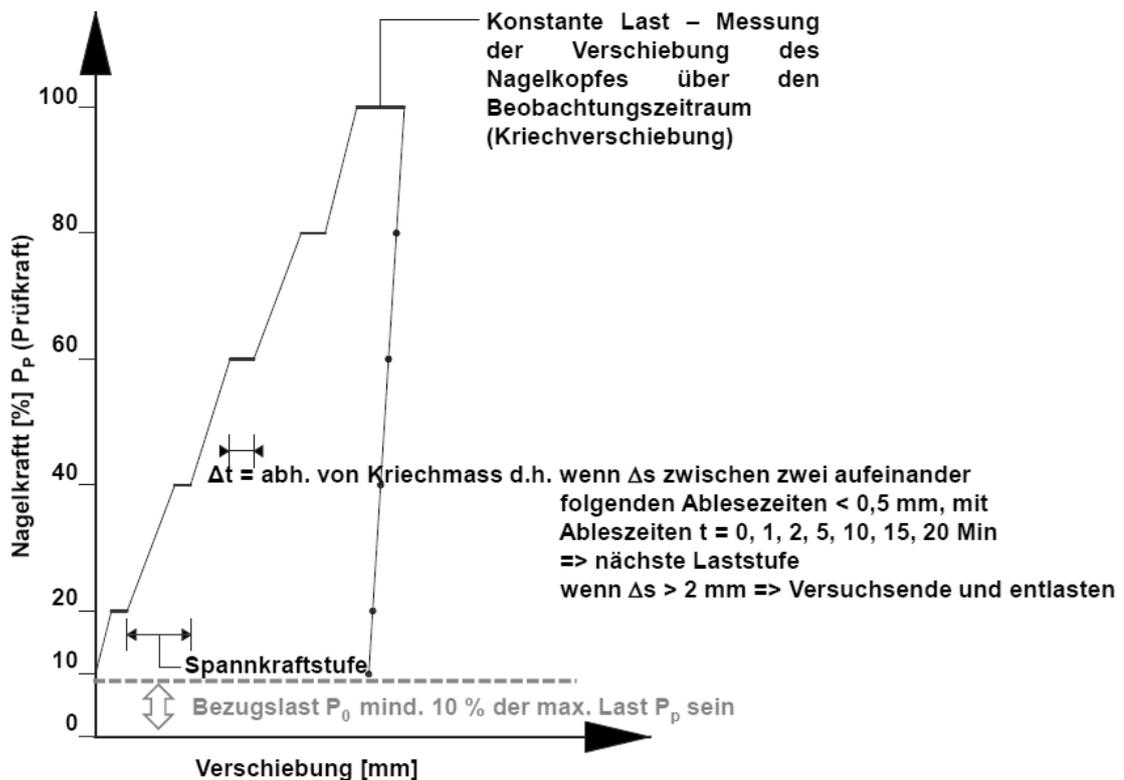


Abb. 29 Prüfvorgang mit einem Lastzyklus (Δ einer Be- und Entlastung) (Marte & Supp, 2014)

Tab. 16 Gegenüberstellung der Prüfverfahren (Marte & Supp, 2014)

	Opfernagel	Ausführungsnagel
<b>Abschätzung der Prüflast</b>	Prüflast $P_p$ muss bei der Bemessung unter Beachtung des maßgeblichen Bemessungsansatzes nach EN 1997 und entsprechender Teilsicherheitswerte festgelegt werden.	
<b>Anzahl der Lastzyklen</b>	<u>Mehr als ein Zyklus</u> Im ersten Zyklus sollte der Bindungswiderstand den bei der Bemessung vorausgesetzten charakteristischen Wert für die Last $P_p$ nicht überschreiten.	nur 1 Zyklus
<b>Anzahl der Laststufen</b>	Die max. Stufengröße sollte ausreichen, um die Form der Lastverschiebungskurve festzulegen und sollte üblicherweise 20 % der größten Zykluslast nicht überschreiten.	mind. 5 Laststufen
<b>Auswertung</b>	Das Ergebnis der Prüflast ist unter der Voraussetzung zulässig, dass die Kriechgeschwindigkeit bei der größten Prüflast $P_p$ kleiner als 2 mm / log Zyklus ist. Die am Nagelkopf gemessene Verschiebung darf bei der Prüflast nicht weniger als die erwartete elastische Verschiebung einer beliebigen ungebundenen Länge des Prüfnagels $L_{ab}$ betragen.	

## 2.6 Berechnungsverfahren

In diesem Kapitel werden die gängigen Berechnungsverfahren bzw. -ansätze aus der Literatur zusammengefasst und durch Handrechnungen beziehungsweise mit den Programmen Slide 6.0 und GGU-Stability 10 verglichen.

Die Versagensarten der Geländesprünge werden als Starrkörper-Bruchmechanismen betrachtet. Das bedeutet, ein oder mehrere Starrkörper, welche im Bruchzustand aneinander gleiten können, werden untersucht. Jeder Starrkörper besitzt die Bodenkennwerte des Baugrundes und versagt entlang einer Scherfuge, sobald das System erschöpft ist. Ab diesem Zeitpunkt ist eine Laststeigerung nicht mehr möglich. In den unterschiedlichen Berechnungsverfahren werden verschiedene Arten von Bruchmechanismen behandelt. (Translation und Rotation mit einem oder zwei Bruchkörper). (Renk, 2011)

Durch die Verschiebung eines oder mehrerer Bruchkörper können Risse an der Geländeoberfläche hinter der Nagelwand entstehen. Diese ermöglichen das Eindringen von Niederschlagswasser in die Gleitfuge. Dieser Effekt kann aufgrund des hydrostatischen Wasserdruckes zu einer unerwarteten Erhöhung der Bemessungslast der Nagelwand führen. Diese Zusatzbelastung wird in den Ansätzen im Allgemeinen jedoch nicht berücksichtigt.

### 2.6.1 Ansatz nach Gässler

Gässler (Gässler, 1987) behandelt in seiner Dissertation „Vernagelte Geländesprünge Tragverhalten und Standsicherheiten“ immer ein Regelprofil. Dieses besitzt keine ausgeprägte Bodenschichtung und wird pro Laufmeter Nagelwand betrachtet. (siehe Abb. 30) (Renk, 2011)

Die folgenden Beschreibungen der Ansätze von Gässler beziehen sich auf seine Dissertation. (Gässler, 1987)

Dabei unterscheidet er vier Bruchmechanismen:

1. Translation mit einem Bruchkörper
2. Translation mit zwei Bruchkörpern
3. Rotation mit einem Bruchkörper
4. Rotation mit zwei Bruchkörpern

„Die Gleitfugeneigungen bzw. -krümmungen sind so lange zu variieren, bis der ungünstigste Mechanismus gefunden wird.“<sup>3</sup> So kann der Bruchkörper mit der geringsten Standsicherheit ermittelt und berechnet werden.

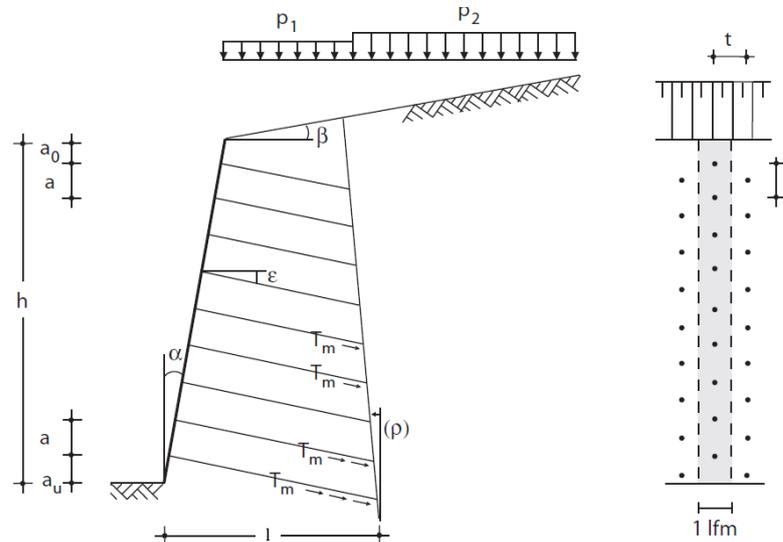


Abb. 30 Regelprofil eines Geländesprung nach Gässler (Renk, 2011)

Tab. 17 Kenngrößen des Regelprofils (Gässler, 1987)

Boden	Reibungswinkel Kohäsion Feuchtwichte	$\varphi$ c $\gamma$	 [kN/m <sup>2</sup> ] [kN/m <sup>3</sup> ]
Geometrie	Wandhöhe Wandneigung zur Vertikalen Geländeneigung oberhalb	h $\alpha$ $\beta$	[m] [°] [°]
Belastung	Flächenlast vorne (vernagelter Bereich) hinten (unvernagelter Bereich)	$q_1$ $q_2$	[kN/m <sup>2</sup> ] [kN/m <sup>2</sup> ]
Vernagelung (Regelraster)	Nagellänge projiziert auf Horizontale Horizontaler Höhenabstand der Nagelreihen projiziert auf die Vertikale Seitenabstand der Nägel Abstand oberster Nagelreihe von Kante Abstand unterster Nagelreihe vom Fuß Nagelneigung zur Horizontalen Neigung hinterer Vernagelungsrand zur Vertikalen Grenzschubkraft zwischen Nagel und Boden pro Längeneinheit axial	l a t a <sub>o</sub> a <sub>u</sub> $\epsilon$ $\rho$ $T_m$	[m] [m] [m] [m] [m] [°] [°] [kN/m]

<sup>3</sup> (Renk, 2011), S.7

### 1. Translation mit einem Bruchkörper (TRA-I)

Als einfachste Form der Starrkörperkinematik wird die Translation eines Bruchkörpers betrachtet. Die lineare Gleitfuge, welche durch den Fußpunkt der Nagelwand fixiert wird, ist mit dem Winkel  $\vartheta$  zur Horizontalen geneigt.

Es wird der sich ausbildende Gleitkeil betrachtet und mit einem Kräfteck das Gleichgewicht gebildet.

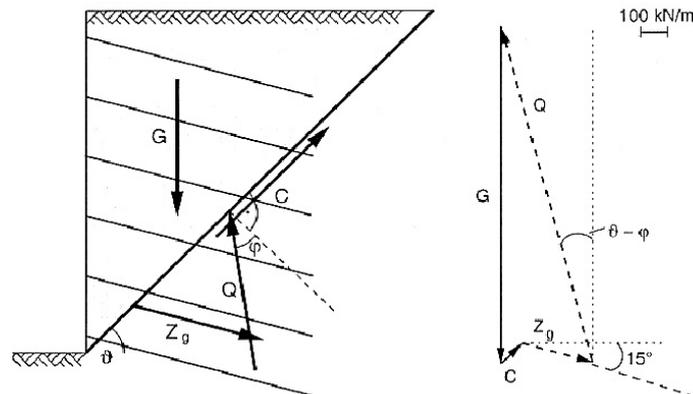


Abb. 31 Translation mit einem Bruchkörper (Haas, 2004)

Die bekannten Größen sind das Eigengewicht  $G$  und die Kohäsion  $C$ . Die Neigung der rückhaltenden Kraft  $Q$  ist mit dem Reibungswinkel  $\varphi$  definiert. Die Größe der Grenzzugkraft  $Z_g$  und der rückhaltenden Kraft  $Q$  ergibt sich aus dem grafischen Schnittpunkt beider Kräfte.

Es muss die Neigung  $\vartheta$  der Gleitfuge so lange variiert werden, bis das Verhältnis  $Z_{vorh}$  zu  $Z_g$  minimal wird.

$$Z_{vorh} = T_{m,vorh} \frac{\sum li(\vartheta)}{t} \quad (3)$$

$Z_{vorh}$  [kN] vorhandene maximal, mobilisierende Nagelzugkraft

$T_{m,vorh}$  [kN/m] mittlere Grenzscherkraft längs des Nagels

$\sum li(\vartheta)$  [m] Summe der Nagellängen im ruhenden Boden (passiver Bereich)

$t$  [m] horizontaler Abstand der Nägel

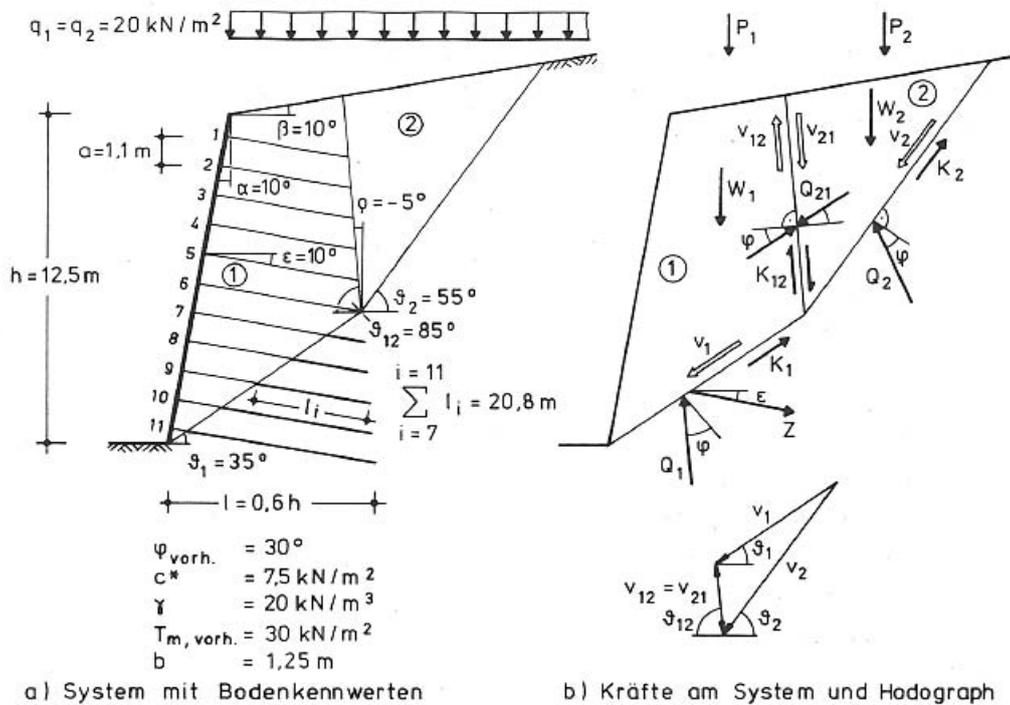
$$\eta = \frac{Z_{vorh}}{Z_g} \quad (4)$$

$Z_g$  [-] erforderliche Grenzzugkraft

$\eta$  [-] Standsicherheit

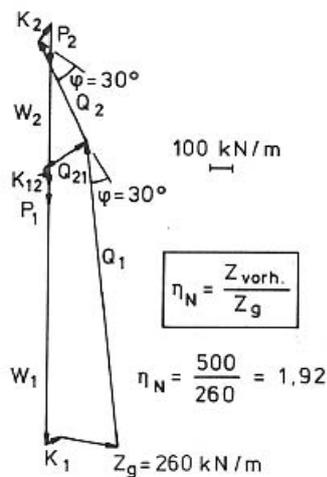
## 2. Translation mit zwei Bruchkörpern (TRA-II)

Bei diesem Ansatz von Gässler werden zwei Starrkörper untersucht, welche mit zwei linearen Hauptgleitfugen und einer linearen Zwischengleitfuge gebildet werden. Die Hauptgleitfugen konstruiert man aus zwei voneinander unabhängigen Neigungen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$ . Vom Fußpunkt der Nagelwand bis zu einer gewählten Nagelspitze verläuft geradlinig die erste Fuge ( $\vartheta_1$ ). Ab diesem Schnittpunkt steigt die zweite Fuge ( $\vartheta_2$ ) bis zur Geländeoberkante ebenfalls geradlinig an. Auch die Zwischengleitfuge wird von dort entlang der Nagelspitzen bis zur Geländeoberkante mit einer Neigung von  $\vartheta_{12}$  verlängert.

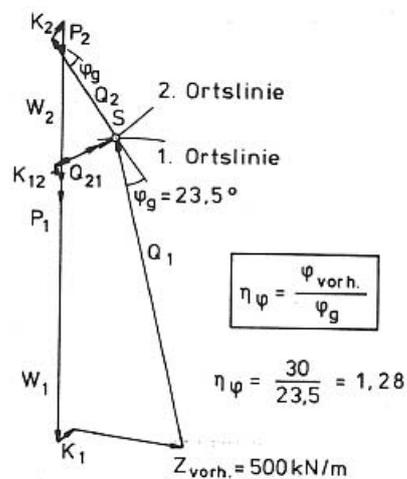


a) System mit Bodenkennwerten

b) Kräfte am System und Hodograph



c) Krafteck, geschlossen mit  $Z_g$



d) Krafteck geschlossen mit  $\varphi_g$

Abb. 32 Translation mit zwei Bruchkörpern (Gässler, 1987)

Bekannt sind das Eigengewicht der zwei Bruchkörper  $G_1$  und  $G_2$ , die Auflast  $q_1$  und  $q_2$ , die längs der Gleitfugen angreifende Kohäsionskräfte  $K_1$ ,  $K_2$  und  $K_{12}$  und die Richtung der Gleitfugenreaktionskräfte  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $Q_{12}$ . Alle Kohäsionskräfte werden durch Multiplikation der Kohäsion  $C^*$ <sup>4</sup> mit der jeweiligen Gleitfugenlänge ermittelt.

Gässler entwickelte für den Zweikörper-Bruchmechanismus zwei Berechnungsverfahren (siehe Abb. 32 c) und d)). Beim ersten Verfahren wird  $Z_g$  graphisch ermittelt und  $Z_{vorh}$  mit Gleichung 3 berechnet. Im zweiten Verfahren wird zuerst die vorhandene Zugkraft  $Z_{vorh} = 500\text{kN/m}$  (gemäß Abb. 32 d)) eingezeichnet und das Kräfteck mit dem Grenzreibungswinkel  $\varphi_g$  geschlossen.

Um die kleinste Standsicherheit zu erhalten, müssen auch bei diesem Ansatz die Neigungen der Hauptgleitfugen variiert werden.

### Vereinfachung dieses Berechnungsansatzes nach Gässler

Bei dieser Vereinfachung wird der zweite Starrkörper (Bereich ohne Vernagelung) nicht berücksichtigt. Stattdessen kann bei einem kohäsionslosen Boden die Stützkraft  $Q_{12}$  mit einer aktiven Erddruckkraft  $E_a$  ersetzt werden. Diese ist mit dem „Wandreibungswinkel“  $\delta = \varphi$  geneigt und greift an der Nagelwand an.

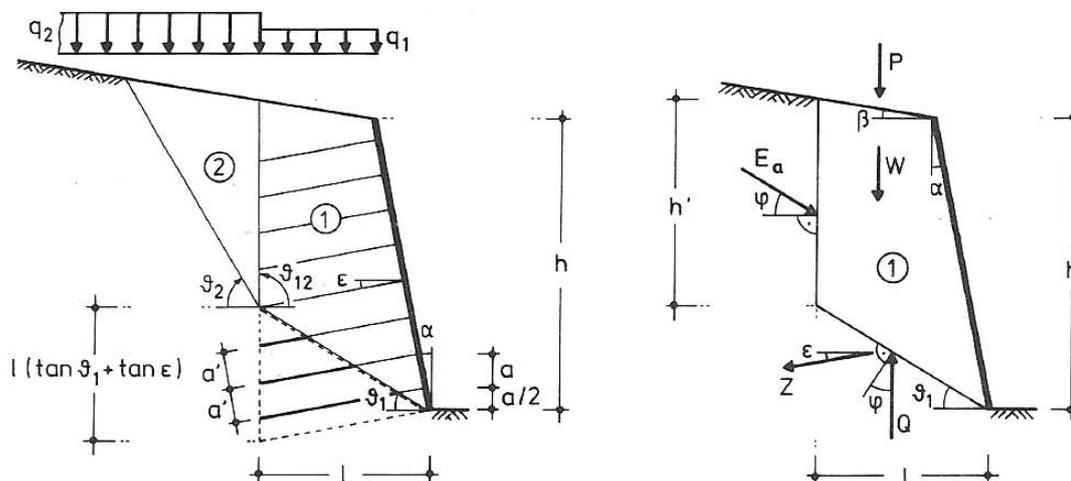


Abb. 33 Vereinfachung: Translation mit zwei Bruchkörpern (Gässler, 1987)

Die Erddruckberechnung  $E_a$  kann zum Beispiel mit dem Erddruckbeiwert  $K_a$  nach (Witt, K.J., 2008) Grundbautaschenbuch Teil 1 ermittelt werden.

Aus der Summe von horizontalen und vertikalen Kräften erhält man folgende Gleichgewichtsbedingung des Regelpfils laut Abb. 33 (für  $\beta = 0$  und  $\rho = 0$ ).

<sup>4</sup> Die Kohäsion  $C^*$  wird bereits mit einem entsprechendem Teilsicherheitsbeiwert abgemindert. (Gässler, 1987)

$$Z_g * \cos(\vartheta_1 - \varphi + \varepsilon) - ((W + P) * \sin(\vartheta_1 - \varphi) + E_a * \cos(\vartheta_1 - 2\varphi)) = 0 \quad (5)$$

mit

$$W = \frac{1}{2} \gamma * (l(2h - l * \tan \vartheta_1) - h^2 * \tan \alpha) \quad (6)$$

$$P = q_1 * (l - h * \tan \alpha) \quad (7)$$

$$E_a = \frac{1}{2} h' * (\gamma * h' + 2q_2) * K_a \quad (8)$$

$$h' = h - l * \tan \vartheta_1 \quad (9)$$

### 3. Rotation mit einem Bruchkörper (ROT-I)

Im Grenzzustand versagt der starre Bruchkörper entlang eines kreiszylindrischen Gleitkreises. Dieser wird durch den Fußpunkt der Nagelwand fixiert und hat den Radius  $r = 1,5 * h$ .

Im Gegensatz zu den vorherigen Bruchmechanismen müssen bei diesem Ansatz nicht nur die Kräfte-, sondern auch die Momentengleichgewichtsbedingungen erfüllt sein.

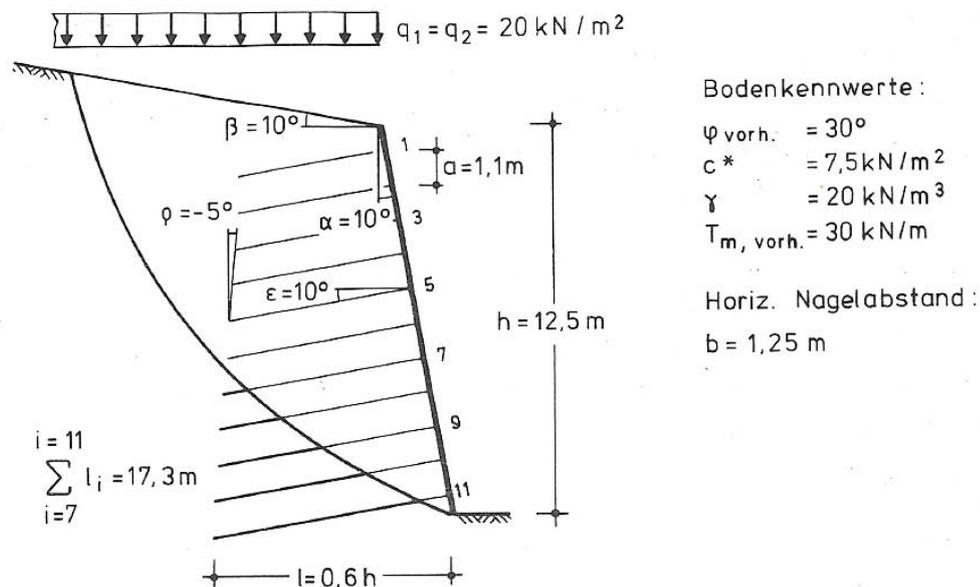


Abb. 34 Rotation mit einem Bruchkörper

Es sind die Neigung und Lage der Resultierenden der Auflast  $P$ , das Eigengewicht  $W$ , die resultierende Kohäsionskraft  $K$ , die Gleitflächenreaktionskraft  $Q$  und die erforderliche Zugkraft  $Z_g$  bekannt. Die Kohäsionskraft  $K = l_s * c$  ( $l_s = \text{Sehnenlänge}$ ) verläuft parallel zur Sehne und liegt in einem Abstand von  $r_c = l_b / l_s * r$  ( $l_b = \text{Kreisbogenabschnitt}$ ) vom Kreismittelpunkt entfernt. Die Auflast  $P$ , das Eigengewicht  $G$  und die Kohäsion  $K$  werden zu einer Resultierenden  $R$  zusammengefasst. Mit einem Momentengleichgewicht kann die Lage der Resultierenden  $R$  definiert werden. Die erforderliche

Nagelzugkraft  $Z_g$  wird zeichnerisch ermittelt (siehe Abb. 35). Sie ist mit dem Winkel  $\varepsilon$  zur Horizontalen geneigt und liegt im Nagelschwerpunkt  $S_n$ . Dieser ergibt sich aus allen im passiven Boden liegenden Nägeln. Die aus Normal- und Reibungskraft erzeugte Resultierende  $Q$  liegt im aus  $R$  und  $Z_g$  konstruierten Schnittpunkt  $S$  und verläuft durch den Tangentenpunkt  $T$ . Dieser liegt mit dem Abstand  $r_\varphi = r \cdot m \cdot \sin \varphi_{vorh}$  ( $m=1,03$ ) vom Mittelpunkt  $M$  entfernt.

Zeichnerisch wird die erforderliche Grenznagelzugkraft  $Z_g$  konstruiert und daraus die Schubkraft  $T_{m,g}$  berechnet.

$$T_{m,g} = Z_g \cdot b / \sum l_i \quad (10)$$

$T_{m,vorh}$  [kN/m] mittlere Grenzschubkraft längs des Nagels

$\sum l_i$  [m] Summe der Nagellängen im ruhenden Boden (passiver Bereich)

$t$  [m] horizontaler Abstand der Nägel

Der Vernagelungsgrad  $\mu_g$ , welcher ein Maß der Bewehrung des vernagelten Bodenkörpers ist, hängt von der Schubkraft  $T_{m,g}$ , der Feuchtwichte  $\gamma$  und dem Nagelraster  $a$  (vertikal) und  $b$  (horizontal) ab.

$$\mu_g = T_{m,g} / (\gamma \cdot a \cdot b) \quad (11)$$

Der Winkel  $\vartheta$  und der Radius  $r$  müssen so lange variiert werden, bis sich ein maximaler Vernagelungsgrad im Grenzzustand ergibt.

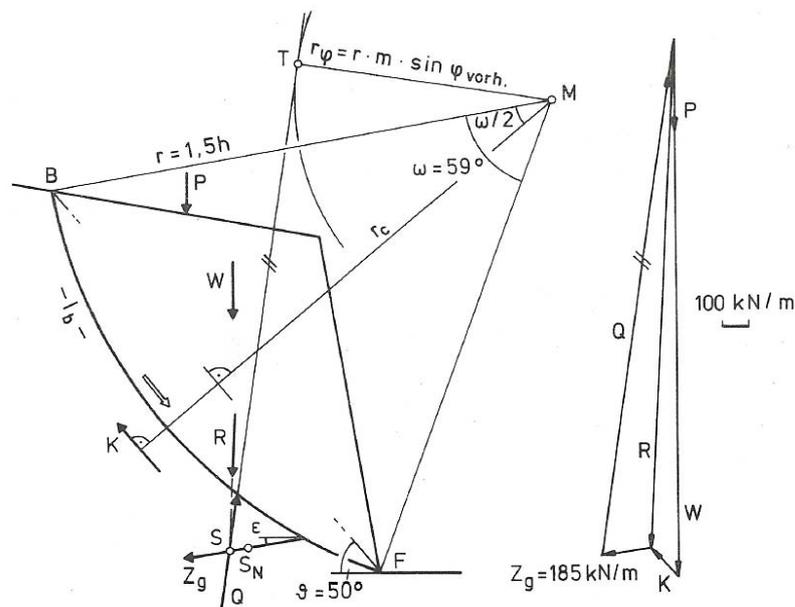


Abb. 35 Kräfte am System (links) und Kräfteck (rechts) bei ROT-I

#### 4. Rotation mit zwei Bruchkörpern (ROT-II)

Gässler hat als letzten Starrkörper-Bruchmechanismus die Zweikörper-Rotation betrachtet. Dabei werden ähnlich wie beim Translationsmechanismus zwei Starrkörper konstruiert, welche entlang von kreiszylindrischen Gleitfugen versagen. Wie in Abb. 36 ersichtlich, lassen sich die Bruchfiguren geometrisch ermitteln. Gässler hat verschiedene Werte anhand von Modellversuchen empirisch ermittelt.

Auch bei diesem Ansatz wird die erforderliche Nagelzugkraft  $Z_g$  im Grenzzustand grafisch ermittelt (siehe Abb. 36) und mit der Grenzschubkraft der erforderliche Vernagelungsgrad  $\mu_g$  ermittelt.

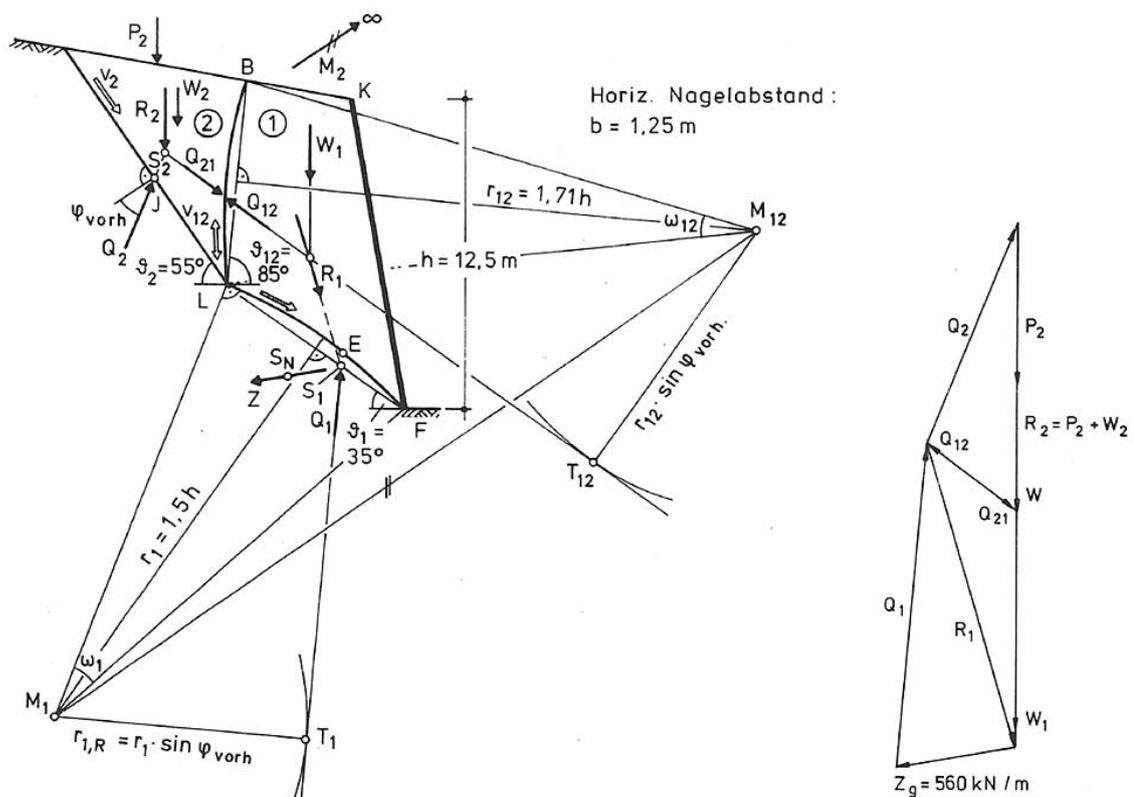


Abb. 36 Kräfte am System (links) und Krafteck (rechts) bei ROT-II

Die detailliertere Beschreibung der Gleitkreise und des Ansatzes ist seiner Dissertation zu entnehmen. Er stellt darin auch einen Vergleich der einzelnen Methoden anhand eines Beispiels da.

### 2.6.2 Ansatz nach Bishop

Bei diesem Ansatz nach Bishop wird auf die Dissertation von Herrn Renk Bezug genommen (Renk, 2011).

Es ist eine Erweiterung des „Rotationsmechanismus mit einem Bruchkörper“ nach Gässler. Der Starrkörper versagt ebenfalls entlang einer kreiszylindrischen Gleitfuge, wobei vereinfachende Annahmen getroffen werden:

- Die Nägel werden nur auf reinen Zug beansprucht.
- Der Fußpunkt der Nagelwand ist ein Zwangspunkt für jeden Gleitkreis.
- Die vertikalen Lamellenkräfte und der Porenwasserdruck werden ignoriert.

Die maximal aufnehmbare Zugkraft  $T_n$  pro Laufmeter wird mit der Grenzmantelreibung  $\tau_m$ , dem Nageldurchmesser  $D$ , der Nagellänge im ruhenden Boden  $L_a$  und des horizontalen Nagelabstandes  $t$  errechnet.

$$T_n = \tau_m * \pi * D * L_a / t \quad (12)$$

Mit einer Unterteilung des Starrkörpers in mehrere Lamellen und deren Gleichgewichtsbetrachtung lassen sich die Normalkräfte  $N_i$  an den einzelnen Scherfugen berechnen. Dabei werden alle Scherfestigkeitsparameter mit der Sicherheit  $\eta$  abgemindert.

$$N_i = \frac{G_i + P_i - (c' * l_i / \eta) \sin \theta_i + Z_i * \sin \varepsilon_i}{\cos \theta_i + (\tan \varphi' / \eta) \sin \theta_i} \quad (13)$$

Wird das gesamte Modell betrachtet und um den Kreismittelpunkt das Momentengleichgewicht gebildet, errechnet sich laut erweitertem Ansatz von Bishop die Sicherheit  $\eta$  mit:

$$\eta = \frac{\sum_i \frac{1}{m_{a,i}} (b_i * c' + (G_i + P_i + Z_i * \sin \varepsilon_i) \tan \varphi') + \eta \sum_i Z_i * \cos(\theta_i + \varepsilon_i)}{\cos \theta_i + (\tan \varphi' / \eta) * \sin \theta_i} \quad (14)$$

mit

$$m_{a,i} = \cos \theta_i + (\tan \varphi' / \eta) * \sin \theta_i \quad (15)$$

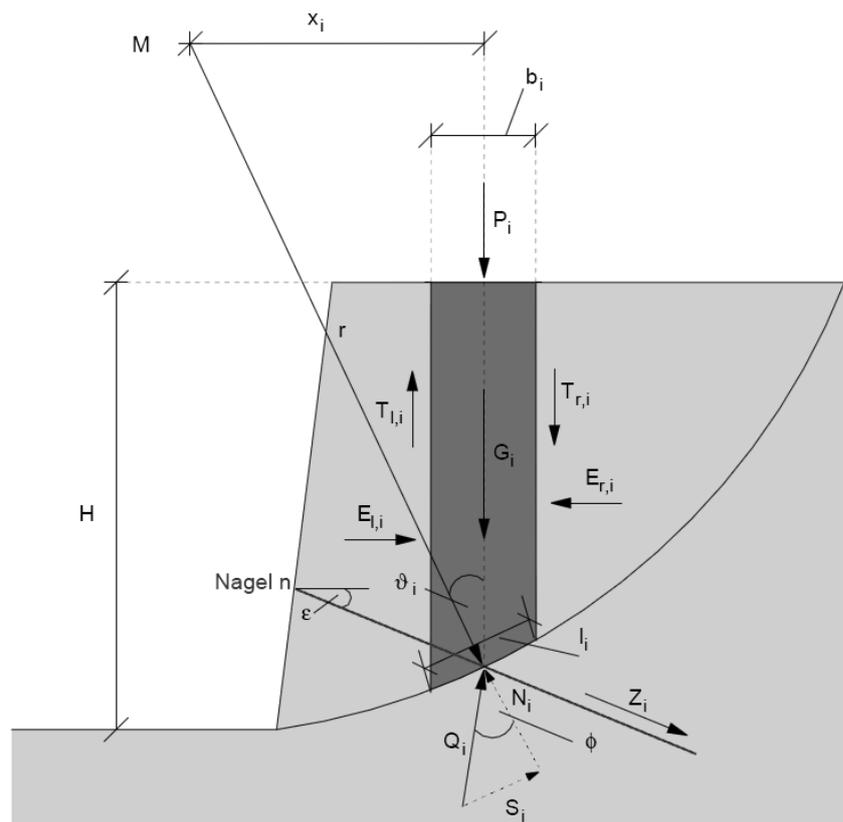


Abb. 37 Kräfte am System nach Bishop (Renk, 2011)

### 2.6.3 Ansatz nach Bang

Bei diesem Ansatz nach Bang wird auf die Dissertation von Herrn Renk Bezug genommen (Renk, 2011).

Bang untersucht ebenfalls einen Starrkörper-Bruchmechanismus im Grenzzustand. In seinem Ansatz versagt dieser Bruchkörper entlang einer parabelförmigen Gleitfuge, welche durch  $y = x^2 / (a^2 * H)$  beschrieben wird. Der Scheitelpunkt verläuft durch den Fußpunkt der Nagelwand und die Länge der Gleitfuge kann mit dem Parameter  $a$  variiert werden. „Es sei angemerkt, dass aus kinematischer Sicht der Ansatz einer parabelförmigen Gleitfuge fragwürdig ist. Das Abrutschen eines Starrkörpers entlang einer parabelförmigen Gleitfuge ist nicht ohne Kontaktverlust oder Dilatanz möglich!“<sup>5</sup>

Für diesen Ansatz sind folgende geometrische und konstruktive Voraussetzungen gefordert:

- Alle Nägel haben eine konstante Länge und es werden nur Zugkräfte berücksichtigt.

<sup>5</sup> (Renk, 2011); S.14

- Die Frontseite muss vertikal sein ( $\alpha = 0$ ).
- Die Geländeoberkante verläuft horizontal ( $\beta = 0$ ).
- Es darf keine Auflast  $P = 0$  an der Geländeoberkante angesetzt werden.

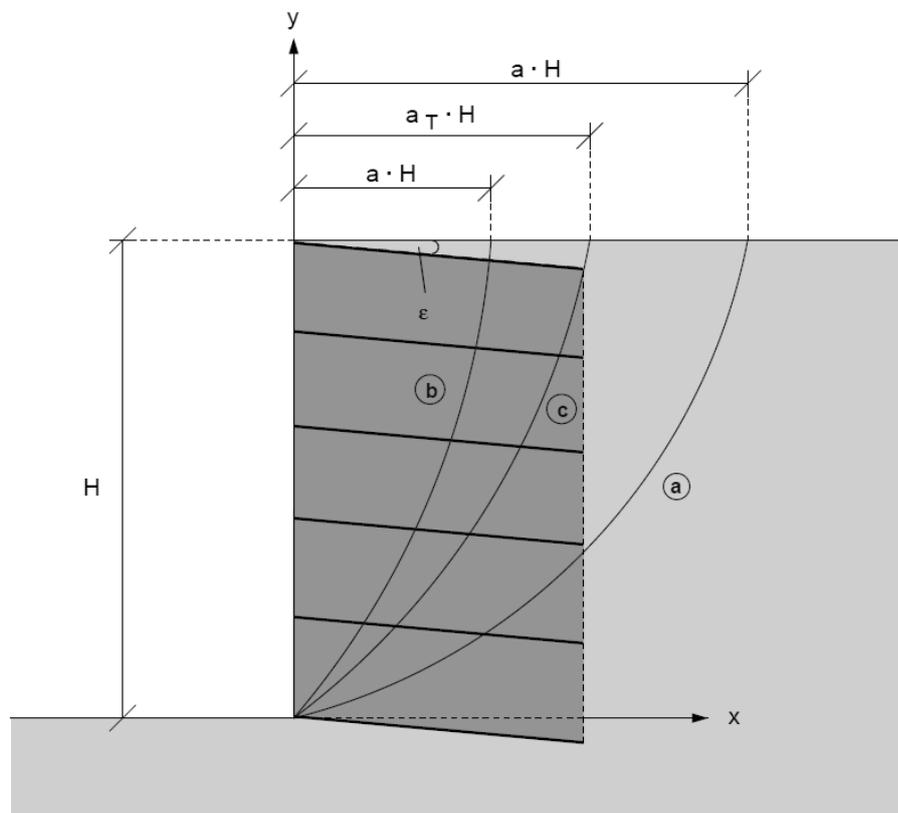


Abb. 38 Gleitfugen nach Bang a verläuft durch Verbundkörper Boden-Nagel und dem Boden b verläuft ausschließlich im Verbundkörper

Die Gleitfuge c ist die Grenzgleitfuge zwischen Zustand a und b und ist durch den Fußpunkt der Wand und dem Endpunkt des obersten Nagels gegeben.

Durch Variieren der Parabellage kann die geringste Standsicherheit bestimmt und das Grenzgleichgewicht gebildet werden. Das Verhältnis der treibenden Kräfte  $S_D$  muss gleich den rückhaltenden Kräften  $S_R$  sein.

$$S_D = S_R \quad (16)$$

Beim Ansatz von Bang ist der globale Sicherheitsfaktor  $FS$  derselbe, mit dem die Kohäsion  $FS_c$  und der Reibungswinkel  $FS_\varphi$  abgemindert werden. Diese Sicherheitsfaktoren werden bei einem gewählten Scherfugenverlauf iterativ variiert, bis ein Gleichgewicht gegeben ist. Im Gegensatz zu einer herkömmlichen geotechnischen Berechnungsmethode wird der Reibungswinkel direkt mit  $FS_\varphi$  abgemindert.

$$\eta = FS_{\varphi} = FS_c \quad (17)$$

$$\varphi_{eff} = \varphi_{vorh}/FS_{\varphi} \quad (18)$$

Zur Berechnung der Standsicherheit der Bodenvernagelung wird der Starrkörper in zwei Lamellen mit vertikalem Stoß unterteilt (siehe Abb. 39). Dabei gibt es zwei Fälle zu betrachten.

**Fall 1)  $a > a_T$ :** Element 1 liegt ausschließlich im Verbundkörper Nagel-Boden und Element 2 im restliche Teil des Bruchkörpers (Boden).

**Fall 2)  $a < a_T$ :** Hier werden die zwei Elemente mit einer Vertikalen beim Schnittpunkt der Gleitfuge mit der obersten Nagelreihe getrennt. Element 1 (Boden-Nagel) befindet sich links und Element 2 (Boden) rechts davon.

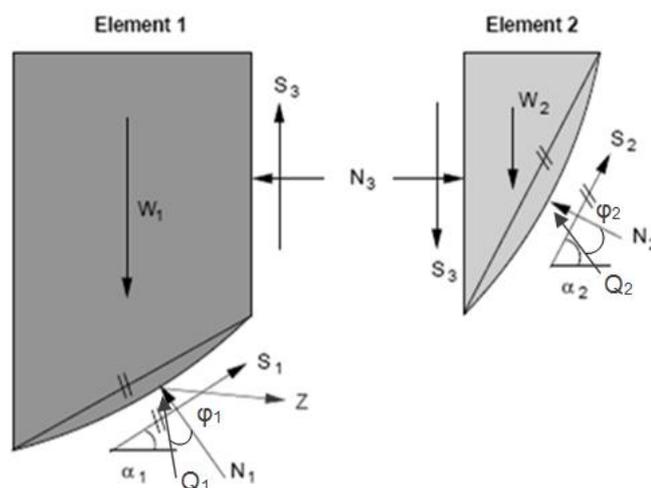


Abb. 39 Bruchkörper in zwei Lamellen geteilt und entsprechende Kräfte angesetzt

Zur Erläuterung wird der Fall 1 genauer betrachtet. Es wird zu Beginn angenommen, dass beim Stoß der beiden Elemente in horizontaler Richtung der Erdruchdruck und  $S_3 = N_3 \cdot \mu$  ( $\mu$  = Reibungsbeiwert) wirkt. Mit dieser Annahme, dem Eigengewicht  $W_2$  aus Element 2, einem Startwert  $FS_c = FS_{\varphi}$  kann  $S_3$  und  $N_2$  am Element 2 ermittelt werden. Dabei ist anzumerken, dass  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  der selben Neigung wie die der Sekantensteigung der Gleitfuge entsprechen. Am Element 2 greift neben der Gewicht-, Kohäsions- und Reibungskraft zusätzlich die Nagelzugkraft  $Z$  an. Diese wird mit der im passiven Boden liegenden Nagellängen  $l(i)$  und der tiefenabhängigen Mantelreibung  $\tau_m(i) = \sigma_n(i) \cdot \tan \varphi_{eff}$  berechnet. Dafür muss die mittlere Spannung  $\sigma_n(i)$  für jeden Nagel berechnet werden.

$$\sigma_n(i) = \frac{\sigma_z(i) * \cos^2 \varepsilon - \sigma_x(i) * \sin^2 \varepsilon}{\cos 2\varepsilon + \sin 2\varepsilon * \tan \varphi} \quad (19)$$

mit

$$\bar{z}(i) = z(i) + (l(i) * \cos \varepsilon - x(i)) * (\tan \varepsilon / 2) \quad (20)$$

$$\sigma_z(i) = \gamma * \bar{z}(i) \quad (21)$$

$$\sigma_x(i) = K_o * \sigma_z(i) \quad (22)$$

$\sigma_z(i)$  [kN/m<sup>2</sup>] Vertikalspannung in der Tiefe  $\bar{z}(i)$

$\sigma_x(i)$  [kN/m<sup>2</sup>] Horizontalspannung in der Tiefe  $\bar{z}(i)$

$K_o$  [-] Erdruhedruckbeiwert

$t$  [m] Horizontaler Abstand der Nägel

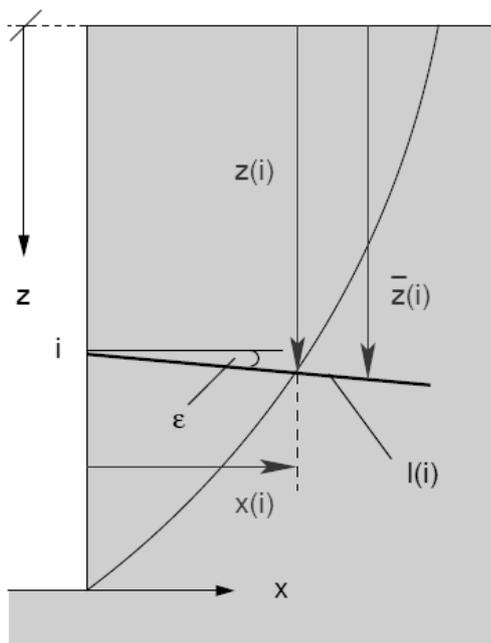


Abb. 40 Geometrische Bezeichnung zur Berechnung von  $\sigma_n(i)$

Die Nagelzugkraft  $Z$  lässt sich wie folgt berechnen.

$$Z = \sum (\pi * D * l(i) * \tau_m(i) + C_{eff} / t) \quad (23)$$

$D$  [m] Nageldurchmesser

$C_{eff}$  [kN/m<sup>2</sup>] Abgeminderte Kohäsion  $c_{eff} = c_{vorh} / FS_c$

$t$  [m] Horizontaler Abstand der Nägel

Die rückhaltenden Kräfte  $Q_i$  (siehe Abb. 39) werden durch Iteration der Sicherheitsfaktoren  $FS_c = FS_\varphi$  ermittelt. Sobald  $N_i$  im Zuge einer Gleichgewichtsbetrachtung der Horizontalkräfte das Gleiche ergibt wie durch die Betrachtung der Vertikalkräfte, ist der

Sicherheitsfaktor  $\eta = FS_c = FS_\varphi$  für die ermittelte Gleitfuge errechnet. Um wiederum die geringste Standsicherheit überprüfen zu können, muss die Form der Parabel mit  $a$  variiert werden. Es ist hier anzumerken, dass die Größe der Zwischenkraft  $N_3$  bzw. die Größe des Koeffizienten  $\mu$  keinen Einfluss auf die globale Sicherheit der Vernagelung hat, da die zwei betrachteten Elemente ohnehin wie ein geschlossener Starrkörper wirken.

### 2.6.4 Ansatz nach Janbu

Im Folgenden wird eine Erweiterung des Ansatzes von Janbu erläutert. Auch dieser Ansatz wird auf die Dissertation von Herrn Renk bezogen. (Renk, 2011)

Es handelt sich um einen Starrkörper-Bruchmechanismus, welcher im Grenzzustand entlang einer polygonalen Gleitfuge versagt. Hierbei sei anzumerken, dass aus kinematischer Sicht das Gleiten der Starrkörper keine polygonale Versagenslinie haben kann. Für die Berechnung wird der starre Versagenskörper in  $n$  Lamellen unterteilt und das Gleichgewicht mit vertikalen und horizontalen Kräften an einer Lamelle gebildet.

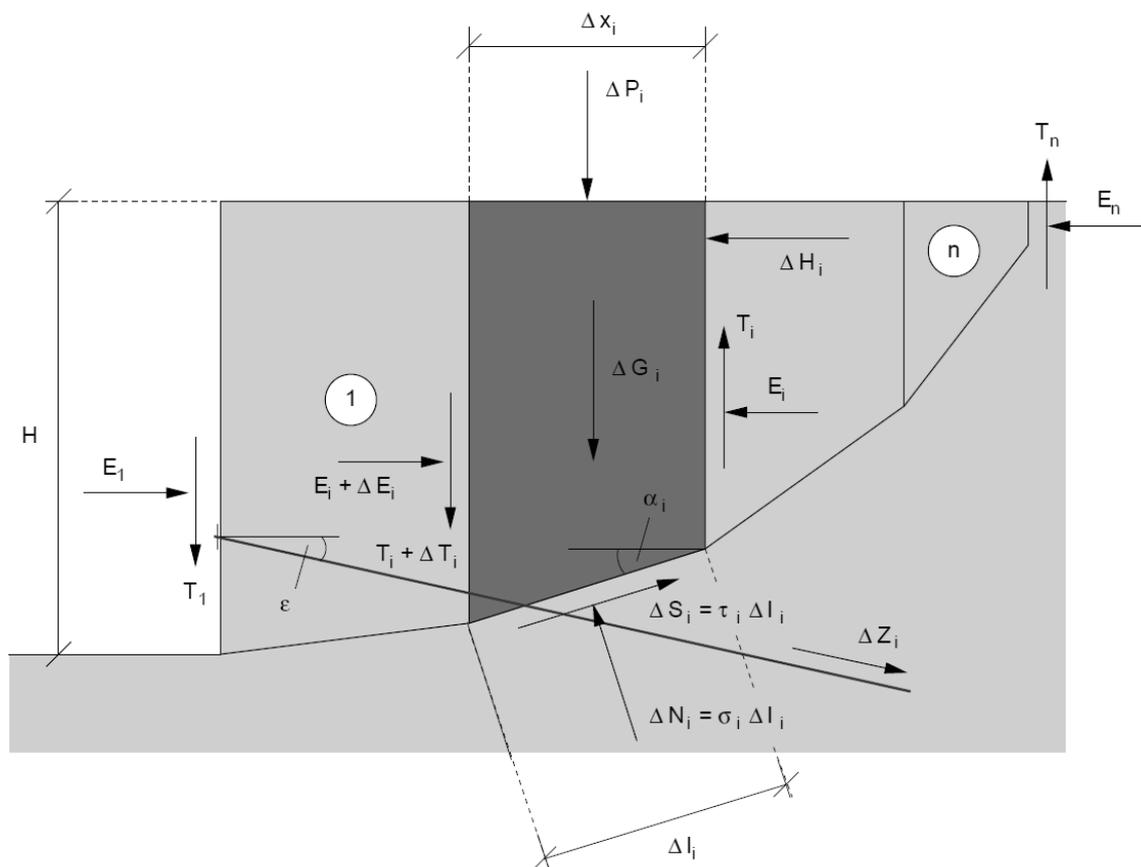


Abb. 41 An einer Lamelle angreifenden Kräfte

Für die detailliertere Ableitung wird auf die Dissertation von Renk verwiesen. Nachfolgend wird nur der grobe Ablauf beschrieben und die wichtigsten Formeln werden angeführt.

Die Standsicherheit des Starrkörpers errechnet sich nach der folgenden Herleitung.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n A_i / n_{\alpha,i}}{E_1 - E_n + \sum_{i=1}^n B_i} \quad (24)$$

$E$  [kN] Aktiver Erddruck an der Stelle 1 oder n

$$A_i = [c'_i + (p_i + t_i - u_i) * \tan \varphi'_i] * \Delta x_i \quad (25)$$

$c'_i$  [kN/m<sup>2</sup>] Kohäsion an der Stelle  $i$

$u_i$  [kN/m<sup>2</sup>] Porenwasserdruck

$$B_i = \Delta Q_i + (p_i + t_i) * \Delta x_i * \tan \alpha_i \quad (26)$$

$$n_{\alpha,i} = \frac{1 + (1/\eta) * \tan \varphi'_i * \tan \alpha_i}{1 + \tan^2 \alpha_i} \quad (27)$$

$\eta$  [-] Sicherheit

mit

$$p_i = \Delta W_i / \Delta x_i \quad (28)$$

$$\Delta W_i = \Delta P_i + \Delta G_i + \Delta Z_i * \sin \varepsilon \quad (29)$$

$$\Delta Q_i = \Delta H_i + \Delta Z_i * \cos \varepsilon \quad (30)$$

Mit der Vereinfachung nach Janbu kann  $t_i$  zu Null gesetzt werden. Der daraus resultierende Fehler wird am Ende mit dem Korrekturfaktor  $f_0$  zur Gänze eliminiert.

$$\eta_{kor} = f_0 * \eta \quad (31)$$

Um die geringste Standsicherheit zu erhalten, muss die ungünstigste Bruchform ermittelt werden.

### 2.6.5 Vergleich der Ansätze

In diesem Kapitel werden fünf für die Praxis relevante Berechnungsansätze (Gässler T1, Gässler T2, Gässler R1, Bishop und Janbu) verglichen. Die Untersuchung soll zeigen, inwieweit sich die Sicherheiten der einzelnen Ansätze unterscheiden bzw. warum es zu großen Streuungen kommt.

Renk (Renk, 2011) hat in seiner Dissertation den Einfluss der Eingangsparameter im Hinblick auf die Sicherheit untersucht, indem er den Reibungswinkel, die Kohäsion und die Mantelreibung  $\tau_m$  variiert und damit die Sicherheiten berechnet hat. Nachdem es dabei große Streuungen der Sicherheiten gibt, ist es nicht möglich, eine Aussage zu treffen, wie konservativ oder sicher die einzelnen Berechnungsansätze sind.

In dieser Arbeit werden für die Vergleiche der Ansätze zwei analytische Berechnungsprogramme (Slide 6.0 und GGU – Stability 10) herangezogen, zum einen um die Sicherheiten einer vorgegebenen Bruchfigur zu ermitteln und zum anderen um die geringste Sicherheit einer Nagelwand vergleichen zu können. Beim ersten Vergleich wird zusätzlich zu diesen Programmen die Sicherheit der drei Berechnungsansätze von Gässler (T1, T2, R1) durch händische Berechnungen ermittelt und ebenfalls gegenübergestellt.

Für diese Untersuchung wird fiktiv eine standardmäßige Bodenvernagelung angenommen, bei der es sich um einen 6 m hohen und 85 ° geneigten Geländesprung handelt, welcher mit 3 m langen und 10 ° geneigten Bodennägeln gesichert wird (siehe Abb. 42). Die Bodenparameter und Nageleigenschaften, sowie die Anordnung der Nägel sind in Tab. 18 angeführt.

Tab. 18 Boden- und Nagelparameter

Boden			Nagel (für Slide und GGU)		
Parameter	Symbol	Wert	Parameter	Symbol	Wert
Wichte	$\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>	Typ	-	Bodennagel
Reibungswinkel	$\phi$	35°	Berechnungsmethode	-	passive
Kohäsion	c	0,1 kN/m <sup>2</sup>	Horizontalabstand	h	1,0 m
Steifigkeitstyp	-	Mohr-Coulomb	begrenzte Zugkraft	$Z_{\text{begr}}$	100 kN
Wasser	-	kein Wasser	Ausziehfestigkeit	$T_m$	50 kN/m

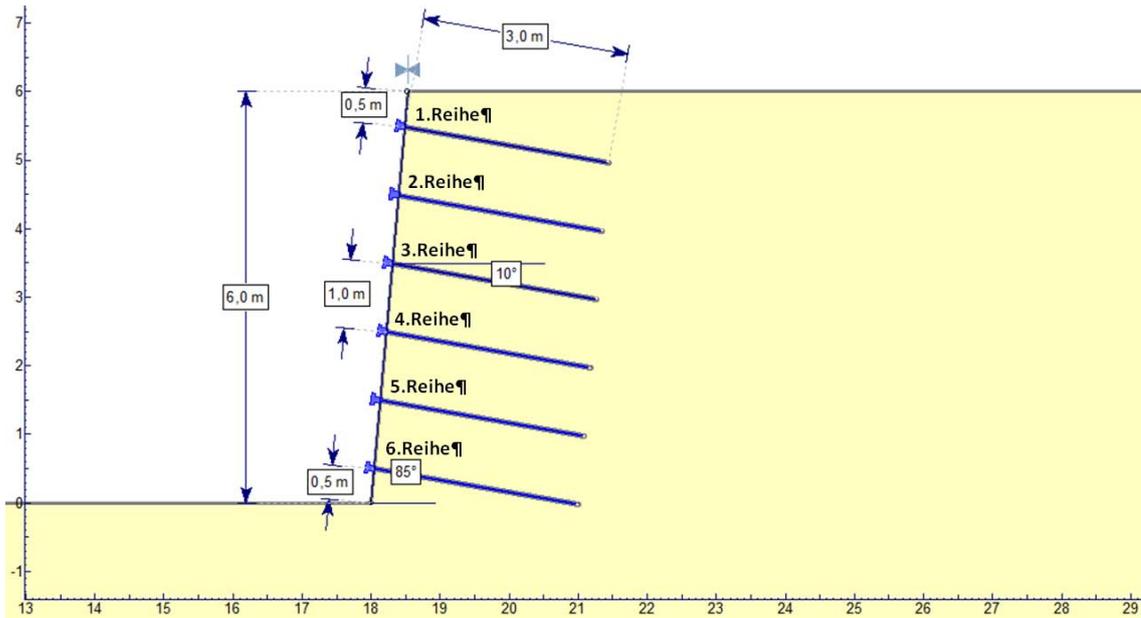


Abb. 42 Regelquerschnitt der Bodenvernagelung für den Vergleich der Ansätze

**Ansatz von Gässler**

Für die Berechnung der Ansätze von Gässler wird die Bruchfigur durch zwei Fixpunkte festgelegt. Diese befinden sich zum einen am Fußpunkt der Nagelwand und zum anderen am Endpunkt des Nagels der dritten Nagelreihe (siehe Abb. 43). Dieser definierte Bruchkörper weist nicht die geringste Standsicherheit auf, was für den Vergleich der Ansätze nicht von Bedeutung ist. Eine flachere Bruchgerade würde zu keiner Lösung des Ansatzes von Gässler führen. Das Problem liegt an der Neigung der rückhaltenden Kraft  $Q$ . Ergibt sich der ungünstige Winkel  $\alpha \geq 90^\circ$  für die Kraft  $Q$  (abhängig vom Reibungswinkels  $\varphi$  und von Neigung  $\vartheta$ ), ist diese zum Hang geneigt und erzeugt eine unerwünschte Druckkraft in den Nägeln (siehe Abb. 43 a).

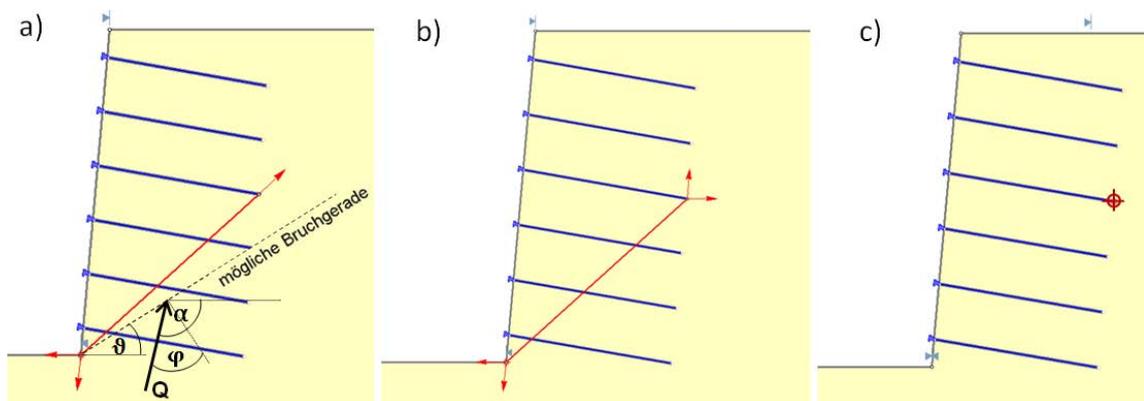


Abb. 43 Fixierte Bruchfiguren für a) Gässler T1 b) Gässler T2 c) Gässler R1

Im ersten Schritt wird die Nagelwand mit dem gewählten Bruchkörper im AutoCAD 2011 konstruiert (siehe Abb. 44, Abb. 47, Abb. 50 und Abb. 51), um damit die Flächen,

beziehungsweise Längen und daraus resultierenden Kräfte (Eigengewicht  $G$  und Kohäsion  $K$ ) ermitteln zu können. Nachdem alle Neigungen der Kräfte bekannt sind, kann das Kräftedreieck für die einzelnen Ansätze gebildet und die Standsicherheitsberechnung nach Gässler durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.6.1).

Die gleiche Bruchfigur wird im Slide 6.0 und GGU-Stability gebildet, um ebenfalls die Sicherheit zu errechnen (siehe Abb. 45 bis Abb. 53).

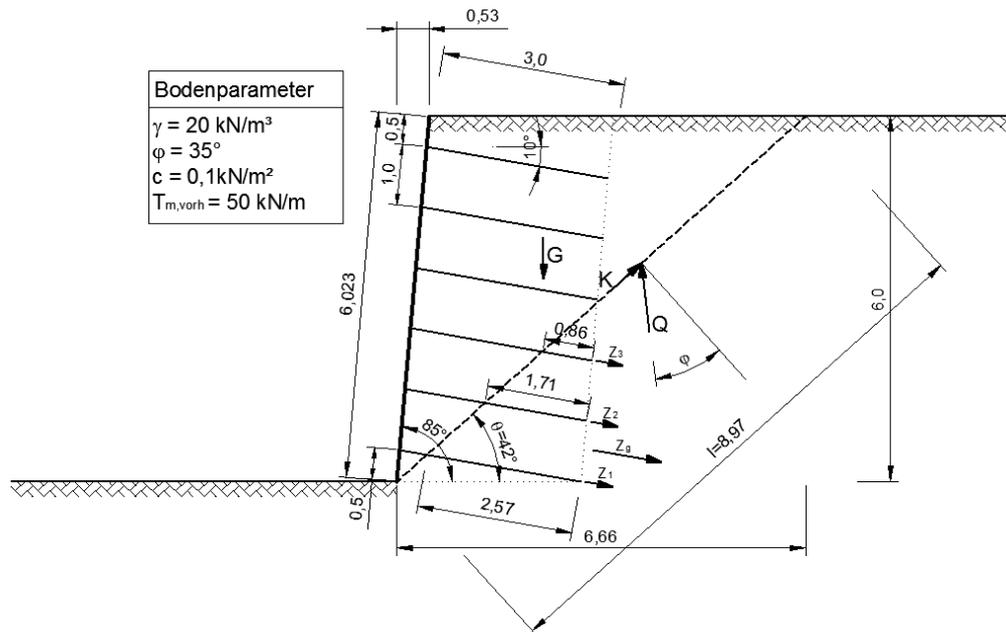


Abb. 44 Bruchfigur nach Gässler T1

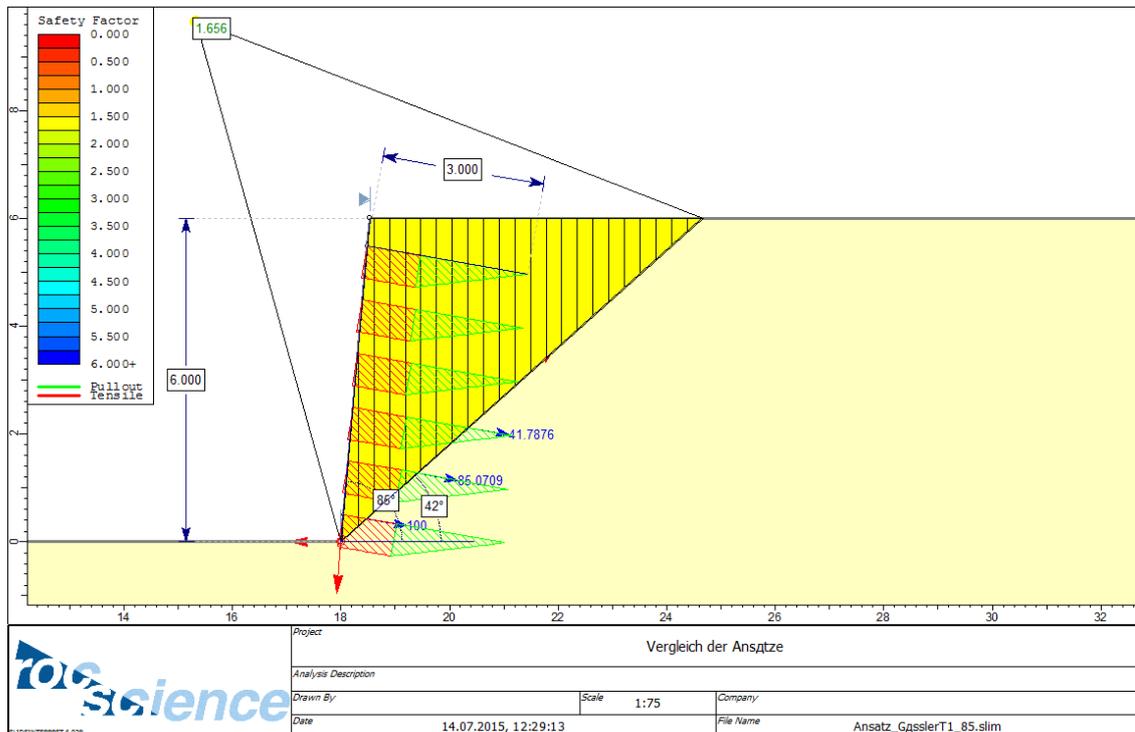


Abb. 45 Bruchfigur nach Gässler T1 mit Slide untersucht



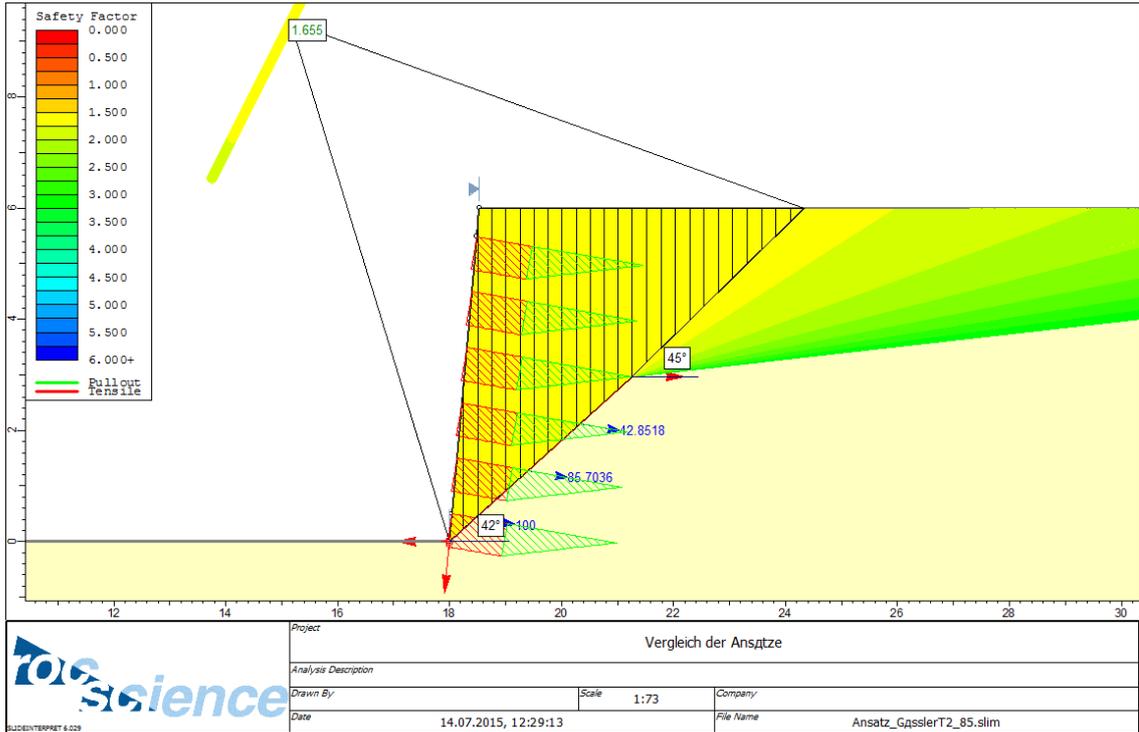


Abb. 48 Bruchfigur nach Gässler T2 mit Slide untersucht

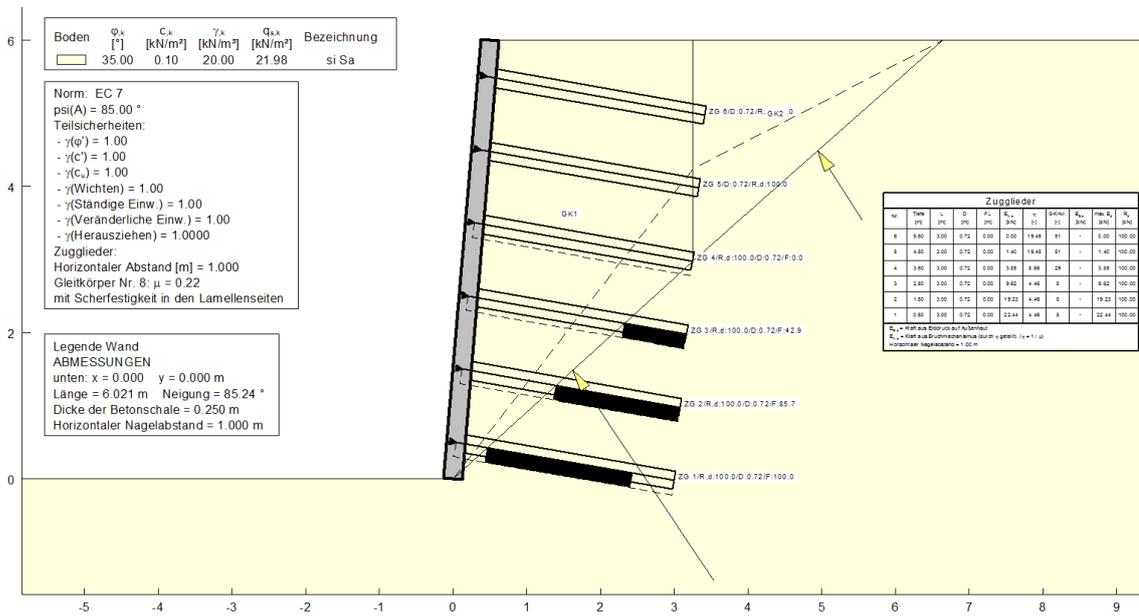


Abb. 49 Bruchfigur nach Gässler T2 mit GGU untersucht

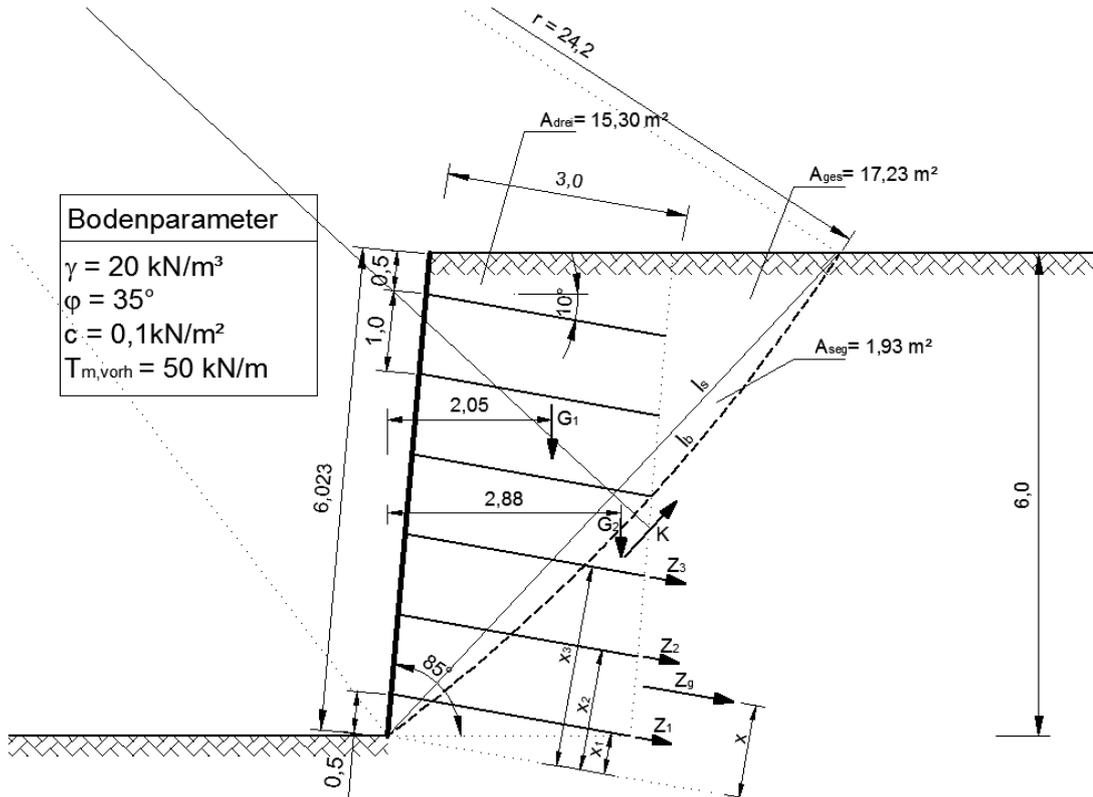


Abb. 50 Bruchfigur nach Gässler R1

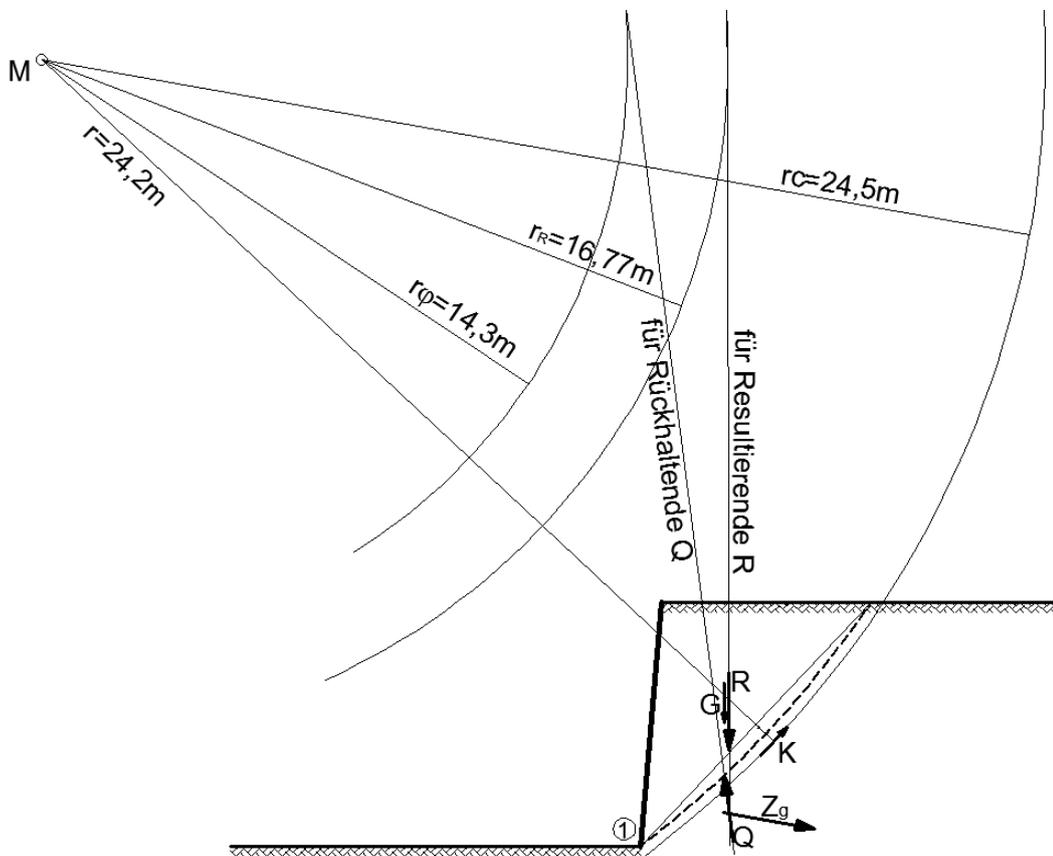


Abb. 51 Gässler R1 Berechnungshilfe

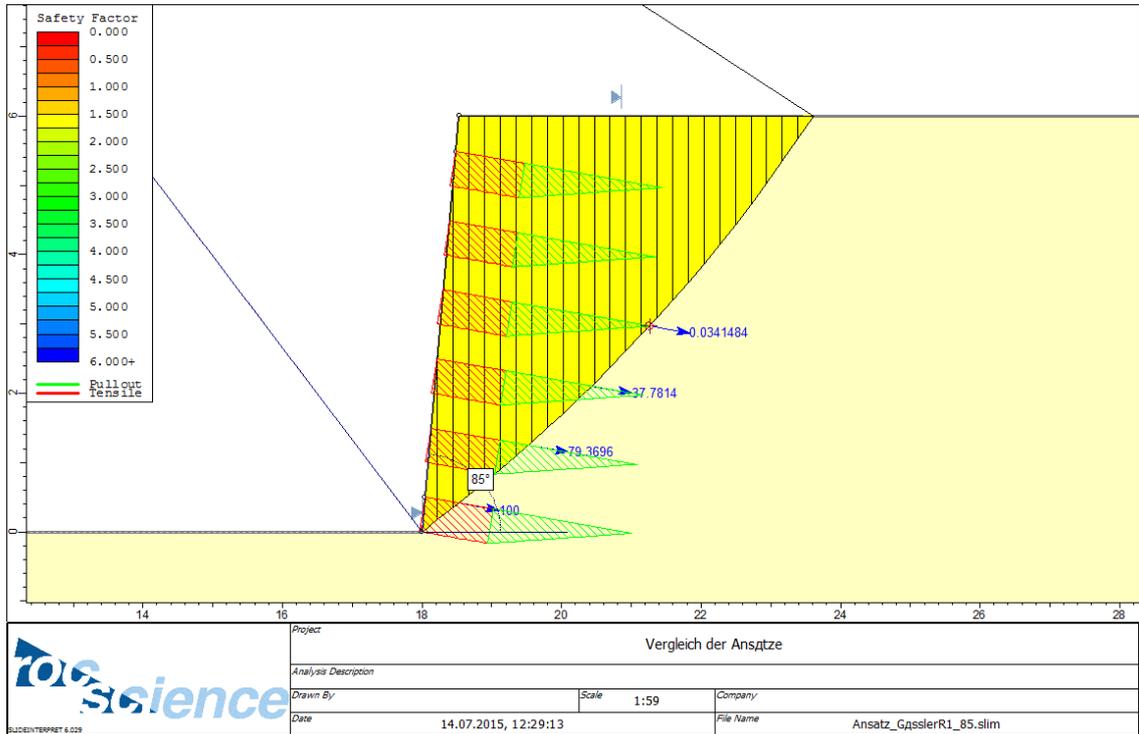


Abb. 52 Bruchfigur nach Gässler R1 mit Slide untersucht

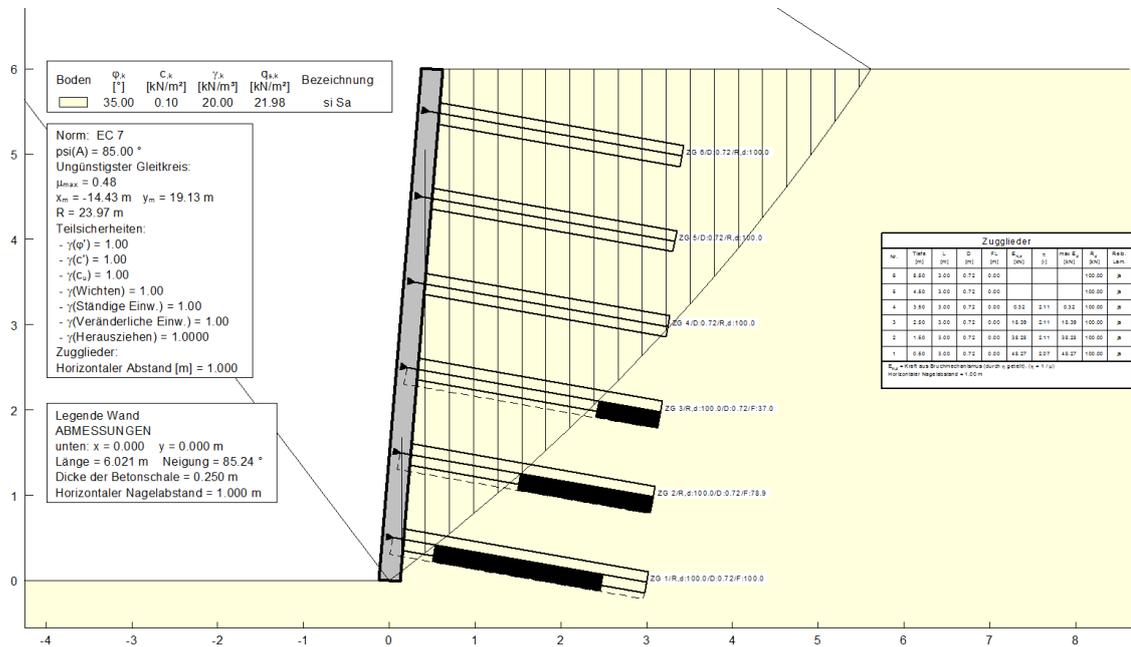


Abb. 53 Bruchfigur nach Gässler R1 mit GGU untersucht

### Bishop und Janbu

Die Sicherheiten für die Ansätze nach Bishop und Janbu laut Tab. 19 (siehe S. 61) werden nur mit Slide 6.0 und GGU-Stability berechnet und verglichen. Bei beiden

Programmen wird der Versagenskörper (Bishop = kreisförmig, Janbu = polygonal) nicht vorgegeben, sondern automatisch gesucht und die geringste Standsicherheit analysiert (siehe Abb. 54 bis Abb. 57).

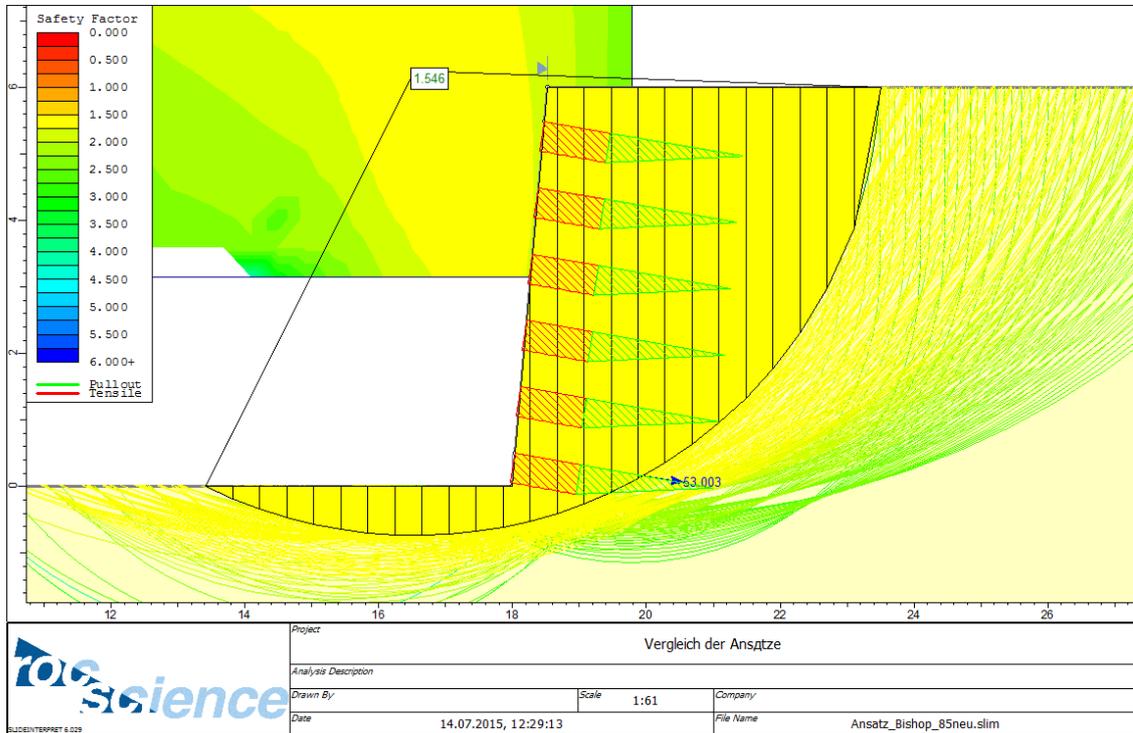


Abb. 54 Gleitkreis nach Bishop mit Slide untersucht

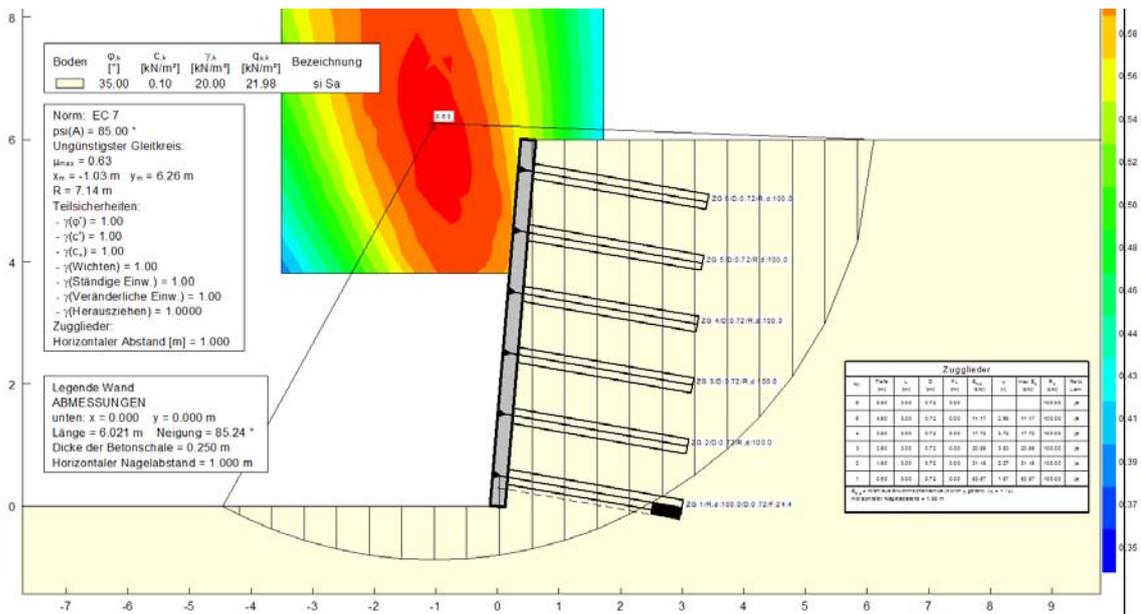


Abb. 55 Gleitkreis nach Bishop mit GGU untersucht

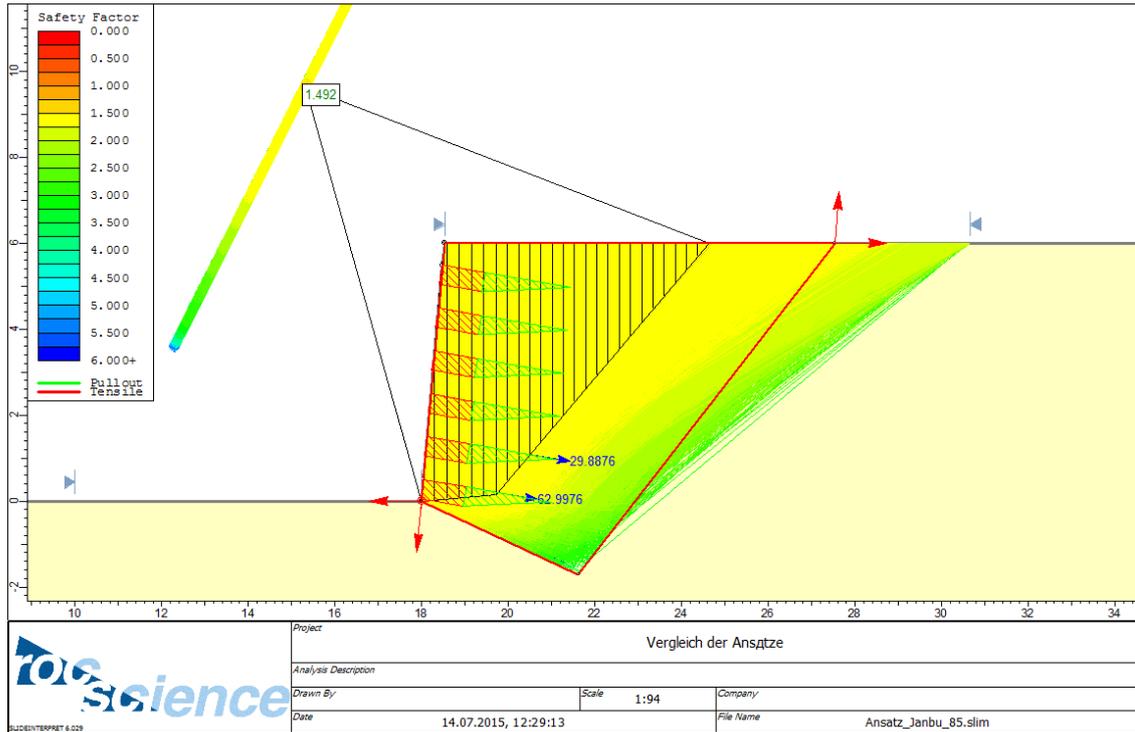


Abb. 56 Bruchfigur nach Janbu mit Slide untersucht

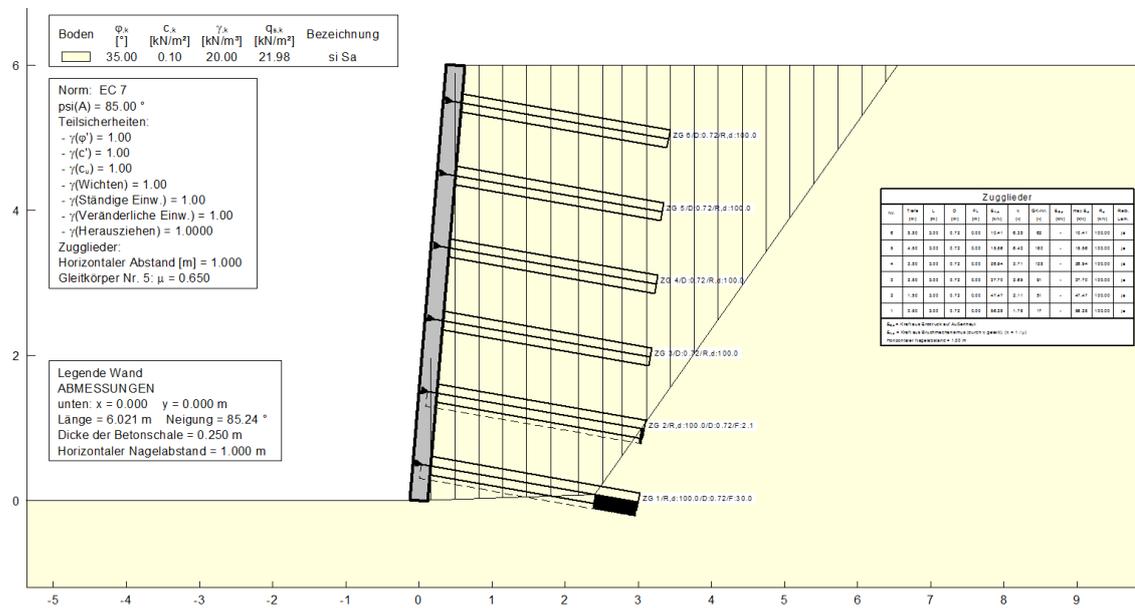


Abb. 57 Bruchfigur nach Janbu mit GGU untersucht

### Interpretation der Ergebnisse

Beim Vergleich der Ergebnisse, die in Tab. 19 zusammengefasst sind, lassen sich große Streuungen erkennen, wobei der markanteste Unterschied in den ermittelten Sicherheiten zwischen den Programmberechnungen und der Handrechnung liegt.

Bevor der Eurocode 7 eingeführt wurde, kam jahrzehntlang das globale Standsicherheitskonzept zur Anwendung. Im „Handbuch Geotechnik“<sup>6</sup> wird angeführt, dass mit dem Nachweisverfahren 2\* (DIN 1054:2005) ähnliche Sicherheiten als beim alten, globalen Sicherheitskonzept errechnet werden. Beim alten Konzept werden die Sicherheitsbeiwerte erst zum Schluss auf die charakteristischen Werte der Beanspruchung angesetzt. In Österreich werden Bodenvernagelungen mit dem Nachweisverfahren 2 berechnet, welches mit NW 2\* aus Deutschland ident ist. Dabei sind die Teilsicherheitsbeiwerte auf die, aus den Einwirkungen resultierenden Beanspruchungen und auf die Widerstände des Baugrundes anzuwenden. Auf der Einwirkungsseite wird der Beiwert auf Einwirkung oder Beanspruchung angesetzt ( $\gamma_E \neq 1$  und  $\gamma_F = 1$  oder  $\gamma_E = 1$  und  $\gamma_F \neq 1$ ), hingegen bleiben die geotechnischen Kenngrößen unverändert ( $\gamma_M = 1,0$ ). Die Widerstandsseite wird mit  $\gamma_M = 1$  und  $\gamma_R > 1$  abgemindert.

Slide ermittelt, unabhängig vom Berechnungsansatz, die minimale, globale Sicherheit  $\eta$  mit der Fellenius-Regel (siehe Gleichung 32). Das bedeutet, dass die Scherfestigkeit des Bodens (Reibungswinkel  $\varphi$  und Kohäsion  $c$ ) iterativ solange erhöht oder abgemindert wird, bis die ermittelte Sicherheitszahl  $\eta$ , der angenommenen Abminderung  $\frac{c}{c_{mob}}$  bzw.  $\frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{mob}}$  entspricht. Nachdem das Programm ohne Teilsicherheiten rechnet, wird somit Nachweisverfahren 2 verwendet. Der Reziprokwert aus der globalen Sicherheit ergibt den Ausnutzungsgrad  $\mu$ , welcher laut Eurocode 7 kleiner gleich 1,0 sein muss.

$$\eta = \frac{1}{\mu} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{mob}} = \frac{c}{c_{mob}} \geq 1,0 \quad (32)$$

Das Programm GGU mindert die Scherfestigkeit mit den Teilsicherheitsbeiwerten laut ÖNORM EN 1997 ab und wendet Nachweisverfahren 2 für den inneren Tragfähigkeitsnachweis und Nachweisverfahren 3 für die Gesamtstandsicherheit an. Um die minimale Standsicherheit zu erhalten, benützt GGU analog zum Slide die Fellenius-Regel.

<sup>6</sup> (Boley, 2011) Kapitel 5.2.6.2, S.243

Tab. 19 Vergleich der Sicherheiten der verschiedenen Ansätze

Ansatz	von Hand	Slide	GGU-Stability	
	Sicherheit $\eta$			
			mit Teilsicherheiten laut ÖNORM B 1997	ohne Teilsicherheiten <sup>4</sup>
Gässler T1*	5,59	1,66 <sup>1</sup>	1,96 <sup>3</sup>	2,94 <sup>3</sup>
Gässler T2*	5,33	1,66 <sup>1</sup>	2,86 <sup>3</sup>	4,55 <sup>3</sup>
Gässler R1*	4,83	1,65 <sup>2</sup>	1,72 <sup>2</sup>	2,08 <sup>2</sup>
Bishop**	-	1,55	1,41	1,59
Janbu**	-	1,49	1,36	1,54

\* Die Bruchfigur wird mit Slide ermittelt.  
 \*\* Die Bruchfigur wird automatisch berechnet.  
<sup>1</sup> Berechnung nach Janbu (entspricht nicht der Bruchfigur mit kleinster Sicherheit)  
<sup>2</sup> Berechnung nach Bishop (entspricht nicht der Bruchfigur mit kleinster Sicherheit)  
<sup>3</sup> Berechnung mit Blockgleitmethode (entspricht nicht der Bruchfigur mit kleinster Sicherheit)  
<sup>4</sup> Teilsicherheitsbeiwerte sind alle 1,0 (charakteristisch)

Aufgrund dieser unterschiedlichen Vorgehensweisen sind erhebliche Streuungen zwischen Slide und GGU vorhanden. Warum die Sicherheiten der Handrechnung noch höher ausfallen, liegt am Nachweisverfahren von Gässler, bei welchem die Sicherheitsanalyse auf einer Gleichgewichtsbetrachtung  $\eta = Z_{vorh} / Z_g$  beruht und die Nagelkraft  $Z_g$  mobilisiert wird. Der ausschlaggebende Parameter, welcher die Sicherheit beeinflusst, ist die Grenzschubkraft  $T_m$ , sobald diese erhöht wird, steigt die Standsicherheit an. Mit der Gleichgewichtsbetrachtung von Gässler kann auf jeden Fall die kritische Bruchfigur ermittelt werden. Es ist aber durchaus möglich, dass andere Ansätze geringere Standsicherheiten aufweisen können. Dies ist zum Beispiel für die Bemessung der äußeren Tragfähigkeit laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 nicht ausschlaggebend, da nur die Summe der Nagellängen einer kritischen Bruchfigur relevant ist (siehe Kapitel 6.1.5).

Wird eine Berechnung mittels GGU durchgeführt, muss zu Beginn bei den Einstellungen die Norm (DIN oder ÖNORM), die Bemessungssituation (BS) sowie die Schadensfolgeklasse (CC) festgelegt werden. Die Sicherheiten für GGU (siehe Tab. 19) sind mit einer angenommenen BS1 und CC1 laut ÖNORM errechnet worden. Da sowohl bei Slide als auch bei der Handrechnung nicht mit Teilsicherheiten gerechnet wird, werden in GGU alle Teilsicherheitsbeiwerte zusätzlich manuell auf 1,0 gesetzt. Ansonsten würde ein Vergleich der ermittelten Sicherheiten keinen Sinn ergeben.

Für die Ansätze nach Janbu und Bishop fallen die Ergebnisse der Sicherheiten mit Slide ( $\Delta\eta$  ca. 4%) und GGU-Stability ( $\Delta\eta$  ca. 3%) ziemlich identisch aus.

Für diese untersuchte Geometrie und den verwendeten Bodenparametern ist, im Hinblick auf die minimale Sicherheit einer Nagelwand, das Berechnungsprogramm Slide am „sichersten“. Inwieweit die Ergebnisse konservativ ausfallen, kann mit diesen Untersuchungen alleine nicht beurteilt werden. Die Untersuchung mit einer definierten Bruchgerade kann ein weiterer Grund für die großen Streuungen sein, weil die kritischen Bruchkörper (geringste Sicherheit) der einzelnen Berechnungsansätze unterschiedliche Geometrien haben.

## 2.7 Verbundverhalten von Nagel, Suspension und Boden

In diesem Kapitel wird diskutiert, wie stark bei herkömmlichen Bodenvernagelungen die verwendete Zementsuspension beansprucht wird. Betrachtet wird ein einzelner Nagel mit zwei unterschiedlichen Grenzscherkräften  $T_m$  und ebenso zwei verschiedene Nagelmaterialien (Stahl und Holz). Nachdem aktuell einige Forschungsarbeiten über Bodenvernagelungen mit Holznägeln (Ellmaier, 2014) am Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz vorgenommen werden, ist nicht nur das Verbundverhalten eines Stahl- oder GFK- Nagels, sondern auch eines Holznagels relevant. Die Ausnutzung des Verbundverhaltens der einzelnen Nägel wird ohne Teilsicherheiten berechnet. Es soll nur eine grobe Abschätzung sein, wie stark der Suspensionskörper beansprucht wird.

Im Grunde verhält sich ein Bodennagel sehr ähnlich zu einem Bewehrungsstab im Stahlbetonbau (siehe Abb. 58 und Abb. 59).

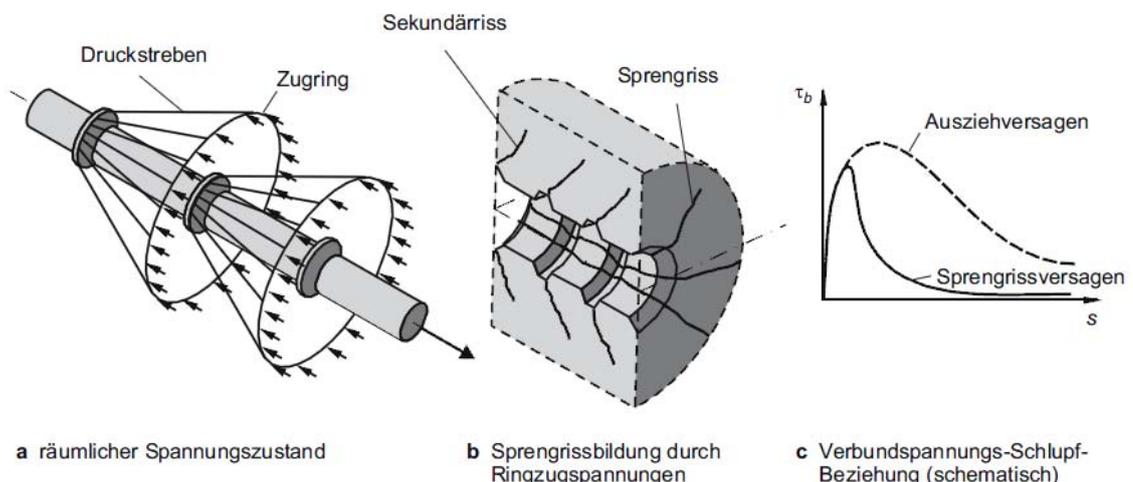


Abb. 58 Ausbreitung der durch Verbund eingeleiteten Druckspannungen; Sprenggrissbildung (Zilch & Zehetmaier, 2006)

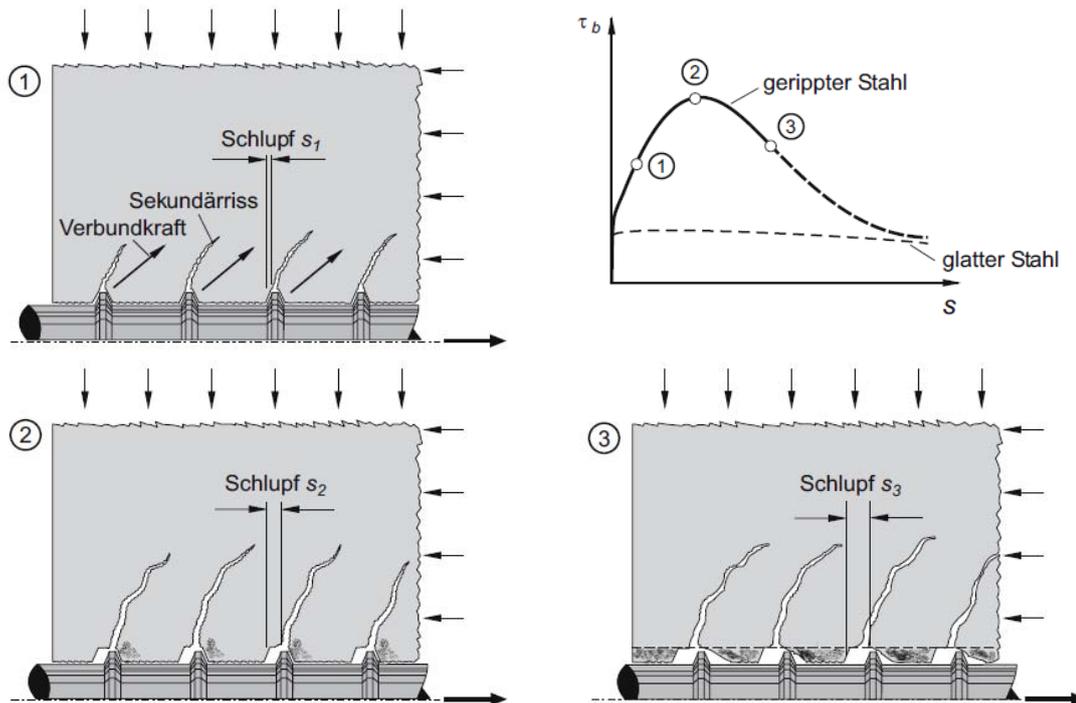


Abb. 59 Verbundmechanismus im Stahlbetonbau (Zilch & Zehetmaier, 2006)

Um das Verbundverhalten eines Holznagels verbessern zu können, ist eine möglichst gute Verzahnung der Suspension mit dem Nagel erforderlich. Diese könnte zum Beispiel ermöglicht werden, indem a) die Wände eines hohlen Nagels mit Löcher (Verzahnung der Suspension mit dem Inneren des Nagels) oder b) die Außenkontur mit Rippen ähnlich wie beim Bewehrungsstab (siehe Abb. 60) ausgeführt werden.

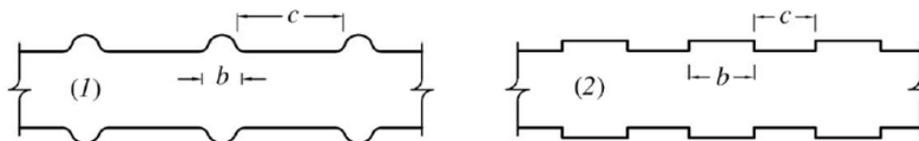


Abb. 60 Verbesserung des Verbundes zwischen Holz und Beton

Für den Nachweis des Verbundverhaltens wird eine fiktive Nagelwand gewählt. Geometrie, Abmessungen und Schubkraft der Wand bzw. der Nägel kann aus Tab. 20 entnommen werden.

Tab. 20 Geometrie und Eigenschaft der Nagelwand

Allgemein			Suspension (Portlandzement)		
Parameter	Symbol	Wert	Parameter	Symbol	Wert
Höhe	H	6,0 m	Druckfestigkeit der Suspension <sup>7</sup>	$f_{c,k}$	35 N/mm <sup>2</sup>
Wandneigung	$\beta$	85°			
Nagellänge	l	4,0 m			
Bohrlochdurchmesser	d	180 mm			
Grenzscherkraft	$T_{m1}$	10 kN/m			
	$T_{m2}$	60 kN/m			

### 2.7.1 Bodennagel aus Stahl

Auf Basis der Rissbreitenbetrachtung im Betonbau (siehe Abb. 59) ist in dieser Arbeit ein Bemessungsmodell für den Bodennagel entwickelt worden, bei dem angenommen wird, dass sich Druckstreben normal auf die Stahlrippen ausbilden. Über diese Druckstreben wird die durch Mantelreibung mobilisierte Kraft in den Stahlnagel eingeleitet. Wie die genaue Kraftumleitung im Zementkörper aussehen kann beziehungsweise angenommen wird, ist in Abb. 62 veranschaulicht.

Um einige unterschiedliche Böden abzudecken, wird das Verhalten mit einer geringen und hohen Grenzscherkraft  $T_m$  [kN/m] untersucht. Mit der Annahme, dass entlang des Nagels die Mantelreibung nur bis zur Gleitfuge mobilisiert werden kann, lässt sich der Normalkraftverlauf im Stab ableiten. Somit steigt die Normalkraft beginnend am Nagelende linear an und verläuft anschließend (vereinfacht angenommen) konstant bis zum Nagelkopf. Im Detail wird der Bereich zwischen zwei Rippen des Nagels betrachtet und die Differenzkraft  $\Delta N_i$  als Bemessungskraft für den Suspensionskörper angesetzt. Dabei wird angenommen, dass sich die Druckstrebe entlang zweier Sekundärrisse wie im Stahlbetonbau ausbildet.

Wie in Abb. 61 ersichtlich, erfährt ein Zugstab mit Rippen nicht nur eine Druckbeanspruchung, sondern auch eine Kombination aus Scher- und Druckbeanspruchung. Aus dieser Sicht ist das erstellte Berechnungsmodell sehr konservativ angesetzt.

<sup>7</sup> (Friedr. Ischebeck GmbH, 2014); S. 38

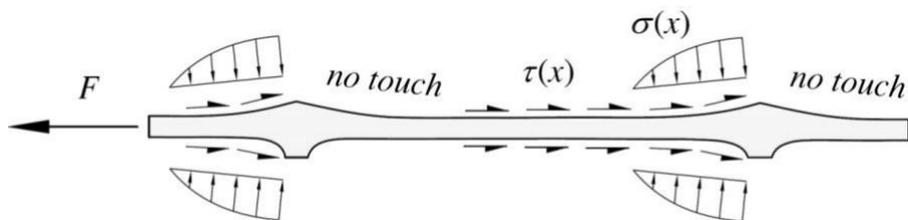


Abb. 61 Verbundverhalten Bambus im Beton (Azadeh & Hassan Haji, 2014)

Tab. 21 Angaben zum Stahl Nagel

Ischebeck TITAN 73/53 <sup>8</sup>		
Parameter	Symbol	Wert
Durchmesser	Da	72,4 mm
Gewindehöhe	r	2,2 mm
Gewindesteigung	S	8 mm
Gewindeneigung	$\alpha$	45°

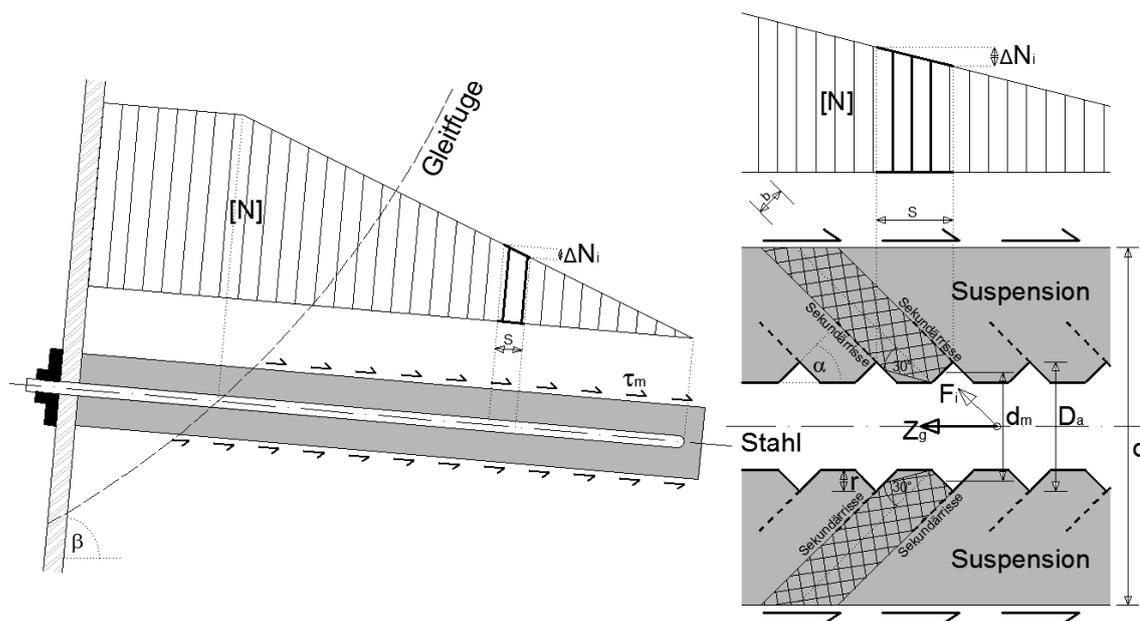


Abb. 62 Bemessungsmodell und Normalkraftverlauf für einen Bodennagel aus Stahl

Mit den Gleichungen 33 bis 36 können die Abmessungen und Kräfte bei der geringsten Kontaktfläche direkt an der Stahlrippe berechnet werden, um im Anschluss den Nachweis erbringen zu können.

<sup>8</sup> (DIBt, 2014); Anlage 2

$$b = r * \sqrt{2} \quad (33)$$

$$d_m = D_a - r \quad (34)$$

$$Z_g = \Delta N_i \quad (35)$$

$$F_i = Z_g * \cos \alpha \quad (36)$$

Tab. 22 Nachweis des Stahlnagels

Abmessungen	
Errechnete Betondruckbreite	b = 5,66 mm (aus Gleichung 33)
Mittlerer Durchmesser	d <sub>m</sub> = 70,2 mm
1. Variante	2. Variante
Grenzscherkraft T <sub>m1</sub> = 10 kN/m	Grenzscherkraft T <sub>m2</sub> = 60 kN/m
Ergebnisse	
Nagelzugkraft Z <sub>g</sub> = ΔN <sub>1</sub> = 0,08 kN	Nagelzugkraft Z <sub>g</sub> = ΔN <sub>2</sub> = 0,48 kN
Bemessungskraft F <sub>1</sub> = 0,057 kN	Bemessungskraft F <sub>2</sub> = 0,34 kN
Nachweis	
$f_{c,k} > \frac{F_1}{d_m * \pi * b}$ $35 \text{ N/mm}^2 > 0,046 \text{ N/mm}^2 \checkmark$ Ausnutzung: $\mu = \frac{0,046}{35} = 0,0013$	$f_{c,k} > \frac{F_2}{d_m * \pi * b}$ $35 \text{ N/mm}^2 > 0,27 \text{ N/mm}^2 \checkmark$ Ausnutzung: $\mu = \frac{0,27}{35} = 0,0077$

### 2.7.2 Bodennagel aus Holz

Der mögliche Kraftverlauf zwischen dem Holznagel, dem Suspensionskörper und dem Boden wird mit Annahmen und Modellbildungen, basierend auf der Literatur im Stahlbetonbau, untersucht. Es ist damit zu rechnen, dass sich ebenfalls Druckstreben im Körper ausbilden, welche durch die Schubspannungen zwischen Nagel und Suspension erzeugt werden (Abb. 63). Abhängig vom Verhältnis der Nagelfläche ( $A_{Nagel}$ ) zur Suspensionsfläche ( $A_{Beton}$ ) werden sich Risse im Körper ausbilden. Je größer das Verhältnis  $A_{Nagel} / A_{Beton}$  wird, desto breiter wird der Riss und desto größer der Rissabstand (König, Tue, & Schenck, 2008).

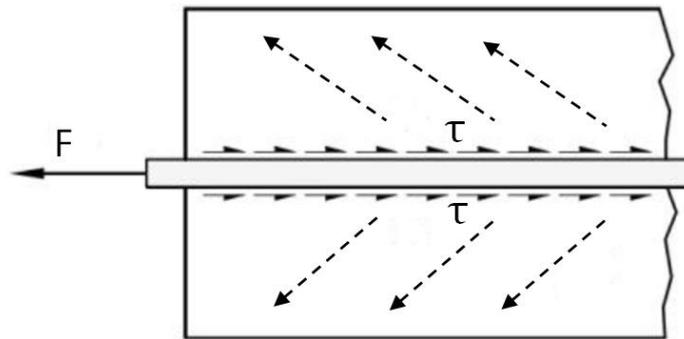


Abb. 63 Verbundverhalten eines glatten Holz Nagels (Azadeh &amp; Hassan Haji, 2014)

Für die Berechnung des Holz Nagels (Durchmesser  $d_h = 70 \text{ mm}$ ) wird angenommen, dass die Nagelzugkraft  $Z_g$  gleich jener des Stahlnagels ist. Nachdem beim betrachteten Holz Nagel keine Rippen vorhanden sind, welche beim Stahlnagel maßgebend die Breite der Druckstreben definieren, wird die Breite mit der erforderlichen Einbindelänge  $l_{b,erf}$  (analog zum Stahlbetonbau) ermittelt (König, Tue, & Schenck, 2008). Obwohl der Nagel aus Holz und nicht aus Stahl besteht und der Durchmesser  $d_h$  größer als 32 mm ist, wird aufgrund fehlender Werte die Verbundspannung  $f_{bd}$  trotzdem für Betonstahl  $d_s \leq 32 \text{ mm}$  nach DIN 1045-1 herangezogen (siehe Tab. 23). Die Neigung der Druckstreben wird mit einem im Stahlbetonbau üblichen Ausbreitungswinkel von  $\alpha = 30^\circ$  angesetzt. Da es keine Werte zur Verbundspannung im Holzbau gibt, wird ein mäßiger Verbund angenommen und somit die Verbundspannung um  $a = 70\%$  abgemindert. Die daraus resultierenden Ergebnisse (Tab. 24) sind nicht exakt und sollen auch nur zur überschlagsmäßigen Betrachtung dienen. Eine Verifizierung dieser Annahmen sollte in weiteren Analysen vorgenommen werden.

$$b = l_{b,erf} * \sin(\alpha) \quad (39)$$

Tab. 23 Bemessungswerte der Verbundspannung  $f_{bd}$  in  $\text{N/mm}^2$  (Lohmeyer, 1994)

Betonfestigkeits- klasse	C 12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	35/45	40/50	45/55	50/60
Glatte Stäbe und Betonstahlmatten aus glattem Stahl	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Rippenstäbe mit $d_s \leq 32 \text{ mm}$ und Betonstahlmatten aus Rippenstählen	1,6	2,0	2,3	2,7	3,0	3,4	3,7	4,0	4,3

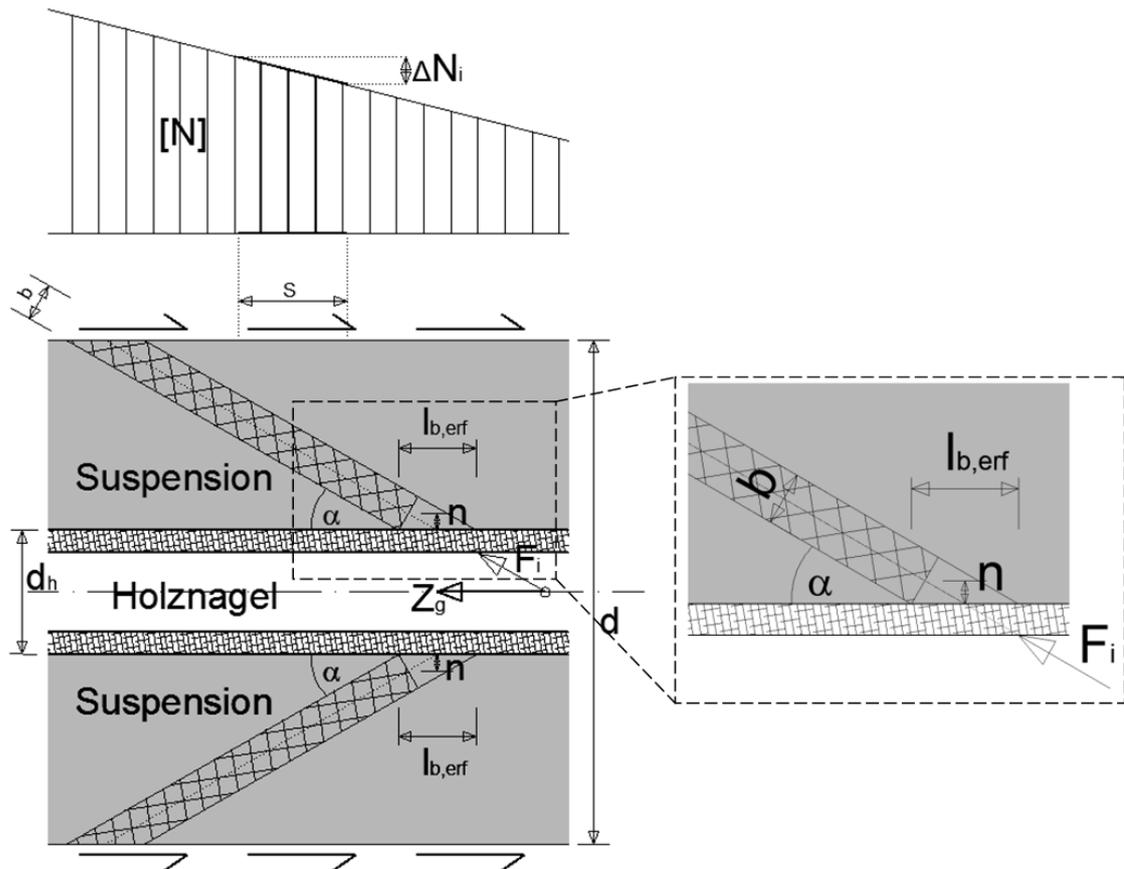


Abb. 64 Bemessungsmodell und Normalkraftverlauf für einen Bodennagel aus Holz

$$l_{b,erf} = \frac{F_i}{d_h * \pi * f_{bd} * a} \quad (37)$$

$$n = \frac{l_{b,erf}}{2} * \sin(\alpha) * \cos(\alpha) \quad (38)$$

$$b = l_{b,erf} * \sin(\alpha) \quad (39)$$

Tab. 24 Nachweis des Holznagels

1. Variante		2. Variante	
Grenzscherkraft	$T_{m1} = 10 \text{ kN/m}$	Grenzscherkraft	$T_{m2} = 60 \text{ kN/m}$
<b>Ergebnisse</b>			
Nagelzugkraft	$Z_g = \Delta N_1 = 0,08 \text{ kN}$	Nagelzugkraft	$Z_g = \Delta N_2 = 0,48 \text{ kN}$
Bemessungskraft	$F_1 = 0,04 \text{ kN}$	Bemessungskraft	$F_2 = 0,24 \text{ kN}$
Erforderliche Einbindelänge	$l_{b1,erf} = 0,18 \text{ mm}$	Erforderliche Einbindelänge	$l_{b2,erf} = 1,11 \text{ mm}$
Durchmessererhöhung	$n = 0,039 \text{ mm}$	Durchmessererhöhung	$n = 0,24 \text{ mm}$
<b>Nachweis</b>			
$f_{c,k} > \frac{F_1}{A} = \frac{F_1}{(d_h + 2 * n) * \pi * b}$ $35 \text{ N/mm}^2 > 2,02 \text{ N/mm}^2 \checkmark$ Ausnutzung: $\mu = \frac{2,02}{35} = 0,058$		$f_{c,k} > \frac{F_2}{A} = \frac{F_2}{(d_h + 2 * n) * \pi * b}$ $35 \text{ N/mm}^2 > 1,95 \text{ N/mm}^2 \checkmark$ Ausnutzung: $\mu = \frac{1,95}{35} = 0,056$	

### Interpretation der Ergebnisse

Wie in Tab. 22 und Tab. 24 ersichtlich, ist die Festigkeit des Suspensionskörpers wesentlich höher als erforderlich. Aufgrund der geringen Differenzkraft, welche der Nagel bzw. Suspensionskörper übertragen muss, wird der Körper aus Zementstein nur minimalst ausgenutzt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist daher bei der „Dimensionierung des Suspensionskörpers“ Optimierungspotential gegeben.

### 3 Feuchtegehalt im Boden

Es ist nicht möglich, den Feuchtegehalt einer bestimmten Bodenart zuzuordnen. Er hängt stark von den Jahreszeiten beziehungsweise dem örtlichen Niederschlag ab. Ein und dieselbe Bodenprobe hat im Sommer naturgemäß einen niedrigeren Feuchtegehalt als im Frühjahr. Über ein gesamtes Jahr betrachtet, kann eine große Bandbreite für den örtlichen Feuchtegehalt analysieren werden. Auch in der Literatur gibt es keine detaillierten Angaben für den Feuchtegehalt der unterschiedlichen Bodenarten.

Es gibt verschiedene Messverfahren, um den Wassergehalt des Bodens bestimmen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass jedes Verfahren zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Laut ÖNORM B 4410:2009 wird die Ofentrocknungsmethode als die zuverlässigste Methode definiert. Nachdem diese jedoch zwischen 16 und 24 Stunden in Anspruch nimmt, werden häufig schnellere Verfahren bevorzugt. (Simić, 2014)

#### 3.1 Ofentrocknung

Bei der Ofentrocknung wird eine Bodenprobe in einen belüfteten Trocknungssofen auf 105 °C ( ± 5 °C) erhitzt. Der Ofen muss diese Temperatur konstant halten können und die Belüftung so angeordnet sein, dass die Feinsedimente nicht abhandenkommen. Wie in Tab. 25 ersichtlich, wird eine Mindestmenge der feuchten Probe für die normgemäße Versuchsdurchführung benötigt. (Simić, 2014)

Tab. 25 Mindestmenge der Probe (ÖNORM B 4410:2009)

$D_{90}$ [mm] <sup>a</sup>	Mindestmenge der feuchten Probe [g]	$D_{90}$ [mm] <sup>a</sup>	Mindestmenge der feuchten Probe [g]
1,0	25	16,0	500
2,0	100	31,5	1500
4,0	300	63,0	5000
<sup>a</sup> Maschenweite des Siebes bei 90% Siebdurchgang			

Vor dem Trocknen wird die Probe gewogen. Nach einer Trocknungsdauer von ca. 16 bis 24 Stunden (bis zu Massekonstanz) wird mit einer geeichten Waage die trockene Masse nochmals gemessen. Aus diesem Masseverlust, zufolge des verdunsteten Wassers, kann der Wassergehalt der Bodenprobe bestimmt werden. (Simić, 2014)

### 3.2 Mikrowellentrocknung

Da das Trocknen im Ofen oft zu zeitintensiv ist, wird stattdessen das Mikrowellentrocknungsverfahren angewandt. Dabei wird analog zum Ofentrocknungsverfahren die Masse der entnommenen Proben ermittelt. Anschließend wird sie in einer Mikrowelle für kurze Zeit getrocknet und wieder gewogen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis sich bei zwei aufeinanderfolgenden Wiegungen eine Differenz der Probenmasse von weniger als 0,1% ergibt. Aus dem Gewichtsverlust wird der Wassergehalt berechnet. Die Trocknungszeit ist abhängig von der Probenmenge, dem natürlichen Wassergehalt und der Bodenart. Dieses Verfahren ist bis zu 10-mal schneller als die standardisierten Trocknungsmöglichkeiten. (Simić, 2014)

### 3.3 Calciumcarbid Verfahren

Dieses Verfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts ist kein Ersatz des Ofentrocknungsverfahrens, sondern lediglich eine Ergänzung. Die Durchführung ist erheblich schneller und somit für Insitu-Messungen oder schnelle Abschätzungen geeignet. Es dürfen nur Böden mit einem Größtkorn von 4,75 mm mit diesem Versuch analysiert werden. (Simić, 2014)



Abb. 65 Calciumcarbid Drucktestset (Mobile CAD Surveying, 2015)

Der Druckbehälter (siehe Abb. 65) wird gemeinsam mit einer repräsentativen Bodenprobe, Stahlkugeln und einer vorgegebenen Menge Calciumcarbid befüllt. Für die üblichen Calciumcarbid Versuchsgeräte ist eine Mindestfüllmenge der Bodenprobe von 10 g vorgeschrieben. Amerikanische Studien haben ergeben, dass mit geringerer Füllmenge die Ergebnisse unbrauchbar werden. (Simić, 2014)

Nach dem Befüllen wird der Druckbehälter dicht verschlossen und kräftig geschüttelt, wobei das Wasser im Boden mit dem Calciumcarbid reagiert. Proportional zur Wassermenge entsteht bei dieser Reaktion im Boden Acetylen gas, welches mit einem Manometer am Druckbehälter gemessen wird. (Simić, 2014)

## 4 Ingenieurbioogie

### 4.1 Allgemein

Die ingenieurbioogische Bauweise wird schon seit Jahrhunderten praktiziert. Beim Vergleich mit der Bodenvernagelung gibt es drei markante Ähnlichkeiten.

- Sicherung von Hängen und Böschungen
- Verzahnung von Material
- Vernetzung der Struktur

Einige Hersteller von Vernagelungssystemen (wie zum Beispiel Spinnanker oder Spantec) vergleichen daher auch die Wirkung ihrer Nagelsysteme mit der Verwurzelung von Pflanzen im Boden.

Ingenieurbioogie wird hauptsächlich im Erd- und Wasserbau eingesetzt. Da diese Arbeit den geotechnischen Teil betrifft, wird auf den wasserbautechnischen Part nicht näher eingegangen.

Die ingenieurbioogische Maßnahmen ermöglichen: (Florineth, F.; Kloidt, F.; Weissteiner, C, 2011)

- Schutz gegen Oberflächenerosion mit Ansaaten, Aufforstung oder Hangbepflanzung
- Verringerung der Steinschlag- und Lawinengefahr durch Aufforstung
- Sicherung von 10 - 20 cm tiefen Bodeninstabilitäten mit Hangentwässerung, Hangfaschinen, Pilotenwand, Rautengeflecht und Hangrost
- Sicherung von 30 - 200 cm tiefen Bodeninstabilitäten mit Hangentwässerung, Holz- bzw. Betonkrainerwand, Blocksteinmauer, Drahtsteinkörbe, bewehrte Erde oder Lagenbau als lebend bewehrte Erde

Die meisten Gehölzwurzeln reichen bis in eine Tiefe von 2 m und geben somit die Grenze für eine bepflanzte Hangsicherung vor. Ein weiterer Nachteil der ingenieurbioogischen Bauweise ist, dass alle Verfahren zu Beginn aufgrund der Verwurzelungstiefe relativ wenig bewirken. Je länger die Pflanzen wachsen, umso höher wird die Standsicherheit.

Dieses Problem kann mit einer kombinierten Bauweise umgangen werden. (Adam, D., 2010)

## 4.2 Sicherungsmethoden

### 4.2.1 Deckbauweise

Die Deckbauweise schützt die Oberflächen bei extremen Wetterbedingungen (z.B. Schlagregen oder Hagel) vor Erosion. Dafür eignen sich ein Rasen, welcher verlegt oder aufgesprüht wird, ein Spreitlagenbau oder Begrünung durch Jute- oder Kokosnetze.

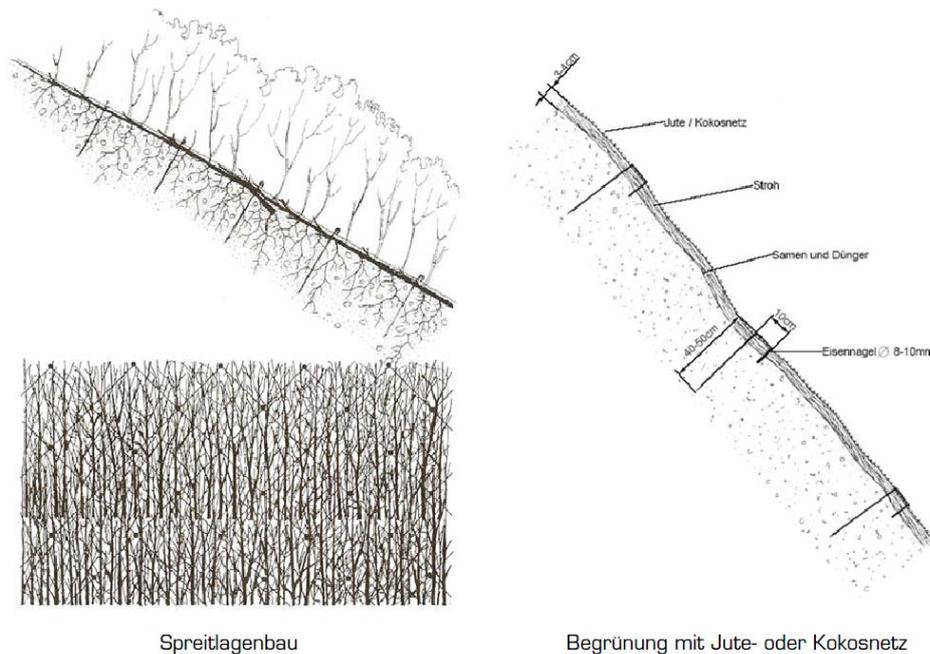


Abb. 66 Deckbauweise (Adam, D., 2010)

### 4.2.2 Stabilbauweise

Für eine Sicherung bis in eine Tiefe von 10 - 20 cm wird die Stabilbauweise verwendet. Bewährte Methoden sind lebende Flechtzäune, Riefenbau oder Hangfaschinen.

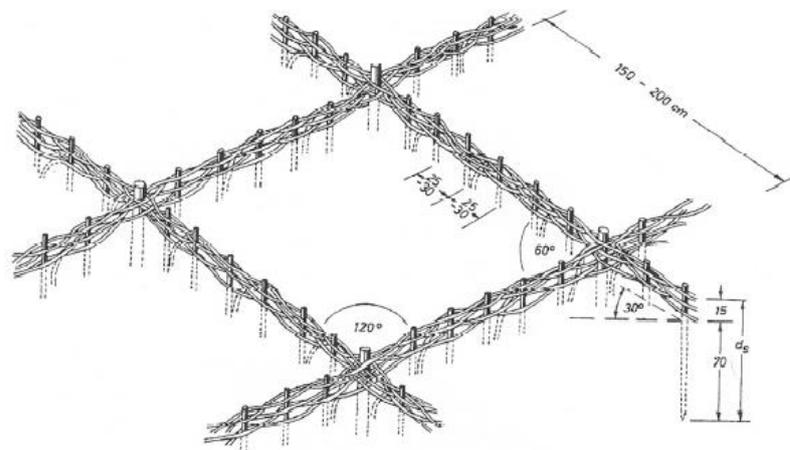


Abb. 67 Stabilbauweise mit lebenden Flechtzäunen (Adam, D., 2010)

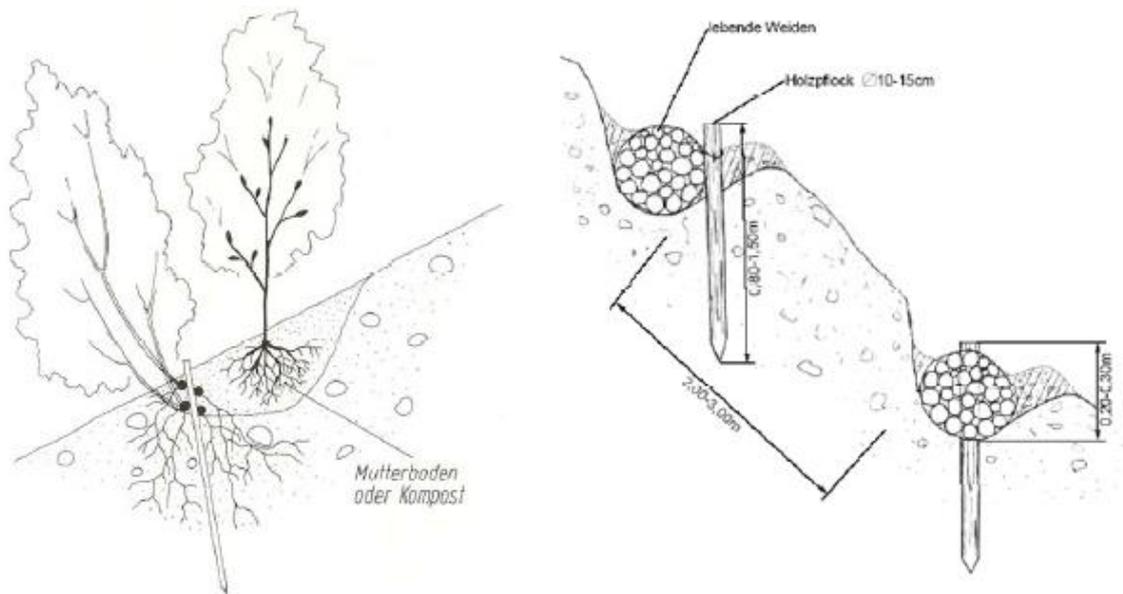


Abb. 68 Stabilbauweise mit Riefenbau (links) oder Hangfashinen (rechts) (Adam, D., 2010)

#### 4.2.3 Kombination

Mit der kombinierten Bauweise ist es möglich, Hanginstabilitäten bis in eine Tiefe von ca. 2 m zu sichern. Die nichtlebenden Materialien (Totholz, Beton oder Geokunststoffe) ermöglichen die sofortige Stabilität des Hanges. Die lebenden Baustoffe werden für die langfristige Wirksamkeit und Verbesserung der Baumaßnahme eingesetzt.

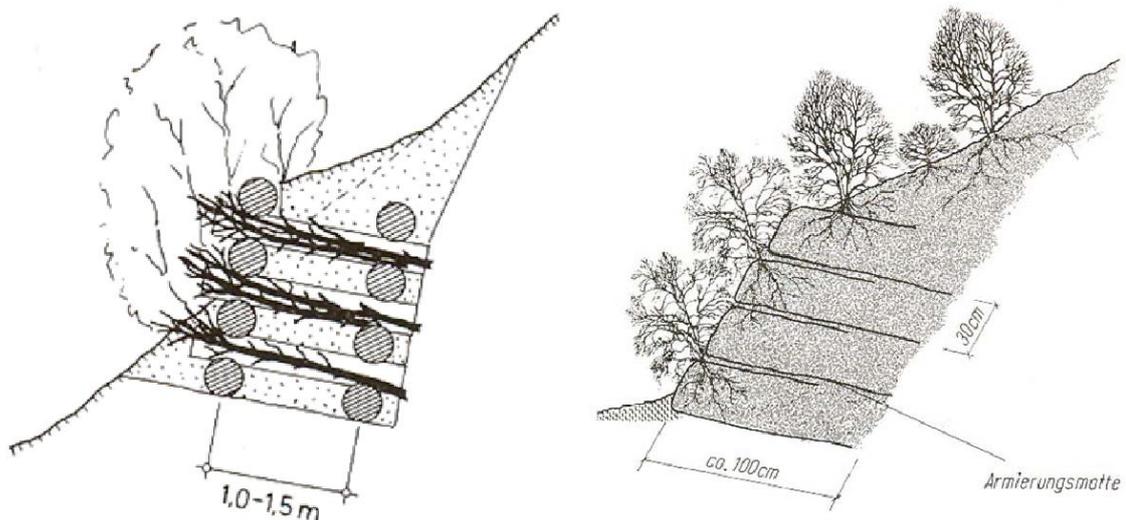


Abb. 69 Begrünte Krainerwand (links) und bewehrte Erde (rechts) (Adam, D., 2010)

### 4.3 Bodenfestigkeitserhöhung durch Pflanzen

Die Festigkeitserhöhung von instabilen Hängen kann durch richtiges Anordnen von Pflanzen erreicht werden. Der wichtigste Effekt durch eine Bepflanzung ist der Entzug des Wassers aus dem Boden und daraus resultierende Erhöhung der Saugspannungen. Die armierende Wirkung der Wurzeln tritt zur Gänze erst bei voll gesättigten Böden ein. Der Vorteil liegt darin, dass im bodenmechanisch schlechten Fall bei gesättigtem Boden die Verwurzelung den Hang trotzdem stabilisiert. (Tobias, 2003)

Aus Untersuchungen kristallisieren sich zwei Versagensmechanismen bei der Zug- und Scherbeanspruchung von Wurzeln heraus. Die Wurzel kann mit einer Kombination aus Abreißen unterhalb der Scherebene und anschließendem Ausziehen versagen (siehe Abb. 70 oben). Im zweiten Versagensmechanismus kommt es innerhalb der Scherfuge zu einem Reißen der Wurzelhaut, welches zu einer Einengung des Wurzelquerschnittes und einem daraus resultierendem Ausgleiten des Wurzelkerns führt (siehe Abb. 70 unten). (Tobias, 2003)

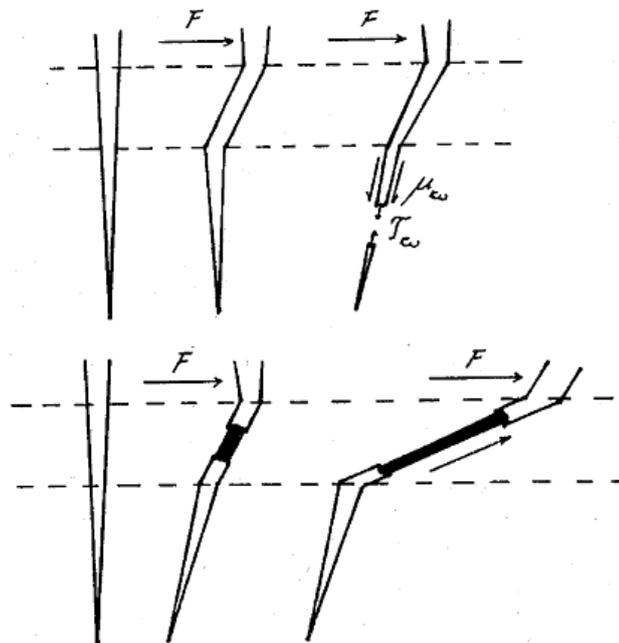


Abb. 70 Versagensmöglichkeiten der Wurzel (Tobias, 2003)

Der erste Versagensmechanismus zeigt auf, dass nicht nur die Zugfestigkeit der Wurzeln, sondern auch die Mantelreibung zwischen Wurzel und Boden eine wichtige Rolle zur Bestimmung der Scherfestigkeitserhöhung des Bodens spielt. Reißt die Wurzel ab, so verringert sich die Mantelfläche und die Wurzel wird aus dem Erdreich gezogen. Aus diesem Grund wird in der Bemessung der verwurzelte Bereich mit einer höheren Kohäsion beaufschlagt. (Tobias, 2003)

In der Literatur sind analytische Versuche zur Beschreibung der Verwurzelung vorhanden. Für eine Bemessung eines Hanges sind diese jedoch noch nicht herangezogen worden.

Polomski und Kuhn (1998) haben einige Durchschnittswerte der Zugfestigkeit verschiedener Pflanzengruppen angeführt. (Katzenbach & Werner, 2007)

- Gräser 0,5-1 kN/cm<sup>2</sup>
- Kräuter 0,3-6 kN/cm<sup>2</sup>
- Gehölze 1-7 kN/cm<sup>2</sup>

Eine wichtige Erkenntnis aus den Zugversuchen der dreijährigen Buchenwurzeln mit unterschiedlichen Durchmessern hat ergeben, dass je größer der Durchmesser, umso geringer die Zugfestigkeit ist. (Katzenbach & Werner, 2007)

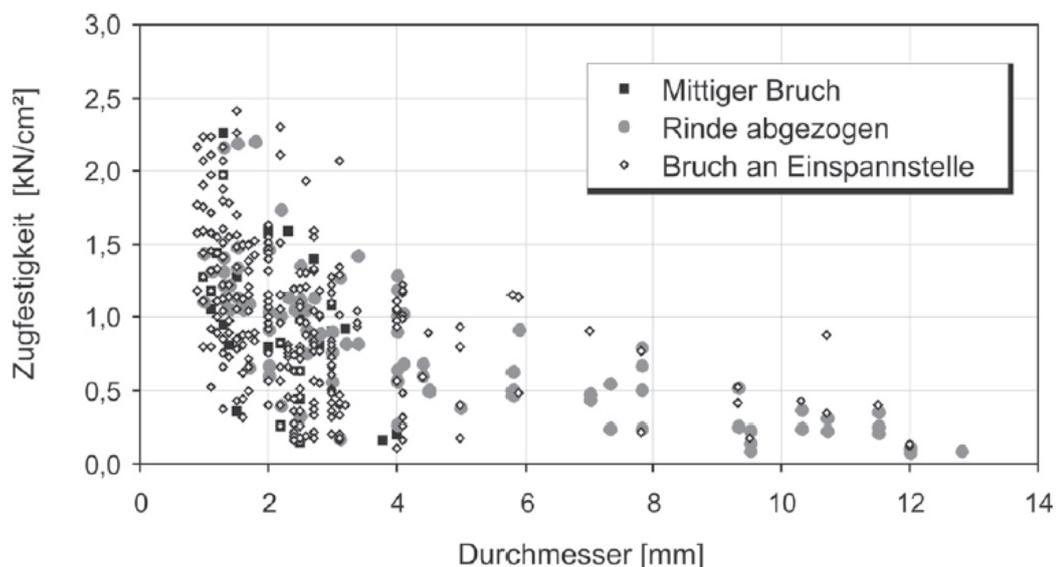


Abb. 71 Zugversuch von Wurzeln in Abhängigkeit des Durchmessers (Katzenbach & Werner, 2007)

Im Zuge der Forschungsarbeit in Darmstadt wurde ein zweiter Versuch durchgeführt. Es wurden zwei unterschiedliche einjährige Pflanzen (Ahorn und Birke), in einen 25 x 25 cm großen mit schwach schluffigem Sand gefüllten Kasten, eingepflanzt. Nach einer beziehungsweise zwei Vegetationsperioden wurde die Festigkeit des verwurzelten Bodens mittels Großrahmenscherversuchs ermittelt.

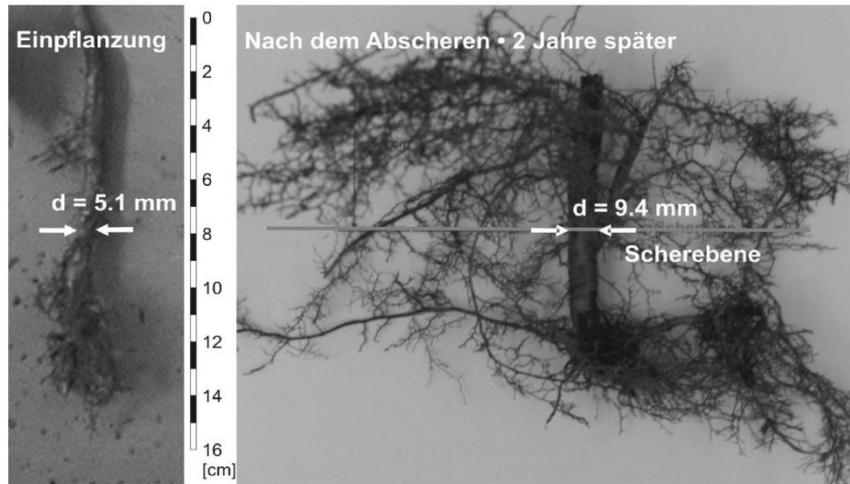


Abb. 72 Wurzel beim Einbau und nach dem Abscheren (Katzenbach & Werner, 2007)

Die mechanische Verfestigung des Bodens ist im Diagramm in Abb. 73 zu erkennen. Unabhängig von der Dauer der Vegetationszeit oder der Zusammensetzung des Bodens (Wassergehalt und Dichte) bleibt der Reibungswinkel  $\varphi'$  unverändert und die Kohäsion  $c'$  wird infolge der Verwurzelung um einen gewissen Wert erhöht. (Katzenbach & Werner, 2007)

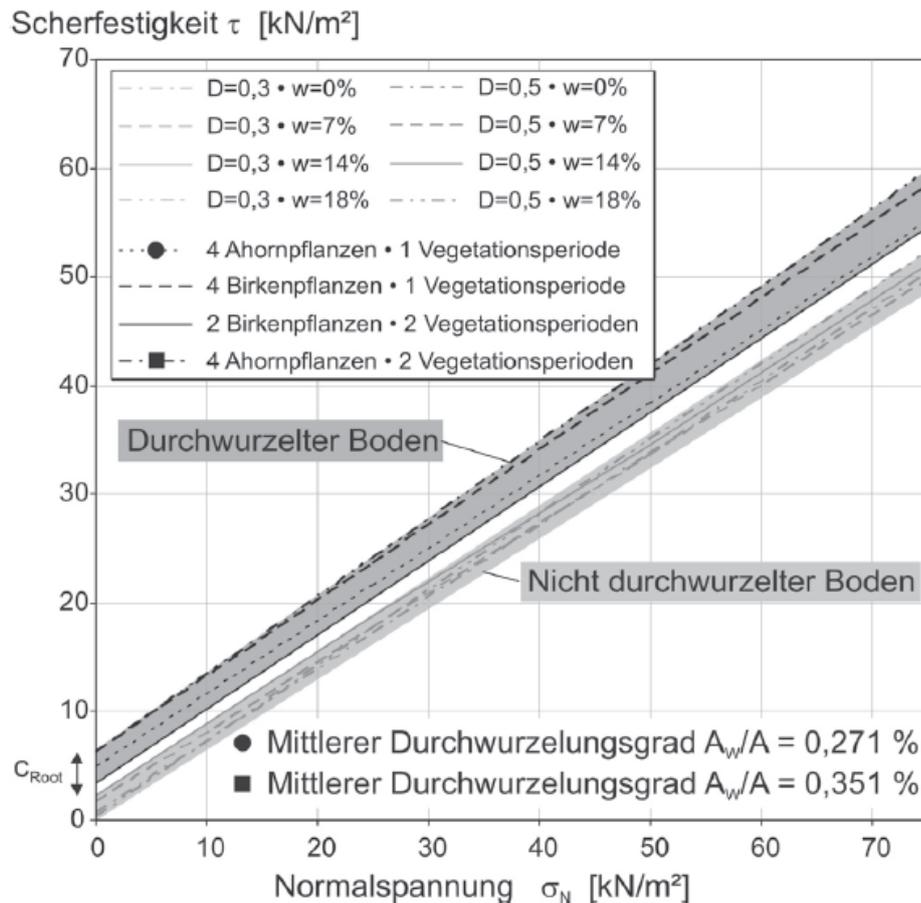


Abb. 73 Ergebnis der Scherfestigkeit an Ahorn- und Birkenpflanzen nach 1 und 2 Vegetationsperioden (Katzenbach & Werner, 2007)

Die Ansätze, bei denen der verwurzelte Bereich in der Bemessung mit einer höheren Kohäsion berücksichtigt wird, hat somit seine Berechtigung.

Das Ergebnis dieser Versuchsreihe ist sehr aufschlussreich, jedoch mit Vorsicht zu interpretieren. Steigt nur die Kohäsion an und der Reibungswinkel bleibt gleich, wäre die scherfestigkeitserhöhende Wirkung der Verwurzelung spannungsunabhängig. Nachdem die einzelne Wurzel auch auf Reibung beansprucht wird (Herauszieh-widerstand) und diese Reibungskraft entsprechend der Erhöhung der Normalspannung größer wird, ist jedenfalls eine gewisse Spannungsabhängigkeit gegeben.

Wird die Scherebene in Abb. 72 betrachtet, ist zu erkennen, dass wenige dünne Wurzeln, aber eine relativ dicke Hauptwurzel vorhanden ist. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die Kohäsionserhöhung auf einer Art Verdübelung des Erdkörpers beruht.

## 5 Untersuchung von Geländesprüngen

Im Zuge dieser Arbeit werden Modelle für eine neue Betrachtungsweise der Bodenvernagelung entwickelt und mittels Plaxis 2D und RuckZuck 6.0 verglichen und diskutiert.

### 5.1 PLAXIS 2D

Ziel der Untersuchungen im Plaxis 2D (Version 2015.02) ist es, die Thematik Bodenvernagelung aus anderen Perspektiven kritisch zu betrachten. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass die kritische Gleitfuge für den Nachweis der äußeren Tragfähigkeit durch den Vernagelungskörper verläuft. Eine ausreichende Untersuchung der optimalen geometrischen Auslegung der Nägel bei Vernagelungssystemen mit Holznägeln ist bisher noch nicht erfolgt. Um der verhältnismäßig geringen Scherfestigkeit der Holznägel Genüge zu tun, wird in einem ersten Schritt angenommen, dass es mit einer ausreichenden Anzahl und entsprechender Anordnung der Holznägel gelingt, den maßgebenden Bruchkörper außerhalb der vernagelten Geometrie zu verschieben. Aus diesem Grund wird angenommen, dass das Versagen im nicht vernagelten Boden stattfindet. Dies ist möglich, indem der gesamte Vernagelungskörper (siehe Abb. 74; Boden A\*) im Plaxis als Gewichtsmauer ersetzt wird und diesem Bereich anstelle der Bodennägel eine erhöhte verschmierte Kohäsion zugewiesen wird. Trotz gleichbleibender Wichte ist es mit dieser Annahme möglich, einen kompakten Körper zu schaffen, welcher bei entsprechend hoher Kohäsion wie eine Gewichtsmauer wirkt. Die Boden- und Plaxiseingabeparameter sind Tab. 26 und Tab. 27 zu entnehmen.

#### ***Eingabe***

In den Berechnungen werden zwei unterschiedliche Bodentypen verwendet. Boden A repräsentiert den umliegenden Baugrund und Boden A\* den Vernagelungskörper. Aufgrund von Problemen während den Berechnungen, welche im Kapitel 5.1.3 näher erläutert werden, ist der E-Modul von Körper A\* um den Faktor 10 erhöht worden. Ansonsten sind keine Änderungen der Bodenparameter vorgenommen worden.

Tab. 26 Bodenparameter

Parameter	Boden A		Boden A*			
	Symbol	Wert	1. Variante (LE)		2. Variante (MC)	
			Symbol	Wert	Symbol	Wert
Wichte	$\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>
Reibungswinkel	$\varphi'$	35°	$\varphi'$	-	$\varphi'$	35°
Kohäsion	$c'$	0,1 kN/m <sup>2</sup>	$c'$	-	$c'$	variiert
Steifemodul	$E'$	40 MPa	$E'$	400 MPa	$E'$	400 MPa
Poissonzahl	$\nu'$	0,33	$\nu'$	0,33	$\nu'$	0,33

Tab. 27 Eingabeparameter in Plaxis 2D

Parameter	Boden A		Boden A*		
	Wert	1. Variante (LE)		2. Variante (MC)	
		Wert	Wert	Wert	Wert
Modellgesetz	Mohr-Coulomb	linear-elastisch	Mohr-Coulomb		
Knoten	15-noded	15-noded	15-noded		
$R_{inter}$	1,0	1,0	1,0		
$K_0$	$1 - \sin\varphi$	$1 - \sin\varphi$	$1 - \sin\varphi$		

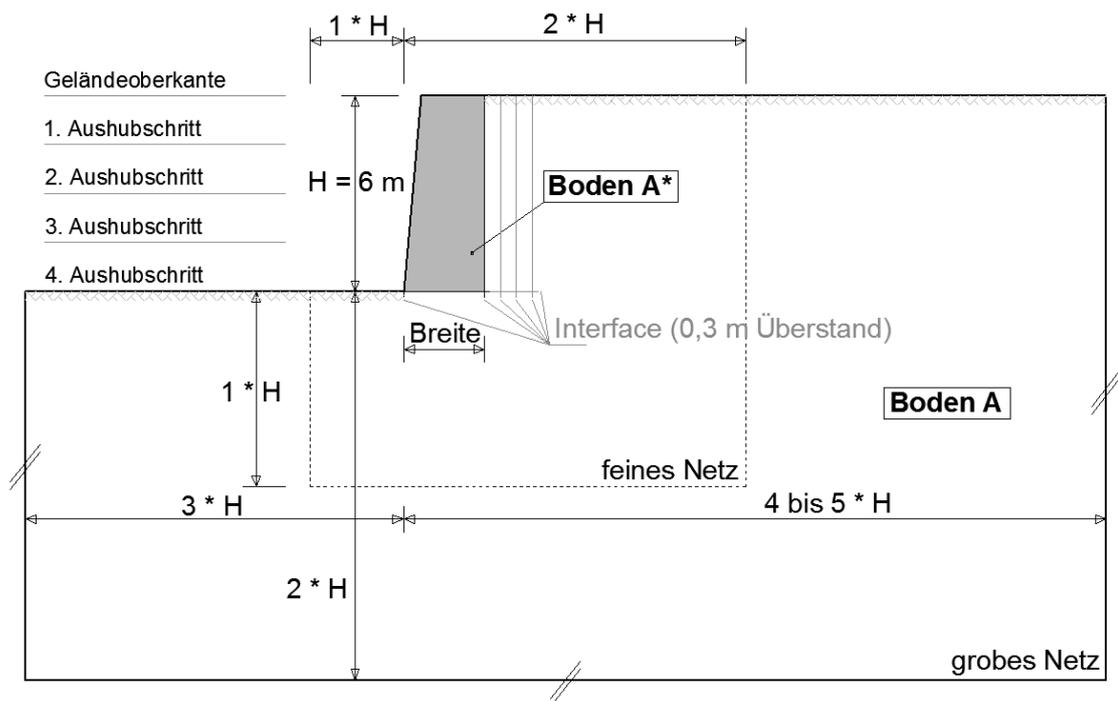


Abb. 74 Modellabmessungen für Plaxis

### **Vorgehensweise**

Im Detail handelt es sich um einen 85° geneigten, 6 m hohen Geländesprung, welcher in vier Aushubschritten hergestellt wird (siehe Abb. 74). Im Programm gibt es für die Berechnung insgesamt sieben Berechnungsphasen. In der ersten Phase werden die initialen Spannungen mit dem K0-Verfahren errechnet und in der zweiten die Interfaces und der Boden A\* aktiviert. Jeder weitere Aushubschritt stellt eine zusätzliche Phase dar. Nachdem nur die Festigkeit des umliegenden Baugrundes mit der  $\varphi$ -c Reduktion abgemindert wird, ist es möglich eine Gesamtstandsicherheitsberechnung des Gewichtskörpers durchzuführen.

Um die minimale Breite an der Basis (siehe Abb. 74) beziehungsweise die Kohäsion des Körpers herausfinden zu können, wird dieser mit zwei verschiedenen Stoffgesetzen beschrieben.

#### 1. Variante

In der ersten Berechnungsvariante wird der Vernagelungskörper linear-elastisch gerechnet, um ein Versagen im Körper ausschließen zu können. Dies soll helfen, die mögliche minimale Breite zu ermitteln. Begonnen wird zunächst mit einer Breite von 4 m. In der linear-elastischen Berechnung wird zusätzlich ein 3 m und 2,5 m breiter Körper untersucht. Bei geringeren Abmessungen ist eine Berechnung aufgrund von Kippversagen nicht mehr durchführbar.

#### 2. Variante

Alle Modelle werden mit dem Mohr-Coulomb'schen Stoffgesetz berechnet. Aufgrund von Problemen bei der linear-elastischen Berechnung mit dem 3.0 Modell (3 m Breite), wird das 3.5 Modell (3,5 m Breite) zusätzlich eingeführt. Bei allen vier Breiten ist in der 2. Untersuchungsvariante von Interesse, welche Festigkeit der Körper mindestens aufweisen muss, um erstens eine ähnliche Standsicherheit  $M_{sf}$  wie aus der linear-elastischen Berechnung zu erhalten und zweitens die gleiche Versagensfigur außerhalb des Körpers zu erzeugen (siehe Abb. 75).

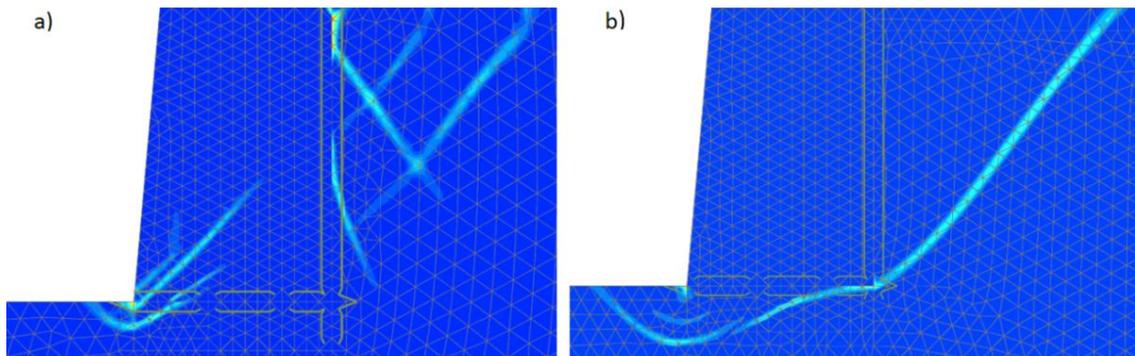
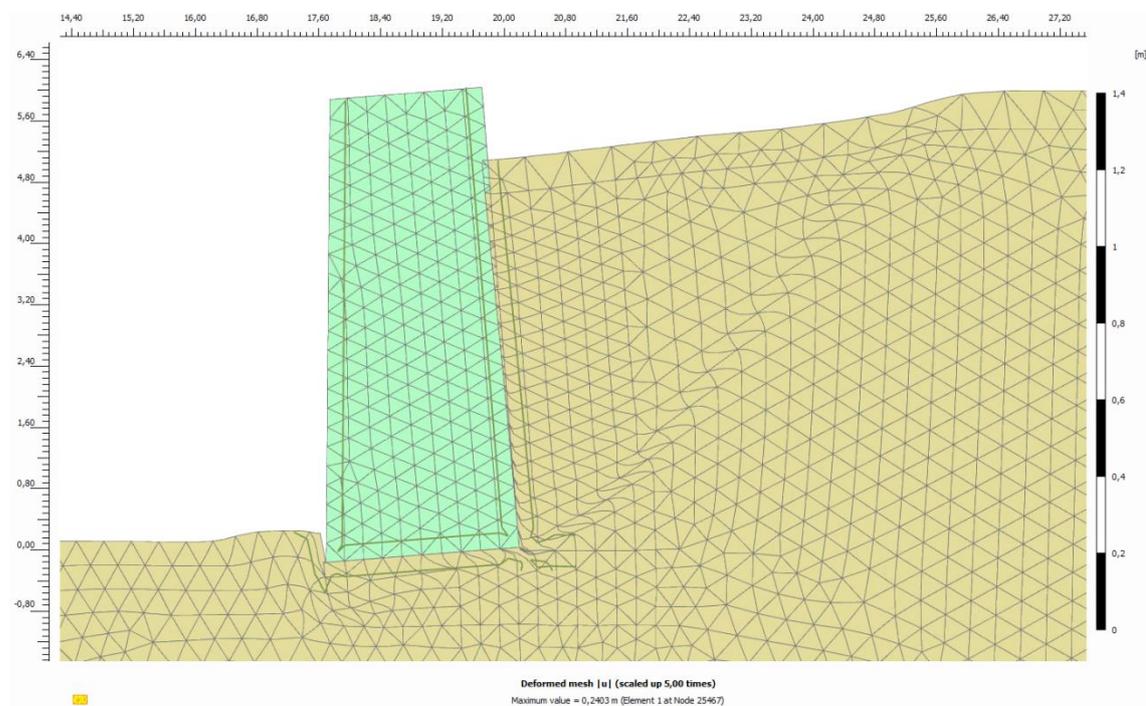


Abb. 75 a) unerwünschtes und b) erwünschtes Versagensbild

### 5.1.1 Berechnung des Körpers mit linear-elastischem Stoffgesetz (1. Variante)

Es ist erwünscht, dass im vernagelten Bereich kein Versagen auftritt. In der 1. Variante (V1) wird wie vorhin beschrieben dieser Bereich mit dem linear-elastischen und der umliegende Baugrund mit dem Mohr-Coulomb'schen Stoffgesetz beschrieben.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Verformung und inkrementelle deviatorische Dehnung nach der Festigkeitsreduktion für das 2.5 Modell (2,5 m Breite). Alle weiteren relevanten Grafiken (totale Verschiebung  $l_{ul}$ , inkrementelle deviatorische Dehnung, plastische Punkte und relative Scherfestigkeit  $\tau_{rel}$ ) der 4.0, 3.0 und 2.5 Modelle sind im Anhang 1 bis 12 ersichtlich.

Abb. 76 V1: totale Verschiebung  $l_{ul}$  des 2.5 Modells (5-fache Skalierung)

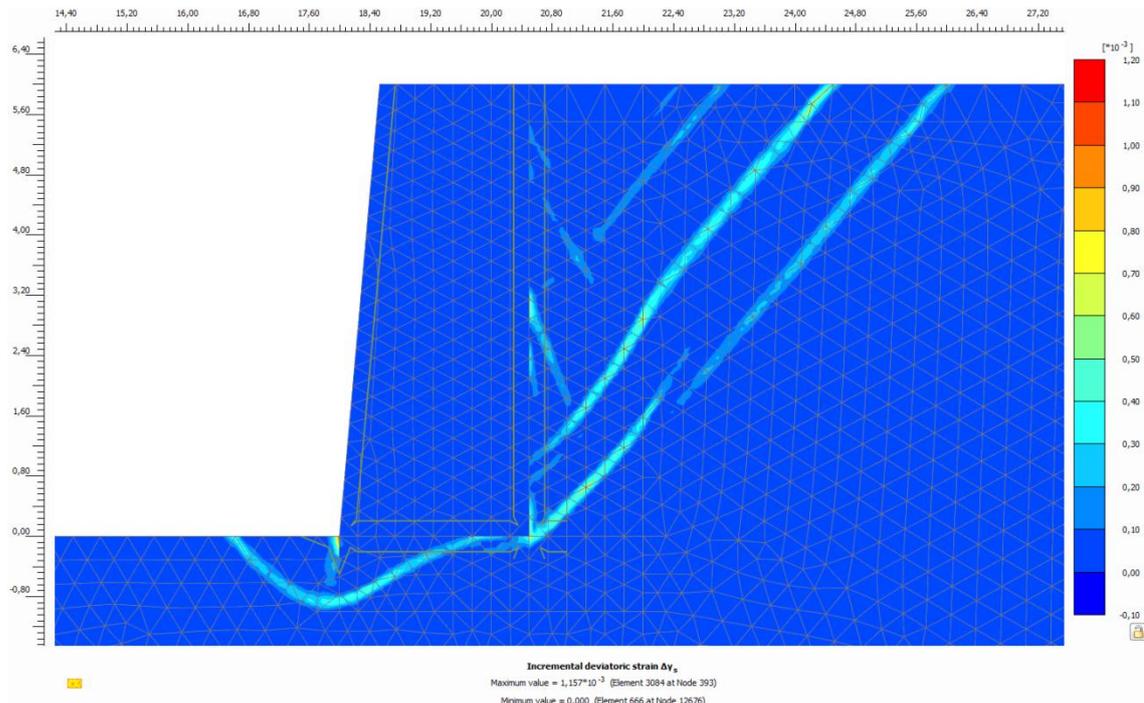


Abb. 77 V1: inkrementelle deviatorische Dehnung des 2.5 Modells

### ***Einfluss der Wichte auf die Standsicherheit***

Die Wichte wird variiert, um den Einfluss auf die Gesamtstandsicherheit analysieren zu können. Für die Untersuchung wird das 2.5 und 4.0 Modell herangezogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wichte ab ca. 22 kN/m<sup>3</sup> grundsätzlich für natürliche Böden zu hoch ist. Um eine größere Bandbreite und die Tendenz der Sicherheiten überprüfen zu können, wurden diese trotzdem verwendet.

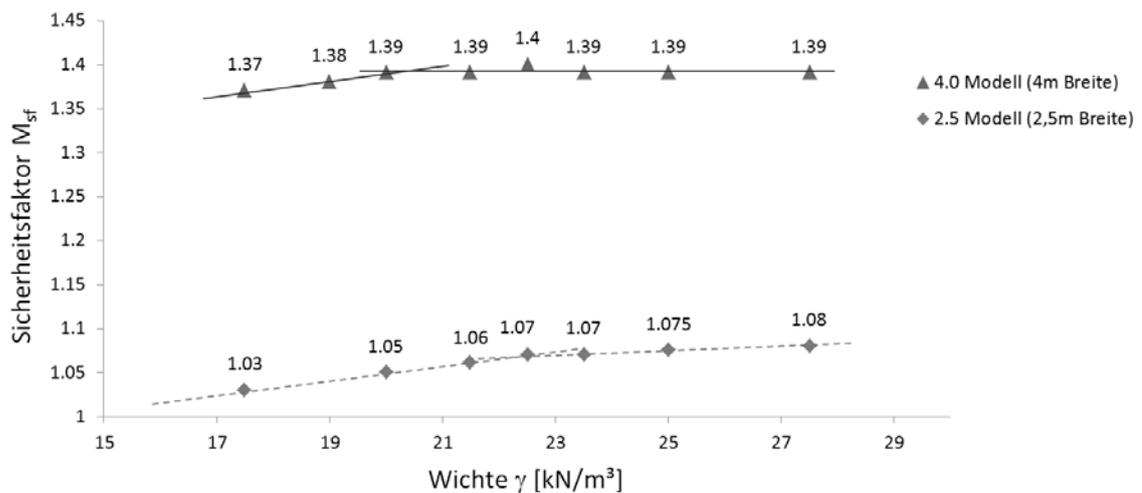


Abb. 78 Einfluss der Wichte auf die Sicherheit

In Abb. 78 ist für diese Modelle der Einfluss der Breite und Wichte auf die Sicherheit zu erkennen. Beide Modelle erfahren bei einer Erhöhung der Wichte einen Sicherheits-

anstieg. Jedoch hat es beim breiteren Modell den Anschein, dass dieser Einfluss geringer als beim 2.5 Modell ist, da ab einer Wichte von  $20,5 \text{ kN/m}^3$  die Sicherheit annähernd konstant bleibt. Hingegen ist beim schmäleren Modell ein größerer Einfluss zu beobachten. Die Sicherheit verläuft im Gegensatz zum breiten Modell ab einem gewissen Punkt nicht konstant. Mit zunehmender Wichte ist ein tendenziell geringerer Anstieg zu erkennen. Dieser Vergleich ist für eine erste Abschätzung gedacht und erfordert noch detailliertere Untersuchungen, um eine exakte Aussage über den Einfluss treffen zu können.

### 5.1.2 Berechnung des Körpers mit Mohr-Coulomb'schen Stoffgesetz (2. Variante)

In der 2. Variante werden beide Bodentypen mit dem Mohr-Coulomb'schen Stoffgesetz berechnet, um auch die Verformungen des Vernagelungskörpers zu berücksichtigen. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind zum einen die minimal erforderliche Kohäsion und zum anderen die dazugehörige Standsicherheit der unterschiedlichen Breiten.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Verformung und inkrementelle deviatorische Dehnung nach der Festigkeitsreduktion für das 2.5 Modell. Alle weiteren relevanten Grafiken (totale Verschiebung  $l_{ul}$ , inkrementelle deviatorische Dehnung, plastische Punkte und relative Scherfestigkeit  $\tau_{rel}$ ) der 4.0, 3.0 und 2.5 Modelle sind im Anhang 13 bis 58 ersichtlich.

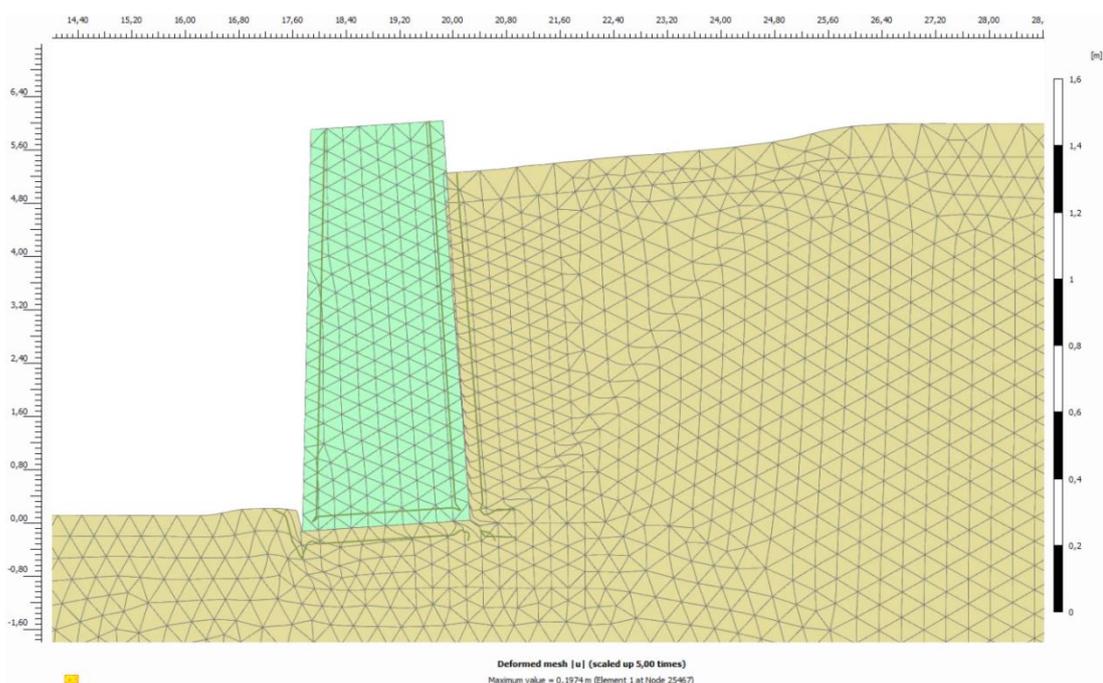


Abb. 79 V2: totale Verschiebung  $l_{ul}$  des 2.5 Modells (5-fache Skalierung)

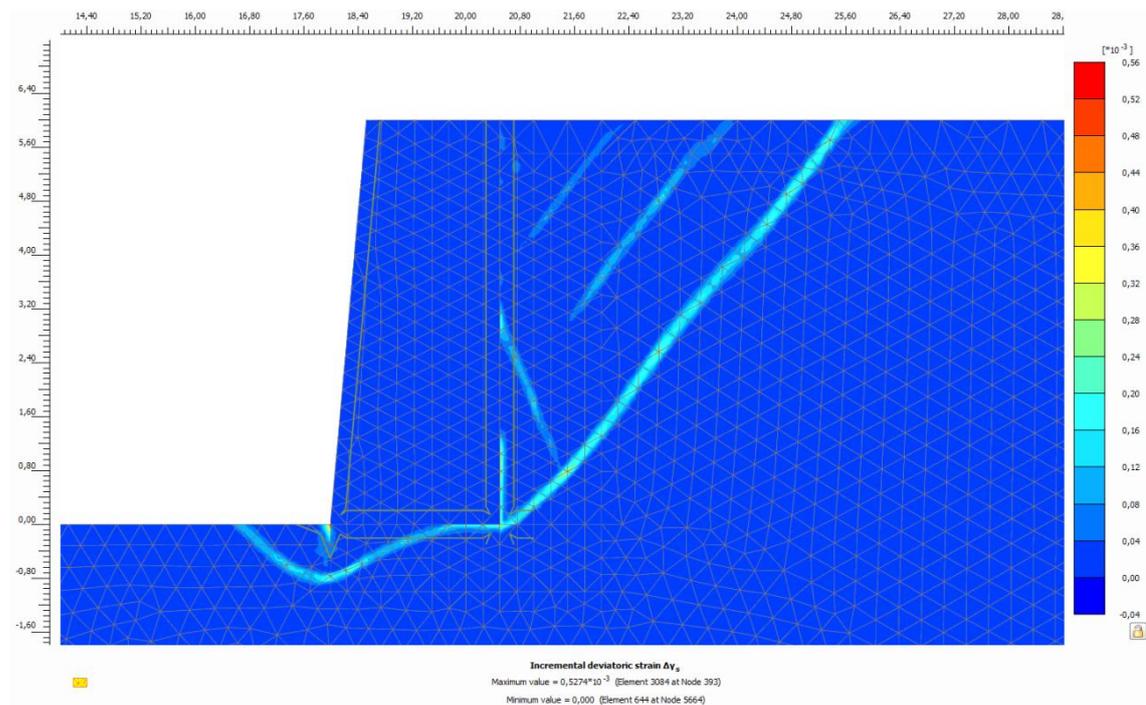


Abb. 80 V2: inkrementelle deviatorische Dehnung des 2.5 Modells

Eine detaillierte Ausgabe von hydrostatischen  $p'$  und deviatorischen Spannungen  $q$ ,  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_3'$  und die Spannungstrajektorien für jede Berechnungsphase ist ebenfalls im Anhang angeführt.

### 5.1.3 Probleme bei der Berechnung

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die während den FEM-Berechnungen aufgetretenen Probleme und deren Lösungen angeführt.

- Erhöhung der Steifigkeit (E-Modul) des Vernagelungskörpers um den Faktor 10 und „Arc-length control“ ausschalten  
 Ohne diese Maßnahmen konnten die Berechnungen nicht durchgeführt werden. Der ausschlaggebende Punkt war die „Arc-length control“.

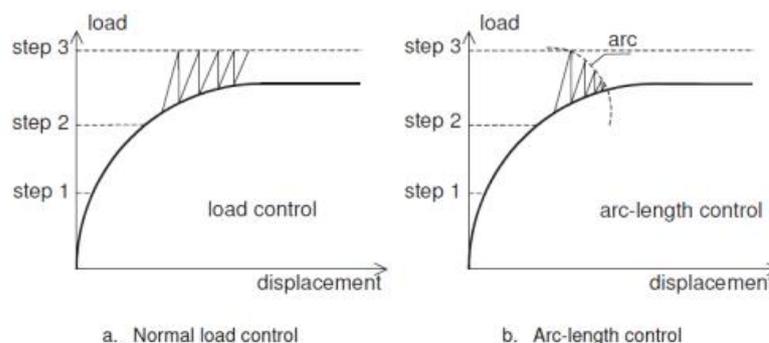


Abb. 81 Unterschied a) normal load control und b) Arc-length control

- Hohe erforderliche Kohäsion bei 3.0 Modell

Der Hintergrund, warum die Kohäsion für das 3.0 Modell (3,0 m Breite) höher ist als für das 4.0 Modell, konnte nicht herausgefunden werden. Es handelt sich wahrscheinlich um ein numerisches Problem. Zur Kontrolle ist das 3.5 Modell eingeführt worden.

- Große Verformung eines Knotens an der Geländeoberkante

Es ist ein bekanntes Problem, dass bei relativ regulärem Netz in Kombination mit geringer Festigkeit ein Knoten sehr große Verformungen erfahren kann. Dieses numerische Problem ist mit einer Vergrößerung (bis 0,5 m unter Geländeoberkante) des Netzrasters beseitigt worden.

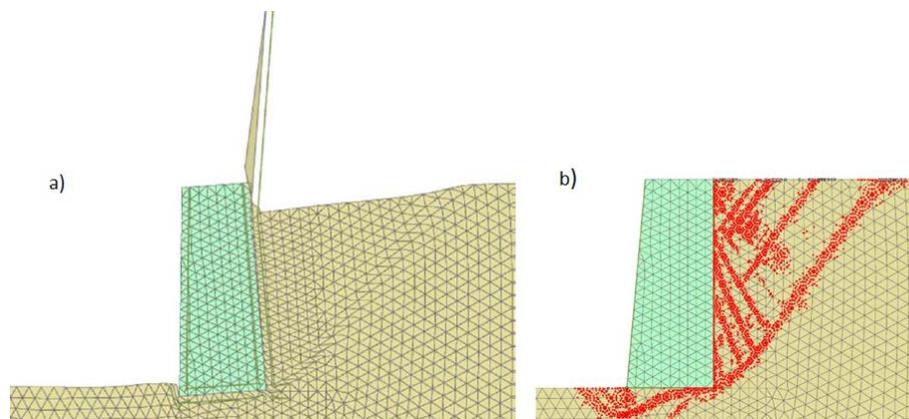


Abb. 82 a) Totale Verschiebung Iul und b) Plastische Punkte

- Große Verformung der Wandvorderseite

Auf Grund der starken Deformation der Wandvorderseite ist ein „Tension cut-off Wert“ von 15 kPa für den Boden A\* für alle Berechnungen der 2. Variante eingeführt worden.

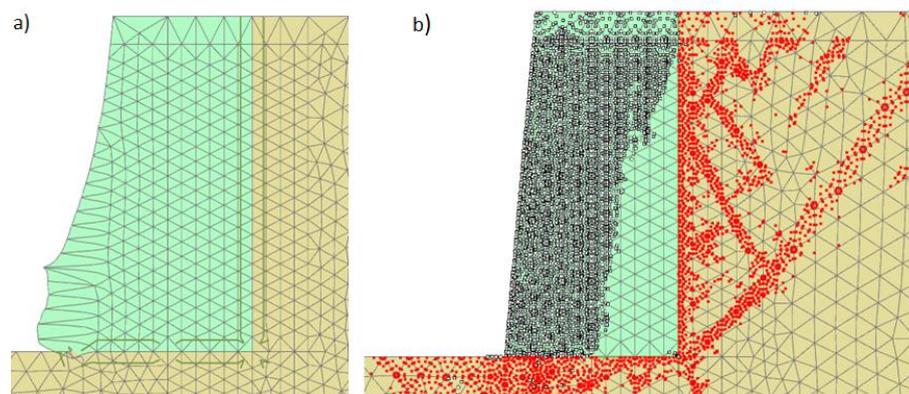


Abb. 83 a) Totale Verschiebung Iul und b) Plastische Punkte

### 5.1.4 Interpretation der Ergebnisse

Bei beiden Berechnungsvarianten des 3.0 Modells sind Probleme aufgetreten, deren Grund nicht herauszufinden war. In der 2. Variante ergibt sich eine minimal, erforderliche Kohäsion, welche größer als jene des breiteren Körpers (4.0 Modell) ist. Dies ist unrealistisch und stimmt mit den restlichen Ergebnissen nicht überein, da bei kleineren Breiten eine Erhöhung der erforderlichen Kohäsion zu erkennen und auch zu erwarten ist. Aus diesem Grund wird das Ergebnis des 3.0 Modells nicht weiter berücksichtigt (siehe Tab. 28).

Tab. 28 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Plaxis

Modell	Geometrie		Boden A (Mohr-Colomb)	Boden A* (Mohr-Colomb)		Boden A* (linear-elastisch)
	Neigung [°]	Breite [m]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	c <sub>min</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	M <sub>sf</sub>	M <sub>sf</sub>
2.5 Modell	85°	2,5 m	0,1	55	1,05	1,05
3.0 Modell		3,0 m		78	1,35	2,75
3.5 Modell		3,5 m		48	1,29	-
4.0 Modell		4,0 m		42	1,40	1,39

Bei beiden Varianten ist das selbe Versagensbild gut zu erkennen. Der Versagensmechanismus besteht aufgrund des abgleitenden Erdkeils aus einer Kippbewegung des Vernagelungskörpers mit einem kombinierten Grundbruchversagen. Je schmaler die Modelle werden, umso ausgeprägter ist die Kippproblematik.

Es ist mit Plaxis durchaus möglich, die minimale Breite mit einer erforderlichen Kohäsion des Körpers und den daraus resultierenden Bruchmechanismen herauszufinden. Wie jedoch im Detail die Vernagelung anzuordnen ist oder ausgeführt werden muss, um genau diese berechnete Festigkeit zu erreichen, erfordert weitergehende Untersuchungen.

## 5.2 Fachwerkmodelle

Das Fachwerkmodell soll zusätzlich zu den Plaxis-Berechnungen eine weitere alternative Betrachtungsweise für Bodenvernagelungen ermöglichen. In der Statik besteht ein klassisches Fachwerk aus Zug- und Druckstäben, welche gelenkig miteinander verbunden sind. Ein ähnliches Verhalten wird auch in der Literatur für einen vernagelten Körper beschrieben. Dabei soll der Nagel den Zug und der Boden den Druck übertragen (Witt, K.J., 2009).

Ein Fachwerkmodell soll das Verhalten des Vernagelungskörpers repräsentieren. Die Idee dahinter ist, dass in Zukunft eine Bodenvernagelung als Gewichtskörper bemessen und betrachtet werden kann.

### 5.2.1 Fachwerkmodellbildung

Es wird versucht, plausible Ergebnisse der Nagelkräfte (= Zugkraft in einem Fachwerk) mithilfe eines Fachwerkmodells zu erhalten. Dabei werden zum einen zwei selbst entwickelte Modelle mit Slide berechnet und verglichen (siehe Kapitel 5.2.2) und zum anderen die Messergebnisse (Nagelkräfte) des Feldversuches B von Gässler (Gässler, 1987) mit einem Fachwerkmodell nachgerechnet (siehe Kapitel 5.2.3).

#### **Vorgehensweise**

Im Programm RuckZuck 6.0 wird ein Fachwerk mit Stäben konstruiert. Dieses weist die gleiche Form wie ein vernagelter Bodenkörper auf und ist mit einem festen (Luftseite) und einem horizontal beweglichen Auflager (Erdseite) gelagert.

Es werden zwei Lastfälle untersucht, welche zur Berechnung der Normalkräfte in den Stäben kombiniert werden. Im ersten Lastfall wird das Eigengewicht des vernagelten Bodens definiert. Um die passende Wichte  $\gamma$  der Stäbe ermitteln zu können, muss zuerst das Gewicht des Körpers  $G_K$  berechnet werden. Nachdem sich an der Vorderseite einer Nagelwand eine Spritzbetonschale befindet, erhalten die vertikalen Stäbe in diesem Bereich die Wichte des Stahlbetons. Anschließend wird die Wichte der übrigen Stäbe so angepasst, dass die Summe der vertikalen Auflagerkräfte dem Gewicht des gesamten Körpers  $G_K$  entspricht. Theoretisch würde die Spritzbetonschicht einer Bodenvernagelung ein geringes Biegemoment aufnehmen können, jedoch wird dies im Fachwerkmodell vernachlässigt.

$$G_K = \text{Volumen des Vernagelungskörpers} * \text{Wichte von Boden} \quad (40)$$

Beim zweiten Lastfall wird der Erddruck an das Fachwerkmodell angesetzt. Dafür wird der aktive Erddruck über die gesamte Höhe ermittelt und auf die Knoten der Spritzbetonschale (luftseitig) angesetzt (siehe Abb. 84).

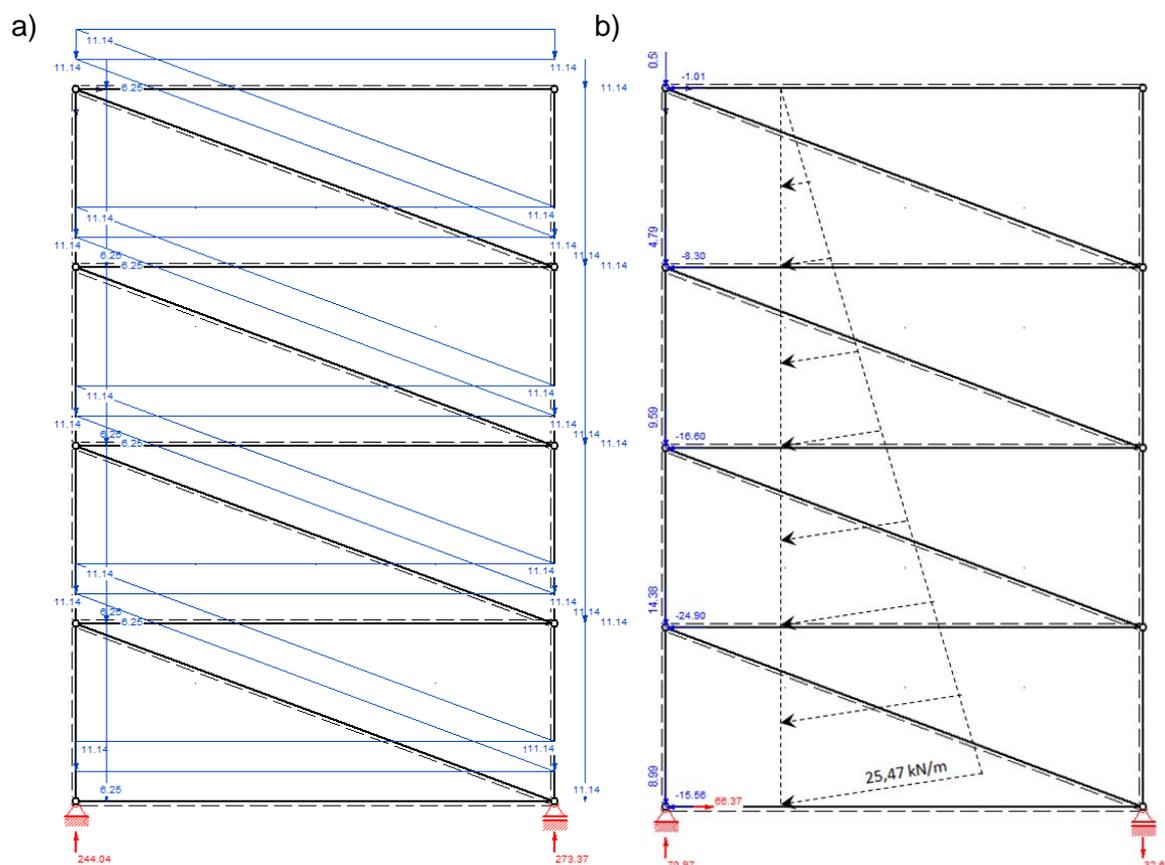


Abb. 84 a) Lastfall Eigengewicht und b) Lastfall Erddruck

Beide Lastfälle werden mit charakteristischen Werten gerechnet. Die Kombination dieser und das zugehörige Ergebnis der Nagelkräfte sind für jedes untersuchte Fachwerkmodell im Anschluss ersichtlich.

### 5.2.2 Vergleich von Slide und Fachwerkmodell (RuckZuck)

Um eine Vorstellung zu erhalten, wie die Nägel angeordnet oder variiert werden können, wurden vorab einige Varianten skizziert und durchdacht (siehe Anhang 59 bis 61). Die beiden Modelle in Abb. 85 kristallisierten sich als Favoriten heraus. Das 1. Modell soll eine Standardbodenvernagelung darstellen. Eine Abwandlung einer normalen Bodenvernagelung ist das 7. Modell, mit dem Hintergedanken, dass der Bereich mit mehreren Nägeln unterschiedlicher Neigung vernagelt wird. Es wird dadurch erwartet, einen vernagelten Bereich erzeugen zu können, der ähnlich wie eine Gewichtsmauer wirkt.

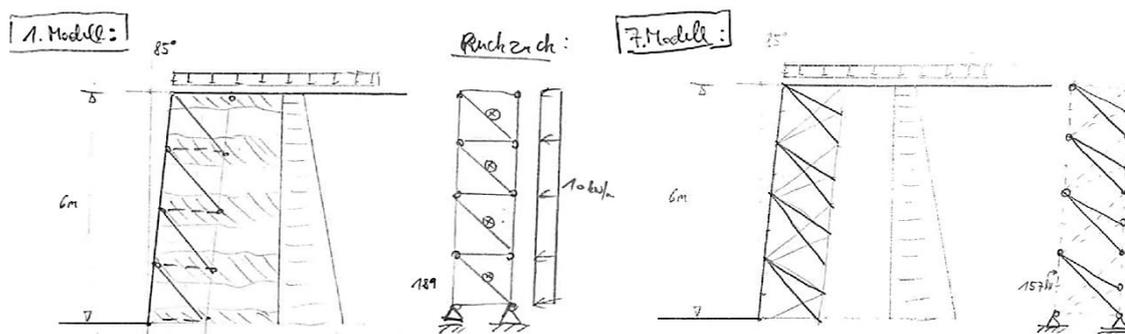


Abb. 85 Entwurfsskizzen der Fachwerkmodelle

Zuerst werden beide Modelle, wie zuvor beschrieben, im RuckZuck mit den Parametern laut Tab. 29 konstruiert und die Normalkräfte ermittelt. Für eine vereinfachte Modellierung der Fachwerke wird die Vorderseite der Nagelwand als vertikal angenommen. Weiters ist zu erwähnen, dass sich aus bautechnischer Sicht die erste Nagelreihe in der Regel nicht an der Geländeoberkante befindet, jedoch um das Konstruieren des Fachwerks vereinfachen zu können, diese dort angenommen wird. (siehe Abb. 86)

Tab. 29 Eingabeparameter für die Stäbe der Fachwerke

Parameter	Symbol	1. Modell (2,5m)		1. Modell (4,0m)		7. Modell (2,5m)		7. Modell (4,0m)	
		B	SB	B	SB	B	SB	B	SB
Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\text{Stab}}$	668	25	747	25	364	25	399	25
Stabfläche [cm <sup>2</sup> ]	$A_{\text{Stab}}$	149,1	2500	149,1	2500	149,1	2500	149,1	2500
B...Boden und SP...Spritzbeton									

Im nächsten Schritt werden bei beiden Modellen die Standsicherheiten und Nagelkräfte mit der Geometrie der Fachwerke mit Slide berechnet. Dafür sind die Boden- und Nagelparameter aus Tab. 30 zu entnehmen.

Tab. 30 Boden- und Nagelparameter

Boden			Nagel		
Parameter	Symbol	Wert	Parameter	Symbol	Wert
Wichte	$\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>	Typ	-	Boden-nagel
Reibungswinkel	$\varphi$	35°	Horizontalabstand	h	1,0 m
Kohäsion	c	0,1 kN/m <sup>2</sup>	Begrenzte Zugkraft	Z <sub>begr</sub>	100 kN
Steifigkeitstyp	-	Mohr-Coulomb	Schubkraft	T <sub>m</sub>	50 kN/m

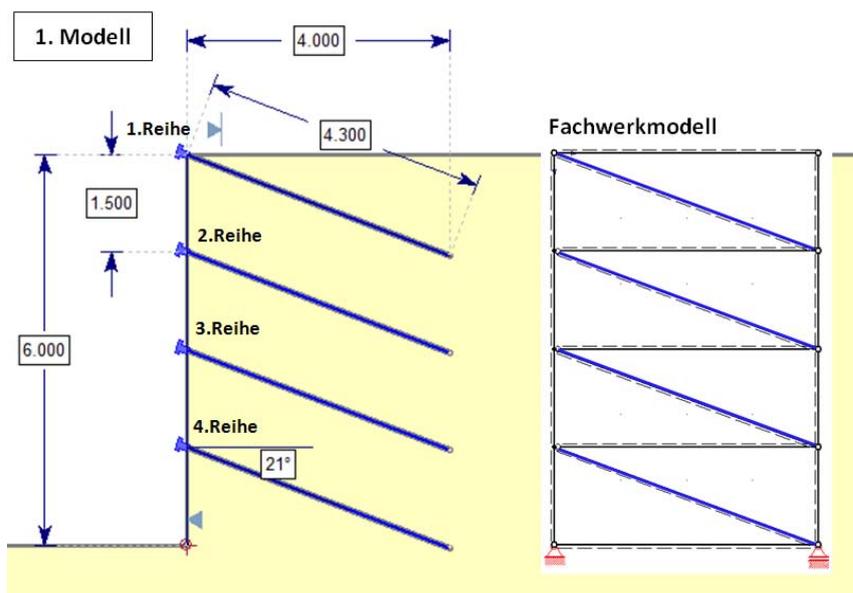


Abb. 86 Vergleich 1. Modell (Slide) mit Fachwerkmodell (RuckZuck)

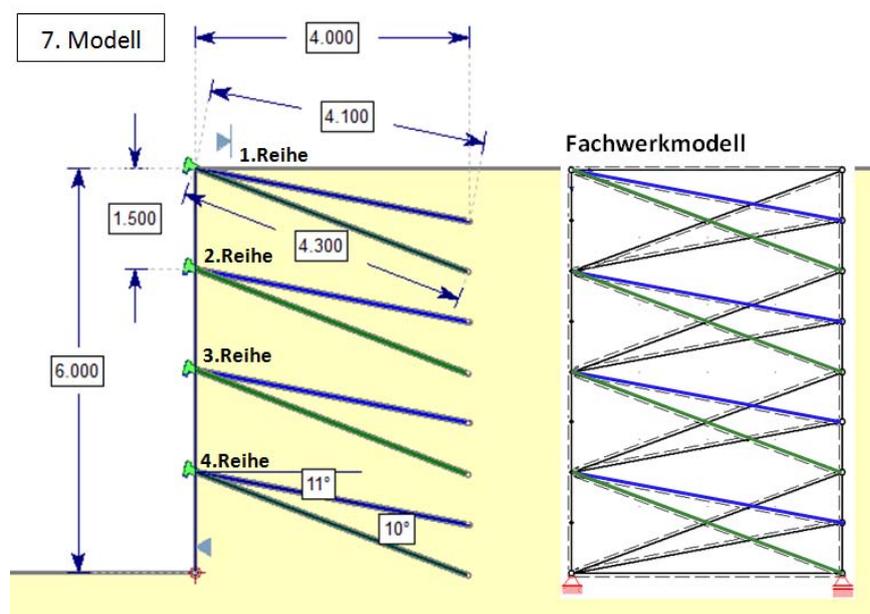


Abb. 87 Vergleich 7. Modell (Slide) mit Fachwerkmodell (RuckZuck)

Das Programm Slide wendet die Fellenius-Regel zur Standsicherheitsermittlung an. Dabei werden nur die Bodenparameter, aber nicht die Mantelreibung mit der Sicherheit  $\eta$  abgemindert (mobilisiert). Aus diesem Grund wird vorab eine Variantenstudie in Bezug auf eine Mobilisierung der Schubkraft  $T_m$  durchgeführt, bei der drei Verfahren verglichen werden.

Das 1. Modell (siehe Abb. 86) wird hierfür herangezogen und für die erste Aushubphase die Sicherheit mit Slide berechnet. Mit einem Zwangspunkt am Nagelkopf der zweiten Nagelreihe wird diese Aushubphase simuliert und mit Janbu (siehe „Problem bei Slide-Berechnung“) die minimale Standsicherheit ermittelt.

### 1. Variante: Reduzierung der Schubkraft mit Sicherheit $\eta$

Zu Beginn wird die Standsicherheit mit einer gewählten Schubkraft  $T_m = 50 \text{ kN/m}$  ermittelt. Im nächsten Schritt wird die Anfangsschubkraft mit der errechneten Sicherheit abgemindert und im Slide erneut die Sicherheit berechnet. Dieser Vorgang wird sooft wiederholt, bis die Sicherheit konstant bleibt.

### 2. Variante: Reduzierung der Festigkeiten mit Sicherheit $\eta$

Es wird die eine idente Vorgehensweise zum ersten Verfahren verwendet, lediglich wird nicht die Schubkraft, sondern die Festigkeit des Bodens (Reibungswinkel und Kohäsion) mit der Sicherheit aus Slide abgemindert. Zum Schluss ergibt sich eine Sicherheit von 1,0 (siehe Abb. 88). Dieses Ergebnis ist ein Beleg dafür, dass das Programm mit der Festigkeitsreduktion rechnet.

### 3. Variante: Kombination aus 1. und 2. Variante

Bei der Kombination beider Varianten ergibt sich nach acht Iterationsschritten ebenfalls eine Sicherheit von 1,0.

Für die weiteren Berechnungen wird die 1. Variante herangezogen.

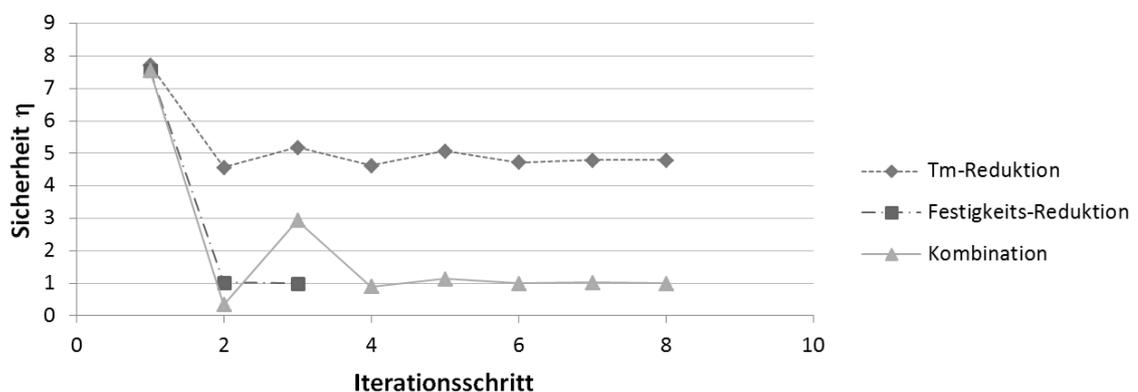


Abb. 88 Reduktionsvergleich

### Problem bei Slide-Berechnung

Bei Standsicherheitsberechnungen von kreisförmigen Versagenskörpern ist laut Literatur in der Regel der Ansatz nach Bishop anzuwenden. Im Programm Slide wird die passive Berechnungsmethode für Nägel angeraten. Dies bedeutet, ein Nagel erfährt erst nach einer Bewegung des Gleitkörpers eine Nagelkraft. Mit Hilfe eines Zwangspunktes (am Nagelkopf jeder Nagelreihe) können im Programm die Aushubschritte untersucht werden (siehe Abb. 89). Infolge der Geometrie der Nagelwand und der Kombination aus Zwangspunkt, Ansatz nach Bishop und passiver Berechnungsmethode entstehen keine logischen Bruchkörper.

Nachdem die Ursache des Entstehens dieser eigenartigen Versagenskörper nicht herauszufinden war, wurden die weiteren Sicherheitsberechnungen mit der aktiven anstelle der passiven Berechnungsmethode und dem Ansatz nach Janbu durchgeführt. Mit dieser Annahme ist es möglich, die Bruchfigur mit einem Zwangspunkt zu fixieren und die einzelnen Aushubschritte mit plausiblen Bruchkörpern zu berechnen. Diese können nun auch einem Fachwerkmodell gegenübergestellt werden.

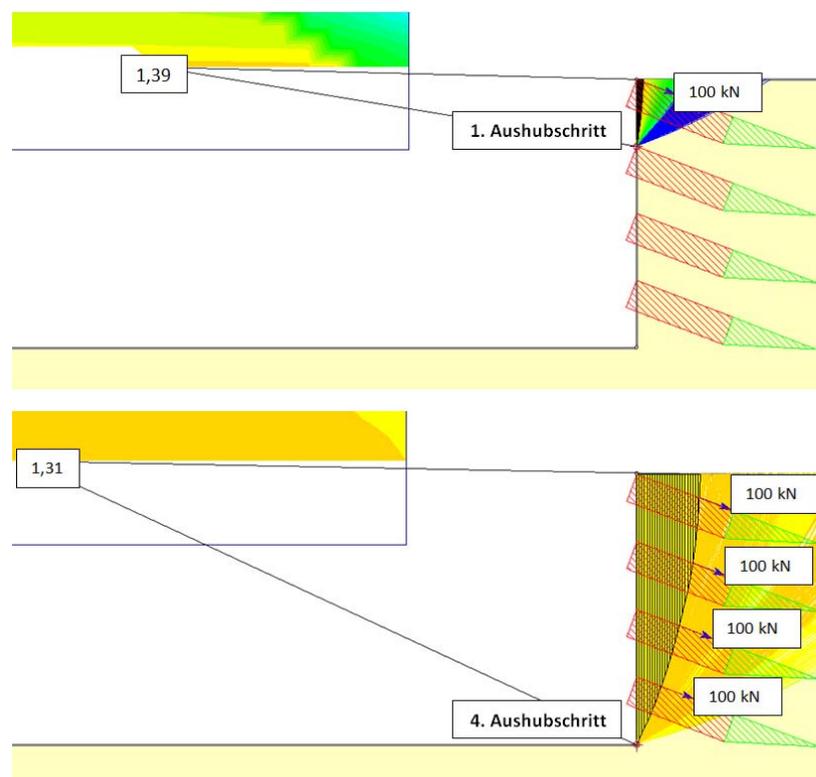


Abb. 89 1. und 4. Aushubschritt mit Zwangspunkt und Ansatz nach Bishop

### ***Interpretation der Ergebnisse***

Mit dem 1. Verfahren werden beide Modelle untersucht, um die maximale Nagelkraft für jeden Aushubschritt herausfinden zu können. Es kann unter Umständen vorkommen, dass ein höherliegender Nagel eine größere Kraft als ein tiefer liegender aufweist. Aus diesem Grund sollte jede Nagelreihe überprüft werden, um die maßgebende Nagelkraft während der Aushubschritte zu finden. Diese und deren Iterationsschritte der unterschiedlichen Modelle sind in Tab. 31 bis Tab. 34 angeführt. Die Maximalwerte der Aushubschritte für jeden einzelnen Nagel sind darin gekennzeichnet. In Abb. 90 bis Abb. 93 sind die Fachwerkmodelle mit deren Nagelkräften zum Vergleich dargestellt. Auch die Nagelkräfte, für das in Plaxis (siehe Kapitel 5.1) ermittelte schlankste Modell (2,5 m Breite), werden ebenfalls für das 1. und 7. Modell berechnet und anschließend dem Fachwerkmodell gegenübergestellt.

Ein derartiger Vergleich mit zwei völlig verschiedenen Berechnungsverfahren (Slide und Fachwerkmodell) zeigt erwartungsgemäß, dass die Nagelkräfte stark voneinander abweichen. Im Slide schneiden die Gleitkreise die Nägel, da es sonst nicht möglich wäre, die Nagelkräfte zu ermitteln. Bei einem Fachwerkmodell soll jedoch der vernagelte Boden als Gesamtkörper wirken, womit die Kräfte aller Nägel ermittelt werden können. Ob das erwünschte Verhalten bei Fachwerkmodellen zutrifft, kann mit diesen Untersuchungen nicht belegt werden.

#### 1. Modell

Wird der Endzustand (4. Aushubschritt) betrachtet und die Kräfte zwischen Slide und RuckZuck verglichen, so passen die Kräfte der 3. Nagelreihe überraschenderweise sehr gut zusammen (*4,0 m Breite*: Slide = 36,15 kN; Fachwerkmodell = 36,03 kN), jedoch die darüber und darunter liegenden Nagelkräfte weichen stark voneinander ab.

#### 7. Modell

Beim 7. Modell wird nur jener Gleitkreis verglichen, der die geringste Standsicherheit aufweist, da sich bereits beim 1. Modell herausstellte, dass der Endzustand der maßgebendste Fall mit der geringsten Standsicherheit und den größten Nagelkräften ist. Eine Übereinstimmung der Nagelkräfte der 3. Nagelreihe (wie beim 1. Modell) kann hier nicht erkannt werden. Zusätzlich bekommen die ersten Nägel im oberen Bereich des Fachwerks eine Druck- (blauer Stab) und keine Zugbeanspruchung. Dieses Problem kann eventuell mit Hilfe von weiteren Untersuchungen und neuer Anordnung der Fachwerksstäbe eliminiert werden.

Tab. 31 Nagelkräfte des 1. Modells (4,0 m) aus Slide-Iteration

1. Modell (4 m Breite)							
Aushub-schritt	Iteration	mobilisierte Schubkraft [kN/m]	Sicherheit $\eta$	Nagelkraft [kN]			
				1. Nagel	2. Nagel	3. Nagel	4. Nagel
1.	8	10,44	4,79	30,31			
2.	9	16,80	2,98	<b>34,77</b>	<b>47,50</b>		
3.	13	23,92	2,10	-	25,67	<b>60,0</b>	
4.	8	31,65	1,57	-	0,21	36,15	<b>80,46</b>

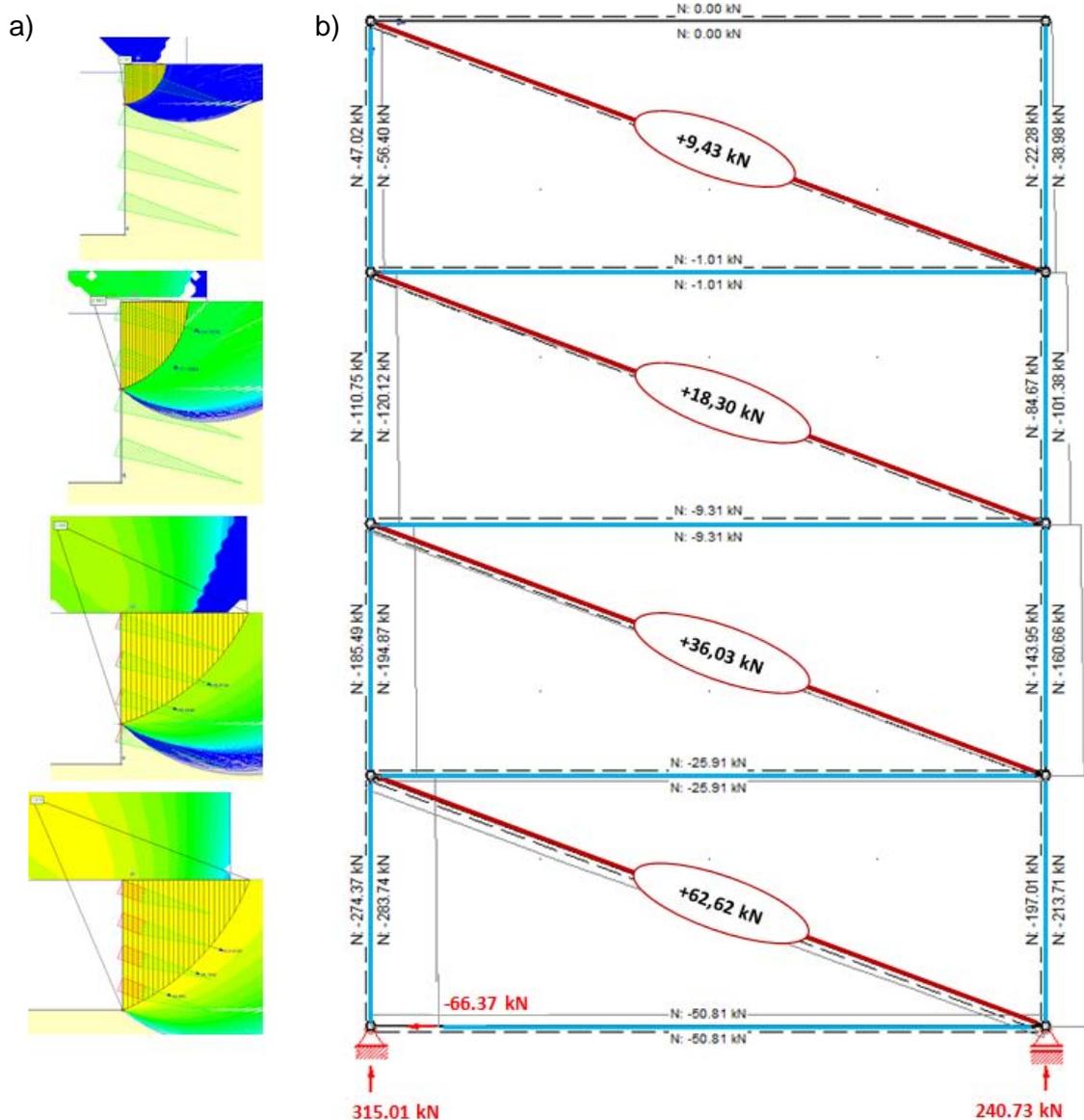


Abb. 90 1. Modell mit 4,0m a) Aushub-schritte in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräfte

Tab. 32 Nagelkräfte des 1. Modells (2,5 m) aus Slide-Iteration

1. Modell (2,5 m Breite)							
Aushub-schritt	Iteration	mobilisierte Schubkraft [kN/m]	Sicherheit $\eta$	Nagelkraft [kN]			
				1. Nagel	2. Nagel	3. Nagel	4. Nagel
1.	9	17,55	2,85	31,45			
2.	7	27,22	1,84	<b>31,75</b>	<b>50,94</b>		
3.	11	35,97	1,39	-	29,82	<b>66,0</b>	
4.	6	44,64	1,11	-	-	40,57	<b>85,15</b>

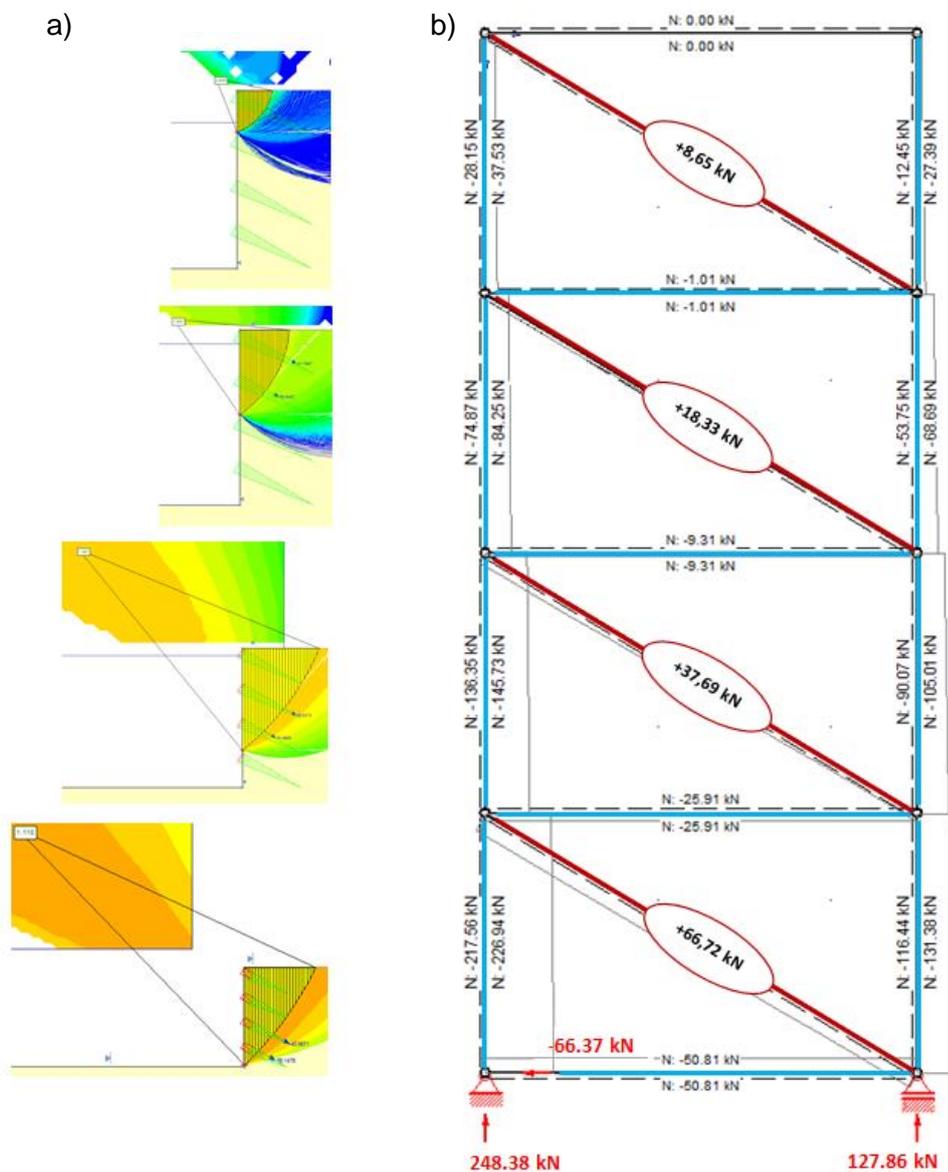


Abb. 91 1.Modell mit 2,5 m a) Aushub-schritte in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräften

In Tab. 33 und Tab. 34 werden nur die 3. und 4. Nagelreihe (eine Nagelreihe besteht aus zwei unterschiedlich geneigten Nägeln) aufgelistet. Die darüber liegenden Nagelreihen weisen gemäß dieser Berechnung keine Kräfte in den Nägeln auf und werden somit nicht angeführt.

Tab. 33 Nagelkräfte des 7. Modells (4 m) aus Slide-Iteration

7. Modell (4 m Breite)							
Aushubschritt	Iteration	mobilisierte Schubkraft [kN/m]	Stand-sicherheit $\eta$	Nagelkraft [kN]			
				3.0 Nagel	3.1 Nagel	4.0 Nagel	4.1 Nagel
4.	8	26,60	1,88	-	14,98	39,77	<b>56,19</b>

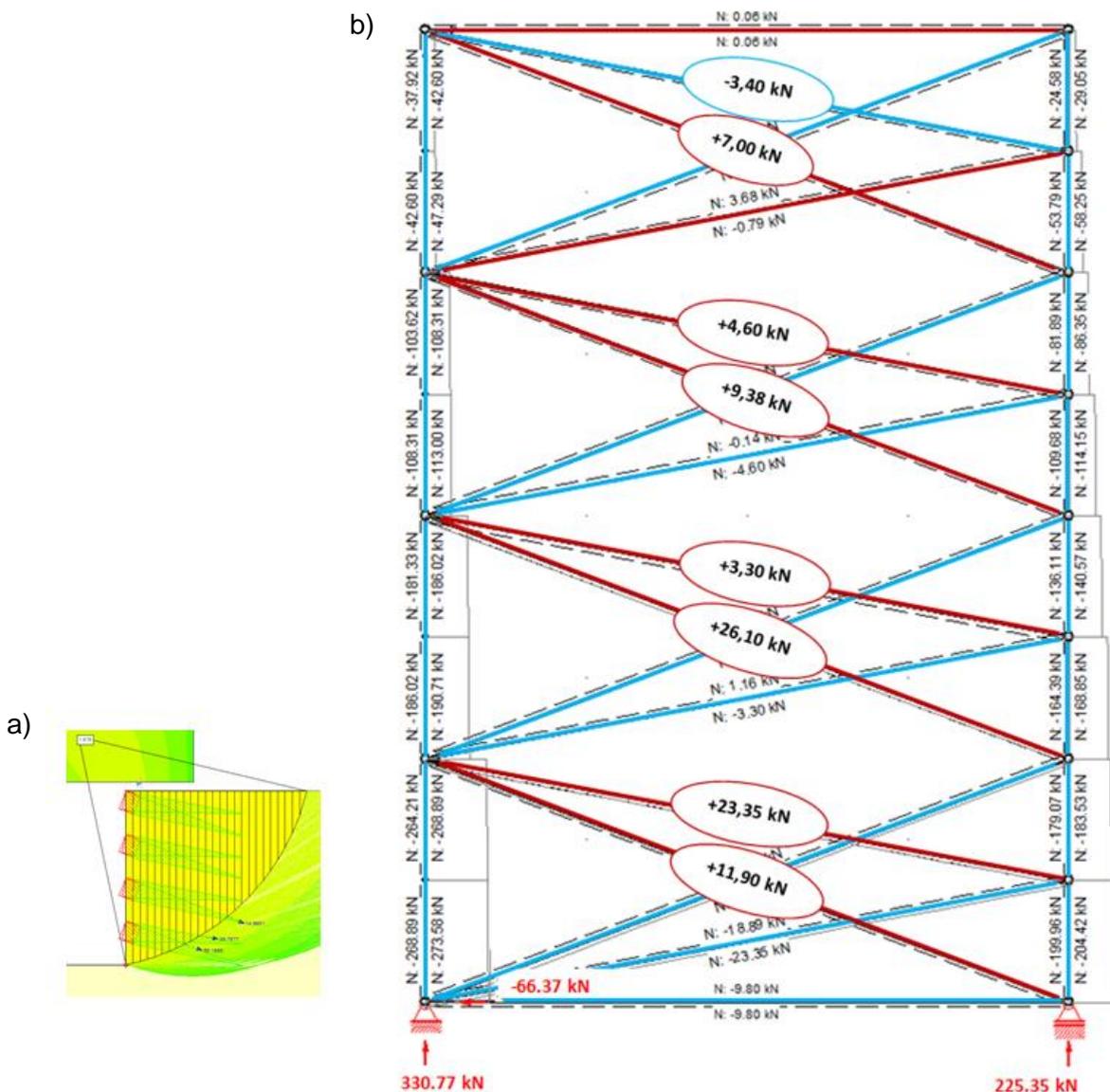


Abb. 92 7. Modell mit 4,0 m a) 4. Aushubschritt in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräften

Tab. 34 Nagelkräfte des 7. Modells (2,5 m) aus Slide-Iteration

7. Modell (2,5 m Breite)							
Aushub-schritt	Iteration	mobilisierte Schubkraft [kN/m]	Stand-sicherheit $\eta$	Nagelkraft [kN]			
				3.0 Nagel	3.1 Nagel	4.0 Nagel	4.1 Nagel
4.	7	38,46	1,30	-	18,94	44,24	<b>62,34</b>

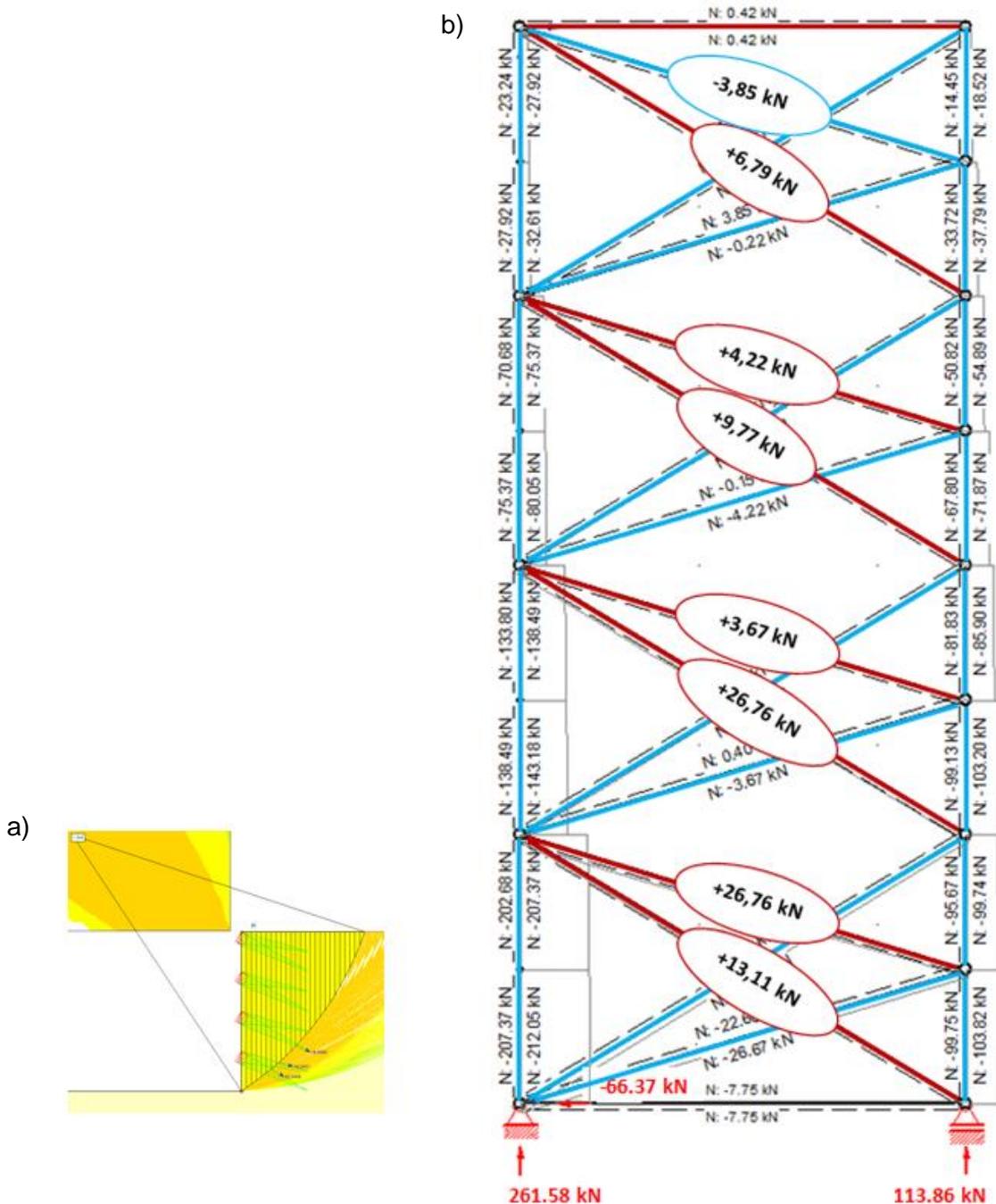


Abb. 93 7. Modell mit 2,5 m a) 4. Aushubschritt in Slide und b) Fachwerkmodell mit Nagelkräften

5.2.3 Vergleich von Gässler Feldversuch mit dem Fachwerkmodell (RuckZuck)

Gässler hat 1987 im Zuge seiner Dissertation ebenfalls das Tragverhalten von Geländesprüngen untersucht. Dabei führte er drei Feldversuche mit Bodenvernagelungen durch (Gässler, 1987). Auf den Großversuch B wird in diesem Kapitel näher eingegangen.

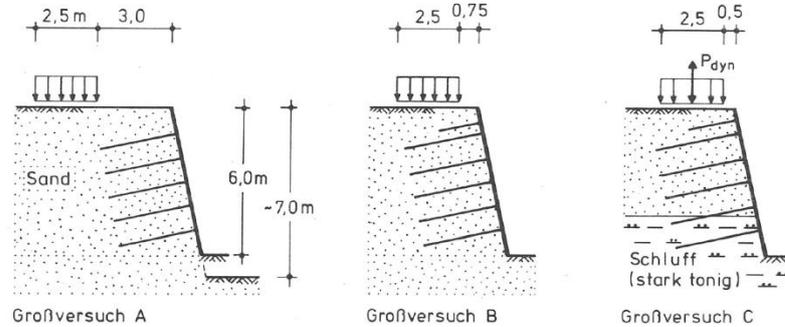


Abb. 94 Großversuch A, B und C von Gässler (Gässler, 1987)

**Großversuch B**

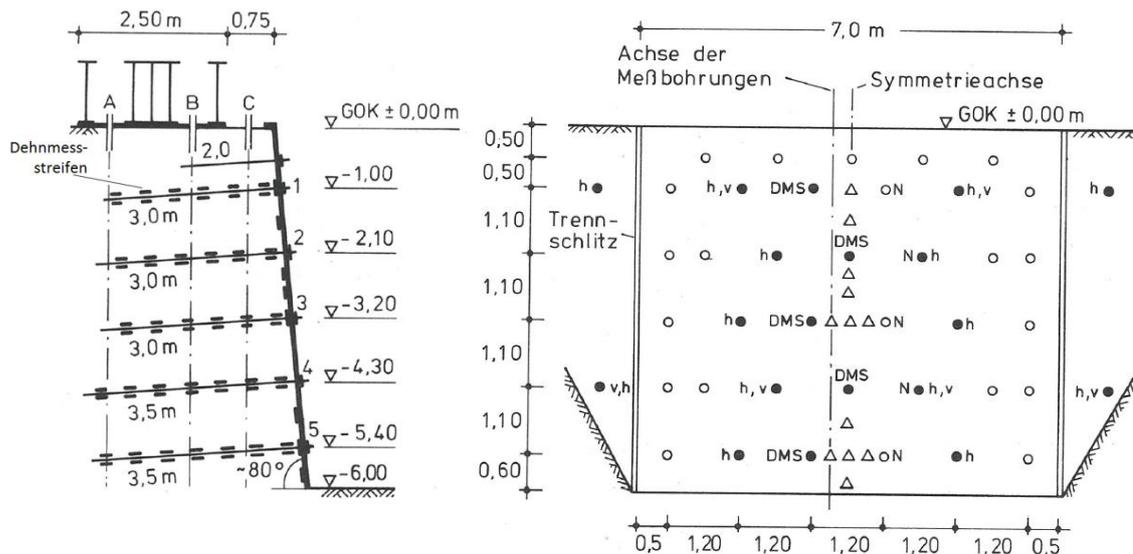


Abb. 95 Schnitt und Ansicht von Großversuch B (Gässler, 1987)

Tab. 35 Bodenparameter

Boden		
Parameter	Symbol	Wert
Wichte	$\gamma$	15,6 kN/m <sup>3</sup>
Reibungswinkel	$\varphi$	40,5°
Kohäsion	c	0 kN/m <sup>2</sup>

Die Anordnung der Nägel, die Geometrie der Bodenvernagelung und die zur Erddruckberechnung für das Fachwerkmodell verwendeten Bodenparameter sind in Abb. 95 und Tab. 35 ersichtlich. Für das Konstruieren des Fachwerks sind die Wichten und die verwendeten Stabflächen in Tab. 36 aufgelistet.

Tab. 36 Eingabeparameter für die Stäbe der Fachwerke

Parameter	Symbol	Einheit	Feldversuch B	
			Boden	Spritzbeton
Wichte	$\gamma_{\text{Stab}}$	[kN/m <sup>3</sup> ]	425	25
Stabfläche	$A_{\text{stab}}$	[cm <sup>2</sup> ]	149,1	3000

Wie im Kapitel 5.2.1 erklärt, werden die Nagelkräfte mit zwei Lastfällen (Eigengewicht und Erddruck) ermittelt. Dabei ist zu erwähnen, dass der Erddruck vereinfacht für eine vertikale Wand gerechnet wird (siehe Abb. 96 b). Die Nagelenden werden, entgegen der Ausführung von Gässler, kontinuierlich abgestuft. Somit ergibt sich eine maximale Gesamtbreite des Fachwerks (= vernagelter Körper) von 3,5 m.

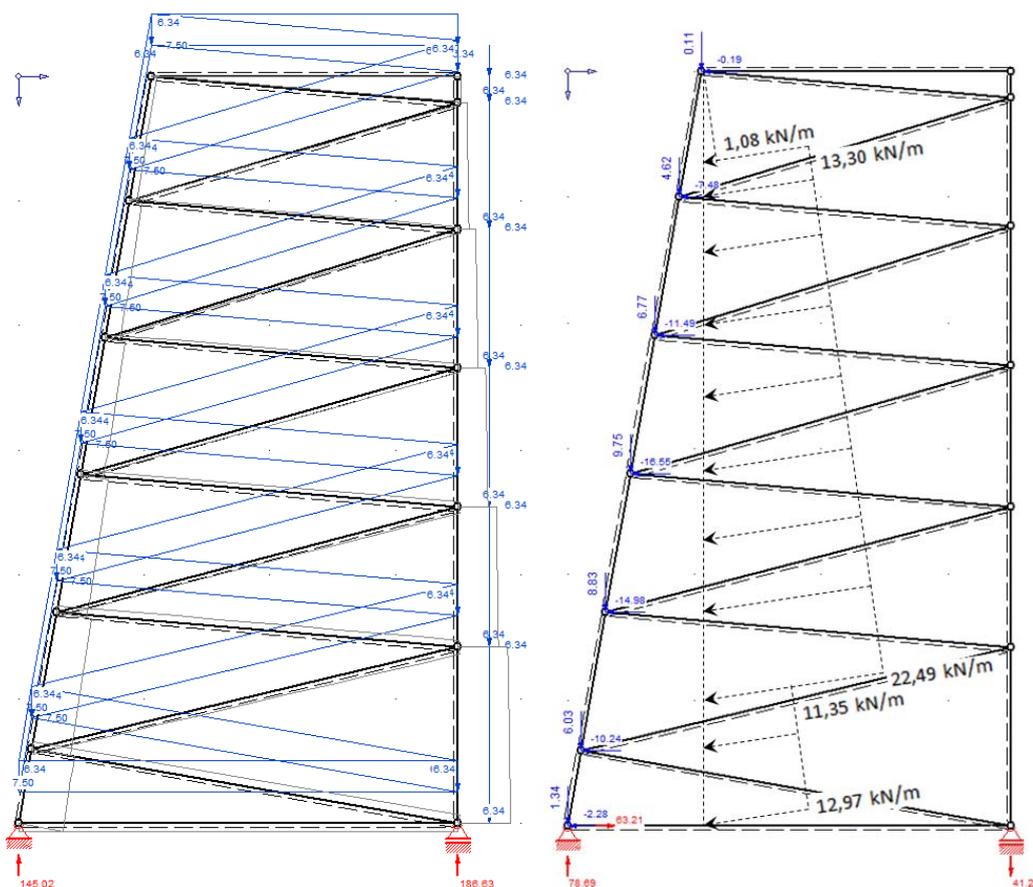


Abb. 96 a) Lastfall Eigengewicht und b) Lastfall Erddruck

**Interpretation des Ergebnisses**

Mit der Kombination der beiden Lastfälle ergeben sich die Nagelkräfte (blau = Druck, rot = Zug) für das Fachwerkmodell (siehe Abb. 97 rechts). Gässler hat den obersten Nagel nicht mit Dehnmessstreifen bestückt und somit sind keine Messergebnisse für diesen Nagel verfügbar. Aus diesem Grund wird auch im Fachwerkmodell dieser Nagel nicht in den Vergleich mit aufgenommen. Gässler führte beim Versuch B mehrere Laststufen durch und hat die dazugehörigen Nagelkräfte gemessen. Bei einer Auflast von 150 kN/m<sup>2</sup> ist der Bruch der Nagelwand eingetreten. Infolgedessen wird auch dieser Lastfall für den Vergleich herangezogen.

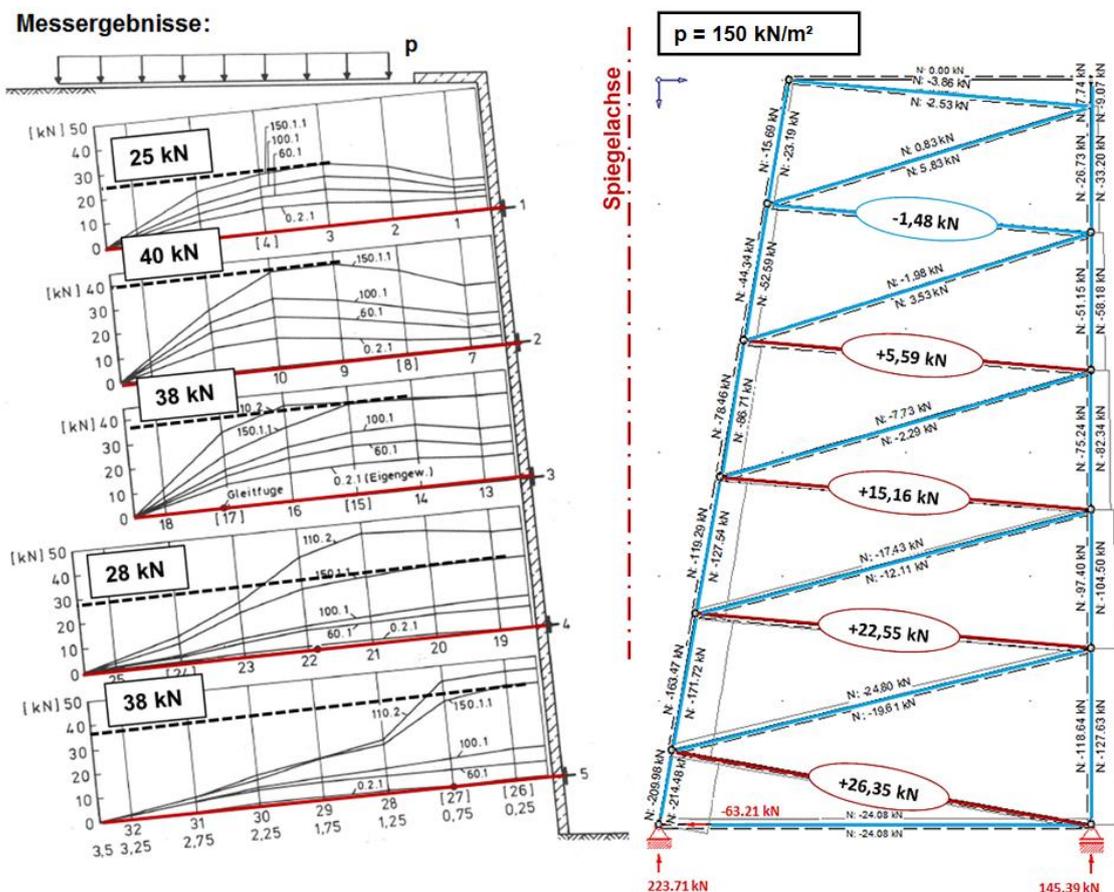


Abb. 97 Gegenüberstellung der Nagelkräfte von Gässler (links) und Fachwerkmodell (rechts)  
 Es war nicht möglich, die gemessenen Nagelkräfte aus dem Versuch mit dem Fachwerkmodell zu verifizieren. Der einzige Nagel, welcher annähernd ähnliche Kräfte aufweist, befindet sich in der vierten Nagelreihe (Gässler = 28 kN und Fachwerkmodell = 22,55 kN). Die darüber- und darunterliegenden Kräfte zeigen starke Abweichungen.

Auch bei diesem Fachwerkmodell gibt es Komplikationen mit den Zug- und Druckstäben im oberen Bereich, die eventuell durch eine neue Anordnung vermieden werden könnten.

## 6 Bemessung einer Nagelwand nach Eurocode 7

Zur Bemessung einer Nagelwand nach Eurocode 7 wird die im Kapitel 2.6.5 behandelte Nagelwand herangezogen. Die Bodenparameter und Geometrien sind der Tab. 37. und Abb. 98 zu entnehmen. Zusätzlich wird für die Bemessung nach EC7 eine Bemessungssituation BS1 und Schadensfolgeklasse CC1 angenommen.

Tab. 37 Boden- und Nagelparameter

Boden			Nagel		
Parameter	Symbol	Wert	Parameter	Symbol	Wert
Wichte	$\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>	Typ		Boden-nagel
Reibungswinkel	$\varphi$	35°	Horizontalabstand	h	1,0 m
Kohäsion	c	0,1 kN/m <sup>2</sup>	begrenzte Zugkraft	$Z_{\text{begr}}$	100 kN
Steifigkeitstyp	-	Mohr-Coulomb	Ausziehfestigkeit	$T_m$	50 kN/m

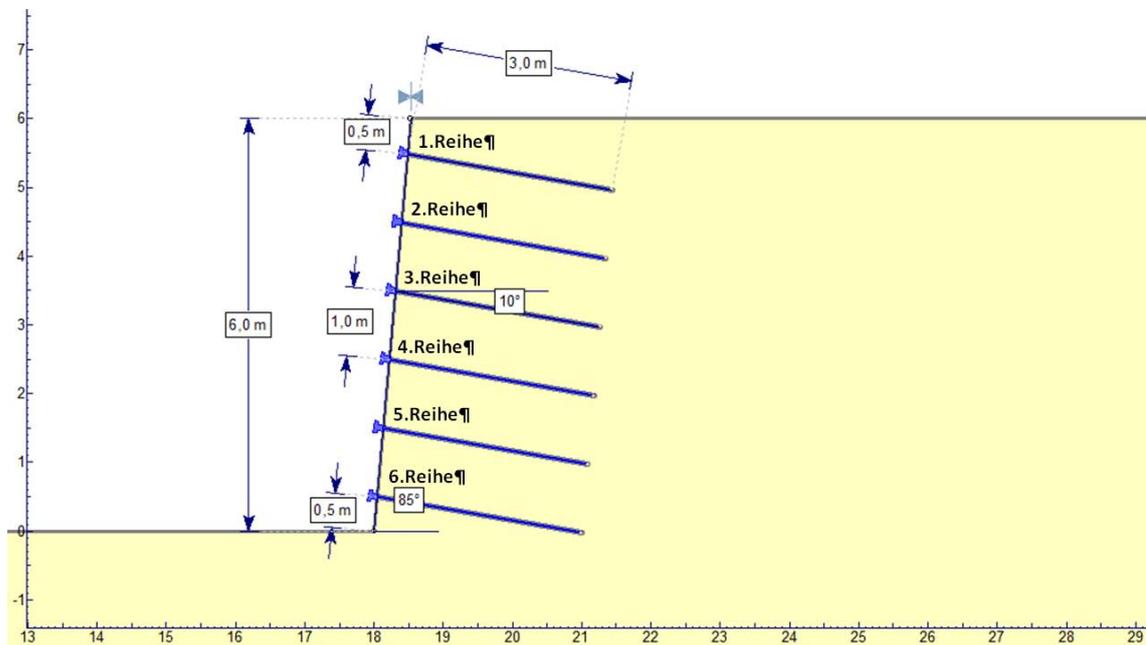


Abb. 98 Regelquerschnitt der Bodenvernagelung für den Vergleich der Ansätze

## 6.1 Nachweise für den Grenzzustand der Tragsicherheit (ULS)

Es werden folgende Nachweise für den Grenzzustand der Tragsicherheit geführt.

### 6.1.1 Gleitsicherheit (Nachweisverfahren 2)

Beim Gleitsicherheitsnachweis muss belegt werden, dass die aus Eigengewicht resultierende rückhaltende Gleitkraft größer gleich dem horizontalen Erddruck ist. Die dafür verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte werden aus Tabelle 2 und 4 der ÖNORM B 1997-1-1:2013 entnommen.

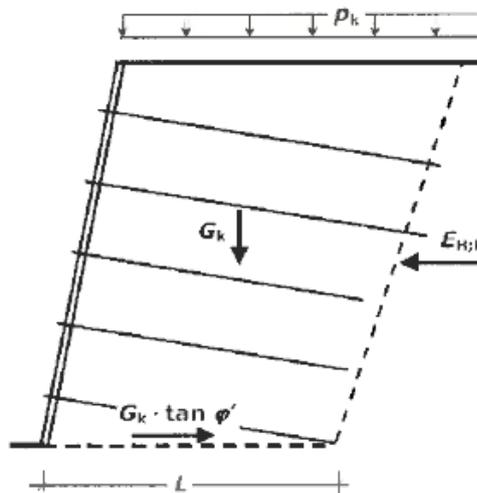


Abb. 99 Nachweis der Gleitsicherheit (RVS 09.01.41, 2013)

$$\frac{G_k * \tan(\varphi')}{\gamma_{R,h}} \geq E_{H;k} * \gamma_E \quad (41)$$

$$\frac{(3,04 * 6 * 20 * 1,0 \text{ m}) * \tan(35)}{1,1} \geq 66,17 * 1,35 \quad (42)$$

$$232,2 \text{ kN} > 89,3 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Der Gleitsicherheitsnachweis ist erfüllt.

### 6.1.2 Kippsicherheit (Nachweisverfahren 2)

Die Kippsicherheit ist für dieses Beispiel nachgewiesen, wenn  $e \leq L/6$  ist. Würde eine veränderliche Last auf den Nagelkörper einwirken, gilt die Bedingung  $e \leq L/3$ .

$$e = \frac{M}{V} = \frac{E_k * h/3}{G_k} = \frac{66,17 * 6/3}{364,8} = 0,36 \text{ m} \quad (43)$$

$$0,36 \leq L/6 = 0,5 \quad \checkmark$$

Der Kippsicherheitsnachweis ist erfüllt.

### 6.1.3 Nachweis der Grundbruchsicherheit (Nachweisverfahren 2)

Der Grundbruchnachweis muss, anhand des in Abb. 99 dargestellten Ersatzsystems, mit Nachweisverfahren 2 laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 belegt werden.

Dieser Nachweis wird erst bei einer außergewöhnlichen Geometrie maßgebend (siehe Abb. 100) und wird in dieser Bemessung daher vernachlässigt.

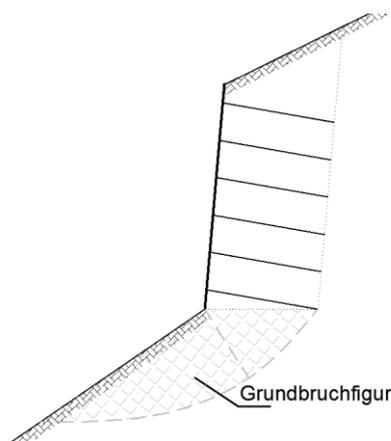


Abb. 100 Beispiel einer maßgebenden Geometrie für einen Grundbruchnachweis

### 6.1.4 Nachweis der Gesamtstandsicherheit (Nachweisverfahren 3)

Die Gesamtstandsicherheit wird mit Nachweisverfahren 3 laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 ermittelt. Dazu werden vor der Standsicherheitsberechnung mit Slide die geotechnischen Kenngrößen laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 Tabelle 16 entsprechend abgemindert.

Tab. 38 Teilsicherheitsbeiwerte für Bodenkenngrößen ( $\gamma_M$ ) (ÖNORM B 1997-1-1:2013, 2013)

Bodenkenngrößen <sup>a</sup>	Symbol	Wert für Schadensfolgeklasse								
		CC 1			CC 2			CC 3		
		Bemessungs-situation			Bemessungs-situation			Bemessungs-situation		
		BS 1	BS 2	BS 3	BS 1	BS 2	BS 3	BS 1	BS 2	BS 3
wirksamer Reibungswinkel <sup>b</sup>	$\gamma_{\varphi'}$	1,10	1,05	1,00	1,15	1,10	1,05	1,30	1,20	1,10
wirksame Kohäsion	$\gamma_c$	1,10	1,05	1,00	1,15	1,10	1,05	1,30	1,20	1,10
Wichte	$\gamma_\gamma$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
undrainierte Scherfestigkeit	$\gamma_{cu}$	1,20	1,15	1,10	1,25	1,20	1,15	1,40	1,30	1,20
einaxiale Druckfestigkeit	$\gamma_{qu}$	1,20	1,15	1,10	1,25	1,20	1,15	1,40	1,30	1,20

<sup>a</sup> Bestimmte Versagensmechanismen gemäß ÖNORM EN 1997-1:2009, Abschnitt 11.5.2 (z. B. Block auf der schiefen Ebene) erfordern unter Umständen andere Teilsicherheitsbeiwerte.  
<sup>b</sup> Dieser Beiwert wird auf  $\tan\varphi'$  angewendet.

Bodenparameter für Slide:

- $\gamma_d = \gamma_k = 20 \text{ kN/m}^3$  mit:  $\gamma_\gamma = 1,0$
- $\varphi'_d = \arctan(\tan\varphi' / \gamma_\varphi) = 32,5^\circ$  mit:  $\gamma_\varphi = 1,10$
- $c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_c} = 0,09 \text{ kN/m}^2$  mit:  $\gamma_c = 1,10$

Mit den neu berechneten Bodenparametern erfolgt die Eingabe und Standsicherheitsberechnung im Programm. Um die Gesamtstandsicherheit der Nagelwand betrachten zu können, muss ein Suchbereich (roter Strich) definiert werden. Anderenfalls würde das Programm einen Gleitkreis berechnen, welcher durch den Vernagelungskörper verläuft. Trifft dies zu, ist es kein Gesamtstandsicherheitsnachweis, sondern ein Nachweis der inneren Tragfähigkeit.

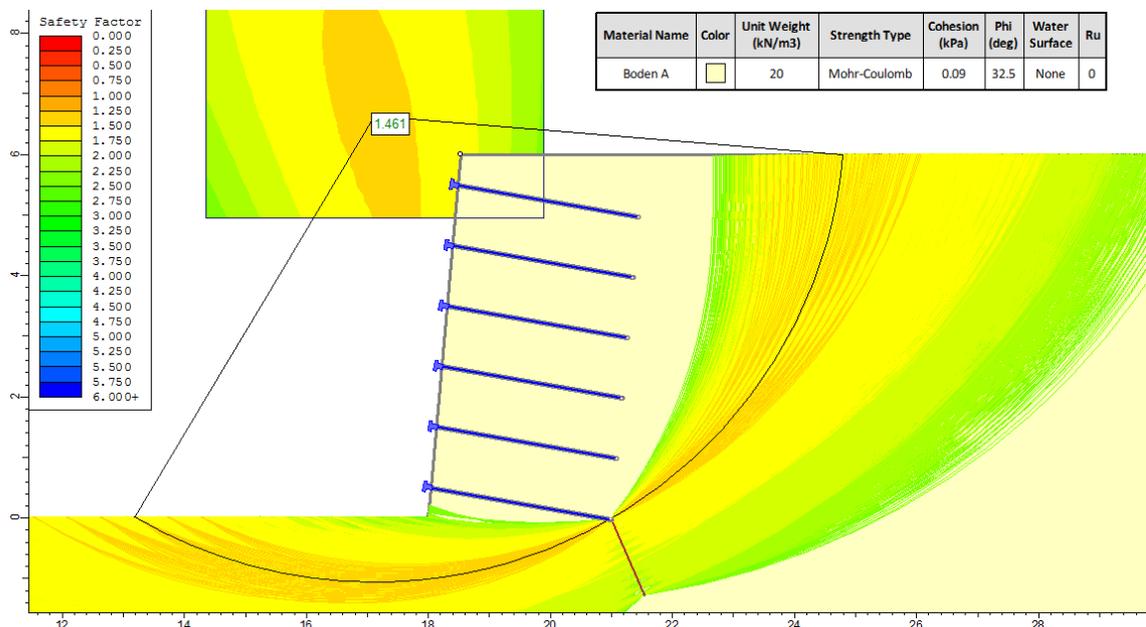


Abb. 101 Gesamtstandsicherheit mit Slide 6.0

Der Gesamtstandsicherheitsnachweis ist erfüllt, sobald der Ausnutzungsgrad  $\mu \leq 1,0$  ist.

$$\mu = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{1,46} \quad (44)$$

$$\mu = 0,68 < 1,0 \quad \checkmark$$

**6.1.5 Äußere Tragfähigkeit**

Bei der Untersuchung der äußeren Tragfähigkeit wird der Auszieh Widerstand  $T_m$  des Nagels überprüft. In dieser Arbeit wird der Ansatz nach Gässler mit dem analytischen

Programm Slide 6.0 verglichen. Das System mit der geringsten mobilisierten Schubkraft wird zur Berechnung der äußeren Tragfähigkeit herangezogen.

#### 6.1.5.1 Berechnung mit Gässler T2 (Nachweisverfahren 2)

Bei den Ansätzen von Gässler T2 soll vorerst geklärt werden, wie sehr sich diese unterscheiden. Dafür werden die Berechnungsergebnisse von Slide (aus Tab. 19 in Kapitel 2.6.5) verwendet und mit der Vereinfachung (aktiver Erddruck wirkt auf Nagelkörper) verglichen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Vereinfachung ist in Kapitel 2.6.1 ersichtlich.

Für den Vergleich der Standsicherheiten wird das Nachweisverfahren 2 laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 verwendet und somit die Nagelkraft  $Z_g$  mit charakteristischen geotechnischen Kenngrößen ermittelt.

#### Normaler Ansatz:

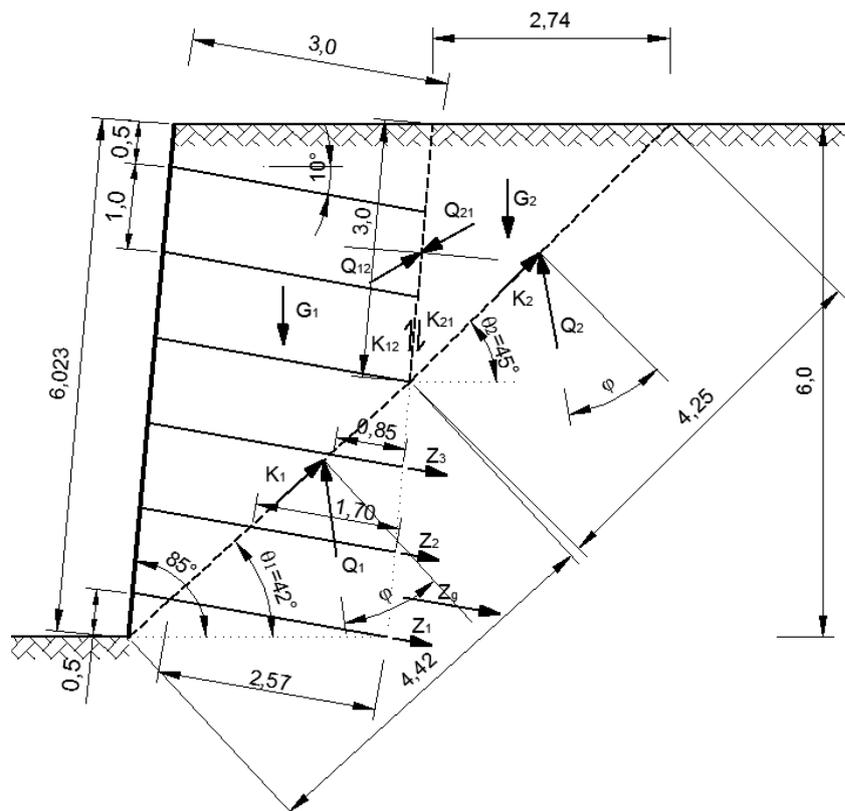


Abb. 102 Normaler Ansatz von Gässler T2

$$Z_{vorh} = T_{m,vorh} \frac{\sum li(\vartheta)}{t} = 50 * \frac{(2,6 + 1,7 + 0,85)}{1,0 \text{ m}} = 257,5 \text{ kN} \quad (45)$$

$Z_{vorh}$  [kN] vorhandene maximal mobilisierende Nagelzugkraft

$T_{m,vorh}$  [kN/m] mittlere Grenzschubkraft längs des Nagels

$\sum li(\vartheta)$  [m]    Summe der Nagellängen im ruhenden Boden (passiver Bereich)

$t$     [m]    horizontaler Abstand der Nägel

Die erforderliche Grenzzugkraft  $Z_g$  wird mit einem Kräftegleichgewicht ermittelt und beträgt 49,7 kN. Daraus ergibt sich eine Standsicherheit der Bodenvernagelung von  $\eta = 5,18$ .

$$\eta = \frac{Z_{vorh}}{Z_g} = \frac{257,5}{49,7} = 5,18 \quad (46)$$

$Z_g$     [-]    erforderliche Grenzzugkraft

$\eta$     [-]    Standsicherheit

### Vereinfachter Ansatz:

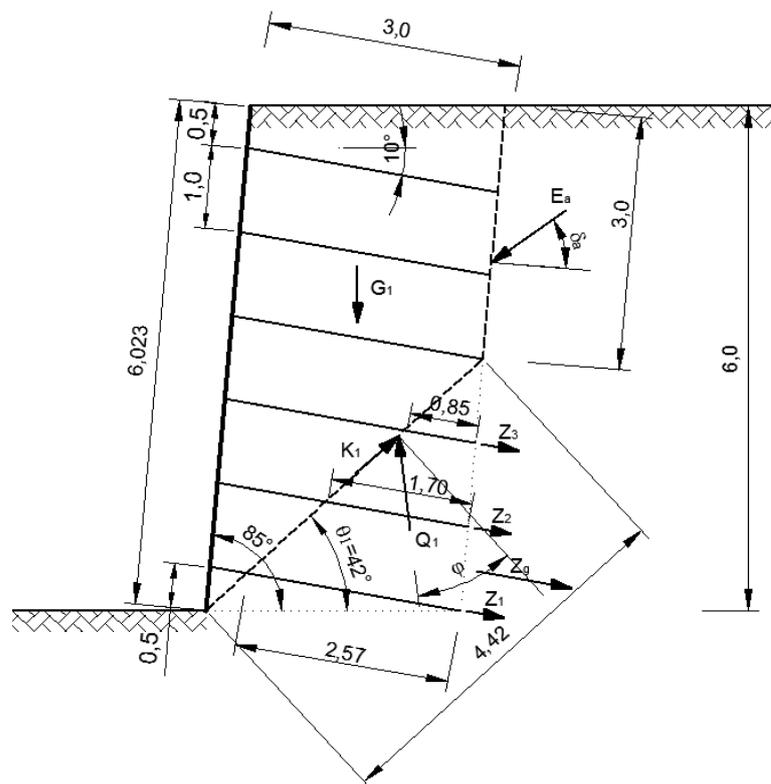


Abb. 103 Vereinfachung mit aktivem Erddruck

Aufgrund der gleichen Bruchfigur ist die vorhandene Zugkraft  $Z_{vorh}$  ident zum normalen Ansatz.

$$Z_{vorh} = 257,5 \text{ kN} \quad (47)$$

Mit der berechneten aktiven Erddruckkraft  $E_a = 19,04$  kN, welche unter dem Winkel  $\delta_a$  an der Nagelwand angreift, wird ebenfalls analog zum normalen Verfahren die

erforderliche Grenzzugkraft  $Z_g = 51,6 \text{ kN}$  grafisch bestimmt und das Kräftegleichgewicht gebildet. Laut Gleichung 48 ergibt sich eine Standsicherheit der Bodenvernagelung von  $\eta = 4,99$ .

$$\eta = \frac{Z_{vorh}}{Z_g} = \frac{257,5}{51,6} = 4,99 \quad (48)$$

Aufgrund der beiden Ergebnisse ( $\eta = 4,99 < \eta = 5,18$ ) ist der vereinfachte Ansatz von Gässler der maßgebende Fall. Mit diesem wird nun die ungünstigste Bruchfigur gesucht, um im Anschluss die daraus resultierende mobilisierte Mantelreibung mit jener aus Slide vergleichen zu können.

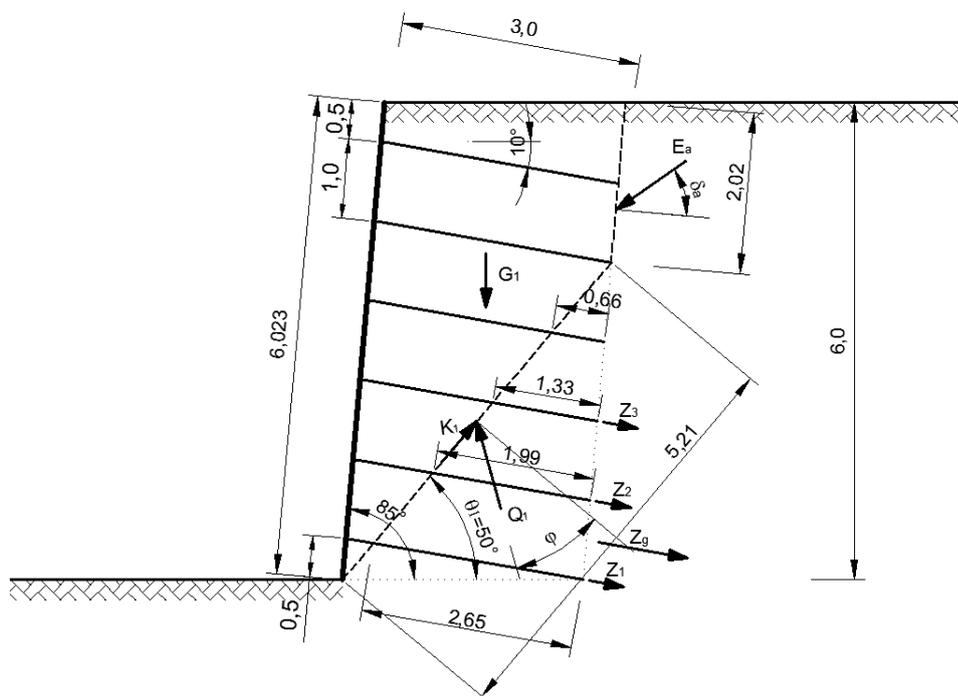


Abb. 104 Ungünstigste Bruchfigur zur Ermittlung der mobilisierten Mantelreibung

Durch Bildung eines Kräftegleichgewichtes mit den in Abb. 104 ersichtlichen Kräften und Neigungen kann die Nagelzugkraft  $Z_g = 76,7 \text{ kN}$  grafisch ermittelt werden.

$$\eta = \frac{Z_{vorh}}{Z_g} = \frac{(2,65 + 1,99 + 1,33 + 0,66) * \frac{50}{1,0 \text{ m}}}{76,7} = 4,32 \quad (49)$$

Mit dieser Zugkraft wird nun für diese Bruchfigur die erforderliche mobilisierte Schubkraft  $T_{i,g,k}$  für den äußeren Tragfähigkeitsnachweis berechnet.

$$T_{i,g,k} = \frac{Z_g * b}{\sum l_i} = \frac{76,7 * 1,0 \text{ m}}{(2,65 + 1,99 + 1,33 + 0,66)} = 11,6 \text{ kN/m} \quad (50)$$

## 6.1.5.2 Berechnung mit Slide 6.0 (Nachweisverfahren 2)

Eine ähnliche Vorgehensweise wird unter Verwendung des Berechnungsprogramms Slide durchgeführt. Laut Nachweisverfahren 2 werden wie in Kapitel 6.1.5.1 die geotechnischen Kenngrößen abgemindert. Für eine schnellere Findung jener Bruchfigur mit der geringsten Sicherheit wird sowohl ein Suchfeld, als auch der Fußpunkt der Nagelwand als Fixpunkt definiert (siehe Abb. 105).

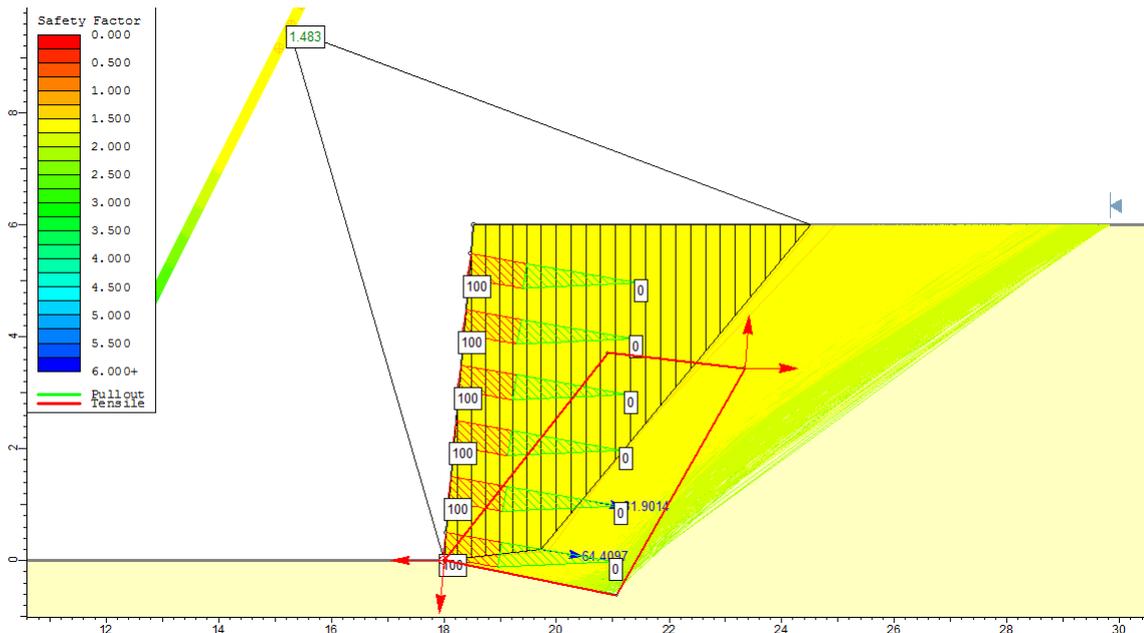


Abb. 105 Berechnungsergebnisse von Slide

Die mit Slide erhaltenen Nagelkräfte ( $N_1 = 64,4 \text{ kN}$  und  $N_2 = 31,9 \text{ kN}$ ) für die Bruchfigur mit einer Sicherheit von  $\eta = 1,48$  werden für die weiteren Berechnungen herangezogen.

$$\eta = \frac{Z_{vorh}}{Z_g} \rightarrow Z_g = \frac{Z_{vorh}}{\eta} = \frac{(64,4 + 31,9)}{1,48} = 65,1 \text{ kN} \quad (51)$$

Mit der in Gleichung 51 berechneten erforderlichen Zugkraft wird wiederum die mobilisierte Mantelreibung ermittelt.

$$T_{i,g,k} = \frac{Z_g * b}{\sum l_i} = \frac{65,1 * 1,0 \text{ m}}{(1,29 + 0,64)} = 33,7 \text{ kN/m} \quad (52)$$

Die beiden in Gleichung 50 und 52 berechneten mobilisierten Schubkräfte der Nägel müssen nun mit der maßgebenden Gesamtnagellänge multipliziert werden. Die größere Nagelkraft ist für die Bemessung der äußeren Tragfähigkeit maßgebend (siehe Gleichung 53).

$$P_p \geq \max P_{i,d} * \gamma_{n,t} * \xi_2 \quad (53)$$

mit

$$P_{i,d} \geq T_{i,k} * a_i * \gamma_E \quad (54)$$

$$P_{1,d} = 11,6 * 2,65 * 1,35 = 41,5 \text{ kN}$$

$$P_{2,d} = 33,7 * 1,29 * 1,35 = 58,7 \text{ kN}$$

$P_{i,d}$	[kN]	Bemessungswert der Nagelbeanspruchung des Nagels $i$
$T_{i,k}$	[kN/m]	charakteristischer Wert der übertragbaren Schubkraft zwischen Nagel $i$ und Baugrund (z.B. Ermittlung mit Ansatz von Gässler)
$a_i$	[m]	Verbundlänge des Nagels $i$
$\xi_2$	[m]	Streuungsfaktor nach ÖNORM B 1997-1-1:2013 Tabelle 8
$\gamma_E$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert nach ÖNORM B 1997-1-1:2013 Tabelle 11
$\gamma_{n,t}$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert nach ÖNORM B 1997-1-1:2013 Tabelle 13

Die aus den Berechnungen mit Slide resultierende Nagelkraft von rund  $P_{2,d} = 59 \text{ kN}$  ist maßgebend.

$$P_p \geq 59 * 1,4 * 1,05 = 86,73 \text{ kN} \quad (55)$$

Dies bedeutet, dass die Nagelprüfkraft mindestens 87 kN aufweisen muss.

#### Mit Bodennagellastprüfung

Laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 dürfen auch Bodennagellastprüfungen zur Bestimmung der mobilisierten Mantelreibung herangezogen werden. In den Gleichungen 56 bis 59 sind diese vollständigshalber angeführt, werden jedoch in dieser Arbeit nicht verwendet.

$$T_{i,d} \leq \frac{T_{k,m}}{\gamma_{n,t}} \quad (56)$$

mit

$$R_{n,k} \geq \frac{(R_{n,m})_{min}}{\xi_2} \quad (57)$$

$$T_{k,m} = \frac{R_{n,k}}{a_m} \quad (58)$$

$$T_{i,d} = T_{i,k} * \gamma_E \quad (59)$$

$T_{i,d}$  [kN/m] Bemessungswert der Beanspruchung

$T_{k,m}$  [kN/m] charakteristischer Schubwiderstand

$R_{n,k}$	[kN]	charakteristischer Nagelauszieh Widerstand aus Bodennagellastprüfung
$R_{n,m}$	[kN]	Mindestwert von mindestens 3 Bodennagellastprüfungen
$a_m$	[m]	Verbundlänge

### 6.1.6 Innere Tragfähigkeit

Bei der inneren Tragfähigkeit eines Nagels wird das Versagen des Zuggliedes untersucht.

Tab. 39 Nagelangaben

GEWI Plus-Nagel		
Parameter	Symbol	Wert
Stahldurchmesser	d	22 mm
Streckgrenze bei 0,2% bleibender Dehnung	$f_{0,2k}$	670 N/mm <sup>2</sup>
Bruchgrenze	$R_{p,k}$	340 kN
Nagelquerschnittsfläche	$A_t$	Mohr-Coulomb
Teilsicherheitsbeiwert für Stahlzugglieder	$\gamma_s$	1,15 (laut ÖNORM)

$$\boxed{R_{t,d} \geq P_{i,d}} \quad (60)$$

$$171 > 58,7 \quad \checkmark$$

mit

$$R_{t0,2k} = f_{t0,2k} * A_t = 670 * 380 = 254,6 \text{ kN} \quad (61)$$

$$R_{t,d} = \frac{R_{t0,2k}}{\gamma_s * \eta} = \frac{254,6}{1,15 * 1,3} = 170,3 \text{ kN} \quad (62)$$

$R_{t,d}$	[kN]	Bemessungswert des Materialwiderstandes von Betonstahl
$R_{t0,2k}$	[kN]	charakteristischer Wert der Kraft des Stahlzugliedes bei 0,2 % bleibender Dehnung für Betonstahl
$\gamma_s$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert gemäß des Stahlzugliedes ( $\gamma_s = 1,15$ gemäß ÖNORM 1992-1-1)
$\eta$	[-]	Faktor in Abhängigkeit der Schadensfolgeklasse laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 Tabelle 14

$$\boxed{P_{p,max} = 0,8 * R_{p,k}} \quad (63)$$

$$P_{p,max} = 0,8 * 340 = 243,2 \text{ kN} > 87 \text{ kN} \checkmark$$

$$\boxed{P_{p,max} = 0,9 * R_{t0,2k}} \quad (64)$$

$$P_{p,max} = 0,9 * 254,6 = 229,1 \text{ kN} > 87 \text{ kN} \checkmark$$

Somit darf der Nagel mit einer Nagelprüfkraft von  $P_p = 87 \text{ kN}$  und der maximalen Prüfkraft  $P_{p,max} = 229,1 \text{ kN}$  belastet werden.

### 6.1.7 Nachweis der Außenhaut

Die Außenhaut muss gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 und ÖNORM B 1992-1-1 nachgewiesen werden. Dabei ist die Spritzbetonschale auf den aktiven Erddruck auszulegen und der Durchstanznachweis der Ankerplatte zu führen.

## 6.2 Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)

Beim Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist zwischen der Gesamtkonstruktion und jenem für jeden einzelnen Nagel zu unterscheiden

### 1. Einzelner Nagel

Dieser Nachweis ist mit der normgerechten Nagelprüfung laut ÖNORM B 1997-1-1:2013 erbracht.

### 2. Gesamtstandsicherheit

Beim SLS Nachweis der Gesamtstandsicherheit können mehrere Verfahren mit einbezogen werden.

- Numerische Untersuchungen
- Beobachtungsmethode
- Begrenzung der mobilisierten Scherfestigkeit
- Nagellastprüfung

## 7 Zusammenfassung

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird das Tragverhalten von Bodennägeln untersucht, um Grundlagen für die Entwicklung neuer Modelle für die Bemessung von Bodenvernagelungen zu schaffen.

Anfangs wird in einer detaillierten Literaturrecherche (Kapitel 2, 3 und 4) auf das Grundprinzip von Bodenvernagelungen näher eingegangen, sowie die unterschiedlichen Vernagelungssysteme von Unternehmen beschrieben und aufgelistet.

Es gibt in der Literatur verschiedene Berechnungsansätze, um eine Bodenvernagelungen bemessen zu können. Im Kapitel 2.6 *Berechnungsverfahren* werden Standsicherheitsberechnungen von Hand und mit zwei analytischen Programmen (Slide und GGU-Stability) durchgeführt und diese miteinander verglichen. Die dabei ermittelten Sicherheiten (laut Tab. 19) weisen eine große Streuung auf, sobald eine selbst definierte Bruchfigur betrachtet wird. Hingegen fallen bei der Ermittlung der minimalen Standsicherheit einer Bodenvernagelung ohne vorgegebene Bruchfigur, die Sicherheiten weitestgehend ident aus.

Die Beanspruchung des Suspensionskörpers der Bodennägel mit unterschiedlichen Materialien (Stahl- und Holznagel) wird im Kapitel 2.7 *Verbundverhalten von Nagel, Suspension und Boden* näherungsweise ermittelt. Es stellt sich dabei heraus, dass die Beanspruchung des Suspensions- bzw. Verpresskörpers in Bezug auf die Festigkeit sehr gering ist. Dies lässt Raum für mögliche Alternativen für die Zementsuspension.

Ob es möglich ist, den Feuchtegehalt für bestimmte Bodenarten zu kategorisieren, wird im Kapitel 3 *Feuchtegehalt im Boden* näher erläutert. Eine derartige Kategorisierung würde, im Hinblick auf die Dimensionierung eines Holznagels bei einer temporären Sicherungsmaßnahme, von Vorteil sein. Dies ist bereits aufgrund von naturgemäßen Einflüssen (Niederschlag oder Grundwasser im Boden) nicht möglich.

Die Recherchen für Kapitel 4 *Ingenieurbiologie* sollen dazu beitragen, Ideen für alternative Bemessungsmodelle für Bodennägel zu sammeln und zu überprüfen, ob eventuell eine geänderte geometrische Anordnung der Nägel im Vergleich zur klassischen Bodenvernagelung zweckmäßig sein kann.

Mit den erworbenen Kenntnissen werden im Kapitel 5 *Untersuchung von Geländesprüngen* zwei alternative Berechnungsmodelle (Plaxis und Fachwerkmodell) untersucht. Eine standardmäßige Bodenvernagelung wird in Plaxis 2D als

Gewichtskörper mit unterschiedlichen Breiten modelliert und hinsichtlich der Standsicherheit überprüft. Bei den Berechnungen im Kapitel 5.1 *PLAXIS 2D* stellt sich heraus, dass die Ermittlung der minimalen Breite mit der dazugehörigen Standsicherheit für Bodenvernagelungen mit Plaxis 2D durchführbar ist.

In einem weiteren Schritt wird versucht, diesen betrachteten Gewichtskörper mittels Fachwerkmodell im RuckZuck zu modellieren. Dabei sollen die Nägel den Zug und der Boden den Druck im vernagelten Bereich aufnehmen. Die daraus ermittelten Nagelkräfte werden mit Slide (analytisches Programm) und den Messdaten des Großversuchs von Gässler (Gässler, 1987) verglichen. Ein derartiger Vergleich zeigt keine wirklichen Übereinstimmungen der Nagelkräfte.

Abschließend wurde im Kapitel 6 *Bemessung einer Nagelwand nach Eurocode 7* eine Nagelwand nach Eurocode 7 bemessen. Hierfür werden die maßgebenden Nachweise erbracht und ein Vergleich zur Ermittlung der äußeren Tragfähigkeit angestellt. Bei diesem Vergleich wird der Nachweis der äußeren Tragfähigkeit sowohl mit dem Ansatz nach Janbu (in Slide), als auch mit dem Ansatz nach Gässler (von Hand) berechnet. Diese beiden Varianten kommen häufig in der Praxis zur Anwendung. Es stellte sich heraus, dass beim betrachteten Beispiel die Berechnungsvariante mittels Slide die maßgebende für die Nagelbemessung nach Eurocode 7 ist.

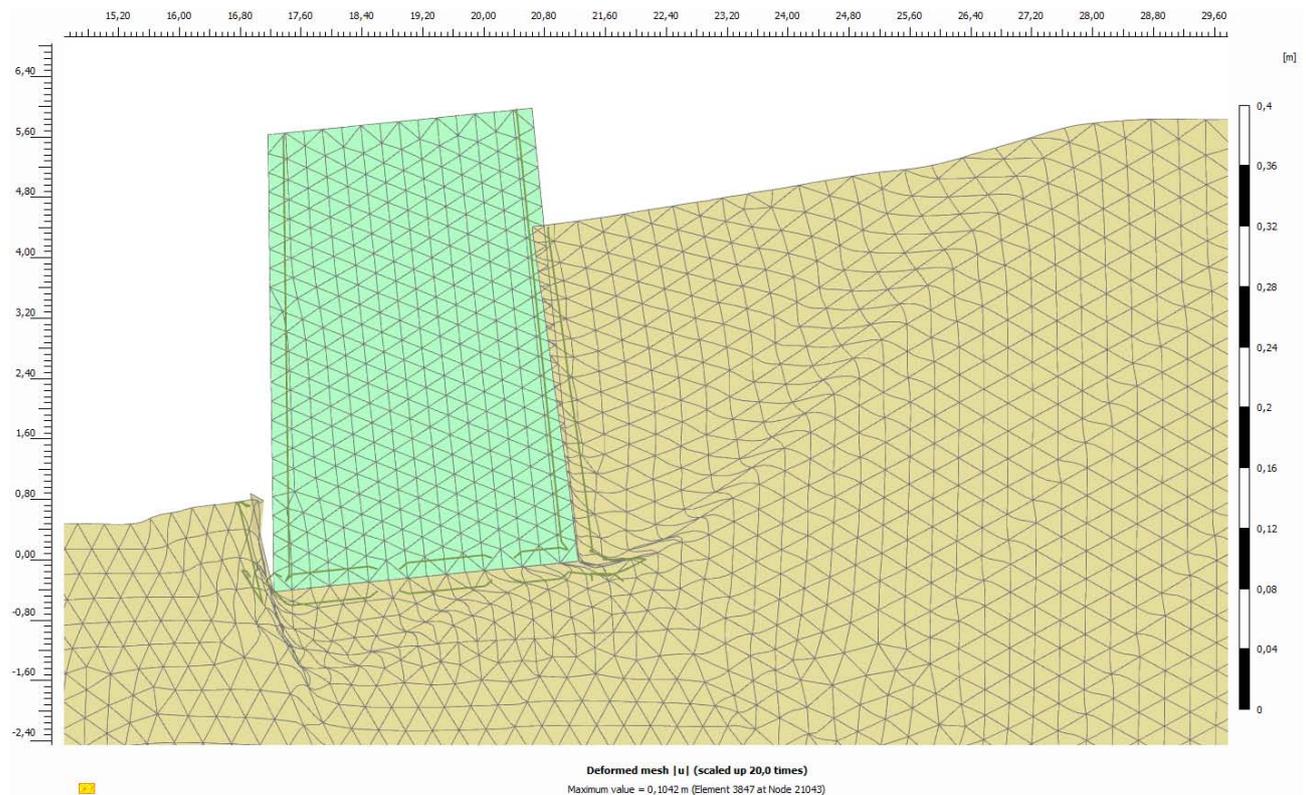
## 8 Literaturverzeichnis

- Adam, D. (2010). *Grundbau und Bodenmechanik. Studienunterlagen zu Vorlesung SS 2010*. Wien: Technische Universität Wien.
- ANP Systems GmbH. (25. Mai 2015). *Bodennägelsysteme*. Von <http://www.anp-systems.at/produkte/naegel/> abgerufen
- Azadeh, A., & Hassan Haji, K. (2014). *New Approaches to Bond between Bamboo and Concrete*. Iran: Ferdowsi University of Mashad.
- BBV Systems GmbH. (09. 06 2015). *Zulassung: Bodenvernagelung*. Von [http://www.bbv-systems.com/fileadmin/con-bbv/Zulassungen/Geotechnik/Z-20.1-108\\_BBV\\_Bodenvernagelung\\_bis\\_01.04.2016.pdf](http://www.bbv-systems.com/fileadmin/con-bbv/Zulassungen/Geotechnik/Z-20.1-108_BBV_Bodenvernagelung_bis_01.04.2016.pdf) abgerufen
- Boley, C. (2011). *Handbuch Geotechnik*. München: Vieweg+Teubner.
- DIBt. (2014). *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: Ischebeck Mikropfähle Titan (Zulassungsnr.: Z-34.14-209)*. Berlin: Bautechnisches Prüfamt, Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten.
- Dywidag-Systems International. (14. Mai 2015). *DSI-Geotechnische Systeme*. Von [https://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI\\_DYWIDAG\\_Geotechnische\\_Systeme\\_at\\_01.pdf](https://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_DYWIDAG_Geotechnische_Systeme_at_01.pdf) abgerufen
- Dywidag-Systems International. (26. Mai 2015). *GEWI - Plus Bodennagel*. Von [http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI\\_GEWI-Plus\\_Geotechnik\\_Systeme\\_02.pdf](http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_GEWI-Plus_Geotechnik_Systeme_02.pdf) abgerufen
- Dywidag-Systems International. (25. Mai 2015). *GFK Anker und Felsbolzen*. Von [http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI\\_ALWAG-Systems\\_GFK\\_Anker-und-Felsbolzen\\_DE\\_01.pdf](http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_ALWAG-Systems_GFK_Anker-und-Felsbolzen_DE_01.pdf) abgerufen
- Ellmaier, E. (2014). *Buche und Bambus als Werkstoff für Bodenvernagelungen im Grundbau*. Graz: Technische Universität Graz.
- Florineth, F.; Kloidt, F.; Weissteiner, C. (2011). *Ingenieurbiologie: Studienblätter zur Vorlesung im Studienjahr 2010/2011*. Wien: Universität für Bodenkultur Wien.
- Friedr. Ischebeck GmbH. (2014). *Prospekt für Verpresspfahl TITAN*. Ennepetal.
- Gässler, G. (1987). *Vernagelte Geländesprünge - Tragverhalten und Standsicherheit*. Karlsruhe: Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- GSI - GeoStabilisation International. (22. Mai 2015). Von <http://www.geostabilization.com/soil-nail-launcher/> abgerufen
- Haas, P. (2004). *Numerische Untersuchungen zur Bodenvernagelung*. Innsbruck: Leopold - Franzens - Universität Innsbruck.

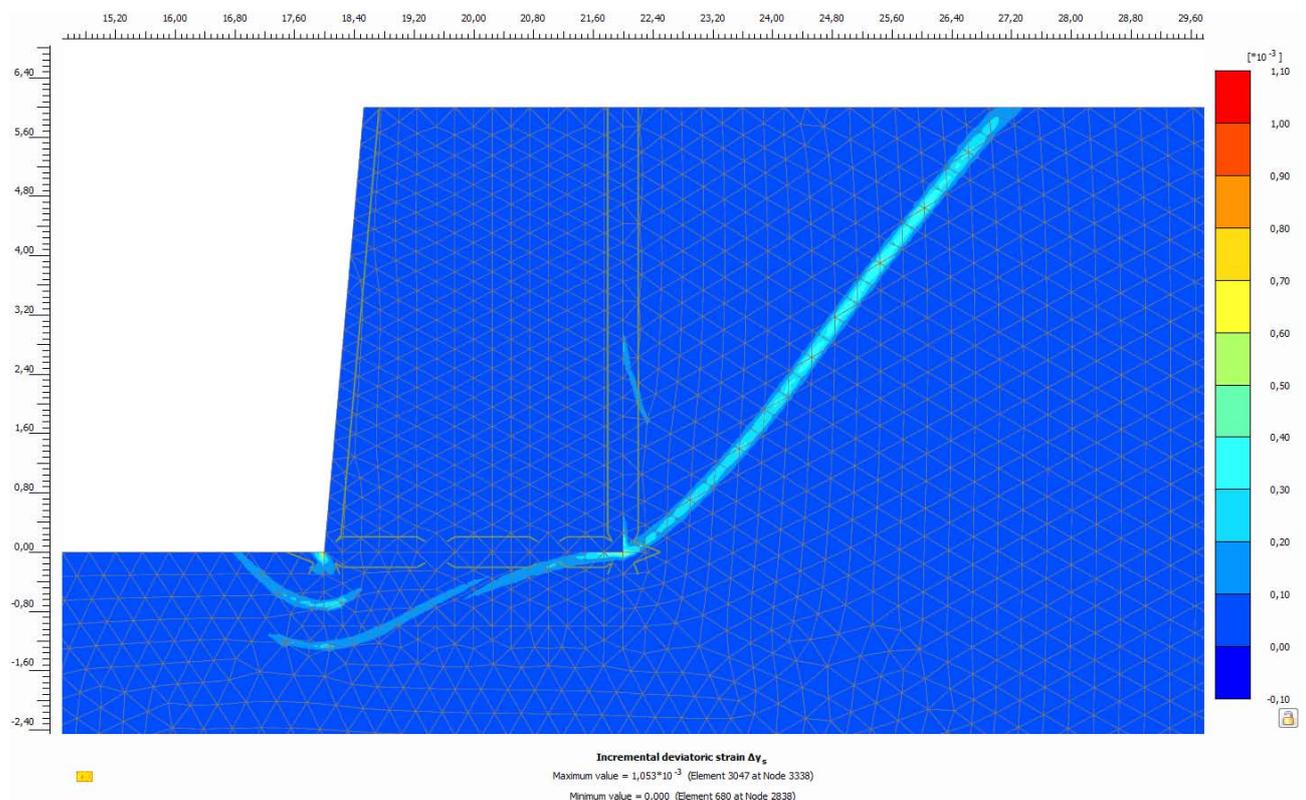
- Horvatits, J. (12. 11 2015). *BMVIT Abteilung IV/ST 2*. Von <http://www.bmvit.gv.at/verkehr/strasse/technik/bautechnik/index.html> abgerufen
- Katzenbach, R., & Werner, A. (2007). *Erhöhung der Standsicherheit von Deichen und Dämmen durch den Bewuchs*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Kindsmüller, H. (2003). *Standsicherheitsberechnung*. Regensburg: Fachhochschule Regensburg.
- König, G., Tue, N., & Schenck, G. (2008). *Grundlagen des Stahlbetonbaus, 3. Auflage*. Leipzig: Vieweg+Teubner Verlag.
- Lohmeyer, G. (1994). *Stahlbetonbau: Bemessung, Ausführung, Ausgabe 5*. Hannover: Springer.
- Martak, L., & Breit, K. (2014). *29. Christian Veder Kolloquium: Prüfung und Bemessung von Verankerungen*. Graz: Technische Universität Graz.
- Marte, M., & Supp, G. (2014). *Vorlesungsunterlagen der Mastervorlesung: Verankerungen gemäß ÖNorm B 1997-1-1:2013*. Graz: Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz.
- Mobile CAD Surveying. (11. September 2015). *Mobile CAD Surveying*. Von <http://www.mobilecadsurveying.co.uk/gann-chemical-hygrometer> abgerufen
- ÖNORM B 1997-1-1:2013. (2013). *Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*. Wien: Austrian Standards Institute.
- ÖNorm EN 14490. (2010). *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bodenvernagelung*. Austrian Standards Institute 2010.
- Renk, D. (2011). *Dissertation: Zur Statik der Bodenvernagelung*. Innsbruck: Berlin Logos. ISBN 978-3-8325-2947-5.
- RVS 09.01.41. (2013). *RVS 09.01.41: Offene Tunnelbauweise*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- SAH - Stahlwerk Annahütte. (kein Datum). Von [http://www.annahuette.com/SAS\\_Geotechnik.html](http://www.annahuette.com/SAS_Geotechnik.html) abgerufen
- Simić, A. (2014). *Vergleichende Untersuchungen zur Wassergehaltsbestimmung an unterschiedlichen Böden*. Graz: Technische Universität Graz.
- Spantec GmbH. (25. Mai 2015). *Zulassung - Bodenvernagelung*. Von [http://www.spantec-gmbh.de/export/sites/www.spantec-gmbh.de/pdf/z\\_20\\_1\\_101.pdf](http://www.spantec-gmbh.de/export/sites/www.spantec-gmbh.de/pdf/z_20_1_101.pdf) abgerufen
- Spinnanker GmbH. (16. 06 2015). Von <http://www.spinnanker.com/de/?home> abgerufen

- Supp, G. (2015). *Das Tragverhalten von geschraubten und schlanken Gewindestäben – Experimentelle Untersuchungen und Bewertung für geotechnische Anwendungen*. Graz: Technische Universität Graz.
- Tobias, S. (2003). *Skriptum: Einführung in die Ingenieurbioogie*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- US Department of Agriculture and Transportation. (22. Mai 1994). *Application Guide for Launched Soil Nails Volume 1*. USA. Von [http://www.fs.fed.us/eng/pubs/pdf/em7170\\_12a.pdf](http://www.fs.fed.us/eng/pubs/pdf/em7170_12a.pdf) abgerufen
- Wichter, L., & Meininger, W. (2000). *Verankerungen und Vernagelungen im Grundbau*. Ernst & Sohn.
- Wietek, B. (2011). *Böschungen und Baugruben ohne und mit Verbau*. 1. Auflage. Sistrans bei Innsbruck: Vieweg + Teuber Verlag.
- Witt, K.J. (2008). *Grundbau - Taschenbuch. Teil1: Geotechnische Grundlagen*. 7.Auflage. Weimar: Ernst & Sohn. ISBN 978-3-433-01843-9.
- Witt, K.J. (2009). *Grundbau - Taschenbuch. Teil3: Gründungen und geotechnische Bauwerke*. 7.Auflage. Weimar: Ernst & Sohn. ISBN 978-3-433-01846-0.
- Zilch, K., & Zehetmaier, G. (2006). *Bemessung im konstruktiven Betonbau*. Heidelberg; ISBN-10 3-540-20650-7: Springer.

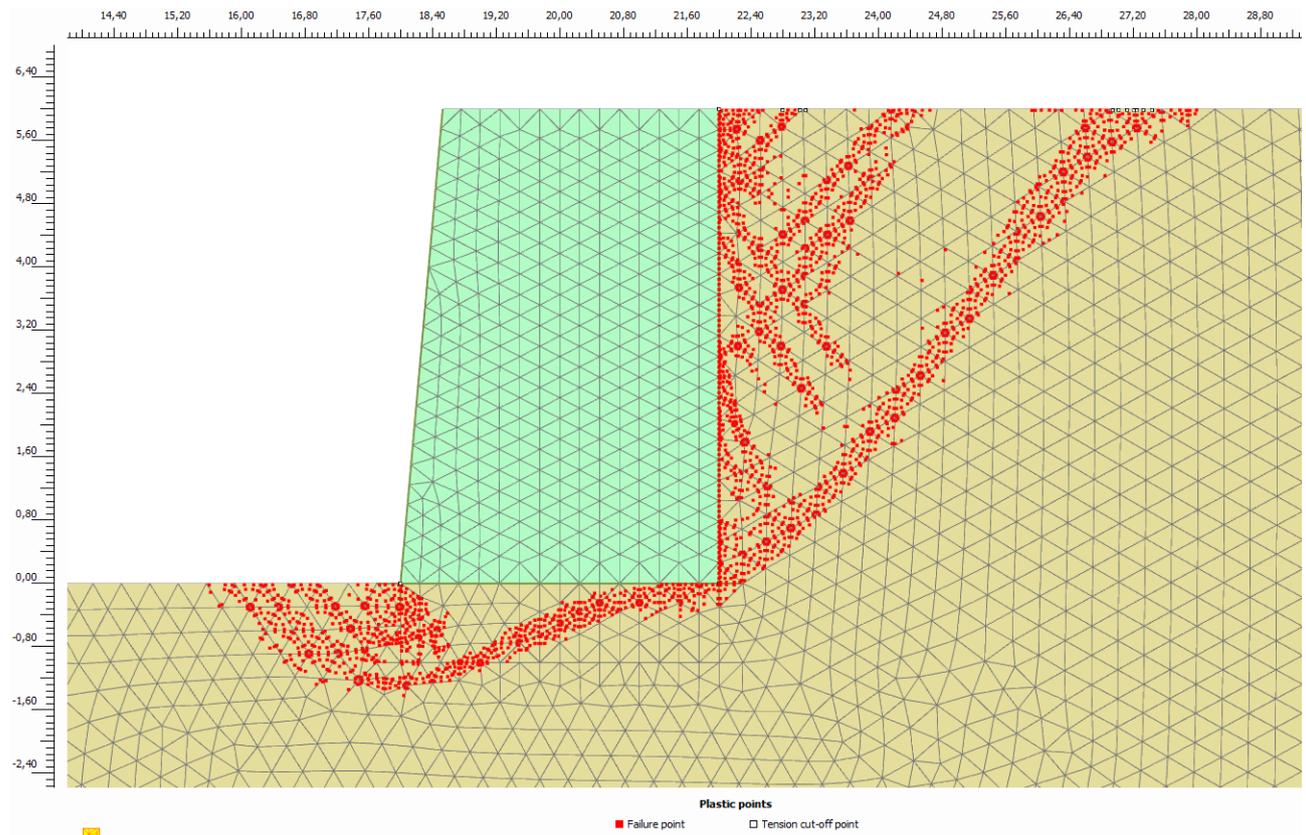
## 9 Anhang



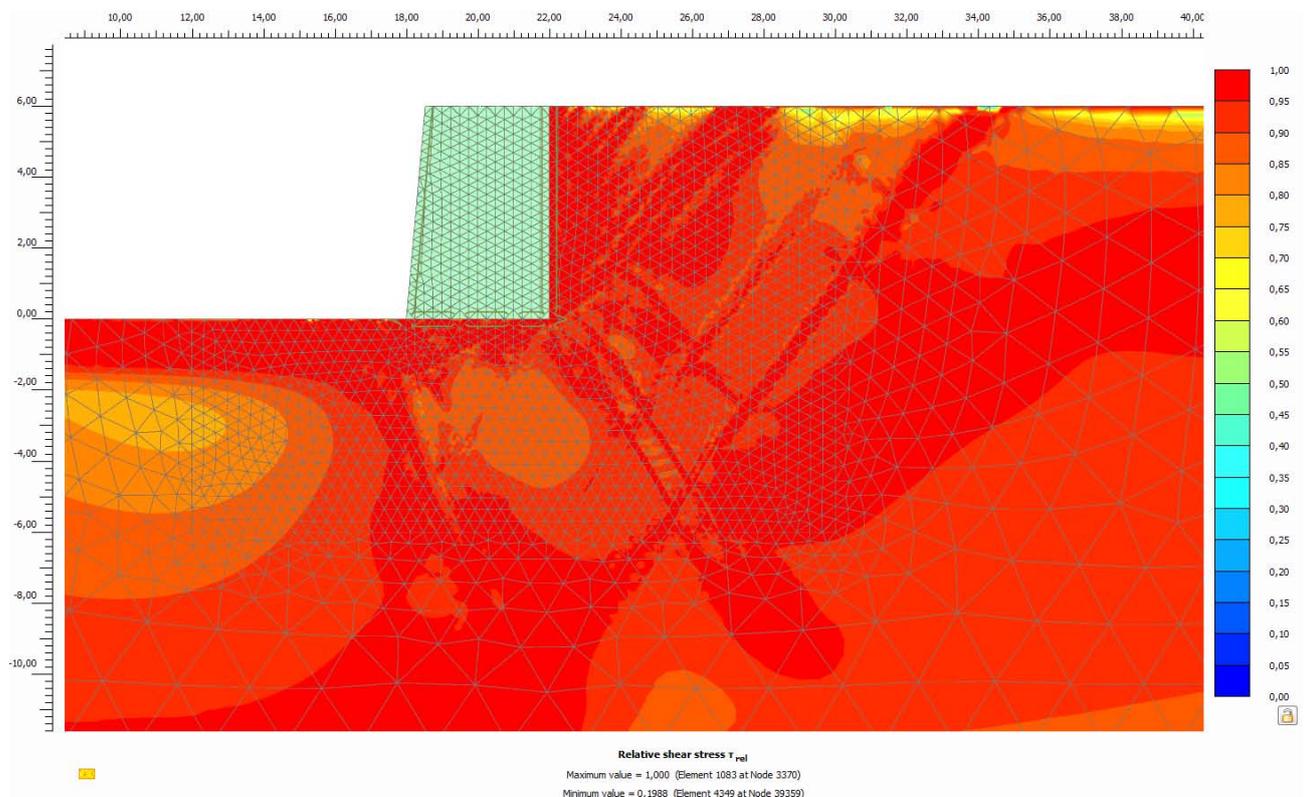
Anhang 1 V1: totale Verschiebung  $l_{ul}$  des 4.0 Modells (20-fache Skalierung)



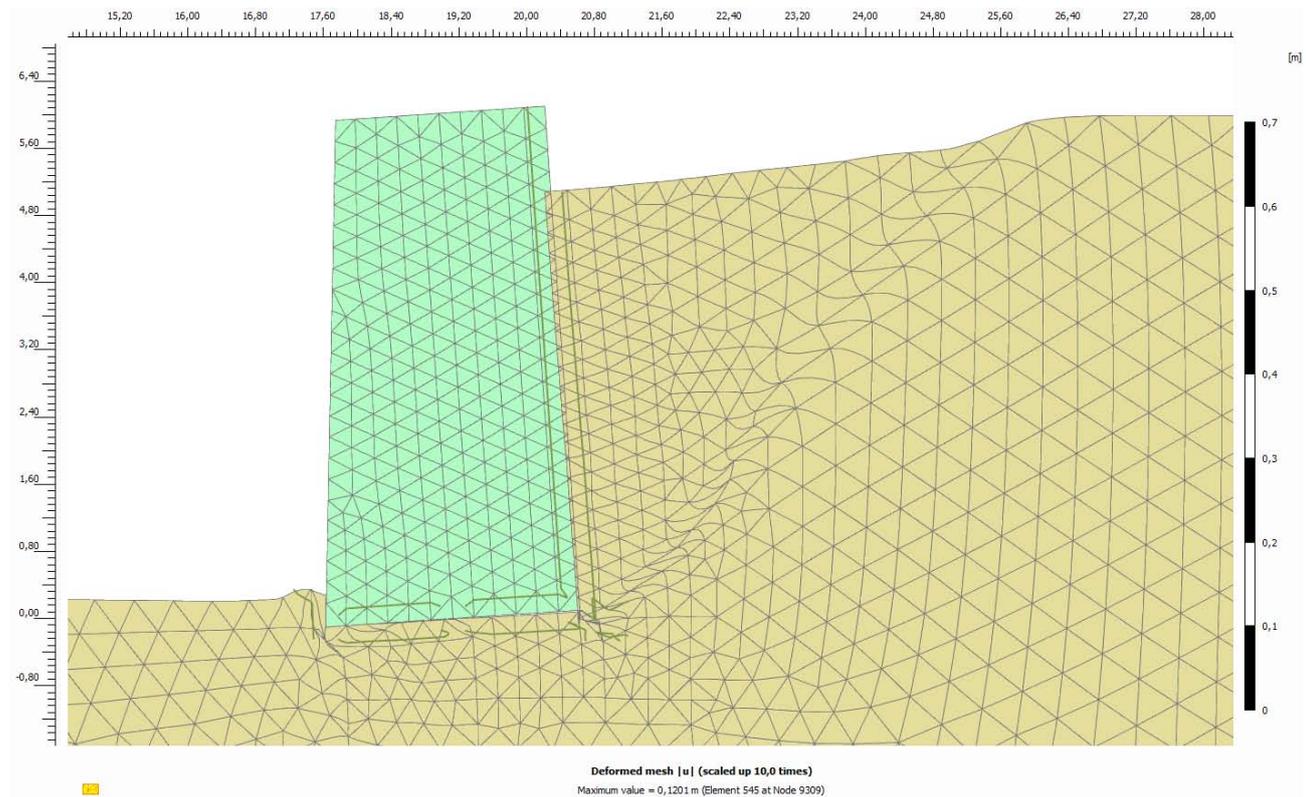
Anhang 2 V1: inkrementelle deviatorische Dehnung des 4.0 Modells



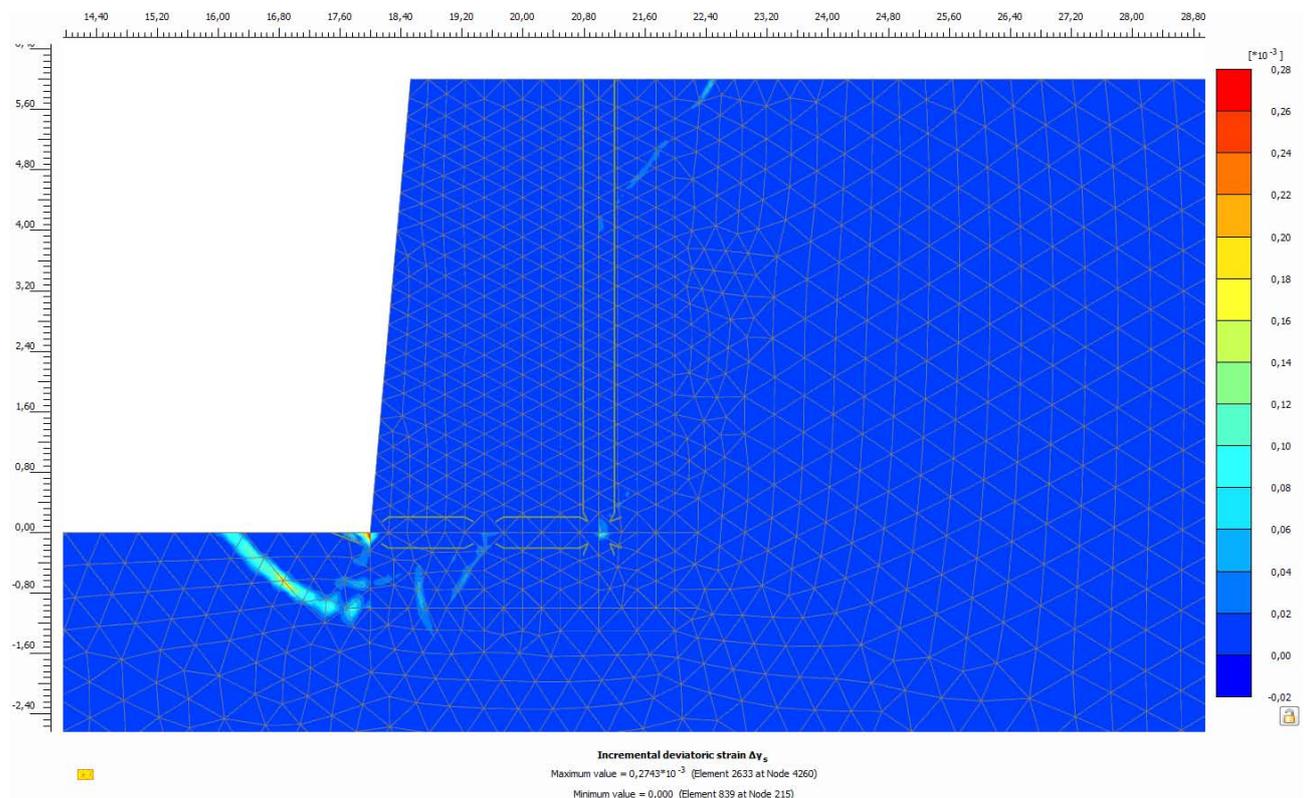
Anhang 3 V1: plastische Punkte des 4.0 Modells



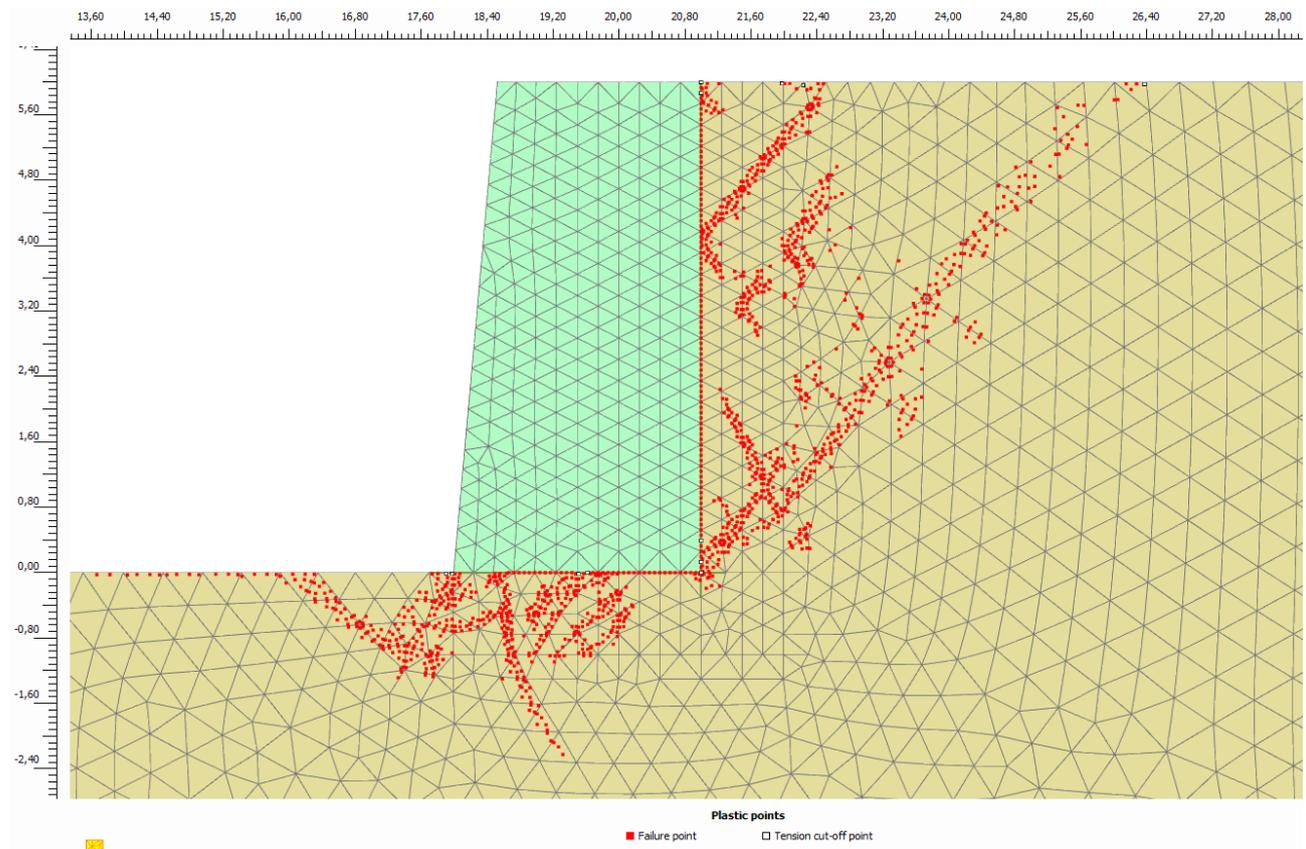
Anhang 4 V1: relative Scherfestigkeit des 4.0 Modells



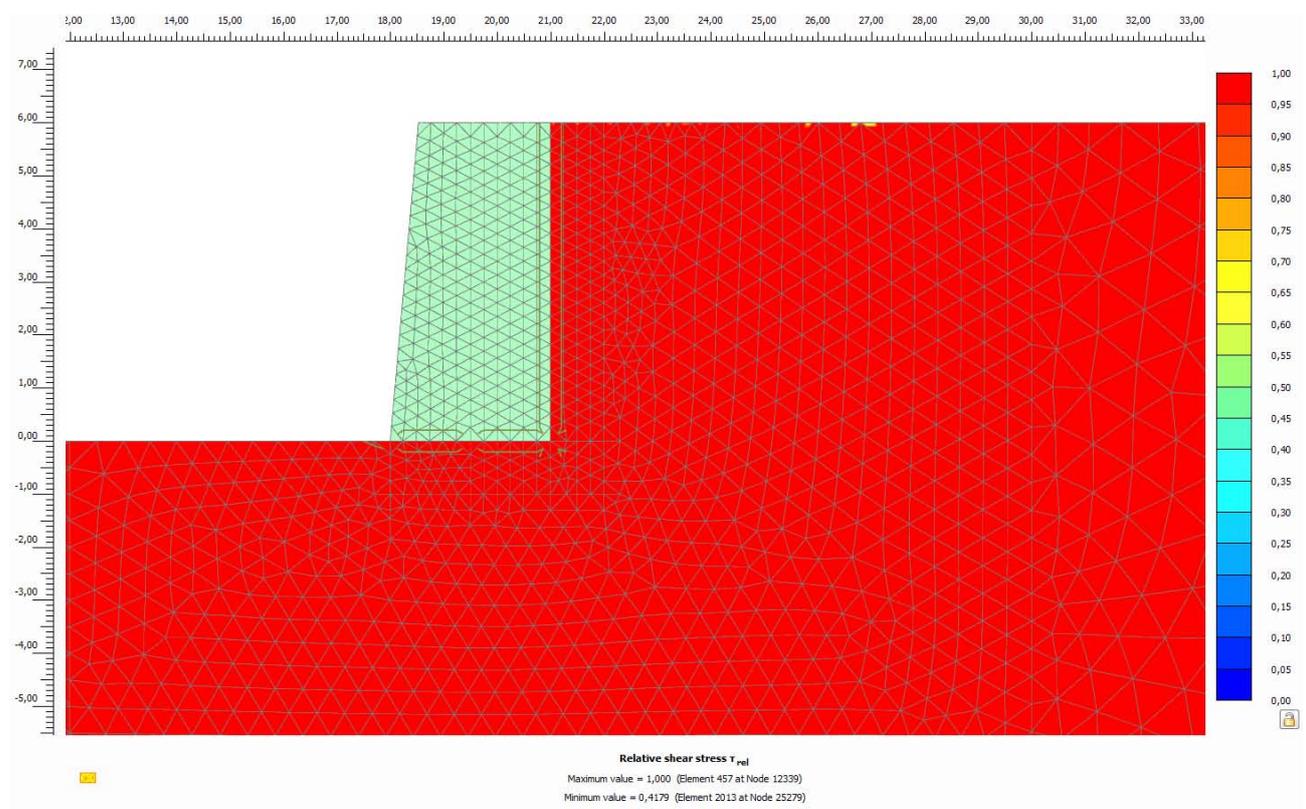
Anhang 5 V1: totale Verschiebung |u| des 3.0 Modells (10-fache Skalierung)



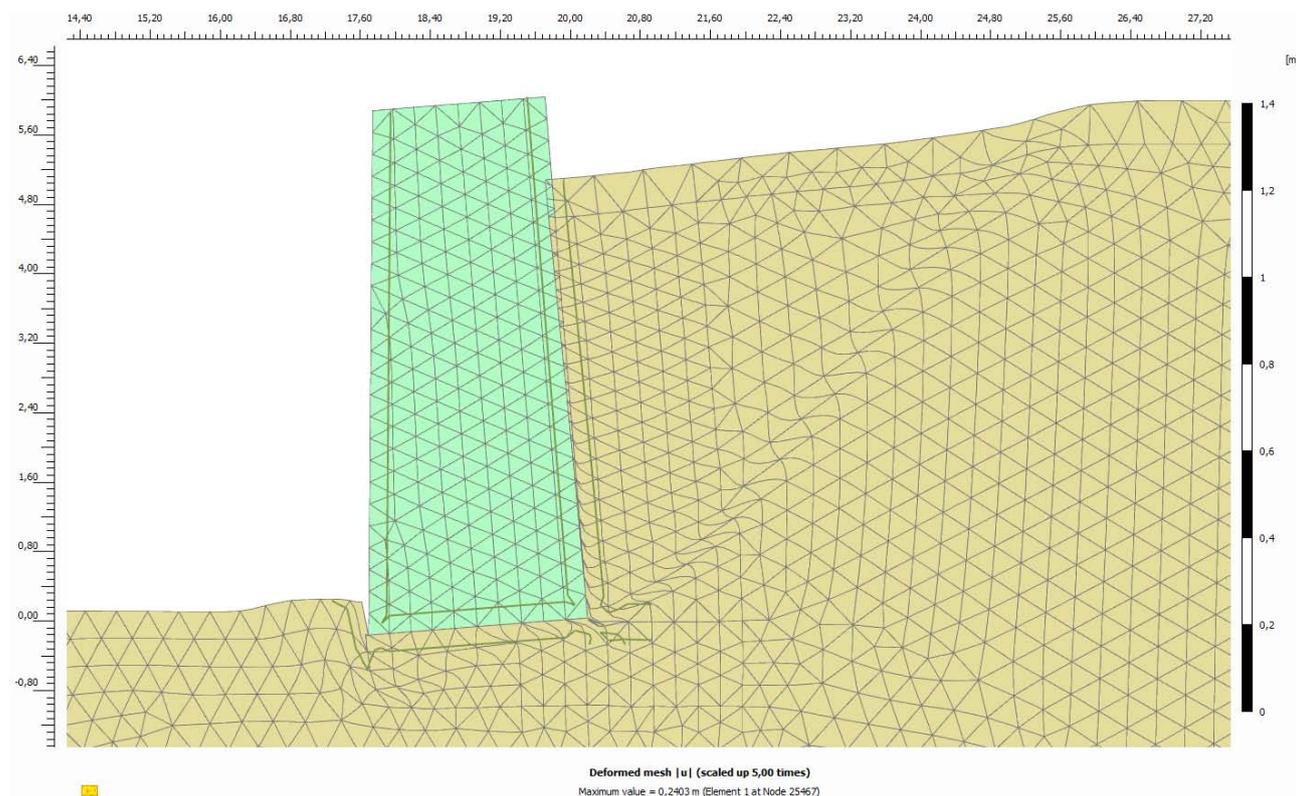
Anhang 6 V1: inkrementelle deviatorische Dehnung des 3.0 Modells



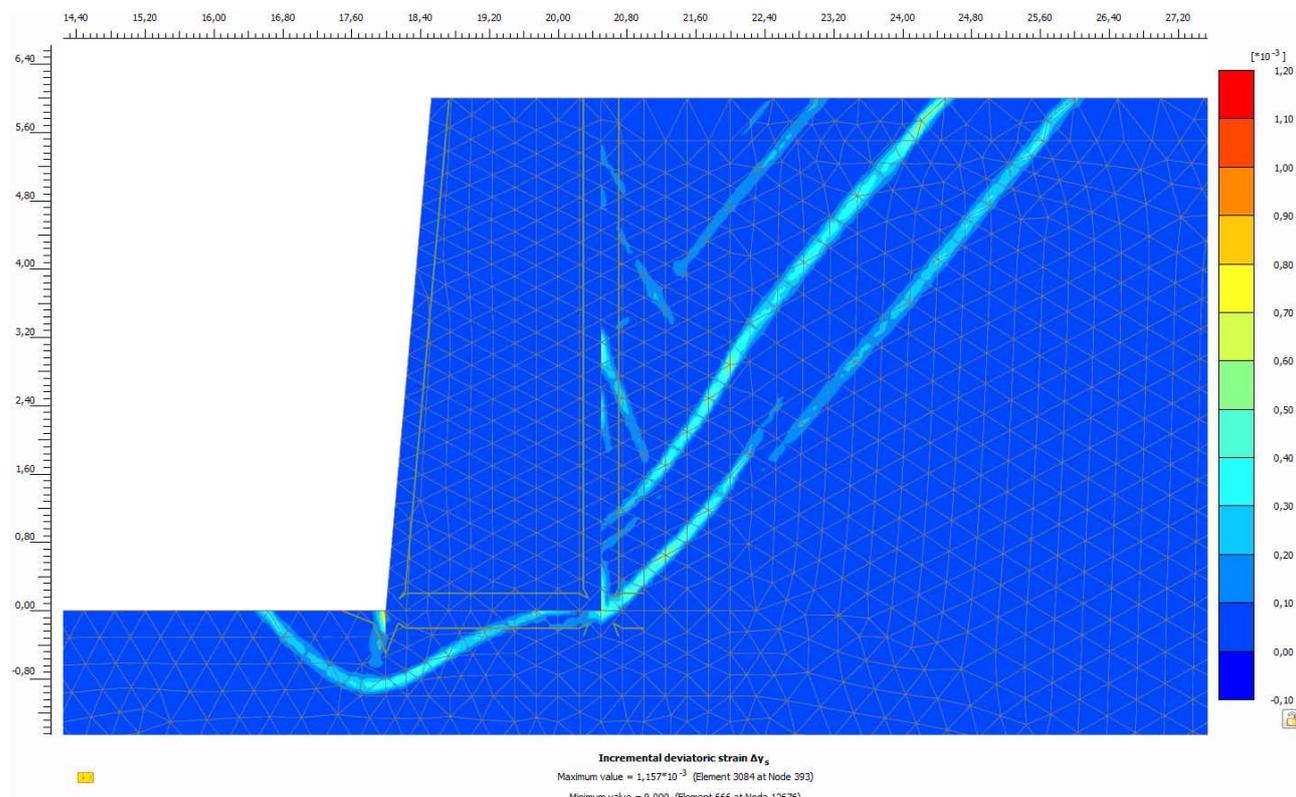
Anhang 7 V1: plastische Punkte des 3.0 Modells



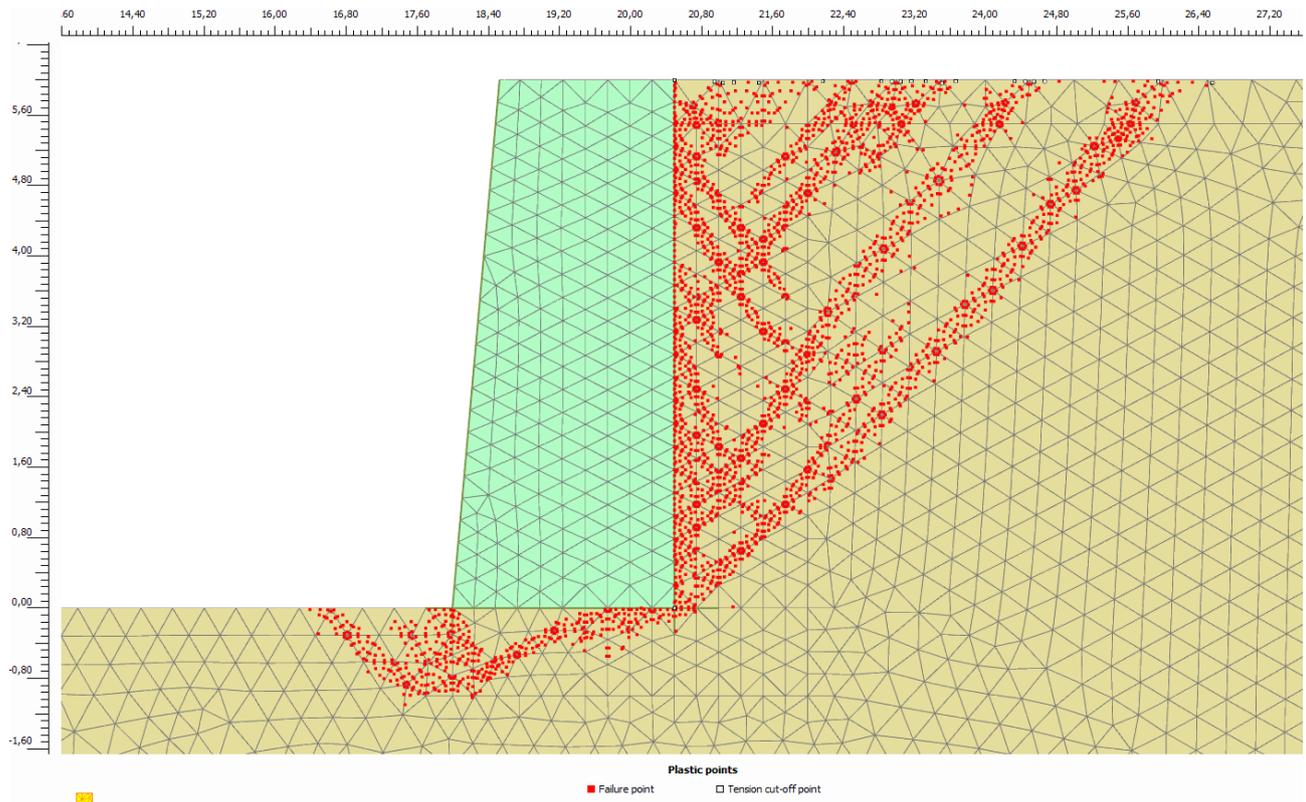
Anhang 8 V1: relative Scherfestigkeit des 3.0 Modells



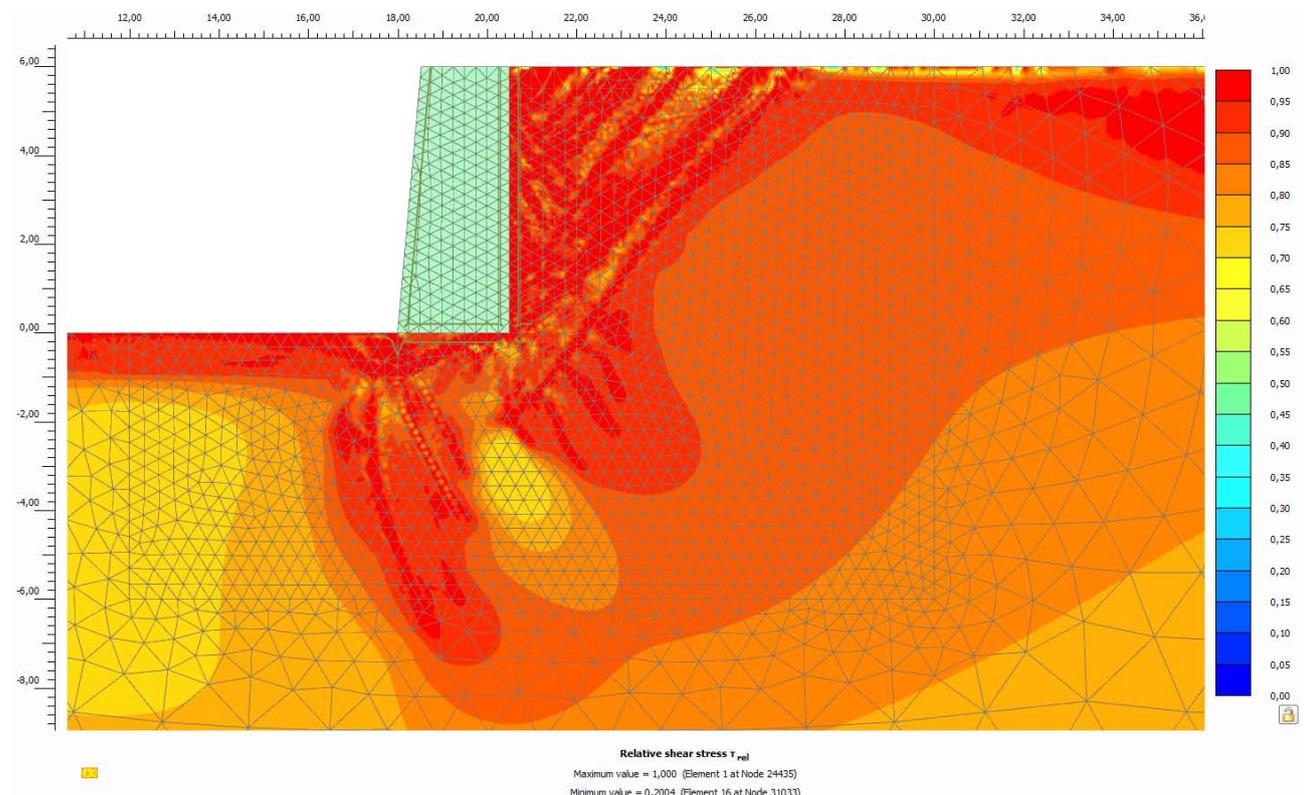
Anhang 9 V1: totale Verschiebung  $|u|$  des 2.5 Modells (5-fache Skalierung)



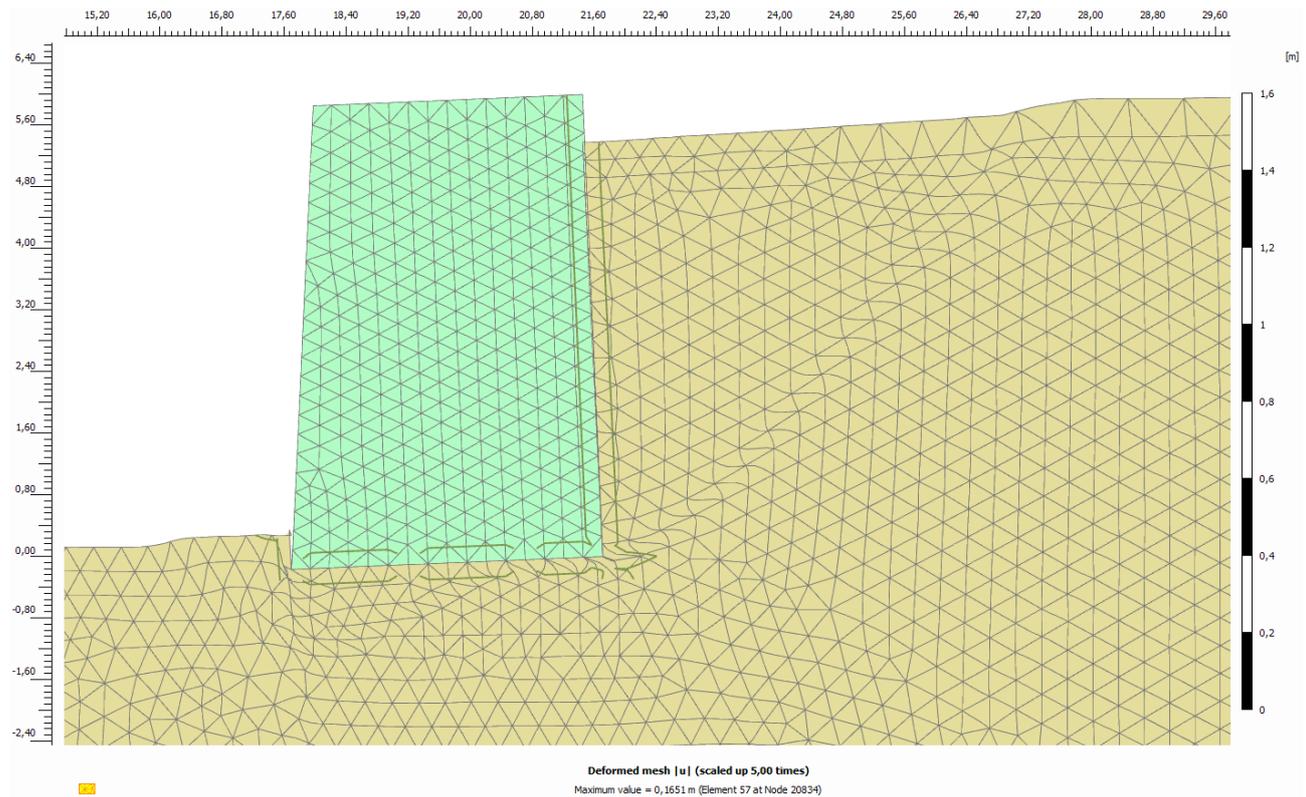
Anhang 10 V1: inkrementelle deviatorische Dehnung des 2.5 Modells



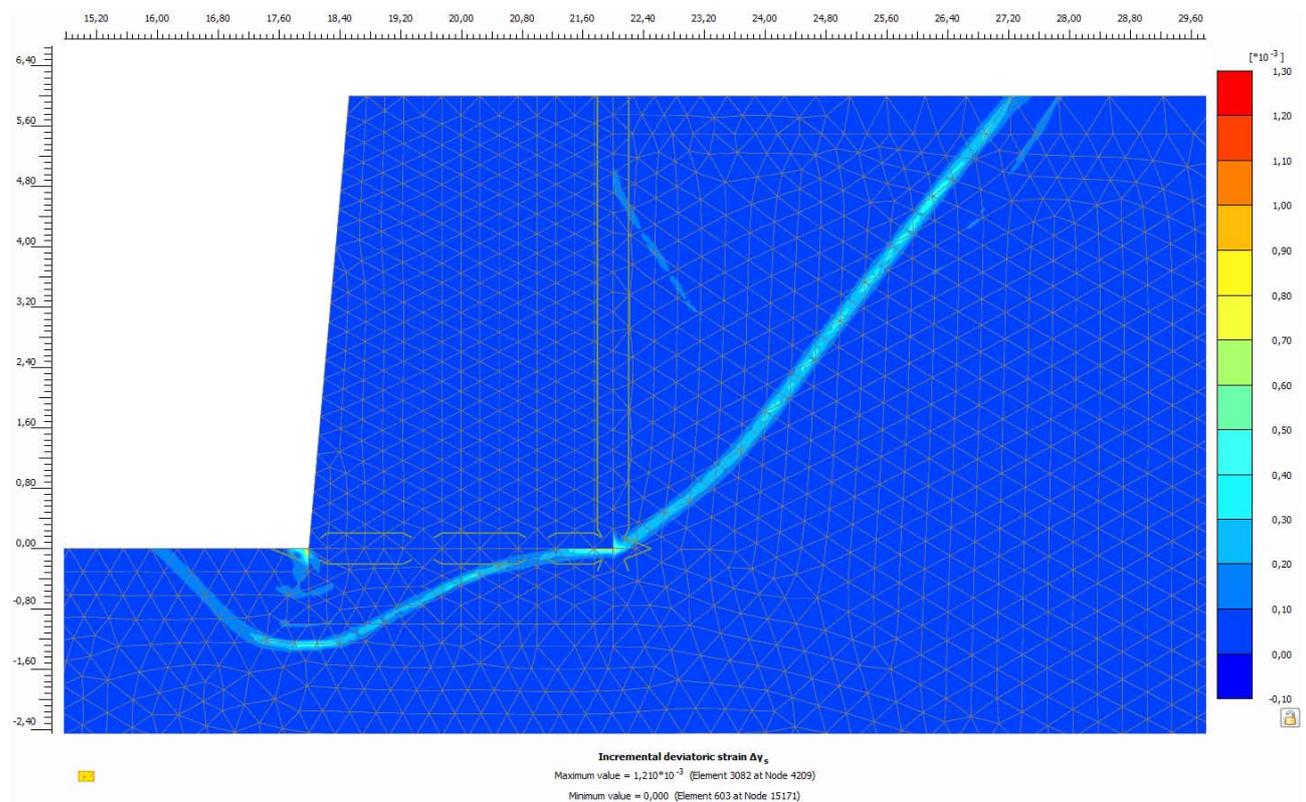
Anhang 11 V1: plastische Punkte des 2.5 Modells



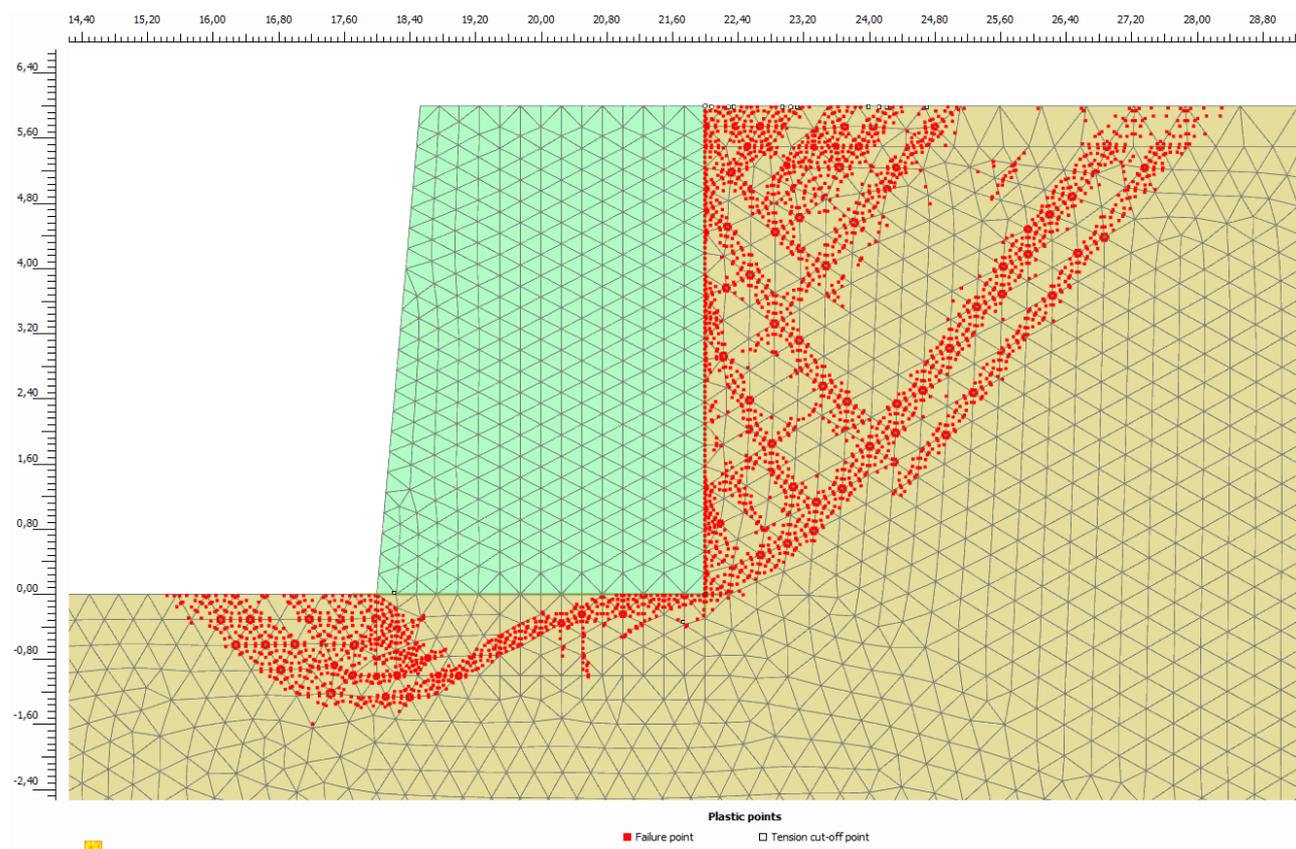
Anhang 12 V1: relative Scherfestigkeit des 2.5 Modells



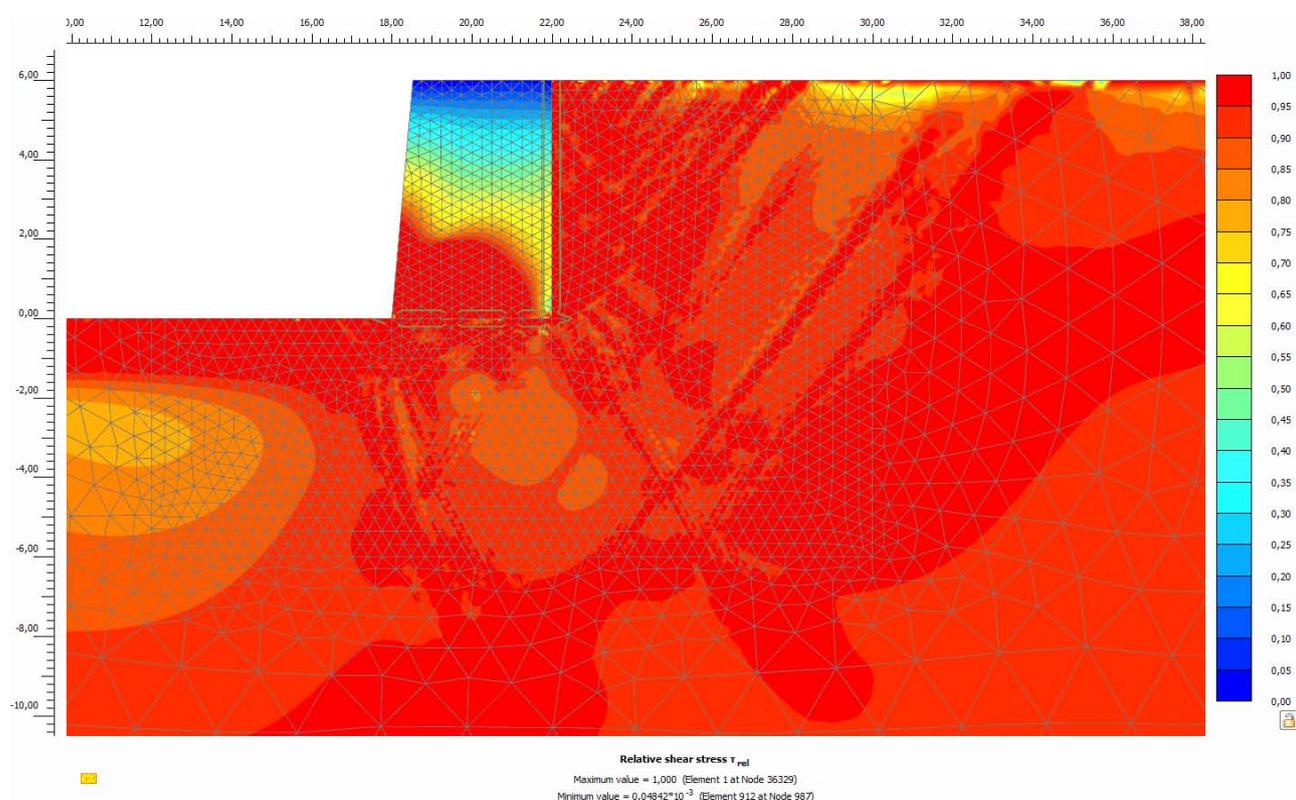
Anhang 13 V2: totale Verschiebung  $u$  des 4.0 Modells (5-fache Skalierung)



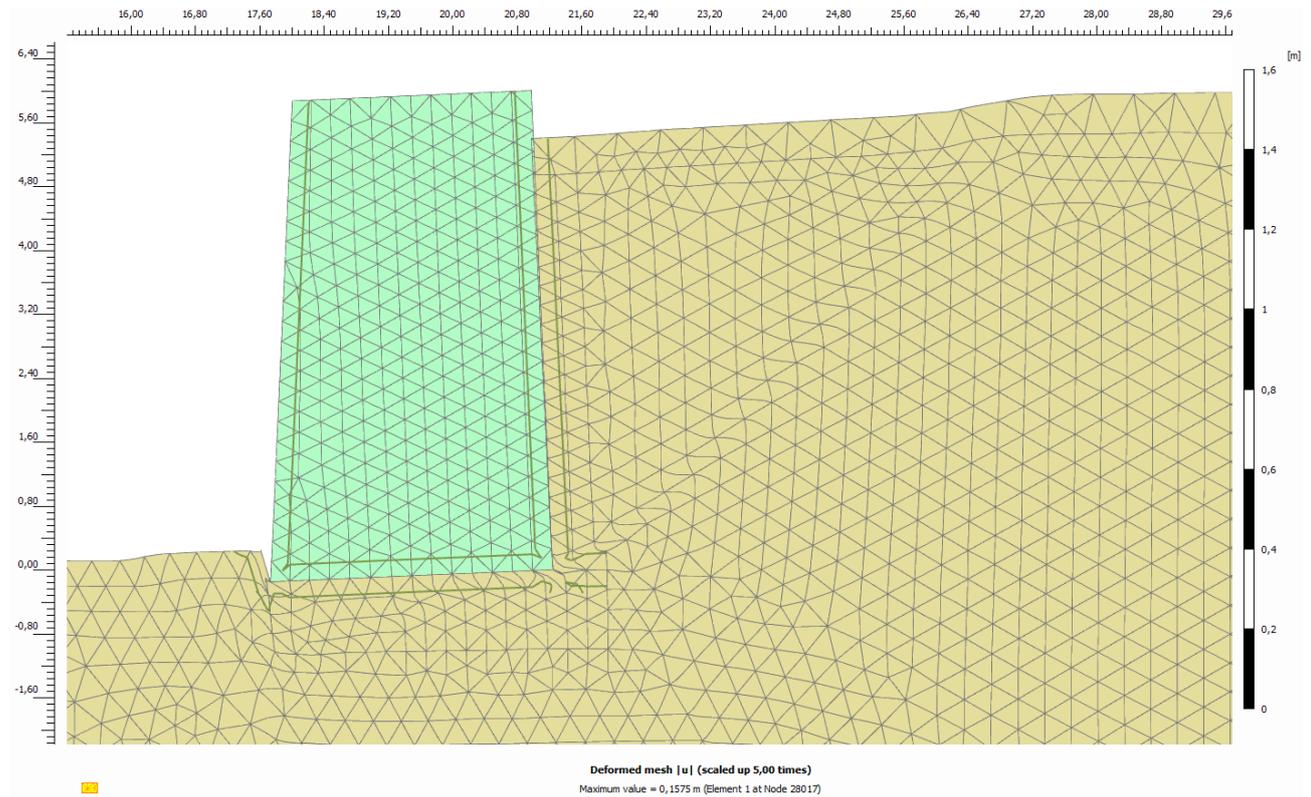
Anhang 14 V2: inkrementelle deviatorische Dehnung des 4.0 Modells



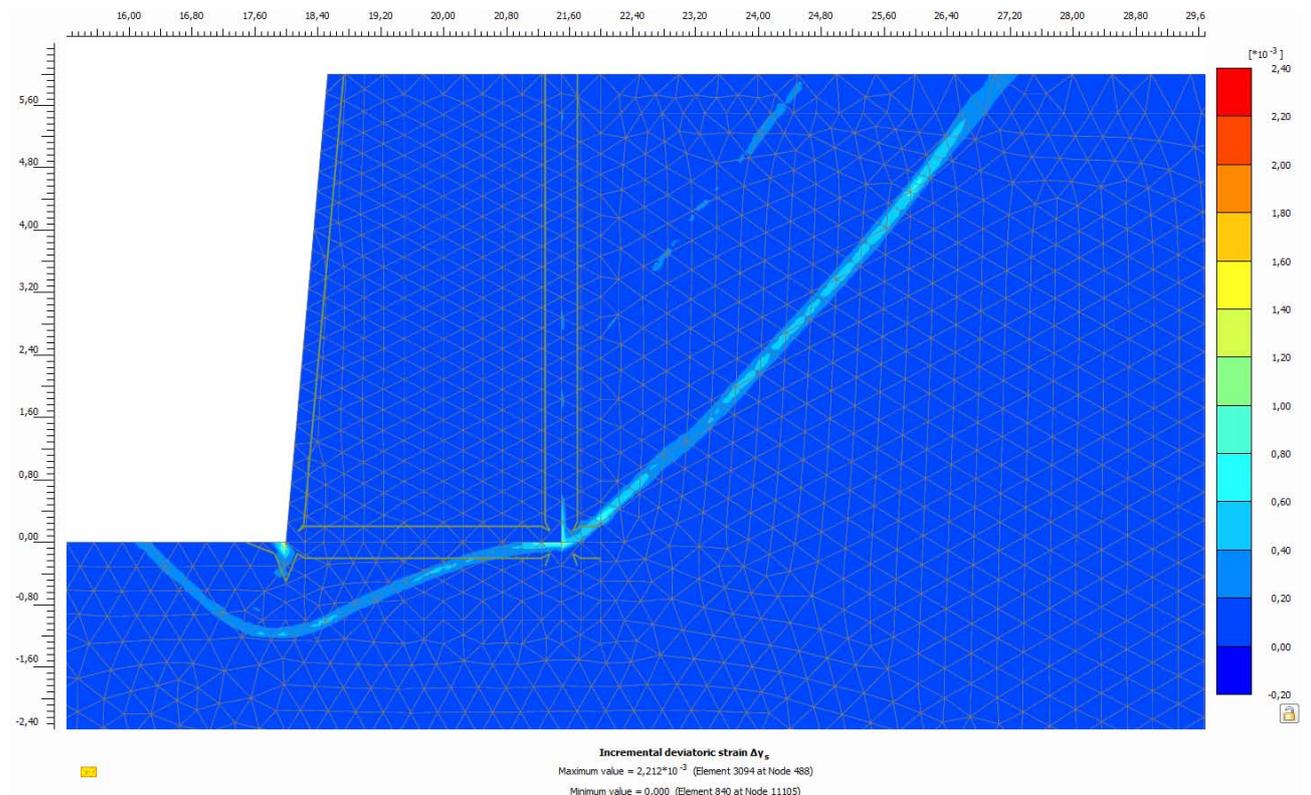
Anhang 15 V2: plastische Punkte des 4.0 Modells



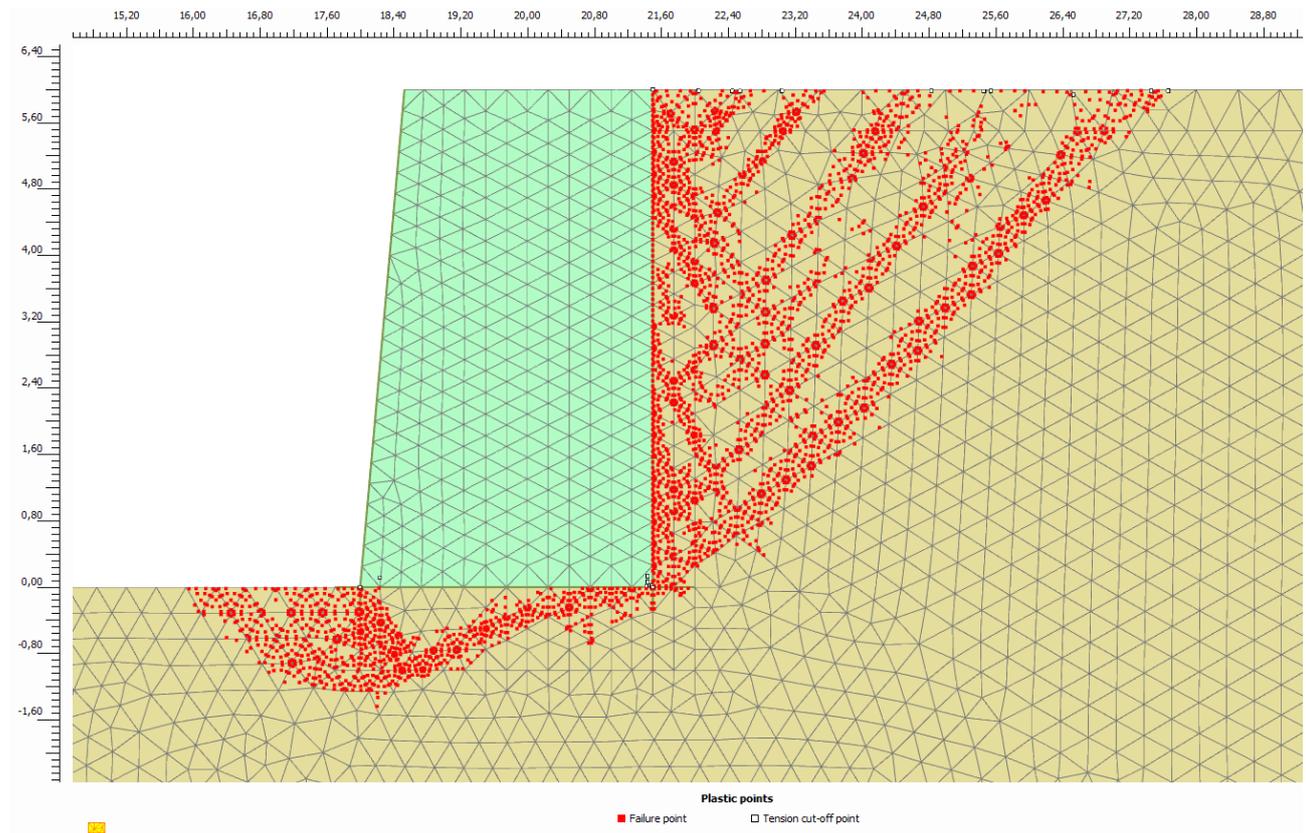
Anhang 16 V2: relative Scherfestigkeit des 4.0 Modells



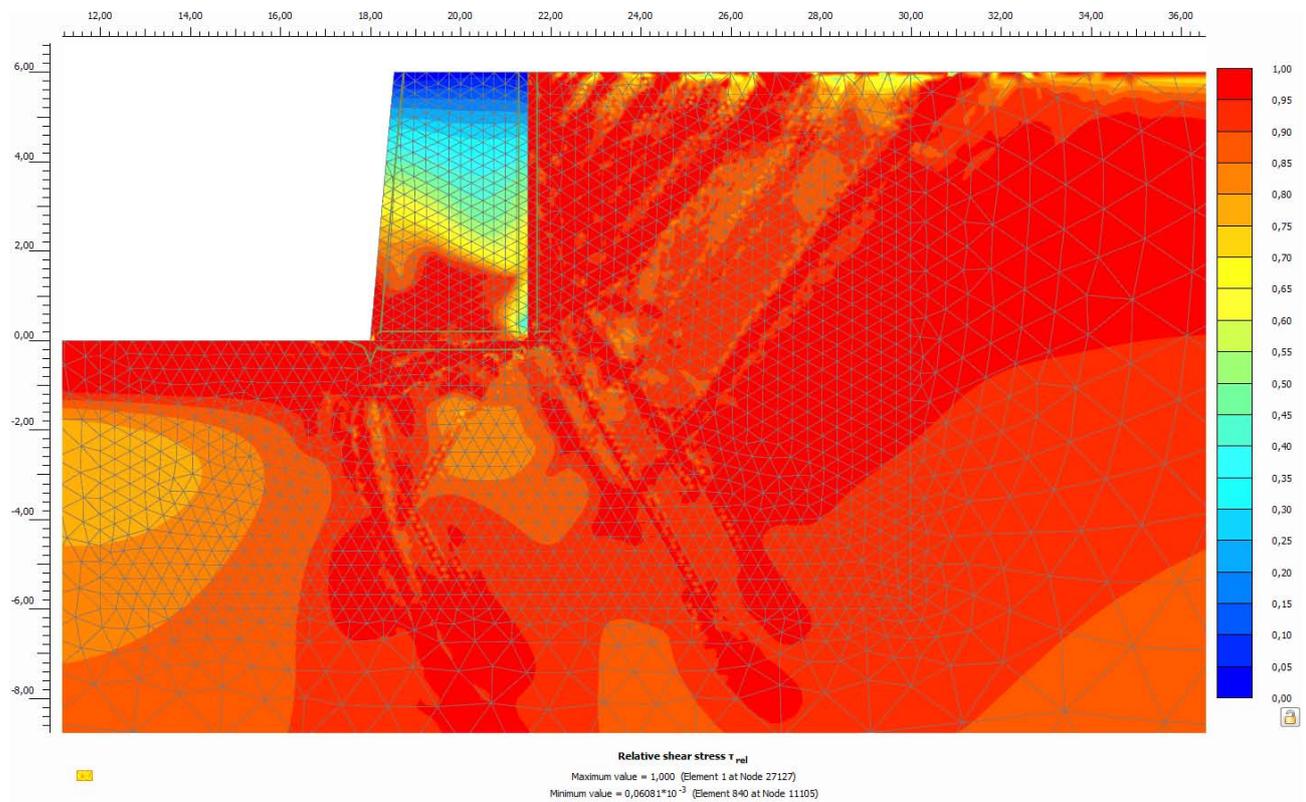
Anhang 17 V2: totale Verschiebung  $|u|$  des 3.5 Modells (5-fache Skalierung)



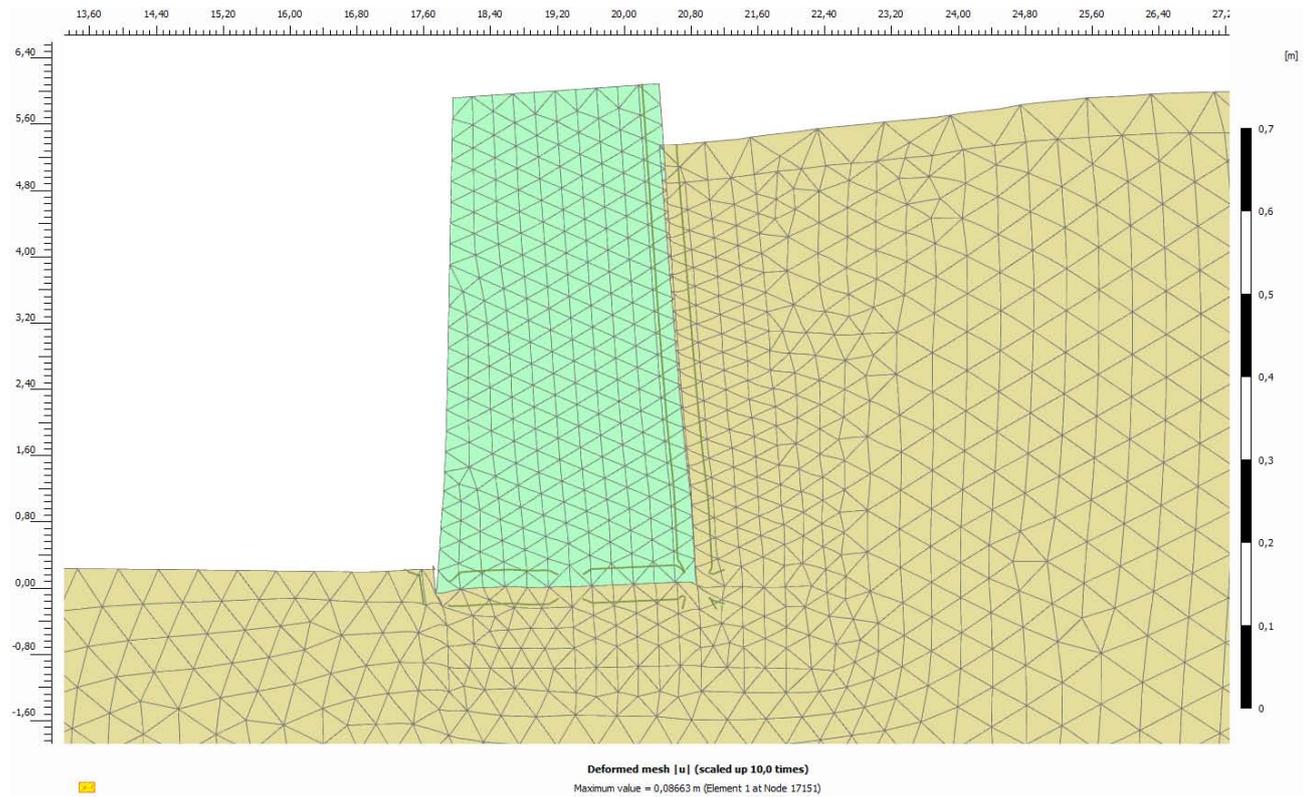
Anhang 18 V2: inkrementelle deviatorische Dehnung des 3.5 Modells



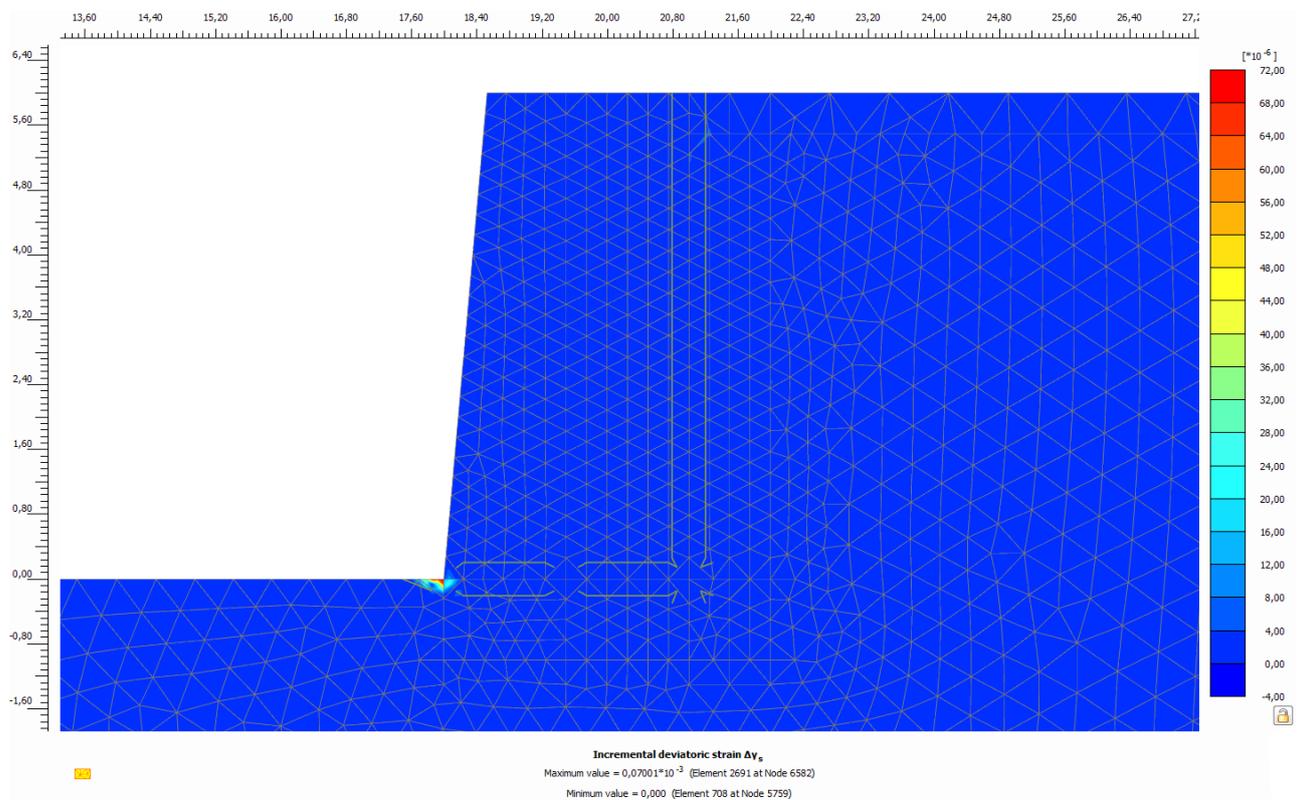
Anhang 19 V2: plastische Punkte des 3.5 Modells



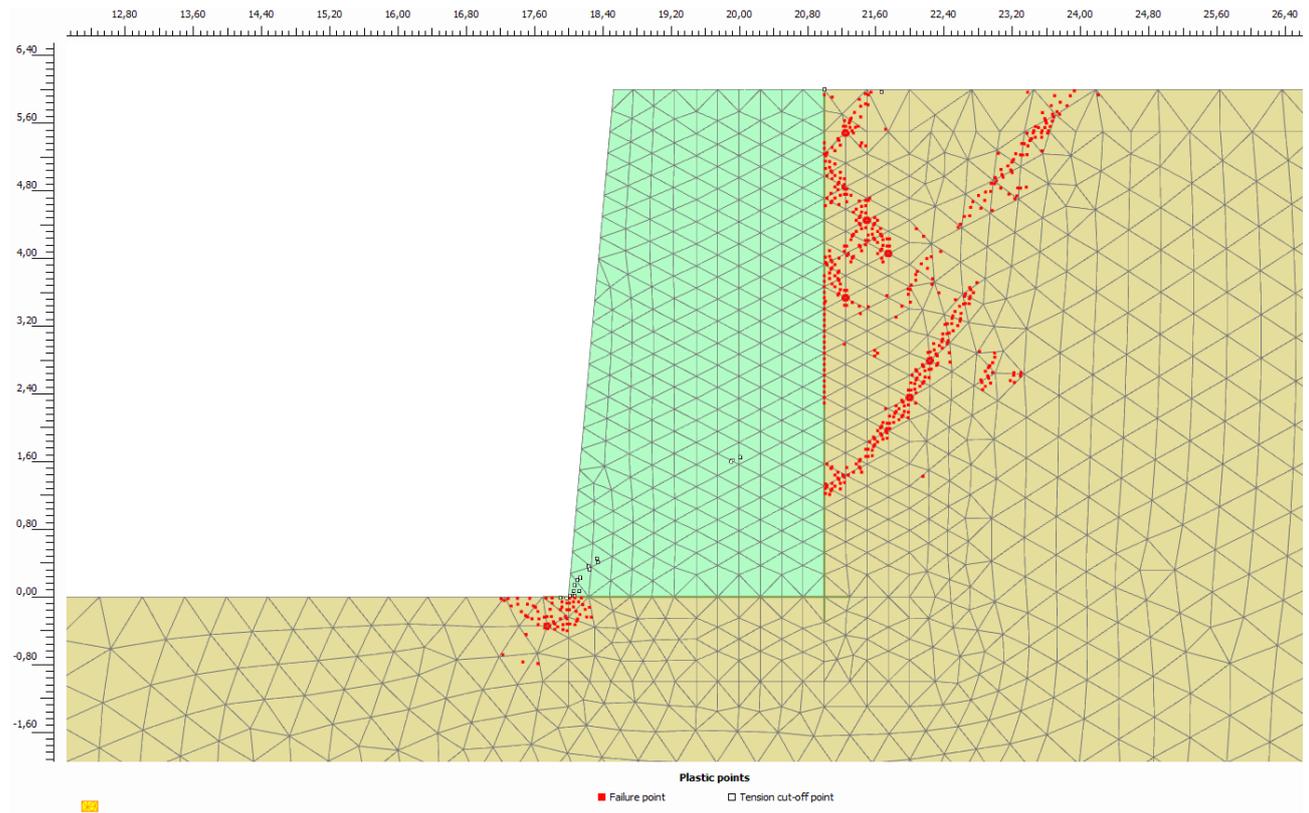
Anhang 20 V2: relative Scherfestigkeit des 3.5 Modells



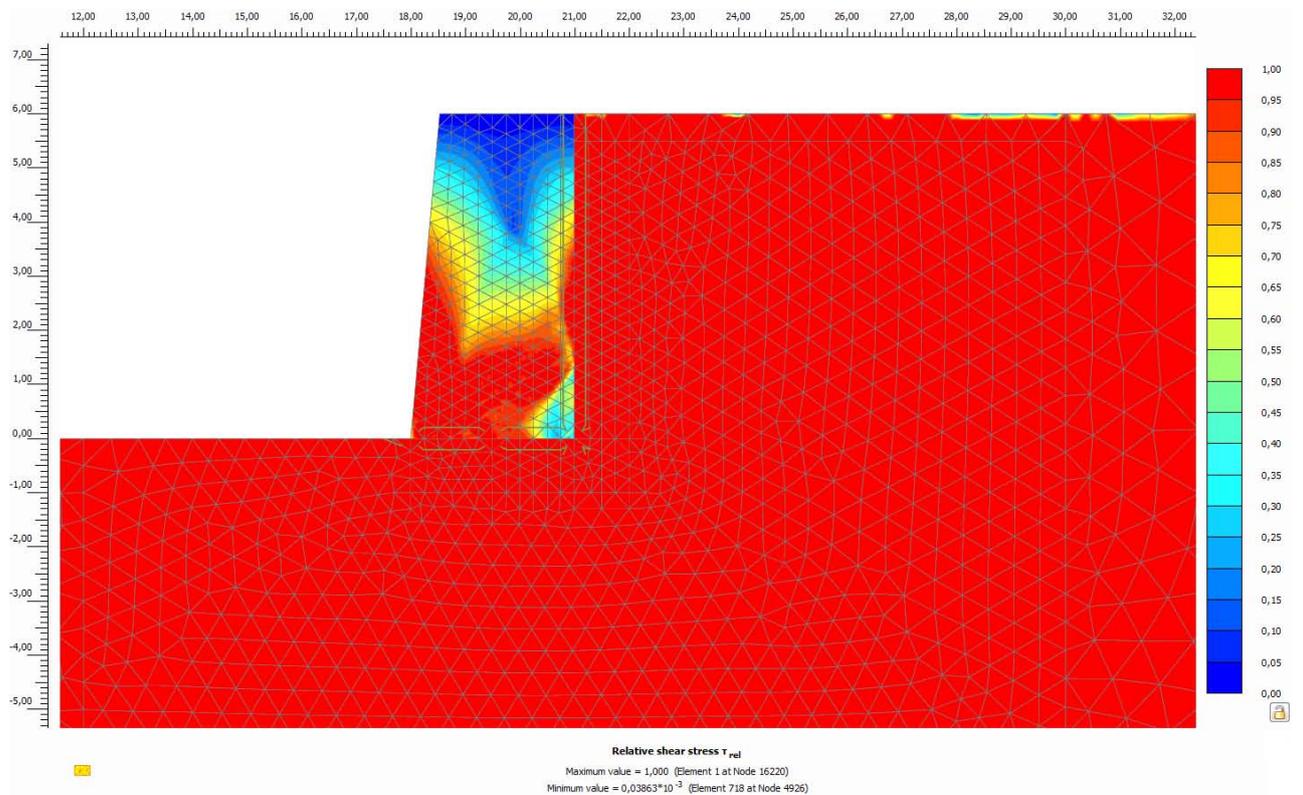
Anhang 21 V2: totale Verschiebung  $u$  des 3.0 Modells (10-fache Skalierung)



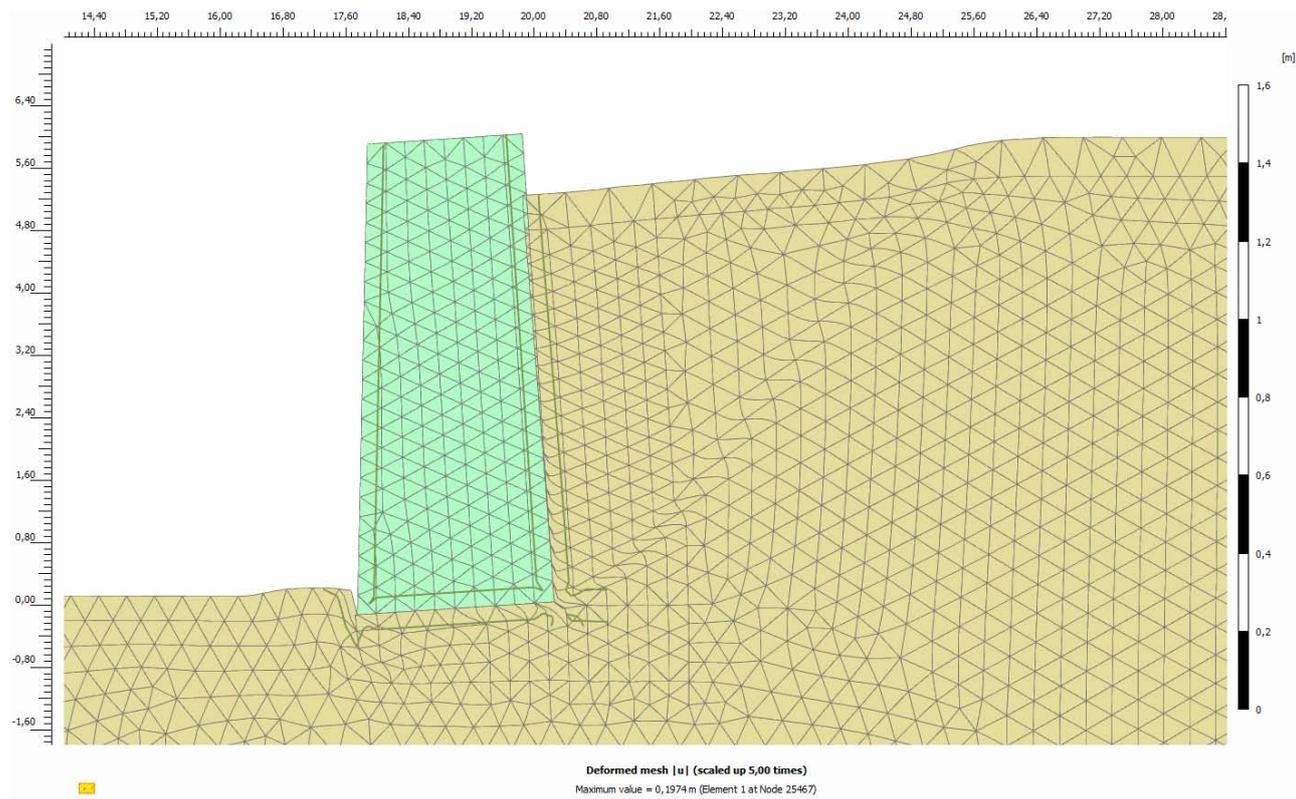
Anhang 22 V2: inkrementelle deviatorische Dehnung des 3.0 Modells



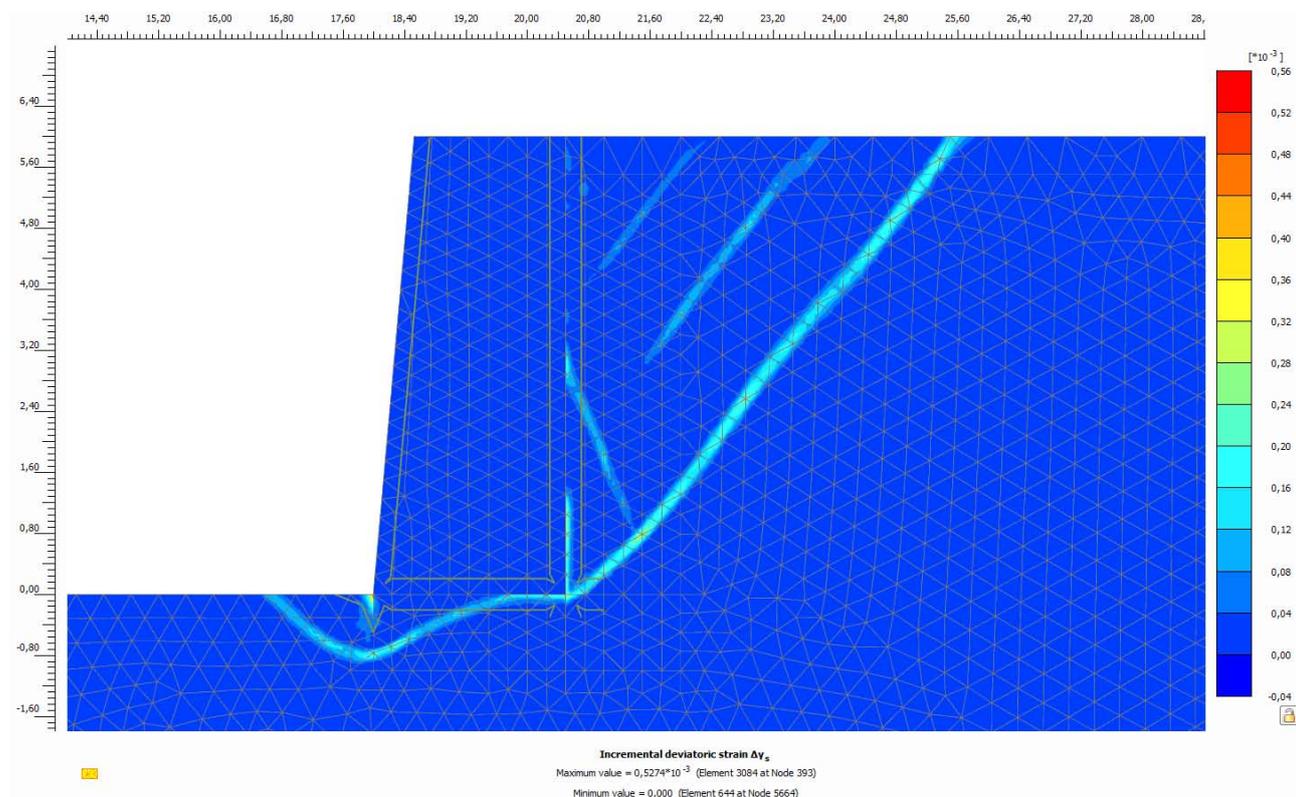
Anhang 23 V2: plastische Punkte des 3.0 Modells



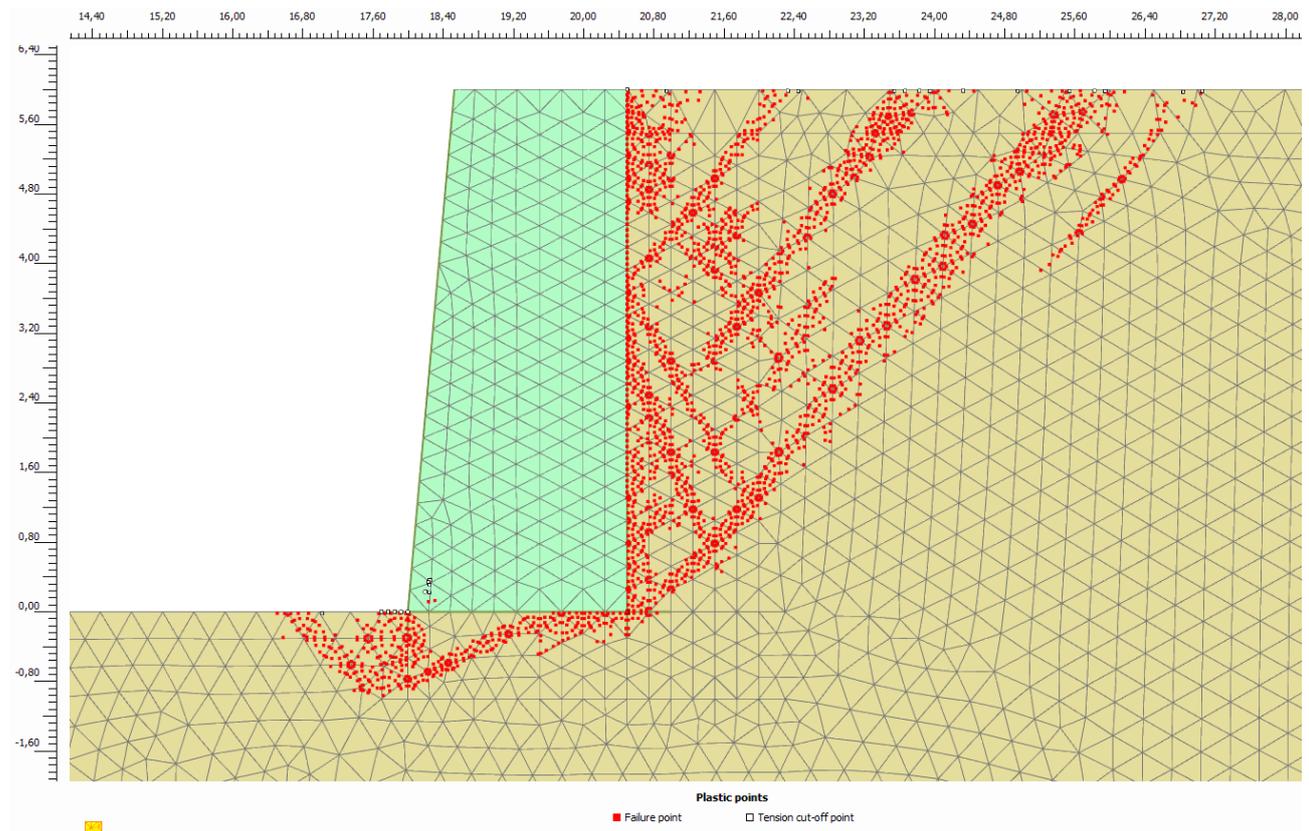
Anhang 24 V2: relative Scherfestigkeit des 3.0 Modells



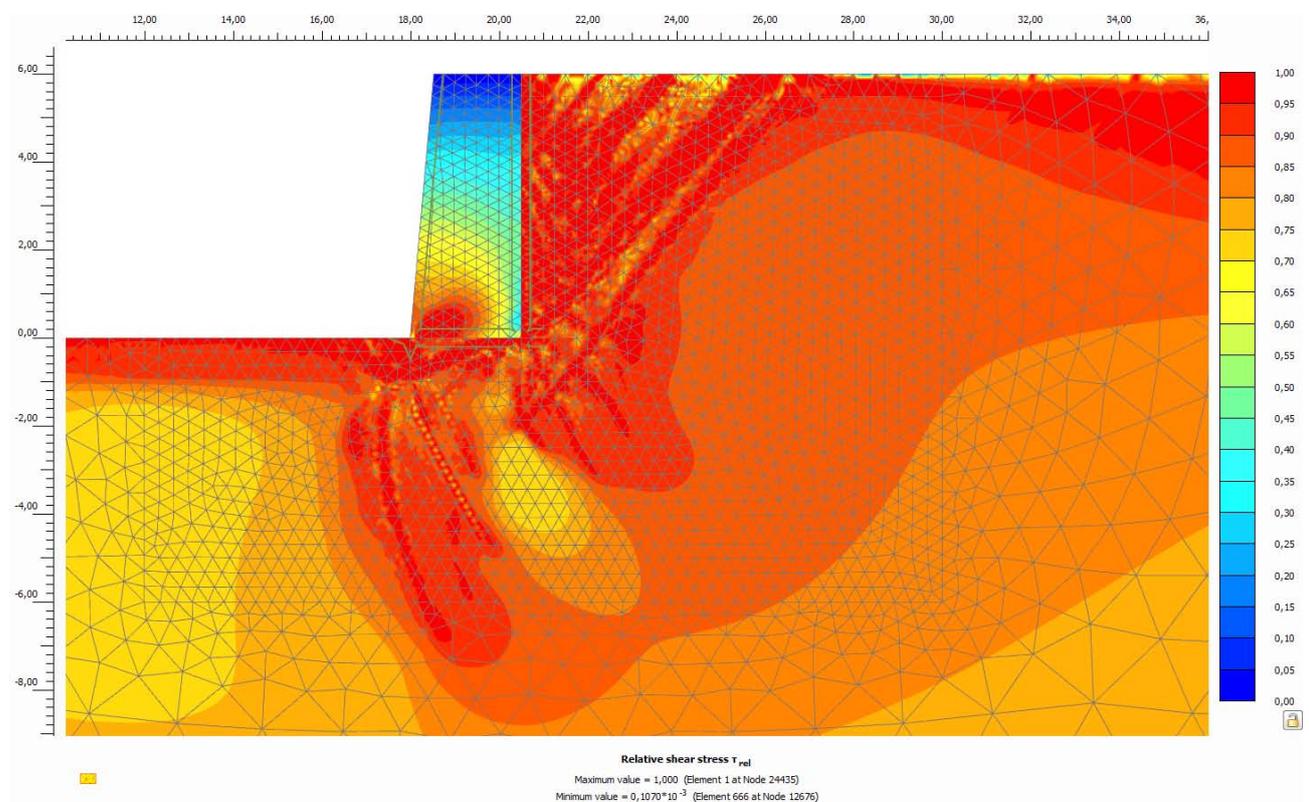
Anhang 25 V2: totale Verschiebung |u| des 2.5 Modells (5-fache Skalierung)



Anhang 26 V2: inkrementelle deviatorische Dehnung des 2.5 Modells

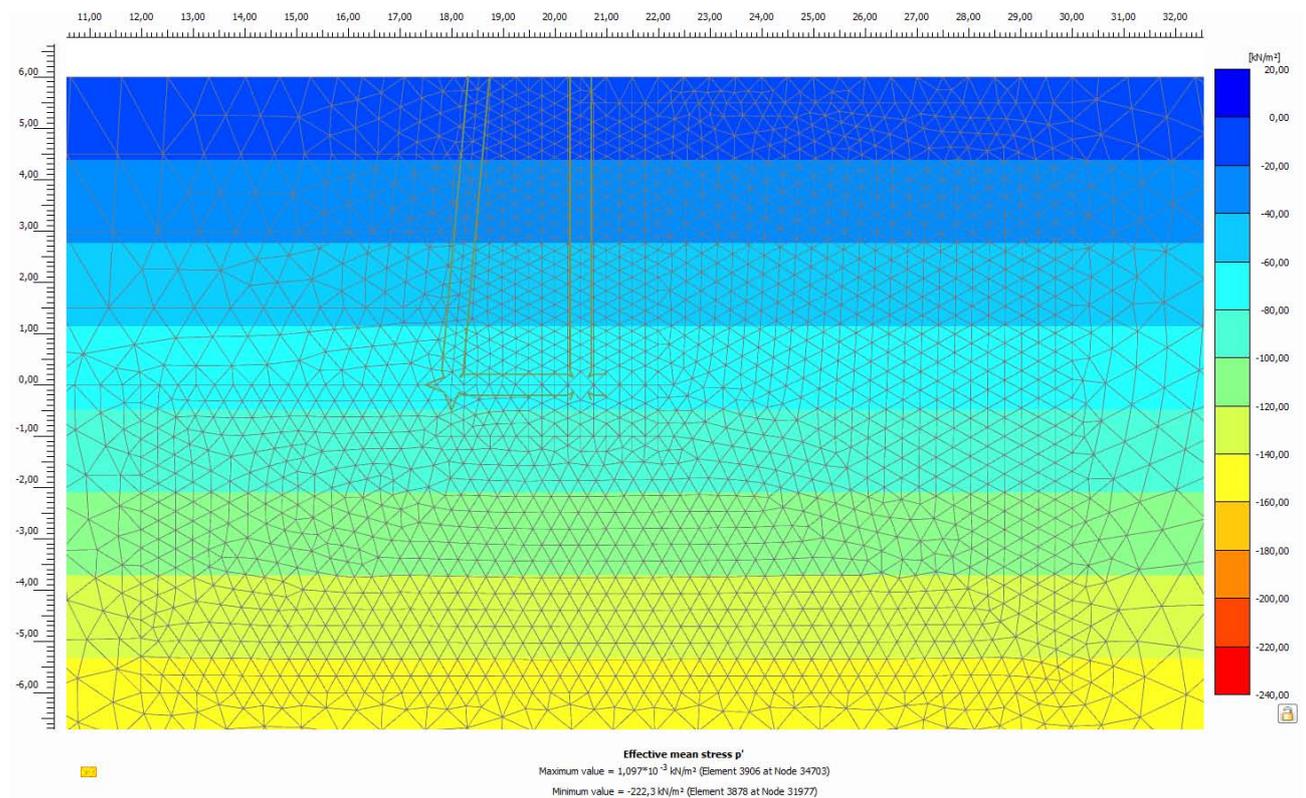


Anhang 27 V2: plastische Punkte des 2.5 Modells

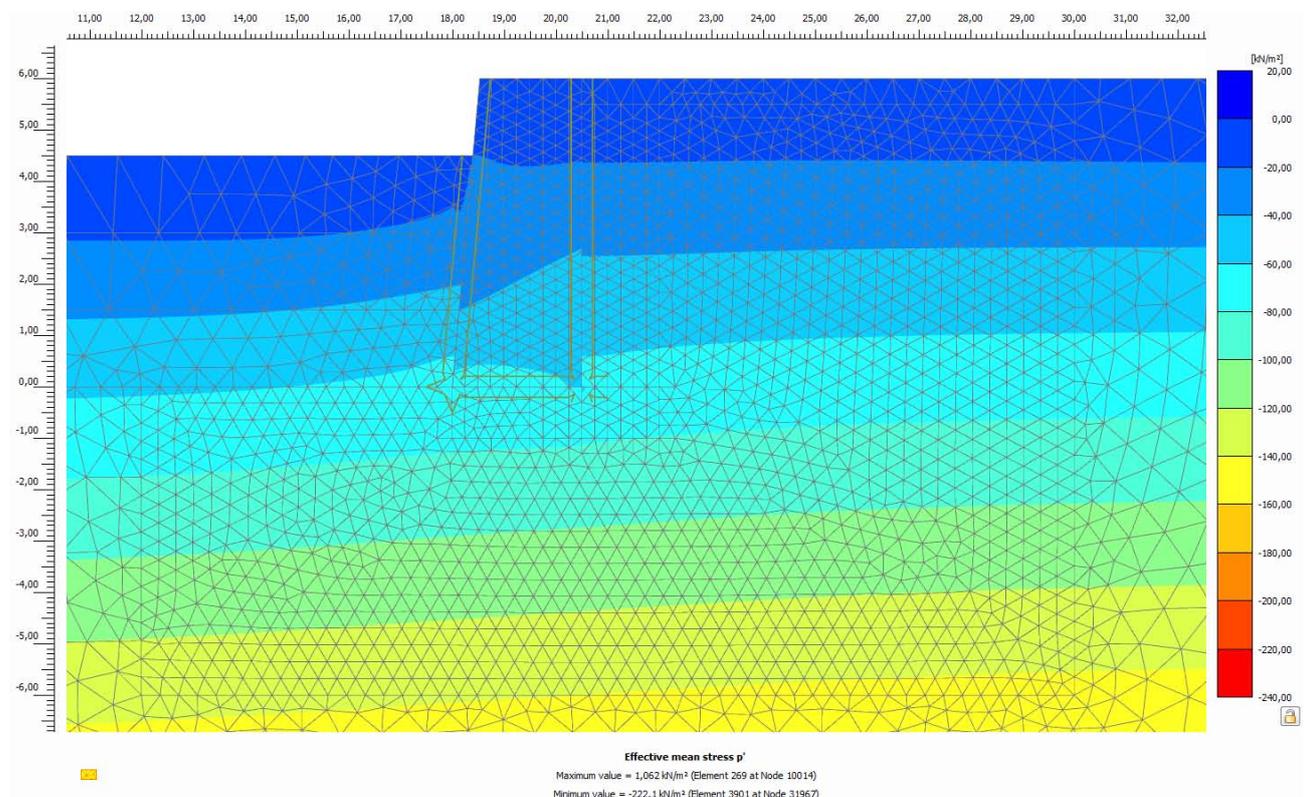


Anhang 28 V2: relative Scherfestigkeit des 2.5 Modells

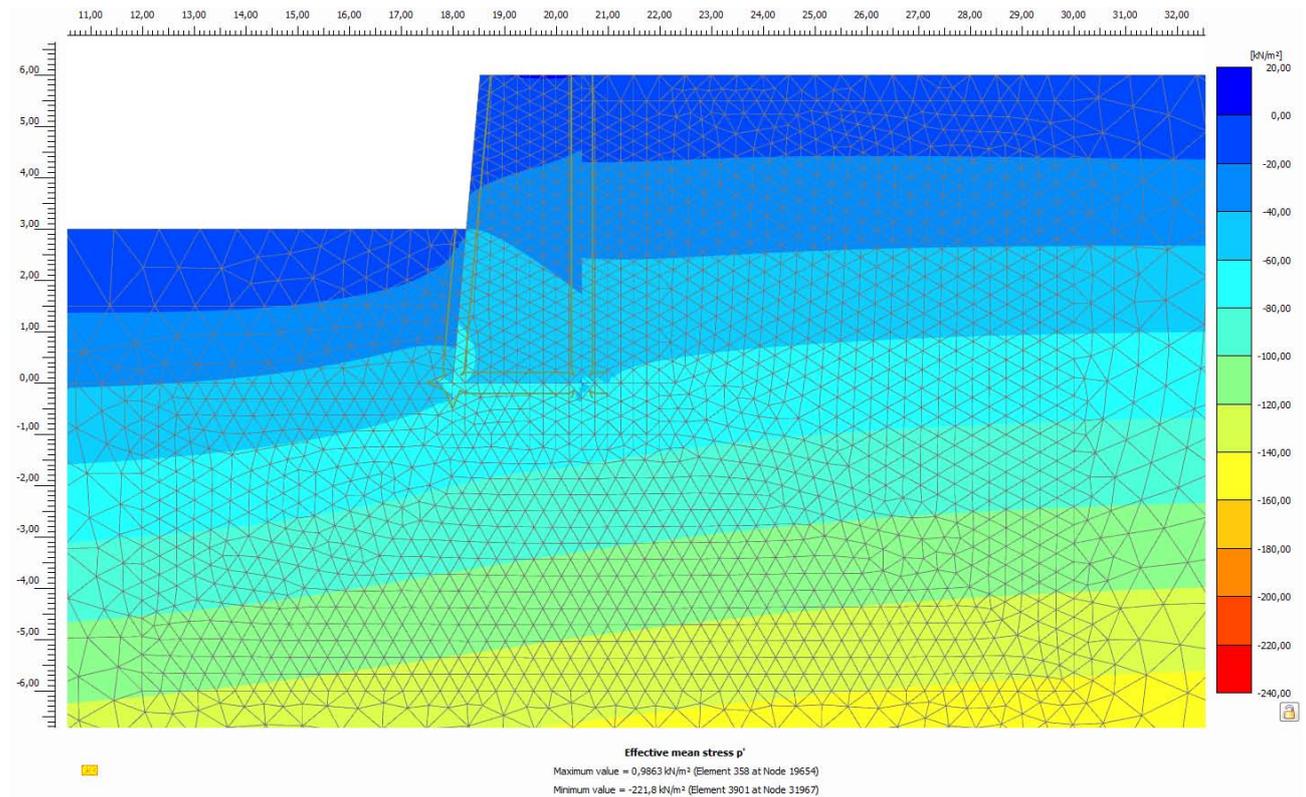
**Detaillierte Ausgabe**



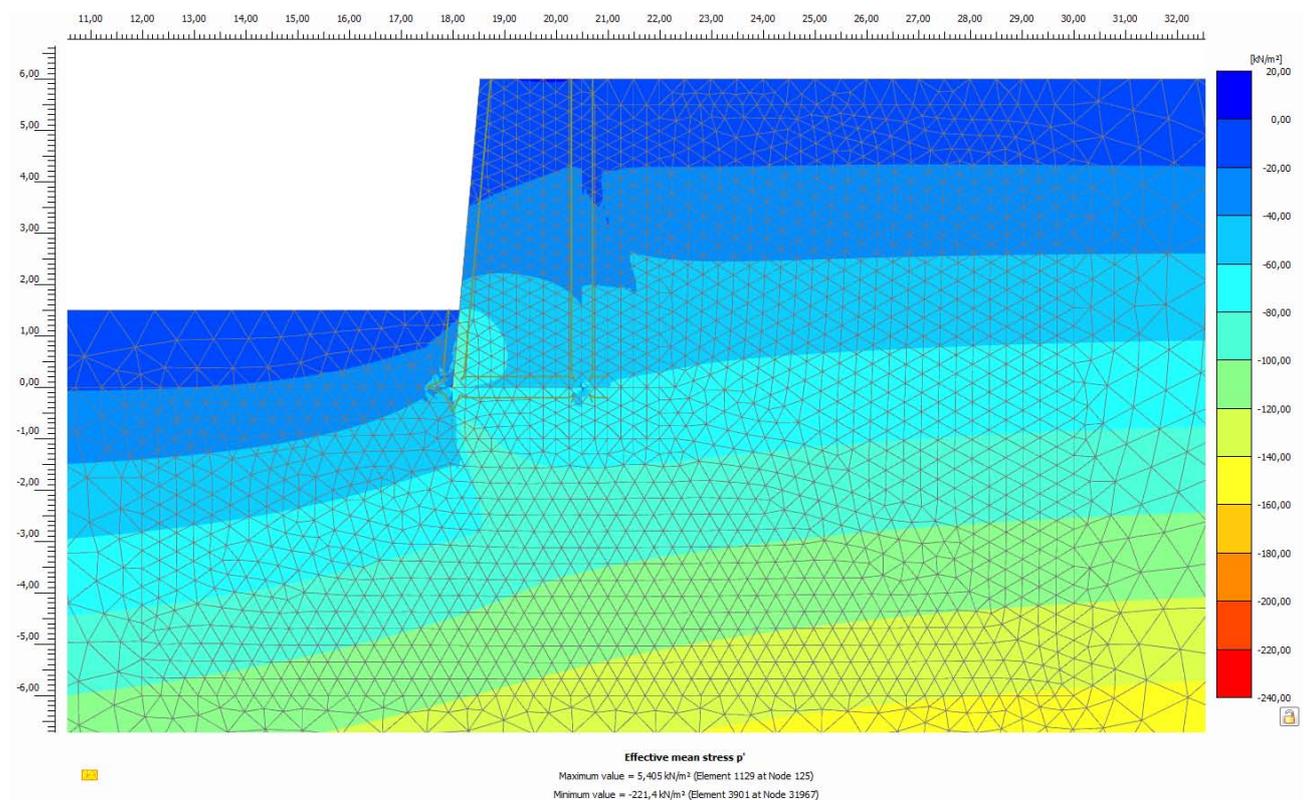
Anhang 29 V2\_2.5 Modell:  $p'$  (Boden und Interface aktivieren)



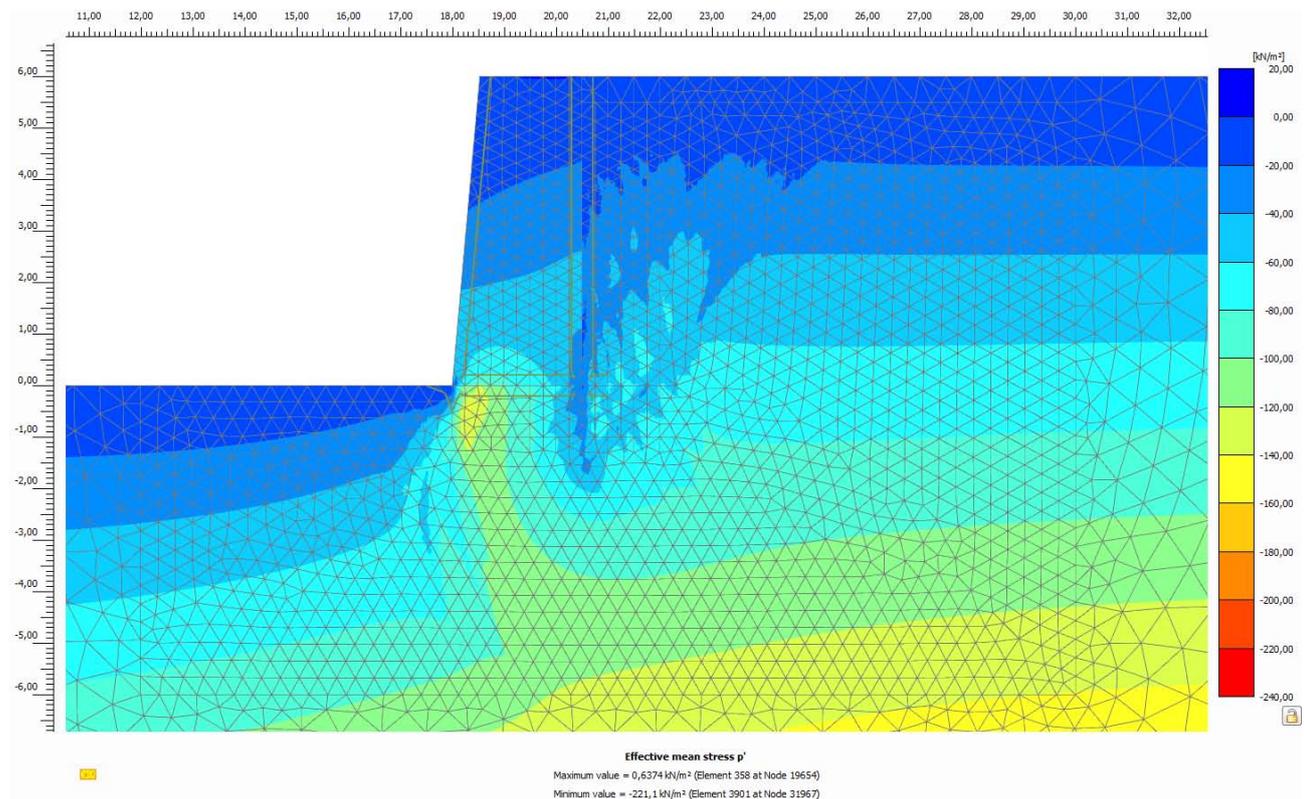
Anhang 30 V2\_2.5 Modell:  $p'$  (1.Aushub)



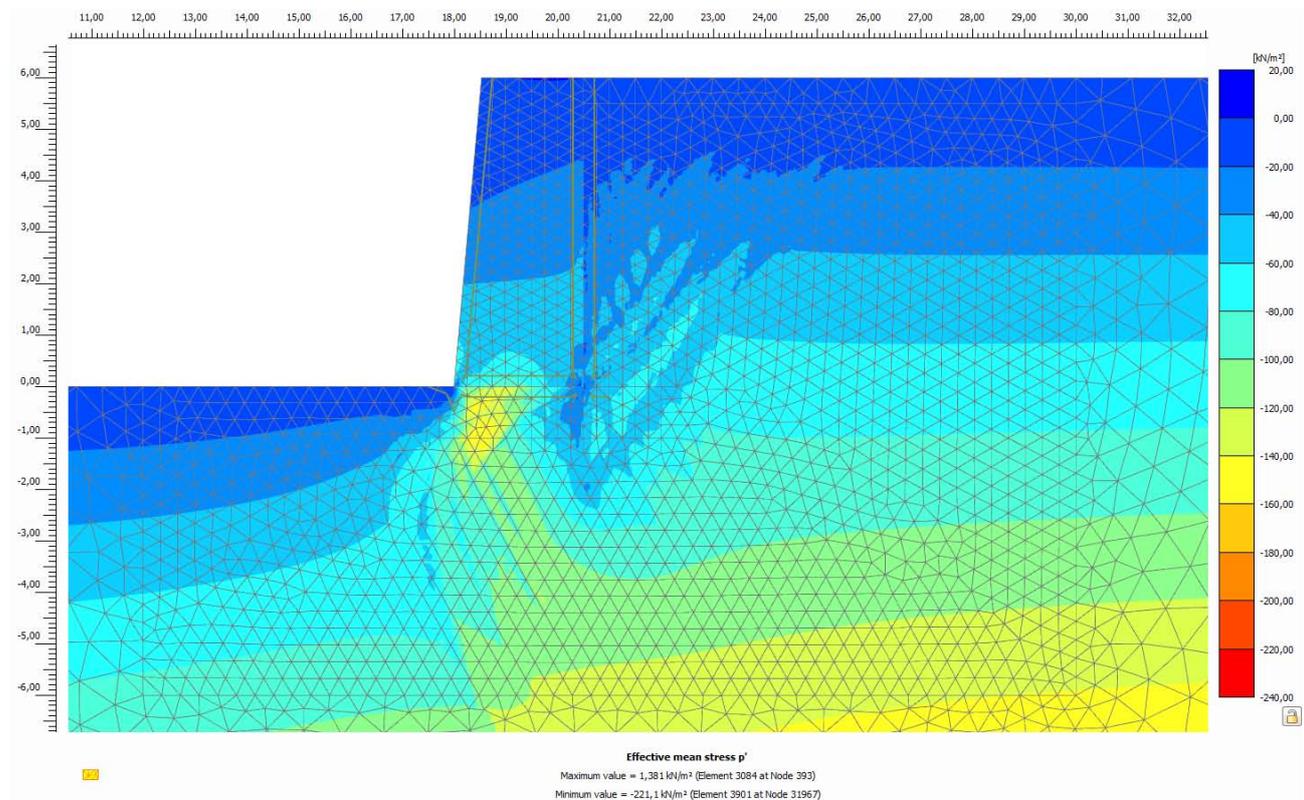
Anhang 31 V2\_2.5 Modell:  $p'$  (2.Aushub)



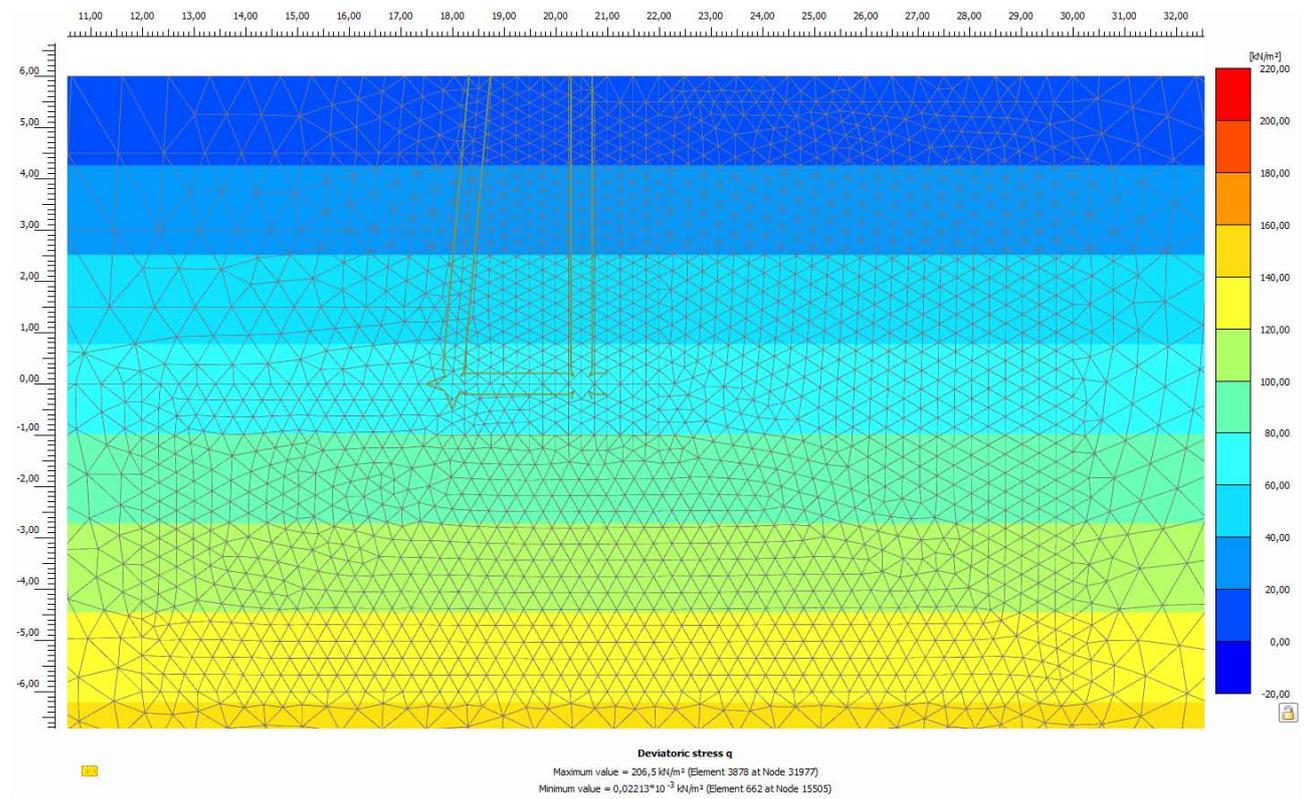
Anhang 32 V2\_2.5 Modell:  $p'$  (3.Aushub)



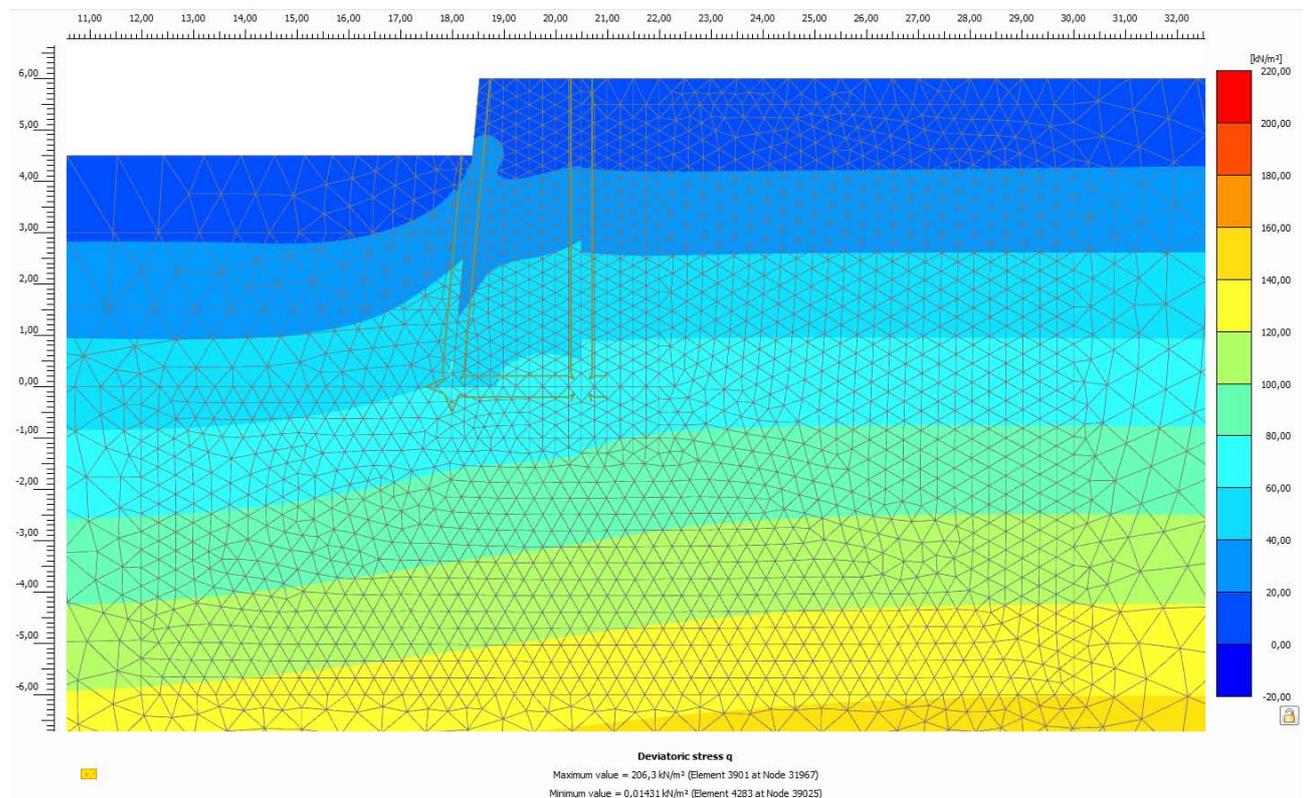
Anhang 33 V2\_2.5 Modell:  $p'$  (4.Aushub)



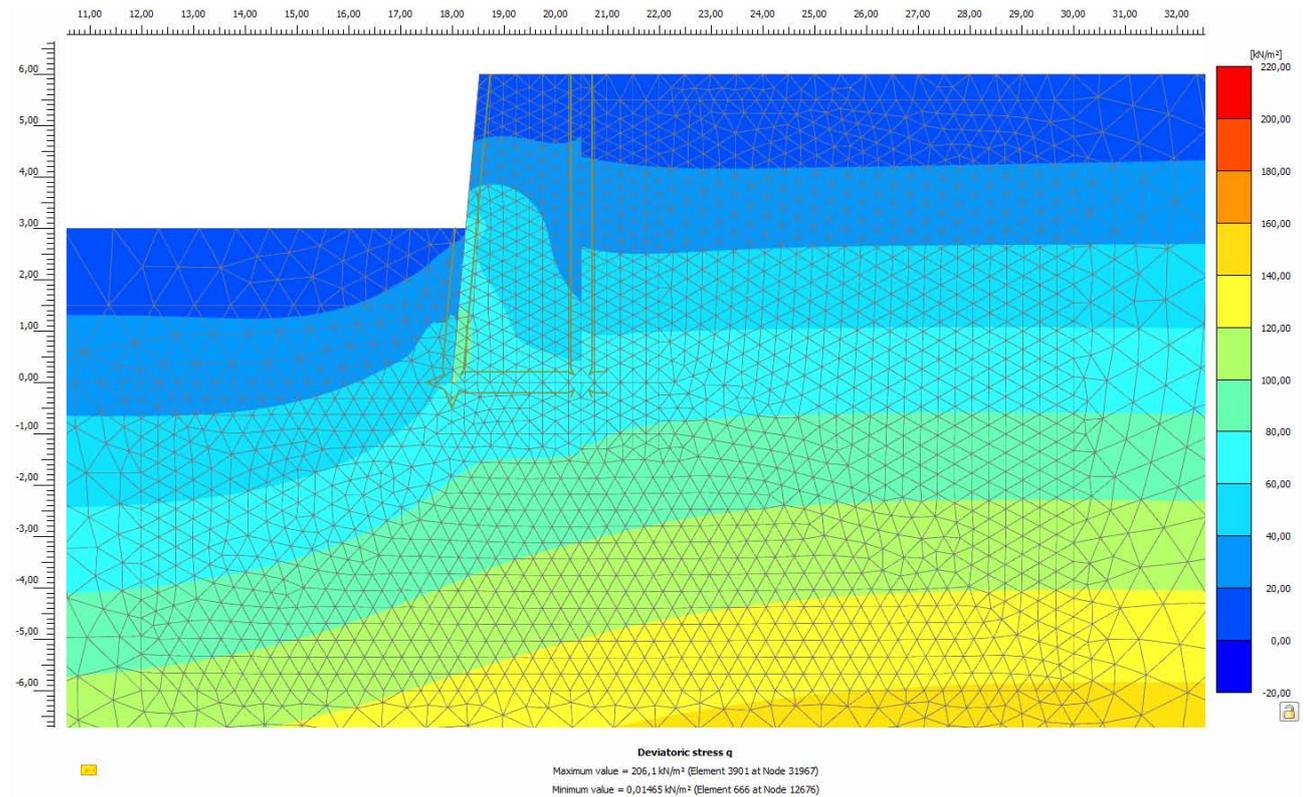
Anhang 34 V2\_2.5 Modell:  $p'$  ( $\varphi$  - c Reduktion)



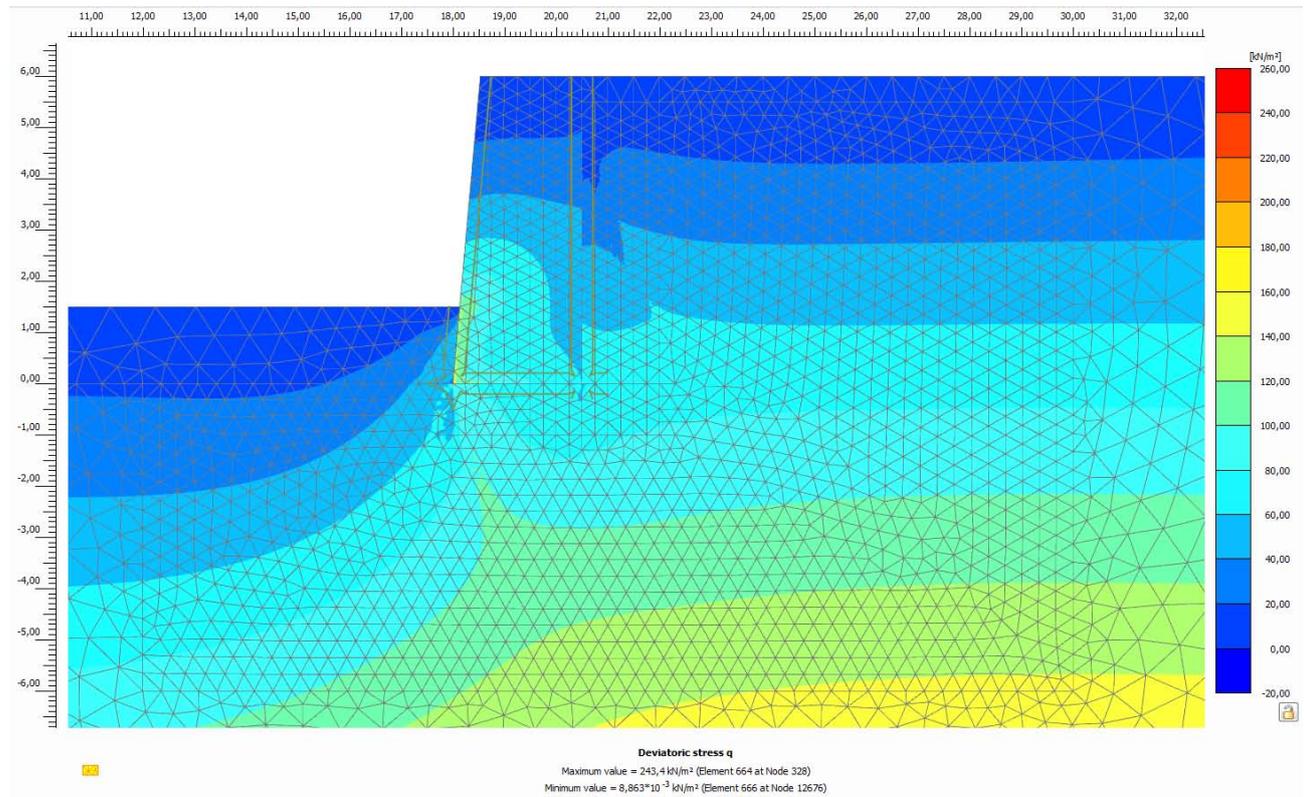
Anhang 35 V2\_2.5 Modell: q (Boden und Interface aktivieren)



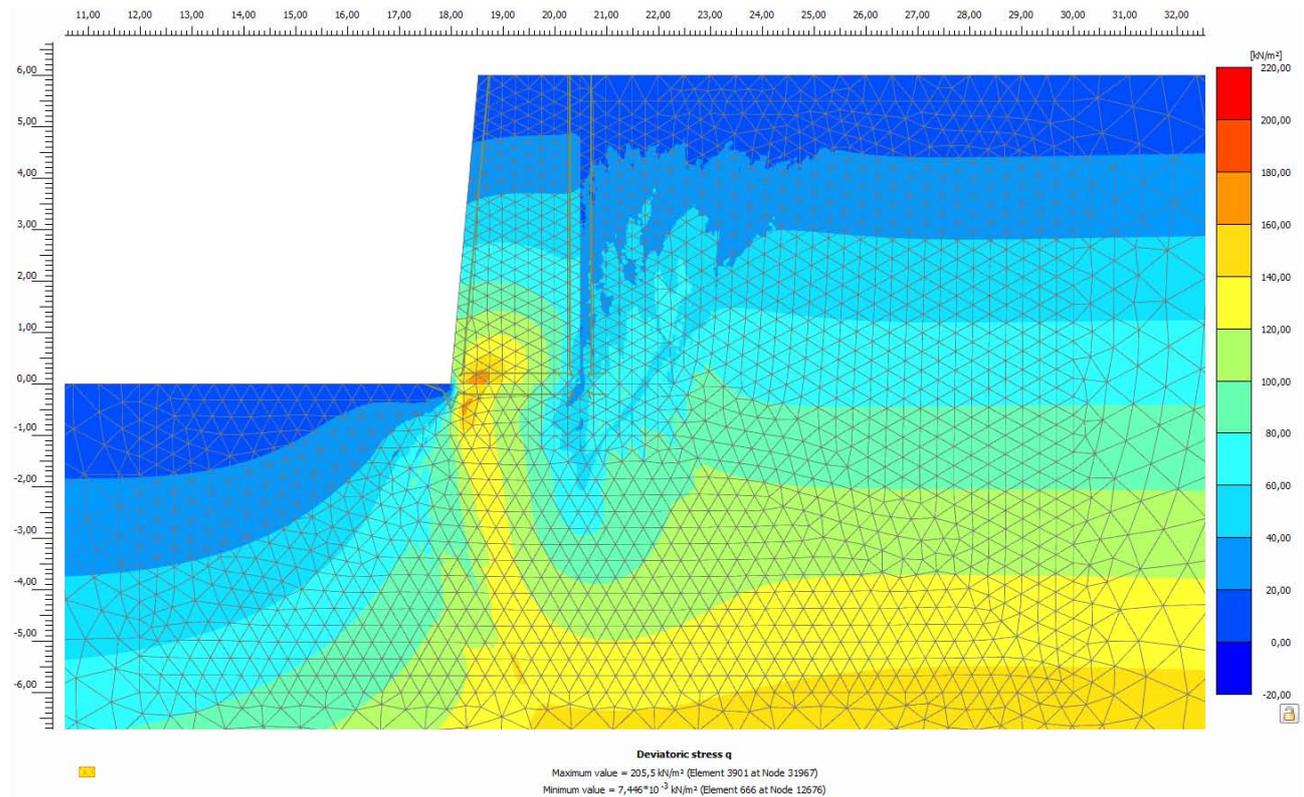
Anhang 36 V2\_2.5 Modell: q (1.Aushub)



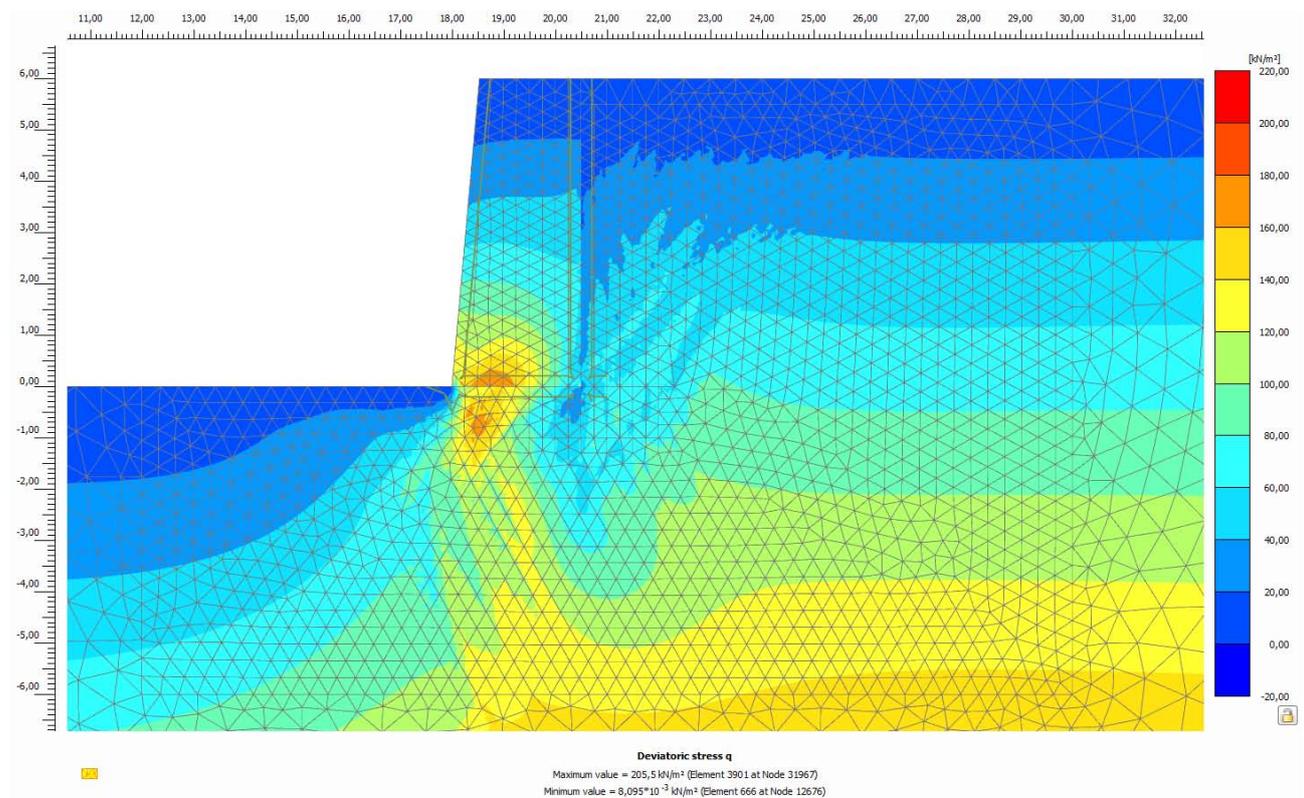
Anhang 37 V2\_2.5 Modell: q (2.Aushub)



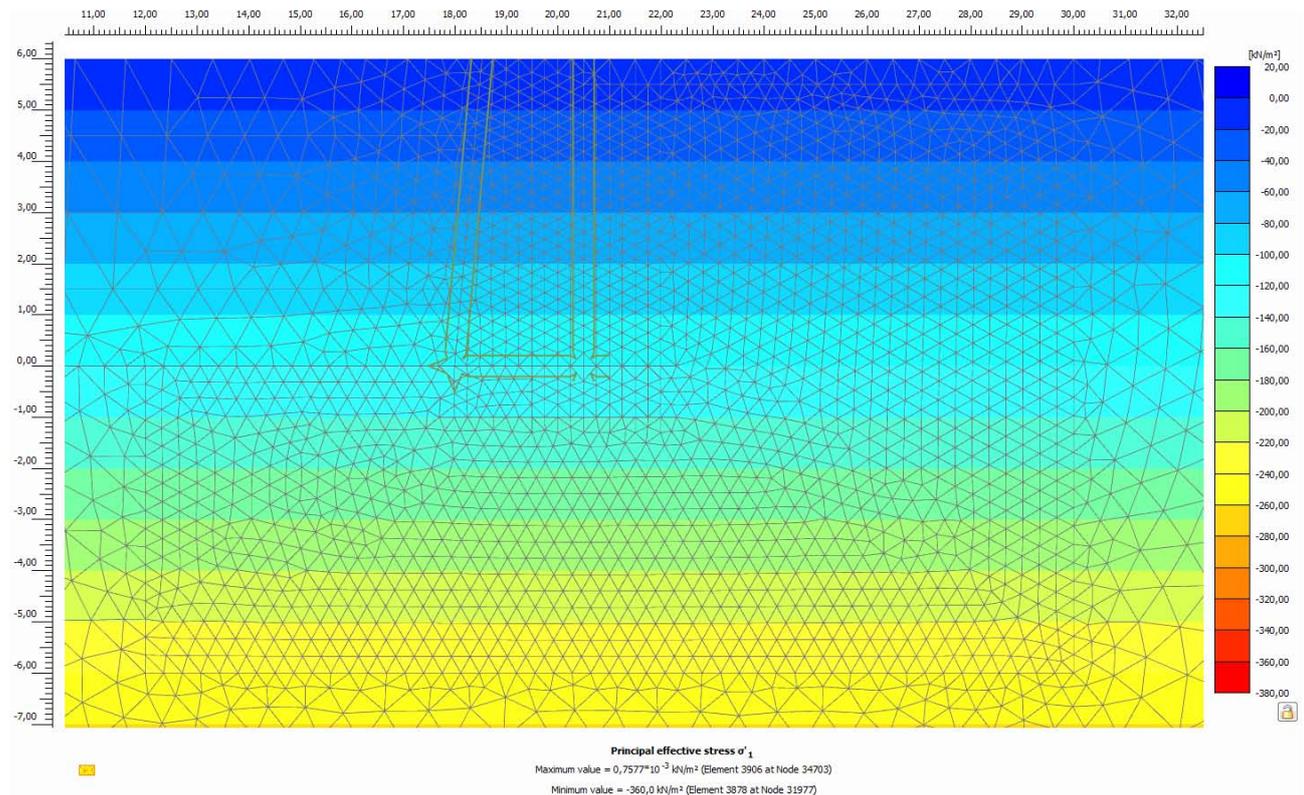
Anhang 38 V2\_2.5 Modell: q (3.Aushub)



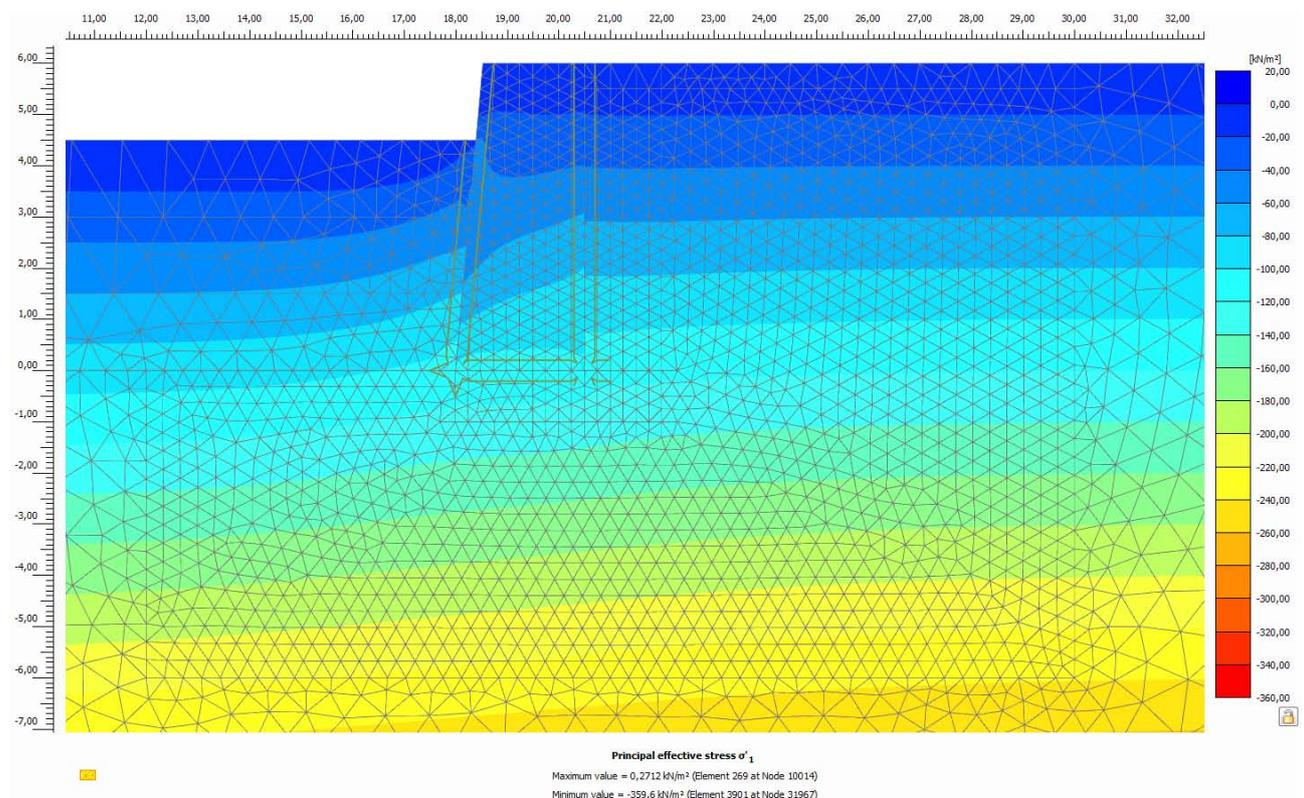
Anhang 39 V2\_2.5 Modell: q (4.Aushub)



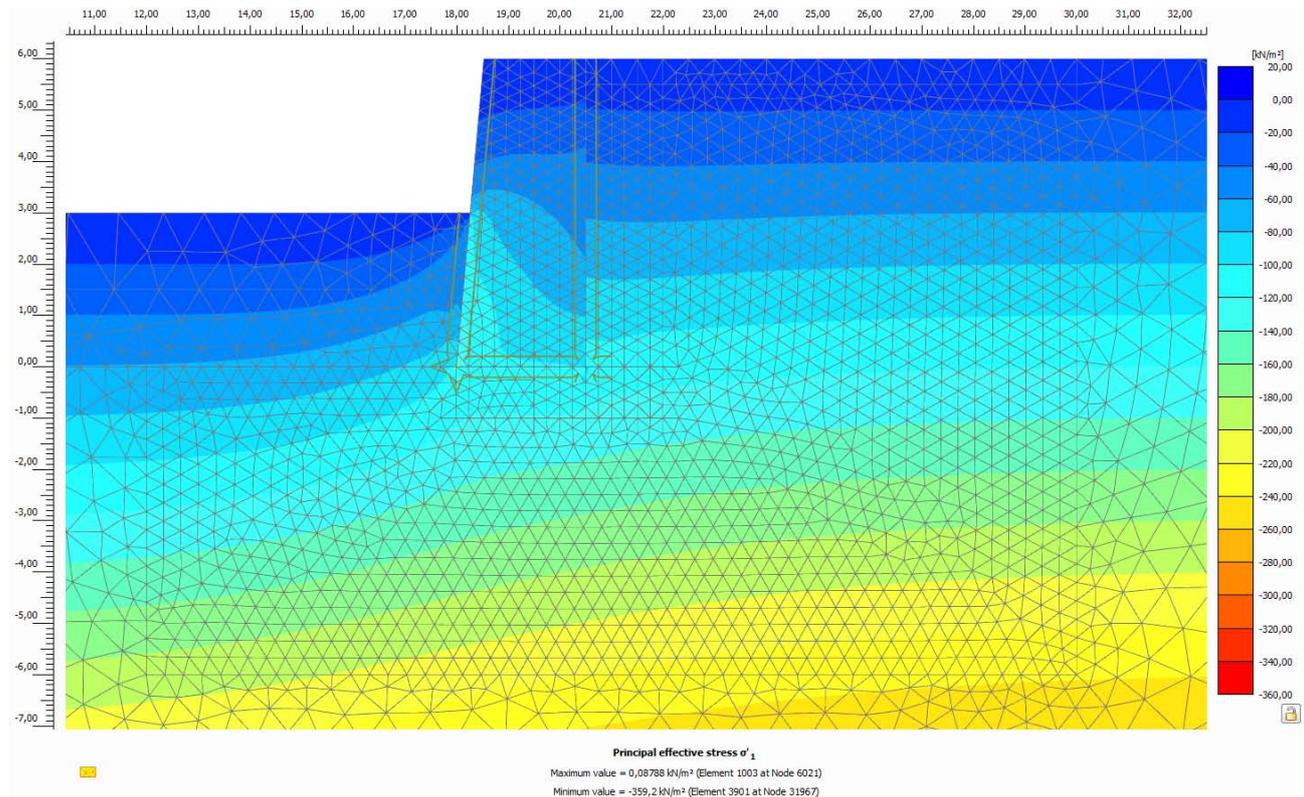
Anhang 40 V2\_2.5 Modell: q ( $\varphi - c$  Reduktion)



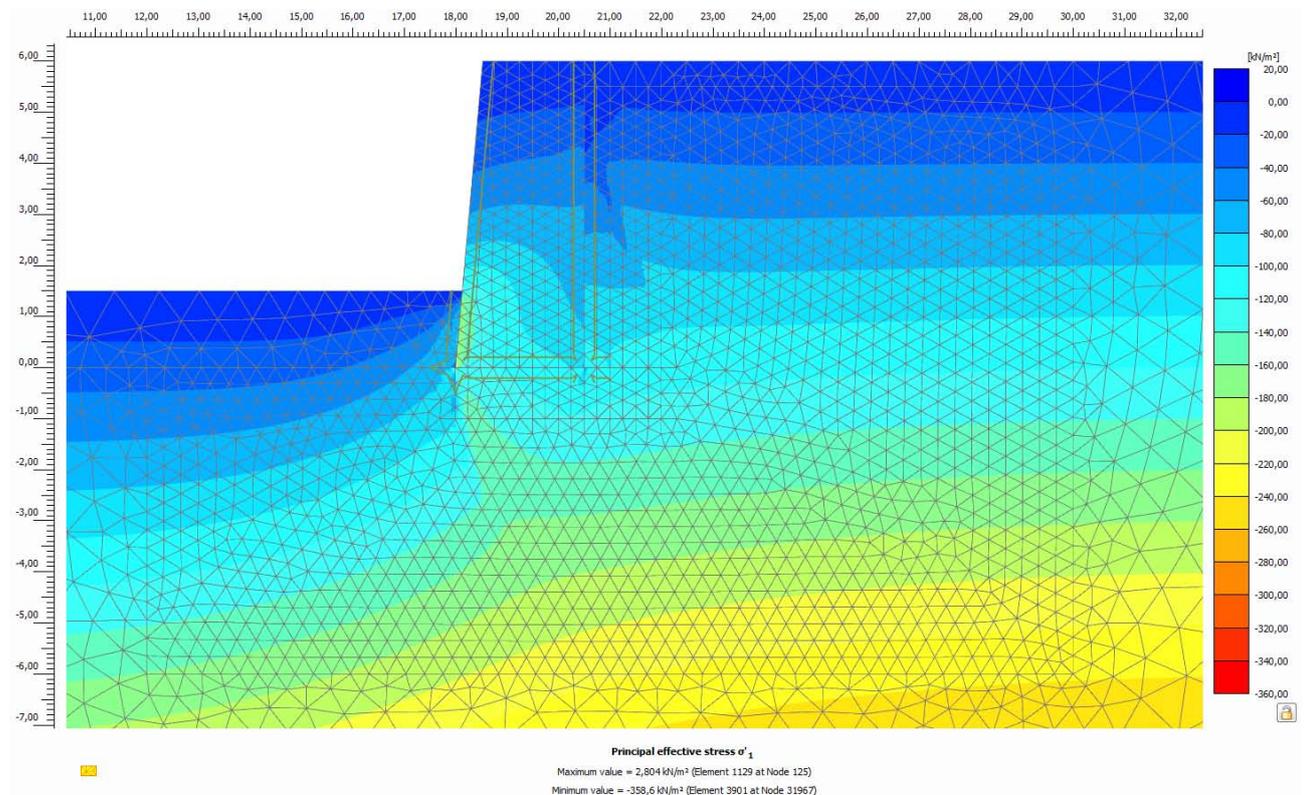
Anhang 41 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_1'$  (Boden und Interface aktivieren)



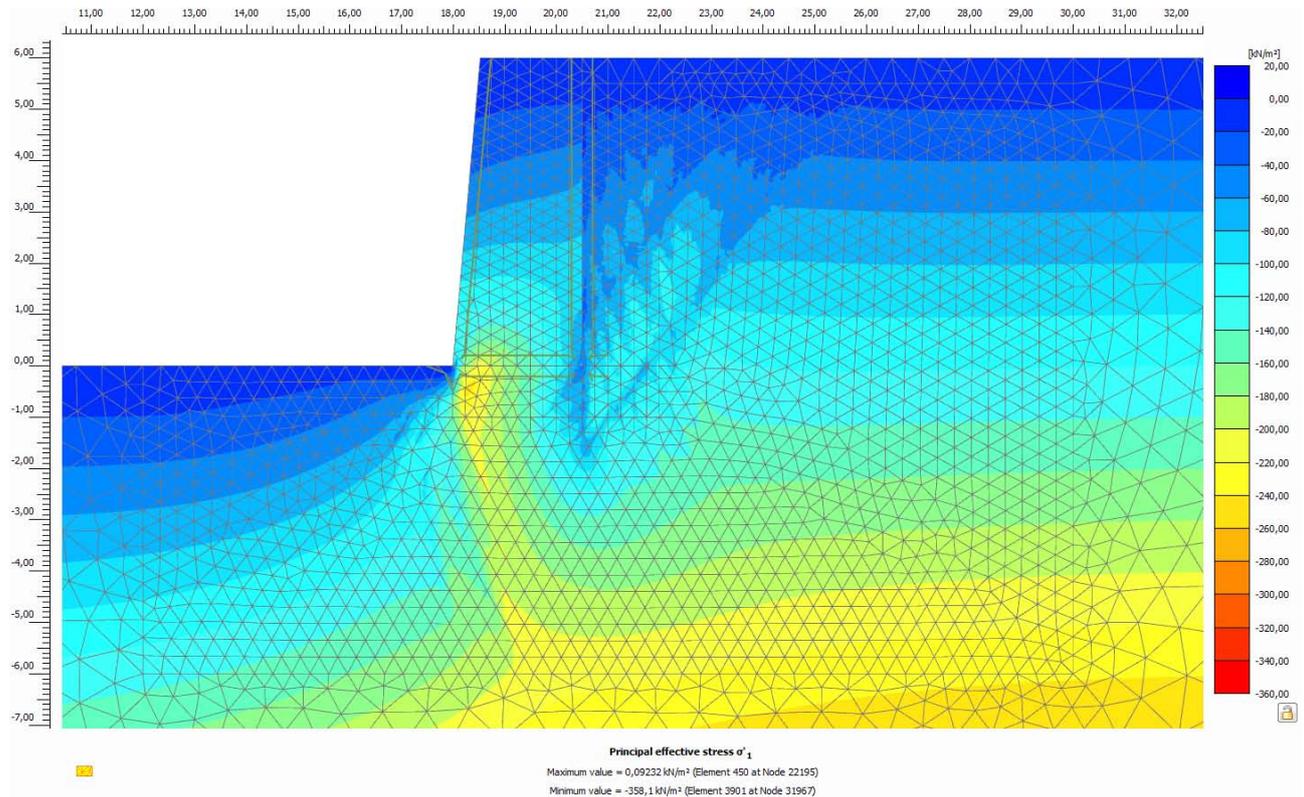
Anhang 42 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_1'$  (1.Aushub)



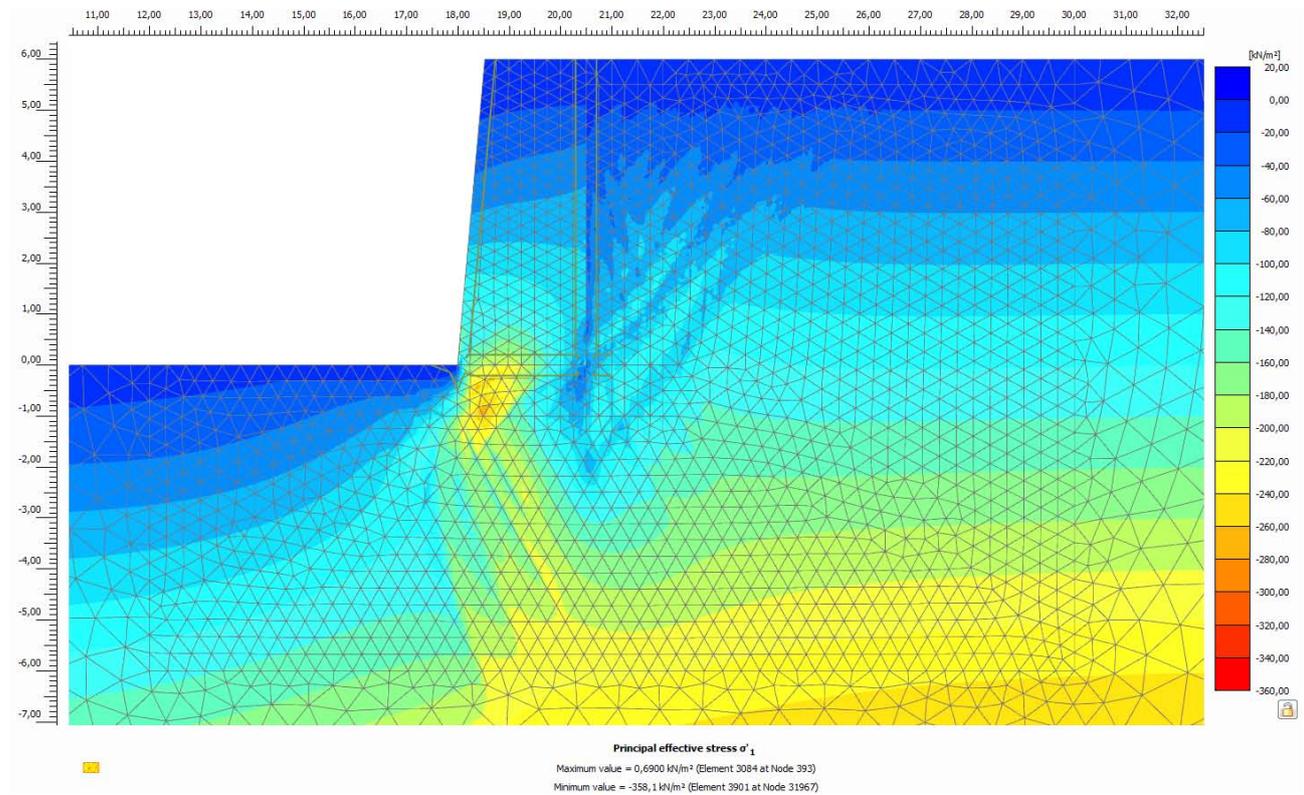
Anhang 43 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_1'$  (2.Aushub)



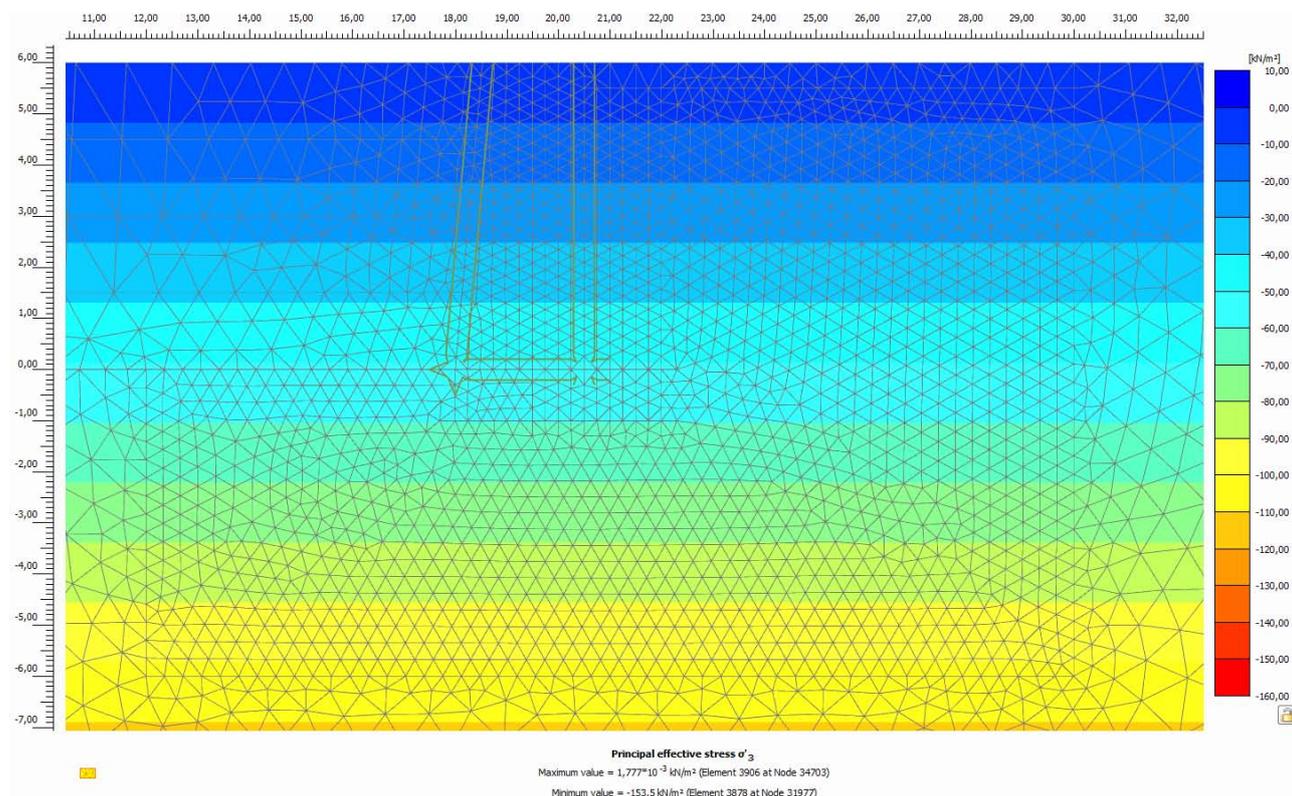
Anhang 44 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_1'$  (3.Aushub)



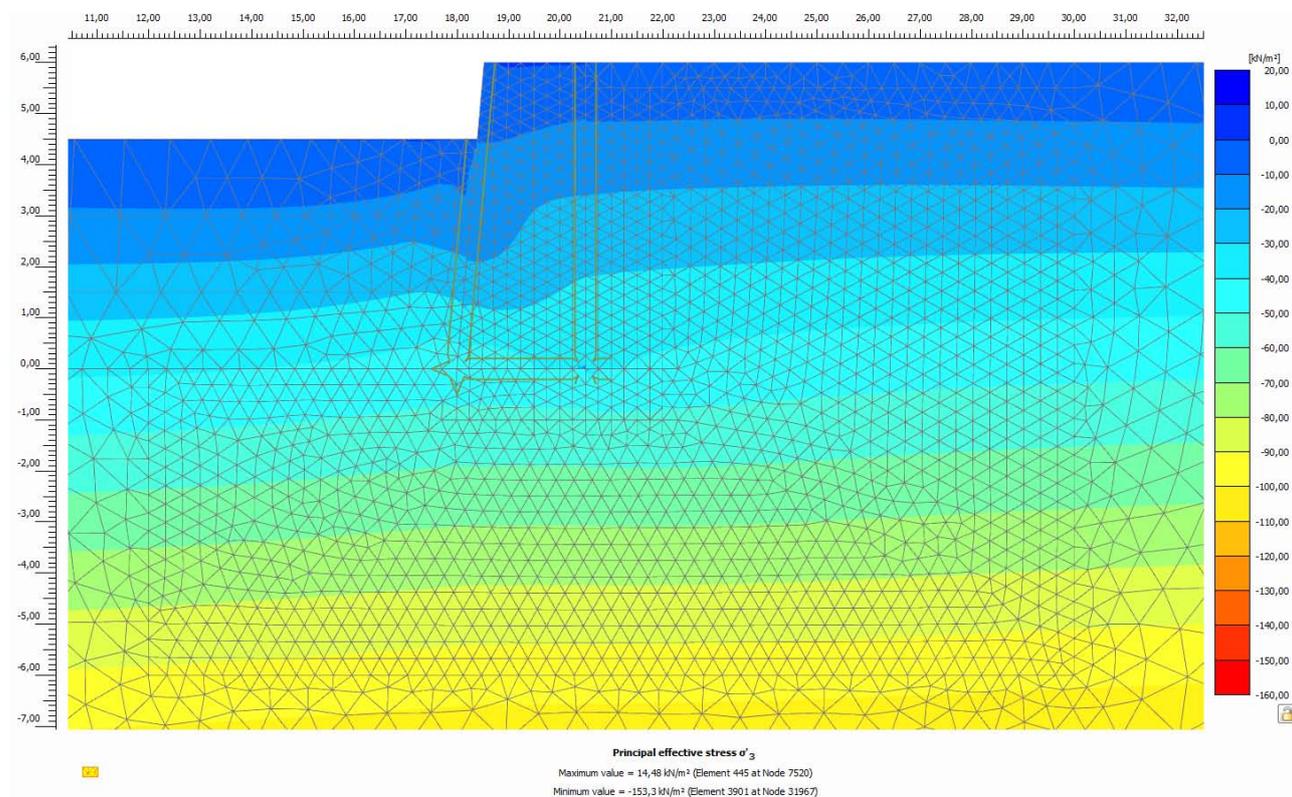
Anhang 45 V2\_2.5 Modell:  $\sigma'_1$  (4.Aushub)



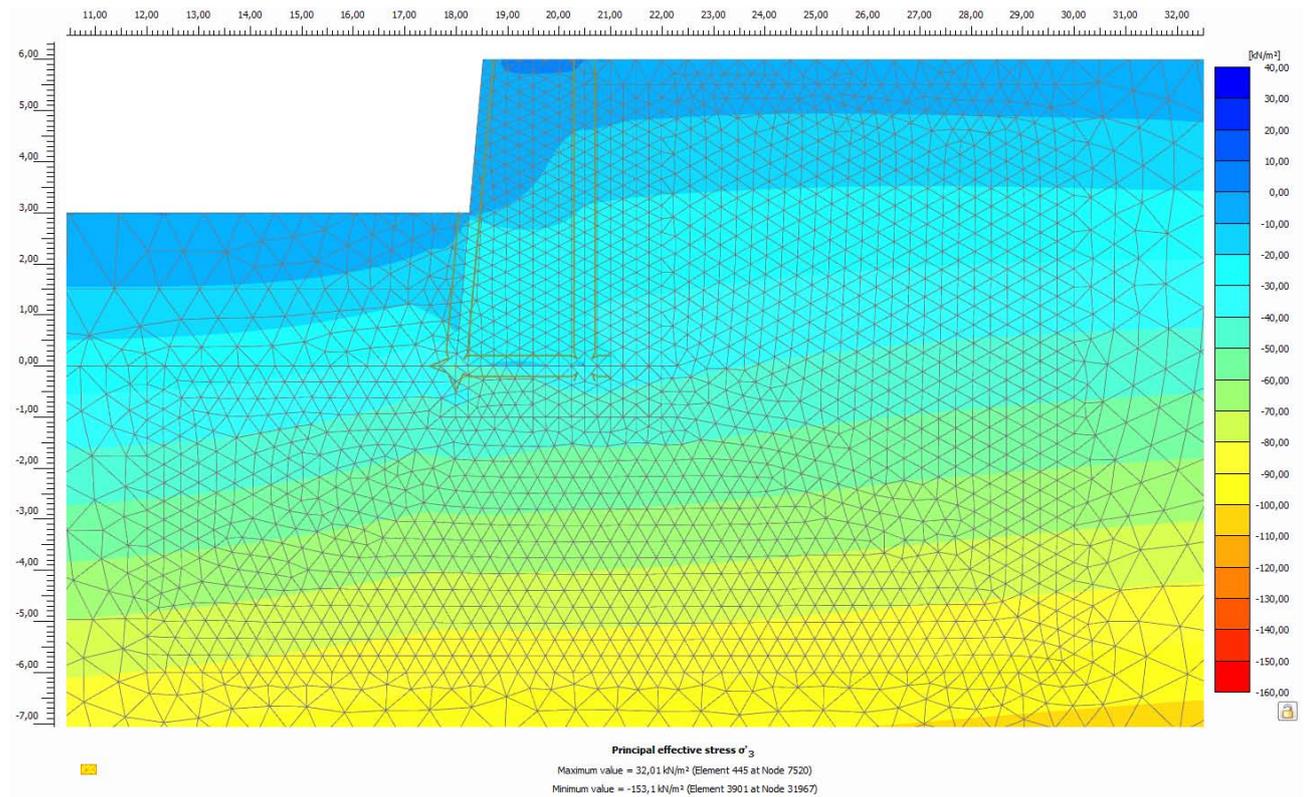
Anhang 46 V2\_2.5 Modell:  $\sigma'_1$  ( $\varphi$  - c Reduktion)



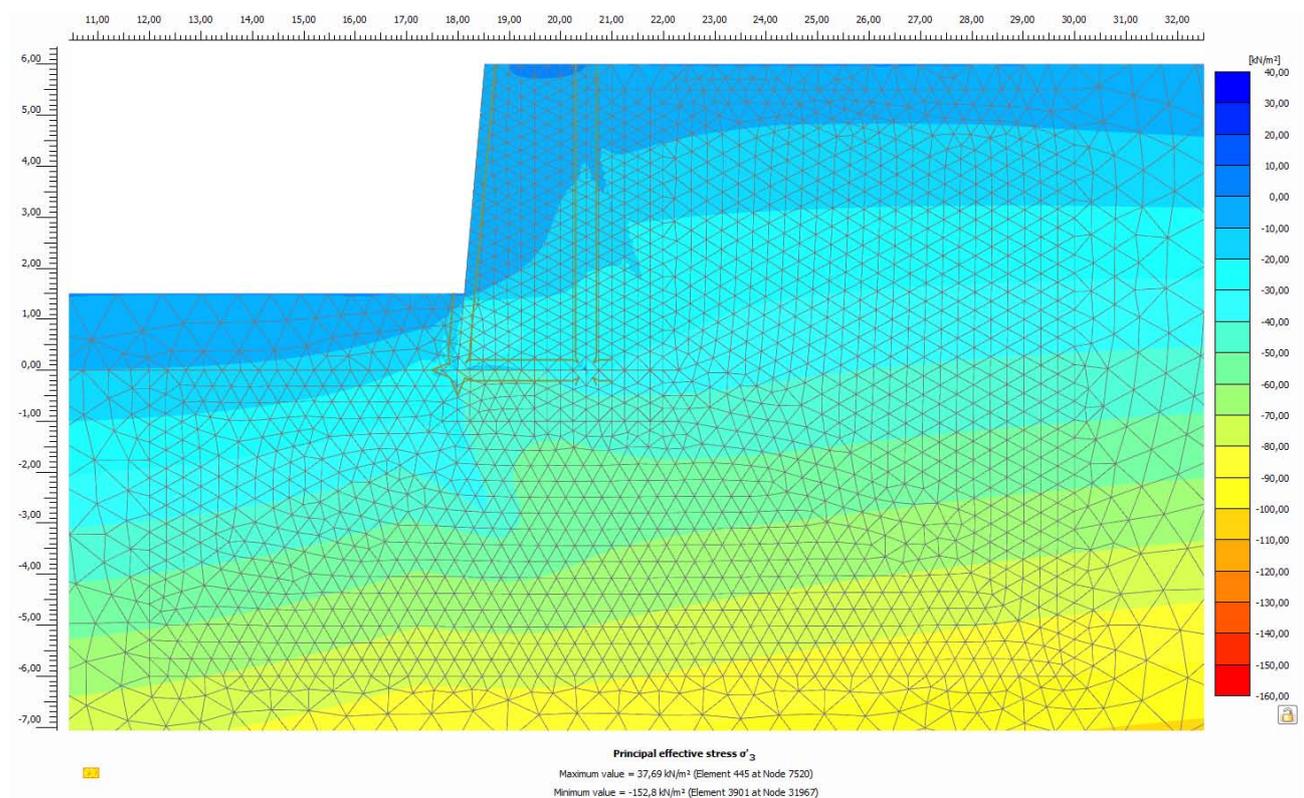
Anhang 47 V2\_2.5 Modell:  $\sigma'_3$  (Boden und Interface aktivieren)



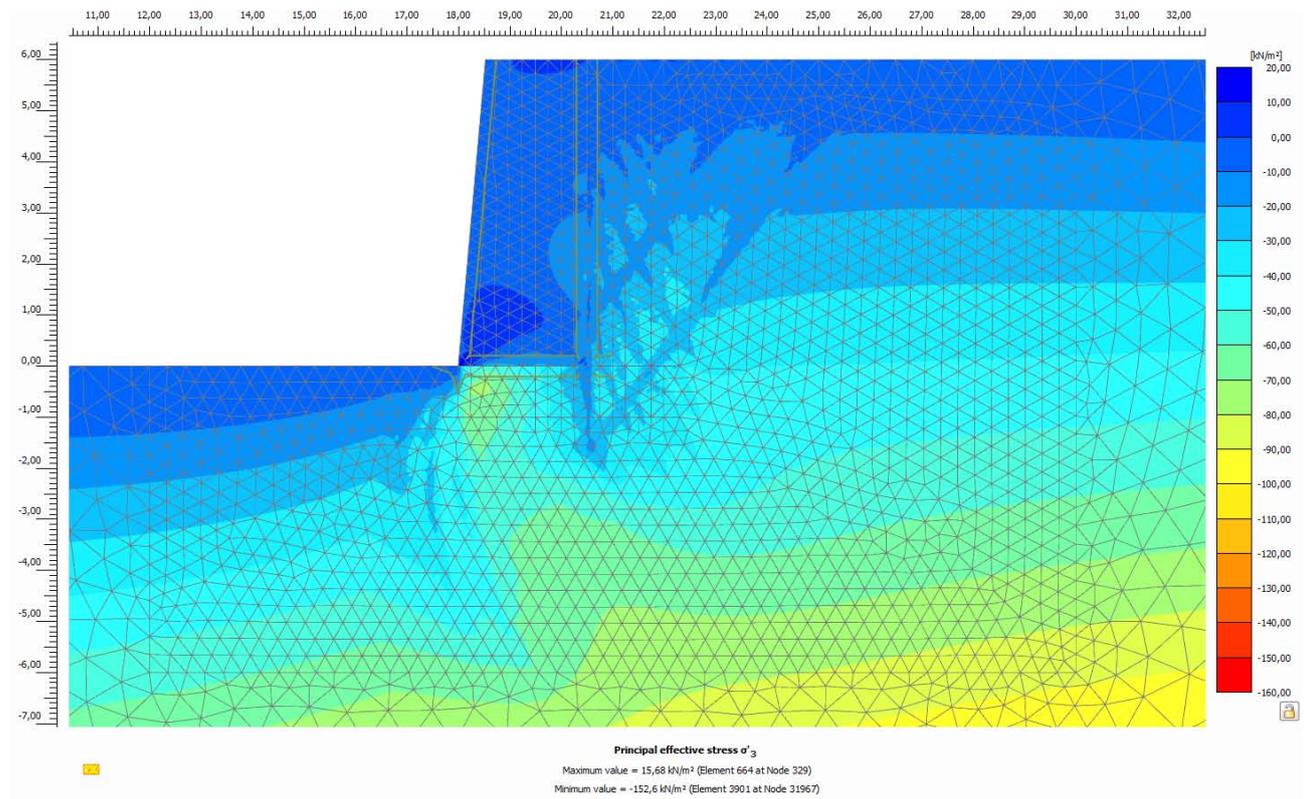
Anhang 48 V2\_2.5 Modell:  $\sigma'_3$  (1.Aushub)



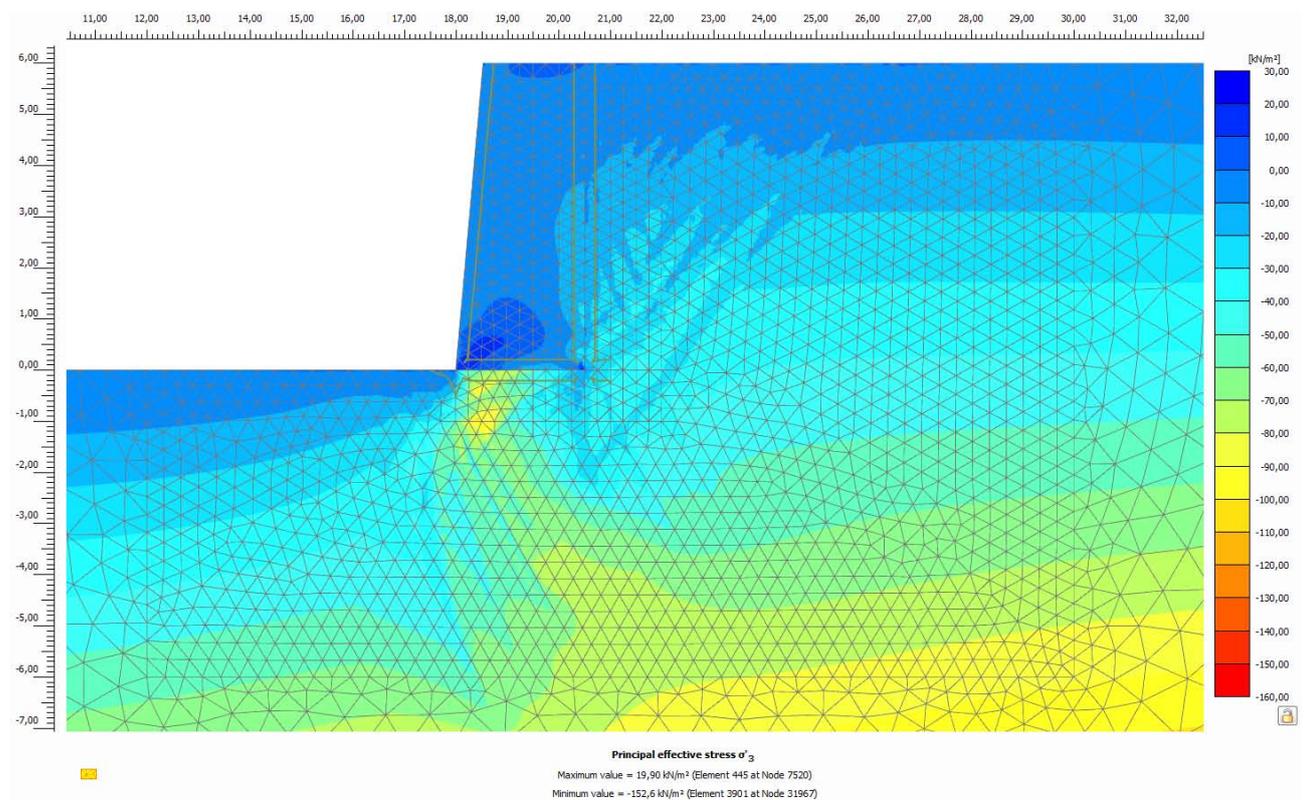
Anhang 49 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_3'$  (2.Aushub)



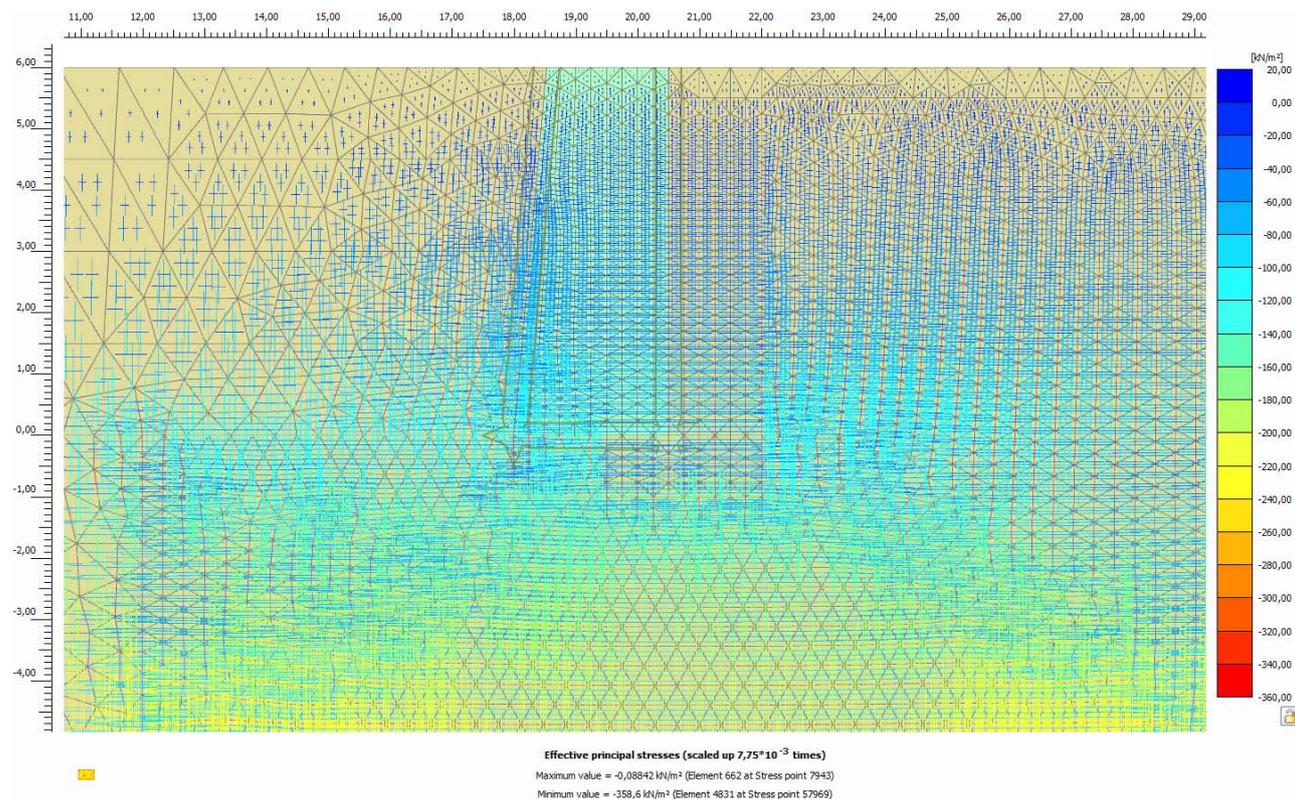
Anhang 50 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_3'$  (3.Aushub)



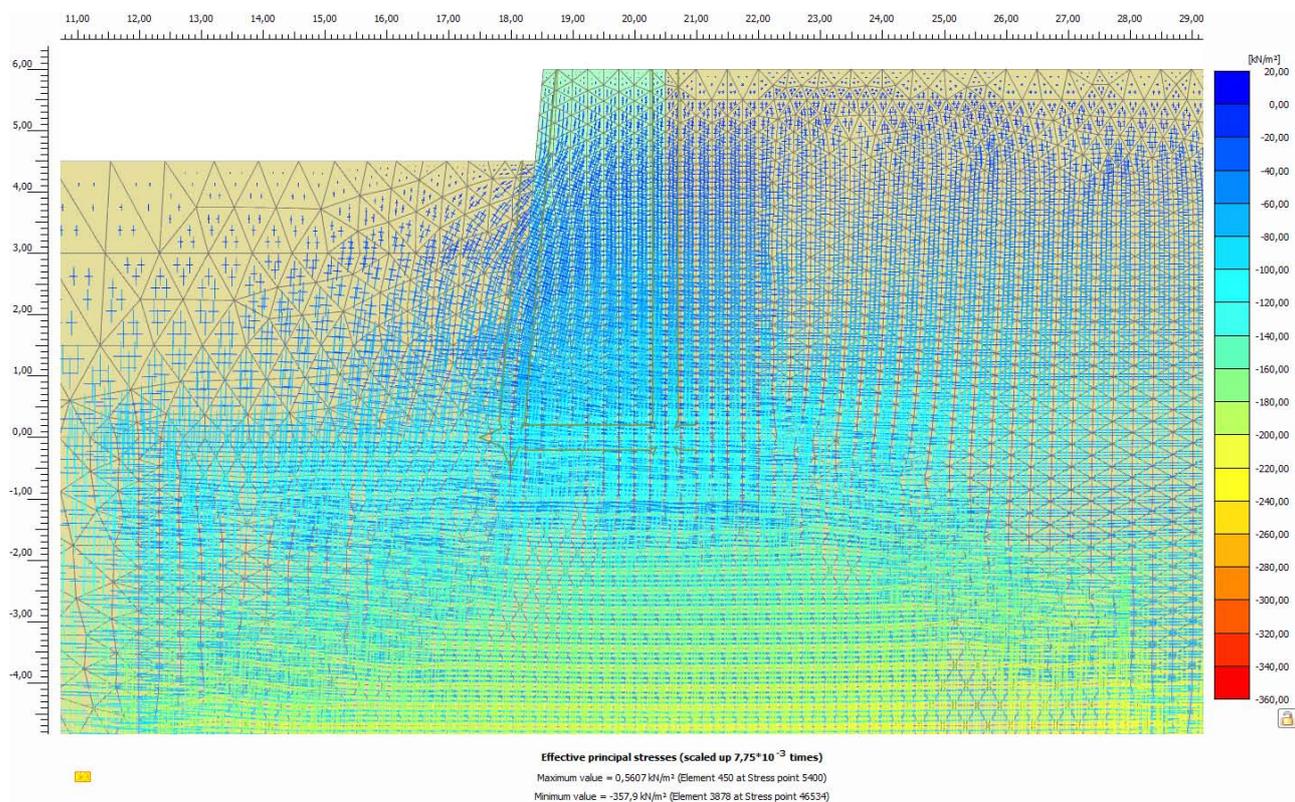
Anhang 51 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_3'$  (4.Aushub)



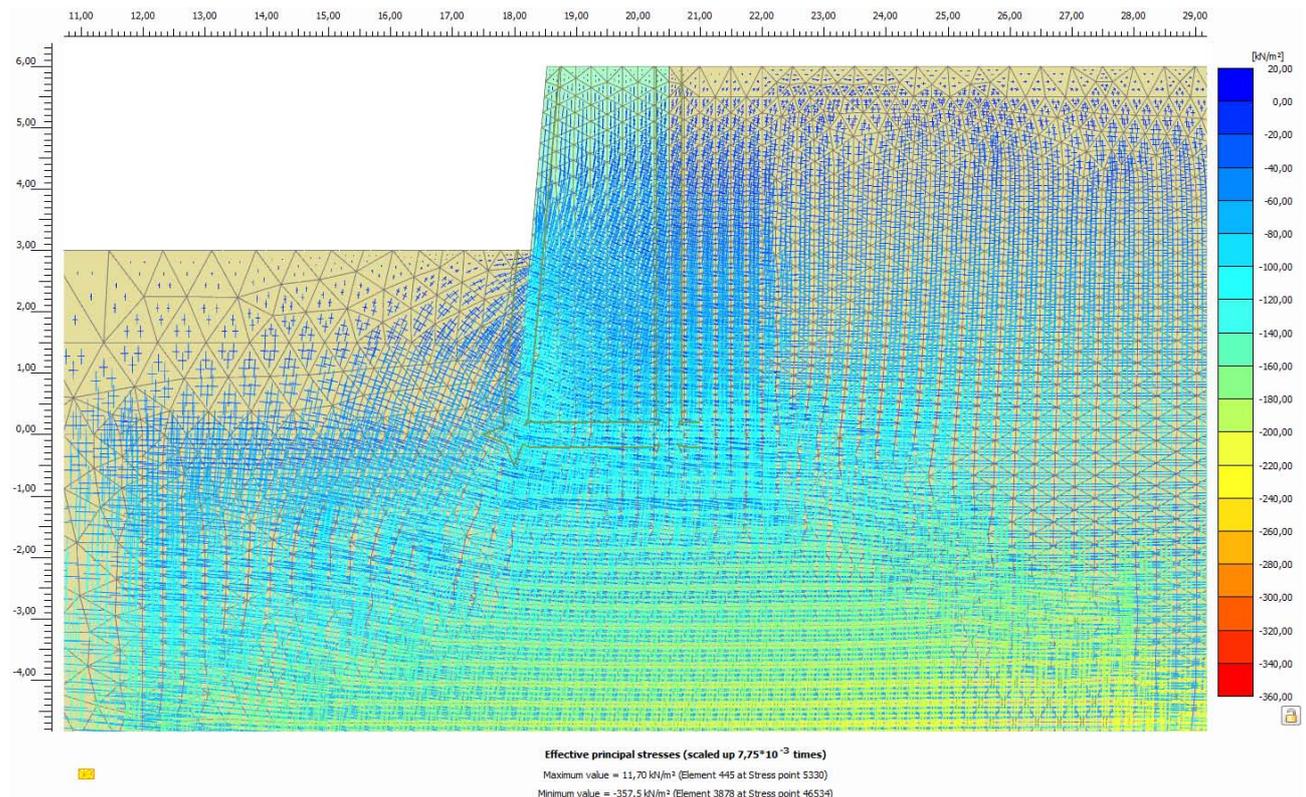
Anhang 52 V2\_2.5 Modell:  $\sigma_3'$  ( $\varphi$  - c Reduktion)



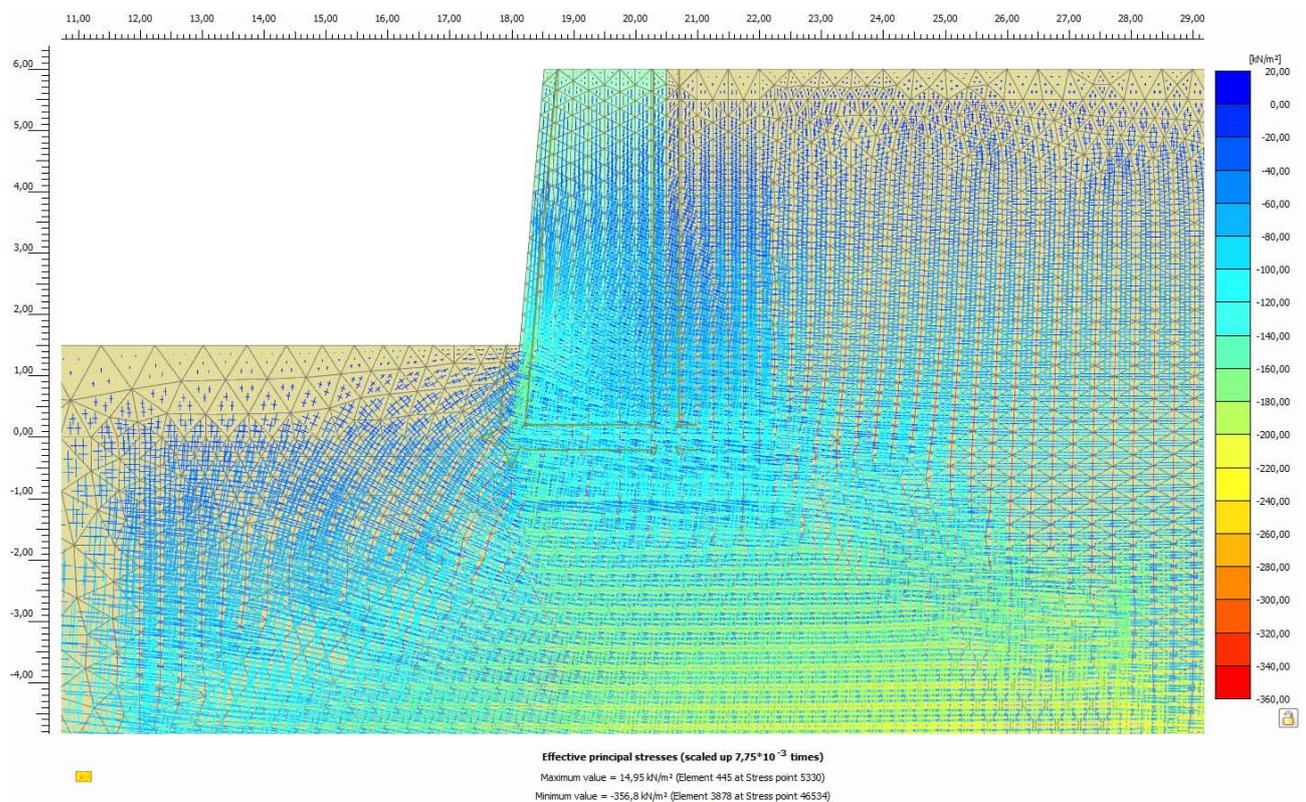
Anhang 53 V2\_2.5 Modell: Spannungstrajektorien (Boden und Interface aktivieren)



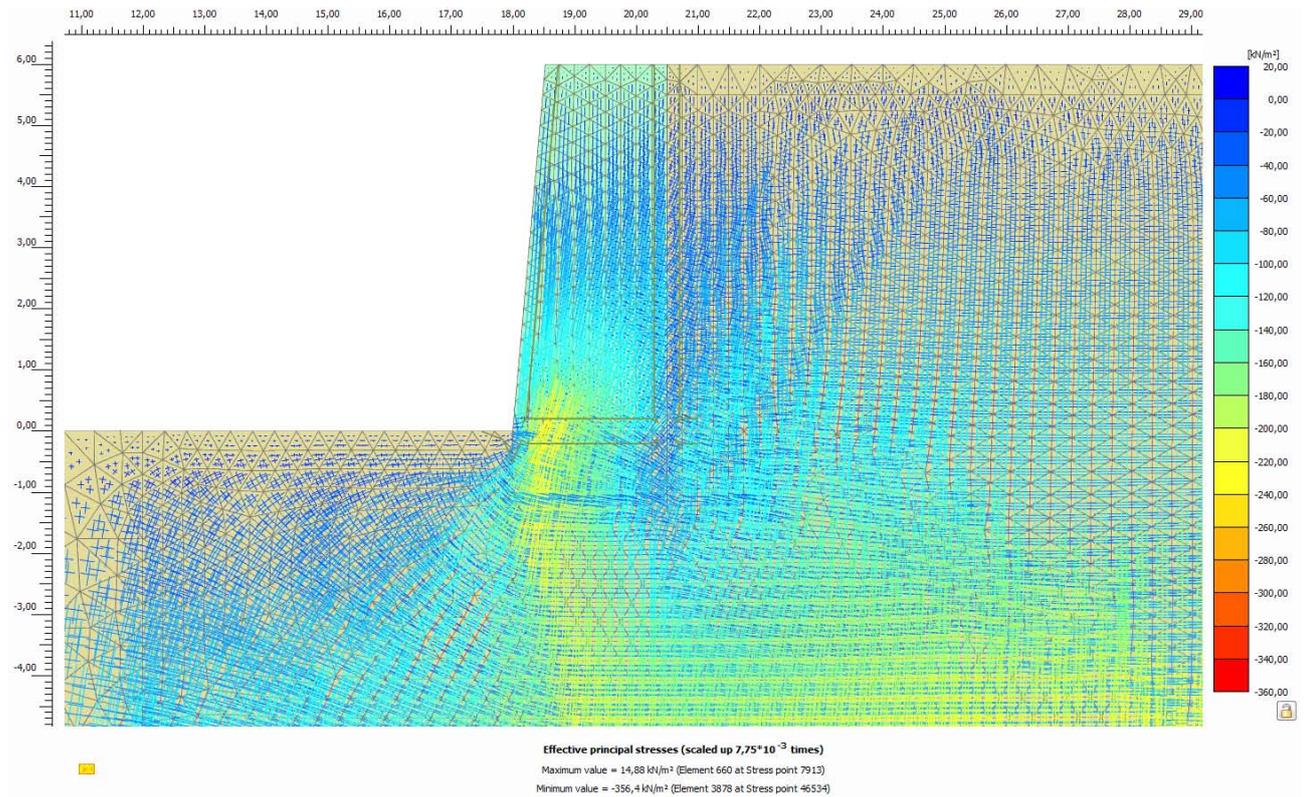
Anhang 54 V2\_2.5 Modell: Spannungstrajektorien (1.Aushub)



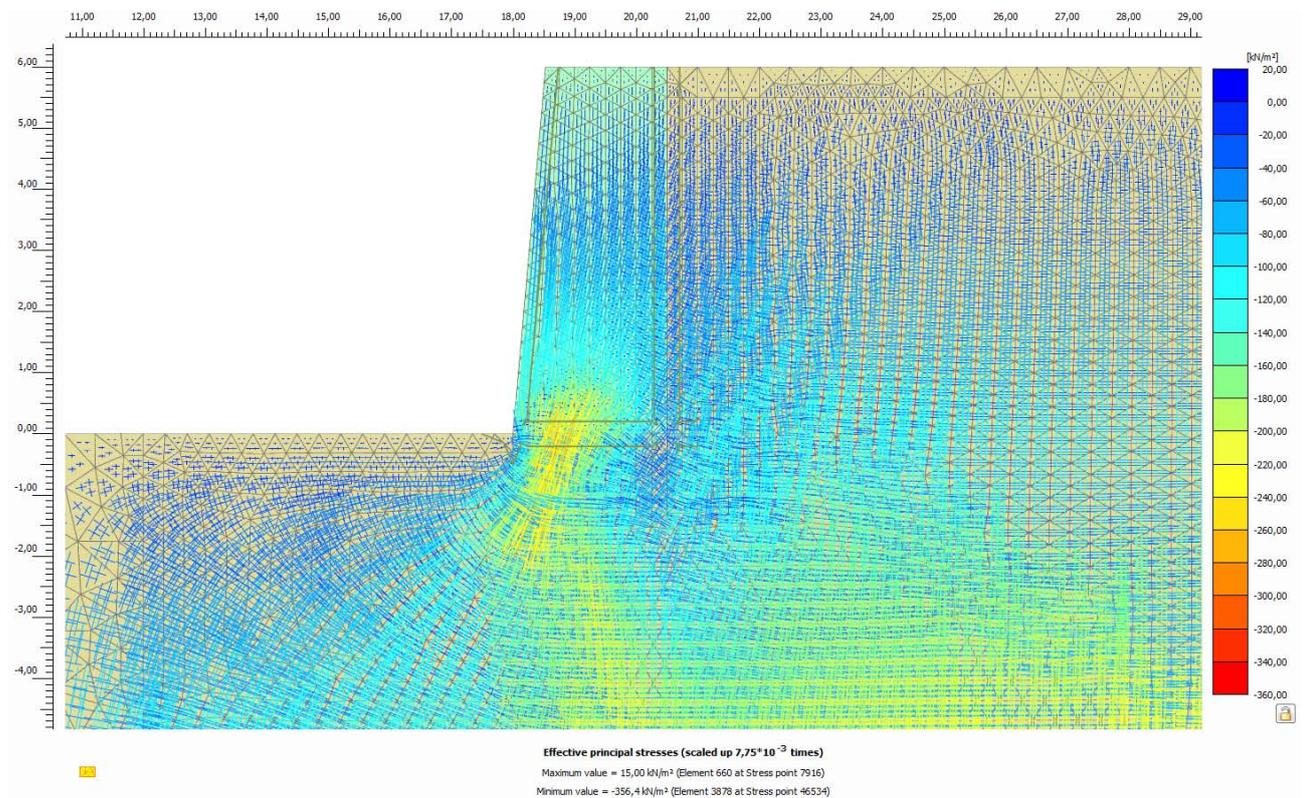
Anhang 55 V2\_2.5 Modell: Spannungstrajektorien (2.Aushub)



Anhang 56 V2\_2.5 Modell: Spannungstrajektorien (3.Aushub)



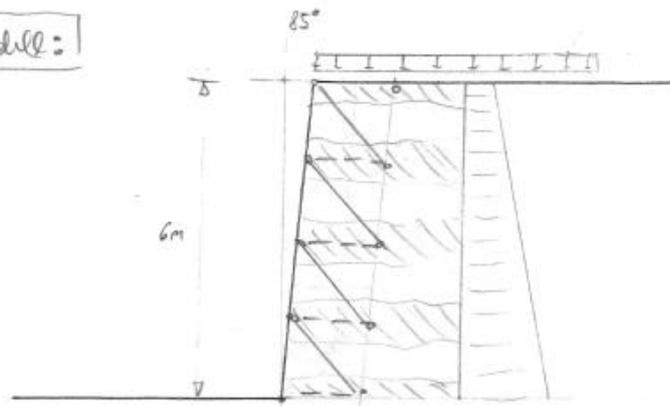
Anhang 57 V2\_2.5 Modell: Spannungstrajektorien (4.Aushub)



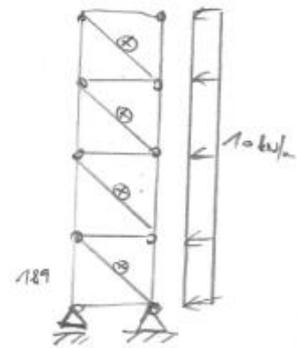
Anhang 58 V2\_2.5 Modell: Spannungstrajektorien ( $\varphi$  - c Reduktion)

1. Modell:

⊖

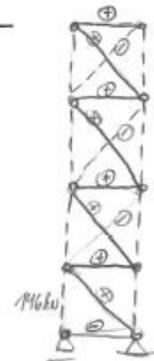
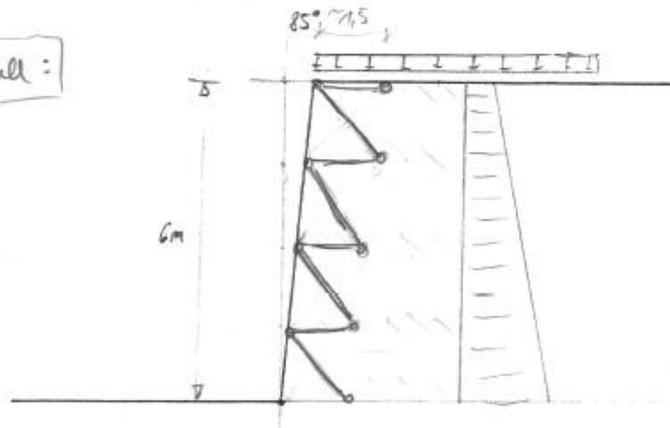


Ruckzeich:



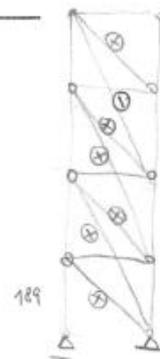
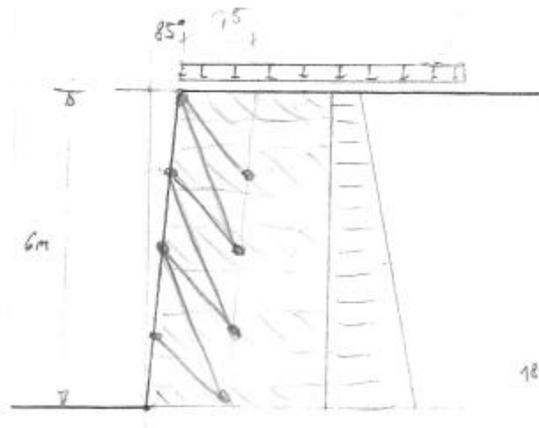
2. Modell:

⊕

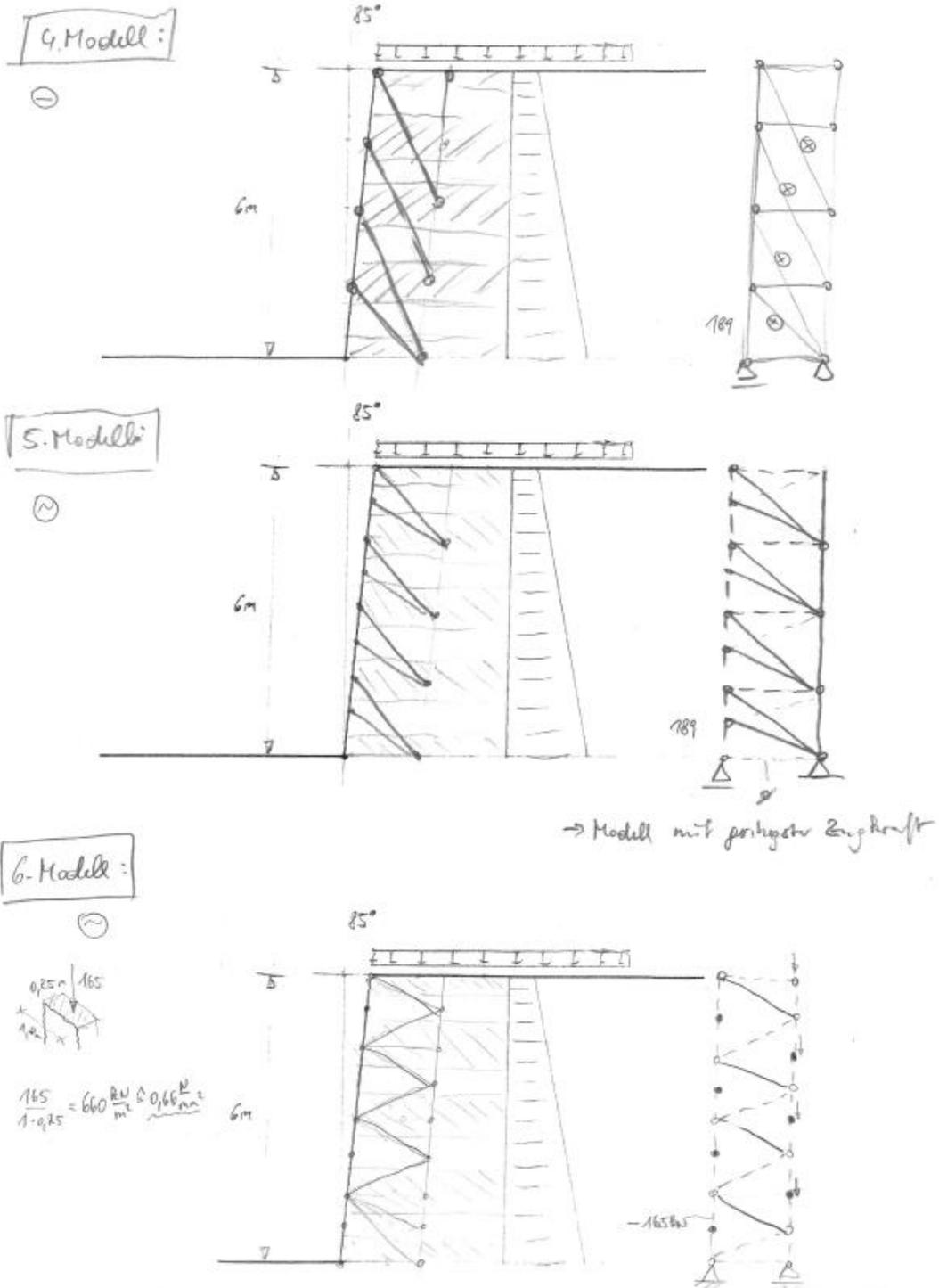


3. Modell:

⊖



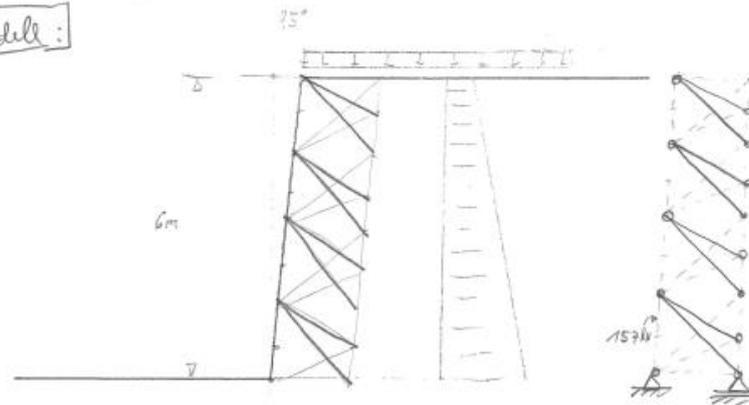
Anhang 59 1. bis 3. Fachwerkmodell (Skizzen)



Anhang 60 4. bis 6. Fachwerkmodell (Skizzen)

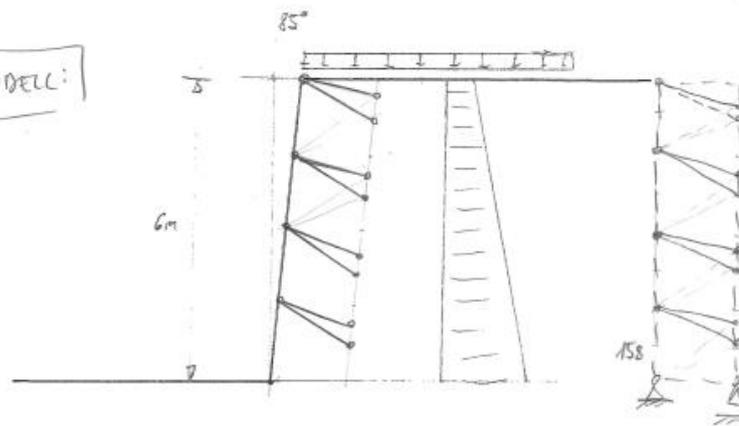
7. Modell:

(+)



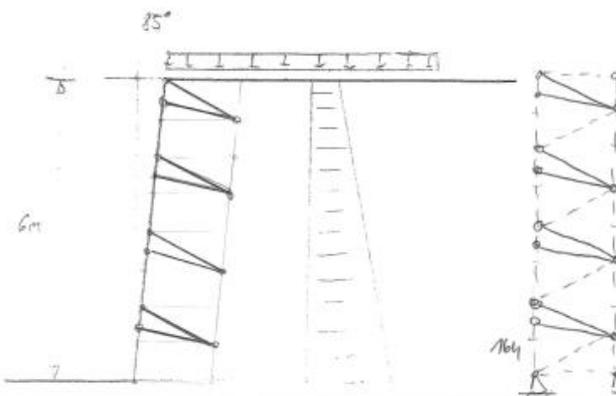
8. Modell:

(-)



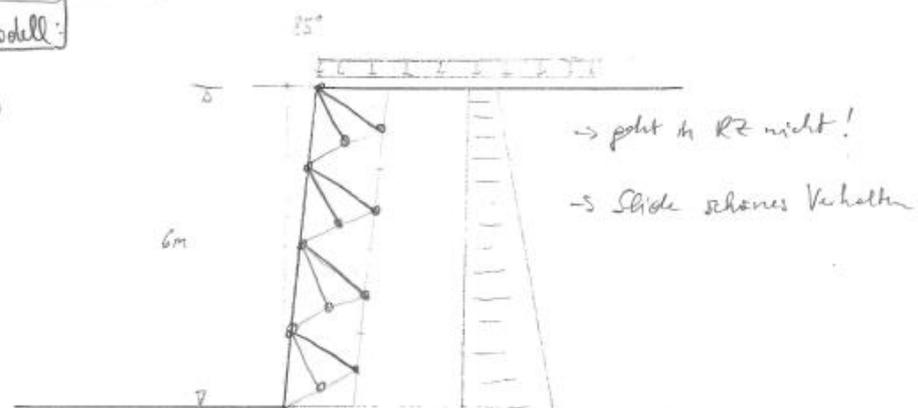
9 Modell:

(~)



10- Modell:

(+)



Anhang 61 4. bis 6. Fachwerkmodell (Skizzen)