



Universität Stuttgart



Institut für Geotechnik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann • Universität Stuttgart
Institut für Geotechnik • Pfaffenwaldring 35 • 70569 Stuttgart

Boden- und Felsmechanik,
Erd- und Grundbau,
Fels- und Tunnelbau
Spezialtiefbau,
Umweltgeotechnik

Direktor

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.
Christian Moormann

Kontakt

Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart
T 0711 685-62436
F 0711 685-62439
info@igs.uni-stuttgart.de
www.uni-stuttgart.de/igs/

**Trag- und Verformungsverhalten von
Dauerbodennägeln im Gebrauchszustand
Nationale und internationale Literaturstudie**

Bericht Nr.: G67.3-001
Datum: 07.03.2023

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstr. 30 L
10829 Berlin

Auftrags-Nr.: P_52-5-11.80-2081.21

Verteiler: Auftraggeber (2-fach + pdf)

Textseiten: 51, eine Anlage (11 Seiten)

Bearbeitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann
Egest Veselaj, M.Sc.

Stuttgart, den 07.03.2023



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann
Direktor des Institutes für Geotechnik der Universität Stuttgart
von der Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart
öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
für Erdbau, Grundbau, Felsbau sowie Spezialtiefbau

Bank
Baden-Württembergische Bank
Stuttgart – BW-Bank

IBAN
DE51 6005 0101 7871 5216 87

SWIFT/BIC
SOLADEST600

Umsatzsteuer-IdNr.
DE147794196





INHALTSVERZEICHNIS

1 Motivation.....	3
2 Bodenvernagelung: Konzept	5
2.1 Einführung	5
2.2 Historischer Überblick.....	5
2.3 Theoretische Grundlagen	6
3 Bemessungs- und Nachweiskonzept für Vernagelungen.....	9
3.1 Normative Anforderungen und Nachweiskonzept.....	9
3.2 Bewertung des Bemessungskonzeptes für Bodenvernagelungen.....	12
4 Experimentelle Untersuchungen aus der Literatur.....	13
4.1 Feldversuch von GÄBLER (1987).....	13
4.1.1 Versuchsrandbedingungen und -durchführung.....	13
4.1.2 Verformungen und Verschiebungen.....	15
4.1.3 Beanspruchung der Bodennägel.....	16
4.2 „Clouterre“-Forschungsprojekt.....	19
4.2.1 Aufbau der Feldversuche	19
4.2.2 Gemessenes Verformungsverhalten.....	20
4.2.3 Beanspruchung der Bodennägel.....	21
4.3 Feldversuch nach SHAEHAN (2000).....	23
4.3.1 Geometrische und geotechnische Randbedingungen des Feldversuchs.....	23
4.3.2 Gemessenes Verformungsverhalten.....	24
5 Messtechnisch basierte Erkenntnisse zum Trag- und Verformungsverhalten von Bodenvernagelungen.....	25
5.1 Feldmessungen nach STOCKER & RIEDINGER (1990).....	25
5.1.1 Geometrische und geotechnische Randbedingungen	25
5.1.2 Gemessenes Verformungsverhalten.....	26
5.1.3 Beanspruchung der Bodennägel.....	27
5.2 Feldmessungen nach Beanspruchung der Bodennägel THOMSON & MILLER (1990).....	29
5.2.1 Geometrische und geotechnische Randbedingungen	29
5.2.2 Gemessenes Verformungsverhalten.....	30
5.2.3 Beanspruchung der Bodennägel.....	30
6 Numerische Untersuchungen zu Bodenvernagelung	32
6.1 Numerische Studie von BABU & SINGH (2009)	32
6.2 Numerische Studie von HAJIALILUE-BONAB & RAZAVI (2016).....	34
6.3 Numerische Studie von JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017).....	36
6.4 Numerische Studie von GARZÓN-ROCA et al. (2019).....	37
6.5 Weitere numerische Studien	39
7 Beurteilung der Beanspruchung der Zementumhüllung anhand der Literaturstudie	40
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	43
9 Literaturverzeichnis	45
Anlage 1: Literaturdatenbank	52



1 Motivation

Nach den bestehenden Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für den dauerhaften Einsatz von Bodenvernagelungen ('Dauerbodennägel') wird bislang vorgegeben, dass bei Dauerbodenvernagelungen der erforderliche Korrosionsschutz neben der Verfüllung des Bohrloches mittels einer Zementsuspension zusätzlich durch eine vorab im Werk aufzubringende Ummantelung des Stahlgliedes mit einem gerippten, mit Einpressmaterial (in der Regel Zementmörtel) verfüllten Kunststoffhüllrohr zu realisieren ist, was in der Summe allgemein als „doppelter Korrosionsschutz“ bezeichnet wird. Damit unterscheiden sich die Anforderungen an den Korrosionsschutz von Bodennägeln von denjenigen von vergleichbaren Verpresspfählen (Mikropfählen) nach DIN EN 14199. Dies führt in der Ingenieurpraxis immer wieder zu Diskussionen und auch zu unklaren Anwendungen, insbesondere wenn Verpresspfähle in einer Bodennägeln ähnlichen Funktion eingesetzt, aber dennoch ohne doppelten Korrosionsschutz ausgeführt werden.

Dabei stehen die Fragen im Fokus, welche Beanspruchungszustände im Bereich der Tragstrecke eines Nagels im Gebrauchszustand auftreten und ob bei dauernd genutzten Bodennägeln, der erforderliche Korrosionsschutz nicht durch die Ummantelung mit einem gerippten Kunststoffhüllrohr, sondern durch eine Beschränkung der Bemessungswerte der Stahlzugspannung im Grenzzustand der Stahlzugspannungen so erbracht werden kann, dass als zulässig definierte Rissweiten (z.B. 0,1 mm) im Zementstein nicht überschritten werden. Im Allgemeinen kann dies vorausgesetzt werden, wenn unter reiner Zugbeanspruchung die Stahlzugspannungen auf $\sigma_s = 165 \text{ N/mm}^2$ beschränkt werden.

Dieser Spannungsnachweis wird vom DIBt bei Verpresspfählen (Mikropfählen nach DIN EN 14199) zugelassen, bei denen die mit einer Begrenzung der Stahlzugspannungen erreichte Beschränkung der Rissbreiten im Verpressmörtel als ausreichend angesehen wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Mikropfähle gemäß Zulassung nur durch axiale Kräfte beansprucht werden dürfen. Hierbei bleibt allerdings unberücksichtigt, dass zwar bei Verpresspfählen primär eine axiale Zugbelastung auftritt, aber auch bei Zugpfahlverankerungen unter üblichen Randbedingungen geringe Verschiebungen quer/lateral zur Pfahlachse nicht ausgeschlossen werden können, wie beispielsweise die bei der Ermittlung des aktiven Erddrucks ('aktiver Gleitkeil') und die beim Nachweis der tiefen Gleitfuge angenommene Gleitkörpergeometrien nahelegen.

Ein vergleichbares Vorgehen, d.h. die Beschränkung der Rissbreite durch eine Beschränkung der Stahlzugspannung bzw. der Zugdehnung wird bei Dauernägeln bis dato nicht als zulässig erachtet, weil diese im Gegensatz zu Mikropfählen - so die grundlegende Annahme - nicht nur durch axiale Lasten beansprucht würden, sondern - infolge der zur Aktivierung der Nagelkräfte und der Verbundwirkung zwangsläufig erforderlichen Bodenverformungen quer zu den Nägeln - auch durch „ungewollte“ Biegebeanspruchungen beeinflusst werden. Diese könnten bei Bodennägeln im Verpressmörtel zu größeren Rissbreiten als bei Verpresspfählen unter



reiner Zugbeanspruchung führen, so dass dann ein dauerhafter Korrosionsschutz nicht mehr gewährleistet wäre.

Bodennägel für den dauerhaften Einsatz, d.h. für eine Einsatzdauer länger als 2 Jahre, sind daher nach den bisherigen bauaufsichtlichen Zulassungen stets mit dem in den Zulassungen beschriebenen zusätzlichen, d.h. doppelten Korrosionsschutz, werksseitig zu versehen oder alternativ Stahlzugglieder mit einem ausreichenden Korrosionsschutz, z.B. durch Verwendung von Zuggliedern aus nichtrostendem Stahl, einzusetzen. Entsprechende Vorgaben werden auch von der Vereinigung der Prüfsingenieure für Bautechnik (VPI) gemacht (BUNDESVEREINIGUNG DER PRÜFINGENIEURE FÜR BAUTECHNIK E.V. (2016); VEREINIGUNG DER PRÜFINGENIEURE FÜR BAUTECHNIK, LANDESVEREINIGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG E.V. (2016)).

Eine Recherche der maßgebenden Erfahrungen insbesondere aus den Grundsatzuntersuchungen in den 1980er Jahren belege

- einerseits, dass bei den dokumentierten Fallbeispielen, bei denen das Trag- und Verformungsverhalten von vernagelten Geländesprüngen im Realmaßstab messtechnisch untersucht wurde, im Gebrauchszustand nur sehr geringe Scher- und Biegemomentbeanspruchungen der Nägel beobachtet wurde, und
- andererseits, dass die Beanspruchung von Bodennägeln durch Bodenverformungen quer zur Nagelachse hinsichtlich ihrer Ausprägung und quantitativer Größenordnung im Gebrauchszustand einer Bodenvernagelung bisher rechnerisch nicht systematisch untersucht wurde, so dass der Einfluss der angenommenen „ungewollten“ Biegebeanspruchung der Bodennägel auf die Beanspruchung von Stahlzugglied und Zementstein im Gebrauchszustand bisher nicht näher bekannt ist.

Es war daher im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes zu untersuchen, welche Beanspruchungen bei einer Dauerbodenvernagelungen im Bereich der Zementsteinumhüllung im Gebrauchszustand auftreten und inwieweit hierbei Beanspruchungszustände entstehen, die zu einer Überschreitung der zulässigen Rissbreite führen, die für die Gewährleistung des dauerhaften Korrosionsschutzes einzuhalten ist.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichts erfolgte eine Auswertung nationaler und internationaler Literaturquellen zum aktuellen Kenntnisstand zum Trag- und Verformungsverhalten von Bodenvernagelungen. Dabei werden insbesondere die Scher- und Biegebeanspruchungen bei Dauerbodenvernagelungen und ihr Einfluss auf die im Verpresskörper entstehenden Rissbreiten genauer betrachtet.

2 Bodenvernagelung: Konzept

2.1 Einführung

Bodenvernagelungen stellen ein weit verbreitetes Verfahren zur Sicherung von Baugrubenflanken und steilen Böschungen dar. Das Ziel einer Bodenvernagelung ist es, durch den Einbau von Bewehrung (Bodennägel) in den bestehenden Baugrund einen Verbundkörper (Schwergewichtsmauer) zu erzeugen, um die Standsicherheit eines Geländesprungs zu erhöhen. Bodennägel sind nicht vorgespannt, besitzen eine vollständige, kraftschlüssige Verbindung durch Verpressen mittels Zementmörtel im Boden und können sowohl als temporäre als auch als dauerhafte Maßnahme eingesetzt werden.

2.2 Historischer Überblick

Das System der Bodenvernagelung wurde erstmals in den 1940er Jahren in Frankreich als Technik zur Stabilisierung von Böschungen im Bereich der Bergbauindustrie entwickelt. Dasselbe System wurde später für den Einsatz im Bereich der Geotechnik adaptiert und die erste dokumentierte Anwendung der Bodenvernagelung in diesem Bereich erfolgte in den späten 1960er Jahren in Europa. Als HENRI VIDAL im Jahr 1957 'Terra Armée' erfand, indem er ein Gemisch aus Sand und Kiefernadeln herstellte (Abbildung 1), das wesentlich bessere mechanische Eigenschaften aufwies als der Sand allein, wurde erstmals der Begriff der bewehrten Stützkonstruktion verwendet.



Abb. 1 Konzept der 'Terra Armée' mit Sand und Kiefernadeln nach VIDAL (1966)

Im Jahr 1963 beantragte und erhielt VIDAL das erste Patent für seine Technik. In Zusammenarbeit mit FRANÇOIS SCHLOSSER vom LPCP (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Paris) begann er daraufhin mit der Erforschung von Versuchswänden in realen Maßstab, um seine Erfindung zu validieren. Ein bedeutsamer Meilenstein in der Entwicklung von vernagelten Stützkonstruktionen wurde 1965 erreicht, als VIDAL und SCHLOSSER die erste bewehrte Stützkonstruktion in *Pragnères*, Frankreich, entwarfen und bauten. Ein Jahr später, 1966,



wurde von VIDAL (1966) die erste Publikation über bewehrte Stützkonstruktionen veröffentlicht, die wichtige Erkenntnisse über die Planung und den Bau dieser Bauwerke lieferte.

Diese Entwicklung eröffnete neue Perspektiven für alternative Sicherungsmethoden von Stützkonstruktionen wie die Bodenvernagelung. GÄßLER & GUDEHUS (1981) dokumentieren erste systematische Untersuchungen zum Bodenvernagelungssystem und beschreiben das Verfahren als eine sichere und moderne Technik zur Stabilisierung von Geländesprüngen in granularen Böden. In diesem Zeitraum beschäftigen sich auch andere Autoren und Wissenschaftler mit diesem Verfahren, wie zum Beispiel STOCKER & RIEDINGER (1990) und PLUMELLE & SCHLOSSER (1991) in Europa sowie THOMSON & MILLER (1990) in den Vereinigten Staaten. In diesem Kontext haben Arbeiten wie GÄßLER (1987) in Deutschland und PLUMELLE & SCHLOSSER (1991) in Frankreich signifikant zur Fortschreibung des Wissenstands über Bodenvernagelungen beigetragen. Die umfassenden experimentellen Untersuchungen dieser Wissenschaftler lieferten wichtige grundlegende Erkenntnisse zum Tragverhalten von Bodenvernagelungen unter permanenten und dynamischen Einwirkungen.

In diesem Zeitraum konzentrierten sich mehrere weitere Studien hauptsächlich darauf, Nachweis- und Berechnungsverfahren zu untersuchen, die für eine zuverlässige rechnerische Bemessung von Bodenvernagelungen erforderlich sind. Diese Studien untersuchten verschiedene Faktoren wie die optimale Nagellänge, den Durchmesser und den Abstand von Bodennägeln sowie die Bodeneigenschaften und den Verfahrensablauf, mit denen die Stabilität und Dauerhaftigkeit gewährleistet wird. So berichten JURAN ET AL. (1985), dass die Anordnung der Bodennägel in einem Neigungswinkel von 10° bis 15° gegen die Horizontale dazu führt, dass die Bodennägel mit ihrer Anordnung günstig zur Hauptdehnungsrichtung von Geländesprüngen liegen. Dies ist von großer Bedeutung, da die Biegesteifigkeit der Bodennägel nach JEWELL & PEDLEY (1990) im Grenzzustand der Tragfähigkeit einen großen Einfluss auf die Mobilisierung der Nagelkräfte hat, weil die Dehn- und Biegesteifigkeit voneinander abhängig sind.

Der Einsatz numerischer Methoden ab den 1980er Jahren ermöglichte es, auch komplexe Baugrund-Tragwerk-Interaktionen einschließlich material- und geometrischer Nichtlinearitäten zu simulieren. Mit diesem Werkzeug kann das Verformungsverhalten von vernagelten Geländesprüngen im Gebrauchszustand, aber auch bis hin zum Versagenszustand untersucht werden. Die Entwicklung fortschrittlicher Materialmodelle trug zur Verbesserung der geotechnischen Simulationen bei. Zum Beispiel simulierten JURAN ET AL. (1985) und auch SHAFIEE (1986) eine Reihe von Varianten der Bodenvernagelung und erhielten Informationen über die Abhängigkeit der Mobilisierung der Biegedehnungen vom Neigungswinkel des Nagels.

2.3 Theoretische Grundlagen

Das Grundkonzept einer Bodenvernagelung besteht darin, mit Hilfe rasterförmig angeordneter Bodennägeln und einer Spritzbetonschale einen bewehrten 'Bodenblock' zu bilden, der eine

Art Schwergewichtsmauer bildet. Bodenvernagelungen können für die temporäre und permanente Sicherung von Böschungen, Hängen oder zur Herstellung von steilen Baugrubenflanken eingesetzt werden. Eine Nagelwand besteht im Wesentlichen aus drei Elementen: dem anstehenden Boden oder Fels, der Bewehrung aus Bodennägeln und der Frontausbildung. Die Bodennägel bestehen in der Regel aus Metall, typischerweise Stahl, selten aber auch aus anderen Werkstoffen, wie z.B. faserverstärkten Kunststoffen, Kohlenstofffasern o.ä. Dabei können die Nägel entweder als massiver Stab (Regelfall), als hohler Stab oder mit anderer Querschnittsform ausgebildet sein. Die Frontausbildung besteht im Regelfall aus bewehrtem Spritzbeton und wird dann als 'starre' Frontausbildung bezeichnet. Alternative Frontausbildungssysteme können aus Netzen, Geokunststoffen o.ä. bestehen und bieten dann als 'nachgiebige' Frontausbildung Schutz vor fallenden oder rutschenden Steinen oder auch dem Erosionsschutz.

Die Bodennägel sind über ihre gesamte Länge über einen im Zuge der Herstellung in das Bohrloch eingebrachte Zementsuspension bzw. Zementstein mit dem umgebenden Baugrund verbunden und erzeugen so auf ihrer gesamten Länge einen Reibungswiderstand mit dem Boden.

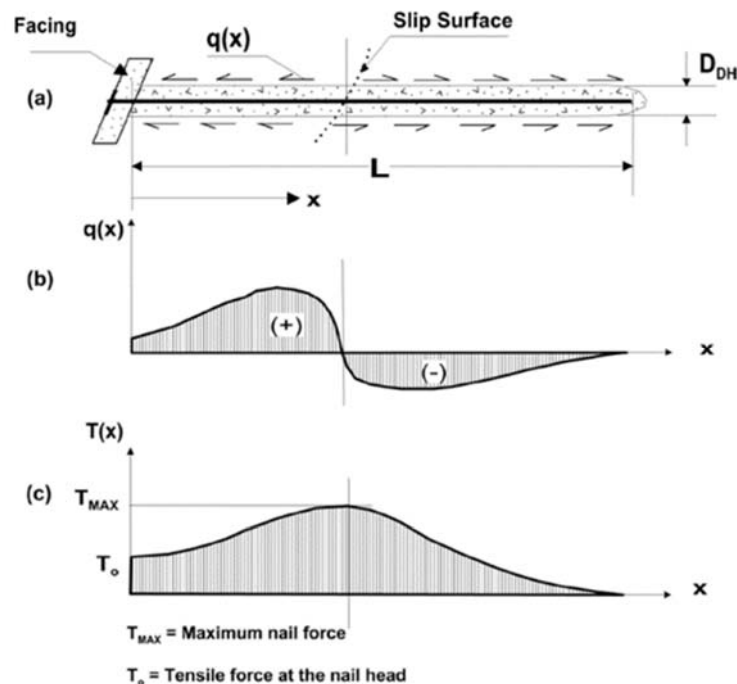


Abb. 2 Qualitative Aktivierung von Mantelreibung ((a) und b)) und Normalkraft (c) in Bodennägeln (FHWA 2003)

Die Bodennägel werden - anders als Verpressanker - bei der Herstellung nicht vorgespannt. Die axiale Beanspruchung der Nägel auf Zug entsteht vielmehr im Zuge des Weiteren Baufortschritts, hier des Weiteren schrittweisen Aushubs durch die Verformungen im Baugrund. Dabei

wird im Verbund zwischen Nagel und Baugrund qualitativ eine Mantelreibung entsprechend Abbildung 2a und b aktiviert, woraus sich eine Normalkraftbeanspruchung im Nagel auf Zug entsprechend Abbildung 2c ergibt. Demnach tritt die maximale Zugbeanspruchung (T_{max}) im Nagel in Höhe des neutralen Punktes der aktivierten Mantelreibung auf, während die am Nagelkopf auftretende und hier aufzunehmende Zugkraft T_0 geringer ist.

Bei größeren Verformungen und Annäherung an einen Grenzzustand mit Ausbildung eines Gleitkeils kann sich nach JEWELL & PEDLEY (1990) eine Schubbeanspruchung für die Bodennägel ergeben, aus der sich dann auch eine Biegemomentenbeanspruchung resultiert. Der Mechanismus wird in Abbildung 3 nach WICHTER & MEININGER (2018) veranschaulicht.

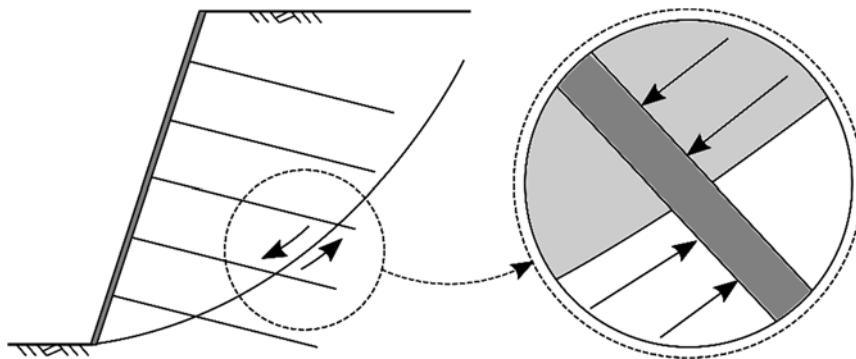


Abb. 3 Beanspruchung von Bodennägeln auf Schub bei Ausbildung eines Gleitkörpers bzw. Annäherung an einen Grenzzustand (WICHTER & MEININGER, (2018))

Beim Einsatz von Bodennägeln wird zwischen Kurzzeitbodennägeln und Dauerbodennägeln unterschieden, die sich durch die Anforderungen bzw. Maßnahmen zum Korrosionsschutz unterscheiden. Kurzzeitbodennägel, deren Einsatz für eine Dauer von ≤ 2 Jahren vorgesehen ist, besitzen nur einen 'einfachen' Korrosionsschutz, während für Daueranker mit einer Einsatzdauer von mehr als zwei Jahren ein 'doppelter' Korrosionsschutz erforderlich wird. Dieser doppelte Korrosionsschutz bedingt für das Stahlzugglied eine werksseitig im Schutz eines Kunststoffwellrohrs aufzubringende Zementsteinummantelung, die im Zuge der Ausführung durch eine Verfüllung des Ringraums zwischen Kunststoffwellrohr und Bohrlochwandung mit Zementstein im Sinne eines zweiten Schutzes ergänzt wird. Außerdem sind bei dem 'doppelten' Korrosionsschutz' auch im Bereich der Muffen der Zugglieder und der Kopfausbildung besondere Maßnahmen zum Korrosionsschutz zu ergreifen.

Die Norm DIN EN 14490:2010-11 regelt die Ausführung von Bodenvernagelungen.

3 Bemessungs- und Nachweiskonzept für Vernagelungen

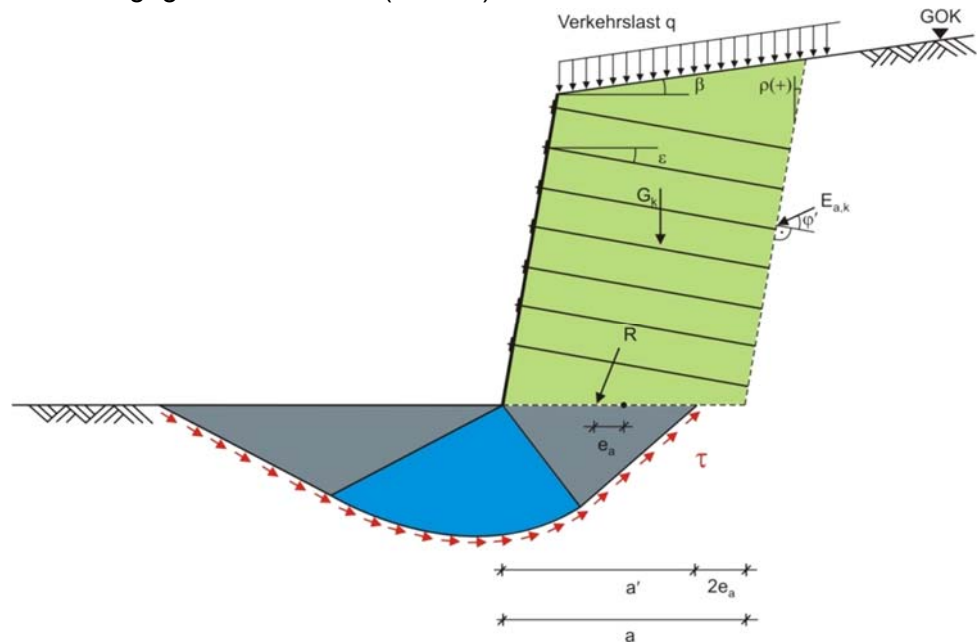
3.1 Normative Anforderungen und Nachweiskonzept

Für die Bemessung von Bodenvernagelungen gibt es auf nationaler deutscher Ebene keine spezifischen normativen Vorgaben, da vernagelte bzw. - allgemein - bewehrte Bodensysteme bisher im maßgebenden Eurocode 7, Band 1, nicht explizit geregelt werden. Entsprechende normative Vorgaben sind erst in der zweiten Generation des Eurocode 7, dann im EN 1997-3, Abs. 9, ab etwa 2025 zu erwarten.

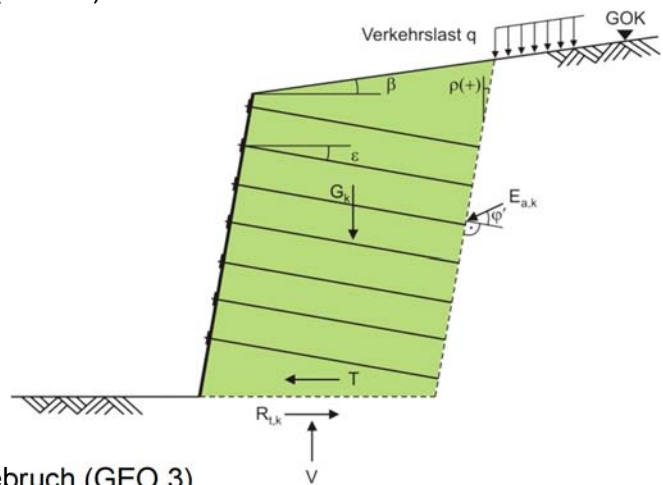
Bei dem heute allgemein gebräuchlichen Bemessungsansatz wird davon ausgegangen, dass sich ein vernagelter Bodenkörper bei Belastung wie ein Verbundkörper verhält. Demnach werden die äußeren Standsicherheitsnachweise bei Bodenvernagelungen in der Regel nach der „Monolith-Theorie“ analog einer Schwergewichtswand geführt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der durch die in einem Raster von max. 1,5 m x 1,5 m angeordneten Bodennägel vernagelte Bodenbereich sich als ein Monolith verhält (grüner Bereich in Abb. 4). Für diesen durch die Bodennägel in seinem mechanischen Verhalten ertüchtigte Bodenbereich werden alle maßgeblichen „äußeren Standsicherheitsnachweise“ nach Handbuch Eurocode 7 analog des Vorgehens für eine Schwergewichtswand geführt, i.e. die Nachweise der Sicherheit gegen Geländebruch, gegen Gleiten, gegen Geländebruch und gegen Kippen (auszugsweise in Abb. 4). Den Standsicherheitsnachweisen liegen dabei Gleichgewichtsbetrachtungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1997-1:2022-12 und DIN 1054:2021-04 zu Grunde. Aussagen zu der Beanspruchung der Nägel lassen sich aus diesen Ansätzen nicht ableiten.

Neben den äußeren Standsicherheitsnachweisen sind für Bodenvernagelungen innere Standsicherheitsnachweise zu führen, mit denen originär nachzuweisen ist, dass die gewählte Nagellänge und der gewählte Nageltyp ausreichend sind. Beim Nachweis der inneren Standsicherheit wird für den zuvor als monolithisch betrachteten Bodenbereich für alle Aushubzustände durch Variation des Gleitflächenwinkels die ungünstigste Gleitfläche mit dem größten Ausnutzungsgrad bestimmt. Dabei kommt wiederum unter Annahme ebener Gleitflächen eine Starrkörpertheorie zum Ansatz, bei denen Gleichgewichtsbetrachtungen im Grenzzustand erfolgen (Abb. 5a). Die betrachteten Gleitkörper suggerieren eine Beanspruchung der Nägel auf Scherung bzw. Querkraft; tatsächlich werden die Bodennägel in diesen Standsicherheitsnachweisen aber rechnerisch lediglich mit ihrer Zugkraft in axialer Nagelrichtung angesetzt (Abb. 5b). Eine Querkraft- oder Biegemomenten-Beanspruchung der Bodennägel ergibt sich also auch in diesen inneren Standsicherheitsnachweisen rechnerisch nicht.

a) Nachweis der Sicherheit gegen Grundbruch (GEO 2)



b) Nachweis der Sicherheit gegen Gleiten (GEO 2)



c) Nachweis der Sicherheit gegen Geländebruch (GEO 3)

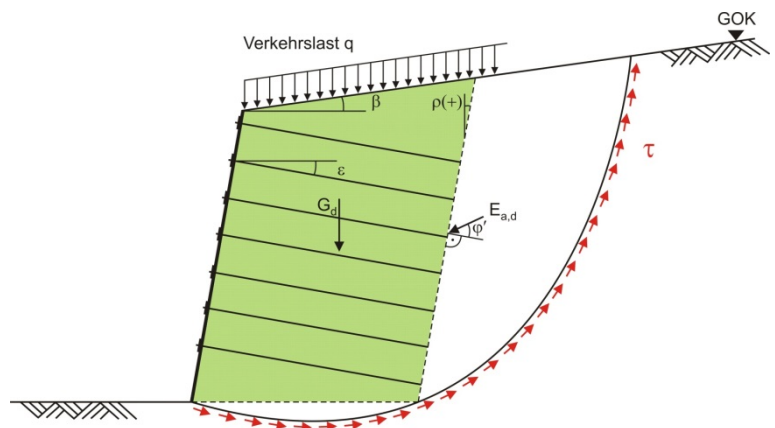
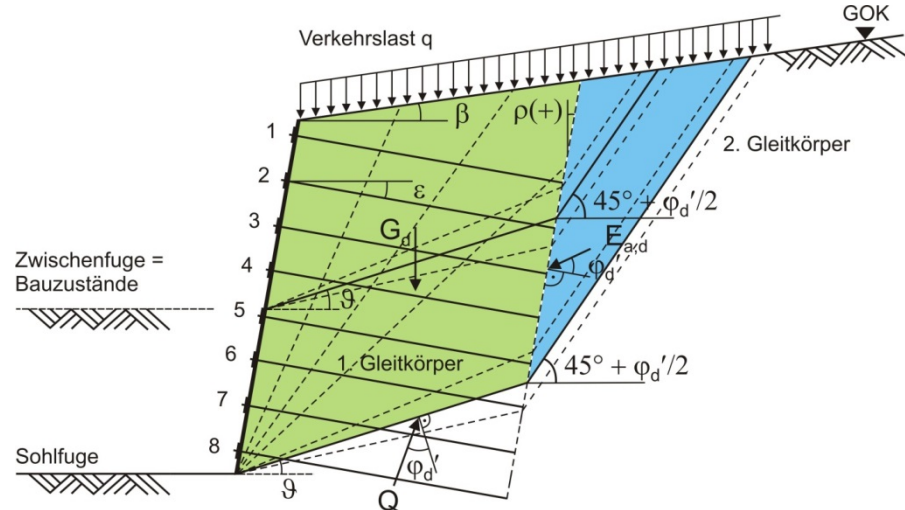


Abb. 4 Äußere Standsicherheitsnachweise für Bodenvernagelungen

- a) Variation der Gleitflächenwinkel für einen Zwischenbauzustand und für das Endaushubniveau



- b) Ansatz der Nagelkräfte beim Nachweis der inneren Standsicherheit für eine ausgewählte Gleitfuge

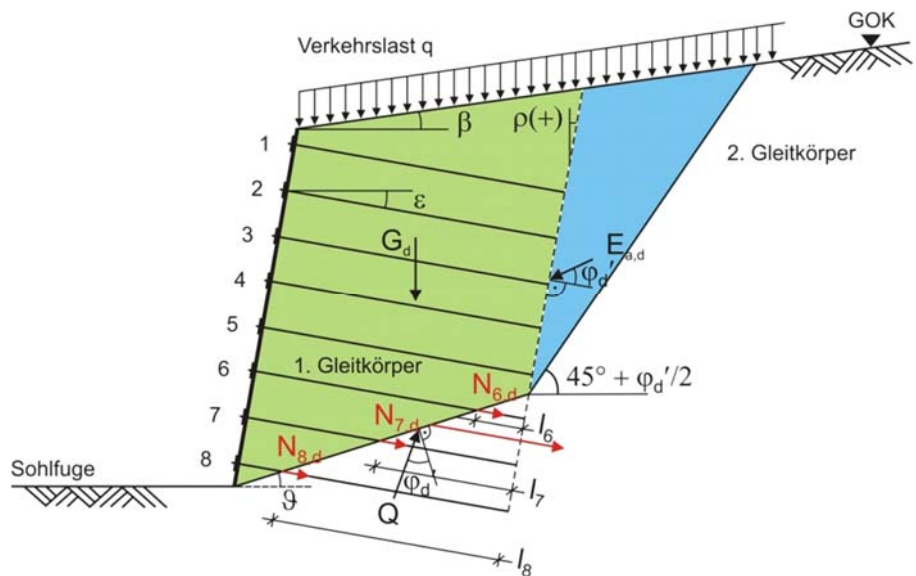


Abb. 5 Innere Standsicherheitsnachweise für Bodenvernagelungen

Neben der Bemessung der Spritzbetonschale sowie gegebenenfalls weiteren Nachweisen für die Anschlüsse ist mit der versuchstechnischen Ermittlung des axialen Herausziehwiderstandes eines Bodennagels (Probebelastung) eine wesentliche Annahme für den Nachweis der inneren Standsicherheit zu validieren. Auch bei dieser auf der projektspezifischen Baustelle auszuführenden Probebelastung werden die Nägel rein axial auf Zug beansprucht.

Dieses Vorgehen zur Bemessung von Bodenvernagelungen entspricht den in den Zulassungsbescheiden des DIBt für Kurzzeit- und Dauerbodenvernagelungen enthaltenen 'Bestimmungen für Entwurf und Bemessung' (u.a. DIBt, 2016 und 2017).

Die Gebrauchstauglichkeit von Bodenvernagelungen bzw. die Verformungsauswirkungen auf im Einflussbereich einer Bodenvernagelung stehenden baulichen Einrichtungen kann mit analytischen Methoden nicht bewertet werden; diesbezüglich kommen in der Ingenieurpraxis neben Abschätzungen auf der Basis von Erfahrungswerten im Wesentlichen numerische Simulationen - meist in Form von Finite-Element Berechnungen - zum Einsatz. Erfahrungsgemäß liegen die die horizontalen Verformungen von Nagelwänden bei ca. 2 bis 4 ‰ der Wandhöhe.

3.2 Bewertung des Bemessungskonzeptes für Bodenvernagelungen

Die Darstellung in Abschnitt 3.1 zeigt, dass entsprechend dem anerkannten Bemessungskonzept den Nägeln eine rein axiale Zugbeanspruchung zugewiesen wird. Auch in den Zulassungsbescheiden wird ein Nachweis der Beanspruchung oder gar der Sicherheit gegen Abscheren der Nägel nicht verlangt.

Im Bruchzustand bzw. Grenzzustand der Tragfähigkeit wird für den Nachweis der inneren Tragfähigkeit ein Versagensmechanismus betrachtet, der aus zwei starren Bruchkörpern mit drei vereinfacht als eben angenommenen Gleitfugen besteht (Abb. 5b). Die flache Hauptgleitfuge schneidet bei dieser Starrkörperkinematik die unteren Nagellagen und verzweigt sich am hinteren 'Vernagelungsrand' in eine steil ansteigende Hauptgleitfuge, die mit der Gleitfuge des aktiven Gleitkeils korreliert, und eine Zwischengleitfuge, die entlang des hinteren 'Vernagelungsrandes' verläuft. Die untere Hauptgleitfuge ist bei entsprechender Ausbildung im Bruchzustand faktisch mit einer Scherbeanspruchung der Nägel der geschnittenen Nagellagen verbunden, auch wenn die Nägel rechnerisch nur mit ihrer aufnehmbaren Zugbeanspruchung berücksichtigt werden. Die Nägel bewehren den Boden und nehmen Zugkräfte auf, die der Boden aus Gleichgewichtsbetrachtungen an freigeschnittenen Starrkörpern im Bruchzustand nicht aufnehmen kann.

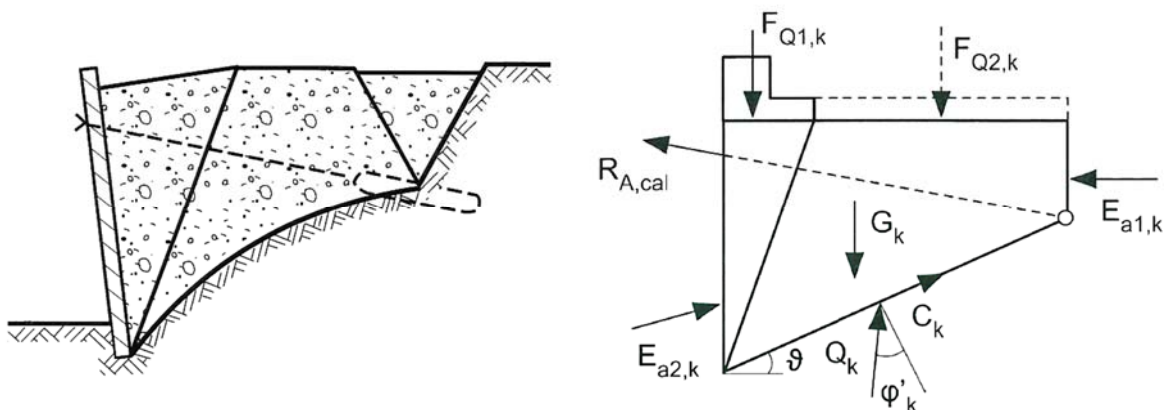


Abb. 6 Angenommener Verformungs-/Gleitkörpermechanismus und Nachweis-konzept für rückverankerte Verbauwände

Der für die Bemessung einer Bodenvernagelung angenommene zusammengesetzte Starrkörperbruchmechanismus (Abb. 5) ähnelt dem Versagensmechanismus, der der Bemessung von



mit Verpressankern oder Zugpfählen rückverankerten Verbauwänden zu Grunde gelegt wird (Abb. 6). Auch hier führt die in der Regel bereits im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit vorausgesetzte Aktivierung des aktiven Erddrucks und die damit einhergehende Ausbildung des aktiven Gleitkeils auf einer ebenen Gleitfläche zu einer theoretischen Scherbeanspruchung des Zugpfahles bereits im Gebrauchszustand (siehe auch WICHTER & MEININGER 2004, 2018), was aber in der Bemessungspraxis bei der konstruktiven Bemessung der Zugpfähle wie auch beim Nachweis des ausreichenden Korrosionsschutzes vernachlässigt wird .

Die Vorhersage der Verformung von Nagelwänden im Gebrauchszustand ist mit analytischen Methoden nicht und mit empirischen Methoden nur sehr eingeschränkt möglich. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Vernagelungen ist aber der Beanspruchungszustand des das Stahlzugglied umhüllenden Zementsteins im Gebrauchszustand maßgeblich. Dieser Gebrauchszustand wird durch die zuvor betrachteten Bruchzustände nicht (annähernd) zutreffend abgebildet.

4 Experimentelle Untersuchungen aus der Literatur

4.1 Feldversuch von GÄBLER (1987)

4.1.1 Versuchsrandbedingungen und -durchführung

Das Forschungsprojekt „Bodenvernagelungen“ wurde in den Jahren 1976 bis 1980 vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) finanziert, von der Spezialtiefbaufirma Karl Bauer KG aus Schrobenhausen durchgeführt und vom Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe konzipiert und wissenschaftlich begleitet.

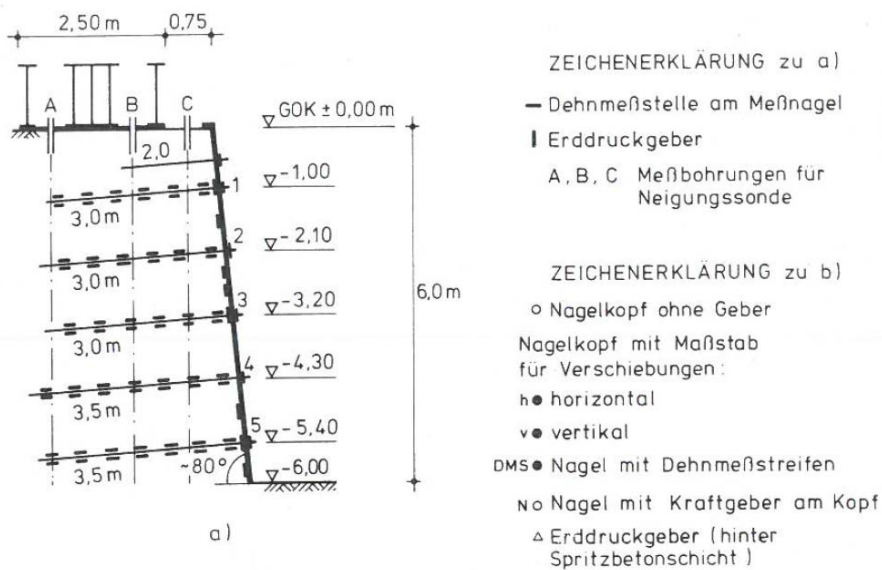
Eingebettet in vom Institut für Bautechnik und der Fa. Bauer, Schrobenhausen, geförderte Forschungsvorhaben hat GÄBLER (1987) das Verhalten von vernagelten Geländesprüngen in kleinmaßstäblichen Modellversuchen sowie in großmaßstäblichen Feldversuchen untersucht. Neben der Beobachtung der Versagensmechanismen der Nagelwände bei planmäßig herbeigeführten Bruchzuständen war die Messung der Wandverformungen und der Nagelkräfte im Bauzustand und unter (hohen) Gebrauchslasten ein wesentliches Ziel der Großversuche im Feld. Mit zahlreichen installierten Messgebern sollte ein möglichst vollständiges Bild über das Verformungs- und Tragverhalten von Nagelwänden im Bauzustand und unter (hohen) Gebrauchslasten gewonnen werden. Da neben den Nagelkräften am Kopf auch die Axial- und Biegedehnungen entlang der Stahlprofile gemessen wurden, konnte die Verteilung der Axialkräfte und der Biegemomente längs der Nägel bei den Versuchen messtechnisch erfasst werden.

Insgesamt wurden sieben Großversuche mit vernagelten Wänden von 6 m bzw. 7 m Höhe durchgeführt, davon vier Versuche in Sanden (Wände A bis D), zwei Versuche in Ton (Wände

E und G) und ein weiterer Versuch in Sand und Ton (Wand F). Die Großversuche sind u.a. in STOCKER (1976), GÄBLER (1977), STOCKER & GÄBLER (1979) SOWIE GÄBLER (1987) dokumentiert.

Besonders interessant ist hierbei der Großversuch B, der aus einem 6,0 m hohen, in fünf Lagen vernagelten Geländesprung im Sand (Abb. 7) besteht, bei dem unter anderem Wandverformungen gemessen, Nagelschnittgrößen in Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und in Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelt sowie Versagensmechanismen beobachtet wurden.

a)



b)

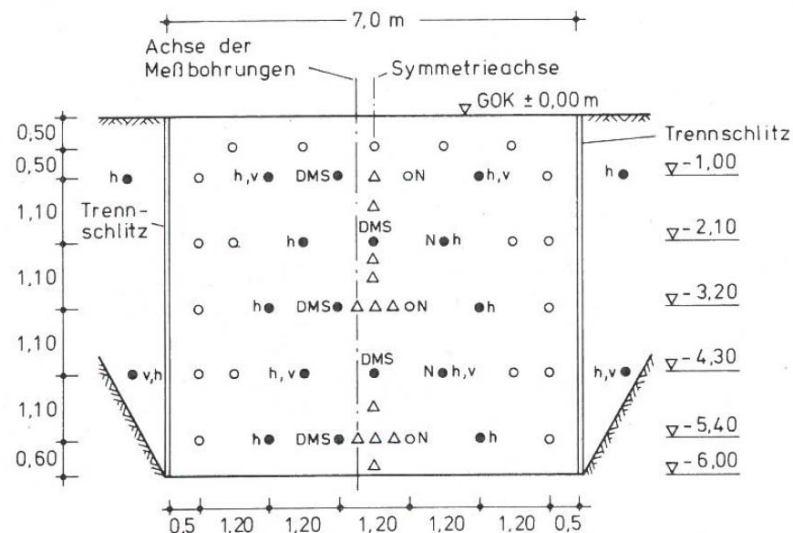


Abb. 7 Konfiguration 'Großversuch B' zur Bodenvernagelung von GÄBLER (1987):
 a) Schnitt durch vernagelte Wand; b) Ansicht mit Messeinrichtungen

Im Rahmen der Großversuche wurde die Versuchswand durch zwei parallele Schlitzwände im Abstand von 7,0 m vom umgebenden Erdreich abgetrennt. Dadurch konnte eine Art

‘Modellkastenversuch’ realisiert werden, bei der sich eine Gleitkörperkinematik ohne bzw. mit reduzierter Seitenreibung einstellen kann. Die Nagelkräfte am Kopf der Nägel wurden mithilfe hydraulischen Kraftmessdosen ermittelt, während die Verteilung der Normalkräfte und Biegemomente entlang des Nagelverlaufs indirekt durch Dehnmessstreifen (DMS) bestimmt wurde. Inklinometermessungen in den vertikalen Bohrlöchern A, B und C (0,35 m, 1,35 m und 2,85 m hinter der Wand) ermöglichten die Erfassung von Horizontalverschiebungen im Boden während der Aushub- und Belastungsphase.

Nach Fertigstellung des Geländesprungs wurde die Bodenvernagelung an der Geländeoberkante mit einer Streifenlast der Breite 2,50 m, die 0,75 m hinter der Wand auf die Geländeoberfläche einwirkte, sukzessive bis zum Erreichen eines Bruchzustandes belastet, der bei einer Auflast von $p_f = 150 \text{ kN/m}^2$ erreicht wurde.

Maßgeblich für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Konstruktion sind indes die Beanspruchungen unter Eigengewicht und unter Gebrauchslast. In den Abbildungen 8 bis 10 ist der Zustand unter Eigengewicht mit dem Index „0.2.1 Eigengewicht“ markiert, während die Kurven mit dem Index „100.1“ bereits einer sehr hohen Einwirkung (Streifenlast) von $p = 100 \text{ kN/m}^2$ an der Geländeoberfläche entspricht. Bei einer Streifenlast von $p = 150 \text{ kN/m}^2$ wurde ein Bruchzustand erreicht (Index „150.1.1“), Kurven mit dem Index „110.2“ bezeichnen bereits das Nachbruchverhalten.

4.1.2 Verformungen und Verschiebungen

Die im Zuge des ‘Großversuchs B’ messtechnisch aufgezeichneten Verformungen sind in Abbildung 8 zusammenfassend ausgewertet.

Nach Endaushub und Fertigstellung der vernagelten Wand betrug die horizontale Verschiebung der oberen Wandkante im Bohrloch C demnach 14 mm, entsprechend 2,3 ‰ der Wandhöhe (Abb.8). Unter sehr hohen Auflasten ($p = 100 \text{ kN/m}^2$) stieg diese Verschiebung auf 20 mm, i.e. 3,5 ‰ der Wandhöhe.

Bei hohen Gebrauchslasten betragen die horizontalen Verformungen der Wandhaut etwa 5÷6 mm, während sie unter Bruchlasten im Wandkopfbereich 20 mm und in halber Höhe des Geländesprungs etwa 30 mm erreichen.

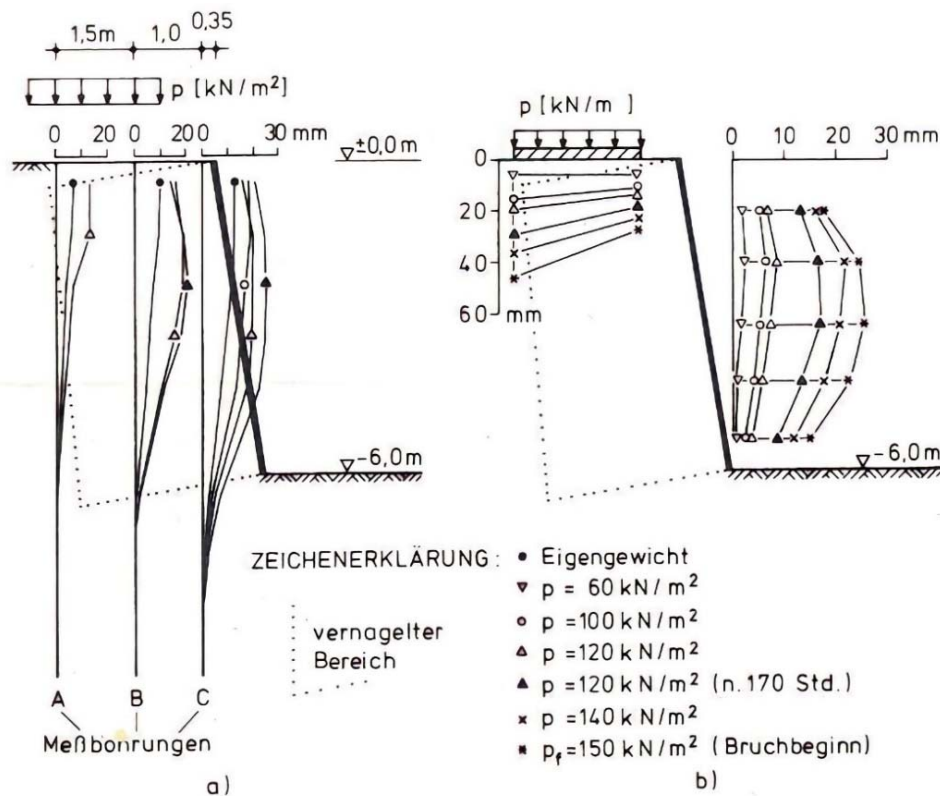


Abb. 8 'Großversuch B' nach GÄSLER (1987): a) Horizontalverformungen im Bodenkörper infolge Eigengewicht und Auflasten; b) Horizontalverformungen der Wandhaut und Vertikalverschiebungen des Laststreifens nur infolge Auflasten bis zum Bruch

4.1.3 Beanspruchung der Bodennägel

Abbildung 9 zeigt die Verläufe der gemessenen axialen Nagelkräfte aller fünf Nagelreihen nach der Fertigstellung des Geländesprungs und bei ausgewählten Stufen während der Erhöhung der Geländeauflast. In allen Lagen nehmen die Nägel Zugkräfte infolge der seitlichen Entspannung des Bodens beim Aushub und der nach Fertigstellung beaufschlagten vertikalen Streifenlast auf

Die Nagelreihen 1 bis 3 zeigen einen parabelförmigen Nagelkraftverlauf mit einem Maximum im mittleren Bereich der Nägel, was mit dem im Abbildung 3 dargestellten qualitativen Verlauf korreliert. Bei den Nagelreihen 4 und 5 hingegen ist ein ansteigender Nagelkraftverlauf mit einer maximalen Zugkraft im Bereich des Nagelkopfs zu beobachten.

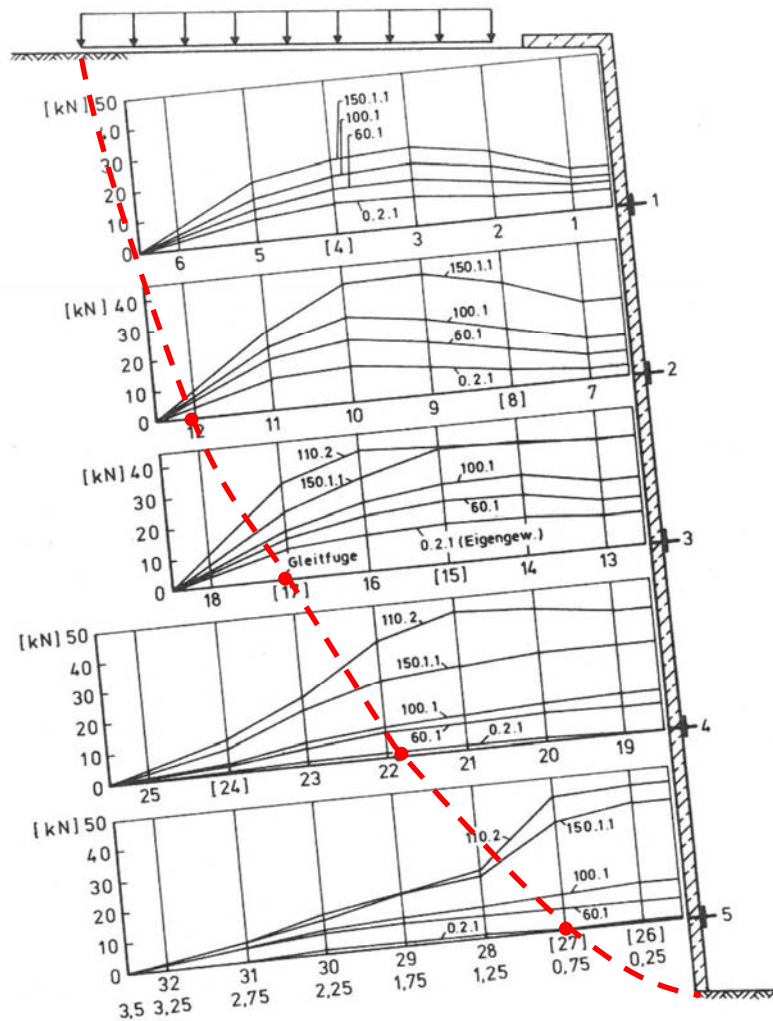


Abb. 9 'Großversuch B' nach GÄBLER (1987): Verlauf der gemessenen axialen Nagelkräfte aller Reihen nach Wandherstellung bei verschiedenen Laststufen

Neben den Normalkräften stellen die in den Nägeln gemessenen Biegemomente eine wichtige Information dar, um den resultierenden Beanspruchungszustand der Zuelemente beurteilen zu können. Wie die GÄBLER (1987) entnommene Darstellung der Messergebnisse in Abbildung 10 zeigt, werden leider nur die Biegemomente bei Erreichen des Bruchzustandes unter einer sehr hohen Streifenlast von $p = 150 \text{ kN/m}^2$ (Index „150.1.1“) sowie beim Nachbruchzustand (Kurven mit dem Index „110.2“) dokumentiert. Für die während der Herstellung des Geländesprungs und unter üblichen Geländeaufasten möglicherweise mobilisierten Biegemomente werden keine Messergebnisse dokumentiert, so dass die Beanspruchung im Gebrauchszustand nicht beurteilt werden kann.

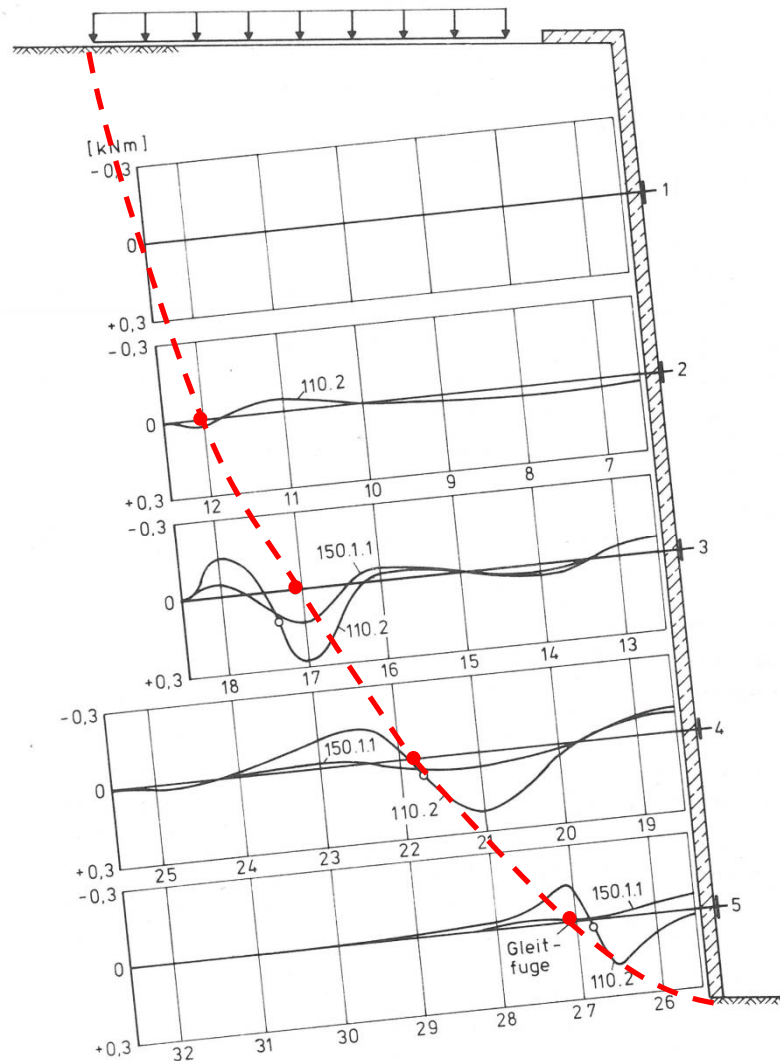


Abb. 10 'Großversuch B' nach GÄßLER (1987): Verlauf der gemessenen Biegemomente in den Nägeln im Bruchzustand

Die gemessenen Biegemomente der Nägel (Abb. 10) zeigen mit $M \leq 0,10$ kNm eine sehr geringe Biegemomentenbeanspruchung der Nägel in allen Lagen im Anfangsbruchzustand (Index „150.1.1“), bei dem die Relativverschiebung der Gleitfugenränder gerade beginnt bzw. erst wenige Millimeter beträgt (GÄßLER 1987). Es ist hieraus zu folgern, dass im Gebrauchstauglichkeitszustand die Biegemomentenbeanspruchung und damit auch die aus der Momentenlinie ableitbare Querkraftbeanspruchung deutlich geringer sein dürften, da sich in diesem Zustand, wie die gemessenen Verformungen (Abb. 8) belegen, noch keine Gleitfugen ausgebildet haben.

Erst im Nachbruchzustand, d.h. nach Eintritt größerer Verformungen und nach Ausbildung einer Gleitfuge und dem Auftritt größerer Relativverschiebungen, sind größere Biegemomente mit bis zu etwa $M = 0,28$ kNm in den Nägeln entstanden.



Es ist hervorzuheben, dass in der Literatur nur diese messtechnisch basierte Untersuchung von GÄBLER (1987) bekannt ist, bei der die Biegemomente in Bodennägeln auf diese Weise eindeutig gemessen und ausgewertet wurden. In anderen Literaturquellen sind diese Informationen in dieser Form nicht zu finden. Daher ist das Forschungsprojekt von GÄBLER (1987) von großer Bedeutung für die Beurteilung des Verhaltens von Bodenvernagelungen im Gebrauchszustand sowie im Übergang zum Grenzzustand der Tragfähigkeit bzw. Standsicherheit.

Auf der Basis dieses sehr gut instrumentierten Fallbeispiels erscheint unter Berücksichtigung der selbst beim Versagen der Wand gemessenen, relativ geringen mobilisierten Biegemomente (Abb. 10) der in der Bemessungspraxis übliche ausschließliche Ansatz von Nagelzugkräften im Grenzzustand grundsätzlich gerechtfertigt (RENK 2011). Im Gebrauchszustand ist bei diesem Fallbeispiel die Biegemomenten- und Querkraftbeanspruchung der Nägel sehr klein, was im Hinblick auf die Beanspruchung der Zementsteinumhüllung und damit auf die Dauerhaftigkeit positiv zu bewerten ist und die Vermutung nähert, dass die Beanspruchung des Zementsteins von (Dauer-)Bodennägeln im Gebrauchszustand so gering sind, dass ein alternativer Nachweis des dauerhaften Korrosionsschutzes unter Einhaltung von Grenzwerten einer zulässigen Rissweite und unter Verzicht auf einen konstruktiven doppelten Korrosionsschutz möglich erscheint. Nagelquerkräfte („Dübelkräfte“) an der Gleitfuge werden erst im späteren Bruchverlauf aktiviert und sind auch dann im Vergleich zu den axialen Nagelkräften sehr gering.

4.2 „Clouterre“-Forschungsprojekt

4.2.1 Aufbau der Feldversuche

„CLOUTERRE“ ist ein nationales Forschungsprojekt zu Bodenvernagelungen, das zwischen 1986 und 1990 in Frankreich durchgeführt wurde. Mit Hilfe von drei instrumentierten Versuchswänden wird das Verhalten einer vernagelten Wand während der Herstellung, im Betrieb und bis kurz vor dem Versagen untersucht. Die erste Wand diente zur Untersuchung des Bruchzustandes, die zweite zur Untersuchung der Stabilität und die dritte Versuchswand zur Simulation des Versagens.

Ziel des Projektes ist es, allgemeingültige Empfehlungen für den Bau von temporären und permanenten Bodenvernagelungen unter besonderer Berücksichtigung von Sicherheits- und Dauerhaftigkeitsaspekten zu erarbeiten. Von besonderem Interesse ist dabei die in Abbildung 11 dargestellte Versuchswand (‘Versuchswand 1’), die Aussagen über den Gebrauchszustand ergibt.

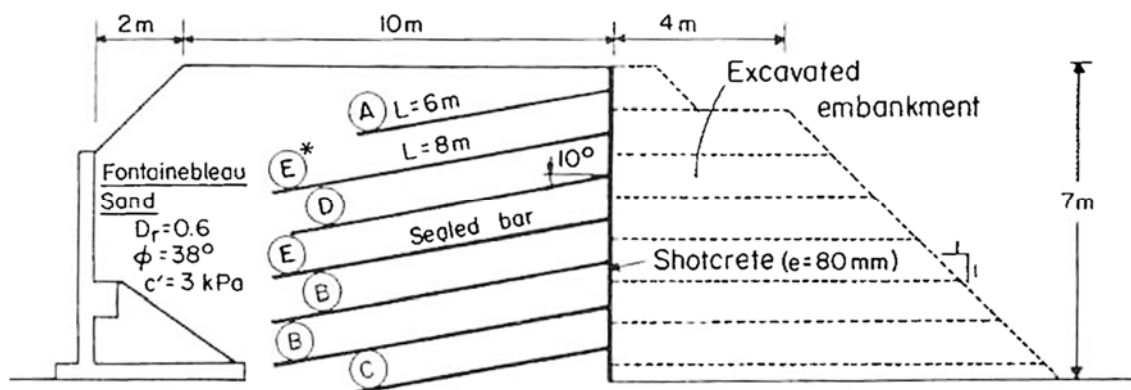


Abb. 11 Versuchsaufbau der ersten Wand nach PLUMELLE & SCHLOSSER (1991)

Die erste Versuchswand wurde mit einer Gesamthöhe von 7,0 m errichtet. Die Bodennägel haben eine Länge von 6,0 m bis 8,0 m. Die Bodennägel stehen in einem horizontalen Abstand von 1,15 m und einem vertikalen Abstand von 1,0 m zueinander mit einem Neigungswinkel von 10° zur Horizontalen. Als Nägel wurden Aluminiumrohre mit unterschiedlichen Durchmessern eingebaut, die, wie in Abbildung 12 dargestellt, mit einer Zementsteinummantelung mit einem Durchmesser von 0,063 m eingebaut wurden.

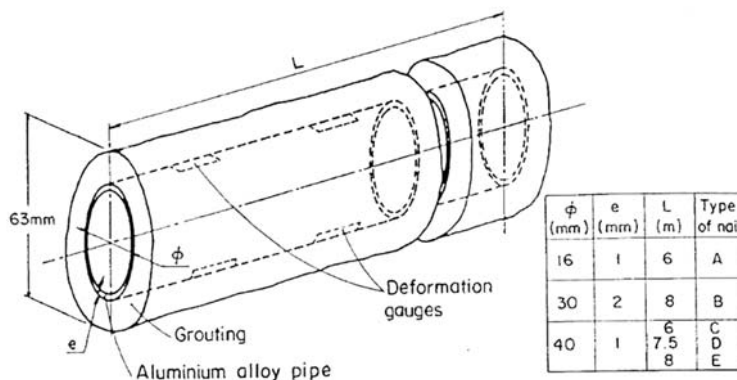


Abb. 12 Nagelaufbau nach PLUMELLE & SCHLOSSER (1991)

4.2.2 Gemessenes Verformungsverhalten

Nach Fertigstellung der Bodenvernagelung wurde diese allmählich von oben mit Wasser gesättigt, um die Bodendichte zu vergrößern und die Kohäsion zu verringern. Damit soll die Verformung durch Hochwasser, starke Niederschläge und Schneeschmelze simuliert werden. Durch die Einbindung der Spritzbetonschale in den Boden führte die Überflutung nicht zu einem vollständigen Versagen des Bauwerks. Die Versuchswand verschob sich gegenüber dem ursprünglichen Zu-stand aber um 18,0 cm (Abb. 13).

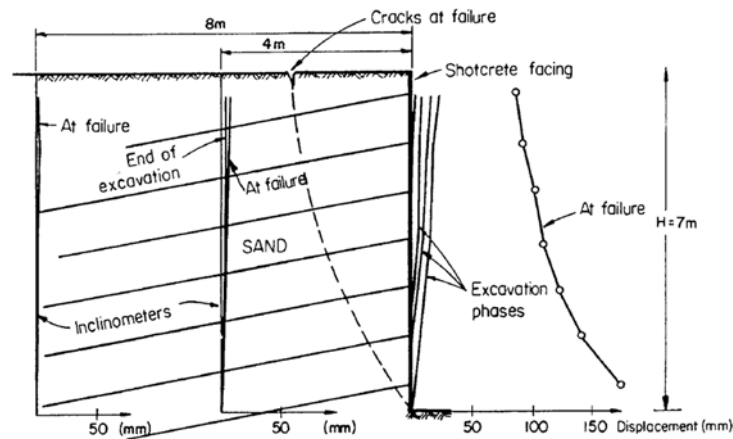


Abb. 13 Horizontalverschiebungen im Boden und Horizontalverformungen der ersten Versuchswand aus PLUMELLE & SCHLOSSER (1991)

4.2.3 Beanspruchung der Bodennägel

Wie in Abbildung 14 dargestellt, trennt die Lage der maximalen Normalkraft das Bodenkontinuum in eine aktive und passive Zone. Der Normalkraftverlauf in den Nägeln und die Lage der maximalen Normalkraft hängt im Allgemeinen von der Neigung der Wand und der Nägel ab. Die maximale Zugkraft nach dem Endaushub wurde in der dritten Nagellage mit ca. 19,0 kN gemessen.

Eine Biegebeanspruchung der Nägel wird nach den Versuchsergebnissen von PLUMELLE & SCHLOSSER (1991) erst bei großen Verformungen und im Versagenszustand bei Ausbildung einer Gleitfuge mobilisiert. Abbildung 15 zeigt die gemessenen Biegedehnungen des tiefsten Nagels kurz vor dem Versagen in Abhängigkeit der Sicherheitsfaktoren. Im Bauzustand und Gebrauchszustand können nach PLUMELLE & SCHLOSSER (1991) die in den Nägeln mobilisierten Biegemomente vernachlässigt werden, da diese deutlich geringer sind als die im Bruchzustand mobilisierten Biegemomente.

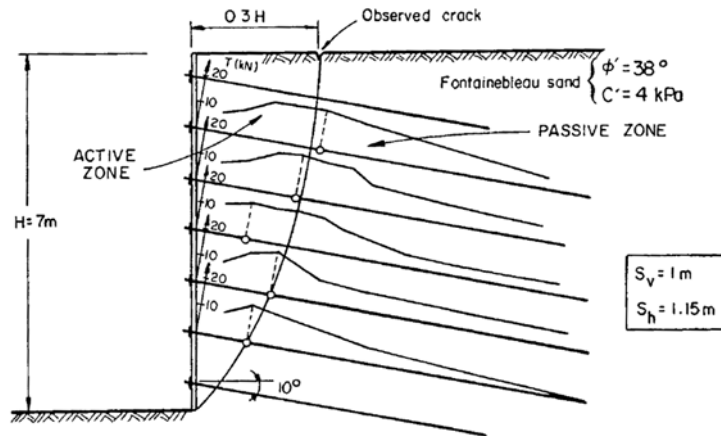


Abb. 14 Verlauf der gemessenen Nagelkräfte nach der Fertigstellung der ersten Versuchswand nach PLUMELLE & SCHLOSSER (1991)

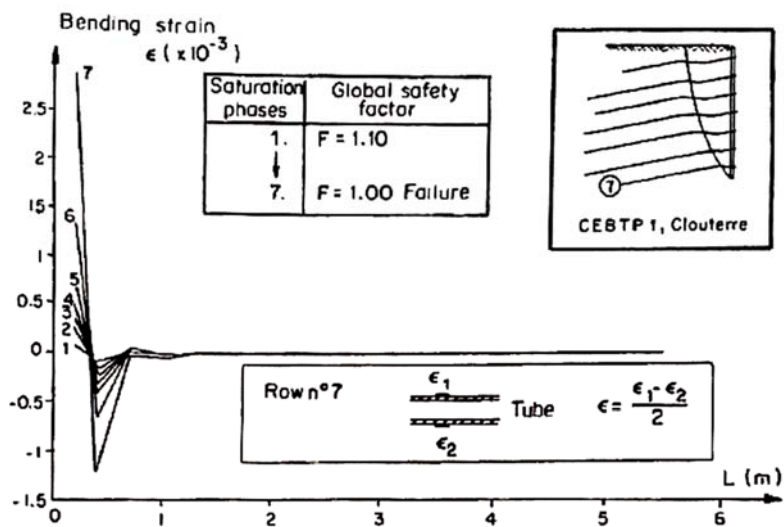


Abb. 15 Mobilisierung der Biegedehnungen im Nagel 7 in Abhängigkeit vom globalen Sicherheitsfaktor nach PLUMELLE & SCHLOSSER (1991)

4.3 Feldversuch nach SHAEHAN (2000)

4.3.1 Geometrische und geotechnische Randbedingungen des Feldversuchs

In dieser Studie wird die sogenannte Amherst-Wand beschrieben, eine instrumentierte, maßstabsgetreue Bodennagelwand, die auf der *National Geotechnical Experimentation Site* (NGES) in Amherst gebaut und durch einen bewusst zu tief reichenden Aushub ('*Overexcavation*') zum Versagen gebracht wurde. Das Projekt wurde von einer Kooperation aus geotechnischen Forschern, einer geotechnischen Industriegruppe und der FHWA (Federal Highway Administration) in den Vereinigten Staaten durchgeführt. Ziel der Untersuchung war die Überprüfung des globalen Sicherheitsfaktors im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter dem zusätzlichen Einfluss der mobilisierten Biegebeanspruchungen der Nägel nach dem Ansatz von JEWELL & PEDLEY (1990), um dies in die neue Fassung des Soil Nail Walls Reference Manuals des U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration zu übernehmen. Ein Schnitt durch die Versuchswand ist in Abbildung 16 zu sehen.

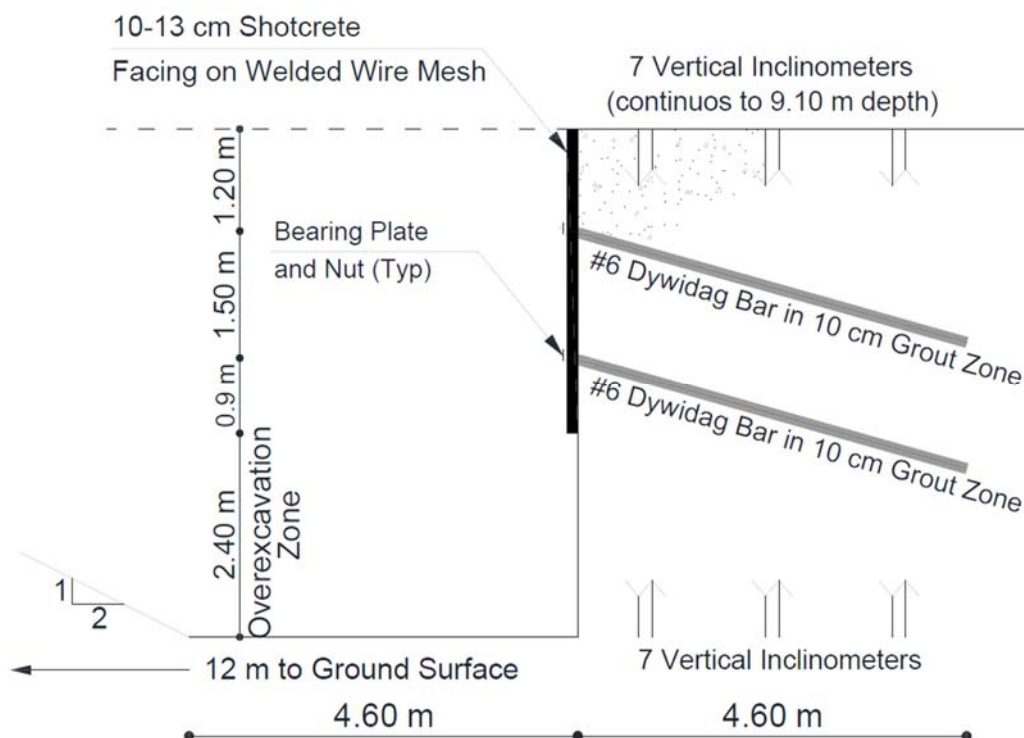


Abb. 16 Schnitt durch die Versuchswand aus SHAEHAN (2000)

Die Wandstärke der Spritzbetonsicherung beträgt $d = 10$ cm. Die Nägel bestehen aus dem DYWIDAG-System mit einem Durchmesser von $\varnothing = 19$ mm der Stahlgüte A615 (ASTM) und einer Zementsteinumhüllung von $D_B = 10$ cm. Der erste und zweite Aushub erfolgt bis zu einer Tiefe von 2,1 m bzw. 3,6 m. Nach jedem Aushubschritt wurden eine Nagelreihe installiert und die Spritzbetonschale mit der Bewehrungsmatte eingebaut. Nach Abschluss der zweiten

Phase wird der Boden bis zu einer Tiefe von 6,0 m ausgehoben, um gezielt die Nägel zu überlasten und die Wand zum Versagen zu bringen.

4.3.2 Gemessenes Verformungsverhalten

Abbildung 17 zeigt die gemessenen horizontalen Bodenverschiebungen über die Tiefe der drei Inklinometer, die in einem horizontalen Abstand von 1,0 m, 3,4 m und 6,4 m hinter der vernagelten Wand angeordnet sind. Das Verschiebungsprofil zeigt im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine maximale horizontale Verschiebung des Bodens im Bereich des Wandkopfes von 10,0 cm. Messungen mit geodätischen Punkten zeigen im Grenzzustand eine maximale Vertikalverschiebung der Geländeoberkante im Nahbereich der Wand von bis zu 0,9 m, die damit bis zu zehnmal größer ist als die maximale Horizontalverformung. Im Versagenszustand ergaben sich bei der Amherst-Testwand große vertikale Verformungen an der Geländeoberfläche, was darauf schließen lässt, dass die Nägel im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf Biegung mobilisiert wurden. In SHAEHAN (2000) wird festgestellt, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Nägel nicht nur auf Normalkraft (Zug), sondern auch auf Biegung mobilisiert werden, was zu einer Erhöhung der globalen Standsicherheit des vernagelten Geländesprungs um rund 20 % beiträgt.

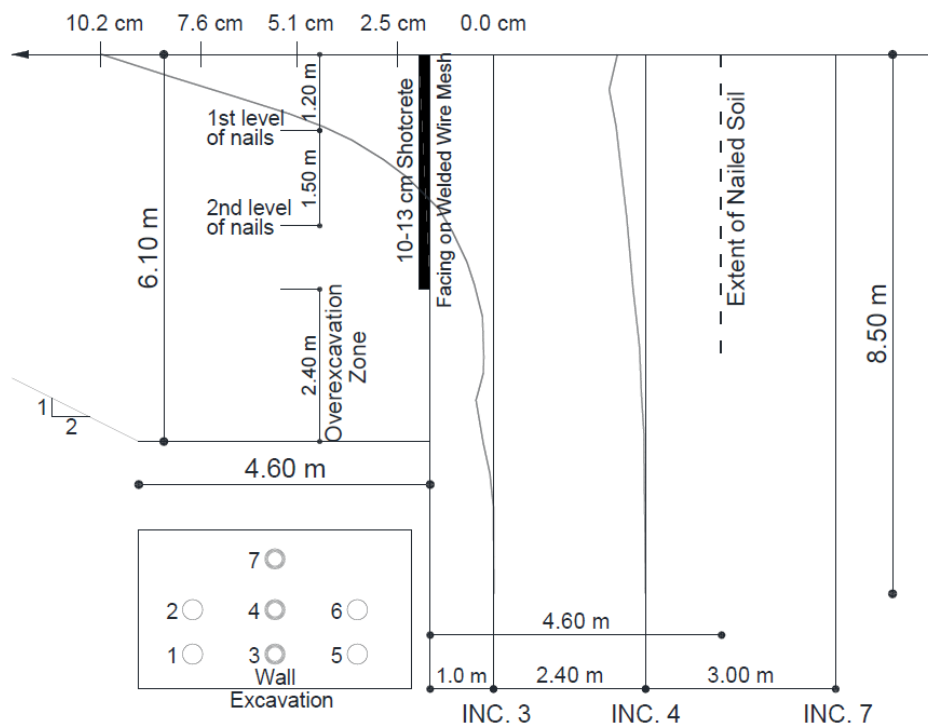


Abb. 17 Horizontale Bodenverschiebungen infolge Überlastung der vernagelten Wand aus SHAEHAN (2000)

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit können aus diesem Feldversuch hingegen keine Informationen gewonnen werden.

5 Messtechnisch basierte Erkenntnisse zum Trag- und Verformungsverhalten von Bodenvernagelungen

5.1 Feldmessungen nach STOCKER & RIEDINGER (1990)

5.1.1 Geometrische und geotechnische Randbedingungen

Im Jahr 1979 wurde in Stuttgart in Hanglage ein fast 15,0 m hoher durch eine Bodenvernagelung zu sichernder dauerhafter Hangeinschnitt geplant und realisiert, über den STOCKER & RIEDINGER (1990) berichten. Auf den oberen rund 8,8 m des herzustellenden Geländesprungs steht danach toniger, sandiger Schluff als Hanglehm an, der von Ton- und Schluffsteinen des Gipskeupers, also von Halbfestgestein, unterlagert wird. Eine Seite des Hangeinschnitts grenzte direkt an eine öffentliche Straße, während die andere Seite an Privathäuser grenzte. Da unter den Nachbargebäuden keine Anker gebohrt werden durften, wurde die Ausführung einer Bodenvernagelung unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten gewählt. Abbildung 18 zeigt einen Querschnitt der Wand, aus dem sich die Geometrie, der Baugrundaufbau und die Ausbildung der Vernagelung zu erkennen sind.

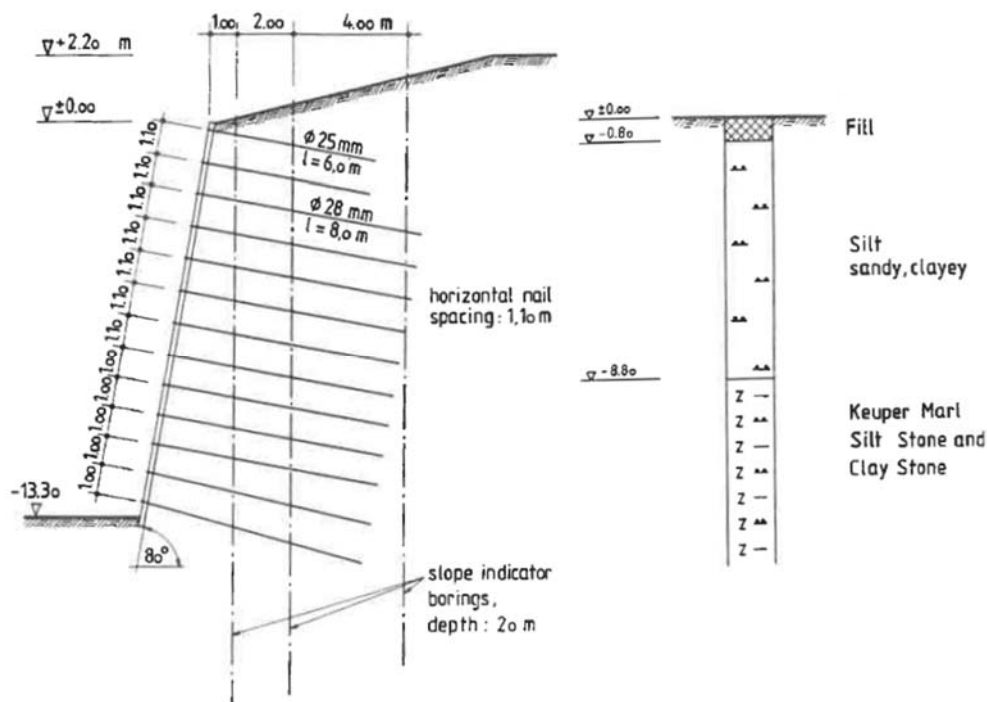


Abb. 18 Vertikalschnitt durch den vernagelten Geländesprung in Stuttgart nach STOCKER & RIEDINGER (1990)

Im Zuge der Herstellung des Geländeinschnitts wurde über die gesamte Höhe in vertikalen Abständen von 1,0 m bzw. 1,1 m Nagelreihen hergestellt. Die Bodennägel bestehen aus Stahlstäben mit Durchmessern von 25 mm und 28 mm sowie einer Streckgrenze von 420 N/mm² bei einer Bruchfestigkeit von 500 N/mm². Die Nägel wurden mit einem doppelten Korrosions-

schutz ausgeführt. Zum Korrosionsschutz wurde ein gewelltes PVC-Rohr mit einer Stärke von 1,0 mm verwendet, dessen Ringraum zum Stahlstab mit Zementsuspension verfüllt wurde. Die Wandhaut besteht aus bewehrtem Spritzbeton in einer Dicke von 25 cm.

Verschiedene Messeinrichtungen wurden installiert, um die Verformung der Wand, Bodenverschiebungen und die Verteilung der Nagelkräfte zu messen. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von 10 Jahren kontinuierlich durchgeführt und so Informationen über das dauerhafte Verhalten im Gebrauchszustand gewonnen.

Bodenart	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kN/m ²]	E_s [MN/m ²]
Auffüllung	19,0	30,0	-	-
toniger, sandiger Schluff	20,0	27,5	5 ÷ 10	15 ÷ 25
Ton- und Schluffstein	21,0	23	> 50	40 ÷ 80

Tab. 1 Bodenparameter gemäß STOCKER & RIEDINGER (1990)

5.1.2 Gemessenes Verformungsverhalten

Nach Analyse von STOCKER & RIEDINGER (1990) ergeben sich die resultierenden horizontalen Verformungen eines vernagelten Geländesprungs durch die Scherung bzw. Schubverformungen und durch die 'Biegung' des vernagelten Bodenkörpers sowie durch die horizontale Verschiebung des Bodens unterhalb des vernagelten Bodenkörpers (Abb. 19).

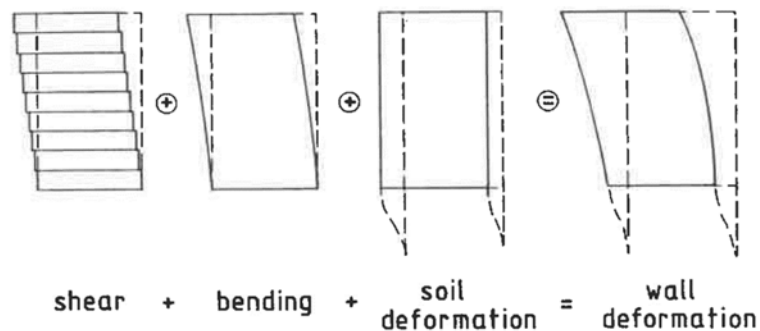


Abb. 19 Vernagelter Geländesprung in Stuttgart: Horizontales Verformungsverhalten eines vernagelten Bodenkörpers nach STOCKER & RIEDINGER (1990)

Die horizontalen Bodenverschiebungen wurden mit drei in einem Abstand von 1,0 m, 3,0 m und 7,0 m hinter dem Wandkopf installierten Inklinometern gemessen (siehe Abb. 20). Die Messungen in den Inklinometern zeigen, dass die Bodenverschiebungen mit zunehmendem Abstand von der Wand abnehmen. Auch in einem horizontalen Abstand von 7,0 m Entfernung von der Wand wurde noch eine horizontale Verschiebung von 13,0 mm (ca. 0,1 % der Wandhöhe) beobachtet.

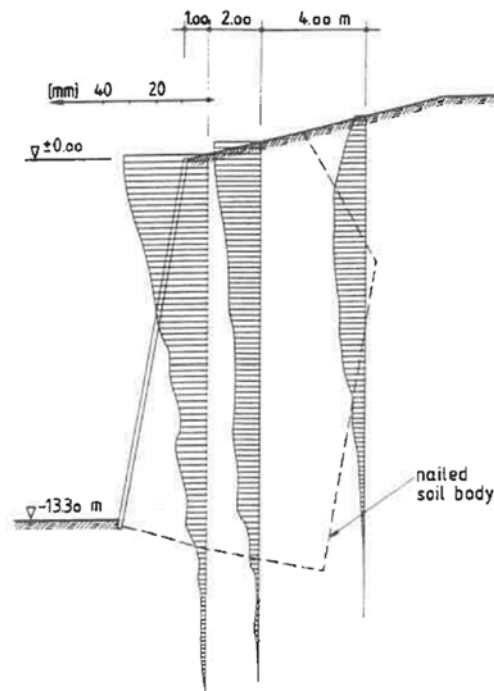


Abb. 20 Vernagelter Geländesprungung in Stuttgart: Gemessene Horizontalverschiebungen nach STOCKER & RIEDINGER (1990)

5.1.3 Beanspruchung der Bodennägel

Bei dem Projekt im Realmaßstab wurden auch ausgewählte Nägel messtechnisch instrumentiert. Allerdings wurden an diesen Ankern nur die axialen Verzerrungen gemessen, nicht aber eine mögliche zusätzliche Biegemomentenbeanspruchung, so dass im Ergebnis nur Erkenntnisse zu den mobilisierten Normalkräften gewonnen werden können.

In Abbildung 21 sieht man für die dritte Nagelreihe die Verteilung der gemessenen Nagelkraft über die Nagellänge für fünf verschiedenen Aushubzustände. Es ist zu erkennen, dass die Nagelkräfte im mittleren Bereich der Nägel relativ konstant sind, zu dem Nagelkopf und dem Nagelende hin aber abfallen. Es fällt ferner auf, dass die Nagelkräfte in der relativ weit oben liegenden dritten Nagelreihe nur etwa bis zum Aushubniveau 'H' ansteigen und dann beim weiteren Aushub annähernd konstant bleiben, d.h. bis zum Endaushubzustand 'N' keine wesentliche weitere Aktivierung mehr erfährt.

Der gemessene Verlauf der Axialkräfte über die Länge der Nägel für verschiedene ausgewählte Nagellagen sind für den finalen Aushubzustand in Abbildung 22 dargestellt. Die Lage der in den jeweiligen Lagen gemessenen maximalen Normalkraft ist markiert. Die Darstellung verdeutlicht, dass in den oberen Nagellagen die maximale Normalkraft eher erdseitig liegt, während in den unteren Nagellagen eher näher am luftseitigen Nagelkopf liegt.

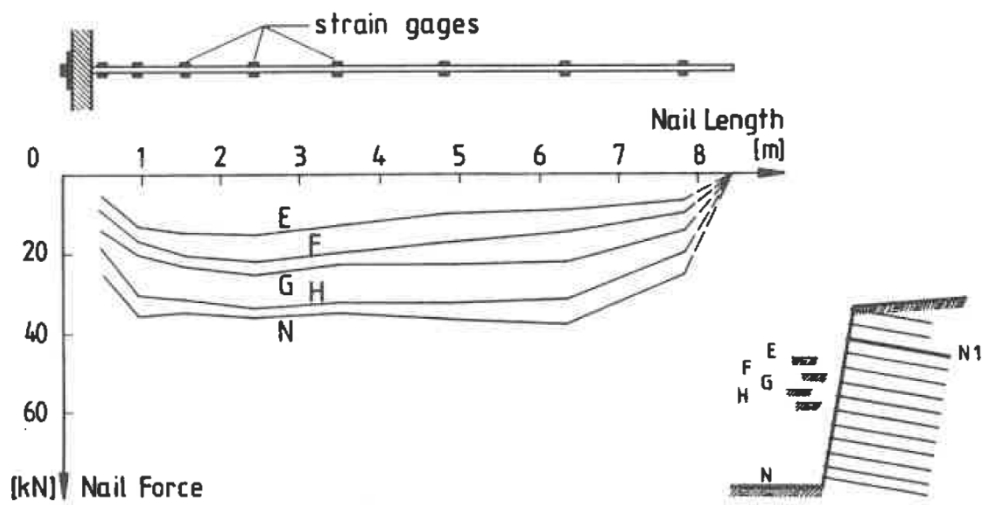


Abb. 21 Normalkraftverteilung über die dritte Nagelreihe bei verschiedenen Aushubsphasen nach STOCKER & RIEDINGER (1990)

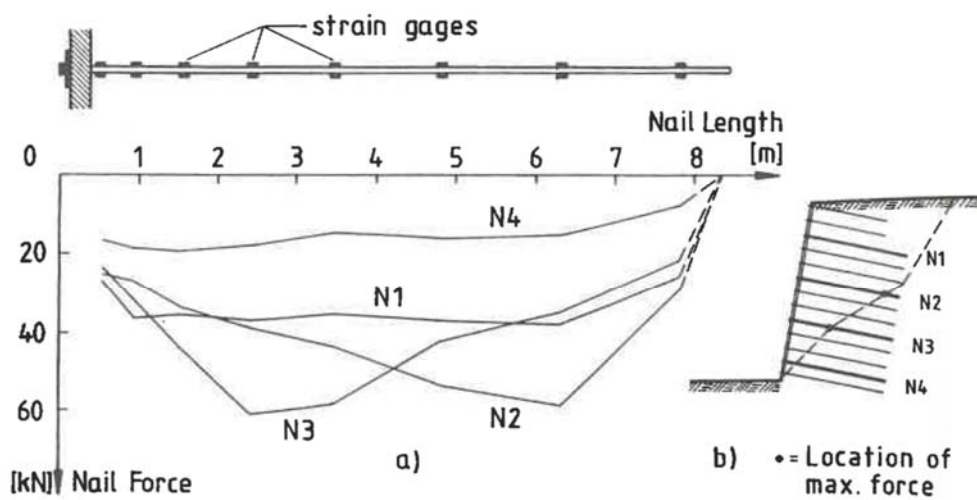


Abb. 22 Nagelkräfte im Endaushub aus STOCKER & RIEDINGER (1990)

5.2 Feldmessungen nach Beanspruchung der Bodennägel THOMSON & MILLER (1990)

5.2.1 Geometrische und geotechnische Randbedingungen

Das Projekt besteht aus zwei vernagelten Geländesprüngen von 10,7 m und 16,8 m Höhe in Seattle, Washington. Auf der einen Seite grenzt eine öffentliche Straße an, auf der anderen Seite befinden sich bestehende Gebäude. Aufgrund fehlender Informationen zum Verformungsverhalten der vernagelten Wände war es erstmalig unsicher, ob diese Systeme ausreichen, um die vorhandenen Gebäude ausreichend zu schützen.

Abbildung 23 zeigt einen Vertikalschnitt durch den 16,8 m hohen vernagelten Bodenkörper sowie die Bodenkennwerte, die in der Planungsphase verwendet wurden. Das Grundwasser befindet sich unterhalb der Baugrubensohle. Die Nägel wurden im Allgemeinen in vertikalen und horizontalen Abständen von 1,8 m angebracht, wobei Nägel des DYWIDAG-Systems mit Durchmessern von 25,0 mm bis 32,0 mm eingesetzt wurden. Die Nägel wurden mit einer Neigung von 15° und 20° in Bohrlöchern mit einem Durchmesser von 203,0 mm installiert.

Es wurde Messtechnik installiert, um die Bodenvernagelung zu überwachen. Dehnungsmessstreifen wurden entlang der Länge ausgewählter Nägel auf den Stahl geklebt. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden je Messstelle nur ein einziger Dehnmessstreifen befestigt, wodurch die Biegemomente entlang des Nagelverlaufs nicht gemessen werden konnten. Zwei Inklinometer wurden im Abstand von rund 0,6 m hinter der Wand installiert, um die horizontale Bodenverschiebung hinter der Wand zu messen.

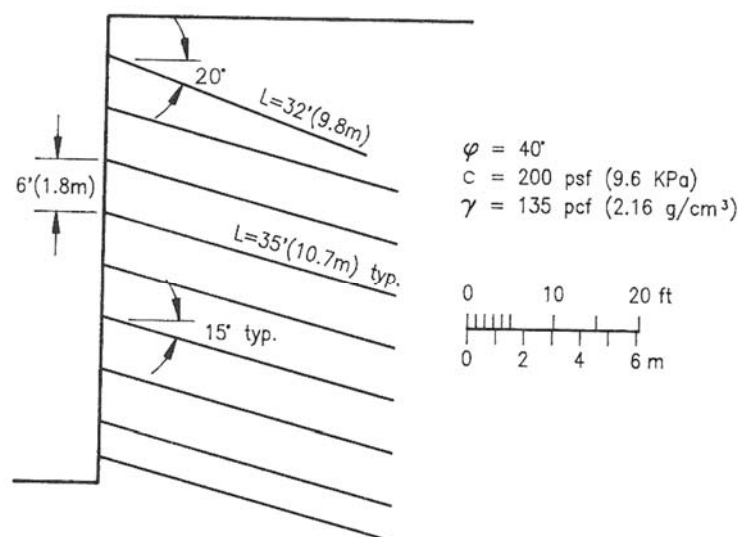


Abb. 23 Vertikalschnitt durch den vernagelten Geländesprung nach THOMSON & MILLER (1990)

5.2.2 Gemessenes Verformungsverhalten

Abbildung 24 dokumentiert die horizontalen Verschiebungen, die mit einem Inklinometer im Abstand von 0,91 cm hinter der Wand gemessen wurden. Die maximale Wandverformung nach dem letzten Aushub betrug 15 mm. Eine Woche später, nachdem die letzte Nagelreihe und die Spritzbetonschale angebracht wurde, ist die Verformung auf 18 mm erhöht. Die Wandverformung wurde für zwei Monate nach Endaushub überwacht und während dieser Zeit wurden keine zusätzlichen Bewegungen gemessen.

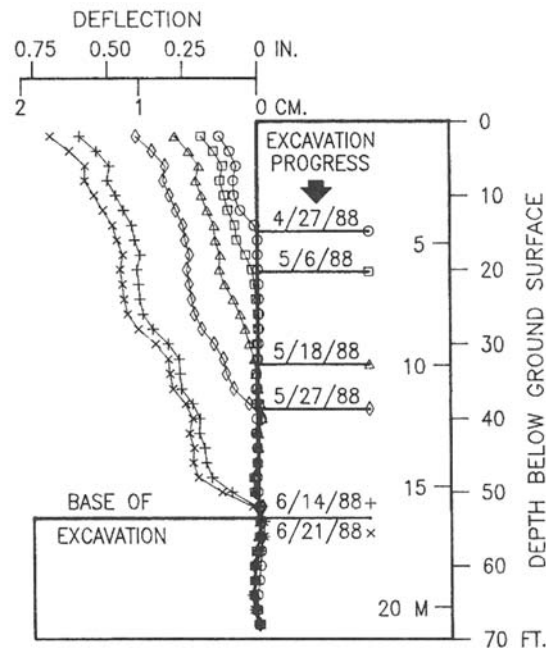


Abb. 24 Gemessene Wandverformung in verschiedenen Aushubphasen nach THOMSON & MILLER (1990)

Die gemessene maximale Horizontalverformung beträgt rund 1 ‰ der Wandhöhe, was in der unteren Bandbreite des Erfahrungswertes für vernagelte Geländesprünge liegt und in etwa der Verformung entspricht, die zur Mobilisierung des aktiven Erddrucks in dicht gelagerten nichtbindigen Böden erforderlich ist.

5.2.3 Beanspruchung der Bodennägel

Für die Rückberechnung der axialen Nagelkräfte aus den Dehnungsdaten werden bei THOMSON & MILLER (1990) zwei verschiedene Ansätze gewählt. Der erste Ansatz besteht darin, eine kombinierte Steifigkeit für den Stahl und für den Beton aus der Querschnittsfläche zu berechnen. Die hieraus resultierenden Nagelkräfte sind in Abbildung 25 unter *Indirect Method* (Zustand I gemäß DIN EN 1992-1-1:2021-10) dargestellt. Der zweite Ansatz besteht unter der Annahme, dass die durch die Rissbildung im Beton verursachten Dehnungssprünge eine

vollständige Freisetzung der Zugspannungen im Beton bewirken, d.h. Beanspruchungen unterhalb dieses Spannungszustandes werden von dem Verbundquerschnitt aufgenommen, während Beanspruchungen oberhalb dieser Grenze allein vom Stahlquerschnitt aufgenommen werden. Die Steifigkeit des Verbundquerschnitts kann unter der Annahme, dass die Gesamtlast über den Dehnungssprung konstant bleibt, zurückgerechnet werden. Die daraus ergebenden maximalen Nagelkräfte sind in Abbildung 25 unter *Direct Method* (Zustand II gemäß DIN EN 1992-1-1:2021-10) zu sehen.

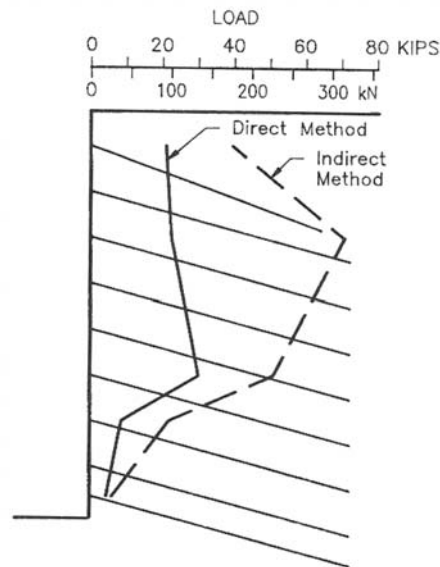


Abb. 25 Maximale Axialkräfte der Nägel im finalen Aushubzustand nach THOMSON & MILLER (1990)

6 Numerische Untersuchungen zu Bodenvernagelung

6.1 Numerische Studie von BABU & SINGH (2009)

Die vom Indian Institute of Science - Department of Civil Engineering im Jahr 2009 durchgeführte Studie von BABU & SINGH (2009) zielt darauf ab, die Standsicherheit von Nagelwänden zu untersuchen, die nach den Richtlinien der Federal Highway Administration (FHWA) aus dem Jahr 2003 entworfen werden. Im Rahmen dieser Studie wurden numerische Simulationen mit einem durchgeführt, mit denen auch der Grenzzustand der Standsicherheit betrachtet wurde. Die Ergebnisse dieser Studie sollten dazu beitragen, das Verständnis der Standsicherheit von Bodenvernagelungen zu verbessern und die Entwurfsrichtlinien fortzuschreiben, um den Entwurf solcher Strukturen zu optimieren und die Standsicherheit dieser Strukturen zu gewährleisten.

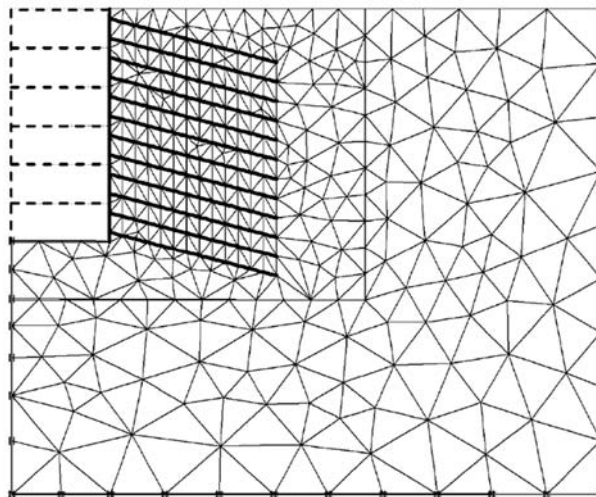


Abb. 26 Numerische Studie von BABU & SINGH (2009): 2D-Modell und Netzgenerierung

Für diese Studie wurden drei Geländesprünge mit Gesamthöhen von 6,0 m, 12,0 m und 18 m nach der Finite Elemente Methode mit dem Programm PLAXIS 2D modelliert. Für die numerische Analyse wurde ein ebener Spannungs-Dehnungszustand angenommen und zur Diskretisierung des FE-Netzes wurden Dreieckselemente mit 15 Knoten verwendet. Der Boden wurde mit dem Stoffgesetz MOHR-COULOMB modelliert und die Nägel sind linear-elastisch mittels Plattenelemente abgebildet. Zwischen Boden und Plattenelementen werden Interface-Elemente eingesetzt, um die Interaktion zwischen den Bodennägeln und dem Boden zu simulieren. Das 2D-Modell für den 12 m hohen Geländesprung und die Netzgenerierung des Modells sind in Abbildung 26 dargestellt.

BABU & SINGH (2009) ermitteln in ihrer Studie maximale horizontale Verschiebungen von 6,8 mm für den 6,0 m hohen vernagelten Geländesprung bzw. von 25,0 mm für den 12,0 m hohen Geländesprung und von 53,1 mm für den 18,0 m hohen Geländesprung. Dies entspricht

einem Verhältnis von 2 bis 3 ‰ der Geländesprunghöhe. Dies liegt in der Bandbreite üblicher Erfahrungen; so stellen u.a. JURAN ET AL. (1985) fest, dass die maximale horizontale Wandverformung in der Regel weniger als 2 ‰ der Wandhöhe beträgt.

Da in BABU & SINGH (2009) keine Messdaten für die Validierung des Modells zur Verfügung stehen, werden die Ergebnisse mit Angaben aus JURAN & ELIAS (1991) validiert. Die Untersuchungen von JURAN & ELIAS (1991) zeigen, dass der Einfluss der Biegesteifigkeit der Nägel für die Standsicherheit einer Bodenvernagelung gering ist und zu weniger als 10 % zur Gesamtstandsicherheit des Geländesprungs beiträgt. Relevante Scher- und Biege widerstände der Bodennägel werden erst mobilisiert, nachdem relativ große Verschiebungen entlang der Gleitfläche stattgefunden haben. Nach einer Untersuchung mittels φ -c-Reduktion bis zum Erreichen eines Grenzzustandes wird für den 12 m hohen Geländesprung in den Nägeln in diesem Grenzzustand ein maximales Biegemoment von 2,5 kNm und eine Querkraft von 13,3 kN ermittelt. Im Gebrauchszustand sind nach BABU & SINGH (2009) diese aber sehr klein und können vernachlässigt werden.

Die Untersuchungen von JURAN & ELIAS (1991) zeigen, dass der Einfluss der Quer- und Biegesteifigkeit der Nägel für die Standsicherheit einer Bodenvernagelung gering ist und zu weniger als 10 % zur Gesamtstandsicherheit des Geländesprungs beiträgt. Relevante Scher- und Biege widerstände der Bodennägel werden erst mobilisiert, nachdem relativ große Verschiebungen entlang der Gleitfläche stattgefunden haben. Nach einer Untersuchung mittels φ -c-Reduktion bis zum Erreichen eines Grenzzustandes wird in BABU & SINGH (2009) für den 12 m hohen Geländesprung in den Nägeln in diesem Grenzzustand ein maximales Biegemoment von 2,5 kNm und eine Querkraft von 13,3 kN ermittelt. Im Gebrauchszustand seien diese aber sehr klein - numerische Werte werden nicht angegeben - und könnten daher vernachlässigt werden. Um die Steifigkeitsparameter der Nägel in in PLAXIS 2D zu berücksichtigen wurde hier ein äquivalenter Elastizitätsmodul aus dem Flächenverhältnis von Stahl und Zementstein wie folgt ermittelt:

$$E_{\text{eq}} = \frac{A_s}{A} \cdot E_s + \frac{A_z}{A} \cdot E_z \quad (1)$$

- mit:
- $A_s = 0,25 \cdot \pi \cdot D_s^2$ - Stahlfläche
 - $A_z = 0,25 \cdot \pi \cdot (D_z^2 - D_s^2)$ - Zementfläche
 - $A = A_z + A_s$ - Nagelfläche
 - E_s - Elastizitätsmodul des Stahls
 - E_z - Elastizitätsmodul des Zements

Die Dehn- und Biegesteifigkeit wird wie folgt ermittelt:

$$EA = \frac{E_{eq}}{S_h} \cdot A \quad (2)$$

$$EI = \frac{E_{eq}}{S_h} \cdot I \quad (3)$$

mit: $I = I_s + I_z$

- Trägheitsmoment des Nagels

S_h

- Horizontaler Nagelabstand

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass dieser Ansatz zur Bestimmung der numerischen Nagelsteifigkeiten zwar zu zutreffenden Ergebnissen bezüglich der axialen Steifigkeit des Verbundquerschnittes führt, während hingegen die Biegesteifigkeit der Nägel überschätzt wird, da der äquivalente Elastizitätsmodul E_{eq} aus dem Flächenverhältnis bestimmt wird und ein äquivalenter Elastizitätsmodul E_{eq} aus dem Verhältnis der Trägheitsmomente vernachlässigt wird.

6.2 Numerische Studie von HAJIALILUE-BONAB & RAZAVI (2016)

In dieser dreidimensionalen numerischen Studie der Universität Tabriz, Iran, wurden die Versagensbedingungen und die Ausbildung von Gleitflächen von drei verschiedenen Nagelwänden mit Hilfe räumlicher Finite-Elemente-Modelle simuliert. Die Annäherung an Grenzzustände wurden mit zwei verschiedenen Methoden modelliert: durch die sukzessive Steigerung einer Oberflächenlast an der Geländeoberfläche (*Load collapse*) sowie durch die sukzessive Verringern der Scherfestigkeit des Bodens mittels einer φ -c-Reduktion. Das von HAJIALILUE-BONAB & RAZAVI (2016) betrachtete Modell ist in Abbildung 27 dargestellt.

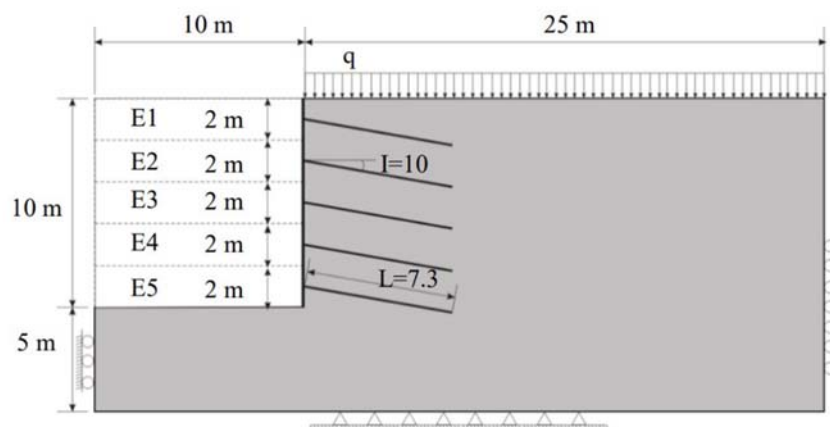


Abb. 27 Abmessungen und das 3D FE – 1. Modell der Simulation aus HAJIALILUE-BONAB & RAZAVI (2016)

In dem untersuchten Modell haben die Nägel einen horizontalen Abstand von 1,5 m, einen vertikalen Abstand von 2,0 m und einen Neigungswinkel von 10° für das erste, 20° für das zweite und 30° für das dritte Modell. Die Modelle wurden mit einer mittleren Elementgröße von

0,25 m geometrisch diskretisiert. Eine Übersicht der Modellparameter fasst Tab. Tabelle 2 zusammen. Die Steifigkeitsparameter der Nägel wurden mit dem gleichen Ansatz wie bei BABU & SINGH (2009) mit den Gleichungen (1), (2) und (3) bestimmt.

Modell	mittlere Elementgröße [m]	Nagelneigung [°]	Nagellänge [m]	Nageldurchmesser [mm]
1	0,25	10	7,3	100
2	0,25	20	7,6	100
3	0,25	30	8,7	100

Tab. 2 Modellparameter aus HAJIALILUE-BONAB & RAZAVI (2016)

Für diese Studie wurde das MOHR-COULOMB'sche Stoffgesetz verwendet mit $\varphi' = 40^\circ$, $c' = 5 \text{ kN/m}^2$, $\psi = 0^\circ$, $E = 20 \text{ MN/m}^2$, $\nu = 0,3$ und $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$.

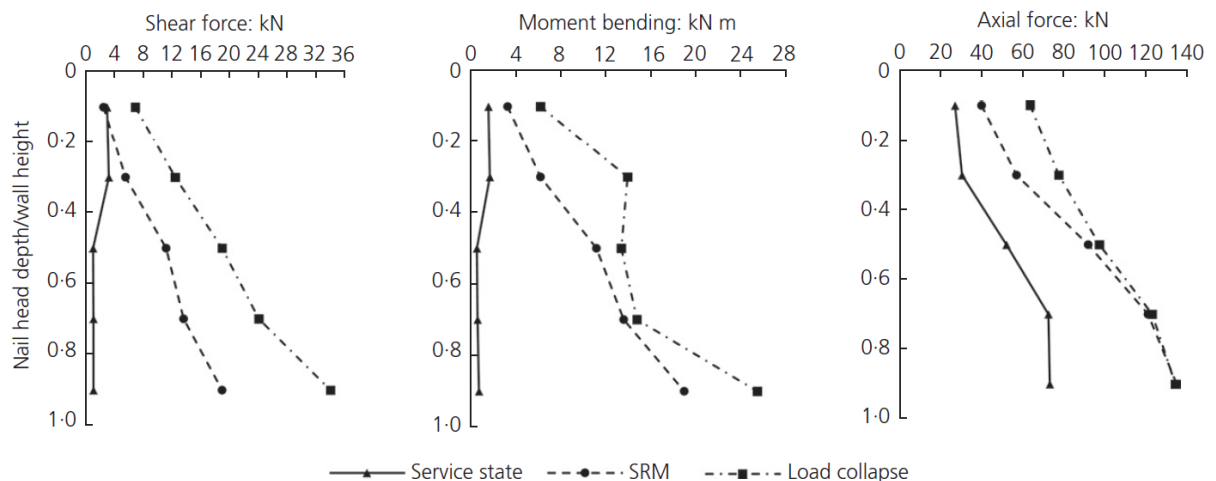


Abb. 28 Scherkraft, Biegemoment und Normalkraft im Gebrauchszustand und im Grenzzustand aus HAJIALILUE-BONAB & RAZAVI (2016)

Nach den Untersuchungen von HAJIALILUE-BONAB & RAZAVI (2016) hat die Biegesteifigkeit der Bodennägel nur einen geringen Einfluss auf die Standsicherheit von vernagelten Wänden. Selbst wenn solche Strukturen großen Verschiebungen ausgesetzt sind oder wenn die Nägel fast senkrecht zur Richtung der Bodenbewegung geneigt sind, kann deren Biegesteifigkeit im Gebrauchszustand vernachlässigt werden. Außerdem wurde festgestellt, dass die Nägel in den unteren Nagelreihen der Wand für die Standsicherheit des Geländesprungs im Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebend sind, während die Nägel der oberen Nagelreihen für die Verformung des Bodens im Gebrauchszustand maßgebend sind.

6.3 Numerische Studie von JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017)

Ziel der numerischen Studie von JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017) war es, den Einfluss der Nagelneigung auf die Boden-Nagel-Interaktion zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Variantenstudie durchgeführt, um den optimalen Neigungswinkel der Bodennägel zu identifizieren, der die günstigsten Boden-Nagel-Verhältnisse sicherstellt. Zur Durchführung dieser numerischen Untersuchung wurde ebenfalls das Programmpaket PLAXIS 2D verwendet. Das Modell und weitere Informationen zur Modellierung sind in Abbildung 29 dargestellt.

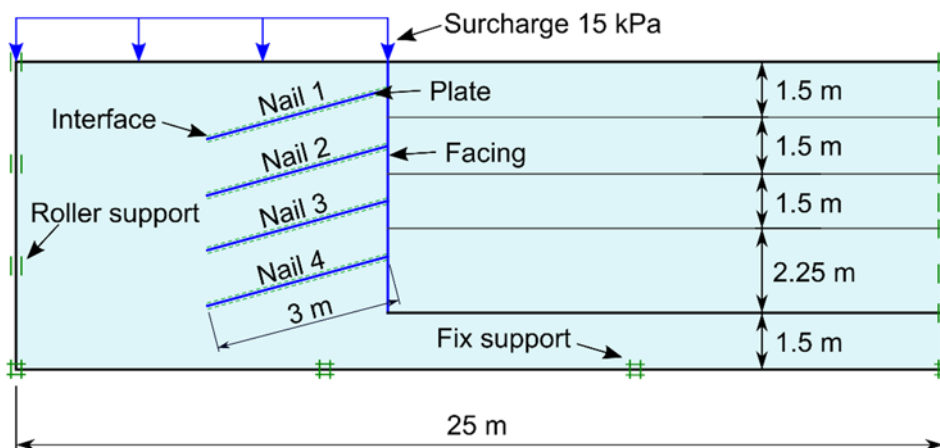


Abb. 29 Systemrandbedingungen des Finite Elemente Modells von JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017)

Für die stoffliche Modellierung des Bodens wurde das MOHR-COULOMB'sche Stoffmodell verwendet. Für die Modellierung der Nägel bzw. Wand wurden Plattenelemente eingesetzt. Die Eingabeparameter für den Boden sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Eingabeparameter für die Nägel wurden analog zu BABU & SINGH (2009) mit den Gleichungen (1), (2) und (3) ermittelt.

In der ersten Phase wurde der Initialzustand (K_0) ermittelt und eine Auflast von 15 kN/m^2 aufgebracht. Danach folgt eine Phase Bodenaushub, eine Phase für die Einsetzung der Nagelreihe und eine letzte für die Wandherstellung. Diese Phasen werden bis zum Endaushub wiederholt.

Stoffmodell	$\gamma_{\text{sat}} / \gamma$ [kN/m^3]	E [kN/m^2]	ν [-]	φ [$^\circ$]	c' [kN/m^2]	ψ [$^\circ$]	R_{int} [-]
MC	17,68 / 15,40	20000	0,3	33	20	4	0,67

Tab. 3 Eingabeparameter für das MOHR-COULOMB'sche Stoffmodell

Abbildung 30 zeigt den Zusammenhang zwischen den mobilisierten Nagelkräften und der Nagelneigung, die zwischen 0° und 75° variiert wurde. JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017) stellen fest, dass bei einer Nagelneigung von 0° bis 20° die Nägel alle Nagellagen infolge der Wandverformung gleichmäßig mobilisiert werden, was als günstig zu bewerten ist. Bei höheren

Neigungen kommt es hingegen demnach zu einer ungleichmäßigen Aktivierung der Nägel. Aus diesem Grund wird von JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017) eine Nagelneigung von 15° sowohl im Hinblick auf das Verformungs- als auch auf das Tragverhalten empfohlen. Dieser Winkel ermögliche es, die Nägel aller Lagen annähernd gleichmäßig zu aktivieren sowie geringere Verformungen bei einem höheren FOS (*Factor of Safety*) zu erreichen und somit einen optimalen Entwurf der Konstruktion zu erreichen.

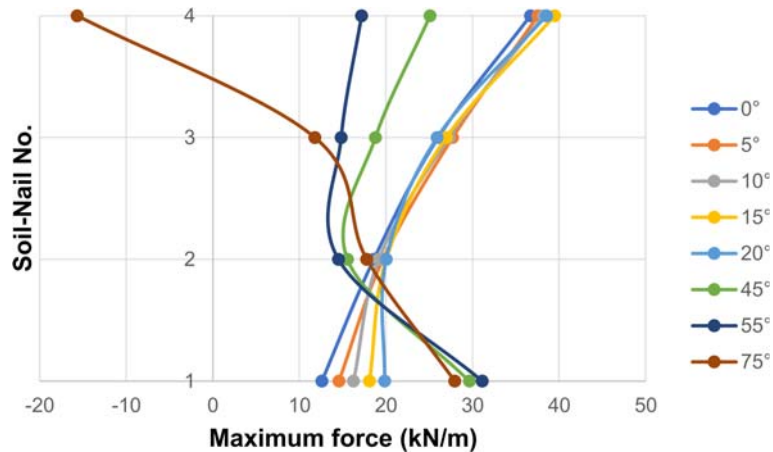


Abb. 30 Verlauf der maximalen Nagelkräfte für verschiedene Neigungswinkeln nach JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017)

6.4 Numerische Studie von GARZÓN-ROCA et al. (2019)

In der Studie von GARZÓN-ROCA et al. (2019) werden anhand eines zweidimensionalen Finite-Elemente-Modells die Nagelkräfte und Bodenverschiebungen an der Amherst-Test Wall untersucht. Zwar beziehen sich diese Untersuchungen auf den Grenzzustand, doch die Verläufe der Axial- und Querkräfte sowie der Biegemomente in den Nägeln werden hier auch grafisch dargestellt.

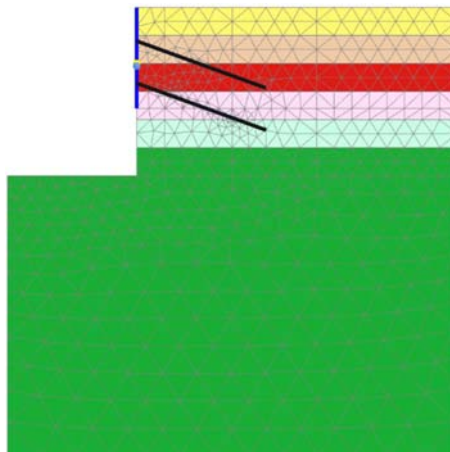


Abb. 31 FE-Modell und Netzgenerierung in GARZÓN-ROCA et al. (2019)

Für die Numerische Studie wurde das Modell in Abbildung 31 eingesetzt. Der Spritzbeton und die Nägel werden mittels Plattenelementen modelliert, für die die wesentlichen Angaben in Tab. 1 zusammengefasst sind.

Element	EA [kN/m]	EI [kNm ² /m]
Spritzbeton	$3,45 \cdot 10^6$	2875
Nagel	$1,17 \cdot 10^5$	76,67

Tab. 1 Parametereingabe für die Plattenelemente aus GARZÓN-ROCA et al. (2019)

Die Versuchswand wurde in drei Schritten erstellt, wobei im ersten Schritt eine Aushubtiefe von 2,5 m, im zweiten Schritt eine Aushubtiefe von 3,6 m und im dritten Schritt von 6,0 m hergestellt wurde. Es wurden zwei Lagen mit je fünf Nägeln in einem horizontalen und vertikalen Abstand von 1,5 m eingebaut. Die Eingabeparameter für die Nägel wurden analog zu BABU & SINGH (2009) mit den Gleichungen (1), (2) und (3) ermittelt.

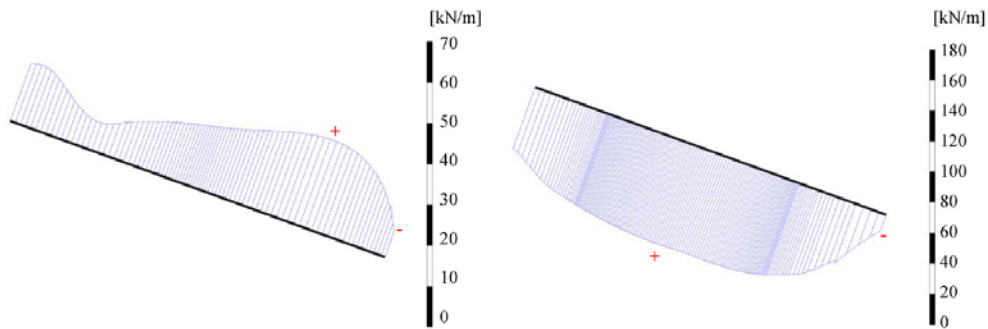


Abb. 32 Normalkräfte über den Nagelverlauf in der ersten und zweiten Reihe im Bruchzustand nach GARZÓN-ROCA et al. (2019)

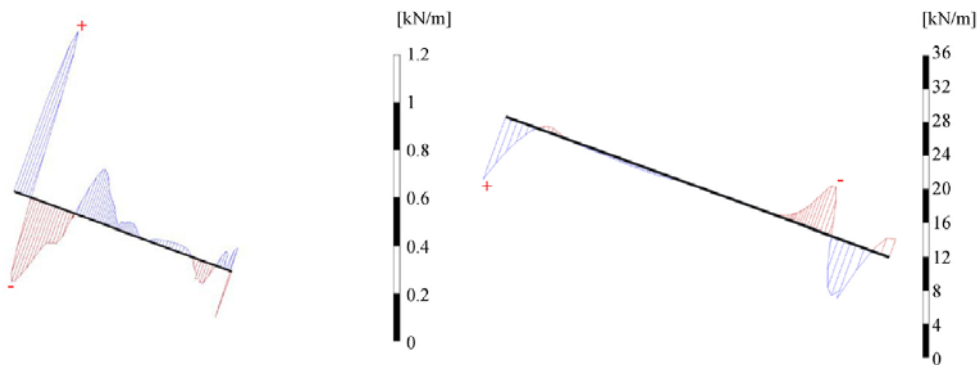


Abb. 33 Querkräfte über den Nagelverlauf in der ersten und zweiten Reihe im Bruchzustand nach GARZÓN-ROCA et al. (2019)

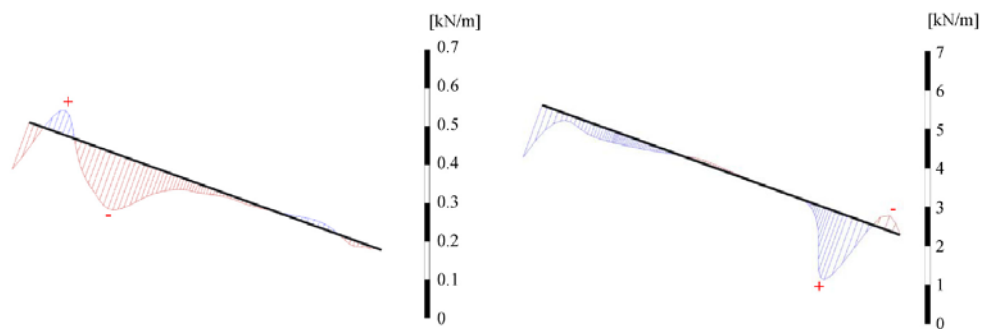


Abb. 34 Biegemomente über den Nagelverlauf in der ersten und zweiten Reihe im Bruchzustand nach GARZÓN-ROCA et al. (2019)

Nach Angaben von GARZÓN-ROCA et al. (2019) weisen die Nägel der unteren Reihe maximale Axialkräfte von 69 kN/m auf, während die Nagelkräfte in der oberen Reihe ca. 22,5 kN/m betragen. Die in den Nägeln mobilisierten Querkräfte erreichen in der oberen Lage maximal 0,65 kN/m und in der unteren Reihe maximal 5,5 kN/m. Zugleich werden in der unteren Reihe maximale Biegemomente von 1,75 kNm/m und in der oberen Nagelreihe von 0,14 kNm/m aktiviert. Dabei treten die maximalen Werte der Querkräfte und Biegemomente in der unteren Nagelreihe in großer Distanz zum Nagelkopf, d.h. nahe des Endes der Nägel auf, was auffällig ist, da generell die größten Schnittkräfte dort auftreten, wo die sich ausbildende Gleitfläche die Nägel schneidet. Möglicherweise sind diese abweichenden Erkenntnisse von GARZÓN-ROCA et al. (2019) auf das verwendete einfache Stoffgesetz (MOHR-COULOMB) zurückzuführen.

6.5 Weitere numerische Studien

In den letzten Jahren haben sich weitere Autoren mit der Untersuchung von Bodenvernagelungen auf der Basis numerischer Simulationen beschäftigt. Anlage 1 liefert einen Überblick über weitere relevante Literaturquellen. Eines der wichtigsten Interessengebiete der aktuellen wissenschaftlichen Forschung zu Bodenvernagelungen ist die Bestimmung der Nagelkräfte im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Verformung von Bodennagelwänden wie z. B. bei ZOLQADR et al. (2016). Der Schwerpunkt dieser Forschungen liegt auf dem Verständnis des Verhaltens der Bodennägel und ihrer Wechselwirkungen mit dem umgebenden Boden und den Strukturelementen der Wand unter extremen Einwirkungen, darunter auch dynamischen und seismischen Einwirkungen, wie beispielsweise bei FARROKHZAD et al. (2021).

Trotz der vorgestellten umfangreichen Forschungsarbeiten besteht ein Defizit an Untersuchungen zu der Beanspruchung von Bodennägeln im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit - insbesondere auch im Hinblick auf eine mögliche kombinierte Beanspruchung unter Normalkraft (Zug) und Biegung. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass, wie aufgezeigt, in den bisherigen Veröffentlichungen im Regelfall davon ausgegangen wird, dass die Biegemomente und Scherkräfte, denen die Bodennägel im Bau- und Gebrauchszustand

ausgesetzt sind, sehr gering sind und daher in diesem Zustand rechnerisch und auch bemessungstechnisch vernachlässigt werden können.

7 Beurteilung der Beanspruchung der Zementumhüllung anhand der Literaturstudie

Bodennägel werden bei ihrer Inanspruchnahme für die Bewehrung und Stabilisierung von Böschungen und Hängen im Wesentlichen axial auf Zug beansprucht. Soweit es bei dem Aushub des Bodens und Herstellung eines vernagelten Geländesprungs jedoch zu Bodenverschiebungen quer zu den Bodennägeln kommt, können Querkkräfte und Biegemomente in den Bodennägeln mobilisiert werden. Nach den bisher ausgewerteten Literaturquellen müssen erhebliche Verschiebungen im Boden und die Aktivierung einer Gleitfläche auftreten, bevor relevante Querkkräfte und Biegemomente in den Bodennägeln voll entwickelt sind.

Aus den messtechnischen Untersuchungen im realen Maßstab gibt es aber lediglich ein Fallbeispiel (GÄßLER 1987), bei dem auch die Biegemomentenbeanspruchung der Bodennägel in ihrer Verteilung über die Nagellänge gemessen und auch ausgewertet wurden, wobei in diesem Fall die Biegemomente nur für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und nicht für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dokumentiert werden. Nach Angaben von GÄßLER (1987) waren die gemessenen Biegemomente im Gebrauchszustand im Großversuch B kleiner als 0,1 kNm.

Berechnet man basiert auf diesen Angaben die Rissbreiten in dem Zementstein in der letzten Gebrauchsphase (Auflast von $p = 100 \text{ kN/m}^2$) mit:

Normalkraft:

$$N = 30 \text{ kN}$$

Biegemoment:

$$M = 0,1 \text{ kNm}$$

so ergibt sich für einen GEWI-Nagel mit Stahlglieddurchmesser $d_s = 22 \text{ mm}$ und Zementsteinumhüllung $d_z = 55 \text{ mm}$ der maximale Rissabstand $s_{r,max}$ nach DIN EN 1992-1-1:2021-10 zu:

$$s_{r,max} = \frac{d_s}{3,6 \cdot \text{eff } \rho} = \frac{d_s}{3,6 \cdot \frac{A_s}{A_z}} = \frac{22}{3,6 \cdot \frac{380,1}{1995,7}} = 32,08 \text{ mm}$$

- Effektiver Bewehrungsgrad $\text{eff } \rho = A_s / A_z$

Für einen GEWI mit $d_s = 22 \text{ mm}$ ergeben sich folgende Steifigkeiten:

- Dehnsteifigkeit: $EA_s = 76.026.542 \text{ N}$
- Biegesteifigkeit: $EI_s = 2.299.802.902 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$

Die rechnerische Rissbreite ergibt sich multiplikativ aus dem maximalen Rissabstand und der Stahldehnung:

- Die rechnerische Rissbreite ohne Berücksichtigung des Biegemoments beträgt:

$$w_N = s_{r,\max} \cdot \varepsilon_s = 32,08 \cdot \left(\frac{30 \cdot 10^3}{76.026.542} \right) = 0,011 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm}$$

- Die rechnerische Rissbreite unter Berücksichtigung des Biegemoments ergibt sich dann zu:

$$w_{N+M} = s_{r,\max} \cdot \varepsilon_s = 32,08 \cdot \left(\frac{30 \cdot 10^3}{76.026.542} + \frac{0,1 \cdot 10^6}{2.299.802.902} \cdot \frac{22}{2} \right) = 0,028 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm}$$

Im Ergebnis ist zu erkennen, dass auch unter Berücksichtigung der Biegemomente in den Bodennägeln im Gebrauchszustand rechnerisch eine Rissbreite in der Zementsteinumhüllung entsteht, die einen Wert von 0,1 mm nicht überschreitet. Eine Rissbreite von 0,1 mm wird üblicherweise als Grenzwert betrachtet, bei dem ein dauerhafter Korrosionsschutz gegeben ist. Das bedeutet, dass in dem Fallbeispiel von GÄßLER (1987) kein doppelter Korrosionsschutz für die Bodennägel erforderlich wird, um die Bodennägel im Sinne einer Dauervernagelung dauerhaft nutzen zu können, obgleich die maximale Rissweite in der Zementsteinumhüllung unter Berücksichtigung der Biegemomente etwa 2,5-mal größer ist als die rechnerische Rissweite unter Vernachlässigung des Biegemoments. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der vorliegenden Betrachtung die Wirkung des maximalen Biegemoments ungünstig mit dem Maximalwert der Normalkraft überlagert wurde, d.h. an derselben Stelle im Nagel wirkend angenommen wurde. Tatsächlich ist die maximale Normalkraft mit dem zugehörigen Biegemoment aus demselben Schnitt bzw. das maximale Biegemoment mit der zugehörigen Normalkraft zu betrachten, woraus sich geringere resultierende Beanspruchungen bzw. Rissweiten ergeben.

Bei den experimentellen Untersuchungen zeigt nur die Untersuchung von PLUMELLE & SCHLOSSER (1991) ein Diagramm der Mobilisierung der Biegeverformungen (Abbildung 15) im Nagel in Abhängigkeit von verschiedenen Sicherheitsfaktoren. Da es für Verbundelemente aus Aluminium und Zement keine Untersuchungen gibt, auf deren Basis die resultierende Rissweiten ermittelt werden kann, ist eine Beurteilung der bei diesem Feldversuch in der Zementsteinumhüllung entstandenen Rissweiten schwierig. Das Diagramm in Abbildung 15 zeigt jedoch, dass im Vergleich zum Grenzzustand der Tragfähigkeit in der Herstellungs- bzw. Gebrauchsphase sehr kleine Biegemomente mobilisiert werden, die nach PLUMELLE & SCHLOSSER (1991) vernachlässigt werden können.

In der aktuellen Forschung zu Bodenvernagelungen gibt es zahlreiche numerische Untersuchungen, bei denen u.a. auch die Biegemoment- und Scherkraftbeanspruchung der Bodennägel ermittelt wird. Einige in der Literatur dokumentierte numerische Modellierungsansätze sind jedoch hinsichtlich der Abbildung der Bodennägel wie auch der Ermittlung der Schnittkräfte zu

hinterfragen, da die insbesondere für zweidimensionale Finite-Element Simulationen gewählten Ersatzsteifigkeiten offenbar nicht immer korrekt bestimmt wurden und es so zu Fehleinschätzungen bei der Vorhersage der tatsächlichen Biegemomente kommen kann. Wie bereits im Abschnitt 6.1 thematisiert wurde, müssen die realen kreisförmigen Nagelquerschnitte in einer zweidimensionalen Finite-Element Simulation als rechteckige Stab- bzw. Plattenquerschnitt abgebildet werden. Dabei müssen sowohl die Anforderungen an eine äquivalente Dehnsteifigkeit EA als auch an eine äquivalente Biegesteifigkeit EI der Nägel berücksichtigt werden. Um dies zu erreichen, wird in BABU & SINGH (2009) ein äquivalenter Elastizitätsmodul E_{eq} , wie in Abschnitt 6.1, Gleichung (1) erläutert, ermittelt, um die äquivalenten Steifigkeitsparameter EA und EI im numerischen Modell zu bestimmen. Betrachtet man dieses Vorgehen genauer, so ist festzustellen, dass, wenn E_{eq} gemäß Gleichung (1) ermittelt wird, zwar die ermittelte äquivalente Dehnsteifigkeit EA gemäß Gleichung (2) mit dem realen Wert von EA übereinstimmt, die Biegesteifigkeit EI gemäß Gleichung (3) jedoch nicht mit der realen Biegesteifigkeit der Nägel übereinstimmt; vielmehr werden mit diesem Vorgehen die Biegesteifigkeit der Nägel in der numerischen Simulation überschätzt. Der gleiche Ansatz wird auch in den anderen hier vorgestellten numerischen Studien verwendet. Dies bedeutet, dass die angegebenen Normalkräfte in den Nägeln bei BABU & SINGH (2009), JAYASEKARA & PRIYANKARA (2017) und GARZÓN-ROCA ET AL. (2019) im Wesentlichen zutreffend ermittelt werden, die in den Nägeln aktivierten Biegemomente aber nicht.

Außerdem ist bei den numerischen Untersuchungen zu berücksichtigen, dass die Berechnungsergebnisse maßgeblich von dem gewählten Ansatz für die stoffliche Modellierung abhängig sind. Maßgeblich ist dabei insbesondere das für das Bodenkontinuum gewählte Stoffgesetz. Das MOHR-COULOMB'sche Stoffgesetz, das in vielen der in dem vorliegenden Bericht analysierten numerischen Studien zum Tragverhalten von Bodenvernagelungen zum Einsatz gekommen ist, eignet sich vor allem für Standsicherheitsberechnungen, zum Beispiel in Verbindung mit einer $\phi - c$ Reduktion. Das MOHR-COULOMB'sche Kriterium liefert zwar für derartige Betrachtungen im Bruchzustand oft Ergebnisse, die mit den Ergebnissen höherwertigerer Stoffmodelle vergleichbar sind. Da aber die Steifigkeit des Bodens nur linear-elastisch berücksichtigt wird, ist das MOHR-COULOMB'sche Stoffgesetz nicht geeignet für eine qualifizierte numerische Prognose von Verformungen und Setzungen im Boden. Da die Mobilisierung der Schnittkräfte in den Nägeln im Gebrauchszustand direkt von den Verformung des vernagelten Bodenkörpers abhängig ist, ist ein solches einfache Stoffmodell nicht geeignet, um derartige Aufgabenstellungen qualifiziert zu lösen. Zu diesem Zweck sollten höherwertige Stoffgesetze, wie z. B. das Hardening Soil-Modell, verwendet werden, mit denen die vom Spannungszustand und Spannungspfad abhängigen Steifigkeiten zutreffend beschrieben werden können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die meisten der in der Literatur dokumentierten Untersuchungen zu Bodenvernagelungen konzentrieren sich auf die Verformungen der vernagelten Wand und die axialen Kräfte (Normalkräfte) in den Bodennägeln. Nur wenige Studien befassen sich mit der zusätzlichen Querkraft- und Biegemomentenbeanspruchung der Bodennägel. Aufgrund der geringen Biegemomente und Querkräfte im Bau- und Gebrauchszustand wird allgemein davon ausgegangen, dass diese Bodenverschiebungen quer zu der Nagelachse resultierenden, zusätzlichen Beanspruchungen vernachlässigt werden können. Tatsächlich zeigen alle vorliegenden Erkenntnisse, dass ein Anstieg der Biegemomente erst bei Annäherung an den Bruchzustand oder bei sehr großen Verformungen zu beobachten ist.

Aufgrund der Steifigkeitsunterschiede zwischen Zementstein und Stahltragglied konzentrieren sich die Beanspruchungen auf die Stahlelemente, auch wenn die Auswirkungen der Biegemomente auf die Beanspruchungen der Zementsteinumhüllung grundsätzlich zu berücksichtigen sind.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche bestätigen tendenziell die Erwartung, dass die aus den lateralen Verformungen resultierenden zusätzlichen Beanspruchungen in der Zementsteinumhüllung von Dauernägeln unter Gebrauchslasten so gering sind, dass die im Sinne eines dauerhaften Korrosionsschutzes zulässigen Rissbreiten im Zementstein nicht überschritten werden und insofern auf einen doppelten Korrosionsschutz verzichtet werden kann.

Für einen effizienten Entwurf von permanenten Nagelwänden ohne doppelten Korrosionsschutz sind in dieser Hinsicht weitere numerische Untersuchungen notwendig, um zu fachlich eindeutigen und zuverlässigen Schlussfolgerungen zu gelangen. Numerische Untersuchungen erscheinen zu diesem Zweck vorteilhaft, um die laterale Beanspruchung von Bodennägeln und deren daraus resultierende innere Beanspruchung von Bodennägeln systematisch für zu variierende geometrische und geotechnische Randbedingungen zu ermitteln. Im Vorfeld einer solchen Variantenuntersuchung sollte das einzusetzende numerische Simulationsmodell zunächst im Hinblick auf die Abbildung der Nägel entwickelt und dann durch eine numerische Rückrechnung (Back-Analysis) von messtechnisch überwachten Fallbeispielen oder Modellversuchen validiert werden. Dazu müssen geeignete Fallbeispiele als Referenzmodelle (z.B. GÄSLER (1987)) identifiziert werden, die als Grundlage für die Back-Analysis dienen können. Im Rahmen der numerischen Simulation muss ein geeignetes Stoffmodell angewendet und die Modellierung der Bodennägel sorgfältig gewählt werden, um sicherzustellen, dass alle Eingabeparameter bzw. Modellierungsansätze für das numerische Modell angemessen sind. Ist ein kalibriertes numerisches Modell verfügbar, das alle Anforderungen an das Stoffgesetz, die Nagelmodellierung und den Simulationsprozess erfüllt, so kann dies als Übertragungsmodell für eine Variantenstudie mit verschiedenen geometrischen Konfigurationen und geotechnischen Randbedingungen durchgeführt werden, bei denen die seitlichen Einwirkungen auf die Bodennägel zu erfassen.



Wenn es gelingt, eine verlässliche Aussage über die Größe der Biegemomente in Bodennägeln zu treffen, so kann ein Ansatz entwickelt werden, mit dem gegebenenfalls eine Bemessung von dauerhaft eingesetzten Bodennägeln ohne doppelten Korrosionsschutz ermöglicht wird.

9 Literaturverzeichnis

- AKHAVAN, M., GHAREH, S., & NAEINI, M. B. (2011). *Comparing the results of numerical analysis and monitoring about the behavior of cracks occurred nearby Soil-Nailing Walls*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16, 1239-1252.
- ALSUBAL, S., HARAHAP, I. S., & BABANGIDA, N. M. (2017). *A typical design of soil nailing system for stabilizing a soil slope: case study*. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(4), 1-7.
- BABU, G.S. & SINGH, V.P. (2009). *Appraisal of soil nailing design*. *Indian Geotechnical Journal*, 39. Jg., Nr. 1, S. 81-95
- BAYAT, M., KOSARIEH, A. H., & JAVANMARD, M. (2021). *Probabilistic Seismic Demand Analysis of Soil Nail Wall Structures Using Bayesian Linear Regression Approach*. *Sustainability*, 13(11), 5782.
- BUNDESVEREINIGUNG DER PRÜFINGENIEURE FÜR BAUTECHNIK e.V. · VPI (2016). *Grundbau: Korrosionsschutz bei Dauernägeln. Festlegung der Prüflasten bei Bodenvernagelungen*. Technische Mitteilung Nr. 02/010 vom April 2016.
- BYRNE, R. J., COTTON, D., PORTERFIELD, J., WOLSCHLAG, C., & UEBLACKER, G. (1998). *Manual for design and construction monitoring of soil nail wall*. FHWA-SA-96-069. United States. Federal Highway Administration. Office of Technology Applications
- CARTIER, G., & GIGAN, J.P. (1983). *Experiments and observations on soil nailing structures*. Proc., Seventh Conference of the ECSMF, Helsinki, Finland
- DAMIANS, I. P. (2016). *Mechanical performance and sustainability assessment of reinforced soil walls*. Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- DIN 1054:2021-04: Baugrund - *Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau* - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1
- DIN 4085:2017-08: *Baugrund – Berechnung des Erddrucks*
- DIN EN 14199:2015-07: *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Mikropfähle*; Deutsche Fassung EN 14199:2015
- DIN EN 14490:2010-11: *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bodenvernagelung*; Deutsche Fassung EN 14199:2015
- DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: *Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- DIN EN 1992-1-1:2021-10: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: *Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010



DIN EN 1997-1:2022-10: Eurocode 7 - *Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln*; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013

DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 7: *Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln*

DUCHESNE, S. M. (2003). *Effects of Frost Heave on a Soil Nail Wall in Brunswick, Maine*. Electronic Theses and Dissertations. 119.

FARROKHZAD, F.D, ET AL. (2021). *Seismic Behaviour of Excavations Reinforced with Soil-Nailing Method*. Geotechnical and Geological Engineering 39.6 (2021): 4071-4091.

FHWA (2003). *Geotechnical Engineering Circular No.7: Soil Nail Walls*. Columbia, Maryland: GeoSyntec Consults.

GARZÓN-ROCA, J., CAPA, V., TORRIJO, J. UND COMPANY, J. (2019). *Designing Soil-Nailed Walls using the Amherst Wall Considering Problematic Issues during Execution and Service Life*. International Journal of Geomechanics, Volume 19, Issue 7

GÄBLER, G. (1978). *Large scale dynamic test of in situ reinforced earth*. Proc., Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, 333-342.

GÄBLER, G. (1987). *Vernagelte Geländesprünge-Tragverhalten und Standsicherheit*. Mitteilung des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 108

GÄBLER, G. (1977): *Large scale dynamic test of in situ reinforced earth*. Proc. Dyn. Methods in Soil and Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam

GÄBLER, G. & GUDEHUS, G. (1981). *Soil Nailing - Some aspects of a new technique*. Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering in Stockholm, Vol. 3, pp. 665-670

GHAREH, S. (2015). *Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils*. Measurement, 73, 341-351.

GRIFFITHS, D. V., & LANE, P. A. (2001). *Slope stability analysis by finite elements*. Geotechnique, London, 51(7), 653-654.

HAJIALILUE-BONAB, M. UND RAZAVI, S. K. (2016). *A study of soil-nailed wall behaviour at limit states*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 169(1), 64-76.

HAN, W., LI, G., SUN, Z., LUAN, H., LIU, C., & WU, X. (2020). *Numerical investigation of a foundation pit supported by a composite soil nailing structure*. Symmetry, 12(2), 252.

HAO, J., & WANG, B. (2014). *Parameter sensitivity analysis on deformation of composite soil-nailed wall using artificial neural networks and orthogonal experiment*. Mathematical Problems in Engineering, 2014.



- HETTLER, A., & HEININGWE, W. (1990). *Einige Sonderprobleme bei Verpressankern*. Bauingenieur, 65(9), 407-412.
- JAYASEKARA, D. UND PRIYANKARA, N. (2017). *Study on Soil-Nail Pullout Interaction Using a Numerical Analysis*. Conference: Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development (ACEPS)
- JELINEK, R., & OSTERMAYER, H. (1976). *Verpreßanker in Böden*. Mitteilungen aus dem Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau und Bodenmechanik der TU München
- JEWELL R. A. UND PEDLEY M.J. (1990). *Soil nailing design: the role of bending stiffness*. Ground Engineering, Reader Enquiry No. 2425
- JIROVEC, P. (1979). *Untersuchungen zum Tragverhalten von Felsankern*. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Friderici-ana in Karlsruhe, Heft 79
- JOHNSON, P. E., CARD, G. B., & DARLEY, P. (2002). *Soil nailing for slopes*. TRL REPORT 537.
- JONES, C. P. (1991). *In-situ techniques for reinforced soil*. In Performance of reinforced soil structures,() Thomas Telford Publishing. pp. 277-282
- JUNAIDEEN, S. M., THAM, L. G., LAW, K. T., LEE, C. F., & YUE, Z. Q. (2004). *Laboratory study of soil nail interaction in loose, completely decomposed granite*. Canadian Geotechnical Journal, 41(2), 274-286.
- JURAN, I., BAUDRAND, G., FARRAG, K., & ELIAS, V. (1990). *Design of soil nailed retaining structures*. Geotechnical Special Publication, (25), 644-659.
- JURAN, I., BAUDRAND, G., FARRAG, K., & ELIAS, V. (1990). *Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures*. Journal of geotechnical engineering, 116(1), 54-72.
- JURAN, R., SHAFIEE, S. UND SCHLOSSER, F. (1985). *Numerical study of nailed soil retaining structures*. In Balkema (ed.), Proceedings, XI ICSMFE, San Francisco. Vol. 3, Session 5B, Rotterdam, pp. 1713 -1716
- JURAN, I. UND ELIAS, V. (1991). *Behavior and working stress design of soil nailed retaining structures*. In: Performance of reinforced soil structures. Thomas Telford Publishing, S. 207-212
- KAPP, H. (1987). *Korrosionsprüfungen an Vorspannkabeln und Injektionsankern*. Schweizer Ingenieur und Architekt, 38, 1093-1095.
- KIM ET AL. (2002). *An Experimental Study of the Soil Nailed Wall Behavior with Front Plate Rigidity*. Zeitschrift der Korean Society of Geotechnical Engineering, 18(3), 87-94.
- KWONG, A. K. L., & LEE, C. F. (2008). *A field test study on instrumented soil nail installed in cut slope*. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2.



- LI, J. (2003). *Field study of a soil nailed loose fill slope*. Hong Kong University, Thesis Online (HKUTO).
- LI, J., THAM, L. G., JUNAIDEEN, S. M., YUE, Z. Q., & LEE, C. F. (2008). *Loose fill slope stabilization with soil nails: full-scale test*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3), 277-288.
- LIMA, A. P., SAYÃO, A. S., & GERSCOVICH, D. M. S. (2003). *Considerations on the Numerical Modeling of Nailed Soil Excavations*. In Proc. of the 4rd Int. Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering (pp. 143-151).
- MATSUI, T., SAN, K. C., & PORBAHA, A. (2021). *Stability analysis of reinforced slopes using a strain-based FEM*. In *Slope Stability Engineering: Proceedings of the International Symposium, IS-Shikoku'99* (p. 1021). Routledge.
- MATT, U. V. (1991). *Vorgespannte Boden- und Felsanker. Ankerprüfungen und Bauwerksüberwachung*. Vorträge der Technischen Akademie Esslingen, Ndl. Sarnen.
- NAGAO, A., KITAMURA, T., & MIZUTANI, J. (1988). *Field experiment on reinforced earth and its evaluation using FEM analysis*. In *International geotechnical symposium on theory and practice of earth reinforcement* (pp. 329-334).
- NAYLOR, D. J. (1982). *Finite elements and slope stability*. In *Numerical Methods in Geomechanics*. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, University of Minho, Braga, Portugal, held at Vimeiro, August 24–September 4, 1981 (pp. 229-244). Dordrecht: Springer Netherlands.
- NOOR, M. M., & JAMAIN, M. F. (2019). *Pull out and creep behaviour of soil nailing—a case study*. *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, 16(1), 189-211.
- OLIA, A., & LIU, J. (2011). *Numerical investigation of soil nail wall during construction*. *Geotechnical Conference Pan-Am CGS*.
- PHAN, T. T., & GUI, M. W. (2019). *Soil nailing behaviour for slope stabilization: A case study*. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 527, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.
- PLUMELLE, C. UND SCHLOSSER, F. (1991). *Three full-scale experiments of French project on soil Nailing: CLOUTERRE*. *Transportation Research Record*, 1330. Jg., S. 80-86
- PRASHANT, A., & MUKHERJEE, M. (2010). *Soil nailing for stabilization of steep slopes near railway tracks*. Research Design and Standard Organization (RDSO), Lucknow, Indian Institute of Technology Kanpur.
- PUIG DAMIANS, I. (2016). *Mechanical performance and sustainability assessment of reinforced soil walls*. Thesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, 2016. DOI 10.5821/dissertation-2117-98914
- RAWAT, S., & GUPTA, A. K. (2016). *An experimental and analytical study of slope stability by soil nailing*. *Electron J Geotech Eng*, 21(17), 5577-5597.



- RENK, D. (2011): *Zur Statik der Bodenvernagelung*. Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling, Universität Innsbruck, Logos-Verlag, Heft 17
- SARKAR, R., KURAR, R., ZANGMO, S., DEMA, U. G., SUBBA, S. J., & SHARMA, D. K. (2017). *Application of soil nailing for landslide mitigation in Bhutan: a case study at Sorchen Bypass*. Electron J Geotech Eng, 22(13), 4963-4980.
- SCHÄDLICH, B., SCHWEIGER, H. F., MARCHER, T., & SAURER, E. (2014). *Application of a novel constitutive shotcrete model to tunneling*. In Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, ISRM, pp. 779-804.
- SCHLOSSER, F., JURAN, I., & JACOBSEN, H. M. (1983). *Soil Reinforcement: general report: session no. 5*. In Proc. of VIII ECSMFE: Helsinki, 1983, pp. 1159-1180.
- SHAFIEE, S. (1986). *Simulation numérique du comportement des sols cloués*. Interaction sol-renforcement et comportement de l'ouvrage. Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- SHAMS MALEKI, Y., & KHAZAEI, J. (2017). *A numerical comparison of the behavior of a braced excavation using two and three-dimensional creep plastic analyses*. Geotechnical and Geological Engineering, 35, 2017-2035.
- SHEAHAN, T.C. (2000). *A Field Study of Soil Nails in Clay at the University of Massachusetts-Amherst National Geotechnical Experimentation Site*. National Geotechnical Experimentation Sites, ASCE Geotechnical Special Publication No. 93 (J. Benoit and A.J. Lutenegeger, eds.), pp. 250-263
- SHEIKHBAHAEI, A., HALABIAN, A. M., & HASHEMOLHOSSEINI, S. H. (2010). *Analysis of soil nailed walls under harmonic dynamic excitations using finite difference method*. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 5.
- SHEN, C. K., DENATALE, J. S., KULCHIN, L., ROMSTAD, K. M., & BANG, S. (1981). *Field measurements of an earth support system*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 107(12), 1625-1642.
- SHEN, C. K., HERRMANN, L. R., & BANG, S. (1981). *Ground movement analysis of earth support system*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 107(12), 1609-1624.
- SHEN, C. K., HERRMANN, L. R., ROMSTAD, K. M., BANG, S., KIM, Y. S., & DENATALE, J. S. (1981). *An in situ Earth reinforcement lateral support system*. NASA STI/Recon Technical Report N, 82, 26520.
- SINGH, V. P., & SIVAKUMAR BABU, G. L. (2010). *2D numerical simulations of soil nail walls*. Geotechnical and Geological Engineering, 28, 299-309.
- SMITH, I. M., & SU, N. (1997). *Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 21(9), 583-597.



- STOCKER, M. (1976). *Bodenvernagelung*. Vorträge der Baugrundtagung, Nürnberg, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Essen.
- STOCKER, M.; GÄßLER, G. (1979): *Ergebnisse von Großversuchen über eine neuartige Baugrubenwand-Vernagelung*. Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau, H. 9, 677-682
- STOCKER, M. (1976): *Bodenvernagelung*. Vorträge der Baugrundtagung 1976 in Nürnberg, DGEG, 639-652
- STOCKER, M. F. UND RIEDINGER, G (1990). *The bearing behavior of nailed retaining structures*. American Society of Civil Engineers. Geotechnical Special Publication , 5. Jg., S. 52-55
- SU, L. J. (2006). *Laboratory pull-out testing study on soil nails in compacted completely decomposed granite fill*.
- SU, L. J., YIN, J. H., & ZHOU, W. H. (2010). *Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance*. Computers and Geotechnics, 37(4), 555-564.
- TERZI, N., YILDIRIM, S., & BAYUR, A. (2007). *Field study of a soil nailed retaining wall*. In Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Spain (pp. 1569-1572).
- THOMSON, S.R. UND MILLER, I (1990). *Design, construction and performance of a soil nailed wall in Seattle, Washington*. In: Design and performance of earth retaining structures. ASCE, 1990. S. 629-643.
- TURNER, J. P., & JENSEN, W. G. (2005). *Landslide stabilization using soil nail and mechanically stabilized earth walls: case study*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(2), 141-150.
- VEREINIGUNG DER PRÜFINGENIEURE FÜR BAUTECHNIK, LANDESVEREINIGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG e.V. (2016). *Kurzinformation Nr. 146, Korrosionsschutz bei Dauernägeln und Dauerverpressankern, Festlegung der Prüflasten bei Bodenvernagelungen*.
- VIDAL, H. (1966). *La Terre Armée*. Annals of L'Institut Technique de Batiment et des Travaux Public. Serie Materiaux, 30. Jg., S. 223-224.
- WANSTREET, P. (2007). *Finite element analysis of slope stability*. West Virginia University.
- WEI, W. B., & CHENG, Y. M. (2010). *Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods*. Computers and Geotechnics, 37(5), 602-618.
- WICHTER, L., JOPPA, E., & LÖER, R. (2005). *Erfahrungen aus dem Einsatz von vorgespannten Verpressankern und Verpresspfählen für Dauerverankerungen*. BTU, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik.
- WICHTER, L.; MEININGER, W. (2004). *Zum Stand der Bodenvernagelung in Deutschland*. Geotechnik 27(3), 292-301



- WICHTER, L.; MEININGER, W. (2018). *Verpressanker, Bodennägel und Zugpfähle, Kapitel 2: Bodenvernagelungen*. In: Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, 8. Aufl., Hrsg. K.J. Witt, , 440-454
- YE, X., WANG, S., WANG, Q., SLOAN, S. W., & SHENG, D. (2017). *Numerical and experimental studies of the mechanical behaviour for compaction grouted soil nails in sandy soil*. Computers and Geotechnics, 90, 202-214.
- ZHANG, G., CAO, J., & WANG, L. (2014). *Failure behavior and mechanism of slopes reinforced using soil nail wall under various loading conditions*. Soils and Foundations, 54(6), 1175-1187.
- ZHANG, M., SONG, E., & CHEN, Z. (1999). *Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)*. Computers and Geotechnics, 25(4), 191-204.
- ZHOU, W. H., & YIN, J. H. (2008). *A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis*. Computers and Geotechnics, 35(3), 479-488.
- ZOLQADR, E, ET AL. (2016). *Analysis of soil nail walls performance-Case study*. Geomechanics and Geoengineering, 11(1), 1-12.



Anlage 1: Literaturdatenbank

No.	Quelle		Übersicht -					Labor-/Modellversuch										Feldversuch/Großversuch/Bauwerke												FE-Analyse						Bemerkungen				
			KI	allg. Grundlagen	Modellversuch	Feldversuch	FE-Analyse	Art	Versuchsaufbau				Art	Baugrund- und Grundwassersituation						Geometrie		Messtechnische				Modell														
									Maßstab	Modellboden	Messtechnik	Auswertung von		Baugrundaufbau	γ [kN/m³]	c [kN/m²]	φ [°]	E_s [kN/m²]	I_b [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel	Dehnung Nagel (axial)	Dehnung Nagel (Biegung)	hor. Wandverschiebung	Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs-/Grenzstatus	Art	FE-Programm	2D	3D		Stoffmodell	SLS	ULS	Abbildung Nagel
Maßstab	Modellboden	Messtechnik	Auswertung von	Art	Baugrundaufbau	γ [kN/m³]	c [kN/m²]	φ [°]	E_s [kN/m²]	I_b [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel	Dehnung Nagel (axial)	Dehnung Nagel (Biegung)	hor. Wandverschiebung	Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs-/Grenzstatus	Art	FE-Programm	2D	3D	Stoffmodell	SLS	ULS	Abbildung Nagel										
1	Babu & Sing (2009)	Appraisal of Soil Nailing Design	P			x																		Parameterstudie	Plaxis	x		MC			Platten-element	Variation Höhe Geländesprung; Stoffparameter angegeben								
2	Gäßler (1987)	Vernagelte Geländesprünge Tragverhalten und Standsicherheit	D	x	x	x	1g Modellversuch	1:25	Karlsruher Sand	Bildauswertung	Versagensformen im Bruchzustand	Großversuch	Sand	15,6	-	41,5	k.A.	0,62	0,84	k.A.													Bodenparameter von Großversuch A							
3	Yildirim & Bayur (2009)	Field study of a soil nailed retaining wall	P			x	x																	Back-Analyse	Plaxis	x		MC	x		Balken-element	Nachrechnung der hor. Wandverschiebung; Stoffparameter angegeben								
4	Olia & Liu (2011)	Numerical investigation of soil nail wall during construction	K	B		x																		Back-Analyse	Plaxis	x		MC	x		Balken-element	Stocker & Riedinger (1990); Bodenschichtung aus Sand & Keuper; Nachrechnung von hor. Wandverschiebung & Nagelkraft								
5	Stocker & Riedinger (1990)	The bearing behaviour of nailed retaining structures	P			x																										Messtechnische Begleitung über 10 Jahre;								
6	Schlosser & Unterreiner (1991)	Soil Nailing in France: Research and Practice	P	x																												Darstellung von Tragmechanismen und Designdetail; Zusammenfassung aus CLOUTERRE (1991)								
7	Plumelle & Schlosser (1991)	Three Full-Scale Experiments of French Project on Soil Nailing: CLOUTERRE	P			x																										Kurzzusammenfassung der Versuche aus CLOUTERRE (1991)								
8	Hajjalilue-Bonab & Razavi (2016)	A study of soil-nailed wall behaviour at limit states	P			x																		Parameterstudie	Flac		x	MC		x	Struktur-elemente	Variation unterschiedlicher Versagenszustände (Last, Verformung;...)								
9	Recommendations CLOUTERRE (1991)	Soil Nailing Recommendation for designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support System Using Soil Nailing.	B	x	x	x																																		
10	Alsubal et al. (2017)	A Typical Design of Soil Nailing System for Stabilizing a Soil Slope: Case Study	P			x																		Parameterstudie	Slope/W	x		MC		x	k.A.	Variation der Nagellänge, Neigung Böschung								

No.	Autor	Quelle	Übersicht -				Labor-/Modellversuch				Feldversuch/Großversuch/Bauwerke											FE-Analyse						Bemerkungen															
			KI	allg. Grundlagen	Modellversuch	Feldversuch	FE-Analyse	Art	Versuchsaufbau			Art	Baugrund- und Grundwassersituation						Geometrie		Messtechnische			Modell																			
									Maßstab	Modellboden	Messtechnik		Auswertung von	Baugrundaufbau	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²]	φ [°]	E_s [kN/m ²]	I_b [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel	Dehnung Nagel (axial)	Dehnung Nagel (Biegung)		hor. Wandverschiebung	Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs- /Grenz Zustand	Art	FE-Programm	2D	3D	Stoffmodell	SLS	ULS	Abbildung Nagel			
20	Junaideen et al. (2004)	Laboratory study of soil-nail interaction in loose, completely decomposed granite	P	x			1g Modellversuch	k.A.	schluffiger, kiesiger Sand	Erddruckgeber; Wegmesser	Nagelverschiebung beim Herausziehen																											Pull-Out-Versuche mit drei unterschiedlichen Nagelarten (ohne Ummantelung); Untersuchung Nagelverschiebung beim Herausziehen (Anbringung Zugkraft)					
21	Ghareh (2015)	Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils	P			x																														Plaxis	x		MC	x	x	Geogitter	Auswertung von hor. Wandverformungen und Scherkräfte und Biegemomente "nur" in der Spritzbetonwand während der Herstellung und unter Auflast
22	Elias & Juran (1991)	Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations	B																																								
23	Jones (1990)	Performance of Reinforced Soil Structures: In-Situ techniques for reinforced Soil																																									
24	Zhang et al. (2014)	Failure behavior and mechanism of slopes reinforced using soil nail wall under various loading conditions	B	x		x																																					
25	Jewell & Pedley (1990)	Analysis for soil reinforcement with bending stiffness.	B	x																																			Zusammenstellung mehrerer analytischer Berechnungsansätze; Unterscheidung von un- und ummantelter Nägel				
26	Jelinek & Ostermayer	Verpressanker in Böden	P		x		50g Zentrifugen Modell	k.A.	kohäsiver Boden	Bildbewertung	Versagensformen im Bruchzustand																											Variation unterschiedlicher Lastfälle (Eigengewicht, Auflast, Aushub); Nagellängen; Modellgröße					
27	Prashant et al. (2010)	Soil nailing for stabilization of steep slopes near railway tracks	B	x																																		Theoretische Einführung in das System Vernagelung (analytische Berechnungsmethoden inkl. Beispiele); Beschreibung Herstellprozess und Möglichkeiten zur Überwachung (Monitoring)					
28	Kim et al. (2002)	An Experimental Study of the Soil Nailed Wall Behavior with Front Plate Rigidity	P		x		1g Modellversuch	k.A.	Sand	Kraftmessdosen; Wegaufnehmer; Spannungsmesser	hor. Wandverformung; axiale Nagelkräfte																										Variation der Wanddicke, Nagellänge, Nagelneigung und Lastangriffspunkt; Auswirkung auf die Wandverformung, Nagelkräfte und der "Versagenslast"; Versuche im GZT						

No.	Autor	Quelle	Übersicht -					Labor-/Modellversuch										Feldversuch/Großversuch/Bauwerke										FE-Analyse							Bemerkungen
			KI	allg. Grundlagen	Modellversuch	Feldversuch	FE-Analyse	Art	Maßstab	Versuchsaufbau			Auswertung von	Art	Baugrund- und Grundwassersituation					Geometrie		Messtechnische			Art	Modell									
										Baugrundaufbau	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²]			φ [°]	E _s [kN/m ²]	I _b [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel	Dehnung Nagel (axial)		Dehnung Nagel (Biegung)	hor. Wandverschiebung	Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs- /Grenzstand	FE-Programm	2D	3D	Stoffmodell	
29	Garzon-Roca et al. (2019)	Designing soil nailed walls considering problematic issues during execution and service life by the amherst wall	P			x																													
30	Lima et al. (2003)	Considerations on the numerical modeling of nailed soil excavations	K B			x																			Parameterstudie	FLAC	x			MC	x		k.A.	Variation der Wanddicke und der Randbedingen (Lagerund des rechten Modellrands)	
31	Akhavan et al. (2011)	Comparing the Results of Numerical Analysis and Monitoring about the Behavior of Cracks Occurred Nearby Soil-Nailing Walls	P			x																			Back-Analyse	Plaxis	x			HS	x		Plattenelement	Nachrechnung eines Schadenfalls. Berechnung der hor. Wandverschiebung und der plastischen Punkte hinter der Nagelwand	
32	Damians (2016)	Mechanical performance and sustainability assessment of reinforced soil walls	D x x	x	x	x	Pullout Test	k.A.	Gravelly Sand (GW), Lowplasticity silty sand (SM)	Pullout box, Pullout jack, Pushing jack, Kraftsdosens und Wegmesser	Interaktion Boden-Bewehrung														Back-Analyse	Plaxis/Flac (2D) - Code-Bright (3D)	x	x	MC / HS	x			Plattenelement	Durch FEM wird versucht das Verständnis der komplexen bodenbewehrten Stütz wandkonstruktionen zu prognostizieren	
33	Bayat et al. (2021)	Probalistic Seismic Demand Analysis of Soil Nail Wall Structures Using Bayesian Linear Regression Approach	P			x																			Parameterstudie	Plaxis 2D	x			MC/HS/HSS	x	x	Plattenelement	Durch FEM wird die seismische analytische Bruchkurve von Bodenvernagelungskonstruktionen vorgestellt.	
34	Stocker (1976)	Bodenvernagelung	P			x																												Messung von Langzeitwirkungen in einem Nagelwand	
35	Stocker et al. ()	Soil Nailing. Coll. Int. reinforcement des Sols				x																												Messung von Langzeitwirkungen in einem Nagelwand	

No.	Autor	Quelle	Übersicht -					Labor-/Modellversuch										Feldversuch/Großversuch/Bauwerke										FE-Analyse						Bemerkungen						
			KI	allg. Grundlagen	Modellversuch	Feldversuch	FE-Analyse	Art	Versuchsaufbau				Art	Baugrund- und Grundwassersituation						Geometrie		Messtechnische						Art	Modell											
									Maßstab	Modellboden	Messtechnik	Auswertung von		Baugrundaufbau	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²]	φ [°]	E_s [kN/m ²]	I_b [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel	Dehnung Nagel (axial)	Dehnung Nagel (Biegung)		hor. Wandverschiebung	Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs- /Grenzzustand	FE-Programm		2D	3D	Stoffmodell	SLS	ULS	Abbildung Nagel
46	Wichter & Meininger (2004)	Zum Stand der Bodenvernagelung in Deutschland, Geotechnik 27	P	x																																		Bishäufige Erfahrungen mit Bodenvernagelung		
47	Wichter et al. (2005)	Erfahrungen aus dem Einsatz von vorgespannten Verpressankerung Verpresspfählen für Dauer- verankerungen, BTU Cottbus Heft 2	B	x																																				
48	Byrne et al. (1998)	Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls	B	x																																		Sammlung von Erfahrungen mit Bodenvernagelung mit dem Zweck der Einführung der Bodenvernagelung in die amerikanische Verkehrsplanung.		
49	Cartier & Gigan (1983)	Experiments and observations on soil nailing structures	P	x																																				
50	Su LJ (2006)	Laboratory Pull-out testing study on soil nails in compacted completely decomposed granite fill	D	x	x	Pullout Test	Schluffiger Sand	Hydraulic Jack, DMS, Erddruckzellen, Reaktionsrahmen, Kleinkernbohrer, Tensiometer	Herausziehversuch, Interaktion Boden-Nagel																			Back-Analyse	Abaqus	x	MC	x			Volumenelement	Pull-out Versuche im Labor und mit Numerik ausgeglichen				
51	Su LJ, Yin JH, Zhou WH (2010)	Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pullout resistance	P		x																						Back-Analyse und Parameterstudie	Abaqus	x	MC	x			Volumenelement	Numerische Untersuchungen mit Ergebnissen aus Laborversuchen vergleicht und Parameterstudie mit verschiedenen Stoffparametern					
52	Wei WB, Cheng YM (2010)	Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods	P		x																						Parameterstudie	FLAC 3D	x	MC	x	x		Nagel-element	Untersuchung der Verteilung der Nagelkraft über den Nagelverlauf für verschiedene Nagelneigungen und Grenzzustände					
53	Zhang Mj, Song EX, Chen Zy (1999)	Grund movement analysis of soil nailing constructions by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)	P		x																						Parameterstudie	k.A.	x	HS	x	x		Plattenelemente	Ein 3D-FE-Modell wird erstellt, um die Verformungen in der Bodenvernagelung zu analysieren					

No.	Autor	Quelle	Übersicht -			Labor-/Modellversuch					Feldversuch/Großversuch/Bauwerke													FE-Analyse						Bemerkungen											
			KI	allg. Grundlagen	Modellversuch	Feldversuch	FE-Analyse	Art	Versuchsaufbau			Art	Baugrund- und Grundwassersituation							Geometrie			Messtechnische			Art	Modell														
									Maßstab	Modellboden	Messtechnik		Auswertung von	Baugrundaufbau	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²]	φ [°]	E _s [kN/m ²]	I _b [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel		Dehnung Nagel (axial)	Dehnung Nagel (Biegung)	hor. Wandverschiebung		Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs- /Grenzuzustand	FE-Programm	2D	3D	Stoffmodell	SLS	ULS	Abbildung Nagel	
64	Juran, Baudrand, Farrag, Elias (1990)	Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structures	P	x																																					In diesem Beitrag wird ein kinematischer Ansatz zur Bemessung vorgestellt, der eine rationale Schätzung maximaler Zug- und Scherkräfte ermöglicht
65	Singh und Sivakumar Babu (2010)	2D Numerical Simulations of Soil Nail Walls	P			x																																		Einsatz von hochwertigen Stoffgesetzen für die numerische Simulation der Bodenvernagelung. Vergleich der Verformungen, Nagelkräfte und Biegemomente.	
66	Sivakumar Babu und Singh (2008)	Numerical Analysis of Performance of Soil Nail Walls in Seismic Conditions	P			x																																		Simulation einer 8m hohen Nagelwand unter seismischen Bedingungen, um das Verhalten besser zu verstehen.	
67	U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2015)	Soil Nail Walls Reference Manual	B	x																																			Dieses Dokument enthält Informationen über die Analyse, den Entwurf und den Bau von permanenten Bodennagelwänden Wänden im Straßenbau		
68	Missouri University of Science and Technology (2010)	Analysis of Soil Nailed Walls Under Harmonic Dynamic Excitations	P			x																																		Diese Forschungsarbeit zielt darauf ab, das Verhalten von Boden-Nagel-Wänden bei dynamischen Erregungen zu verstehen.	
69	Sandra McRae Duchesne 2003	Effects of Frost Heave on a Soil Nail Wall in Brunswick, Maine	D	x		x																																	Ziel dieser Arbeit war die Bestimmung des Einflusses von Frost in Bodenvernagelung		
70	Garzón-Roca, J.; Capa-Guachon, VE.; Torrijo, F.; Company Rodríguez, J. (2019)	Designing Soil-Nailed Walls Using the Amherst Wall Considering Problematic Issues during Execution and Service Life	P			x																																		Wissen über die Beanspruchungen entlang eines Nagels im Anfangsbruchzustand zu erweitern	
71	Wan-Huan Zhou 1, Jian-Hua Yin (2007)	A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis	P																																					In diesem Beitrag stellen die Autoren ein einfaches mathematisches Modell für die Analyse der Wechselwirkung zwischen einem Bodennagel und dem umgebenden Boden vor	
72	Yazdan Shams Maleki . Jahangir Khazaei 2017	A Numerical Comparison of the Behavior of a Braced Excavation Using Two and Three-Dimensional Creep Plastic Analyses	P			x																																		Die aktuelle Studie beschäftigt sich mit der Untersuchung der Auswirkungen sowohl des Zeitfaktors als auch der Auswahl eines konstitutiven Modelltyps auf die Vorhersage von Verformungen einer nagelbewehrten Baugrube mittels zwei- und dreidimensionaler Finite-Elemente-Analysen	

No.	Autor	Quelle	Übersicht -					Labor-/Modellversuch										Feldversuch/Großversuch/Bauwerke										FE-Analyse								Bemerkungen							
			KI	allg. Grundlagen	Modellversuch	Feldversuch	FE-Analyse	Art	Maßstab	Versuchsaufbau			Auswertung von	Art	Baugrund- und Grundwassersituation										Geometrie		Messtechnische						Art	Modell									
										Baugrundaufbau	γ [kN/m³]	c [kN/m²]			φ [°]	E_s [kN/m²]	I_b [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel	Dehnung Nagel (axial)	Dehnung Nagel (Biegung)	hor. Wandverschiebung	Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs-/Grenz Zustand	FE-Programm	2D	3D		Stoffmodell	SLS		ULS	Abbildung Nagel					
																																							Modellboden	Messtechnik	Baugrundaufbau	γ [kN/m³]	c [kN/m²]
73	Pinar Wanstreet 2007	Finite Element analysis of slope stability				x																													Parameterstudie	ABAQUS	x						
74	Jianbin Hao and Banqiao Wang	Parameter Sensitivity Analysis on Deformation of Composite Soil-Nailed Wall Using Artificial Neural Networks and Orthogonal Experiment	P																																					Auf der Grundlage des Algorithmus der Backpropagation künstlicher neuronaler Netze (ANNs) wird in dieser Arbeit ein intelligentes Modell erstellt, das zur Vorhersage der maximalen seitlichen Verschiebung einer Verbundwand mit Bodennägeln verwendet wird.			
75	Ivan Puig Damians 2017	MECHANICAL PERFORMANCE AND SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF REINFORCED SOIL WALLS	D	x		x	Pullout test in a box	125x50x55-75 cm	Verschiedene Bodenarten	Kraftmessdose, Wegaufnehmer	Herausziehenwiderstand																								Parameterstudie	Plaxis/Abaqus	x	x	MC		x	Geogrid	In dieser Arbeit wurden numerische Modelle entwickelt und gezeigt, dass sie zufriedenstellende Vorhersagen des Wandverhaltens im Vergleich zu den Ergebnissen instrumentierter physischer Strukturen liefern
76	2020, Wie Han, Genxiao Li, Sun, Luan, Wu, Liu	Numerical Investigation of a Foundation Pit Supported by a Composite Soil Nailing Structure	P																																Back-Analyse	Abaqus		x	MC	x		Volumenelemente	In dieser Arbeit wurde eine zusammengesetzte Bodenvernagelungsstruktur untersucht und ihre Wirkung auf eine symmetrische Baugrube aus Schluffboden untersucht.
77	Akhavan, 2011	Comparing the Results of Numerical Analysis and Monitoring about the Behavior of Cracks Occurred Nearby Soil-Nailing Walls	P																																Back-Analyse	Plaxis Abaqus	x		HS	x		Plattenelemente	Mit 2D FE-Analysen wird das Verhalten und die Entwicklung der Risse angrenzend an die Boden-Nagel-Wände untersucht
78	Truc T T Phan1 and M W Gui1	Soil nailing behaviour for slope stabilization: A case study	P																															Back-Analyse	Plaxis	x		HS	x	Node-to-Node / Geogrid	Der Zweck dieser Studie ist es, dem Entwurfsingenieur mehr Möglichkeiten zu bieten eine vernünftige Auswahl der oben beschriebenen Entwurfsparameter zu treffen		
79	Lima, Sayao, Gerscovich, 2003	CONSIDERATIONS ON THE NUMERICAL MODELING OF NAILED SOIL EXCAVATIONS	P																																Parameterstudie	Flac	x		MC	x		Linienelemente	Eine Untersuchung über den Einfluss geometrischer und geotechnischer Parameter auf die Spannungen und Dehnungen, die sich in genagelten Baugruben entwickeln, wird durchgeführt
80	Rawat, Gupta 2016	An Experimental and Analytical Study of Slope Stability by Soil Nailing	P	x		x	1g Modellversuch	50 cm x 22 cm x 35 cm	Sand	DMS, Multimeter	Dehnung																							Back-Analyse	Plaxis		x	MC		x	Plattenelemente	In dieser Studie wird die Reaktion von unbewehrten und vernagelten Böschungen unter einer allmählich ansteigenden Auflast experimentell und mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode durchgeführt	

No.	Quelle		Übersicht -						Labor-/Modellversuch														Feldversuch/Großversuch/Bauwerke										FE-Analyse							Bemerkungen							
			KI	allg. Grundlagen	Modellversuch	Feldversuch	FE-Analyse	Art	Versuchsaufbau				Art	Baugrund- und Grundwassersituation					Geometrie			Messtechnische						Modell																			
									Maßstab	Modellboden	Messtechnik	Auswertung von		Baugrundaufbau	γ [kN/m ³]	c [kN/m ²]	φ [°]	E_s [kN/m ²]	I_p [-]	e [-]	Grundwasser	Höhe Geländesprung H [m]	Anzahl Nagelreihen	Länge Nägel [m]	Kraft Nagel	Dehnung Nagel (axial)	Dehnung Nagel (Biegung)	hor. Wandverschiebung	Setzung hinter Wand	Inklinometer	Gebrauchs- /Grenzzustand	Art	FE-Programm	2D	3D	Stoffmodell	SLS	ULS	Abbildung Nagel								
81	Mingju Zhang*, Erxiang Song*, Zhaoyuan Chen, 1999	Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)	P			x																																Parameterstudie	FLAC		x	MC			x	Plattenelemente	In dieser Arbeit wurde ein dreidimensionales (3-D) Finite-Elemente-Modell (FEM) für die Verformungsanalyse von genagelten Bodenstrukturen entwickelt
82	Sarkar, Kurar 2017	Application of Soil Nailing for Landslide Mitigation in Bhutan: A Case Study at Sorchen Bypass	P	x																																					Die Analyse, das Design und die Konstruktion der permanenten Bodennagelwand in dieser Studie wurde von den Referenzhandbüchern für Bodennagelkonstruktionen beeinflusst, die von der Federal Highway Administration des United States Department of Transportation veröffentlicht wurden						
83	Xinyu Ye, Shanyong Wang, Qiong Wang, Scott William Sloan, Daichao Sheng, 2017	Numerical and experimental studies of the mechanical behaviour for compaction grouted soil nails in sandy soil	P		x		x	Pull-out Test	100 cm x 60 cm x 73 cm	Stockton Sand	Erddrucksensoren, Kraftmessdose	Nagekraft und Herausziehenwiderstand																							Back-Analyse	Abaqus		x	MC			x	Volumenelement	Es wurde ein Modellversuch für einen neu entwickelten Bodennagel durchgeführt, dessen Ergebnis mit dem einer 3D-Simulation nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) verglichen wurde			