



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

**Rückrechnung eines Nagelwand-Großversuches mittels FLAC^{3D} zur
Verifikation von Boden-Nagel Modellen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel
E220, Institut für Geotechnik, TU-Wien

und

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh
E220, Institut für Geotechnik, TU-Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Péter Nagy
Matr. Nr.: 1027008
Gagarin Str. 20
H-9495 Kópháza

Wien, März 2013

.....
Péter Nagy

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
Kurzfassung	5
Abstract	6
1. Bodenvernagelungen	7
1.1. Nagelwände	7
1.1.1. Herstellung von Nagelwänden.....	7
1.1.2. Dimensionierung von vernagelten Wänden.....	9
2. Die Großversuche	15
2.1. Übersicht der Großversuche	15
2.1.1. Wandgeometrien.....	15
2.1.2. Vorversuche zur Bestimmung der Nageltraglast.....	17
2.2. Großversuch B	18
2.2.1. Herstellung der Versuchswand.....	18
2.2.2. Die Belastungsvorrichtung	19
2.2.3. Messprogramm und Messgeber	19
2.2.4. Eigenschaften des Versuchsbodens.....	20
2.2.5. Die Versuchsanordnung, Wandherstellung	22
2.2.6. Versuchsverlauf	22
2.2.7. Die Messergebnisse.....	23
3. FLAC - kontinuumsmechanischer Finite Differenzen Code	25
4. Verwendete Stoffmodelle und Strukturelemente	27
4.1. Verwendete Stoffmodelle	27
4.1.1. Das Mohr-Coulombsche Stoffmodell.....	27
4.1.2. Das Strain-softening Stoffmodell.....	28

4.2.	Modellierung der Nägel.....	29
4.2.1.	Ankerelemente („cable structural elements“)	29
4.2.2.	Pfahlelemente („pile structural elements“)	33
4.3.	Modellierung der Spritzbetonschale.....	34
5.	Modellierung mit FLAC^{3D}	35
5.1.	Ziele der Modellierung.....	35
5.2.	Modellgeometrie.....	37
5.3.	Modellierung der Auflast.....	38
5.4.	Modelle 1A und 1B – Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen, Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen.....	39
5.4.1.	Modelleigenschaften	39
5.4.2.	Die untersuchten Modellvarianten	39
5.4.3.	Versagen der Verbindung zwischen den Bodennägeln und Spritzbetonschale	39
5.4.4.	Modellparameter	40
5.5.	Modell 2 – Bodennägel mit Hilfe von Pfahlelementen, Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen.....	42
5.5.1.	Modelleigenschaften	42
5.5.2.	Modellparameter	42
5.6.	Modell 3 – Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen, Berücksichtigung der Material-Entfestigung.....	44
5.6.1.	Modelleigenschaften	44
5.6.2.	Modellparameter	44
5.7.	Modell 4 – Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen, Spritzbetonschale mit Hilfe von Kontinuumselementen.....	45
5.7.1.	Modelleigenschaften	45
5.7.2.	Modellparameter	46
5.8.	Modell 0 – Keine Spritzbetonschale, Darstellung der Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen	49
5.8.1.	Modelleigenschaften	49
5.8.2.	Modellparameter	49

6. Ergebnisse.....	50
6.1. Ergebnisse bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$	50
6.1.1. Modelle 1A, 2, 3 und 4: Vergleich der Systemzustände.....	50
6.1.2. Modelle 1A, 2, 3 und 4: Vergleich des Verlaufes der Nagelzugkräfte	55
6.1.3. Modell 2: Verlauf der Biegemomente.....	67
6.1.4. Modelle 1A und 1B: Vergleich des Verlaufes der Nagelkräfte.....	69
6.2. Modellergebnisse im Anfangsbruchzustand	70
6.2.1. Das Modell 0	71
6.2.2. Das Modell 1B.....	72
6.2.3. Die Modelle 1A, 2, 3 und 4	74
6.2.4. Verlauf der Nagelkräfte im Anfangsbruchzustand.....	77
7. Interpretation der Ergebnisse.....	83
7.1. Gegenüberstellung der Zug- und Pfahlelemente	83
7.1.1. Angezeigte Nagelkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$	83
7.1.2. Biegebeanspruchung der Bodennägel	83
7.1.3. Modellergebnisse im Anfangsbruchzustand.....	84
7.2. Auswirkung der Verwendung unterschiedlicher Stoffmodelle auf die Modellergebnisse	85
7.2.1. Gegenüberstellung der Modellergebnisse bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$	85
7.2.2. Gegenüberstellung der Modellergebnisse im Anfangsbruchzustand.....	85
7.3. Auswirkung der Spritzbetonschale und der Verbindung zwischen den Bodennägeln und der Spritzbetonschale auf die Modellergebnisse.....	86
7.4. Auswirkung der verschiedenen Schalenmodelle auf die Modellergebnisse.....	87
7.5. Am besten geeignetes numerische Modell.....	87
8. Schlussfolgerungen	90
Quellenangabe	92

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel und Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh bedanken, die immer Zeit für meine Fragen gefunden haben und durch wertvolle Ratschläge mich bei der Entstehung der Diplomarbeit unterstützten.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und meiner Freundin für das Verständnis und Geduld während der Studienzeit.

Kurzfassung

Gäßler (1987) führte im Rahmen seiner Dissertation Großversuche an vernagelten Geländesprüngen durch, untersuchte deren Trag- und Bruchverhalten und entwickelte darauf aufbauend ein Berechnungsverfahren beruhend auf einem Starrkörpermodell.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das bestmögliche Modell für die Darstellung der Bodennägel in FLAC^{3D} durch Rückrechnung der von Gäßler (1987) durchgeführten Großversuche zu finden. Dazu wurden sechs Modelle aufgebaut und die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen des Großversuchs verglichen. In diesen numerischen Modellen wurden einerseits verschiedene Stoffmodelle für den vernagelten Bodenkörper und andererseits verschiedene Strukturelemente für die Modellierung der Bodennägel und der Spritzbetonschale angewendet.

Im Rahmen der Arbeit wurde auch die Problematik der konventionellen analytischen Methoden für die Ermittlung der Sicherheit für Gleitflächen innerhalb des vernagelten Bodenkörpers behandelt. So sind zum Beispiel die anhand des Ansatzes von Gäßler (1987) ermittelten Nagelzugkräfte in den oberen Reihen wesentlich kleiner als die im Großversuch und die in den numerischen Untersuchungen ermittelten Kräfte.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass FLAC^{3D} für die numerische Modellierung von vernagelten Konstruktionen anwendbar ist. Dabei sind in gering kohäsiven Böden das Entfestigungsverhalten des Bodens zu berücksichtigen, die Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen und die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen darzustellen. Das Programm zeigt besonders gute Ergebnisse unter Gebrauchslast und ist daher für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis bestens geeignet, aber bildet auch den Bruchzustand relativ genau ab.

Abstract

Gäßler (1987) executed field tests on soil nail constructions, in order to investigate the structural behaviour and failure mechanism of soil nail constructions. He also developed an analytical design method for soil nail constructions based on the field tests.

The objective of the present diploma thesis was to find the best model for the soil nails in FLAC^{3D} by the simulation of the field tests by Gäßler (1987). Six numerical models were set up for this purpose. The results of the numerical models were compared with the results of the field tests. Different material models were used for the reinforced ground and different structural elements for the nails and the shotcrete lining in the six models, in order to find the best way of simulating the field tests.

In the present diploma thesis the problem of the conventional analytical design methods of soil nail constructions is discussed. For example the upper nail forces gained by means of Gäßler's (1987) analytical method are much lower than the forces in the field tests and in the numerical models.

Summing up the studies showed that FLAC^{3D} is suitable to model soil nail constructions. Thereby in soils with low cohesion the softening of the soil has to be considered, the soil nails have to be simulated using cable structural elements and the shotcrete lining has to be simulated using shell structural elements. The program presents especially good results under service loads, it can therefore be applied for a serviceability state design. The failure state of the soil nail construction can be identified as relatively close to the field tests.

1. Bodenvernagelungen

Bei der Bodenvernagelung werden in der Regel Stahl- oder Kunststoffstäbe („Nägel“) eingebaut. Ziel ist die Erhöhung der Standsicherheit einer Böschung im Lockergestein (im Folgenden wird dafür der Begriff Boden verwendet, weil auch im Bereich der Vernagelungen der Begriff Boden eingebürgert ist). Die Vernagelung ist einerseits eine Verdübelung, weil sie Querkräfte und Biegemomente aufnimmt, andererseits eine Zugbewehrung. (Brandl, 2001)

1.1. Nagelwände

Nagelwände stellen eine der meisten angewandten Formen der Bodenvernagelung dar. Unter einer Nagelwand versteht man einen Verbundkörper, der aus dem anstehenden Boden oder Fels, der Bewehrung (Nägeln) und einer Außenhaut an der Geländeoberfläche besteht. (Brandl, 2001)

Nagelwände erhalten in der Regel eine Außenhaut, die mit den Nägeln kraftschlüssig verbunden wird. Die Außenhaut wird meistens aus bewehrtem Spritzbeton hergestellt, aber Ortbeton, Fertigteile oder Gabione kommen zur Anwendung. Bei entsprechenden Baugrundverhältnissen - vor allem bei Felsböschungen - kann die Außenhaut sogar entfallen.

Bei der Bodenvernagelung wird der Boden selbst zur Sicherung des Geländesprunges herangezogen. Durch die Bodennägel, die mit ihrer nahezu horizontalen Anordnung günstig zur Hauptdehnungsrichtung von Geländesprüngen liegen, werden die Scherfestigkeit, die Zugfestigkeit und die Steifigkeiten des Bodens anisotrop erhöht.

Nagelwände werden nicht nur zur Sicherung von instabilen Hängen, Hanganschnitten oder Dammböschungen, sondern auch für Baugrubenwände, oder sogar zur Verstärkung alter Stützmauern verwendet. (Schmoltzik, 2001)

1.1.1. Herstellung von Nagelwänden

Vernagelte Wände oder vernagelte Böschungen werden nach folgendem Arbeitsschema hergestellt:

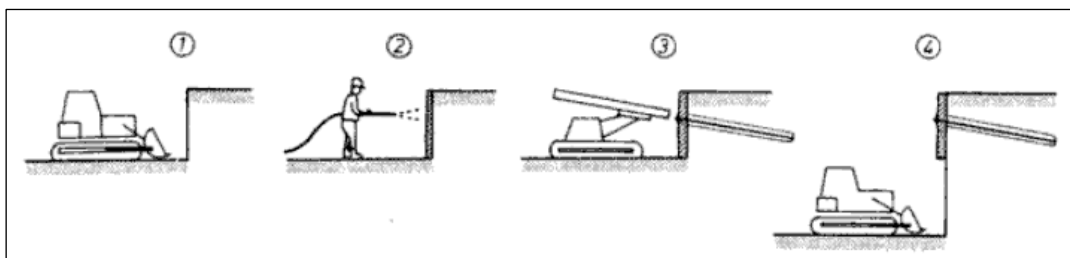


Abbildung 1: Herstellung einer vernagelten Wand (aus Schmoltzik, 2001)

1. Aushub in Lagen von etwa 1,0 bis 1,5 m Tiefe je nach Kurzstandfestigkeit des Bodens oder Rutschgefährdung des Hanges.
2. Sicherung der freien Wandfläche mit bewehrtem Spritzbeton
3. Einbringen der Nägel unter geringer Neigung zur Horizontalen in den Boden mit schubfestem Verbund auf ganzer Länge durch Zementmörtel.
4. Weiterer Abtrag

Die freigelegte Wandfläche wird rasch mit Spritzbeton gesichert. Die Dicke der Spritzbetonschicht beträgt bei Kurzzeitvernagelungen 10-15 cm, bei Dauervernagelungen 15-25 cm. Bei der Bewehrung der Spritzbetonschale werden in der Regel Baustahlmatten angewendet, aber anstelle eines mit Baustahlmatten bewehrten Spritzbetons kann auch Faserspritzbeton verwendet werden. Zur Vermeidung unerwünschter Wasserdrücke an die Spritzbetonschale muss diese eine entsprechende Anzahl von Drainageöffnungen erhalten.

Bei Dauerbauwerken hat es sich oft bewährt, anstelle des Spritzbetons normalen Ortbeton zu verwenden, dessen Ansichtsfläche aus ästhetischen Gründen abgeschalt wird. (Schmoltzik, 2001)

Die Nägel bestehen in den meisten Fällen aus Betonrippenstahl, Stabstahl mit aufgerolltem Gewinde (GEWI-Stahl) oder es werden Dywidag Bodennägel verwendet mit Durchmessern von 16 bis 63,5 mm (meist 20 bis 32 mm). Die Vernagelungsdichte beträgt in der Regel zwischen 0,5 und 1 Nagel pro m².

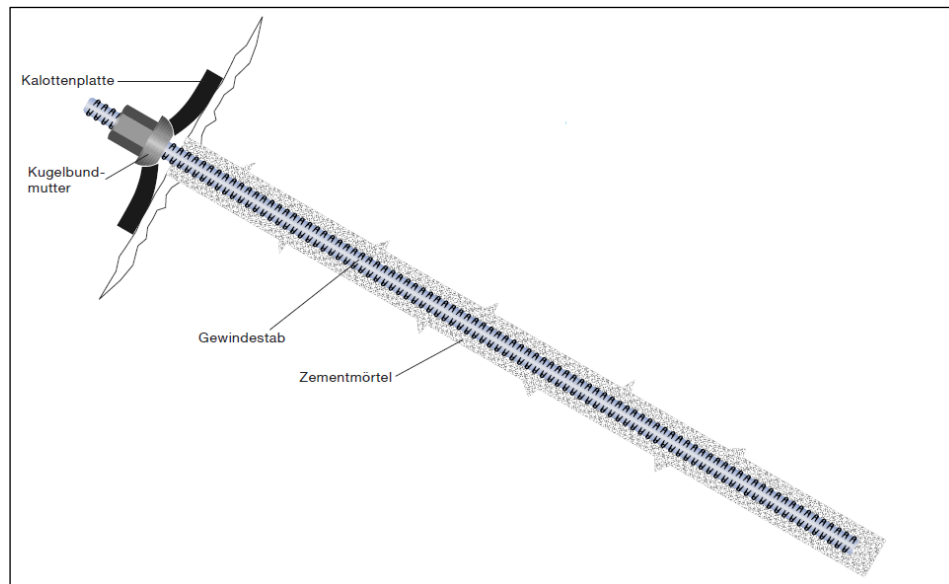


Abbildung 2: Dywidag Bodennagel (aus Dywidag, 2012)

Die Bodennägel werden in der Regel nach dem Erhärten des Spritzbetons in den Boden eingebracht. Dies kann durch Bohren, Rammen, Spülen, Vibration oder Hineinschieben erfolgen, wobei das Bohren überwiegt. (Schmoltzik, 2001)

Zur Gewährleistung eines ausreichenden Verbundes zwischen Boden und Nagel wird der durch die Bohrung entstandene Raum mit Zementmörtel gefüllt oder verpresst und der Nagel eingebracht. Nach dem Erhärten des Zementmörtels ist der Nagelkopf mit der Spritzbetonhaut kraftschlüssig, aber ohne Vorspannung zu verbinden. Unmittelbar darauf kann eine neue Lage ausgehoben werden.

1.1.2. Dimensionierung von vernagelten Wänden

Die Bodenvernagelung und die vernagelten Wände werden in den folgenden Regelwerken behandelt:

- ÖNORM EN 1997-1, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1 Allgemeine Regeln
- ÖNORM B 1997-1, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen
- ÖNORM EN 14490, Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bodenvernagelung

In der ÖNORM EN 1997-1 und in der ÖNORM B 1997-1 werden keine Vorschriften für die Dimensionierung von vernagelten Wänden angegeben. Der Anhang B der ÖNORM EN 14490 enthält Empfehlungen betreffend die Dimensionierung.

Danach werden bei der Dimensionierung von vernagelten Wänden in der Regel die folgenden Nachweise der inneren und äußeren Standsicherheit geführt:

- Nachweis für Geländebruch unter Betrachtung der maßgebenden Gleitfläche inner- und außerhalb des vernagelten Bodenkörpers. (siehe Abbildung 3)
- Gleitnachweis, Kippnachweis und Nachweis der zulässigen Sohldruckspannungen, wobei der vernagelte Bodenkörper als Gewichtsmauer betrachtet wird.
- Bestimmung der erforderlichen Vernagelungsdichte und Nagellänge.
- Nach der Ermittlung der maßgebenden Nagelzugkräfte, Bestimmung des erforderlichen Nageldurchmessers.
- Falls erforderlich:
 - Bemessung der Spritzbetonwand (eventuell Ortbetonwand).
 - Durchstanznachweis an der Kopfplatte.

Bei der Nachweisführung müssen auch die Bauzustände während der Wandherstellung untersucht werden.

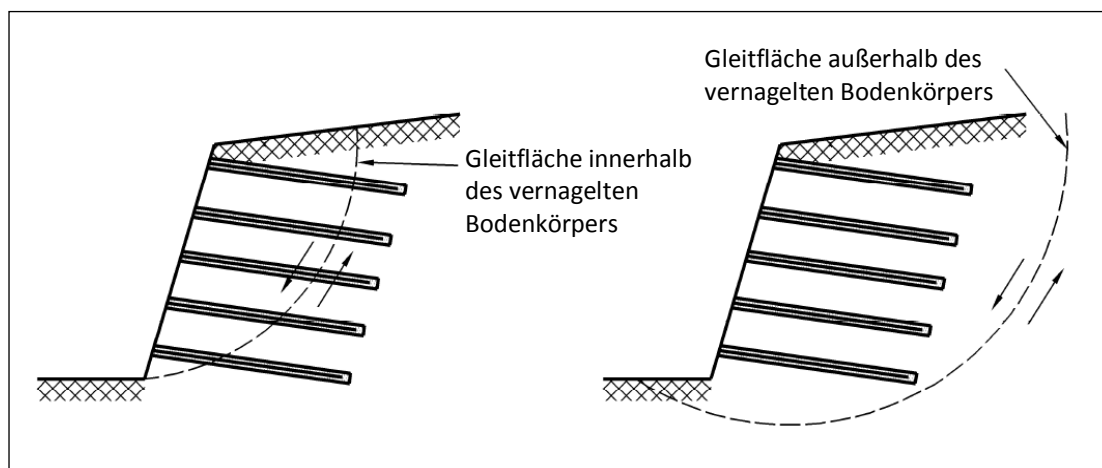


Abbildung 3: Geländebrech, mit Gleitflächen inner- und außerhalb des vernagelten Bodenkörpers (aus EN 14490)

Die Ermittlung der Sicherheit für eine Gleitfläche außerhalb des vernagelten Bodenkörpers kann mit Hilfe der konventionellen Gleichgewichtsbetrachtungen an Starrkörper-Bruchmechanismen erfolgen.

Die Ermittlung des Sicherheitsfaktors für eine Gleitfläche innerhalb des vernagelten Bodenkörpers ist mit Hilfe der konventionellen Methoden nicht möglich. Um die Nagelzugkräfte bei der Ermittlung der Sicherheit berücksichtigen zu können, wurden gewisse konventionelle Methoden erweitert bzw. neue Ansätze entwickelt.

Die Dimensionierung der vernagelten Wände erfolgt in der Regel mit Hilfe von analytischen Berechnungsprogrammen. Die Sicherheit für Gleitflächen außerhalb des vernagelten Bodenkörpers wird mit Hilfe von Gleichgewichtsbetrachtungen an Starrkörper-Bruchmechanismen bestimmt.

Für die Dimensionierung von Nagelwänden werden auch numerische Berechnungsmethoden verwendet. Finite Elemente Programme, wie zum Beispiel das Programm Plaxis, und Finite Differenzen Programme, wie zum Beispiel FLAC oder FLAC^{3D}, sind für die numerische Berechnung von vernagelten Wänden geeignet.

1.1.2.1. Analytische Methoden für die Ermittlung der Sicherheit für Gleitflächen innerhalb des vernagelten Bodenkörpers

Für die Standsicherheitsnachweise von vernagelten Wänden werden meistens die erweiterten Verfahren nach Bishop (Kolymbas & Renk, 2011), Janbu (Kolymbas & Renk, 2011) und der Ansatz nach Gäßler (1987) verwendet.

- **Erweitertes Verfahren nach Bishop (nach Kolymbas & Renk, 2011)**

Der Ansatz geht von der Ausbildung einer kreisförmigen Gleitfläche im Bruchzustand aus. Der Bruchkörper wird in Lamellen unterteilt. Unter Vernachlässigung der vertikalen Lamellenzwischenkräfte werden die horizontalen Lamellenzwischenkräfte ermittelt.

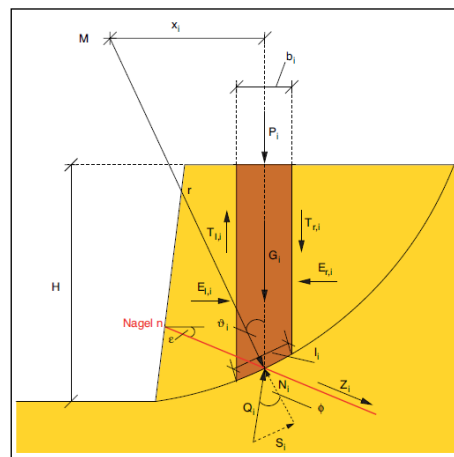


Abbildung 4: Lamelle mit den angreifenden Kräften mit Berücksichtigung der Nägel nach Bishop (aus Kolymbas & Renk, 2011)

Die Sicherheit für das Gesamtsystem ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht der horizontalen Lamellenzwischenkräfte um den Punkt M . Die minimale Sicherheit ergibt sich durch die Variation des Gleitkreises.

- **Erweitertes Verfahren nach Janbu (nach Kolymbas & Renk, 2011)**

Der Ansatz basiert auf einem Translationsmechanismus. Der Versagen findet entlang einer polygonalen Gleitfläche statt. Der Bruchkörper wird in Lamellen unterteilt.

Die Sicherheit für das Gesamtsystem ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht in der horizontalen Richtung ohne die Berücksichtigung der vertikalen Kräfte. Die minimale Sicherheit ergibt sich durch die Variation des Bruchkörpers.

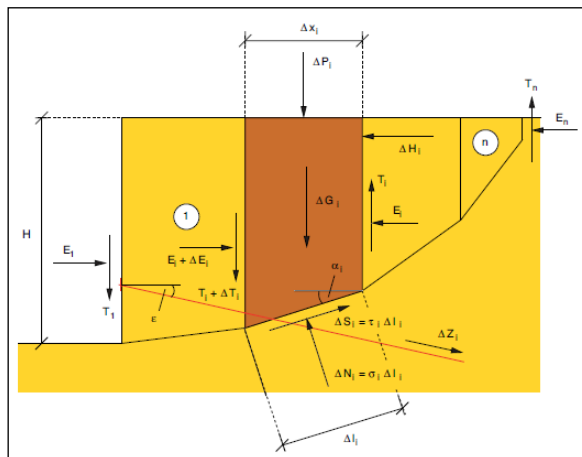


Abbildung 5: Lamelle mit den angreifenden Kräften mit Berücksichtigung der Nägel nach Janbu (aus Kolymbas & Renk, 2011)

- **Der Ansatz von Gäbler (1987)**

Der Ansatz von Gäbler wurde mit Hilfe von Großversuchen entwickelt und verifiziert, die auch als Grundlage für die vorliegende Arbeit dienen. Gäbler (1987) gibt als Versagensform einen Translationsmechanismus mit einem bzw. zwei Blöcken sowie einen Rotationsmechanismus eines Blockes an.

Der Sicherheit ergibt sich nach Gäbler (1987) zu:

$$\eta = \frac{Z_{vorh}}{Z_g}$$

Z_{vorh} : Erforderliche Nagelzugkraft, damit das System in Gleichgewicht ist.

Z_g : Die tatsächlich maximal mobilisierbare Nagelzugkraft.

Durch die Variation der Gleitflächenneigung Θ ergibt sich die minimale Sicherheit für das Gesamtsystem.

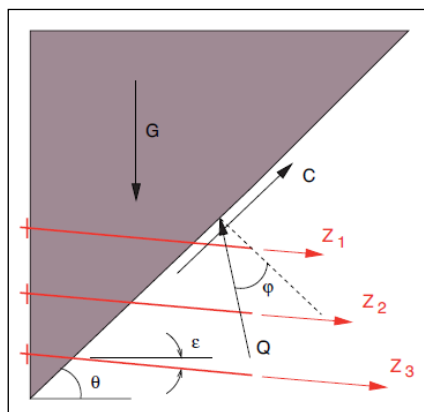


Abbildung 6: Translationsmechanismus eines Starrkörpers nach Gäßler (1987) (aus Kolymbas & Renk, 2011)

Die Zuverlässigkeit der verschiedenen konventionellen Bemessungsmethoden wird immer wieder diskutiert. Die Plausibilität der Nachweise der Standsicherheit ausgehend von Starrkörperbruchmechanismen wird von Kolymbas & Renk (2011) in Frage gestellt. Obwohl in den Nachweisen die Nagelzugkräfte im Bruchzustand betrachtet werden, ermöglicht die durch die Starrkörperbruchmechanismen bedingte Kinematik kaum die Mobilisierung der Nagelzugkräfte.

„Die geläufigen Nachweise der Standsicherheit von Nagelwänden gehen von einer Gleichgewichtsbetrachtung an Starrkörper-Bruchmechanismen aus. Dies ist allerdings nur gerechtfertigt, wenn die zur Mobilisierung der Nagelkräfte erforderlichen Deformationen vorhanden sind. Die zugrundeliegende Starrkörper-Bruchkinematik ist aber meist ungeeignet, Zugkräfte in den Nägeln zu mobilisieren.“ (Kolymbas & Renk, 2011)

2. Die Großversuche

2.1. Übersicht der Großversuche

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Bodenvernagelung“ wurden von der Spezialtiefbaufirma Karl Bauer KG, Schrobenhausen, und dem Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericana in Karlsruhe Großversuche in bindigen und nichtbindigen Böden durchgeführt. Dabei wurden vernagelte Wände hergestellt und bis zum Bruch belastet. Die Ergebnisse der Versuche wurden von Gäßler (1987) veröffentlicht.

Die Großversuche fanden in einer Sandgrube nahe der Ortschaft Schrobenhausen in Niederbayern statt. Die Planung der Großversuche wurde von der Firma Karl Bauer KG und dem Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik erarbeitet. Die Technologie zur Herstellung der Nagelwände wurde von der Firma Bauer entwickelt. (Gäßler 1987)

Die Großversuche mit den vernagelten Wänden hatten die folgenden Ziele:

- Nachweis der technischen Durchführbarkeit von nahezu senkrechten Nagelwänden in (feuchten) sandigen Böden.
- Messungen der Wandverformungen und der Nagelkräfte im Bauzustand und unter Gebrauchslasten um ein möglichst vollständiges Bild über das Verformungs- und Tragverhalten von Nagelwänden zu gewinnen.
- Genaue Beobachtung der Versagensmechanismen beim planmäßig herbeigeführten Bruch, um das theoretisch festgelegte Versagensmodell des starren Bruchkörpers zu bestätigen.

2.1.1. Wandgeometrien

Im Zuge des Forschungsprojektes wurden drei Großversuche durchgeführt. Von den drei Versuchen sind die Großversuche A und B von Gäßler (1987) beschrieben und ausgewertet.

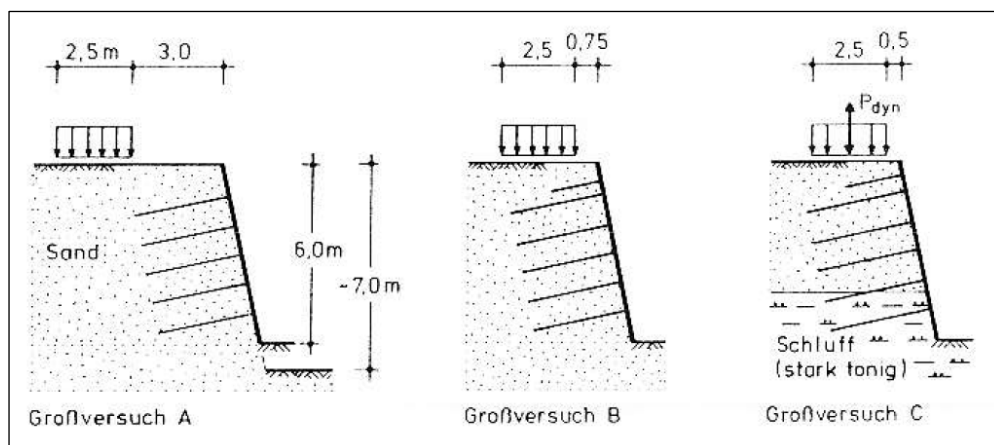


Abbildung 7: Die drei Großversuche, Wandgeometrie und Versuchsanordnung (aus Gäßler, 1987)

Beim Großversuch A betrug die Wandhöhe nach Fertigstellung und unter Gebrauchslasten 6 m. Nach weiterem Abgraben bis 7 m wurde die statische Belastung durch die Streifenlast bis zum Bruch erhöht.

Beim Großversuch B betrug die Wandhöhe 6 m und es erfolgte kein weiteres Abgraben nach der Wandherstellung, die Streifenlast nahe der Böschungskante wurde bis zum Bruch erhöht.

Bei dem Großversuch C betrug die Wandhöhe 6 m. Eine Streifenlast und eine dynamische Belastung wurden bis zum Bruch erhöht.

Bei allen Großversuchen wurde die eigentliche Versuchswand mit Belastungsvorrichtungen und Messgebern vom umliegenden Erdkörper durch zwei parallele Schlitze im Abstand von 7 m getrennt, die mit Bentonit verfüllt wurden.

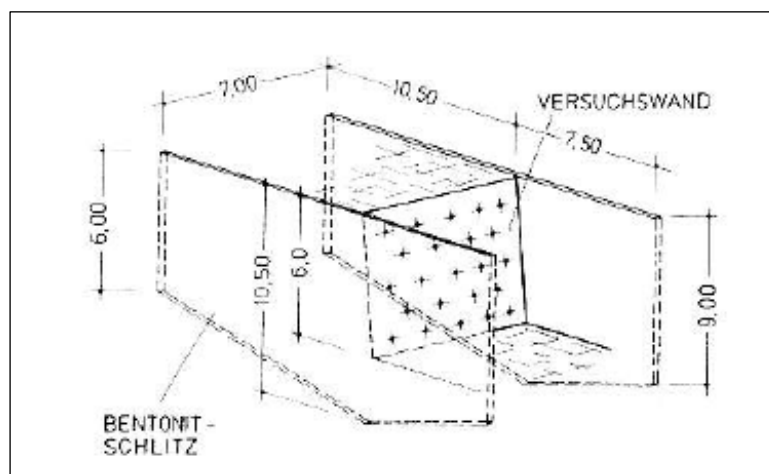


Abbildung 8: Bentonitschlitz bei den Versuchswänden (aus Gäßler, 1987)

2.1.2. Vorversuche zur Bestimmung der Nageltraglast

Vor dem Beginn der Großversuche wurden acht Nägel im Versuchsboden hergestellt um verschiedene Herstellungsmethode zu erproben und die Traglast durch Ausziehversuche zu messen.

Es wurde eine 10 cm dicke und 1,5 m hohe senkrechte Spritzbetonwand hergestellt um eine Mindestüberlagerungshöhe für die Nägel zu erhalten und um ein Widerlager beim Ausziehen der Prüfnägel zu haben. Der Kernquerschnitt der Prüfnägel bestand aus Gewi-Stahl ($d = 22 \text{ mm}$). Auf die Nägel war eine Rammspitze mit Durchmesser $D = 55$ bzw. 76 mm angeschweißt. Die Nagellängen betragen zwischen $3,5 \text{ m}$ und $4,5 \text{ m}$. Die Nägel wurden mit einer Neigung von 10° zur Horizontalen eingerammt. Gleichzeitig wurde der freibleibende Ringraum um die Nägel mit Zementmörtel verfüllt. Zwei mit Schnellzement hergestellte Nägel wurden nach 5 Stunden, die übrigen Nägel wurden nach 14 Tagen mittels einer hydraulischen Presse gezogen. Die Tabelle 1 enthält die über dem Pressendruck ermittelten Traglasten der gezogenen Nägel.

Tabelle 1: Ergebnisse der Vorversuche zur Bestimmung der Nageltraglast (aus Gäßler, 1987)

Nagel Nr.	Länge [m]	Durchmesser D Spitz bzw. Nagel [mm]	Traglast Nagel [kN]	mittlere Schubkraft T [-]
1	4,4	55	ca. 180	40,9
2	4,1	55	100	24,4
3	3,5	76	110	31,4
4	4,5	76	110	24,4
5 ^{*)}	2,3 ^{**)}	55	55	23,9
7 ^{*)}	4,0	55	80	20,0
8	4,4	55	70	15,9
9	4,0	55	55	25,0
*) Zugversuch nach 5 Stdn.			Mittelwert $T_m = 21,5$	
**) Verfüllung mit Zement unvollständig				

2.2. Großversuch B

Der Großversuch B wurde von Gäßler (1987) am ausführlichsten dokumentiert und beschrieben. Von diesem Versuch stehen die meisten Messergebnisse für den Vergleich mit Berechnungsergebnissen zur Verfügung. Der Großversuch B wurde daher mittels FLAC^{3D} untersucht, um dieses Programm für die Berechnung von Nagelwänden zu verifizieren.

2.2.1. Herstellung der Versuchswand

Die erste Baumaßnahme war das Abteufen der Bentonitschlitzte. Es wurde dazu ein am unteren Ende verstärktes IPE 500 Profil verwendet, das mit einem Vibrationsbär eingerüttelt wurde. Der freibleibende Raum wurde mit Bentonitsuspension verfüllt. Der Träger wurde längs einer Leitwand versetzt eingerüttelt, wobei auf die Vertikalität der Schlitzte sorgfältig geachtet wurde.

Die drei Herstellungsphasen der Wand – Ausheben, Spritzen und Nageln – bestanden aus den folgenden Teilphasen:

- Ausheben
 - Ausheben des Bodens mit schwerem Gerät, Herstellung des Grobprofils
 - Manuelle Nachbearbeitung des Profils
 - Einbau der Erddruckgeber
- Spritzen und Bewehren
 - Aufspritzen einer ca. 2 cm dicken Spritzbetonschicht
 - Verlegen der Bewehrung (Baustahlmatten)
 - Aussparen der Durchtrittstellen der Nägel durch die Spritzbetonhaut
 - Spritzen der Wandhaut bis 10 cm Dicke
- Vernageln
 - Einbringen der Nägel in den Boden ca. sechs Stunden nach dem Spritzen
 - Ca. sechs Stunden nach dem Verfüllen mit Zementleim Anschließen des Nagels über eine Kopfplatte, Kalotte und Kugelbundmutter an die Wandhaut
 - Montage von Nagelkraftgebern
 - Kräftiges Anziehen der Kugelbundmutter von Hand (in der Regel bis zu einer Nagelkraft von 5 kN)

In allen Großversuchen bestanden die Bodennägel im Kern aus einem Gewi-Stahl St42/50 mit Durchmesser $d = 22$ mm und $d = 55$ mm.

2.2.2. Die Belastungsvorrichtung

Die Belastungsvorrichtung bestand aus den folgenden Teilen: Laststreifen, Lastträger, Querträger, hydraulische Hohlkolbenpressen und senkrechte Injektionsanker.

Der Laststreifen war 2,5 m breit und 6,7 m lang. Die Injektionsanker lagen außerhalb des Wandbereichs und reichten bis 22 m Tiefe hinab. Eine Beeinflussung der Nagelwand durch das vom Verpresskörper ausgehenden Spannungskörper war damit ausgeschlossen. An jeder Hohlkolbenpresse wurde eine elektrische Kraftmessdose installiert. Mittels eines Lastkonstanthaltegerätes konnten Lastniveaus beliebig lange gehalten werden.

2.2.3. Messprogramm und Messgeber

Beim Großversuch B wurden die folgenden Werte gemessen:

- Verschiebungen der Spritzbetonwand
- Verschiebungen der Geländeoberfläche
- Verschiebungen im Innern des vernagelten Bodenkörpers
- Nagelkräfte am luftseitigen Ende und längs des ganzen Nagels
- Erddrücke auf die Wand

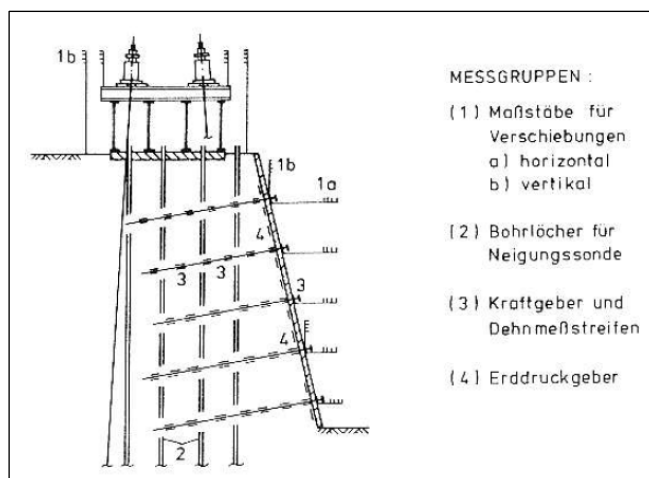


Abbildung 9: Messanordnung beim Großversuch B: Schnitt durch die Versuchswand
(aus Gäßler, 1987)

Die Horizontalverschiebungen der Wände wurden mit Hilfe eines Theodolits gemessen, der seitlich von der Versuchswand auf unbewegtem Boden aufgestellt wurde. Eine unmittelbare Ablesung der Wandverschiebungen in Millimetergenauigkeit konnte erreicht werden.

Zur Messung der Vertikalbewegungen der Geländeoberfläche wurden Nivellierinstrumente auf der ursprünglichen Geländehöhe aufgestellt. Hierbei wurde auch Millimetergenauigkeit erreicht.

Die Messung der horizontalen Verschiebungen im vernagelten Bodenkörper erfolgte mit Hilfe von drei Neigungsmesssonden, die in 12 m tiefe Messbohrlöcher eingeführt wurden. Die Neigungsmesssonden wurden bereits vor dem Abgraben installiert, um bei der Bestimmung der Horizontalverschiebungen von einer Nullmessung ausgehen zu können.

Die Nagelkräfte wurden beim Versuch B mit Hilfe von auf den Messnägeln installierten Dehnmessstreifen und hydraulischen Kraftmessdosen gemessen.

2.2.4. Eigenschaften des Versuchsbodens

Weil die Großversuche A und B unmittelbar aneinander grenzten, war die Untergrunderkundung vor dem Großversuch B nicht mehr so umfangreich, wie vor dem Großversuch A. Es wurden beim Großversuch B keine Rammsondierungen durchgeführt.

In der Tabelle 2 sind die wichtigsten bodenphysikalischen Parameter der untersuchten vier ungestörten Proben angegeben.

Tabelle 2: Wichten und Lagerungsdichten der ungestörten Sandproben (aus Gäßler, 1987)

Probe	Tiefe [m]	Feucht- wichte γ [kN/m ³]	Wasser- gehalt w [%]	Trocken- wichte γ_d [kN/m ³]	Poren-zahl e [-]	Wichte bei lockerster / dichtester Lagerung		bezogene Lagerungs- dichte I_D [-]
						γ_{min} [kN/m ³]	γ_{max} [kN/m ³]	
1	1,20	15,6	5,2	14,8	0,83	12,9	16,2	0,62
2	2,20	16,0	6,0	15,1	0,79	13,2	16,7	0,60
3	3,60	15,1	5,2	14,3	0,89	12,6	16,1	0,55
4	5,30	15,7	6,0	14,9	0,82	13,0	16,3	0,61
Mittelwert		15,6				Mittelwert		0,60

In der Tabelle 3 werden die Trocken- und Einbauwichten, die Spitzenreibungswinkel ϕ_p und Restreibungswinkel ϕ_r des Quarzsandes angegeben. Die Reibungswinkel wurden im Labor mit Hilfe des parallelgeführten Schergerätes ermittelt.

Tabelle 3: Trocken- und Einbauwichte bzw. Spitzenreibungswinkel und Restreibungswinkel des Quarzsandes, ermittelt im parallel geführten Rahmenschergerät (aus Gäßler, 1987)

Probe	Trockenwichte [kN/m ³]	Einbauwichte [kN/m ³]	Reibungswinkel	
			ϕ_p [°]	ϕ_r [°]
1	14,8	14,7	42,8	40,6
2	15,1	15,0	41,9	40,3
3	14,3	14,3	40,2	39,9
4	14,9	14,9	43,5	41,1
Mittelwerte gerundet			42	40,5

Zur Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter des Quarzsandes wurden ausreichend viele Bodenproben untersucht, die ermittelten Parameter weisen eine geringe Streuung auf. Die in den Tabellen 2 und 3 angegebenen Mittelwerte der bodenphysikalischen Parameter werden in den Berechnungsmodellen angesetzt.

2.2.5. Die Versuchsanordnung, Wandherstellung

Beim Versuch B wurde die Streifenlast in 0,75 m Abstand zur Wandkante gelegt. In der Abbildung 10 sind die Lage der Streifenlast und der Bohrungen für die Inklinometer A, B und C zu sehen.

Die Wandherstellung verlief in neun Arbeitstagen. Es wurden Nägel in 5 Reihen in die Versuchswand eingebaut. Die Nägel in der 1. bis 3. Reihe waren 3,0 m, die Nägel in den Reihen 4. und 5. waren 3,5 m lang. Wegen der dicht an der Wandkante liegenden Streifenlast wurde nach dem Aushub der ersten Lage in 0,5 m Tiefe eine zusätzliche Reihe mit kurzen Nägeln (2,0 m) gesetzt. In jeder Nagelreihe wurde ein Messnagel mit 6 bzw. 7 Messquerschnitten (Dehnmessstreifen) eingebaut.

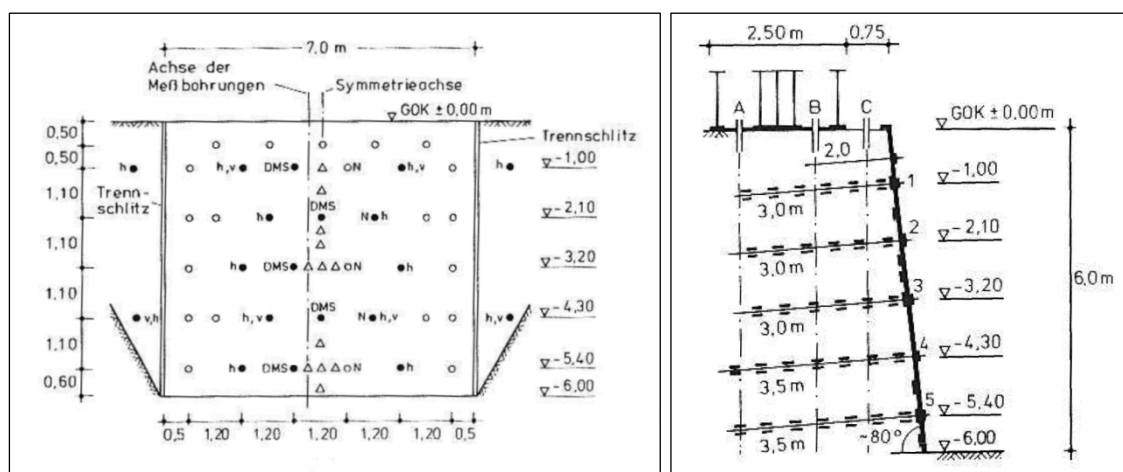


Abbildung 10: Ansicht der Versuchswand und Schnitt durch die Versuchswand
(aus Gäßler, 1987)

2.2.6. Versuchsverlauf

Die vernagelte Wand wurde während des Versuchs schrittweise bis zum Bruch belastet. Die Abbildung 11 zeigt den Belastungsverlauf.

Die Belastung der Wand bis zum Bruch und die Wiederbelastung haben insgesamt 8 Tage gedauert. Die Auflast wurde schrittweise über 7 Tage bis 150 kN/m^2 gesteigert. Bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ wurde die Last 20 Minuten lang konstant gehalten und eine Verschiebungsgeschwindigkeit von $v = 1,5 \text{ mm/min}$ längs der Gleitfläche gemessen.

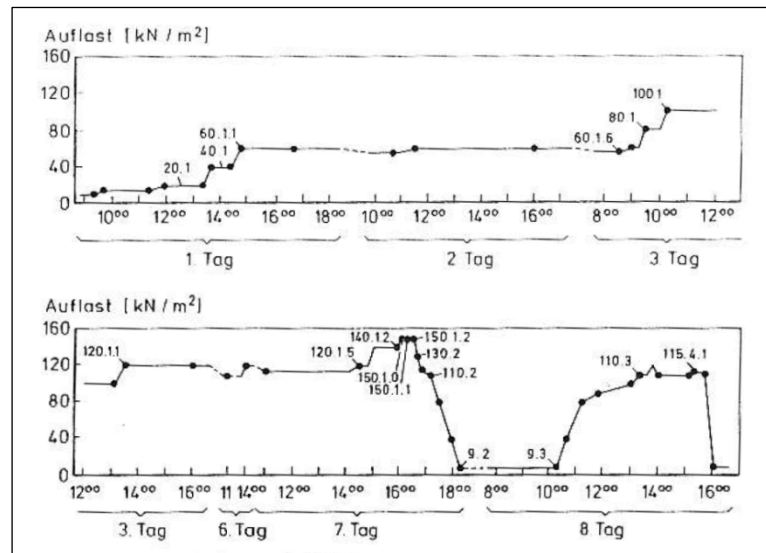


Abbildung 11: Der Versuchsverlauf (aus Gäßler, 1987)

Im Anfangsbruchzustand zeigte sich ein durchgehender horizontaler Riß in der Spritzbetonschale zwischen den Nagelreihen von vorletzter und letzter Lage.

2.2.7. Die Messergebnisse

Die Abbildung 12 zeigt die Horizontalverformungen in den Inklinometerbohrungen, die Verschiebungen der Spritzbetonschale und die Vertikalverschiebungen unter dem Laststreifen.

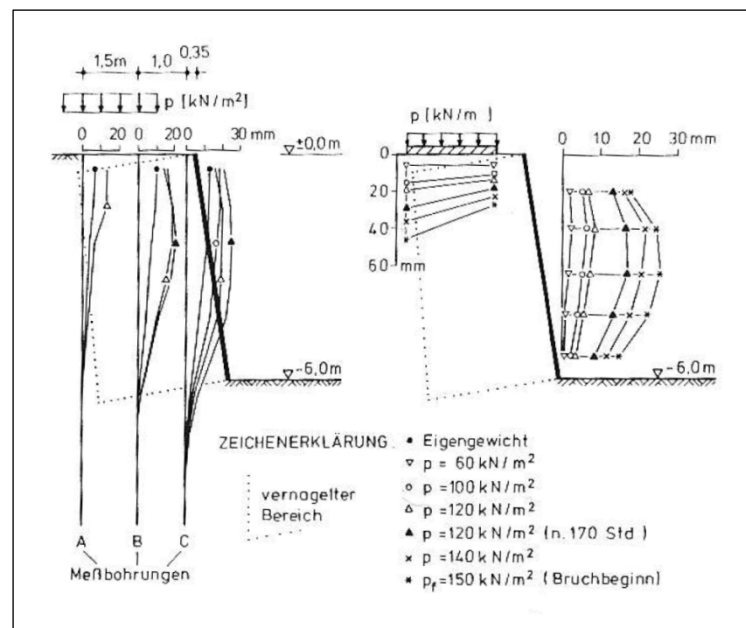


Abbildung 12: Die Messergebnisse beim Großversuch B: Horizontalverschiebungen in den Messbohrungen, Horizontalverformung der Wandhaut und Vertikalverschiebung unter der Laststreife. (Gäßler, 1987)

Die axialen Nagelkräfte in den Messnägeln während des Versuchs in den einzelnen Laststufen sind auf dem linken Diagramm der Abbildung 13 zu sehen. Die Nagelkraftverläufe bei der Laststufe 150.1.0, im Anfangsbruchzustand und bei der Laststufe 110.1, nach dem residuellen Bruchzustand, als die Belastung auf 110 kN/m^2 gesenkt wurde und die Wandbewegungen zum Stillstand kamen, zeigen, dass die Nagelkraftmessungen am Anfang und am Ende des Bruches erfolgten.

In allen Nägeln entstanden zufolge der Vertikallast Zugkräfte (linkes Diagramm). In den oberen drei Nagelreihen ist der Nagelkraftverlauf bis zum Anfangsbruchzustand etwa parabelförmig mit einem etwa in der Nagelmitte liegenden Maximum. Bei den Nägeln der 4. und 5. Reihe nehmen die Nagelkräfte von der Spitze monoton ab. Das rechte Diagramm in Abbildung 13 zeigt den Verlauf der Biegemomente im Anfangsbruchzustand und im residuellen Bruchzustand.

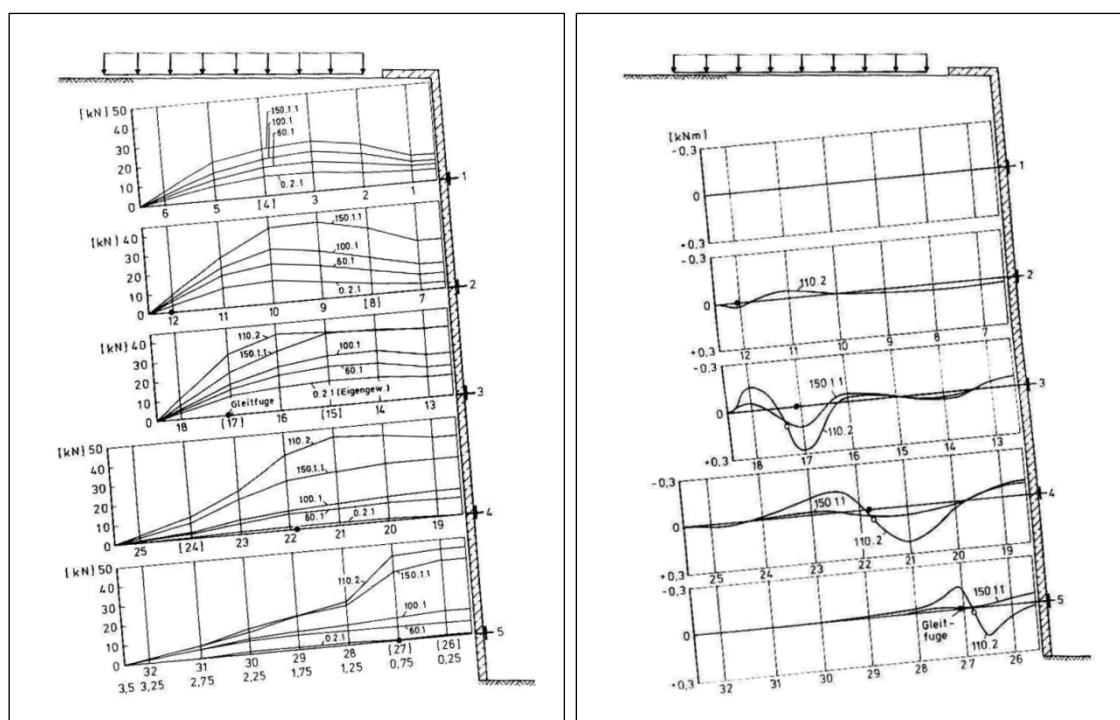


Abbildung 13: Großversuch B: Verlauf der Nagelzugkräfte (links) und der Biegemomente (rechts) in den Messnägeln (aus Gäßler, 1987)

Zu den Verläufen der axialen Nagelkräfte und der Biegemomente in den Messnägeln muss festgestellt werden, dass die hydraulischen Kraftmessdosen sowie die Dehnmessstreifen der Messnägeln keine ausreichende Messgenauigkeit lieferten (Gäßler, 1987). Deshalb wurden bei den späteren Versuchen elektrische Kraftmessdosen verwendet.

3. FLAC - kontinuumsmechanischer Finite Differenzen Code

FLAC („Fast Lagrangian Analysis of Continua“) ist geeignet für die numerische Berechnung von Kontinuumsmodellen in zwei, oder drei Dimensionen. Alle nachfolgend beschriebenen Berechnungen wurden mit der Version 5.0 des Programmes FLAC^{3D} durchgeführt.

FLAC^{3D} ist ein Werkzeug zur Analyse und Dimensionierung in der Geotechnik. Das Programm wurde speziell für die Modellierung dreidimensionaler Strukturen in Boden und Fels entwickelt und ist besonders geeignet für die Modellierung eines komplexen Verhaltens. Es können auch thermische und dynamische Aufgaben modelliert werden. Ein wichtiger Vorteil von FLAC gegenüber FEM Methoden ist, dass die Lokalisierung von Scherzonen besser abgebildet wird. (Poisel, 2010)

Das Programm wird von der Firma Itasca Consulting Group Inc. entwickelt, die gleichzeitig Ingenieurconsulting betreibt.

FLAC^{3D} ist ein Programmsystem, das durch Integration der Bewegungsgleichungen über die Zeit kontinuumsmechanisches Verhalten modellieren kann. FLAC^{3D} benutzt eine explizite Finite-Differenzen-Formulierung und dadurch ist die Modellierung komplexer Verhalten möglich. Durch die explizite Lagrangsche Formulierung und die Technik der gemischten Diskretisierungszonen wird sichergestellt, dass auch Versagen und plastisches Fließen sehr genau modelliert werden kann.

Die Diskretisierung des Gebirges erfolgt in Form eines Netzes mit Knotenpunkten, die als „Gitter“ bezeichnet wird. Materialien werden in FLAC^{3D} durch Polyeder in einem dreidimensionalen Gitter präsentiert. Das Gitter kann vom Benutzer entsprechend der zu modellierenden Form beliebig verändert werden, Jedes Element verhält sich entsprechend einem vorgeschriebenen linearen oder nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Gesetz. Die iterative Berechnung erfolgt in FLAC^{3D} kreislaufartig (Abbildung 14).



Abbildung 14: Der Berechnungskreislauf in $FLAC^{3D}$ (nach Itasca 2009)

Bauteile und Konstruktionen die mit dem umliegenden Boden in Interaktion stehen, wie zum Beispiel Pfähle, Anker, Balken, Tunnelinnenschalen oder Geogrids sind im Programm durch Strukturelemente definierbar.

4. Verwendete Stoffmodelle und Strukturelemente

4.1. Verwendete Stoffmodelle

Im Programm FLAC^{3D} werden zahlreiche Stoffmodelle angeboten. Es ist auch die Verwendung benutzerdefinierter Stoffmodelle möglich. In den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen numerischen Modellen wurden das Mohr-Coulombsche Stoffmodell und seine Erweiterung das „strain-softening“ Stoffmodell angewendet.

4.1.1. Das Mohr-Coulombsche Stoffmodell

Das Mohr-Coulombsche Modell ist ein linear elastisches - idealplastisches Stoffmodell, das auch für Böden angewendet wird. Beim Stoffmodell wird die Fließfläche durch die folgenden drei Funktionen dargestellt. (Boley, 2011)

$$f_1 = |\sigma_2' - \sigma_3'| + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3') \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi = 0$$

$$f_2 = |\sigma_3' - \sigma_1'| + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1') \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi = 0$$

$$f_3 = |\sigma_1' - \sigma_2'| + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2') \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi = 0$$

Die Modellparameter φ und c sind der Reibungswinkel und Kohäsion des Bodens. Die drei Fließfunktionen beschreiben einen hexagonalen Trichter im Hauptspannungsraum (siehe Abbildung 15).

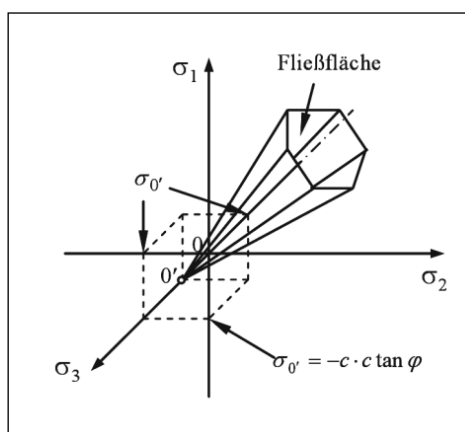


Abbildung 15: Die Mohr-Coulombsche Fließflächen im Hauptspannungsraum
(aus Boley, 2011)

Für Spannungszustände innerhalb der Fließfläche verhält sich der Boden elastisch. Für die Bestimmung der elastischen Verformungen werden der Elastizitätsmodul E und die Poisson-Zahl ν benötigt. Die drei Materialparameter c , φ und ψ sind für die Ermittlung der plastischen Dehnungsinkremente auf den Fließflächen notwendig. Der Parameter ψ ist der Dilatanzwinkel des Bodens. Er ist ein Maß für die Volumenvergrößerung von Böden im Zuge des plastischen Verhaltens (Boley, 2011).

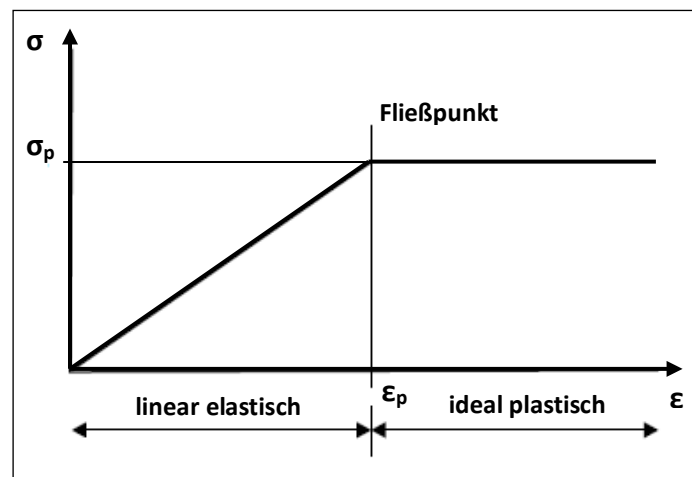


Abbildung 16: Spannung – Dehnungsbeziehung des elastoplastischen Materialverhaltens bei einaxialer Stauchung, das Mohr-Coulombsche Stoffmodell

Eine Materialprobe unter einer einaxialer Stauchung verhält sich elastisch bis die Spannung $\sigma = \sigma_p$ und die axiale Dehnung auf $\epsilon = \epsilon_p$ ansteigt. Bei einer weiteren Stauchung bleibt die Spannung konstant und die weitere Verformung ist nicht umkehrbar (plastisch). Die konstante Spannung wird Fließspannung genannt.

4.1.2. Das Strain-softening Stoffmodell

Das strain-softening Stoffmodell basiert auf dem Mohr-Coulombschen Stoffmodell und ist besonders geeignet für Materialien, die eine Verringerung der Festigkeit bei Belastung über die Bruchdehnung ϵ_p anzeigen.

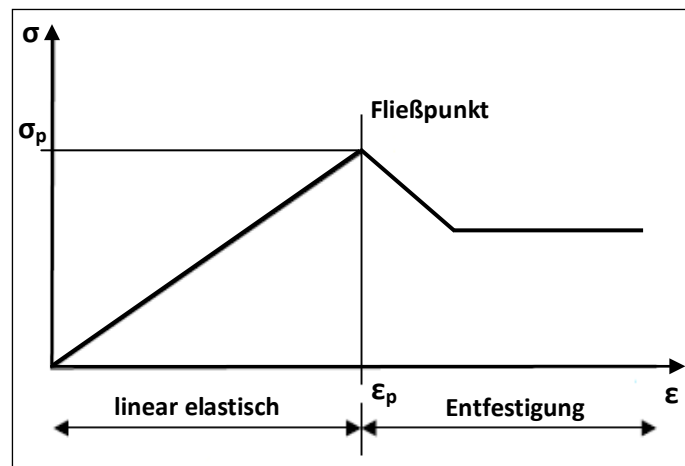


Abbildung 17: Spannung-, Dehnungsbeziehung des strain-softening Stoffmodells in *FLAC^{3D}*

Im Mohr-Coulombschen Stoffmodell bleiben nach dem Erreichen der Bruchdehnung die Festigkeitsparameter konstant. Mit der Verwendung des strain-softening Stoffmodells können die Festigkeitsparameter nach der Bruchdehnung auf einen definierbaren Wert abgemindert werden. In *FLAC^{3D}* werden im post failure – Bereich die Festigkeitsparameter proportional zur Dehnung abgemindert.

4.2. Modellierung der Nägel

Das Programm *FLAC^{3D}* bietet Strukturelemente an, die für die Modellierung der Stabilisierungsmaßnahmen verwendet werden können. Für die Modellierung der Bodennägel sind die Ankerelemente ("cable structural element" (Itasca, 2009)) und die Pfahlelemente ("pile structural elements" (Itasca, 2009)) geeignet.

4.2.1. Ankerelemente („cable structural elements“)

Ankerelemente sind finite Stabelemente mit zwei Netzpunkten und mit einem axialen Freiheitsgrad je Netzpunkt. Die Ankerelemente können auf Druck und auf Zug beansprucht werden, jedoch keine Biegemomente aufnehmen.

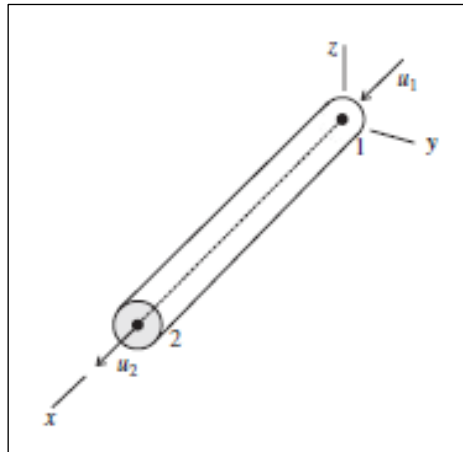


Abbildung 18: Lokales Koordinatensystem und die zwei aktive Freiheitsgrade des Ankerelementes (aus Itasca, 2009)

Die Anker Elemente werden in der Regel in FLAC^{3D} für die Modellierung von Ankern oder Nägeln herangezogen. Die Verwendung des Elementes erfolgt in erster Linie als zugbeanspruchter Bauteil. Die Abbildung 19 zeigt das idealisierte Anker element-Vermörtelung-Gestein System.

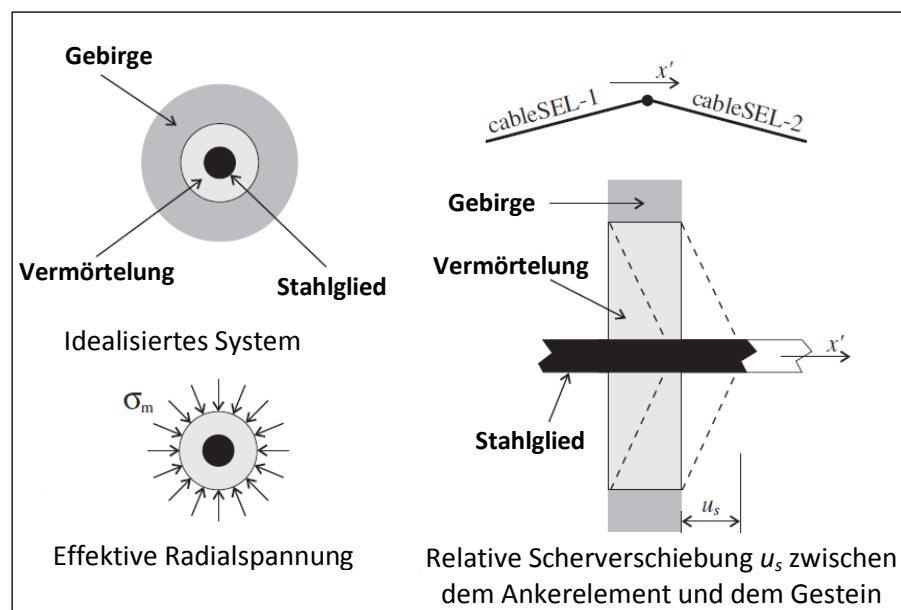


Abbildung 19: Idealisiertes Anker element-Vermörtelung-Gebirge System (aus Itasca, 2009)

Abbildung 20 zeigt das Modell des Anker element-Vermörtelung-Gebirge Systems in FLAC^{3D}. Das Materialmodell des Stahlgliedes ist elastoplastisch. Die Festigkeitseigenschaften der Verbindung zwischen den Anker elementen und dem

Gebirge werden mit Hilfe eines Systems aus Federn und Gleitern modelliert, das mit den Federn des Stahlgliedes gekoppelt ist.

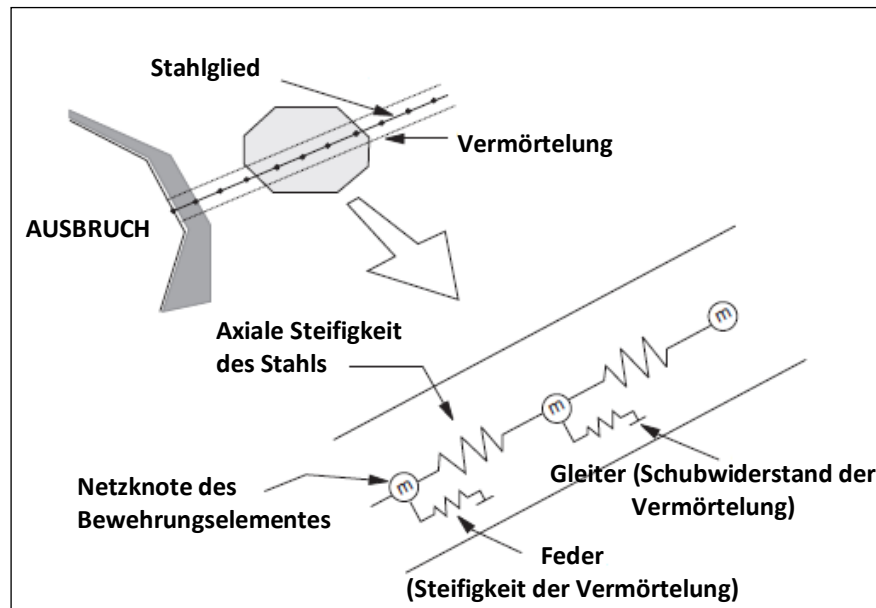


Abbildung 20: Mechanisches Modell des Ankerelementes in $FLAC^{3D}$ (aus Itasca, 2009)

Die Ankerelemente sind in $FLAC^{3D}$ durch die Geometrie, durch die Materialparameter des Stahlgliedes und durch die Festigkeitseigenschaften der Vermörtelung definierbar.

Die axiale Steifigkeit des Stahlgliedes wird mit dem E-Modul des Stahles definiert, die Fließgrenze ist direkt anzugeben.

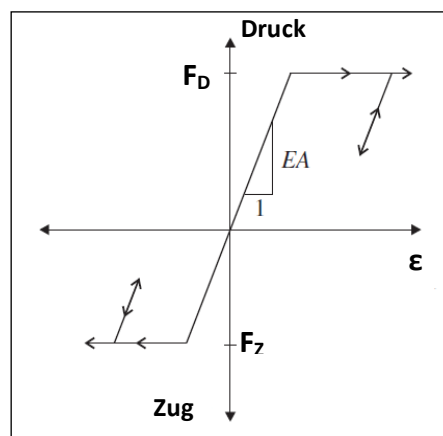


Abbildung 21: Kraft-Dehnungsbeziehung des Stahlgliedes des Ankerelementes
(aus Itasca, 2009)

Die Steifigkeit der Vermörtelung („grout stiffness“ (Itasca, 2009)) wird ebenfalls mittels einer Federsteifigkeit angegeben. Der Schubwiderstand des Gleiters („grout cohesion“

(Itasca, 2009)) wird mit der maximal aufnehmbaren Schubkraft definiert. Die maximal aufnehmbare Schubkraft kann mittels Ausziehversuchen bestimmt werden.

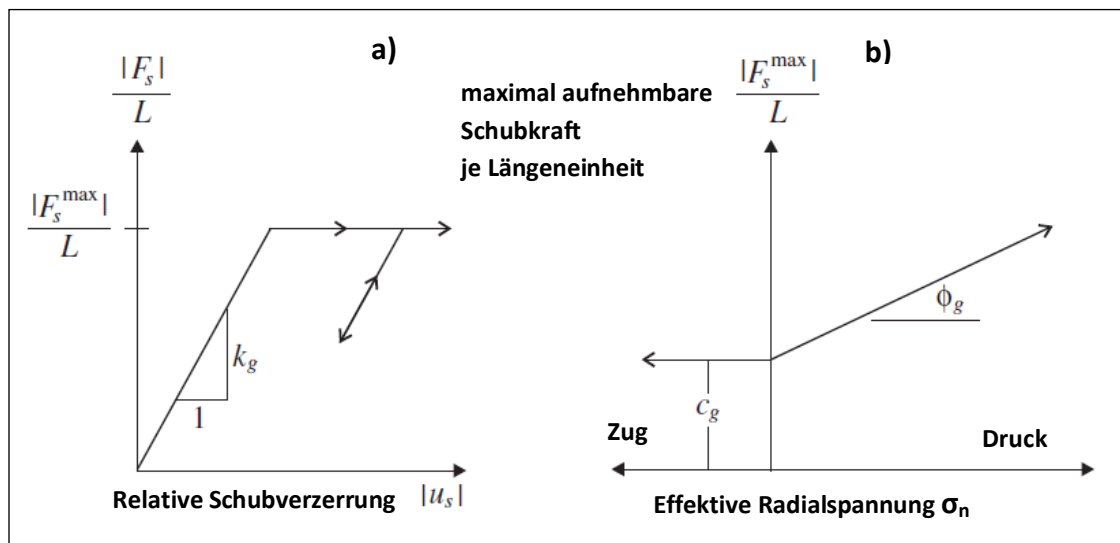


Abbildung 22: Mechanisches Verhalten der Vermörtelung des Ankeres

a) Schubkraft-Schubverzerrung Verhalten der Vermörtelung

b) Schubkraft-Kriterium, maximal aufnehmbare Schubkraft in Abhängigkeit der effektiven Radialspannung

Die Steifigkeit der Vermörtelung „grout stiffness“ (gr_k) lässt sich mit der Formel nach Itasca (2012)

$$gr_k = \frac{2\pi \cdot G}{10 \cdot \ln(1 + 2 \cdot \frac{t}{D})} \quad 4.1.$$

bestimmen, wobei:

G : Schubmodul der Vermörtelung

t : Dicke des Verpresskörpers

D : Durchmesser des Stahlgliedes

und

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad 4.2.$$

wobei:

E : E-Modul der Verpressmörtels

ν : Poisson-Zahl des Verpressmörtels

ist.

4.2.2. Pfahlelemente („pile structural elements“)

Pfahlelemente („pile structural elements“) sind finite Stabelemente mit zwei Netzpunkten und mit sechs Freiheitsgraden je Netzpunkt. Die Pfahlelemente können auf Druck und auf Zug beansprucht werden und auch Biegemomente aufnehmen.

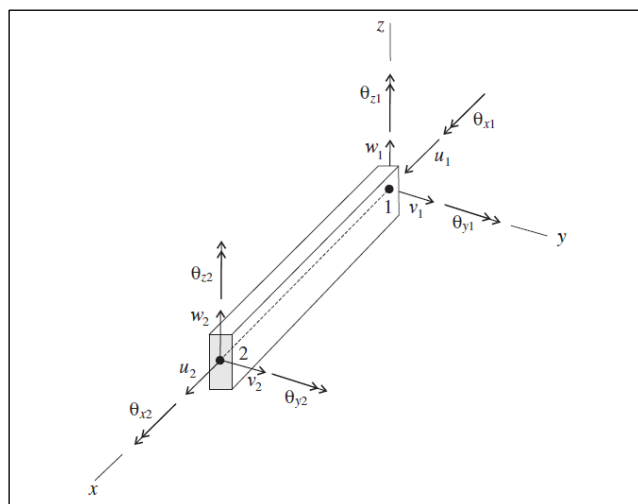


Abbildung 23: Lokales Koordinatensystem und die 12 aktiven Freiheitsgrade des Pfahlelementes (Itasca, 2009)

Die Pfahlelemente sind mit Hilfe der gekoppelten Federn und Gleitern in Scher- (Richtung Elementachse x) und in Normalrichtung (Richtung Achsen y und z) mit den Netzpunkten verbunden. Das mechanische Verhalten der Pfahlelemente in Scherrichtung entspricht dem mechanischen Verhalten der Ankerelemente. Der Unterschied zwischen den beiden Elementen im Verhalten in Scherrichtung ist, dass die Pfahlelemente durch die Angabe des Reibungswinkels in Achsrichtung („shear coupling spring friction angle“ (Itasca, 2009)) über einen höheren Auszieh Widerstand (maximal aufnehmbare Schubkraft) verfügen können. (siehe Abbildung 22b)

Das Verhalten der Pfahlelemente wird durch die Materialparameter des Pfahlmaterials, durch die Geometrie und durch die Eigenschaften der Verbindung zu den Netzknoten definiert. Bei den Pfahlelementen sind mehrere Modellparameter für die Definition des mechanischen Verhaltens erforderlich als bei der Definition von Ankerelementen. Es muss den Elementen auch eine Biegesteifigkeit zugeordnet werden. Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Vermörtelung müssen sowohl in Achsrichtung, als auch in Richtung normal dazu definiert werden.

4.3. Modellierung der Spritzbetonschale

In der vorliegenden Arbeit wurden für die Modellierung der Spritzbetonschale die Schalenelemente („shell structural element“ (Itasca, 2009)) herangezogen.

Die Schalenelemente sind ebene dreieckige finite Flächenelemente mit 6 Freiheitsgraden je Knoten. Schalenelemente sind geeignet für die Modellierung dünner Strukturen.

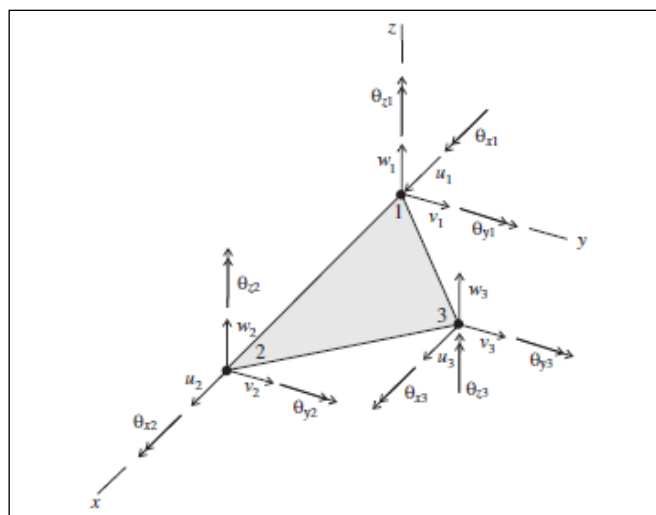


Abbildung 24: Lokales Koordinatensystem und die 18 aktive Freiheitsgrade des Schalenelementes (aus Itasca, 2009)

Die Schalenelemente werden durch die Geometrie (Abmessungen und Dicke der Platte) und Materialparameter definiert und ihre Eckpunkte werden mit den Netzknoten des Kontinuums kraftschlüssig gekoppelt.

Den Schalenelementen kann isotropes, anisotropes oder orthotropes Verhalten (ohne ein plastisches Limit) zugeordnet werden. In den Modellen der vorliegenden Diplomarbeit wurde die Spritzbetonschale als ebene isotrope Platte modelliert.

Verschiedene Strukturelemente lassen sich in $FLAC^{3D}$ miteinander verbinden, wodurch eine Kraftübertragung zwischen den einzelnen Elementen ermöglicht wird. Durch die Verbindung der Anker- und Pfahlelemente mit den Schalenelementen kann die Kraftübertragung zwischen diesen Elementen bei der Modellierung berücksichtigt werden.

5. Modellierung mit FLAC^{3D}

5.1. Ziele der Modellierung

Für die Bestimmung des am besten geeigneten Boden-Nagel Modells wurden sechs unterschiedliche Modelle aufgebaut, die im Folgenden ausführlich beschrieben werden. Die für die Modellierung der Nagelwand wesentlichen Faktoren, wie:

- das verwendete Stoffmodell für den Boden,
- das Modell zur Darstellung der Bodennägel,
- die Modellierung der Spritzbetonschale und
- Verbindung zwischen den Nägeln und der Spritzbetonschale

werden diskutiert.

Die untersuchten Modelle lassen sich in zwei Gruppen unterteilen.

Zur ersten Modellgruppe gehören die Modelle, die zur Simulation der Mechanismen in der Versuchswand bzw. für die Bestimmung des am besten geeigneten Boden-Nagel Modells aufgebaut wurden. Mit der Gegenüberstellung der Ergebnisse der folgenden vier Modelle wurde versucht, die am besten geeigneten Strukturelemente und Stoffmodelle für die Modellierung von vernagelten Wänden zu finden.

- **Modell 1A**

Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Anker-elementen, die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen modelliert. Die Bodennägel wurden mit der Spritzbetonschale kraftschlüssig verbunden. Für den Boden wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell verwendet.

- **Modell 2**

Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Pfahlelementen, die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen modelliert. Die Bodennägel wurden mit der Spritzbetonschale kraftschlüssig verbunden. Für den Boden wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell verwendet.

- **Modell 3**

Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Ankerelementen, die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen modelliert. Die Bodennägel wurden mit der Spritzbetonschale kraftschlüssig verbunden. Für den Boden wurde das „strain softening“ Stoffmodell verwendet.

- **Modell 4**

Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Ankerelementen, die Spritzbetonschale mit Hilfe von Kontinuums-elementen modelliert. Die Bodennägel wurden mit der Spritzbetonschale kraftschlüssig verbunden. Für den Boden wurde das „strain softening“ Stoffmodell verwendet.

Die folgenden zwei Modelle bilden die zweite Modellgruppe. Sie stellen Extremwerte dar und dienen als Referenz für die Modelle 1A, 2, 3 und 4.

- **Modell 0**

Im Modell 0 wurde keine Spritzbetonschale modelliert. Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Ankerelementen modelliert. Für den Boden wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell verwendet.

- **Modell 1B**

Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Ankerelementen, die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen modelliert. Die Bodennägel wurden mit der Spritzbetonschale nicht verbunden. Für den Boden wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell verwendet.

Die Tabelle 4 zeigt die Gegenüberstellung der in den Modellen 0-4 verwendeten strukturellen Elemente zur Darstellung der Bodennägel und der Spritzbetonschale bzw. das verwendete Stoffmodell für den Boden.

Tabelle 4: Die untersuchten Modelle

	Strukturelle Elemente für die Darstellung der Bodennägel	Strukturelle Elemente für die Darstellung der Spritzbetonschale	Materialverhalten des Bodens
Modell 1A	Ankerelemente („cable structural element“)	Schalenelemente („shell structural element“)	linear-elastisch ideal-plastisch (Mohr-Coulomb)
Modell 1B	Ankerelemente („cable structural element“)	Schalenelemente („shell structural element“)	linear-elastisch ideal-plastisch (Mohr-Coulomb)
Modell 2	Pfahlelemente („pile structural element“)	Schalenelemente („shell structural element“)	linear-elastisch ideal-plastisch (Mohr-Coulomb)
Modell 3	Ankerelemente („cable structural element“)	Schalenelemente („shell structural element“)	Entfestigung („strain softening modell“)
Modell 4	Ankerelemente („cable structural element“)	Kontinuumselemente	Entfestigung („strain softening modell“)
Modell 0	Ankerelemente („cable structural element“)	keine Spritzbetonschale	linear-elastisch ideal-plastisch (Mohr-Coulomb)

5.2. Modellgeometrie

Die Modellgeometrie entspricht dem Großversuch B. Entsprechend der in den Abbildungen 7 und 8 angegebenen Abmessungen der Versuchswand wurde das Modell mit einer Höhe von 6 m und mit einer Breite von 7 m aufgebaut. Die Böschungsneigung beträgt 80° . Die Bodennägel wurden entsprechend der Abbildung 10 eingegeben. Die Modellgeometrie und die wichtigsten Modellabmessungen sind in den Abbildungen 25 und 26 dargestellt.

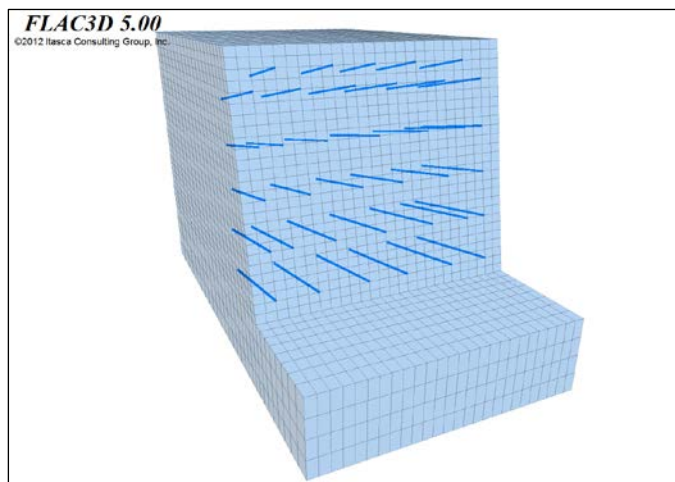


Abbildung 25: Modellgeometrie im $FLAC^{3D}$

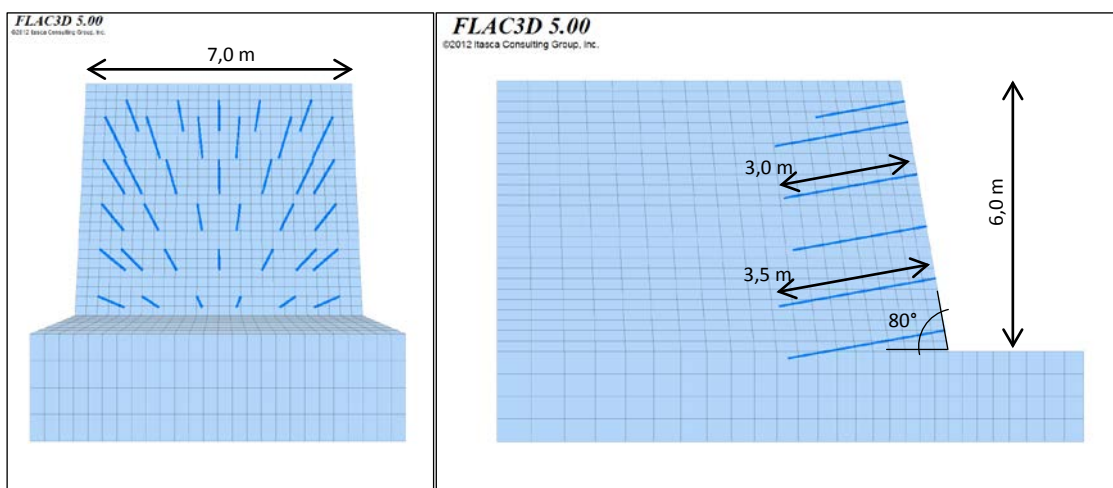


Abbildung 26: Modellabmessungen

5.3. Modellierung der Auflast

Die Position der Last auf der Oberfläche des vernagelten Bodenkörpers wurde entsprechend der Abbildung 10 definiert.

Bei allen Modellen wurde in der ersten Einzelberechnung der Gleichgewichtszustand ohne Belastung berechnet. Anschließend wurde die Belastung stufenweise entsprechend den Laststufen des Großversuchs erhöht:

1. 60 kN/m^2
2. 100 kN/m^2
3. 120 kN/m^2
4. 140 kN/m^2
5. 150 kN/m^2

Falls bis zur Laststufe 5 kein Versagen des Modells erfolgte, wurde die Belastung schrittweise um 5 kN/m^2 je Einzelberechnung erhöht.

Für die Dauer jeder Einzelberechnung wurden einerseits die größte unausgeglichene Kraft im System („maximal unbalanced force“) und andererseits die maximale Anzahl von Berechnungsschritten festgelegt. Jede Einzelberechnung endete, wenn eine der beiden Grenzen erreicht wurde. Die Anzahl der Berechnungsschritte wurde ausreichend groß gewählt, sodass nach jeder Einzelberechnung festgelegt werden konnte, ob das System stabil oder instabil ist.

5.4. Modelle 1A und 1B – Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen, Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen

5.4.1. Modelleigenschaften

Die Darstellung der Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen und der Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen erfordert die wenigsten Modellparameter und die Modellparameter sind am einfachsten bestimmbar.

5.4.2. Die untersuchten Modellvarianten

Es wurden zwei Modellvarianten untersucht.

Bei der Modellvariante 1A wurde eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Ankerelementen und den Schalenelementen definiert. Dadurch wurde die Kraftübertragung zwischen den beiden Strukturelementen ermöglicht.

Bei der Modellvariante 1B wurde keine Verbindung zwischen den Ankerelementen und den Schalenelementen definiert.

5.4.3. Versagen der Verbindung zwischen den Bodennägeln und Spritzbetonschale

Das Versagen der Verbindung zwischen eines Bodennagels und der Spritzbetonschale kann auf folgende Arten erfolgen:

- Versagen des Stahlgliedes (plastisches Fließen)
- Versagen des Nagelkopfes (Kalottenplatte oder Kugelbundmutter)
- Durchstanzen der Kalottenplatte

Das Versagen des Stahlgliedes (plastisches Fließen im Stahlzugglied) ist durch die Betrachtung der Axialspannungen in den Elementen erkennbar. Das Versagen des Stahlgliedes ist bei vernagelten Wänden in Lockergestein unwahrscheinlich.

Das Versagen der Kalottenplatte oder der Kugelbundmutter kann in der Praxis ausgeschlossen werden.

Das Durchstanzen der Kalottenplatte ist mit Hilfe der Zug- und Schalenelemente direkt nicht modellierbar. Man kann nur die in der Spritzbetonschale auftretende Nagelkraft mit dem Durchstanzwiderstand der Spritzbetonschale vergleichen.

5.4.4. Modellparameter

5.4.4.1. Bodenphysikalische Parameter, Stoffmodell

Bei den Modellen 1A und 1B wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell für den Boden verwendet. Die bodenphysikalischen Parameter des Quarzsandes wurden entsprechend den Ergebnissen der Laboruntersuchungen angesetzt. (s. Tabelle 2 und 3)

Tabelle 5: Modelle 1A und 1B: Die angesetzten bodenphysikalischen Parameter

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
Dichte	[kg/m ³]	1560	Reibungswinkel	[°]	42.0
E-Modul	[MPa]	50	Dilatanzwinkel	[°]	12.0
Poisson – Zahl	[-]	0.25	Kohäsion	[kPa]	5.5

5.4.4.2. Modellparameter für die Anker Elemente

Für die Nagelstange wurden die Materialparameter eines Gewi St42/50 Stahls angesetzt.

Für die Messnägel wurde der Mittelwert der mittleren Schubkraft $T_m = 21500$ N/m (siehe Tabelle 1) als maximal aufnehmbare Schubkraft („grout cohesion“) angesetzt.

Die Steifigkeit der Vermörtelung („grout stiffness“) wurde mit Hilfe der Formel 6.1 ermittelt.

Tabelle 6: Modelle 1A und 1B: Modellparameter der Bodennägel

Messnägel			Nägel		
Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
<u>Modellparameter des Stahlgliebes</u>					
Querschnitt	[m ²]	2.38e-3	Querschnitt	[m ²]	3.8e-4
E-Modul	[Pa]	206e9	E-Modul	[Pa]	206e9
Pl. Fließgrenze	[N]	1306e3	Pl. Fließgrenze	[N]	209e3
<u>Modellparameter der Vermörtelung</u>					
Maximal aufnehmbare Schubkraft („grout cohesion“)	[N/m]	2.15e4	Maximal aufnehmbare Schubkraft („grout cohesion“)	[N/m]	1.55e4
Steifigkeit der Vermörtelung („grout stiffness“)	[N/m/m]	3.8e9	Steifigkeit der Vermörtelung („grout stiffness“)	[N/m/m]	2.7e9

5.4.4.3. Modellparameter für die Schalenelemente

Da Gäßler (1987) keine Festigkeitseigenschaften des Spritzbetons angab, wurden bei der Berechnung die Festigkeitseigenschaften des Spritzbetons mit der Festigkeitsklasse SpC 8/10 angesetzt.

Tabelle 7: Modelle 1A und 1B Modellparameter der Spritzbetonschale

Parameter	Einheit	Wert
Dichte	[kg/m ³]	2500
E-Modul	[GPa]	5.0
Poisson – Zahl	[-]	0.20
Dicke	[m]	0.10

5.5. Modell 2 – Bodennägel mit Hilfe von Pfahlelementen, Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen

5.5.1. Modelleigenschaften

Bei Modell 2 wurden die Bodennägel mit der Spritzbetonschale kraftschlüssig verbunden. Die Darstellung der Bodennägel mit Hilfe von Pfahlelementen ermöglicht die Bestimmung der Biegebeanspruchung in den Bodennägeln.

5.5.2. Modellparameter

5.5.2.1. Stoffmodell, Bodenphysikalische Parameter

Im Modell 2 wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell für den Boden verwendet. Es wurden die gleichen bodenphysikalischen Parameter angesetzt, wie bei den Modellen 1A und 1B (siehe Tabelle 5).

5.5.2.2. Modellparameter für die Pfahlelemente

Die Ermittlung der Modellparameter für die Vermörtelung in Richtung Elementachse erfolgte analog den Modellen 1A und 1B. Für die maximal aufnehmbare Schubkraft und für die Steifigkeit die Vermörtelung in Richtung Nagelachse wurden die beim Modell 1 ermittelten Modellparameter angesetzt.

Die Festigkeitseigenschaften der Vermörtelung müssen bei den Pfahlelementen auch in der auf die Nagelachse senkrechten Richtung (in Normalrichtung) definiert werden. Die genaue, zuverlässige Bestimmung der Modellparameter in Normalrichtung ist nur beschränkt möglich.

Die maximal aufnehmbare Normalkraft ist vom passiven Erddruckwiderstand des Bodens abhängig. Es wurde eine maximal aufnehmbare Normalkraft von 2000 N/m angesetzt. In Normalrichtung wurde für die Vermörtelung eine um eine Zehnerpotenz kleinere Steifigkeit als in Scherrichtung angenommen, weil eine Parametervariation zeigte, dass damit Biegemomente ermittelt wurden, wie sie im Großversuch ermittelt wurden.

Tabelle 8: Modell 2: Modellparameter für die Pfahlelemente

Messnägel			Nägel		
Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
<u>Modellparameter der Stahlgliedes</u>					
Querschnitt	[m ²]	2.38e-3	Querschnitt	[m ²]	3.8e-4
E-Modul	[Pa]	206e9	E-Modul	[Pa]	206e9
Pl. Fließgrenze	[N]	1306e3	Pl. Fließgrenze	[N]	209e3
Flächenträgheitsmomente I _y , I _z	[m ⁴]	4.49e-7	Flächenträgheitsmomente I _x , I _y	[m ⁴]	1.15e-8
<u>Modellparameter der Vermörtelung</u>					
Maximal aufnehmbare Schubkraft „shear coupling spring cohesion“	[N/m]	2.15e4	Maximal aufnehmbare Schubkraft „shear coupling spring cohesion“	[N/m]	1.55e4
Steifigkeit der Vermörtelung in Achsrichtung „shear coupling spring stiffness“	[N/m/m]	3.8e9	Steifigkeit der Vermörtelung in Achsrichtung „shear coupling spring stiffness“	[N/m/m]	2.7e9
Reibungswinkel in Achsrichtung „shear coupling spring friction angle“	[°]	40.5	Reibungswinkel in Achsrichtung „shear coupling spring friction angle“	[°]	40.5
Maximal aufnehmbare Normalkraft „normal coupling spring cohesion“	[N/m]	2e3	Maximal aufnehmbare Normalkraft „normal coupling spring cohesion“	[N/m]	2e3
Steifigkeit der Vermörtelung in Achsrichtung „normal coupling spring stiffness“	[N/m/m]	6e8	Steifigkeit der Vermörtelung in Achsrichtung „normal coupling spring stiffness“	[N/m/m]	9e8
Reibungswinkel in Normalrichtung „normal coupling spring friction angle“	[°]	40.5	Reibungswinkel in Normalrichtung „normal coupling spring friction angle“	[°]	40.5

5.5.2.3. Modellparameter für die Schalenelemente

Die Spritzbetonschale wurde mit Hilfe von Schalenelementen dargestellt. Die Tabelle 7 zeigt die angesetzten Modellparameter.

5.6. Modell 3 – Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen, Berücksichtigung der Material-Entfestigung

5.6.1. Modelleigenschaften

Beim Modell 3 wurde das „strain softening“ Stoffmodell für den Boden verwendet. Dadurch wurde die Entfestigung der bodenphysikalischen Parameter bei Belastung über der Versagensgrenze (entlang der Gleitfläche) berücksichtigt.

Das Modell 3 wurde analog zum Modell 1A aufgebaut. Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Ankerelementen, die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen modelliert.

5.6.2. Modellparameter

5.6.2.1. Stoffmodell, bodenphysikalische Parameter

Generell gilt, dass ein höherwertiges Stoffmodell das Verhalten des Bodens wirklichkeitsnäher beschreibt. Ein derartiges Stoffmodell erfordert die Kenntnis weiterer bodenmechanischer Parameter. Im vorliegenden Fall sind zusätzlich die Restwerte des Reibungswinkels, des Dilatanzwinkels und der Kohäsion erforderlich.

Der Versuchsboden wurde ausführlich untersucht, der Reibungswinkel und der Restreibungswinkel wurden im parallelgeführten Rahmenschergerät ermittelt (Gäßler, 1987). Die Modellparameter wurden entsprechend der Tabelle 3 angesetzt.

Der Reibungswinkel nimmt im Modell 3 nach der Bruchdehnung vom Spitzenwert 42° auf den Restreibungswinkel von $40,5^\circ$ ab. Die Entfestigung wurde auch bei der Kohäsion berücksichtigt. Die bodenphysikalischen Parameter wurden während der Berechnung schrittweise, bezogen auf die erfassten Schubverzerrungen abgemindert. Die Tabelle 9 zeigt die angesetzten bodenphysikalischen Parameter.

Tabelle 9: Modell 3: Die angesetzten bodenphysikalischen Parameter

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
Dichte	[kg/m ³]	1560			
E-Modul	[MPa]	50			
Poisson – Zahl	[-]	0,25			
Reibungswinkel	[°]	42.0	Restreibungswinkel	[°]	40.5
Dilatanz	[°]	12.0	Restdilatanz	[°]	10.5
Kohäsion	[kPa]	5,5	Restkohäsion	[kPa]	0

5.6.2.2. Modellparameter für die Spritzbetonschale

Die Spritzbetonschale wurde im Modell 3 mit Hilfe von Schalenelementen modelliert. Die Modellparameter für die Schalenelemente der Spritzbetonschale sind beim Modell 3 identisch mit jenen in den Modellen 1A, 1B und 2. (siehe Tabelle 7)

5.6.2.3. Modellparameter für die Bodennägel

Die Bodennägel wurden im Modell 3 mit Hilfe von Ankerelementen modelliert. Die Modellparameter der Ankerelemente entsprechen jenen der Modelle 1A und 1B. (siehe Tabelle 6)

5.7. Modell 4 – Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen, Spritzbetonschale mit Hilfe von Kontinuumselementen

5.7.1. Modelleigenschaften

Itasca (2009) empfiehlt bei dicken, plattenartigen Konstruktionen anstelle von Schalenelementen Kontinuumselemente einzusetzen. Beim Modell 4 wurde untersucht, ob ein Modell mit Kontinuumselementen für die Spritzbetonschale gegenüber einem Modell mit konventionellen Schalenelementen tatsächlich Vorteile besitzt. Die Bodennägel wurden bei Modell 4 mit Hilfe von Ankerelementen dargestellt.

Mit der Modellierung der Spritzbetonschale mit Hilfe von Kontinuumselementen lässt sich die Verbindung zwischen den Bodennägeln und der Spritzbetonschale realitätsnaher gestalten.

5.7.2. Modellparameter

5.7.2.1. Stoffmodell, bodenphysikalische Parameter

Im Modell 4 wurde die Materialentfestigung (strain softening Stoffmodell) berücksichtigt. Es wurden die gleichen bodenphysikalischen Parameter angesetzt, wie beim Modell 3 (siehe Tabelle 9).

5.7.2.2. Modellparameter für die Spritzbetonschale

Für die Modellierung der Spritzbetonschale wurde eine neue, 10 cm dicke Zone im kontinuumsmechanischen Modell definiert. Der Einbau der neuen Zone bedeutet eine geringfügige Veränderung der Modellgeometrie, dadurch wird aber die Vergleichbarkeit der Modellergebnisse mit jenen der Modelle 1 - 3 nicht beeinträchtigt.

Bei der Modellierung der Spritzbetonschale wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell verwendet. Die Verwendung des Stoffmodells erfordert die Kenntnis des Reibungswinkels und der Kohäsion (Modellparameter φ und c) des Betons der Spritzbetonschale. Die beiden Parameter können aus der Zug- und Druckfestigkeit des Spritzbetons abgeleitet werden. Bei der Berechnung wurden die Festigkeitseigenschaften des Spritzbetons mit der Festigkeitsklasse SpC 8/10 angesetzt.

Die Kohäsion und der Reibungswinkel können mit Hilfe des Mohr-Coulomb Bruchkriteriums ermittelt werden. Die Abbildung 27 zeigt die Ermittlung der Festigkeitsparameter der Spritzbetonschale.

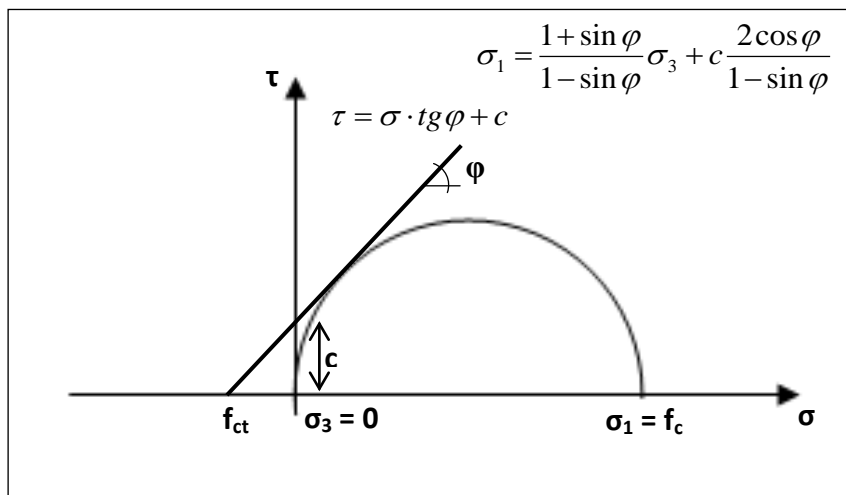


Abbildung 27: Ermittlung der Festigkeitsparameter der Spritzbetonschale mit Hilfe des Mohrschen Spannungskreises (aus Poisel, 2010)

Die Modellparameter φ und c ergeben sich wie folgt:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{c}{f_{ct}}$$

$$f_c = c \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

f_c : Druckfestigkeit des Spritzbetons

f_{ct} : Zugfestigkeit des Spritzbetons

Tabelle 10: Modell 4: Modellparameter für die Spritzbetonschale

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
Dichte	[kg/m ³]	2500	Reibungswinkel	[°]	49
E-Modul	[GPa]	5,0	Kohäsion	[MPa]	1,90
Poisson – Zahl	[-]	0,20	Zugfestigkeit	[MPa]	1,6

5.7.2.3. Modellparameter für die Bodennägel

Die Bodennägel wurden mit Hilfe von Ankerelementen dargestellt. Um die Ankerelemente mit der Spritzbetonschale verbinden zu können, wurden sie in zwei Teile aufgeteilt, auf einen 10 cm langen vorderen Teil, der innerhalb der

Spritzbetonschale liegt und auf einen hinteren, der im vernagelten Boden liegt. Die Kraftübertragung zwischen den beiden Nagelteilen wurde ermöglicht.

Nagelteil im Bodenkörper

Die Modellparameter des im Bodenkörper liegenden Nagelteiles entsprachen jenen der Modelle 1A und 1B. (siehe Tabelle 6)

Nagelteil in der Spritzbetonschale

Die Kraftübertragung zwischen dem Nagelkopf und der Spritzbetonschale wurde durch den vorderen Nagelteil gewährleistet.

Die maximal aufnehmbare Schubkraft („grout cohesion“) wurde entsprechend dem Durchstanzwiderstand des 10 cm dicken Spritzbetons angesetzt.

Im vorliegenden Fall musste nicht die Steifigkeit der Vermörtelung bestimmt werden, sondern die Steifigkeit des Kalottenplatte-Spritzbeton-Systems, die in erster Linie von der Nachgiebigkeit der Spritzbetonschale abhängig ist. Die Steifigkeit der Verankerung wurde wesentlich höher angenommen als die Steifigkeit der Vermörtelung.

Die Tabelle 11 zeigt die Modellparameter des vorderen Nagelteiles, die die Verbindung zwischen den Nägeln und der Spritzbetonschale bestimmen. Die weiteren Parameter des vorderen Nagelteiles (Materialeigenschaften des Stahlgliedes) stimmen mit den Parametern des hinteren Nagelteiles überein.

Tabelle 11: Modell 4: Modellparameter der Verbindung zwischen dem vorderen Nagelteil und der Spritzbetonschale

Parameter	Einheit	Wert
„grout cohesion“	[N/m]	1,5e6
„grout stiffness“	[N/m/m]	10e10

5.8. Modell 0 – Keine Spritzbetonschale, Darstellung der Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen

5.8.1. Modelleigenschaften

Das Modell 0 ohne Spritzbetonschale ist prinzipiell nicht zur Simulation der Mechanismen im Großversuch geeignet. Die Ergebnisse des Modells 0 dienen als Referenz (Extremwert) bei der Interpretation der Modellrechnungen 1A - 4.

5.8.2. Modellparameter

5.8.2.1. Stoffmodell, bodenphysikalische Parameter

Beim Modell 0 wurde das Mohr-Coulombsche Stoffmodell für den Boden verwendet. Die Modellparameter entsprechen jenen der Modelle 1A und 1B. (siehe Tabelle 5).

5.8.2.2. Modellparameter für die Bodennägel

Die Bodennägel wurden im Modell 3 mit Hilfe von Ankerelementen dargestellt. Die Modellparameter der Ankerelemente stimmten jenen der Modelle 1A und 1B überein.

6. Ergebnisse

6.1. Ergebnisse bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Die Ergebnisse der Modelle 1A, 2, 3 und 4 wurden mit folgenden Ergebnissen des Großversuches verglichen:

- ❖ Vergleich der Systemzustände
 - Die Verschiebungen der Netzknoten mit dem Verlauf der Verschiebung des Böschungskopfes und der größten unausgeglichenen Kraft
 - Die angezeigten Schubverzerrungen
 - Der Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Nägeln
- ❖ Vergleich des Verlaufes der Nagelkräfte in den Messnägeln mit den im Großversuch gemessenen Werten
- ❖ Vergleich des Verlaufes der Biegemomente in den Messnägeln mit den im Großversuch gemessenen Werten

Bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ wurden auch die Ergebnisse der Modellvarianten 1A und 1B verglichen.

6.1.1. Modelle 1A, 2, 3 und 4: Vergleich der Systemzustände

Im Gegensatz zum Großversuch kam es in den FLAC^{3D} Modellen unter der Flächenlast von $q = 150 \text{ kN/m}^2$ zu keinem Versagen. Bei allen vier Modellen wird ein stabiler Zustand erreicht.

6.1.1.1. Verschiebungsvektoren der Netzknoten bei der Laststufe 150 kN/m^2

Die Abbildung 28 zeigt die Verläufe der Verschiebung des Böschungskopfes und der größten unausgeglichenen Kraft („maximal unbalanced force“) in den Modellen 1A, 2, 3 und 4 bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$. Die beiden Verläufe wurden zur Beurteilung des Systemzustandes verwendet.

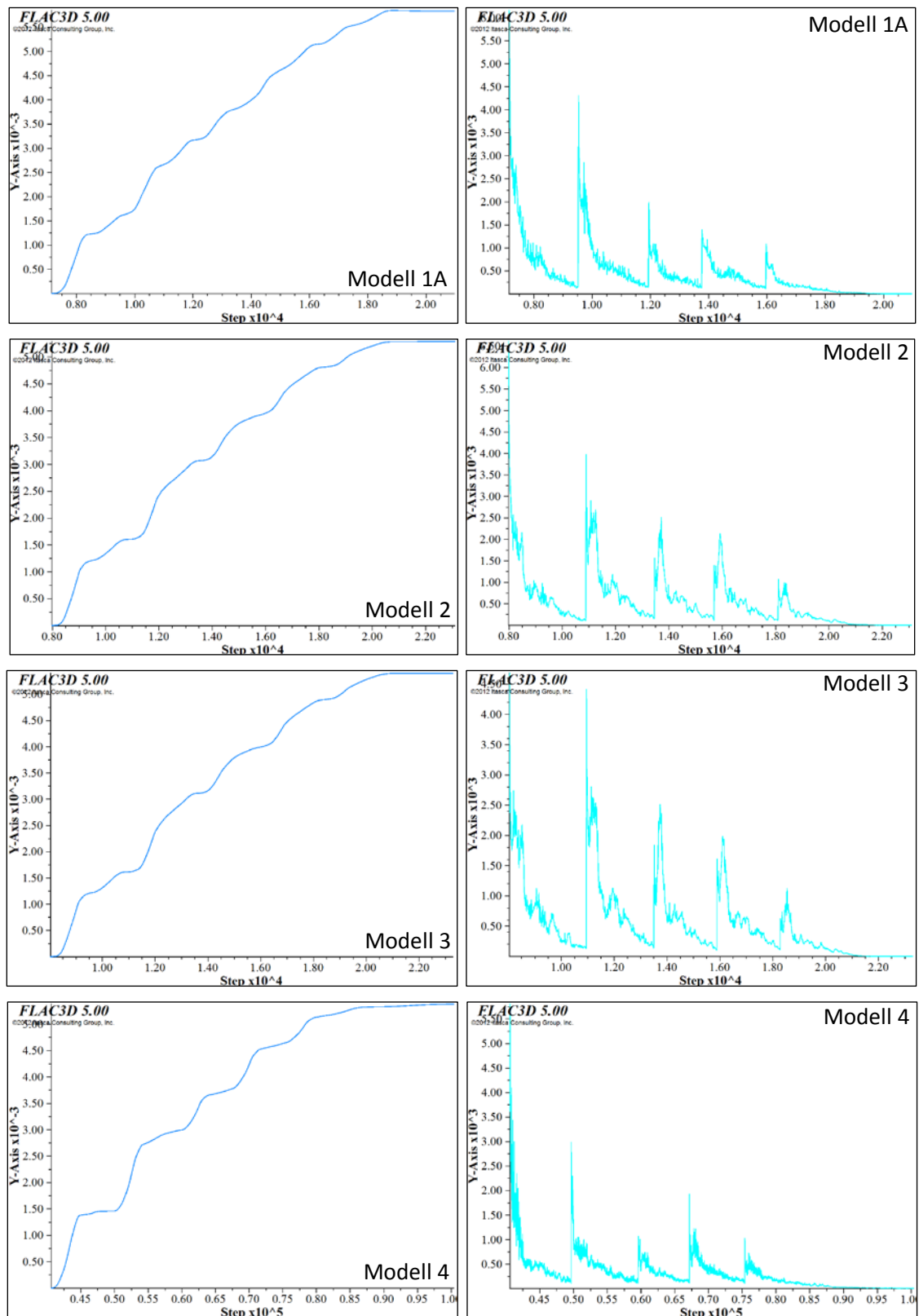


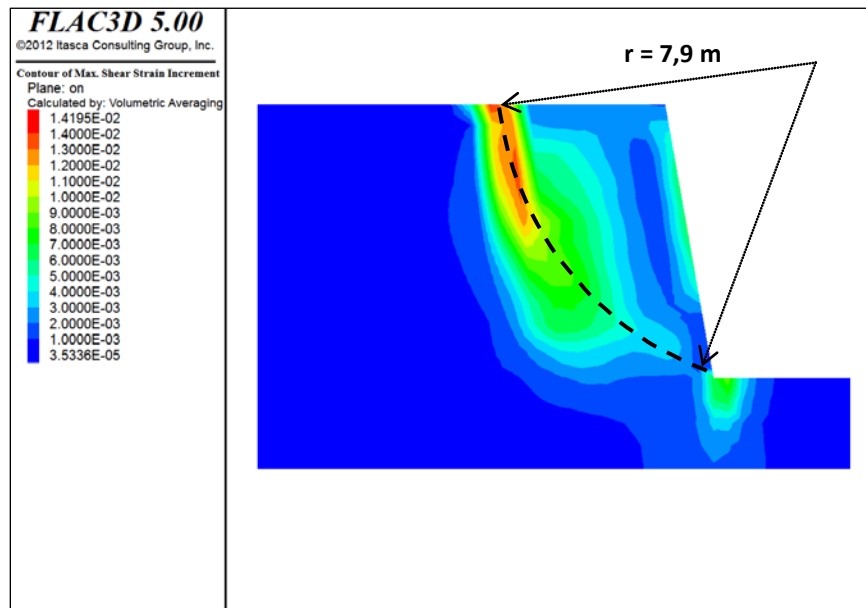
Abbildung 28: Modelle 1A, 2, 3 und 4: Verläufe der Verschiebung des Böschungskopfes und der größten unausgeglichenen Kraft

Es ist sowohl in den Verläufen der Verschiebung des Böschungskopfes, als auch in den Verläufen der größten unausgeglichenen Kraft eine Konvergenz zu erkennen. Alle vier

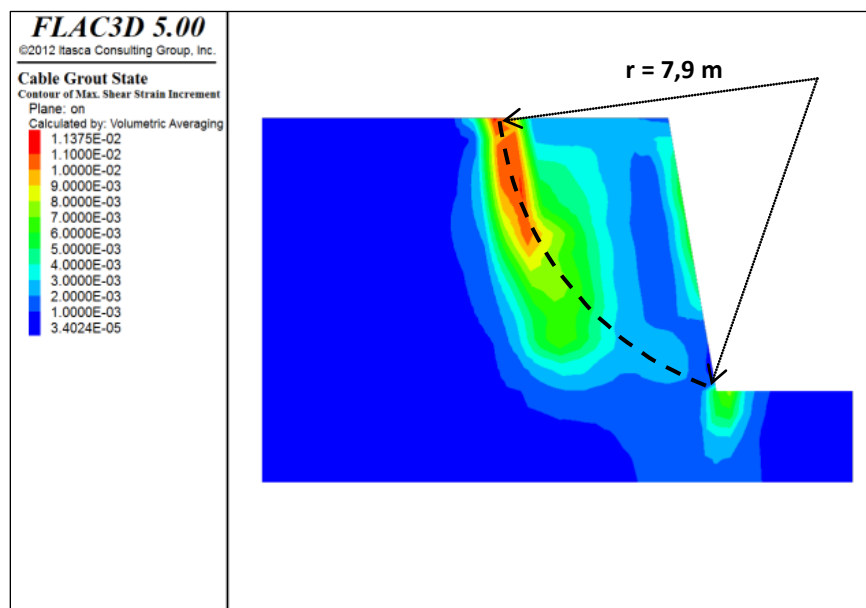
Modelle sind - im Gegensatz zum Großversuch - unter der Flächenlast $q = 150 \text{ kN/m}^2$ stabil.

6.1.1.2. Schubverzerrungen im vernagelten Bodenkörper

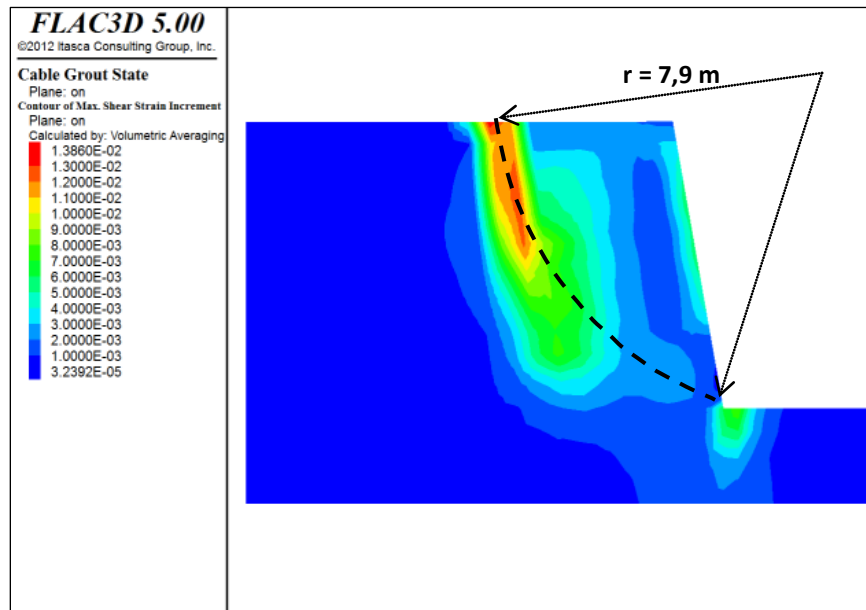
Die Abbildungen 29 - 32 zeigen die Konturplots der Hauptschubverzerrungen in den Modellen 1A, 2, 3 und 4 unter der Flächenlast von $q = 150 \text{ kN/m}^2$.



29. Abbildung: Modell 1A: Konturplot der Hauptschubverzerrungen bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$



30. Abbildung: Modell 2: Konturplot der Hauptschubverzerrungen bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$



31. Abbildung: Modell 3: Konturplot der Hauptschubverzerrungen bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

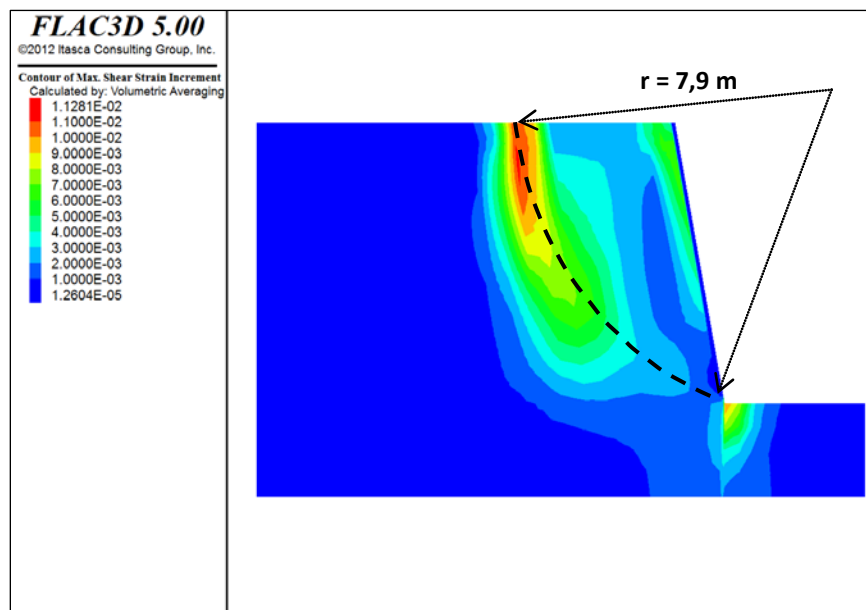


Abbildung 32: Modell 3: Konturplot der Hauptschubverzerrungen bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Obwohl es zu keinem Versagen des Systems kam, war die Scherzone bei allen vier Modellen bereits bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ erkennbar.

Die Form der während des Großversuchs entstandenen Scherzone ist in den Abbildungen 29 – 32 bei allen vier Modellen mit der schwarzen strichlierten Linie markiert. Gäßler (1987) gab die Form der Gleitfläche als Kreisbogen an. Der Radius des

Gleitkreises betrug etwa 7,9 m und verband den Fußpunkt der Wand mit der hinteren Kante der Streifenlast.

6.1.1.3. Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Bodennägeln

Die Abbildung 33 zeigt den Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Bodennägeln in den Modellen 1A, 2, 3 und 4 bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$.

Der Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Bodennägeln wird in FLAC^{3D} mit drei Farben angezeigt. Die blaue Farbe weist jene Bereiche der Nägel aus, bei denen bis zum betrachteten Zustand kein Versagen eingetreten ist. Die Bereiche, in denen ein Versagen der Verbindung in der aktuellen Berechnungsphase erfolgte, sind mit grüner Farbe, die Bereiche, in denen ein Versagen in einer der früheren Berechnungsphasen erfolgte, sind mit roter Farbe markiert.

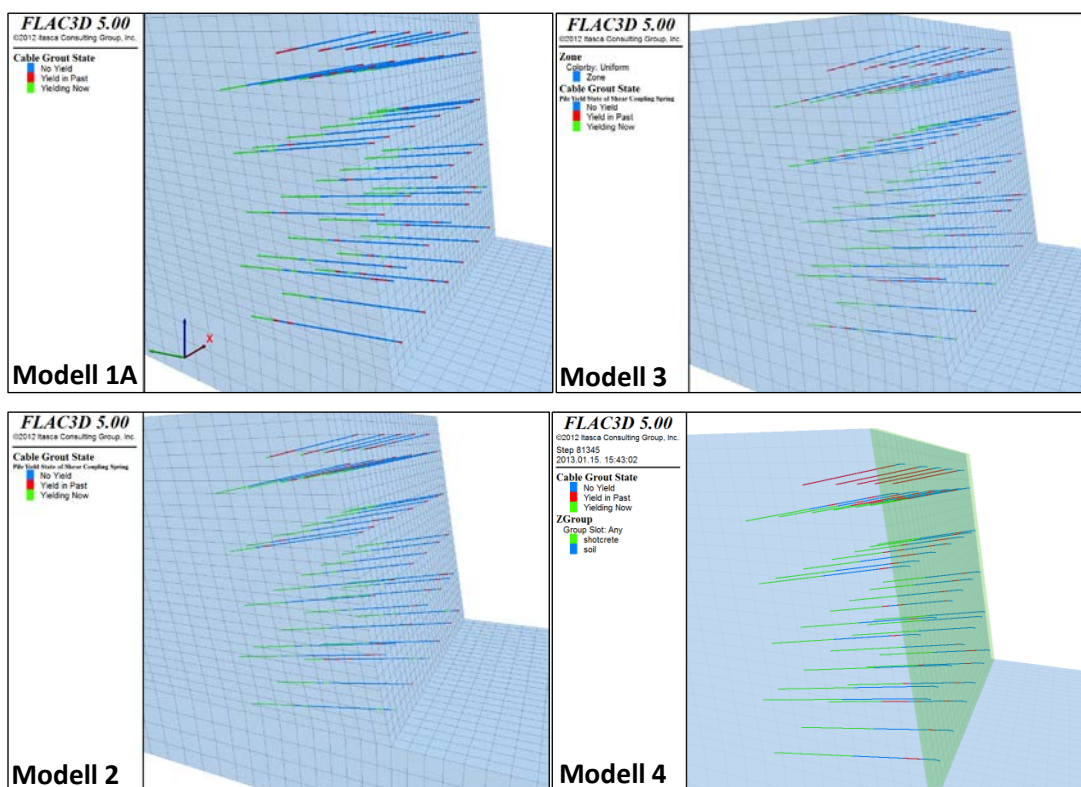


Abbildung 33: Modelle 1A, 2, 3 und 4: Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Nägeln bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$
 blau: kein Versagen bis der aktuelle Laststufe,
 grün: Versagen in der aktuellen Laststufe,
 rot: Versagen in einer der früheren Laststufen

Bei allen vier Modellen sind hellgrüne Bereiche bei den Nagelspitzen zu sehen, d.h. in diesen Bereichen wurde die maximal aufnehmbare Schubkraft erreicht.

6.1.2. Modelle 1A, 2, 3 und 4: Vergleich des Verlaufes der Nagelzugkräfte

6.1.2.1. Modell 1A

Die Abbildung 34 zeigt den numerisch ermittelten Verlauf der Nagelzugkräfte beim Modell 1A, bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$. Die roten Pfeile zeigen die Messnägel.

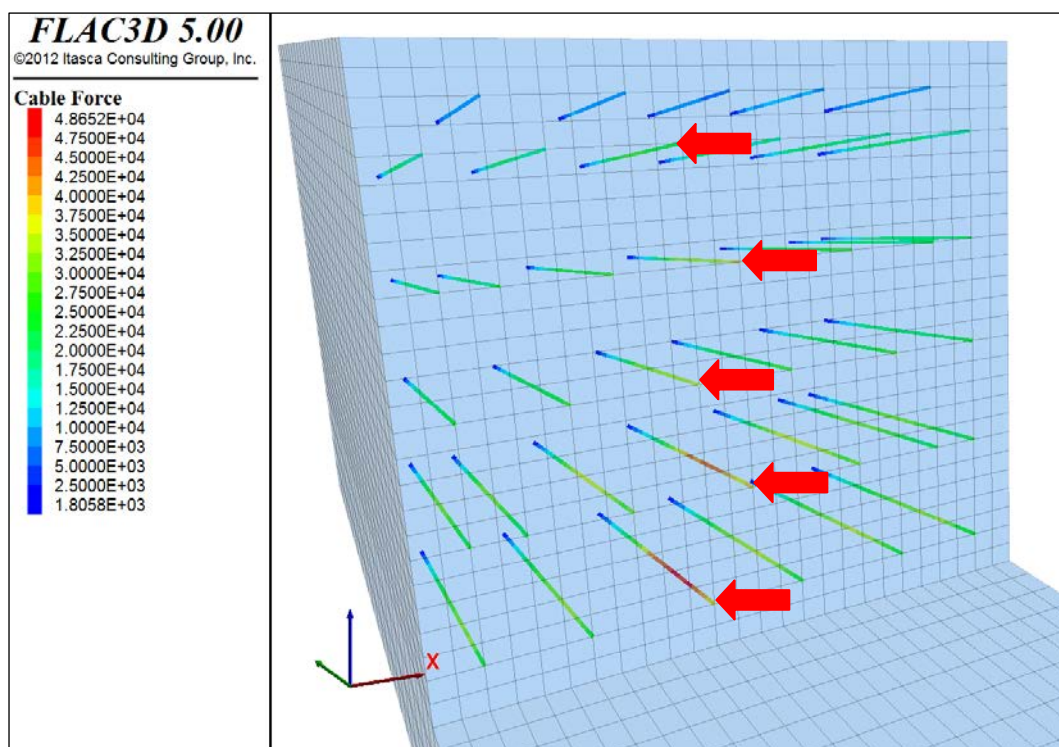


Abbildung 34: Modell 1A: Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Die Abbildung 35 zeigt den Versuchsverlauf, mit dem Anfangsbruchzustand und mit dem residuellen Bruchzustand.

Für die Betrachtung der Modellergebnisse werden die Nagelzugkräfte in den markierten Nägeln herangezogen. Die Verläufe der gerechneten und der im Großversuch gemessenen Nagelkräfte wurden wegen der besseren Vergleichbarkeit auf einem Diagramm dargestellt. Die Abbildung 36 zeigt den Vergleich der Verläufe der im Großversuch gemessenen und numerisch ermittelten Nagelkräfte in allen fünf Messnägeln.

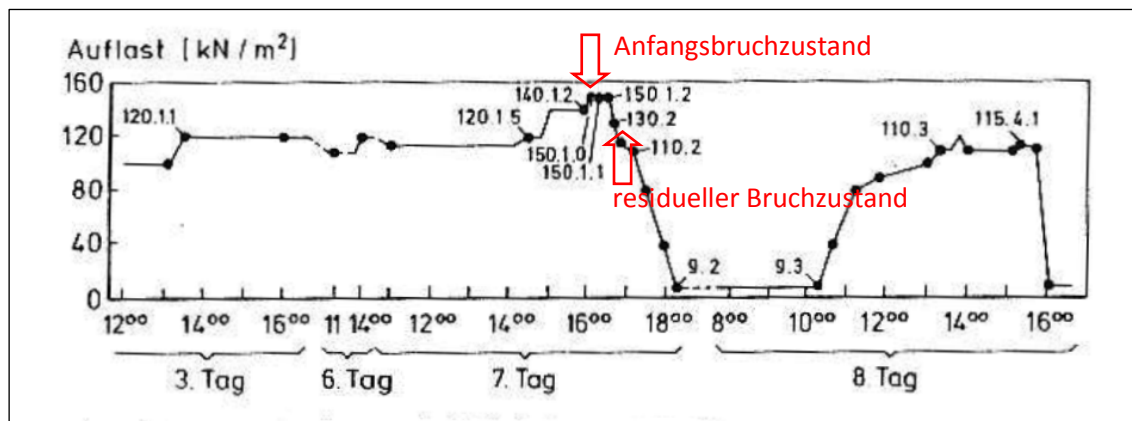


Abbildung 35: Versuchsverlauf mit dem Anfangsbruchzustand und mit dem residuellen Bruchzustand (aus Gäßler, 1987)

Wie die Abbildung 36 zeigt, nahmen alle Nägel während des Versuchs Zugkräfte zufolge der Vertikallast auf.

Die beiden oberen Messnägel (1. und 2.) zeigen im Vergleich zu den unteren drei einen unterschiedlichen Verlauf der im Großversuch gemessenen Nagelkraft. Bei den beiden oberen Messnägeln (1. und 2.) hat die gemessene Nagelkraft einen nahezu parabelförmigen Verlauf, während bei den unteren Messnägeln (3., 4. und 5.) die Nagelkraft monoton zur Spitze hin abnimmt. In der 1. und 2. Nagelreihe ist maximale Kraft in der Nagelmitte etwa zweifach größer als die Kraft am Nagelkopf. Dies lässt die Zuverlässigkeit der Nagelkraftmessungen in Frage stellen.

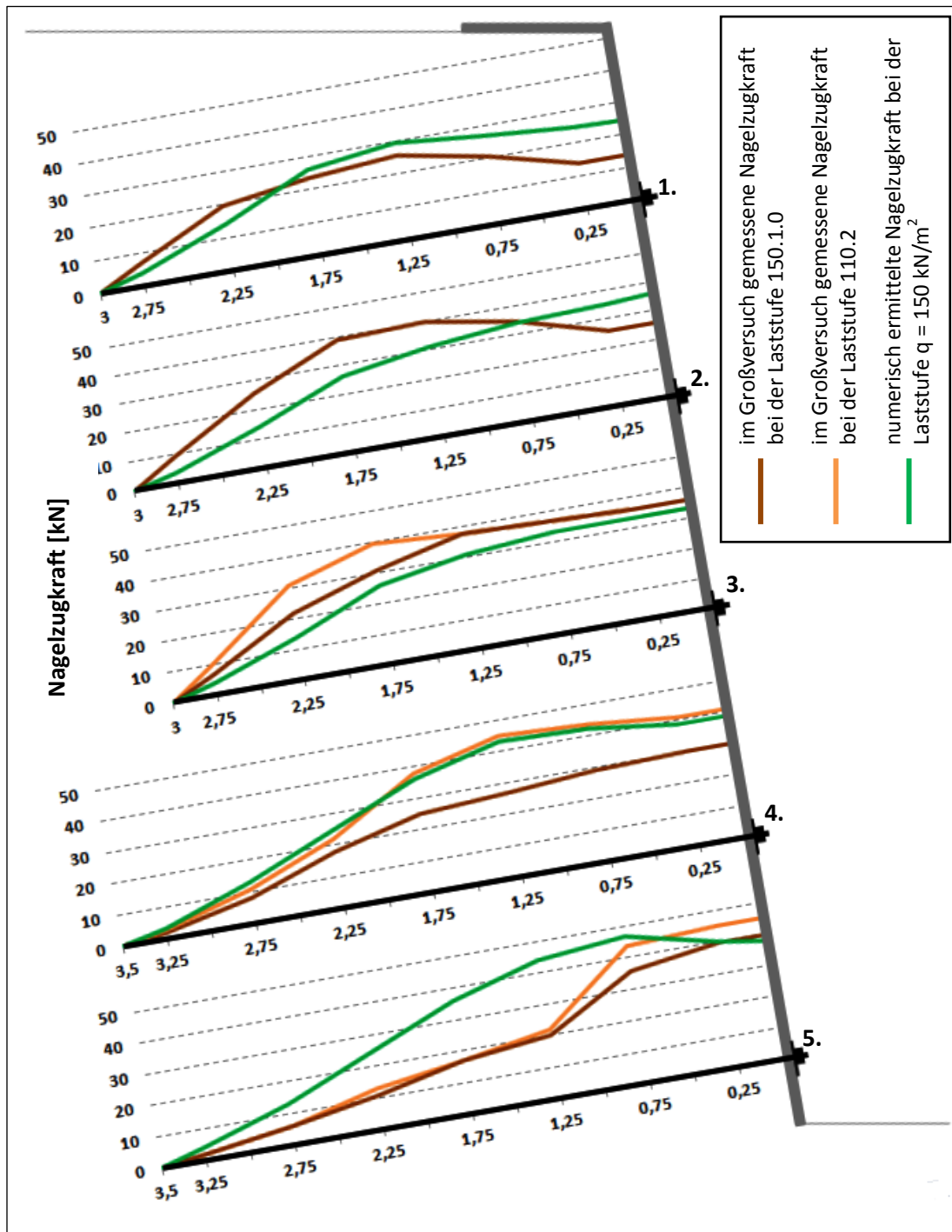


Abbildung 36: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 1A bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

Die numerisch ermittelten Nagelzugkräfte zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit den im Großversuch gemessenen Nagelzugkräften.

In der 2. und 3. Nagelreihe nimmt die numerisch ermittelte Nagelkraft bis zur Nagelspitze monoton ab. In der ersten und in den beiden unteren Nagelreihen ist ein geringer Zuwachs der Nagelkraft kurz hinter der Spritzbetonschale zu beobachten.

Der Verlauf der numerisch ermittelten Nagelzugkraft in der 4. Nagelreihe stimmt fast vollkommen mit dem Nagelkraftverlauf im residuellen Bruchzustand überein.

Vergleich der gemessenen und der numerisch ermittelten Nagelzugkräfte

Der Vergleich der im Großversuch gemessen und numerisch ermittelten Nagelzugkräfte erfolgt nach den folgenden Kriterien mit Hilfe der Tabelle 12:

- Vergleich der Spitzenwerte der im Großversuch gemessenen und der numerisch ermittelten Nagelkraftverläufe
- Vergleich der über der Nagellänge integrierten Nagelkraft
- Vergleich der durchschnittlichen Nagelkraft
(Die über der Nagellänge integrierte Nagelkraft dividiert durch die Nagellänge)

Tabelle 12: Modell 1A: Vergleich der im Großversuch gemessenen und numerisch ermittelten Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

	Spitzenwert der Nagelkraft [kN]			Integrierte Nagelkraft [kN·m]			Durchschnittliche Nagelkraft [kN]		
	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung
1.	26	29	14%	55	62	13%	18	20	13%
2.	40	36	-9%	86	72	-16%	28	24	-16%
3.	38	33	-11%	84	70	-16%	28	23	-16%
4.	32	43	36%	69	100	45%	19	33	45%
5.	40	46	17%	65	104	58%	18	34	58%
Σ	186	190	2%	361	410	13%	114	136	13%

6.1.2.2. Modell 2

Die Abbildung 37 zeigt den Verlauf der Nagelkräfte im Modell 2, bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$. Der numerisch ermittelte Verlauf wird mit den im Großversuch gemessenen Nagelkräften verglichen.

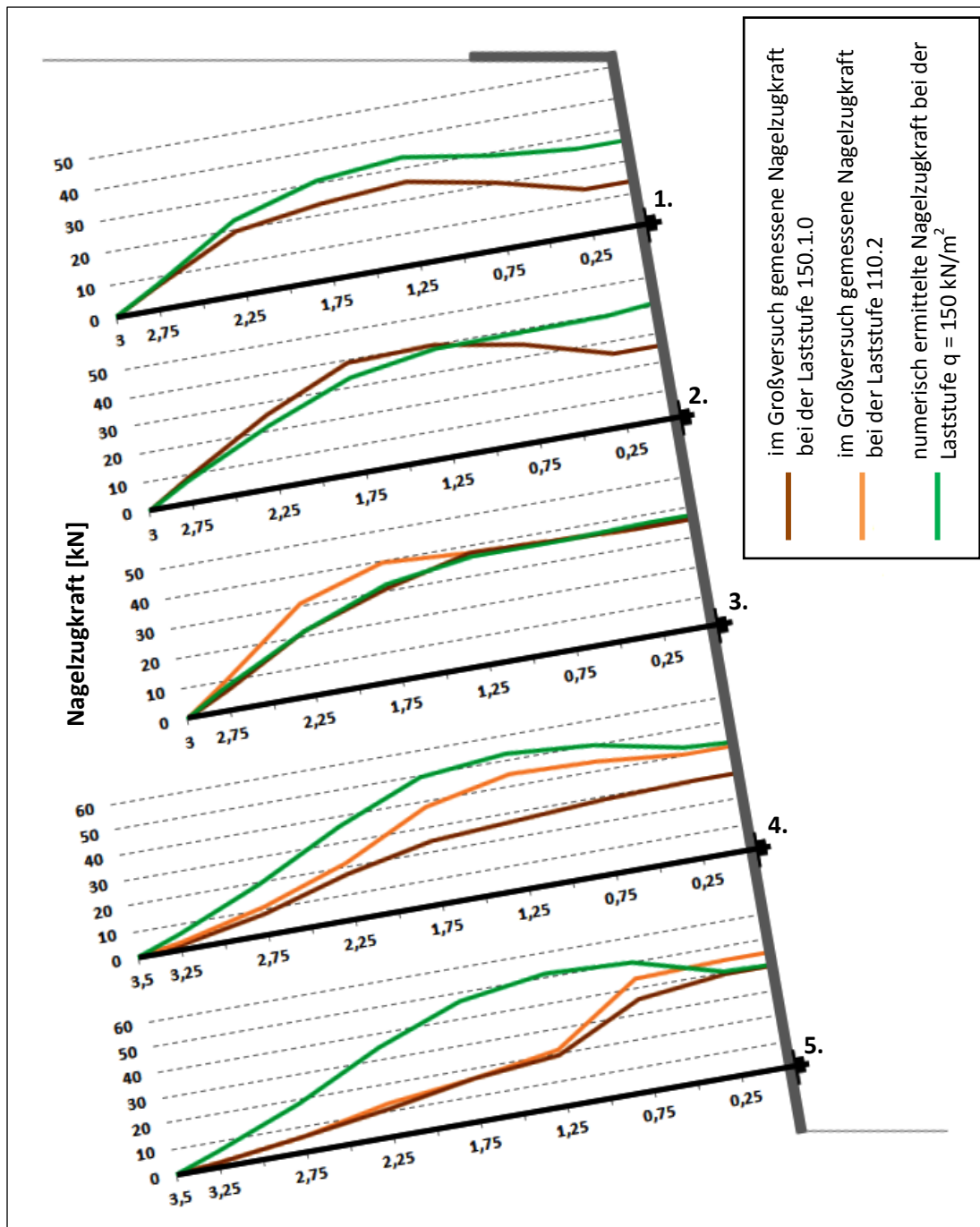


Abbildung 37: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 2 bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

In den Messnägeln der 2. und 3. Reihe fällt die Nagelzugkraft nach einer Strecke mit konstantem Verlauf hinter der Spritzbetonschale monoton ab. In der 1. Nagelreihe und in den beiden unteren Nagelreihen (4. und 5.) steigt die Nagelkraft hinter der Spritzbetonschale an, der Spitzenwert wird in einer Entfernung von etwa 1,2 m hinter der Spritzbetonschale erreicht.

Die numerisch ermittelten Nagelkräfte stimmen bei den oberen drei Nagelreihen mit den im Großversuch gemessenen Ergebnissen relativ gut überein. Bei der 2. und 3. Nagelreihe ergibt sich ein geringer Unterschied zwischen den beiden Verläufen. In der 4. und 5. Nagelreihe sind aber die numerisch ermittelten Nagelkräfte deutlich höher als die Messergebnisse im Großversuch.

Vergleich der gemessenen und der numerisch ermittelten Nagelzugkräfte

Tabelle 13: Modell 2: Vergleich der im Großversuch gemessenen und numerisch ermittelten Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

	Spitzenwert der Nagelkraft [kN]			Integrierte Nagelkraft [kN·m]			Durchschnittliche Nagelkraft [kN]		
	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung
1.	26	33	30%	55	75	36%	18	25	36%
2.	40	41	2%	86	90	4%	28	30	4%
3.	38	37	0%	84	85	1%	28	28	1%
4.	32	53	66%	69	129	86%	19	38	86%
5.	40	51	29%	65	124	89%	18	35	89%
Σ	186	217	17%	361	504	39%	114	158	39%

6.1.2.3. Modell 3

Die Abbildung 38 zeigt die Verläufe der numerisch ermittelten und im Großversuch gemessenen Nagelkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$.

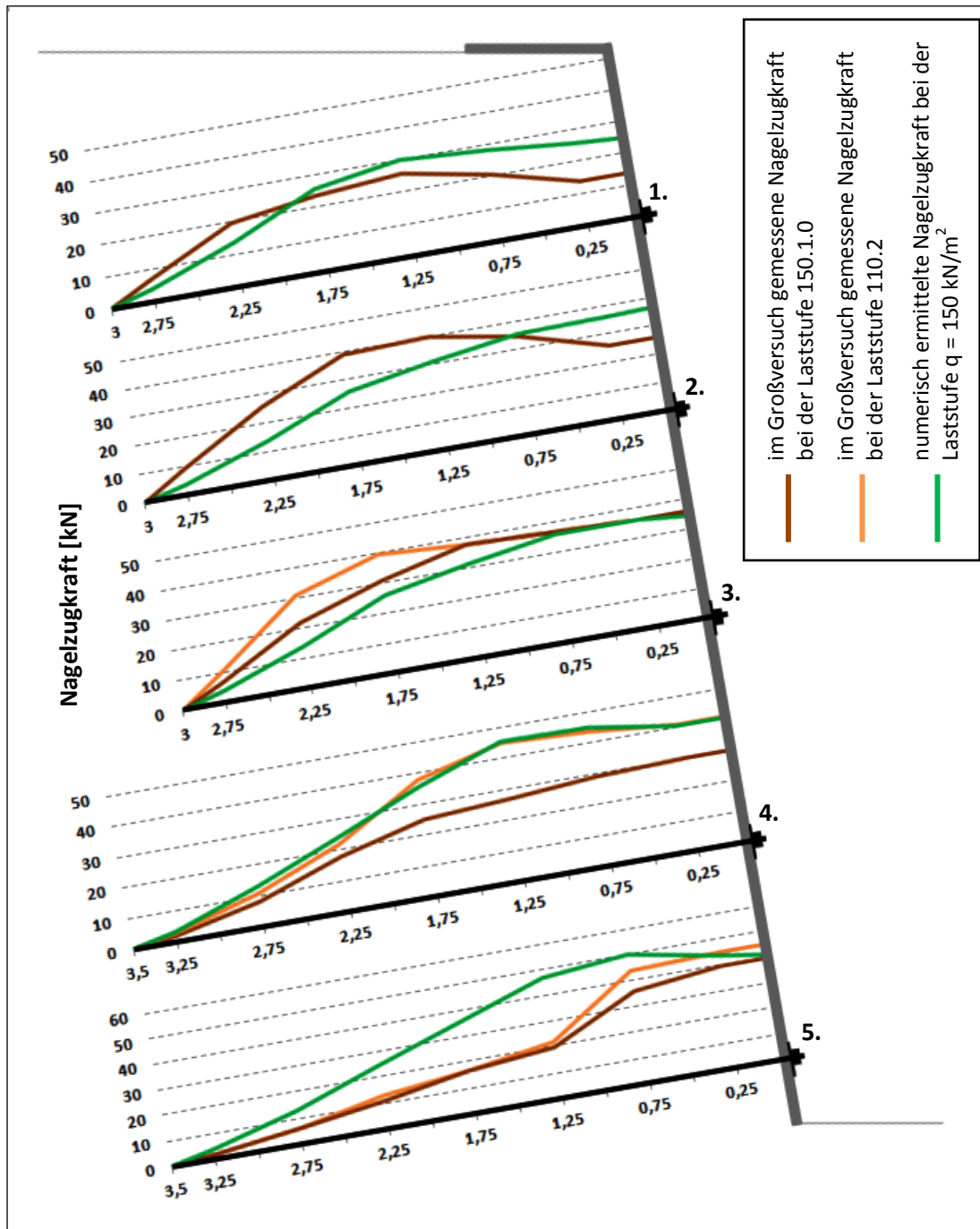


Abbildung 38: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 3 bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

Der Verlauf der numerisch ermittelten Nagelkräfte beim Modell 3 ist annähernd gleich wie beim Modell 1A. Das Modell 3 zeigt etwas höhere Nagelkräfte als das Modell 1A.

Vergleich der gemessenen und der numerisch ermittelten Nagelzugkräfte

Tabelle 14: Modell 3: Vergleich der im Großversuch gemessenen und numerisch ermittelten Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

	Spitzenwert der Nagelkraft [kN]			Integrierte Nagelkraft [kN·m]			Durchschnittliche Nagelkraft [kN]		
	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung
1.	26	30	15%	55	63	15%	18	21	15%
2.	40	36	-8%	86	73	-14%	28	24	-14%
3.	38	36	-5%	84	73	-13%	28	24	-13%
4.	32	45	42%	69	103	49%	19	34	49%
5.	40	50	25%	65	108	65%	18	36	65%
Σ	186	198	6%	361	423	17%	114	141	17%

6.1.2.4. Modell 4

Die Abbildung 39 zeigt den Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen Nagelkräfte und der Ergebnisse des Modells 4 bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$.

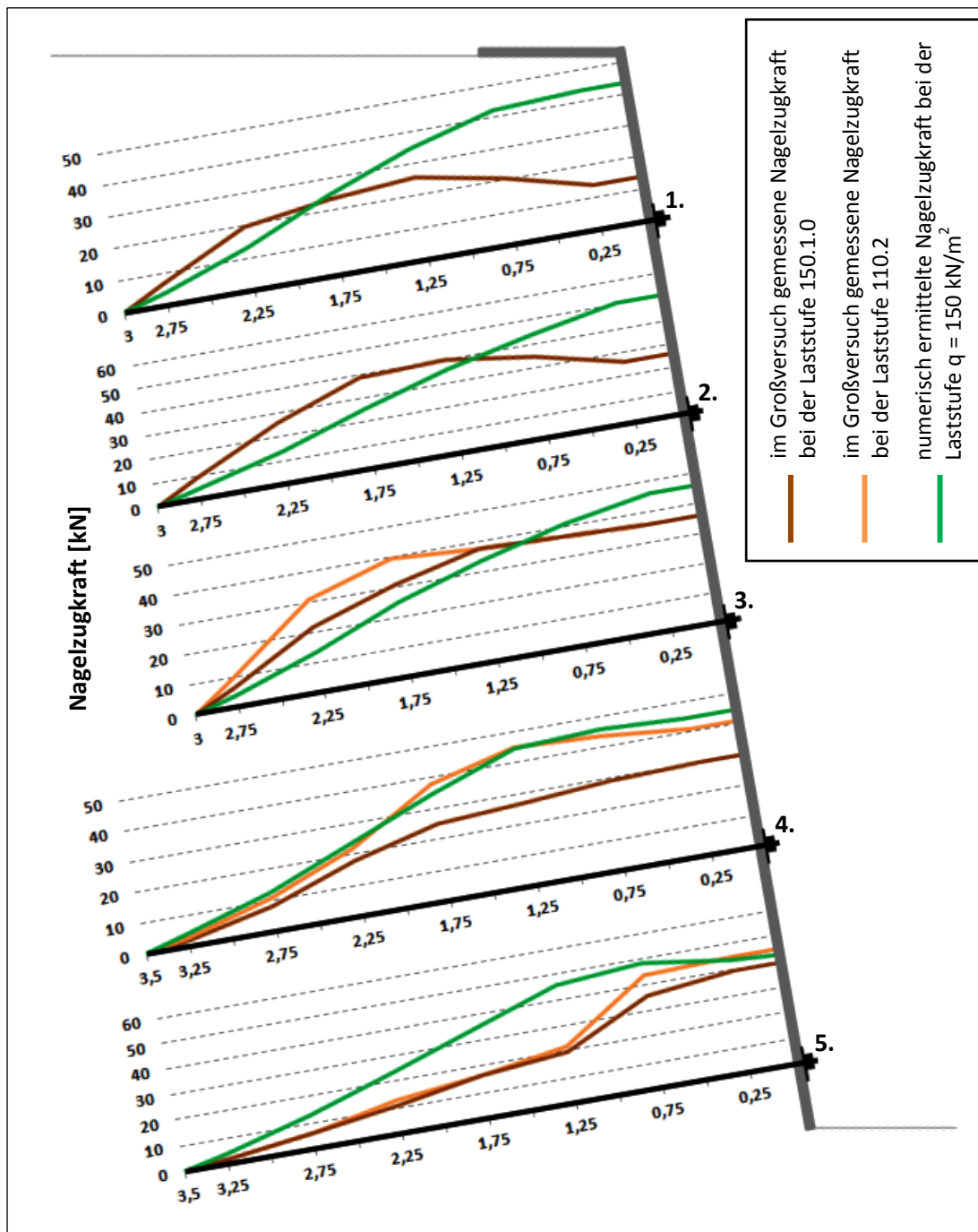


Abbildung 39: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 4 bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

Das Modell 4 zeigt bei den oberen drei Nagelreihen einen unterschiedlichen Nagelkraftverlauf als die Modelle 1A, 2 und 3. Die Nagelkraft fällt monoton, nahezu linear bis zur Nagelspitze ab.

Der Verlauf der Nagelkraft zeigt bei den beiden unteren Nagelreihen eine relativ gute Übereinstimmung mit jenem der Modelle 1A und 3.

Vergleich der gemessenen und der numerisch ermittelten Nagelzugkräfte

Tabelle 15: Modell 4: Vergleich der im Großversuch gemessenen und numerisch ermittelten Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

	Spitzenwert der Nagelkraft [kN]			Integrierte Nagelkraft [kN·m]			Durchschnittliche Nagelkraft [kN]		
	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung	gemessen	gerechnet	Abweichung
1.	26	43	68%	55	81	47%	18	27	47%
2.	40	51	28%	86	86	0%	28	28	0%
3.	38	46	22%	84	81	-3%	28	27	-3%
4.	32	46	44%	69	105	51%	19	30	51%
5.	40	48	21%	65	106	62%	18	30	62%
Σ	186	236	27%	361	461	27%	114	143	27%

6.1.2.5. Vergleich des Verlaufes der Nagelzugkräfte

bei den Modellen 1A, 2, 3 und 4

Bei der Dimensionierung einer Nagelwand wird für die Bestimmung des erforderlichen Nageldurchmessers der Spitzenwert der Nagelzugkraft herangezogen. Bei der Verifikation der Boden-Nagel Modelle ist der Spitzenwert der angezeigten Nagelkraft ausschlaggebend. Die Tabelle 16 zeigt den Vergleich der Spitzenwerte der numerisch ermittelten und im Großversuch gemessenen Nagelzugkräfte.

Tabelle 16: Vergleich der Spitzenwerte der numerisch ermittelten und der im Großversuch gemessenen Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Spitzenwert der Nagelzugkraft [kN]					
Nagelreihe	Modell 1A	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Großversuch
1.	29	33	30	43	26
2.	36	41	36	51	40
3.	33	37	36	46	38
4.	43	53	45	46	32
5.	46	51	50	48	40
Σ	190	217	198	236	186

In der obersten und in den beiden unteren Nagelreihen zeigen alle vier numerischen Modellen höhere Werte der Nagelzugkraft als die Messergebnisse im Großversuch. In der 2. und 3. Nagelreihe zeigt das Modell 4 höhere Werte, die Ergebnisse der Modelle 1A, 2 und 3 stimmen relativ gut mit den Messergebnissen im Großversuch überein.

Die Betrachtung einzelner Spitzenwerte ist für den Vergleich des Verlaufes der Nagelzugkräfte in den verschiedenen Modellen ungeeignet. Aus diesem Grund wurden neben den Spitzenwerten auch die Integrale der Nagelkraft über der Nagellänge und die durchschnittliche Nagelkraft für den Vergleich herangezogen.

Die über der Nagellänge integrierte Nagelzugkraft hat keine Bedeutung für die Bemessung von Nagelwänden, ist aber für den Vergleich der Nagelkraftverläufe gut geeignet. Die Tabelle 17 zeigt die über der Nagellänge integrierte Nagelkraft.

Tabelle 17: Vergleich der Integrale der numerisch ermittelten und im Großversuch gemessenen Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Integrale der Nagelzugkraft [kN]					
Nagelreihe	Modell 1A	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Versuch
1.	62	75	63	81	55
2.	72	90	73	86	86
3.	70	85	73	81	84
4.	100	129	103	105	69
5.	104	124	108	106	65
Σ	410	504	423	461	361

Die durchschnittliche Nagelzugkraft ist der Quotient der über der Nagellänge integrierten Nagelkraft durch die Nagellänge.

Tabelle 18: Vergleich der numerisch ermittelten und der im Großversuch gemessenen durchschnittlichen Nagelzugkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Durchschnittliche Nagelzugkraft [kN]					
Nagelreihe	Modell 1A	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Versuch
1.	20	25	21	27	18
2.	24	30	24	28	28
3.	23	28	24	27	28
4.	33	38	34	30	19
5.	34	35	36	30	18
Σ	136	158	141	143	114

Auch im Vergleich der integrierten Nagelzugkräfte und im Vergleich der durchschnittlichen Nagelzugkräfte zeigen die 1. bzw. die 4. und 5. Nagelreihen höhere Werte als die Messergebnisse im Großversuch.

6.1.3. Modell 2: Verlauf der Biegemomente

Die Darstellung der Bodennägel mit Hilfe von Pfahlelementen ermöglicht die Betrachtung des Verlaufes der Biegemomente in den Messnägeln.

Die Abbildung 40 zeigt den Verlauf der Biegemomente bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$. Die numerisch ermittelten Verläufe werden mit den im Großversuch gemessenen Ergebnissen verglichen.

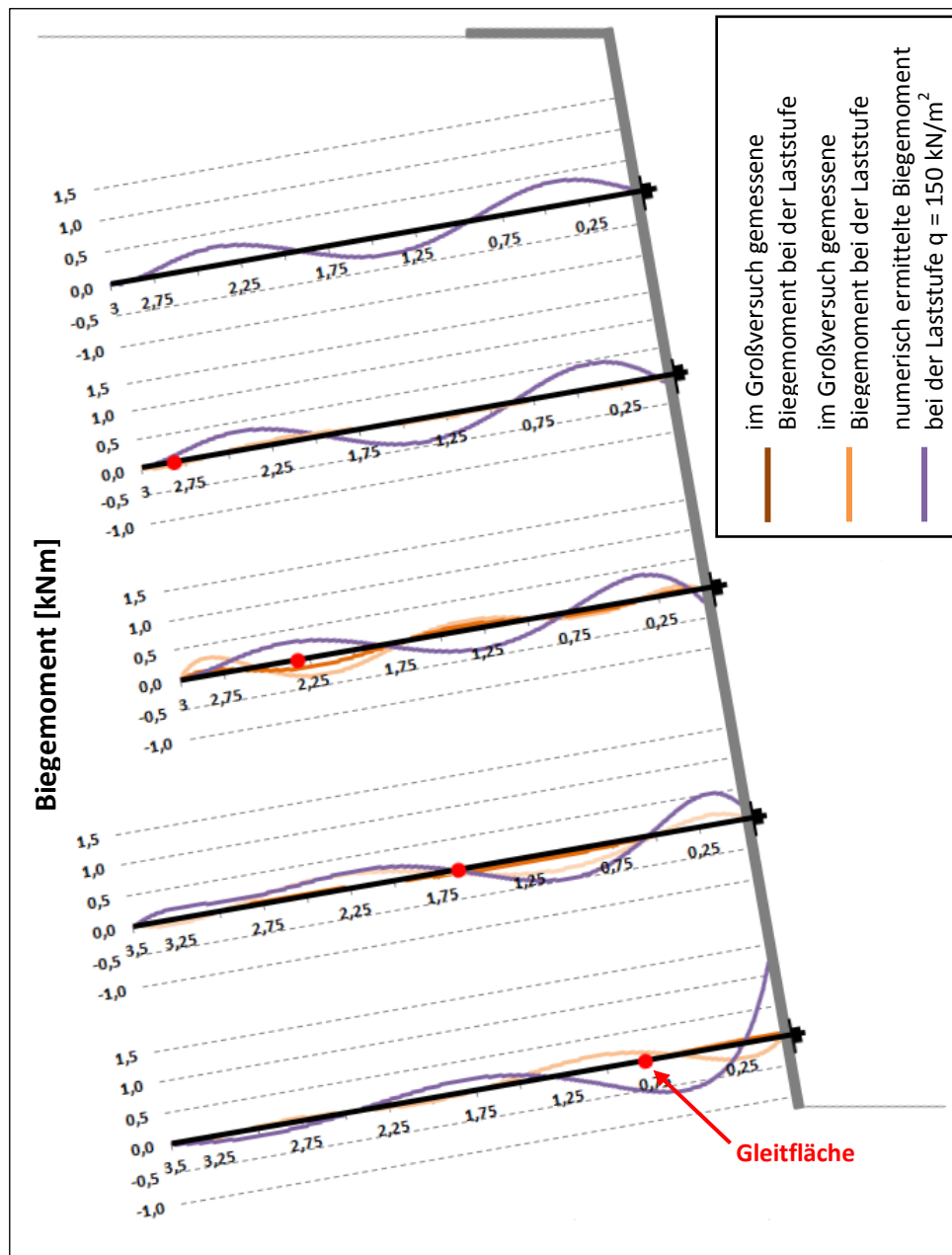


Abbildung 40: Modell 2: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Violett: Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$) Biegemomente in den Messnägeln

Der Messnagel in der 1. Nagelreihe zeigte während des Großversuchs auf keiner Laststufe eine Biegebeanspruchung, der Messnagel in der 2. Nagelreihe zeigte im Anfangsbruchzustand (bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$) keine, im residuellen Bruchzustand eine geringe Biegebeanspruchung an.

Alle Messnägel des Modells 2 zeigen eine Biegebeanspruchung an. Der Verlauf der numerisch ermittelten Biegemomente zeigt nur eine ungefähre Übereinstimmung mit den Messergebnissen im Großversuch. In den Messnägeln des Modells 2 ergaben sich höhere Biegemomente als in den Messnägeln im Großversuch.

6.1.4. Modelle 1A und 1B: Vergleich des Verlaufes der Nagelkräfte

Die Abbildung 41 zeigt den Vergleich des Verlaufes der Nagelzugkräfte bei den Modellvarianten 1A und 1B.

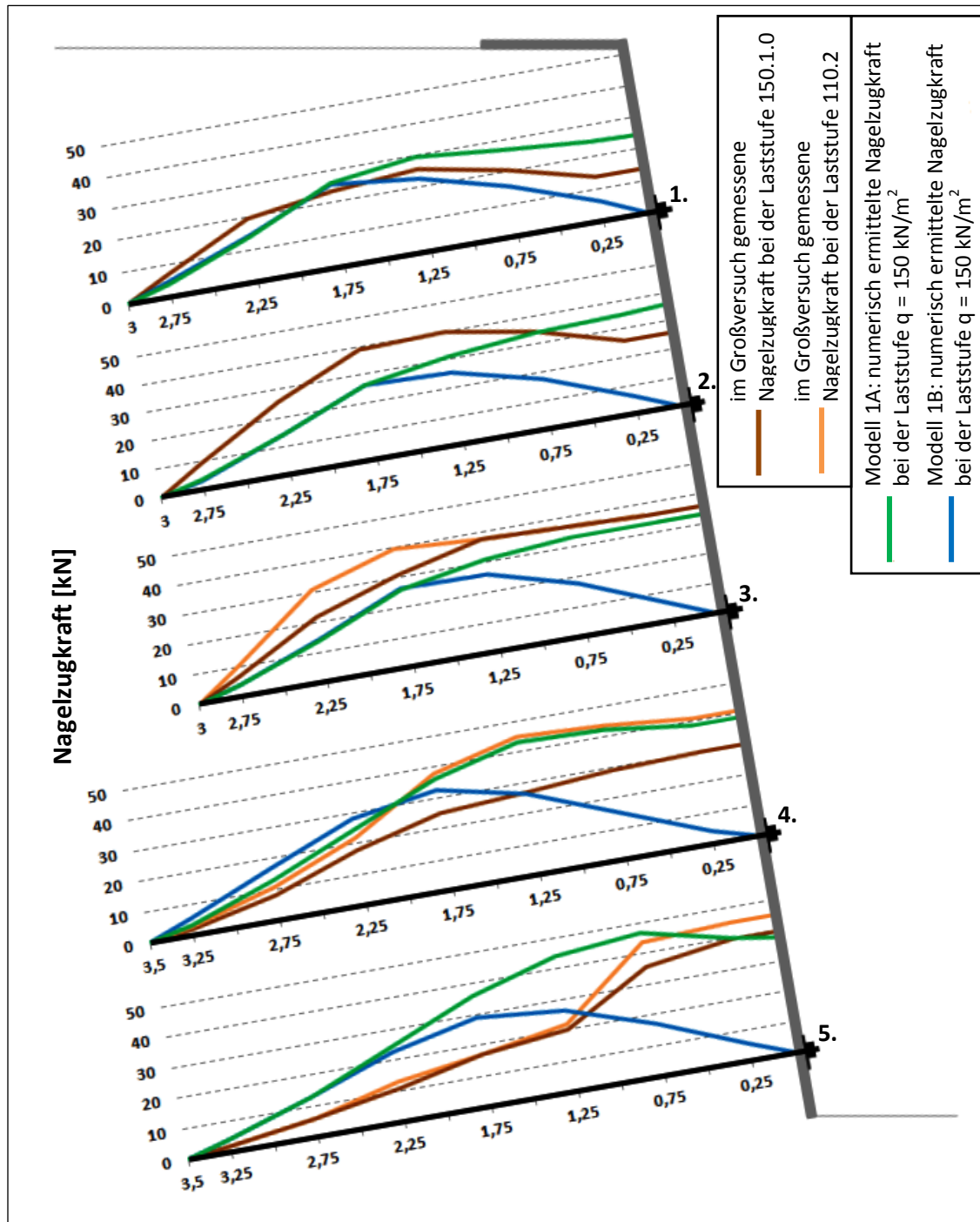


Abbildung 41: Modelle 1A und 1B: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und der numerisch ermittelten Nagelzugkräfte (Grün: Modell 1A, Blau: Modell 1B bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$) in den Messnägeln

Beim Modell 1A wurden die Ankerelemente mit den Schalenelementen kraftschlüssig verbunden, der Verlauf der Nagelzugkräfte zeigt eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen im Großversuch. Beim Modell 1B (keine Verbindung zwischen den Zug- und Schalenelementen vorgegeben) hat die Nagelzugkraft einen etwa parabelförmigen Verlauf.

6.2. Modellergebnisse im Anfangsbruchzustand

Keines der Modelle 1A, 2, 3 und 4 zeigte unter der Flächenlast von $q = 150 \text{ kN/m}^2$ ein Systemversagen. Daher wurde die Belastung um 5 kN/m^2 je Einzelberechnung bis zum Versagen der Modelle erhöht. Die Laststufe, bei der das System seine Stabilität verlor, wurde als Laststufe des Anfangsbruchzustandes betrachtet.

Es wurden

- ❖ die Versagensform des Modells,
- ❖ die Laststufe des Anfangsbruchzustandes (Tragfähigkeit des Modells),
- ❖ die Verformungen des vernagelten Bodenkörpers im Anfangsbruchzustand,
- ❖ der Verlauf der Nagelkräfte in den Messnägeln

bei den Modellen 1A, 2, 3 und 4 verglichen.

Die Modelle 0 und 1B wurden auch bis zum Versagen des Systems belastet. Dabei wurden die Tragfähigkeit und die Versagensform des Modells verglichen.

6.2.1. Das Modell 0

Die Abbildung 42 zeigt den Konturplot der Hauptschubverzerrungen, die Abbildung 43 den Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Bodennägeln bei der Laststufe des Anfangsbruchzustandes.

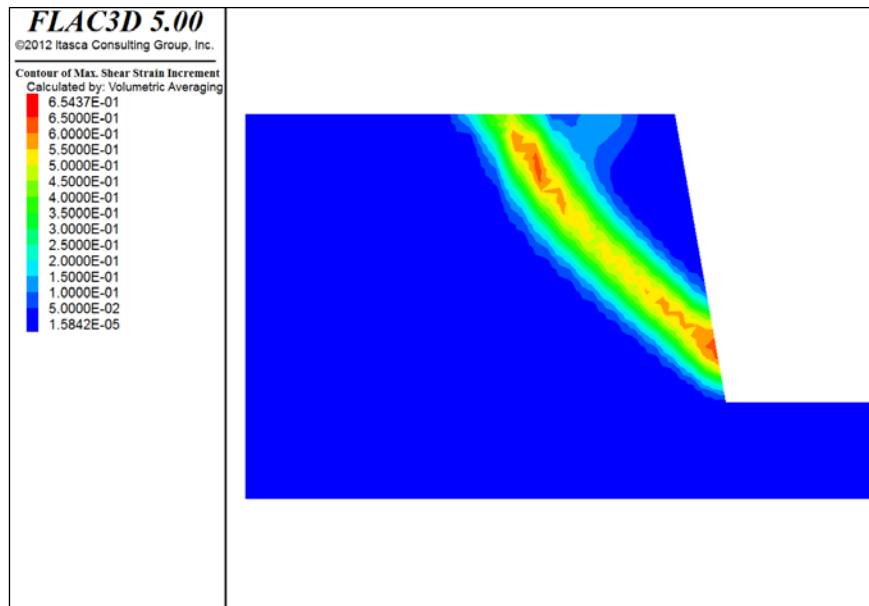


Abbildung 42: Modell 0: Konturplot der Hauptschubverzerrungen im Anfangsbruchzustand

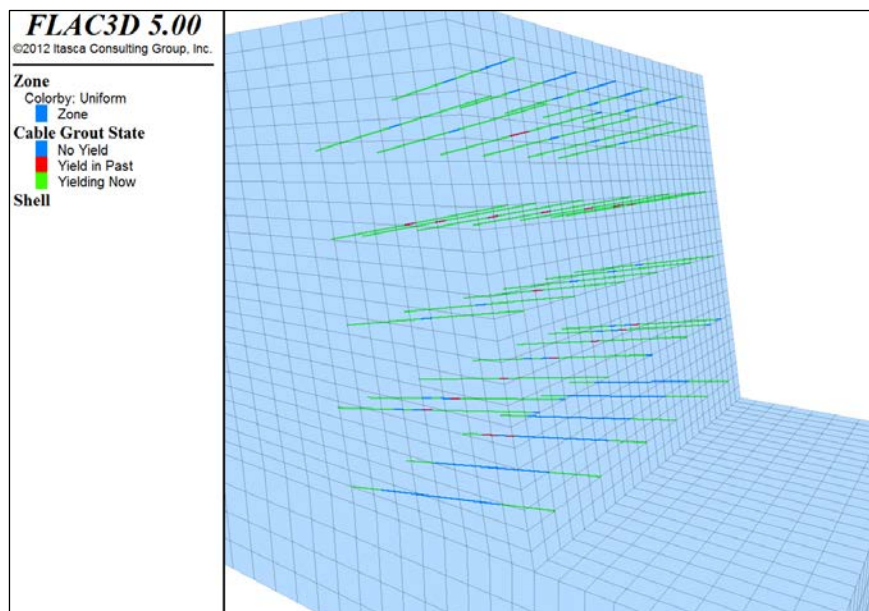


Abbildung 43: Modell 0: Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Bodennägeln im Anfangsbruchzustand

Das Modell 0 zeigte bei der Laststufe $q = 100 \text{ kN/m}^2$ ein Systemversagen. Die Gleitfläche ist nahezu gerade, im oberen Bereich leicht gekrümmt und schneidet die Ansichtsfäche der vernagelten Wand zwischen den beiden unteren Nagelreihen. Es ist die typische keilförmige Versagensfigur des Grundbruchs unter der Streifenlast in der Abbildung 42 erkennbar. Die unterste Nagelreihe wurde im Anfangsbruchzustand kaum beansprucht.

Die Abbildung 44 zeigt die Verschiebungsvektoren der Netzknoten des Modells 0 und auch den Verlauf der Verschiebung des Böschungskopfes und der größten unausgeglichenen Kraft. Bei der Laststufe $q = 100 \text{ kN/m}^2$ konvergiert die größte unausgeglichene Kraft nicht gegen 0 und die Verschiebung des Böschungskopfes steigt monoton an, was die Instabilität des Systems bedeutet.

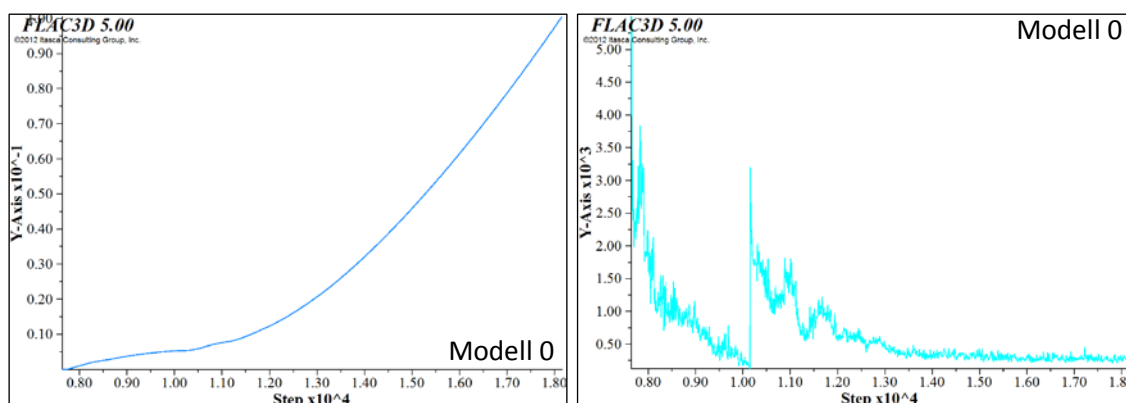


Abbildung 44: Modell 0: Verschiebung des Böschungskopfes und. der größten unausgeglichenen Kraft

6.2.2. Das Modell 1B

Die Abbildung 45 zeigt den Konturplot der Hauptschubverzerrungen und den Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Bodennägeln beim Modell 1B.

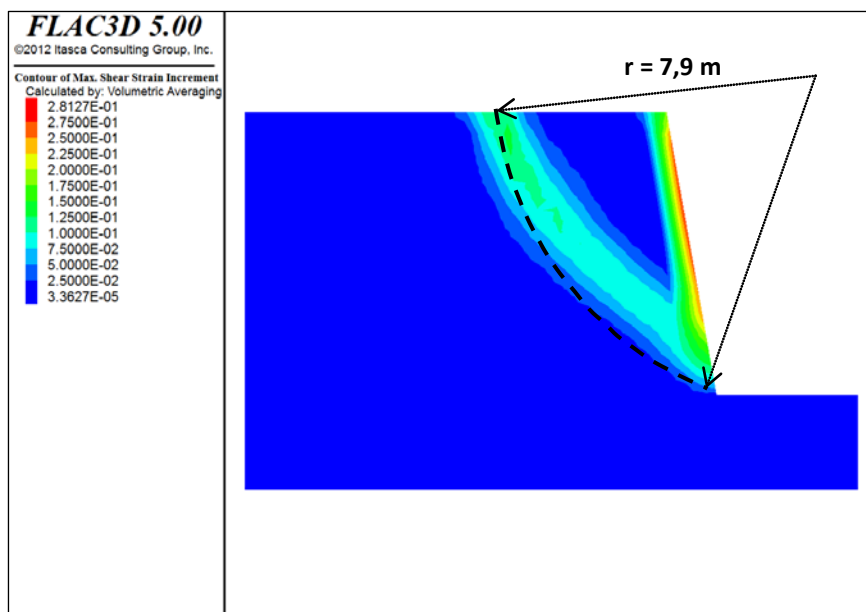


Abbildung 45 : Modell 1B: Konturplot der Hauptschubverzerrungen im Anfangsbruchzustand

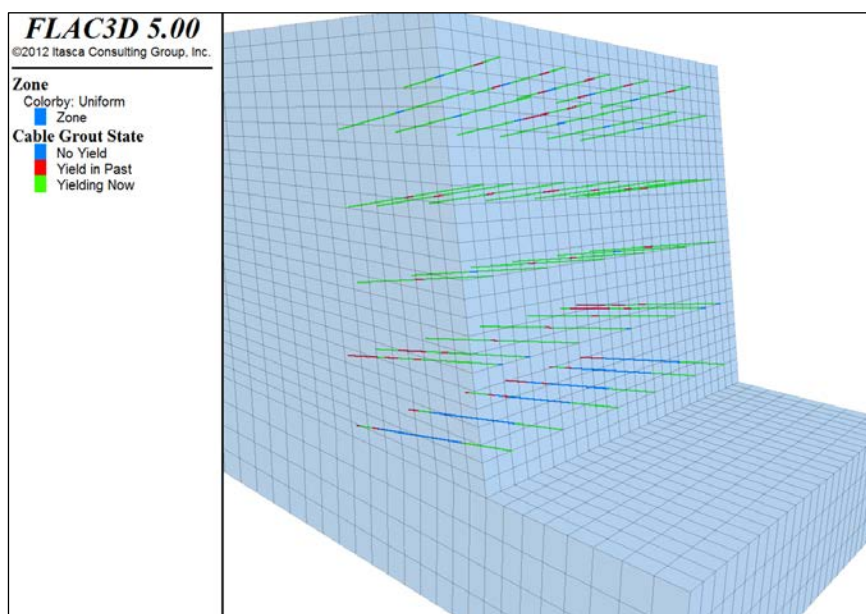


Abbildung 46: Modell 1B: Zustand der Verbindung zwischen dem Boden und den Bodennägeln im Anfangsbruchzustand

Im Modell 1B wurde die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen modelliert, die Bodennägel wurden nicht mit der Spritzbetonschale verbunden. Das Modell zeigte das Systemversagen bei der Laststufe $q = 175 \text{ kN/m}^2$ an. Die Form der numerisch ermittelten Gleitfläche stimmt mit der Form der Gleitfläche, die beim Großversuch beobachtet wurde, nicht überein.

6.2.3. Die Modelle 1A, 2, 3 und 4

6.2.3.1. Die Versagensform

Die Abbildungen 47 - 50 zeigen den Konturplot der Hauptschubverzerrungen in den Modellen 1A, 2, 3 und 4. Die angezeigte Versagensform ist in allen vier Modellen eindeutig erkennbar. Es konnte in allen vier Fällen eine Scherzone innerhalb des vernagelten Bodenkörpers beobachtet werden.

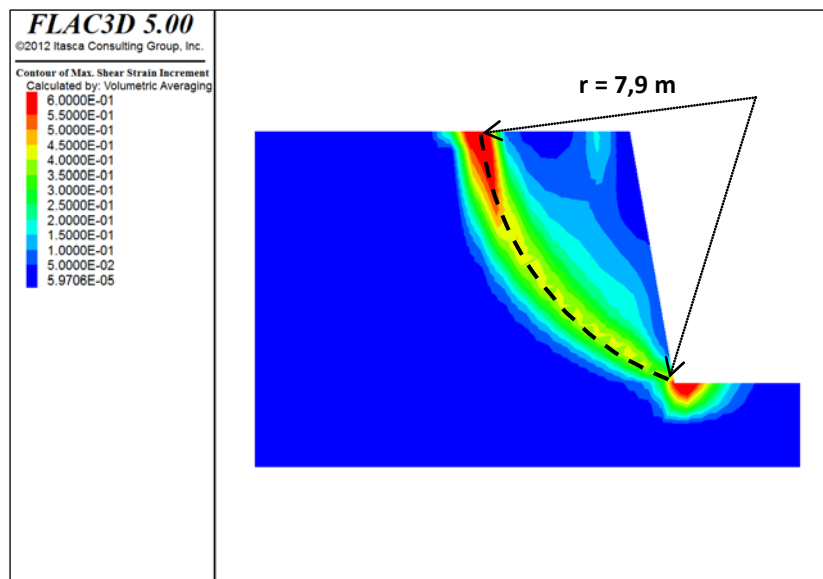


Abbildung 47: Modell 1A: Konturplot der Hauptschubverzerrungen im Anfangsbruchzustand

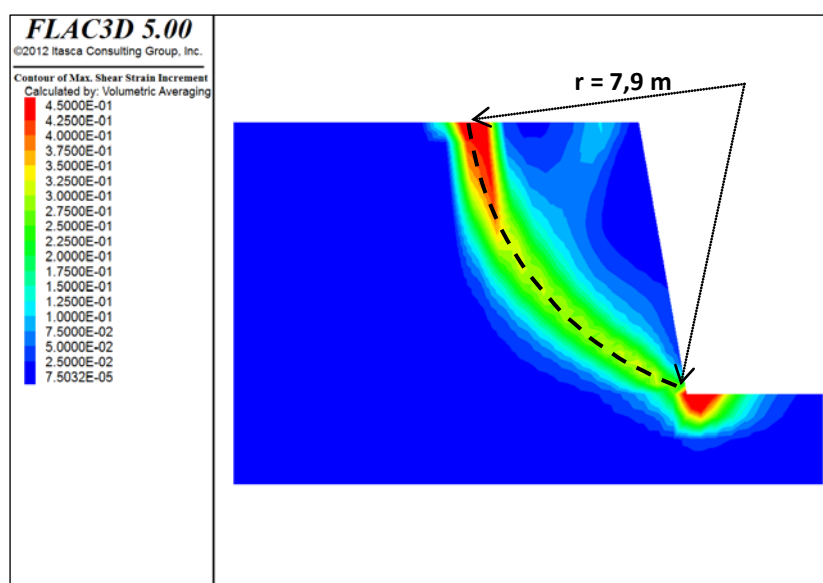


Abbildung 48: Modell 2: Konturplot der Hauptschubverzerrungen im Anfangsbruchzustand

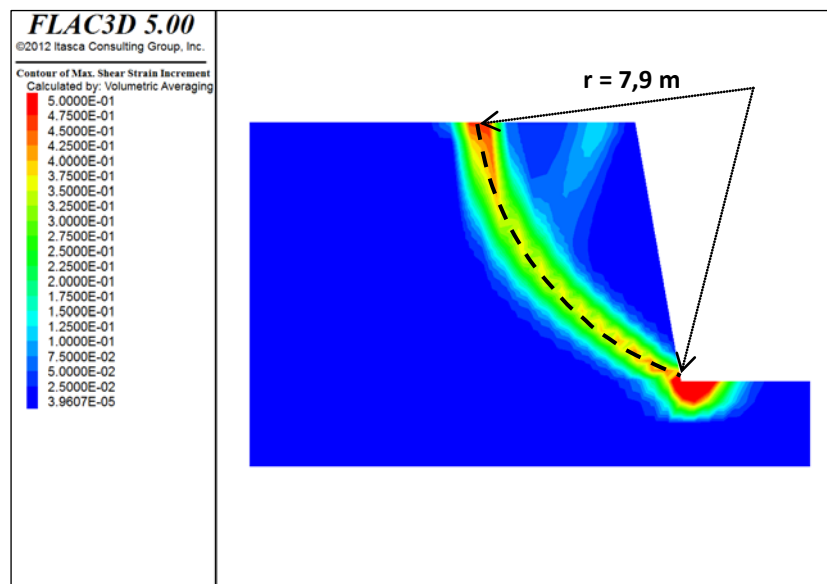


Abbildung 49: Modell 3: Konturplot der Hauptschubverzerrungen im Anfangsbruchzustand

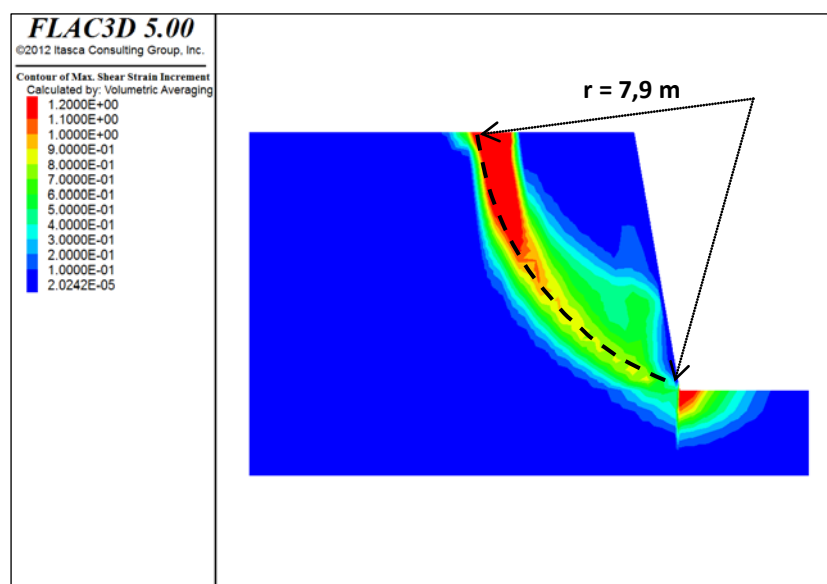


Abbildung 50: Modell 4: Konturplot der Hauptschubverzerrungen im Anfangsbruchzustand

Die Form der Scherzone ist in allen vier Modellen nahezu kreisförmig und verbindet den Böschungfußpunkt mit der hinteren Kante der Belastungsvorrichtung. Die typische keilförmige Versagensfigur des Grundbruchs ist unter der Streifenlast erkennbar.

Die beim Großversuch beobachtete Bruch- bzw. Gleitfläche ist in den Abbildungen 47 bis 50 schwarz strichliert markiert. Die im Großversuch gemessenen und rechnerisch ermittelten Gleitfugen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

6.2.3.2. Die Laststufe des Anfangsbruchzustandes

Es ergaben sich bedeutende Unterschiede zwischen den Laststufen des Anfangsbruchzustandes in den Modellen 1A, 2, 3 und 4.

Das linke Diagramm in der Abbildung 51 zeigt die Laststufe des Anfangsbruchzustandes in den Modellen 1A, 2, 3 und 4, im Vergleich mit der Laststufe des Anfangsbruchzustandes im Großversuch.

Das rechte Diagramm in der Abbildung 51 zeigt die Länge des größten Verschiebungsvektors innerhalb des vernagelten Bodenkörpers im Anfangsbruchzustand. Die Modellergebnisse wurden mit den Messergebnissen im Großversuch verglichen.

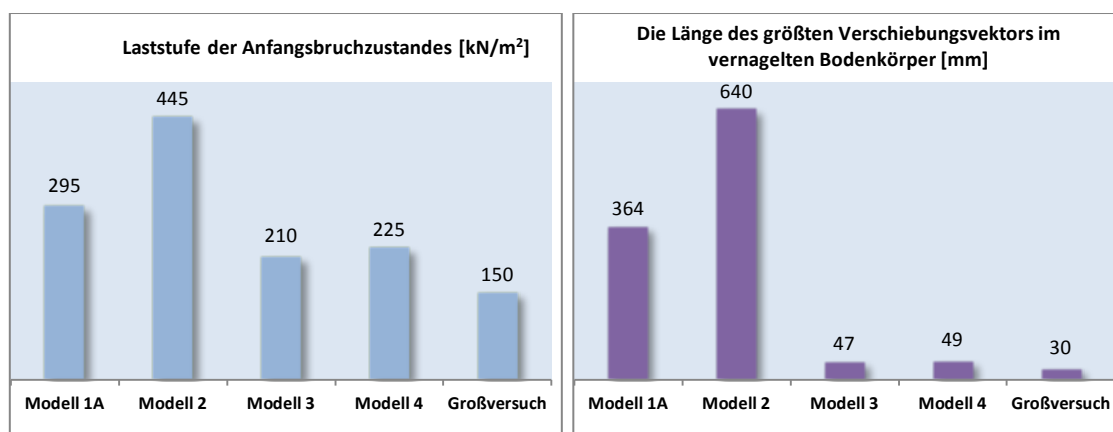


Abbildung 51: Laststufe der Anfangsbruchzustand und die Länge des größten Verschiebungsvektors im vernagelten Bodenkörper, Vergleich der Ergebnisse der Modelle 1A, 2, 3 und 4 mit den Ergebnissen des Großversuches

Ein Systemversagen kam in den Modellen 1A, 2, 3 und 4 bei einer höheren Laststufe und nach größeren Verformungen, als im Großversuch zustande.

Die Modelle 1A und 2 zeigen größere Werte bei den beiden Vergleichen als die Modelle 3 und 4. Das Modell 2 wurde auf dem extrem hohen Lastniveau von $q = 445 \text{ kN/m}^2$, nach enorm großen Verformungen des Bodenkörpers instabil.

Die Modelle 3 und 4 lieferten Ergebnisse, die den Ergebnissen des Großversuches deutlich näher lagen als die Modelle 1A und 2. Die Länge des größten Verschiebungsvektors im vernagelten Bodenkörper ist in den Modellen 3 und 4 kaum größer als die größte Verformung im Großversuch.

6.2.4. Verlauf der Nagelkräfte im Anfangsbruchzustand

Die Abbildungen 52 bis 55 zeigen den Verlauf der numerisch ermittelten Nagelzugkräfte im Anfangsbruchzustand und die Messergebnisse im Großversuch, bei den Laststufen $q = 150 \text{ kN/m}^2$ und $q = 110 \text{ kN/m}^2$.

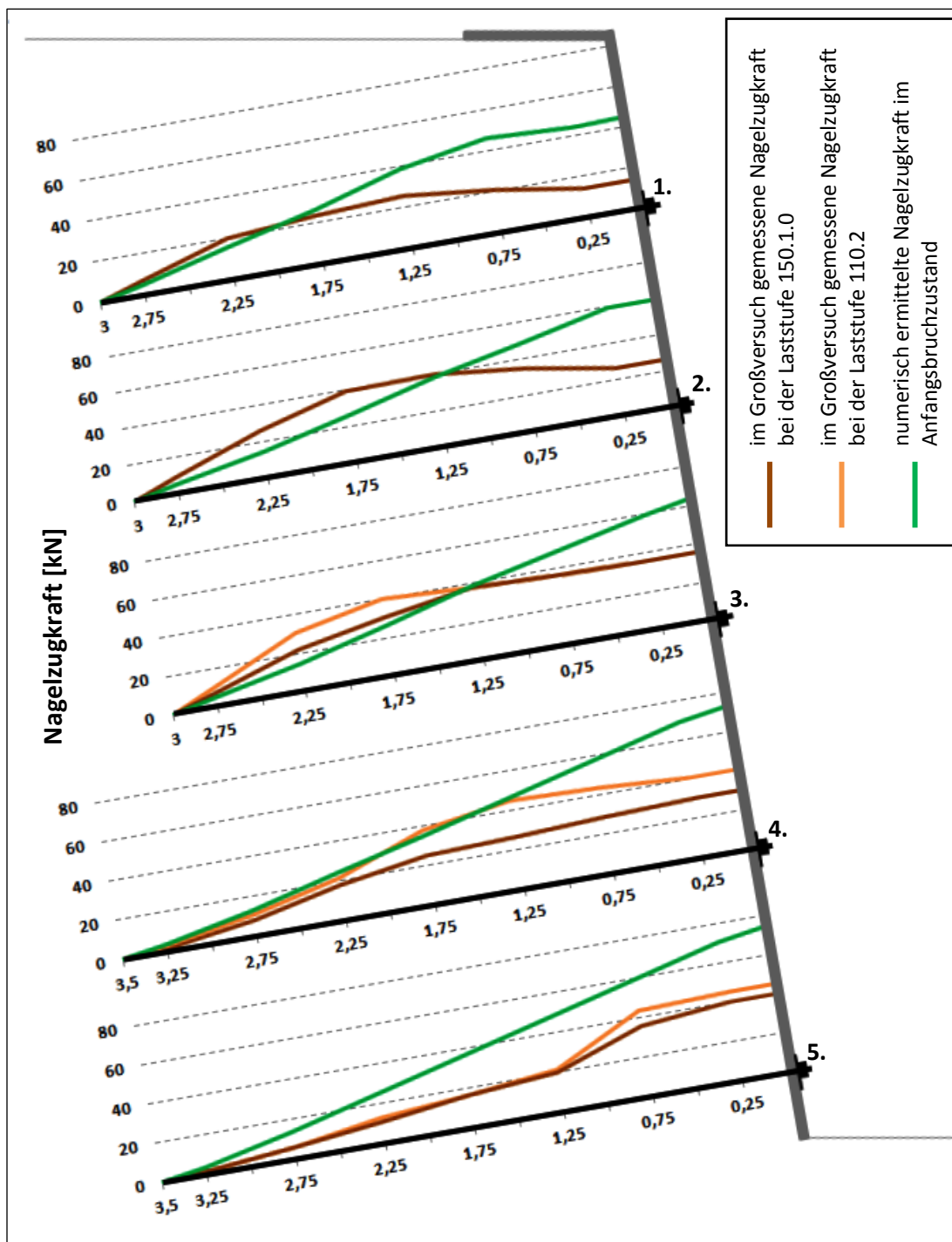
Modell 1A

Abbildung 52: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 1A im Anfangsbruchzustand) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

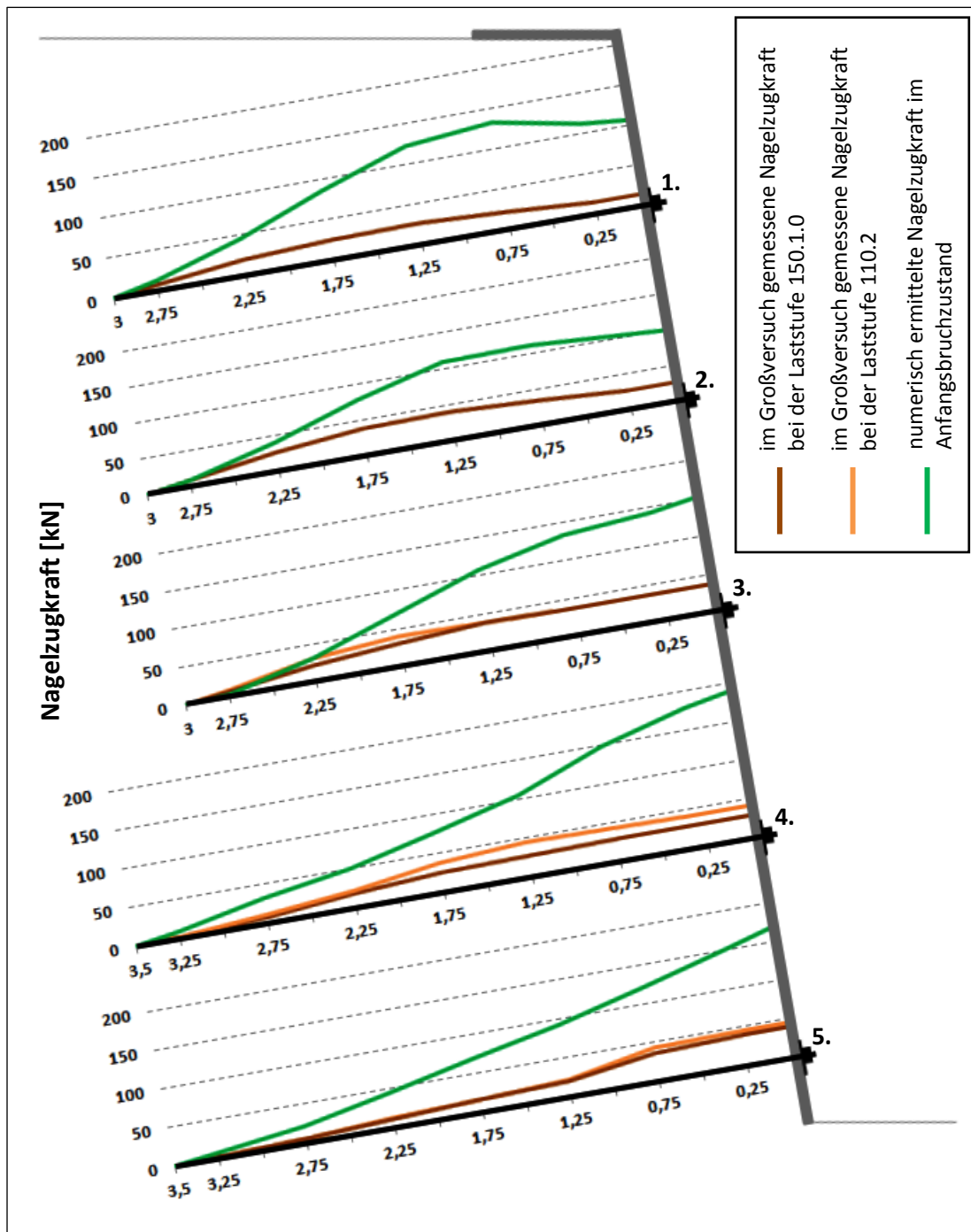
Modell 2

Abbildung 53: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 2 im Anfangsbruchzustand) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

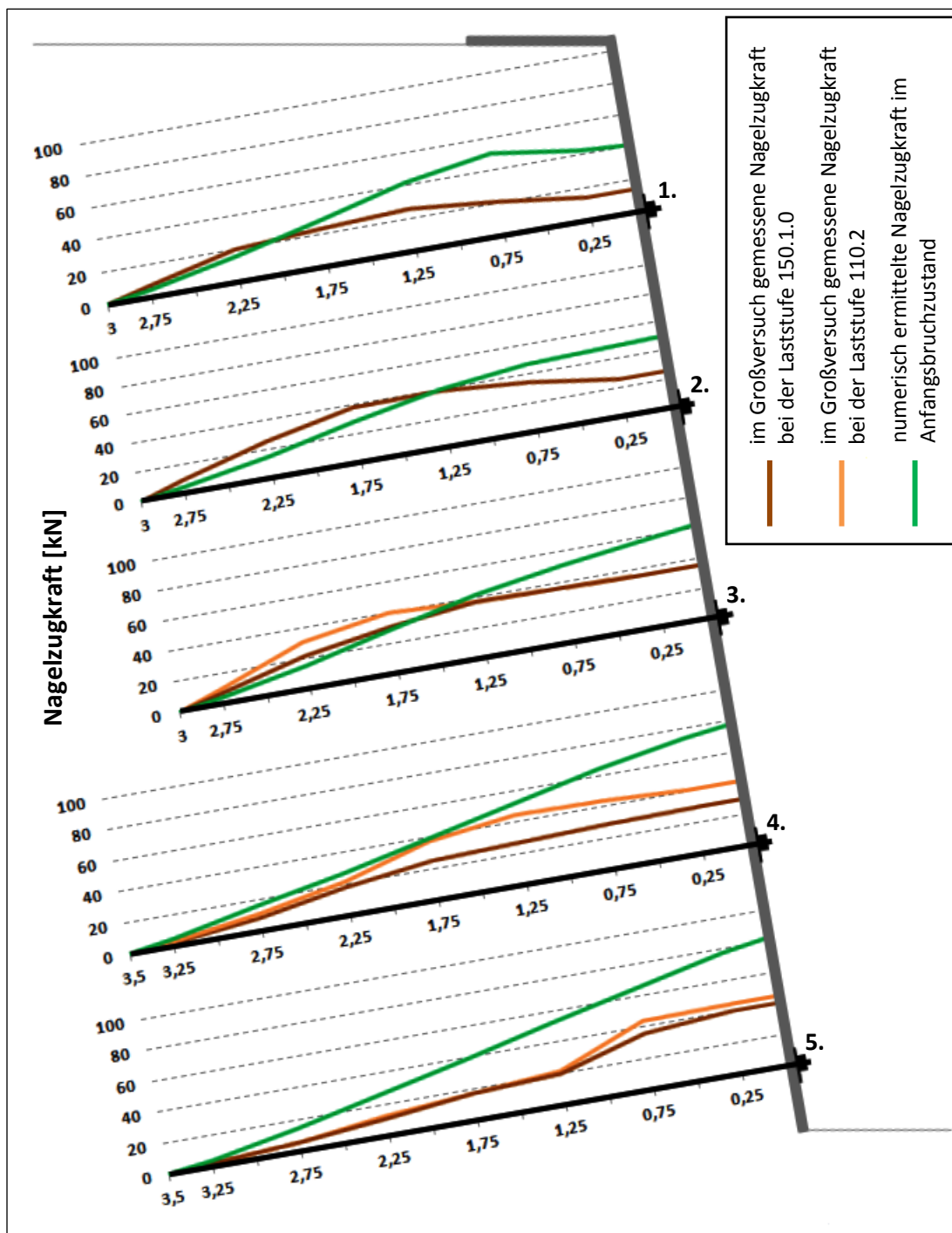
Modell 3

Abbildung 54: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 3 im Anfangsbruchzustand) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

Modell 4

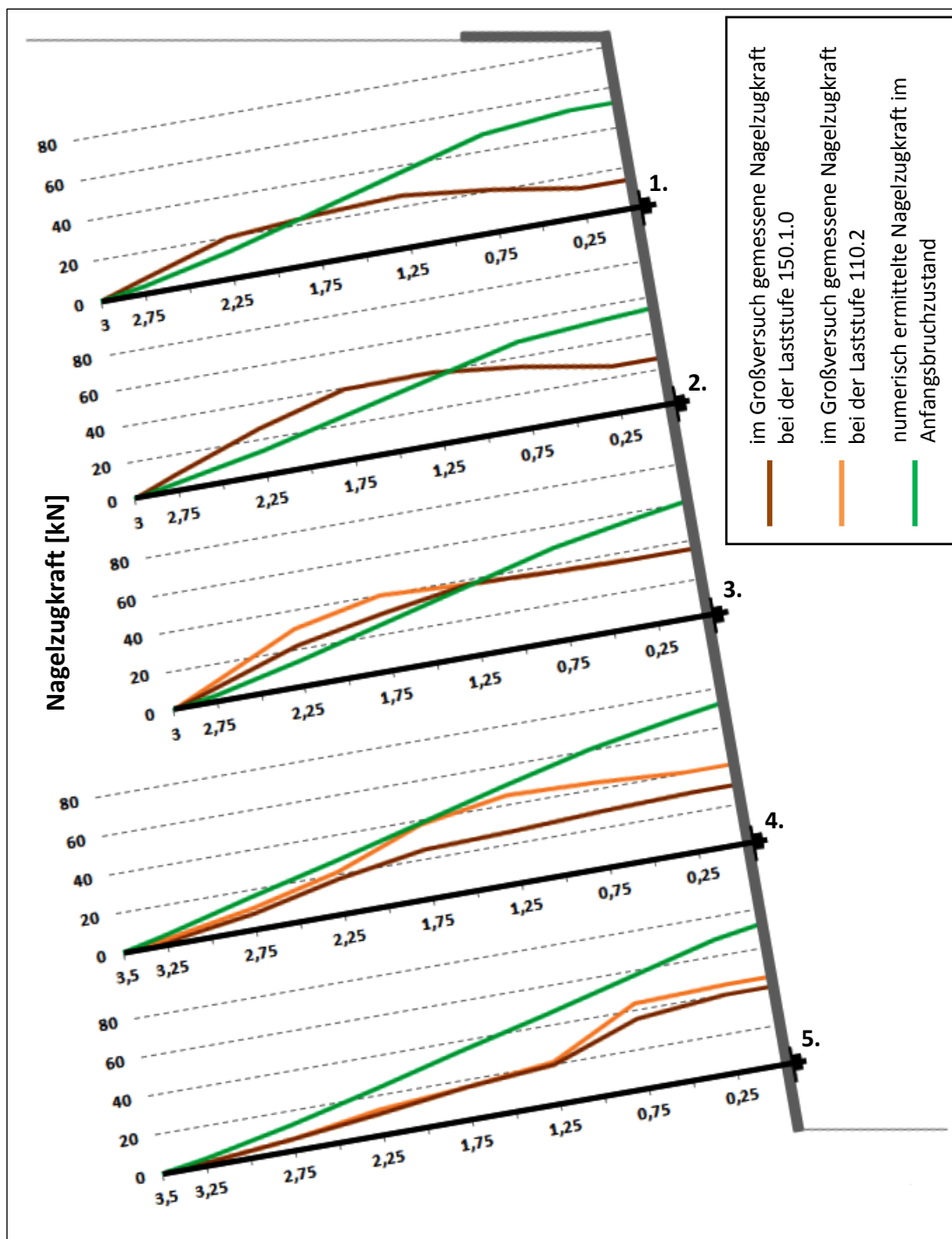


Abbildung 55: Vergleich des Verlaufes der im Großversuch gemessenen (Dunkelorange: Laststufe 150.1.0, Orange: Laststufe 110.2) und numerisch ermittelten (Grün: Modell 1A im Anfangsbruchzustand) Nagelzugkräfte in den Messnägeln

6.2.4.1. Vergleich der Modelle 1A, 2, 3 und 4

Die Tabelle 19 und die Tabelle 20 zeigen den Vergleich der Integrale der Nagelzugkräfte und die durchschnittlichen Nagelzugkräfte in den Modellen 1A, 2, 3, 4 und der im Großversuch gemessenen Nagelkräfte.

Tabelle 19: Vergleich der Integrale der numerisch ermittelten und der im Großversuch gemessenen Nagelzugkräfte im Anfangsbruchzustand

Nagelreihe	Modell 1A	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Versuch
1.	88	255	92	81	55
2.	95	225	93	90	86
3.	96	245	100	93	84
4.	125	301	139	133	69
5.	128	257	140	123	65
Σ	534	1285	566	522	361

Tabelle 20: Vergleich der numerisch ermittelten und der im Großversuch gemessenen durchschnittlichen Nagelzugkräfte im Anfangsbruchzustand

Nagelreihe	Modell 1A	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Versuch
1.	29	85	31	27	18
2.	32	75	31	30	29
3.	32	82	33	31	28
4.	36	86	40	38	20
5.	37	73	40	35	19
Σ	166	401	175	161	114

Die Integrale der Nagelkräfte in den numerischen Modellen sind deutlich höher als die Integrale der im Großversuch gemessenen Nagelkräfte. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung der numerisch ermittelten Werte mit den im Großversuch gemessenen Werten ist bei keinem der vier Modelle zu finden. Das Modell 2 zeigt auch in diesem Vergleich deutlich höhere Werte als die anderen drei Modelle.

7. Interpretation der Ergebnisse

7.1. Gegenüberstellung der Zug- und Pfahlelemente

Ein Vergleich der Wirkungsweise von Anker- und Pfahlelementen ist mittels der Ergebnisse des Modells 1A, bei dem die Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen simuliert wurden, und des Modells 2, bei dem die Bodennägel mit Hilfe von Pfahlelementen simuliert wurden, möglich.

7.1.1. Angezeigte Nagelkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Das Modell 2 zeigte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ höhere Nagelzugkräfte als das Modell 1A. Der Verlauf der Nagelkräfte ist in den beiden Modellen auch unterschiedlich.

Die Erklärung der Unterschiede ist die höhere maximal aufnehmbare Schubkraft des Pfahlelementes. In beiden Modellen wurde bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ die maximal aufnehmbare Schubkraft an den Nagelspitzen erreicht (siehe Abbildung 33). Die Ankerelemente des Modells 1A nehmen im Bereich der Nagelspitze eine Nagelkraft auf, die mit der maximal aufnehmbaren Schubkraft („grout cohesion“) gleich ist. Bei den Pfahlelementen ist die aufnehmbare Last analog zu den Ankerelementen durch die maximal aufnehmbare Schubkraft („shear coupling spring cohesion“) begrenzt, aber falls ein Reibungswinkel in Achsrichtung („shear coupling spring friction angle“) angegeben wird, erhöht sich die maximal aufnehmbare Schubkraft um den Reibungsteil $\sigma_n \cdot \tan\phi$.

Der Verlauf der Nagelkräfte bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ zeigt, dass die Ergebnisse des Modells mit den Ankerelementen in den beiden unteren Nagelreihen (4. und 5.), die Ergebnisse des Modells mit den Pfahlelementen in den oberen drei Nagelreihen (1., 2. und 3.) den Ergebnissen des Großversuchs besser entsprechen.

7.1.2. Biegebeanspruchung der Bodennägel

Durch die Darstellung der Bodennägel mit Hilfe von Pfahlelementen kann die Biegebeanspruchung und die Querkraftbeanspruchung in den Nägeln bestimmt werden. Eine genaue Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des Modells 2 und den

Ergebnissen des Großversuchs ist nicht zu erkennen. Die Biegebeanspruchung in den Pfahlelementen hängt von den Modellparametern der Vermörtelung in Normalrichtung ab. Die Bestimmung der Modellparameter war aber im vorliegenden Fall mit Unsicherheiten behaftet.

7.1.3. Modellergebnisse im Anfangsbruchzustand

Im Anfangsbruchzustand liefert das Modell 2 unrealistische Ergebnisse: Das Versagen kommt auf einem deutlich höheren Lastniveau zustande, als beim Großversuch. Die Verformungen innerhalb des vernagelten Bodenkörpers sind beim Modell 2 auch deutlich höher als im Großversuch. Mit dem Modell 2 werden im Anfangsbruchzustand deutlich höhere Nagelzugkräfte ermittelt als die im Großversuch gemessenen Kräfte.

Das Modell 2 ist daher ungeeignet, die Mechanismen im Großversuch im Bruchzustand realitätsnah abzubilden.

7.2. Auswirkung der Verwendung unterschiedlicher Stoffmodelle auf die Modellergebnisse

Für die Bestimmung der Auswirkung unterschiedlicher Stoffmodelle auf die Berechnungsergebnisse werden die Ergebnisse der Modelle 1A und 3 herangezogen. Beim Modell 1A wurde das Mohr-Coulomb'sche Stoffmodell für den Bodenkörper verwendet, beim Modell 3 wurde die Entfestigung des Bodens („strain softening“ Stoffmodell) im post failure – Bereich berücksichtigt.

7.2.1. Gegenüberstellung der Modellergebnisse bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$

Die Ergebnisse der Modelle 1A und 3 unterscheiden sich bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ kaum. Die Ankerelemente des Modells 3 zeigen etwas größere Nagelzugkräfte als die Ankerelemente des Modells 1A (siehe Tabelle 17).

7.2.2. Gegenüberstellung der Modellergebnisse im Anfangsbruchzustand

Im Bruchzustand simuliert das Modell 3 die Mechanismen im Großversuch eindeutig besser als das Modell 1A. Mit der Berücksichtigung der Entfestigung tritt der Anfangsbruchzustand bereits bei einer geringeren Last (d.h. bei einer früheren Laststufe) auf und die Verformungen innerhalb des vernagelten Bodenkörpers reduzieren sich deutlich. Das Modell 3 zeigte das Versagen bei einer höheren Laststufe als der Großversuch, aber die Ergebnisse des Modells 3 entsprechen am besten den Ergebnissen des Großversuchs. Beim Modell 3 ist die Übereinstimmung der numerisch ermittelten Verformungen im vernagelten Bodenkörper mit den im Großversuch gemessenen Werten zufriedenstellend.

Wie zu erwarten verhielten sich die Modelle, bei denen das Mohr-Coulombsche Stoffmodell für den Boden verwendet wurde (Modelle 1A und 2), wesentlich duktiler in FLAC^{3D} als die Modelle, bei denen die Entfestigung des Bodens im post failure - Bereich berücksichtigt wurde (Modelle 3 und 4).

7.3. Auswirkungen der Spritzbetonschale und der Verbindung zwischen den Bodennägeln und der Spritzbetonschale auf die Modellergebnisse

Im Modell 0 wurde keine Spritzbetonschale modelliert, im Modell 1B wurde die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen simuliert, die Bodennägel und die Spritzbetonschale wurden nicht kraftschlüssig verbunden und im Modell 1A wurde die Spritzbetonschale ebenfalls mit Hilfe von Schalenelementen modelliert und sie wurde mit den Bodennägeln kraftschlüssig verbunden. Wie Abbildung 56 zeigt, ergaben sich zwischen den Laststufen des Anfangsbruchzustandes bedeutende Unterschiede in den oben genannten Modellen.

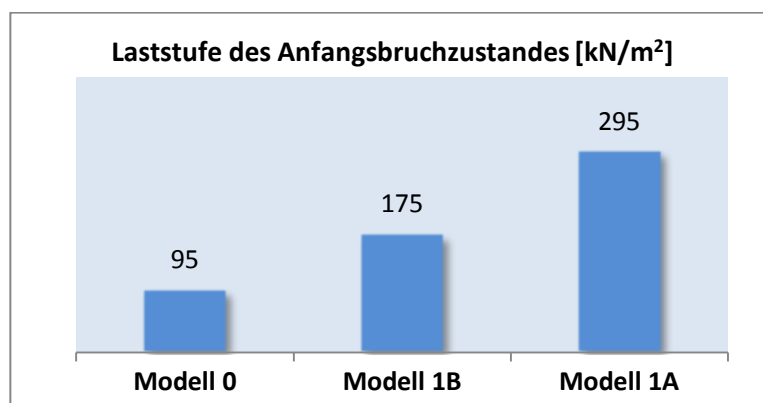


Abbildung 56: Die Laststufen des Anfangsbruchzustandes in den Modellen 0, 1A und 1B

Beim Modell 0, wo keine Spritzbetonschale modelliert wurde, kam das Versagen bei der Laststufe 95 kN/m^2 zustande. Mit dem Einbau einer Spritzbetonschale, die mit den Bodennägeln nicht verbunden wurde, wurde die Laststufe des Anfangsbruchzustandes auf $q = 175 \text{ kN/m}^2$ erhöht. Durch die Verbindung der Bodennägel mit der Spritzbetonschale wurde die Laststufe des Anfangsbruchzustandes des Systems noch bedeutend höher.

Die Verbindung zwischen den Bodennägeln und der Spritzbetonschale hat einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Nagelkräfte. Der mit dem Modell 1B (Bodennägel und Spritzbetonschale nicht kraftschlüssig verbunden) ermittelte Verlauf der Nagelkräfte entspricht nicht den Ergebnissen des Großversuchs. Das bedeutet, dass ein Modell ohne Spritzbetonschale und ein Modell, in dem die Bodennägel mit der Spritzbetonschale nicht kraftschlüssig verbunden sind, den Großversuch nicht simulieren kann.

7.4. Auswirkung der verschiedenen Schalenmodelle auf die Modellergebnisse

Im Modell 3 wurde die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen, im Modell 4 mit Hilfe von Kontinuumselementen dargestellt. Der Vergleich der Modellergebnisse bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ zeigt, dass der Einfluss der unterschiedlichen Schalenmodelle auf den Verlauf der Nagelkräfte gering ist.

Die unterschiedlichen Schalenmodelle hatten auch keinen wesentlichen Einfluss auf die Versagensform (siehe Abbildungen 49 und 50) und auf das Lastniveau des Versagens. Beim Modell 3 trat Versagen bei der Laststufe 210 kN/m^2 , beim Modell 4 trat Versagen bei der Laststufe 225 kN/m^2 auf.

Bei der Modellierung der Spritzbetonschale mit Hilfe von Kontinuumselementen ist es möglich, das Durchstanzen des Nagelkopfes und die Umlagerung der Nagelzugkräfte zufolge des Durchstanzens bei der numerischen Modellierung direkt berücksichtigen zu können. Das Durchstanzen des Nagelkopfes kann in der Praxis durch die entsprechende Dimensionierung der Spritzbetonschale und der Kalottenplatte ausgeschlossen werden. Die Möglichkeit, das Durchstanzen im numerischen Modell berücksichtigen zu können, bietet also keinen bedeutenden Vorteil.

7.5. Am besten geeignetes numerische Modell

Unter den untersuchten Modellen ist das Modell 3, bei dem die Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen, die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen dargestellt wurden, am besten geeignet, die Beanspruchungen der Stützelemente und die Verformungen des vernagelten Bodenkörpers im Großversuch (Gäßler, 1987) zu simulieren (Tabelle 21). Sowohl für die Anker- als auch für die Schalenelemente sind die Modellparameter relativ einfach bestimmbar.

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Nagelzugkräfte nach dem Ansatz von Gäßler (1987) (nach Preh & Hoffmann, 2012), die Ergebnisse des Modells 3 (Spitzenwerte der Nagelzugkraft) und die Messergebnisse im Großversuch

Nagelreihe	Vergleich der Spitzenwerte der Nagelzugkraft [kN]		
	Ergebnisse des Modells 3	Ansatz von Gäßler (1987) (Preh & Hoffmann, 2012)	Messergebnisse im Großversuch
1.	30	11	26
2.	36	20	40
3.	36	29	38
4.	45	50	32
5.	50	66	40
Σ	198	176	186

Die Tabelle 21 zeigt, dass die mit Hilfe des Modells 3 ermittelten Nagelzugkräfte den Messergebnissen im Großversuch besser entsprechen, als die mit Hilfe des Ansatzes von Gäßler (1987) ermittelten Nagelzugkräfte.

Kolymbas & Renk (2011) weisen darauf hin, dass die durch den Starkkörpermechanismus von Gäßler (1987) bedingte Kinematik die Mobilisierung der Nagelzugkräfte kaum ermöglicht. Aus dem Grund sind die mit Hilfe des Ansatzes von Gäßler ermittelten Nagelzugkräfte in den Nagelreihen 1., 2. und 3. deutlich niedriger als die Ergebnisse im Großversuch und die numerisch ermittelten Nagelzugkräfte.

Die Abbildung 57 zeigt die Spitzenwerte der Nagelzugkraft in allen Messnägeln des Modells 3 bei den einzelnen Laststufen. Die Spitzenwerte steigen - wie in den Messnägeln im Großversuch - entsprechend der schrittweisen Belastung an.

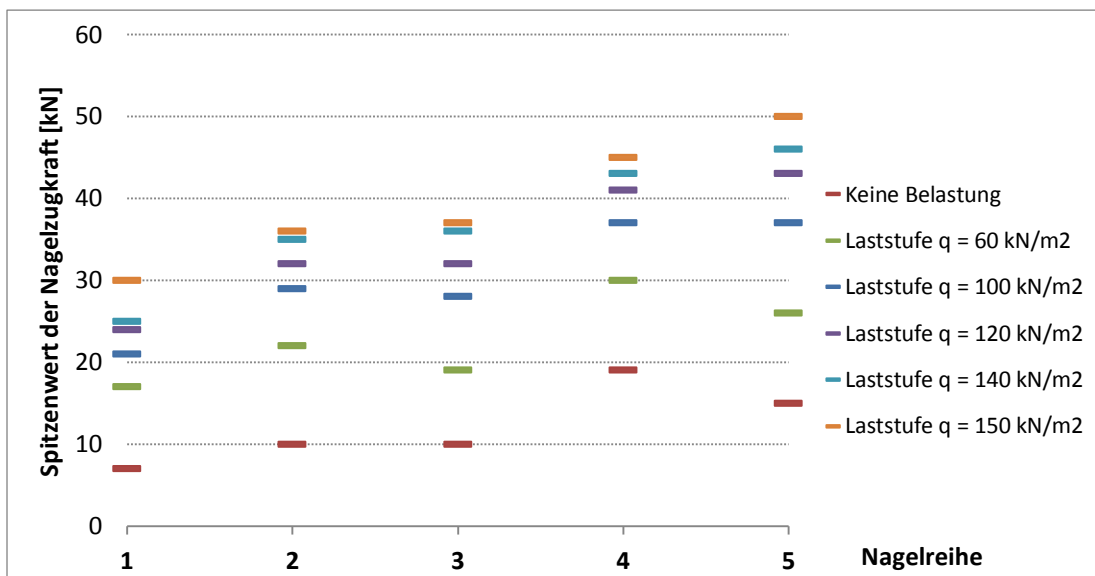


Abbildung 57: Modell 3: Spitzenwerte der Nagelzugkraft bei den einzelnen Laststufen

8. Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Rückrechnung des Großversuchs von Gäßler (1987) sind:

Falls für den Bodenkörper ein linear elastisches - ideal plastisches Materialverhalten angewendet wird, verhält sich das System wesentlich duktiler als unter der Berücksichtigung der Entfestigung des Bodens im post failure – Bereich. Die Darstellung der Bodennägel mit Hilfe von Pfahlelementen führt zur Erhöhung der Duktilität des Systems.

Die Berücksichtigung der Entfestigung des Bodens im post failure – Bereich hatte einen bedeutenden Einfluss auf die Modellergebnisse, in erster Linie auf die Tragfähigkeit der vernagelten Wand und auf die Verformungen des vernagelten Bodenkörpers. Die Entfestigung des Bodens im post failure – Bereich in der Scherzone (Gleitfläche) muss daher bei der numerischen Modellierung berücksichtigt werden.

Die berechneten Verformungen des am besten geeigneten FLAC^{3D} - Modells stimmten gut mit den Verformungen im Großversuch überein. FLAC^{3D} ist daher gut geeignet, vernagelte Konstruktionen unter Gebrauchslasten zu simulieren.

FLAC^{3D} ist zur genauen Bestimmung der Form und der Lage der Scherzone (Gleitfläche) sehr gut geeignet.

Das Versagen der numerischen Modelle erfolgte bei einer höheren Laststufe als das Versagen im Großversuch. Das numerische Modell liefert im Grenzzustand der Tragfähigkeit unrealistische Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Modelle, in denen die Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen dargestellt wurden, zeigten sowohl bei der Laststufe $q = 150 \text{ kN/m}^2$ als auch im Bruchzustand eine wesentlich bessere Übereinstimmung der Nagelzugkräfte mit den Ergebnissen im Großversuch.

Die Modellierung der Spritzbetonschale mit Hilfe von Kontinuumselementen bietet keine Vorteile gegenüber der Modellierung mit Hilfe von Schalenelementen.

Wenn in der Realität die Bodennägel mit der Spritzbetonschale kraftschlüssig verbunden sind, muss das im numerischen Modell simuliert werden, weil eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Bodennägeln und der Spritzbetonschale wesentlichen Einfluss auf die Modellergebnisse hat.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass FLAC^{3D} für die numerische Modellierung von vernagelten Konstruktionen anwendbar ist. Dabei sind in gering kohäsiven Böden das Entfestigungsverhalten des Bodens zu berücksichtigen, die Bodennägel mit Hilfe von Ankerelementen und die Spritzbetonschale mit Hilfe von Schalenelementen darzustellen. Das Programm zeigt besonders gute Ergebnisse unter Gebrauchslast und ist daher für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis bestens geeignet, aber bildet auch den Bruchzustand relativ genau ab.

Quellenangabe

Boley, C.: *Handbuch Geotechnik: Grundlagen – Anwendungen - Praxiserfahrungen*. Berlin: Springer, 2011.

Brandl, H.: *Konstruktive Hangsicherungen In: Grundbau Taschenbuch Teil 3 - Konstruktive Hangsicherungen*. Berlin: Ernst & Sohn, 2001.

Brandl, H. ; Dalmatiner, J.: *Stützmauersystem "NEW" und andere Konstruktionen nach dem Boden-Anker-Verbundprinzip*, Wien: Bundesministerium für Bauten und Technik, Heft 280, 1986.

DYWIDAG-Systems Interational GmbH: DYWIDAG Geotechnische Systeme.
http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_DYWIDAG_Geotechnische-Systeme_at_03.pdf (15-11-2012)

DYWIDAG-Systems Interational GmbH: *Approval Certifikate - Dywidag Soil Nailing System*, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2007.

Gäßler, G.: *Vernagelte Geländesprünge - Tragverhalten und Tragsicherheit.*: Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericana in Karlsruhe, Heft 108, 1987.

Itasca Consulting Group: *FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (Flac^{3D} Version 4.0)*, 2009.

Itasca Consulting Group: *FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions - Users Guide, Fifth Edition - Draft (Flac^{3D} Version 5.0)*, 2012.

Khazei, S.: Einführung in FLAC^{3D}. In: *FFIG Aktuell 2* (2006), S. 6-7.

Kolymbas, D. ; Renk, D: Zur Dimensionierung von Nagelwänden. In: *Geotechnik 34*, Heft 3 (2011), S. 169-180.

ÖNORM EN 1997-1: 2009-05-15: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln

ÖNORM B 1997-1: 2010-03-15: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen

ÖNORM EN 14490: 2010-07-15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau -
Bodenvernagelung

Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, *Richtlinie Spritzbeton -
Ausgabe Juli 2004*, Wien (2004)

Poisel, R: *Studienblätter der Vorlesung Angewandte Felsmechanik*,: Technische
Universität Wien, 2010.

Preh, A: *Studienblätter des Seminars Finite Difference Models in Geoengineering*,
Technische Universität Wien, 2011.

Preh, A. ; Hoffman, R.: *Design of soil nailing according to EC7*; Vortrag: 6th
Colloquium Rock Mechanics - Theory and Practice, March 22nd and 23rd 2012, Institut
für Geotechnik TU-Wien, Wien, 2012.

Schmoltzik, U.: *Grundbau Taschenbuch. Teil 3: Gründungen*, Berlin: Ernst & Sohn,
2001

Stahlmann, B. ; Lutz, J.: *Geotechnik-Standsicherheitsberechnungen von Böschungen
nach alten und neuen Regelwerken*, Seminardokumentation des Seminars am
14.05.1997, München: Ingenieurakademie Bayern, 1997.