

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau
und Umweltgeotechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Wichtmann



Bachelorarbeit

Untersuchung des Tragverhaltens und der Erddruckentwicklung mit Geogittern rückverankerter Spundwände

von

Nils Thielecke

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. T. Wichtmann, Dr.-Ing. D. König
Dr.-Ing. O. Detert, R. Hölter, M.Sc.

Bochum, den 02.03.2020

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Geokunststoffe	4
2.1.1 Produkte	5
2.1.2 Funktionen	6
2.1.2.1 Trennen	6
2.1.2.2 Filtern	7
2.1.2.3 Drainieren	7
2.1.2.4 Bewehren	8
2.1.2.5 Schützen	8
2.2 Bewehren mit Geokunststoffen	8
2.3 Mit Geogittern stabilisierte Tragkonstruktionen	12
2.3.1 Spannungs-Verformungsverhalten	12
2.3.2 Kraftübertragung	15
2.3.3 Erddruck	18
2.4 Erddruckumlagerung	22
3 Methode	25
3.1 Hintergrund	25
3.2 Laborversuch	25
3.3 Grundmodell	26
4 Ergebnisse	31
4.1 Auswirkung der Lastposition und der Geogitterlage	31

4.2	Flächenlast	40
4.3	Geogitterlänge	44
4.4	Steife	48
5	Auswertung	49
5.1	Lastposition	50
5.2	Vergleich der Ergebnisse mit den Laborversuchen	52
5.3	Vergleich Steife und Geogitter	57
5.4	Vergleich nach EAB und EAU	57
5.5	Nachweis der tiefen Gleitfuge	59
6	Fazit und Ausblick	61
	Literaturverzeichnis	63

Abbildungsverzeichnis

2.1	Plaxis2D Modell, Spingher (2018)	4
2.2	Funktionen von Geokunststoffen, nach Rügger (2003)	6
2.3	Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ^* für einen kohäsiven Boden für den effektiven Spannungsbereich $\sigma' = \gamma \cdot h$ mit $\gamma =$ Raumbgewicht, $h =$ Überlagerung. Rügger (2003)	10
2.4	Interaktion zwischen Geogitter und Boden (links: einseitiges Gleiten/Scherversuch, rechts: zweiseitiges Ausziehen. Rügger (2003)	10
2.5	Bruchbedingung von bewehrtem Boden nach Schlosser & Long (1972), modifiziert nach Schlosser & Delage (1987).	13
2.6	Bruchkriterium für unbewehrten und bewehrten Boden nach Hausmann & Lee (1976).	13
2.7	Spannungsänderungen einer bewehrten Bodenprobe im triaxialen Druckversuch nach Hausmann & Lee (1976).	14
2.8	spannungsabhängige zusätzliche Scherfestigkeit $\Delta\tau$ bewehrter Probekörper für a) verschiedene Zugkräfte T in der Bewehrung und b) geometrisch unterschiedliche Geogitter bei gleicher Zugkraft nach Ochiai et al. (1996). . .	15
2.9	übliche Bewehrungsprodukte und die Mechanismen der Krafteinleitung nach Palmeira (1987), modifiziert.	16
2.10	Einfluss der Formstabilität von Geogittern auf die Ergebnisse von „Push-Tests“ nach Matys & Baslik (2004).	17
2.11	Vorstellung zur Entstehung von Partikel „Interlocking“ während der Bodenverdichtung nach Yogarajah (1993).	17
2.12	Zusammenstellung der untersuchten Probekörper und Bewehrungsanordnungen (Lage der Geogitter als Höhe in cm). Ruiken (2013)	18
2.13	Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckentwicklung (Geogitter GL-700, nicht am Facing angeschlossen). Ruiken (2013)	19
2.14	Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckentwicklung (Geogitter GL-1155, nicht am Facing angeschlossen). Ruiken (2013)	19

2.15	Zusammenhang zwischen Erddruck und Bewehrungsgrad.	20
2.16	Erddruckverteilung auf das Facing bei unbewehrtem und verschiedenfach geogitterbewehrtem Boden nach $u_x = 2$ mm Wandverschiebung. Ruiken (2013)	20
2.17	Qualitative Darstellung der verformungsabhängigen Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Arten der Versuchsdurchführung. Ruiken (2013) . . .	21
2.18	Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckent- wicklung (Gitter GL-700, Verschiebung des Facings mit angeschlossenen Geogittern). Ruiken (2013)	21
2.19	Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckent- wicklung (Gitter GL-1155, Verschiebung des Facings mit angeschlossenen Geogittern). Ruiken (2013)	22
2.20	Partikelrotationen (a) und horizontale Partikelverschiebungen (b) in unbe- wehrten, 2- und 5-fach geogitterbewehrten Probekörpern nach $u_x = 10$ mm Wandverschiebung. Ruiken (2013)	22
2.21	Erddruckumlagerung für das Herstellverfahren Abgegrabene Wand, EAU (2012)	23
2.22	Erddruckumlagerung für das Herstellverfahren Hinterfüllte Wand, EAU (2012)	24
2.23	Lastfiguren für einmal gestützte Spundwände und Ortbetonwände, EAB (2013)	24
3.1	Laborversuch, Deltares (2020)	26
3.2	Plaxis2D-Modell nach Laborversuch	27
3.3	Plaxis2D-Grundmodell	27
3.4	Steife	29
4.1	Biegemoment der Spundwand für Platte A Geogitterlage -0,05m	32
4.2	Kräfte im Geogitter für Platte A für Modellvariante 1	33
4.3	Kräfte im Geogitter für Platte B für Modellvariante 1	34
4.4	Kräfte im Geogitter für Platte C für Modellvariante 1	34
4.5	Modellvariante 1 Platte A Geogitterlage -0,05 m	35
4.6	Modellvariante 1 Platte A Geogitterlage -0,07 m	36
4.7	Modellvariante 1 Platte A Geogitterlage -0,09 m	36
4.8	Modellvariante 1 Platte B Geogitterlage -0,05 m	37
4.9	Modellvariante 1 Platte B Geogitterlage -0,07 m	37
4.10	Modellvariante 1 Platte B Geogitterlage -0,09 m	38

4.11	Modellvariante 1 Platte C Geogitterlage -0,05 m	38
4.12	Modellvariante 1 Platte C Geogitterlage -0,07 m	39
4.13	Modellvariante 1 Platte C Geogitterlage -0,09 m	39
4.14	Kräfte im Geogitter für Flächenlast Modellvariante 3	41
4.15	Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,05 m	42
4.16	Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,07 m	42
4.17	Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,09 m	43
4.18	Modellvariante 4 Geogitterlänge 6 cm Geogitterlage -0,05 m	45
4.19	Modellvariante 4 Geogitterlänge 11 cm Geogitterlage -0,05 m	45
4.20	Modellvariante 4 Geogitterlänge 18 cm Geogitterlage -0,05 m	46
4.21	Modellvariante 5 Variation des Silikonblocks	47
4.22	Modellvariante 6 Steife	48
5.1	Vergleich der Scherdehnung eines unbewehrten und eines bewehrten Systems	49
5.2	Vergleich des Erddrucks eines unbewehrten und eines bewehrten Systems .	50
5.3	Erddruck in Abhängigkeit der Lastposition und der Geogitterlage	51
5.4	max Last in Abhängigkeit der Lastposition und der Geogitterlage	51
5.5	Erddruckverteilung auf das Facing bei unbewehrtem und verschiedenfach geogitterbewehrtem Boden nach $u_x = 2$ mm Wandverschiebung. Ruiken (2013)	52
5.6	Scherdehnung für Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,05 m . . .	52
5.7	Vergleich des Laborversuches mit numerischen Ergebnissen für Platte A Geogitterlänge 6 cm	53
5.8	Vergleich des Laborversuches mit numerischen Ergebnissen für Platte A Geogitterlänge 11 cm	54
5.9	Vergleich des Laborversuches mit numerischen Ergebnissen für Platte A Geogitterlänge 18 cm	54
5.10	Vergleich der Spundwandverschiebung am Geogitteranschluss	55
5.11	Vergleich der Spundwandverschiebung am Kopfpunkt	56
5.12	Vergleich der Spundwandverschiebung am Fußpunkt	56
5.13	Resultierender Erddruck in Abhängigkeit der Dehnsteifigkeit der Steife . .	57
5.14	Resultierender Erddruck der Flächenlast nach EAB/EAU und Plaxis	58
5.15	Resultierender Erddruck für Platte A und Platte B nach EAB und Plaxis .	59
5.16	Nachweis der tiefen Gleitfuge bei mehrfacher Verankerung, EAU (2004) . .	60

1 Einleitung

Beim Bau von hinterfüllten Spundwandkonstruktionen wird die Rückverankerung traditionell über eine Ankertafel oder Verpressanker ausgeführt. Eine neue Methode, um Kosten und Aufwand zu sparen, ist die Rückverankerung mittels Geogitter. Ein Anwendungsbeispiel ist der küstennahe Offshore-Windpark Krammer. Beim Bau des Windparks Krammer wurde die offene Spundwand mit drei Geogittern in verschiedenen Höhen und Längen rückverankert. Messungen des hieraus resultierenden Verbunds aus Erdreich und Geogitterlage weisen auf eine Überbemessung hin. Zur genaueren Untersuchung wurden bereits kleinmaßstäbliche Laborversuche durchgeführt, anhand derer ein Finite-Elemente Modell validiert wurde. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Lastabtrags in dem System und der Vergleich der Ergebnisse mit den traditionellen Bemessungsansätzen nach EAB (2013) und EAU (2012). Hierzu wird das Finite-Elemente Modell bezüglich des Lastauftrags, der Geogitterlänge sowie der Anzahl und der Höhe der Geogitterlagen erstellt. Diese Variationen sollen neue Erkenntnisse im Bereich Erddruckumlagerung und den Nachweis der tiefen Gleitfuge liefern. In vorherigen Arbeiten wurden bereits der Einfluss der Bodenparameter auf das Gesamtsystem von Spingher (2018) und der Einfluss der Veränderung von Systemparametern der Spundwand und des Geogitters von Derin (2019) untersucht.

Nach der Einleitung werden zu Beginn dieser Arbeit unter dem Punkt „Stand der Forschung“ die Ergebnisse nach Spingher (2018) und Derin (2019) zusammengefasst, um danach auf Geotextilien und deren Einsatzmöglichkeiten einzugehen. Im Weiteren werden Geotextilien als stabilisierende Tragkonstruktion und die Erddruckumlagerung bei Verbauwandssystemen mit Hinterfüllung erläutert. Im dritten Kapitel werden das Finite-Elemente Modell und die Modellvariationen vorgestellt, um anschließend die Ergebnisse darzustellen.

2 Stand der Forschung

In seiner Masterarbeit hat sich Spingher (2018) mit einer durch Geogittern rückverankerten aus Spundwänden bestehenden Arbeitsplattform der Offshore-Windenergieanlage Kramer befasst. Den Aufbau des Offshore-Windparks wiedergebend wurde zur Überprüfung ein Finite-Elemente Modell der Arbeitsplattform in Plaxis2D simuliert. Wie in Abb.2.1 zu erkennen wurde das System spundwandnah belastet und die Spundwand wurde über mehrere Geogitterlagen in verschiedenen Höhen und Längen rückverankert. Spingher (2018) kam zu dem Ergebnis, dass der Lastabtrag hauptsächlich im vorderen spundwandnahen Bereich stattfindet und mit zunehmender Entfernung zur Spundwand abnimmt. Zudem beeinflussen die Kohäsion und die Steifigkeit des Bodens die Tragfähigkeit. Hier konnte beobachtet werden, dass bei zunehmender Steifigkeit und Kohäsion die Horizontalverschiebung und die Setzung der Totlast abnimmt. Die Vertikalspannungen zeigen, dass bei Belastung das Verbundsystem aus Boden und Geogitter gestärkt wird und die Tragfähigkeit zunimmt. Bei Erhöhung der Belastung bilden sich zwischen dem untersten Punkt der Spundwand und den Enden der Geogittern zwei unvollständige Scherfugen aus, die Hinweise auf ein Tiefes-Gleitfugen-Szenario liefern. Das System versagt jedoch lokal durch einen Bruchkörper im unbewehrten Boden zwischen Auflast und Spundwand. Den größten Effekt auf das Tragverhalten des Verbundes hat die Vorspannung, die auf die Geogitter aufgebracht wird. Durch erhöhte Vorspannung nimmt die Dehnung im Geogitter zu und ermöglicht einen besseren Lastabtrag, sodass die Horizontalverschiebung und Setzung der Totlast abnimmt. Das System gewinnt insgesamt an Steifigkeit, was zur Folge hat, dass der Erddruck auf die Spundwand zunimmt. Der hieraus entstehende Erddruckverlauf weist Merkmale mit dem Erddruckverlauf einer mittels Verpressankern rückverankerten Spundwand auf. Daher kommt Spingher zu dem Schluss, dass es sich bei mit Geogittern rückverankerten Spundwänden um ein Hybrid-System handelt. An die Ergebnisse der Masterarbeit Spingher (2018) anknüpfend hat Derin (2019) in seiner Bachelorarbeit das System variiert und die Variationen auf Standsicherheit, Systemverformung und Spannungsverteilung untersucht und die Ergebnisse nach wirtschaftlichen Aspekten ausgewertet. Derin (2019) hat beim System die Geogitterlänge, die Zugfestig-

keit der Geogitter, das Spundwandprofil und die Anzahl der Geogitterlagen verändert. Bei allen Varianten war die Standsicherheit gegeben. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit kam Derin zu dem Ergebnis, dass ein System, in dem eine Geogitterlage entfernt und die übrigen Geogitter gekürzt wurden, am wirtschaftlichsten ist.

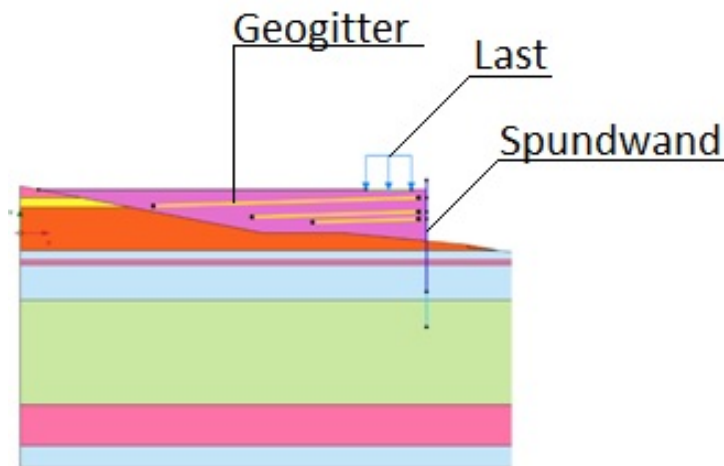


Abb. 2.1: Plaxis2D Modell, Spingher (2018)

2.1 Geokunststoffe

Geokunststoffe werden in der Baubranche seit den 1970er eingesetzt. Die synthetischen Materialien werden meistens für spezifische Aufgaben wie das Trennen, Filtern, Drainieren, Bewehren, Schützen, Abdichten verwendet. Hierbei müssen die Geokunststoffe oft mehrere Aufgaben gleichzeitig erfüllen. Um dies zu gewährleisten gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Produkten aus Geokunststoffen. Für sämtliche Produkte ist in der Norm SN 670 240 (1996) vorgeschrieben, dass der Hersteller von Geokunststoffen ein Datenblatt, welches Aufschluss über die Daten für oben beschriebene Hauptaufgaben gibt, beilegen muss. Zudem sind auf dem Datenblatt eindeutige Mindest-, bzw. Höchstwerte für die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften anzugeben. Auf dem Datenblatt sind herstellungsbedingte Schwankungen der Werte bereits berücksichtigt, sodass diese ohne Sicherheitszuschlag verwendet werden können. Die Charakterisierung der Geokunststoffe findet über die in SN 670 240 (1996) vorgegebenen Standardversuche statt. Hergestellt werden die beständigen Geokunststoffe aus Erdölvarianten. Die am meisten verwendeten Rohstoffe sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), lineare Polyester (PET) und Polyamid (PA). Diese synthetisch polymeren Materialien setzen sich aus Makromolekülen zusammen, welche wiederum aus Monomeren bestehen. Dabei bestimmt die Struktur der

Makromoleküle über die spezifischen Eigenschaften des Geokunststoffes. Einfluss auf die Struktur kann durch die Polymerisation und die Polykondensation genommen werden, die Bestandteile von verschiedenen Behandlungs- und Produktionsverfahren sind. Die Polymerisation und die Polykondensation nehmen damit unmittelbaren Einfluss auf die Eigenschaften von Geokunststoffen. Bei gestreckten Geogittern, die aus Polyethylenen bestehen, kann so der Grad der Kristallinität und damit die Dichte beeinflusst werden und bei den selten eingesetzten Polyamiden die Elastizität. Neben ihren besonderen Eigenschaften und preislichen Vorteilen bieten die Geokunststoffe oft auch praktische Vorteile im Einbau. Hier lässt sich durch schnelles und einfaches Verlegen Zeit und somit Kosten sparen. Rügger (2003)

2.1.1 Produkte

Aus Geokunststoffen wird mittlerweile eine breite Produktpalette hergestellt. Die Produkte unterscheiden sich durch die verschiedenen hydraulischen und mechanischen Eigenschaften. Diese Arbeit befasst sich hauptsächlich mit Geogittern. Hierfür ist eine klare Abgrenzung und Unterscheidung zu anderen Geokunststoffen entscheidend.

Geotextil

Geotextilien sind wasser- und luftdurchlässige, flächige Textilien. Sie werden aus natürlichen oder künstlichen Fasern hergestellt und als Baustoff im geotechnischen oder bautechnischen Bereich angewendet.

Geovlies

Das Geovlies wird durch Vernadeln (mechanisch) oder durch thermische und adhäsive Verfestigung hergestellt. Dabei können die Fasern ausgerichtet oder ungeordnet liegen. Geovliesstoffe können zum Dränieren, Filtern, Schützen und Trennen verbaut werden. Eingesetzt werden sie im Wasser- und Straßenbau.

Geogewebe

Geotextil, das aus sich regelmäßig, meist rechtwinklig kreuzenden Systemen aus mindestens zwei Fasern besteht. Das Geogewebe kann Zugkräfte aufnehmen und dient daher als Bewehrung oder wird bei statischer Belastung zum Trennen oder Filtern eingesetzt.

Geogewirk

Ein durch Maschenbildung hergestelltes Geotextil, welches aus verschiedenen Systemen von Fäden, Fasern und Filamenten besteht.

Geogitter

Ein regelmäßiges und flaches, aus fest verbundenen Längs- und Querelementen bestehendes Gitter. Durch Öffnungen, die größer sind als die Fäden und Streben, kann das Geogitter einen Verbund mit dem Kontaktboden eingehen und Bewehrungsaufgaben erfüllen.

Geonetz

Geotextil mit einer netzwerkartigen Struktur, bei dem die Öffnungen deutlich größer als die Knotenpunkte sind.

Geoverbundstoff (Geokomposit)

Der Geoverbundstoff besteht aus mindestens einem Geokunststoff, der mit anderen Komponenten kombiniert wird. Je nach Anwendungsfall zählen hierzu Distanzhalterschichten, Noppenbahnen, Kunststoffdichtungsbahnen oder Tone.

2.1.2 Funktionen

Hauptaufgaben	Trennen	Filtern	Drainieren	Bewehren	Schützen
Belastung	Normaldruck σ	Normaldruck σ	Normaldruck σ	Zugkraft z Normaldruck σ	Normaldruck σ Interaktion Boden - Geokunststoff
Massgebende Eigenschaften Geokunststoff	Zugfestigkeit, Dehnung unter Höchstzugkraft, Durchschlagswiderstand, Öffnungsweite, Durchlässigkeit senkrecht, Alterungsbeständigkeit	Öffnungsweite, Durchlässigkeit senkrecht, Zugfestigkeit, Dehnung unter Höchstzugkraft, Durchschlagswiderstand, Alterungsbeständigkeit	Öffnungsweite, Durchlässigkeit in der Ebene, Durchlässigkeit senkrecht, Zugfestigkeit, Dehnung unter Höchstzugkraft, Kompressibilität, Alterungsbeständigkeit	Zugfestigkeit, Kraft-Dehnungsverhalten, Zugkriechen, Langzeitzugfestigkeit, Durchlässigkeit, Interaktion Boden - Geokunststoff, Alterungsbeständigkeit	Pyramidendurchdrückkraft, Durchschlagswiderstand, Scheuerwiderstand, Zugfestigkeit, Dehnung unter Höchstzugkraft, Alterungsbeständigkeit

Abb. 2.2: Funktionen von Geokunststoffen, nach Rügger (2003)

2.1.2.1 Trennen

Mit Geokunststoffen werden Bodenschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften und Korngrößen voneinander getrennt. Dadurch wird das Vermischen von Fein- und Grob-

material verhindert. Ein Wasserstau ist hierbei unbedingt zu verhindern. Ein Nebeneffekt des mechanischen Trennens ist das gleichzeitig stattfindende Filtern, welches das Ausschwemmen von Feinmaterial begrenzt. Bei trennenden Geokunststoffen müssen besondere Anforderungen erfüllt werden. Für die Hauptaufgabe des Trennens muss der Geokunststoff widerstandsfähig gegen das Einpressen von groben Komponenten in den feinen Boden und anderen Belastungen sein. Diese Eigenschaften werden durch die Zugfestigkeit in Längs- und Querrichtung und den Durchschlagswiderstand charakterisiert. Zusätzlich werden zwei Fälle unterscheiden: zum einen das beschränkte Verstärken mit Geokunststoffen hoher Dehnung über 30 % und zum anderen das erhöhte Verstärken mit Geokunststoffen geringer Dehnung unter 30 %. In beiden Fällen darf der Geokunststoff nicht zerstört werden. Um dies zu gewährleisten gilt, je geringer die Dehnfähigkeit des Geokunststoffes ist, umso größer muss die Zugfestigkeit sein.

2.1.2.2 Filtern

Die Grundanforderungen an Geokunststoffe mit der Hauptfunktion des Filterns sind das druckfreie Durchfließen von Wasser durch den Geokunststoff und das Verhindern des Ausschwemmens von Feinmaterialien. Diese Anforderungen müssen über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet bleiben. Maßgebenden Einfluss für die oben genannten Anforderungen hat die charakteristische Öffnungsweite O_w und die Durchlässigkeit K_g . Die zulässige charakteristische Öffnungsweite und die Durchlässigkeit werden nach dem Aufbau und den Eigenschaften des abzufilternden Bodens beurteilt. Dabei werden die Bodenarten in bindige Böden, nichtbindige Böden und grobkörnige Böden unterschieden. Zusätzlichen Einfluss auf die Durchlässigkeit hat die Normalkraft σ . Bei Zunahme der Normalkraft sinkt die Durchlässigkeit des Geokunststoffes. Durch das Abstimmen auf die Bodenart wird ein Verkleben und ein damit auftretender Wasserstau verhindert. Als Nebenaufgabe übernimmt der Geokunststoff die Aufgabe des Trennens.

2.1.2.3 Drainieren

Ziel des Drainierens ist das Abführen von seitlich aus dem Boden zufließendem Wasser in der Ebene des Geokunststoffes. Bei den zum Drainieren eingesetzten Geokunststoffen ist die Transmissivität ein entscheidender Faktor, um einen möglichst geringen Druckverlust im Geokunststoff beim Abführen des Wassers zu gewährleisten. Die Transmissivität O ist das Wassertransportvermögen des Geokunststoffes. Das Wassertransportvermögen darf nicht durch äußere Belastungen wie Erddruck oder Auflast beeinflusst werden. Im

Bereich des Drainierens kommen überwiegend Geoverbundstoffe mit einem dreidimensionalen Kern zum Einsatz.

2.1.2.4 Bewehren

Beim Bewehren werden vom Geokunststoff aufgenommene Zugkräfte über Reibung großflächig in den Kontaktboden abgegeben. Die Zugkräfte dürfen dabei den Geokunststoff nur begrenzt verformen, um eine Beschädigung zu verhindern und die Gebrauchsdauer des Bauwerkes sicherzustellen. Darüber hinaus muss die Bewehrung je nach Anwendungsfall Nebenaufgaben wie das Drainieren und Trennen erfüllen. Sonst könnte sich durch einen Wasserstau ein Porenwasserdruck aufbauen, der die Scherfestigkeit gefährlich verringert. Beim Bemessen von mit Geokunststoffen bewehrten Bauwerken wird zwischen äußerer und innerer Tragsicherheit unterschieden. Bei der äußeren Tragsicherheit findet das Versagen außerhalb der Bewehrung statt und bei der inneren Tragsicherheit innerhalb der Bewehrung. Dabei sind die mechanischen Mindestanforderungen das Resultat einer erdmechanischen Messung. Beim Bewehren mit Geokunststoffen sind folgende Randbedingungen zu beachten: das Geländeprofil, charakteristische Eigenschaften des Bodens, die Hinterfüllung, der Grundwasserspiegel, die Belastung, die Gebrauchsdauer und die Umwelteinflüsse.

2.1.2.5 Schützen

Durch das Aufbringen einer schützenden Geokunststofflage werden andere Lagen wie Abdichtungen vor mechanischen Einflüssen geschützt. Zu den Aufgaben einer schützenden Geokunststofflage zählen der Widerstand gegen die Perforation und der Widerstand gegen das Scheuern. Dabei verteilt die schützende Lage konzentriert auftretende Kräfte und verhindert eine mechanische Beschädigung der Unterlage.

2.2 Bewehren mit Geokunststoffen

Mit erdverlegten Geokunststoffen werden die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit von Tragkonstruktionen verbessert. Dies wird erforderlich, wenn der Boden keine ausreichende Standsicherheit aufweist. Die Kraftübertragung zwischen Geokunststoff und Boden findet hierbei über Reibung, Verzahnung und Adhäsion statt. Als Faustformel kann

eine Bewehrungslänge von 70 % der Konstruktionshöhe H und ein vertikaler Abstand von 0,3 m bis 0,6 m zwischen den Geokunststofflagen angenommen werden. EBGEO (2011)

Die Verbundwirkung kann vereinfacht über den Reibungsbeiwert $f_{sg,k}$ ausgedrückt werden und ist wie folgt definiert:

$$f_{sg,k} = \lambda \cdot \phi_k \quad (2.1)$$

mit:

λ Verbundbeiwert für Reibung $\lambda = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$,

$\tan \delta$ Reibungsbeiwert Geokunststoff/Boden,

$\tan \varphi$ Reibungsbeiwert Boden,

$\tan \varphi_k$ charakteristischer Reibungsbeiwert Boden.

Soll für den Verbundbeiwert die Kohäsion berücksichtigt werden, erfolgt dies über den Scherbeiwert $f_{scg,k}$. Der Scherbeiwert ist wie folgt definiert:

$$f_{scg,k} = \lambda_c \cdot c_k \quad (2.2)$$

mit:

λ_c Verbundbeiwert für Kohäsion $\lambda_c = \frac{a}{c}$,

a Adhäsion Geokunststoff/Boden,

c Kohäsion Boden,

c_k charakteristische Kohäsion Boden.

Beim Ansetzen von Adhäsionsanteilen muss die Wirkung über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet sein. EBGEO (2011) Zu berücksichtigen ist hierbei, dass der Einfluss der Kohäsion sehr groß sein kann und die Kohäsionsgröße nicht zuverlässig bestimmt werden kann. In der Praxis ist es daher üblich, die Kohäsion sehr vorsichtig oder gar nicht zu berücksichtigen. Indirekt wird ein Kohäsionsanteil in bindigen, kohäsiven Boden über den Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ^* mit einberechnet. Rügger (2003)

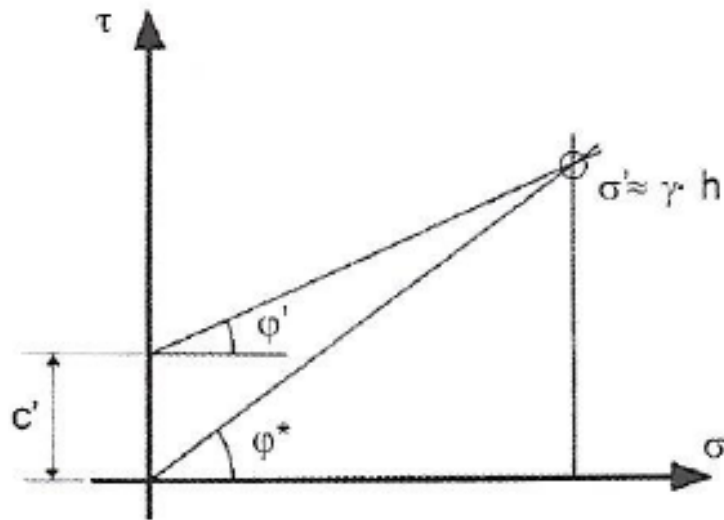


Abb. 2.3: Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ^* für einen kohäsiven Boden für den effektiven Spannungsbereich $\sigma' = \gamma \cdot h$ mit $\gamma =$ Raumbgewicht, $h =$ Überlagerung. Rügger (2003)

Die Verbundbeiwerte sind für zwei Fälle zu unterscheiden EBGEO (2011):

- Nachweis gegen Abgleiten/Abscheren in einer Kontaktfläche Geokunststoff/Boden
- Nachweis gegen das Herausziehen der Bewehrung.

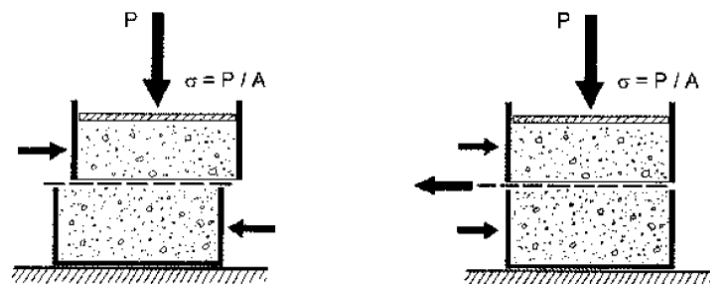


Abb. 2.4: Interaktion zwischen Geogitter und Boden (links: einseitiges Gleiten/Scherversuch, rechts: zweiseitiges Ausziehen. Rügger (2003)

Beeinflusst werden die Nachweise hauptsächlich über folgende Faktoren Rügger (2003):

- Korngrößenverteilung des Kontaktbodens
- Reibung/Kohäsion des Kontaktbodens
- Öffnungs-/Maschenweite des Geokunststoffes

- Oberflächenstruktur des Geokunststoffes
- Wasser in wenig durchlässigen Kontaktböden (Porenwasserdruck).

Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion werden meistens für permanente Aufgaben eingesetzt. Daher liefert die Zugfestigkeit keine relevante Aussage über den Tragsicherheitsnachweis, sondern dient zu Qualitätsüberwachung [Bauen mit]. Bei Kurzzeitbelastung verhalten sich Geokunststoffe elastisch. Bei dauerhafter Belastung hingegen haben Geokunststoffe ein elasto-plastisches Verhalten, hier finden viskose, zeitabhängige Kriechvorgänge statt. Resultate können eine reduzierte Belastbarkeit und eine erhöhte Dehnung sein. Das hat wiederum zur Folge, dass ein Zeitstandsbruch und eine durch Kriechdehnung unakzeptable Verformung auftreten können. Daher werden in der Gleichung 2.3 ein Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Kriechdehnung, sowie weitere Abminderungsfaktoren zur Ermittlung der Langzeitfestigkeit angesetzt. Ausgegangen wird hierbei von der Kurzzeitfestigkeit ermittelt über die Zugkraft-Dehnungs-Linie. EBGEO (2001)

$$R_{B,k} = R_{B,k0} / (A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5) \quad (2.3)$$

mit:

$R_{B,k0}$ charakteristischer Wert der Kurzzeitfestigkeit des Geokunststoffes (5%-Quantil),

$R_{B,k}$ charakteristischer Wert der Langzeitfestigkeit des Geokunststoffes,

A_1 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Kriechdehnung bzw. des Zeitstandsverhaltens,

A_2 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung einer möglichen Beschädigung bei Einbau, Transport oder Verdichtung,

A_3 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Verarbeitung,

A_4 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen,

A_5 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von dynamischen Einwirkungen.

Das Kraft-Dehnungsverhalten oder auch Verformungsverhalten wird bei Geokunststoffen durch einen Streifenzugversuch ermittelt. Jedoch zeigten im Boden eingesetzte Geokunststoffe andere Verformungsverhalten als im Streifenzugversuch. Durch den Verbund aus Boden und Geokunststoff werden besonders Produkte mit hoher Dehnung im Streifenzugversuch im Boden deutlich steifer und zeigen wesentlich geringere Deformationen. Rügger (2003)

Bei mit Geokunststoffen bewehrte Tragkonstruktionen tritt das Versagen durch teilweises oder völliges Abgleiten des mit Geokunststoffen bewehrten Geländesprunges auf. Dieser Prozess wird als Geländebruch bezeichnet. Ursache für einen Geländebruch ist das Überschreiten des Widerstandes gegen Zugbeanspruchung der Bewehrung oder das Überschreiten des Scherwiderstandes des Bodens als auch des Scherwiderstand zwischen Bewehrungslage und Boden. Abhängig von der Versagensursache verläuft die Scherfuge durch die Hinterfüllung, den Untergrund oder die Bewehrungskonstruktion. Der abgleitende Bereich wird hierbei als aktiver Bereich bezeichnet und der Verformung widerstehende Teil als Passiver Bereich. EBGEO (2011)

2.3 Mit Geogittern stabilisierte Tragkonstruktionen

Durch das Einlegen von horizontalen Geogitterlagen als Bewehrungselement verändern sich durch komplexe Verbundwirkungen die Eigenschaften des Bodens. Es entsteht ein anisotroper Verbundbaustoff, bei dem sich das Spannungs-Dehnungsverhalten nicht über die Addition der einzelnen Komponenten definiert. Ruiken (2013)

2.3.1 Spannungs-Verformungsverhalten

Das Spannungs-Verformungsverhalten von Böden kann über Stoffgesetze ausgedrückt werden. Häufig wird für Böden ein linear-elastisches idealplastisches Verformungsverhalten angenommen, welches über den Reibungswinkel φ und die Kohäsion c ausgedrückt wird. Daraus resultiert, dass die Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb gilt.

Grundsätzlich wird bei Bodenbewehrung zwischen zwei Ansätzen unterschieden. Bei dem ersten Ansatz wird die Tragfähigkeitserhöhung des Bodens durch das Ansetzen einer zusätzlichen Kohäsion und bei dem zweiten Ansatz durch das Ansetzen eines zusätzlichen Stützdruckes erklärt. Zurückzuführen sind die beiden Ansätze auf Vidal (1969), der den Effekt der Bewehrung mit einer zusätzlichen Kohäsion vergleicht und eine Stützung des Bodens in Richtung der kleineren Hauptspannung feststellte.

Durch das Bewehren des Erdreichs wird die Bruchfestigkeit erhöht. Diese Erhöhung wird im Ansatz der zusätzlichen Kohäsion berücksichtigt. Anhand des in Abb dargestellten triaxialen Druckversuches nach Schlosser & Long (1972) ist eine Parallelverschiebung der Schergeraden zwischen bewehrtem und unbewehrtem Boden zu erkennen. Die daraus resultierende Tragfähigkeitserhöhung wird als zusätzliche Kohäsion c_R erfasst.

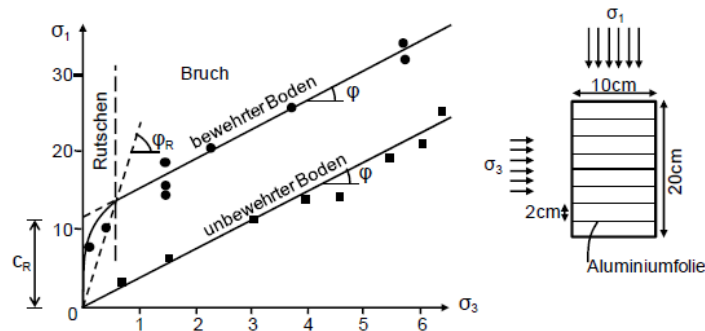


Abb. 2.5: Bruchbedingung von bewehrtem Boden nach Schlosser & Long (1972), modifiziert nach Schlosser & Delage (1987).

Die Annahme einer zusätzlichen Kohäsion gilt nach Yang & Singh (1974) nur oberhalb eines kritischen Drucks c_{crit} . Unterhalb dieses Stützdrucks kann durch mangelnde Aktivierung der Bewehrung die axiale Belastung nicht aufgenommen werden und die zusätzliche Kohäsion ist nicht vollumfänglich vorhanden. Daher wurde der Ansatz einer zusätzlichen Kohäsion von Hausmann & Lee (1976) wie in Abb zu erkennen ergänzt. Bei dem bilinearen System wird unterhalb des kritischen Drucks c_{crit} für das Rutschen zwischen Bewehrung und Boden ein erhöhter Reibungswinkel φ angesetzt. Für den Bereich oberhalb von c_{crit} gilt weiterhin der Ansatz einer zusätzlichen Kohäsion.

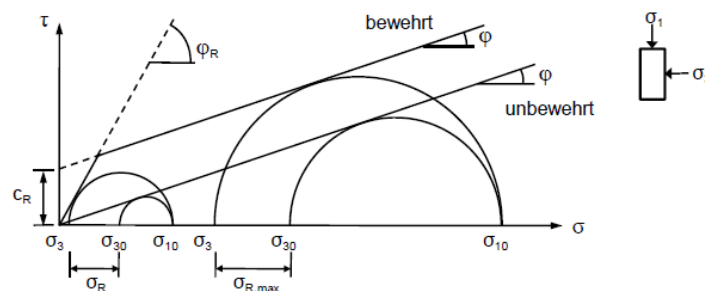


Abb. 2.6: Bruchkriterium für unbewehrten und bewehrten Boden nach Hausmann & Lee (1976).

Beim Betrachten des zweiten Ansatzes der zusätzlichen Stützwirkung ist in Abb. 2.7 zu erkennen, dass durch das Einsetzen einer Bewehrung die kleinere Hauptspannung erhöht wird. Durch diese Erhöhung der kleineren Hauptspannung um den Betrag $\Delta\sigma_3$ ergibt sich eine zusätzliche Stützwirkung. Die zusätzliche Stützwirkung ist für die Zunahme der Tragfähigkeit des Systems um den Betrag $\Delta\sigma_1$ verantwortlich.

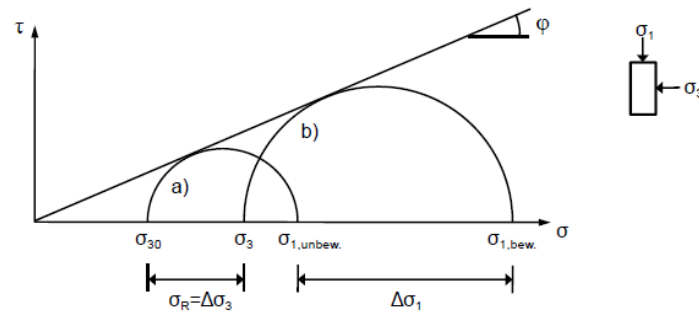


Abb. 2.7: Spannungsänderungen einer bewehrten Bodenprobe im triaxialen Druckversuch nach Hausmann & Lee (1976).

Weitergehend hat Ochiai et al. (1996) den Einfluss der Vorspannung bei seinen Versuchen, bei denen eine geneigte Scherfuge durch ein gespanntes Geogitter verläuft, untersucht. Die in Abb a zu sehenden Ergebnisse zeigen, dass es durch die durch Zugkraft erhöhte Normalspannung zu einer Parallelverschiebung und damit zu einer Zunahme des Scherwiderstandes kommt. Dieser Effekt wird als „Tensile“-Effekt bezeichnet. Dabei entsteht der zusätzliche Scherwiderstand durch den scherfugenparallelen Anteil der Zugkraft und einer größeren Reibung und kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\Delta \tau = \frac{1}{A} (T \cdot \cos \vartheta + T \cdot \sin \vartheta \cdot \tan \varphi) = c_T \quad (2.4)$$

Der zugkraftunabhängige Scherwiderstand ist hingegen wie folgt definiert:

$$\Delta \tau = \beta \cdot \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (2.5)$$

In Abb.2.8b ist der Einfluss der Gitteröffnungen auf den Scherwiderstand abgebildet. Die Neigung der Schergeraden verhält sich unter zunehmender Normalspannung proportional zu der Größe der Geogitteröffnungen und wird „Confining“-Effekt genannt. Geogitter A besitzt die kleinsten Öffnungen und damit bei zunehmender Normalspannung den größten Scherwiderstand. Geogitter B mit den größten Geogitteröffnungen besitzt den geringsten Scherwiderstand bei zunehmender Normalspannung.

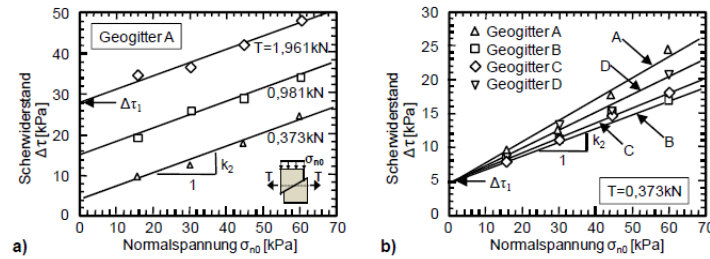


Abb. 2.8: spannungsabhängige zusätzliche Scherfestigkeit $\Delta\tau$ bewehrter Probekörper für
a) verschiedene Zugkräfte T in der Bewehrung und
b) geometrisch unterschiedliche Geogitter bei gleicher Zugkraft
nach Ochiai et al. (1996).

Die Scherfestigkeit des bewehrten Bodens ergibt sich somit aus der Addition der Anteile des unbewehrten Bodens, der Scherfugenparallelität und des zusätzlichen Scherwiderstands resultierend aus der Geogitterbewehrung.

$$\tau = (1 + \beta) \cdot \sigma_n \cdot \tan \varphi + c + c_T \quad (2.6)$$

2.3.2 Kraftübertragung

Durch das Verwenden einer Bewehrung wird das Ziel verfolgt, Kräfte aus dem Boden in die Bewehrung zu leiten. Dieses Ziel wird ja nach Bewehrung durch unterschiedliche Wirkungsweisen erfüllt. In Abb.2.9 sind die verschiedenen Kraftübertragungsmechanismen dargestellt.

Art der Bewehrung		Mechanismus	
		Reibung	Erddruck
Glatter Metallstreifen			
Gerippter Metallstreifen			
Geotextil			
Geogitter			

Abb. 2.9: übliche Bewehrungsprodukte und die Mechanismen der Krafteinleitung nach Palmeira (1987), modifiziert.

Wird der Boden mit glatten Metallstreifen bewehrt, findet die Kraftübertragung ausschließlich über Oberflächenreibung der Zugglieder statt. Wird der Metallstreifen darüber hinaus mit Rippen ergänzt, erfolgt zusätzlich zur Kraftübertragung über Oberflächenreibung auch eine Kraftübertragung durch Erddruck. Während sich Boden und Bewehrung relativ zueinander verschieben, bildet sich durch das „Verzahnen“ der Rippen im Boden ein zusätzlicher Erddruck aus. Es werden mehr Kräfte übertragen.

Bei der Bewehrung mit Geogittern ist der Effekt der Kraftübertragung durch Erddruck maßgebend. Das liegt an dem gitterförmigen Aufbau. Hierbei findet das „Verzahnen“ nicht über die Rippen, sondern über die Querszugglieder statt. Voraussetzung hierfür ist, dass die Körnung des Bodens und die Größe der Geogitteröffnungen aufeinander abgestimmt sind. Für eine Kraftübertragung muss die Bodenkörnung in die Öffnungen des Geogitters passen.

Weitergehend unterscheidet Müller (2011) Geogitter mit stabilen Knoten und steifen Zuggliedern und Geogitter mit verformbaren Filamenten. Die erstgenannten formstabilen Geogitter leiten den Erddruck von den Querszuggliedern über die Knoten in die Längszugglieder. Die Kräfte werden besser verteilt und es können, wie in Abb.2.10 dargestellt, größere Druckkräfte aufgenommen werden. Matys & Baslik (2004) verweisen auf die erhöhten Druckkräfte durch Gewölbebildung der Bodenpartikel über den Zuggliedern.

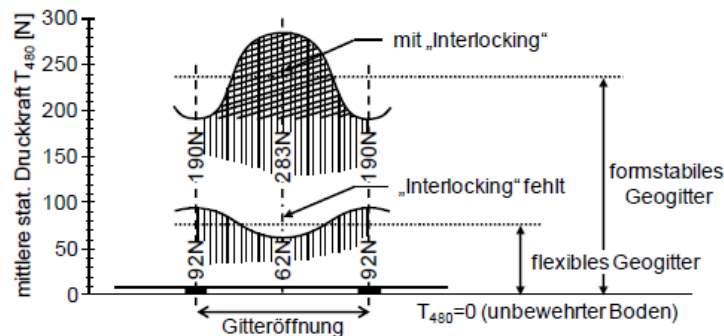


Abb. 2.10: Einfluss der Formstabilität von Geogittern auf die Ergebnisse von „Push-Tests“ nach Matys & Baslik (2004).

Die Relativverschiebung findet abhängig von der Dehnsteifigkeit des Geogitters, der Normalspannung, dem Verhältnis von Bodenkörnung und Größe der Geogitteröffnungen und der Querschnittsform in einem bestimmten Bereich statt.

Als dritten Effekt betrachten Jewell et al. (1984) die Reibung zwischen den Kontaktflächen von unbewehrtem und bewehrtem Boden. Dadurch, dass sich der bewehrte und der unbewehrte Boden anders verformen, kommt es zum Gleiten des unbewehrten Bodens. Der Anteil der Reibung entspricht hierbei dem Verhältnis von Zergliedern und Geogitteröffnungen. Der entstehende Widerstand gegen das Gleiten wird als Interlocking bezeichnet und meint das Verzahnen von Bodenpartikeln. Als Interlocking bezeichneten Luo et al. (2000) und Jenner (2009) auch das Verzahnen von Bodenkörnung in den Geogitteröffnungen. Durch diesen Effekt wird das Verformen verhindert und das System stabilisiert. Durch Bodenverdichtung kann das Interlocking weiter verstärkt werden, da durch die aufgebrachte Energie der Boden in den Geogitteröffnungen verdichtet wird und damit das Geogitter unter Spannung setzt Abb. 2.11.

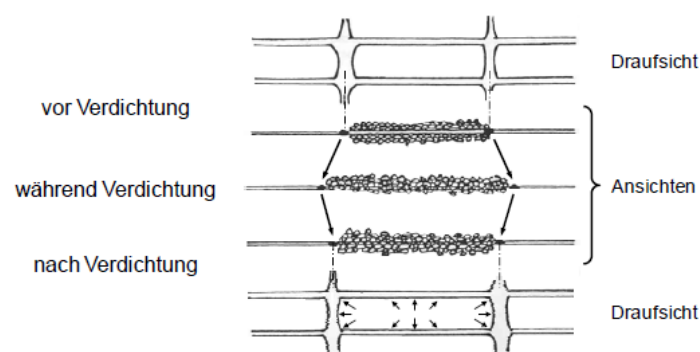


Abb. 2.11: Vorstellung zur Entstehung von Partikel „Interlocking“ während der Bodenverdichtung nach Yogarajah (1993).

2.3.3 Erddruck

Den Einfluss auf den Erddruck mit Geogittern stabilisierten Tragkonstruktionen hat Ruiken (2013) anhand eines Laborversuches untersucht. Hierzu wurde ein Probekörper mit einer Querschnittsfläche von 1 m x 1 m hergestellt und über steife Stirnseiten, die unabhängig voneinander bewegt werden können, gelagert. Belastet wurde das System von oben über ein Druckluftkissen mit einer Last von 50kN/m^2 . Zudem wurden an der vorderen Stirnplatte 20 Facingelemente mit einer Größe von 5 cm angebracht und an der hinteren Stirnplatte ein horizontal verschiebbares Widerlager. Durch das Widerlager konnte die Erddruckkraft und über die Facingelemente die Erddruckverteilung bestimmt werden. Zusätzlich konnten über die Facingelemente, sofern die Geogitter an die Facingelemente als Rückverankerung angeschlossen waren, die Anschlusskräfte bestimmt werden. Darüber hinaus wurden in dem Versuch die Wandverschiebung und die Geogitterdehnung gemessen. Zum Einsatz kamen in dem Versuch zwei verschiedene Geogitter mit unterschiedlicher Dehnsteifigkeit von $J_{0-2\%} = 700\text{ kN/m}$ und 1155 kN/m . In Abb. 2.12 erkennt man die Bewehrungsanordnung und die Zusammenstellung der untersuchten Probekörper.

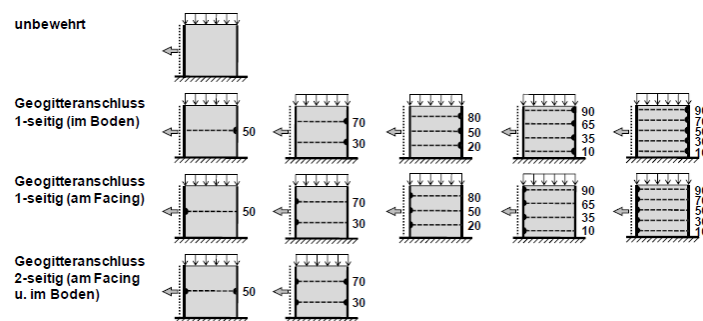


Abb. 2.12: Zusammenstellung der untersuchten Probekörper und Bewehrungsanordnungen (Lage der Geogitter als Höhe in cm). Ruiken (2013)

Ruiken (2013) kam zu dem Ergebnis, dass bei zunehmender Wandverschiebung der Erddruck bis auf den aktiven Erddruck abnimmt. Erst ab einer gewissen Verschiebung steigt der Erddruck durch eine dichte Bodenlagerung wieder an. Durch das Bewehren des Bodens mit Geogittern konnte der Erddruck ebenfalls deutlich reduziert werden. Dieser Effekt kann bereits bei kleinsten Verformungen beobachtet werden und wird durch das Erhöhen der Anzahl von Geogitterlagen weiter verstärkt.

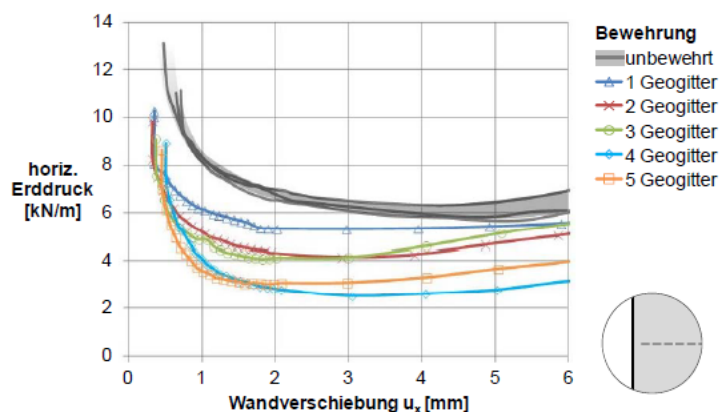


Abb. 2.13: Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckentwicklung (Geogitter GL-700, nicht am Facing angeschlossen). Ruiken (2013)

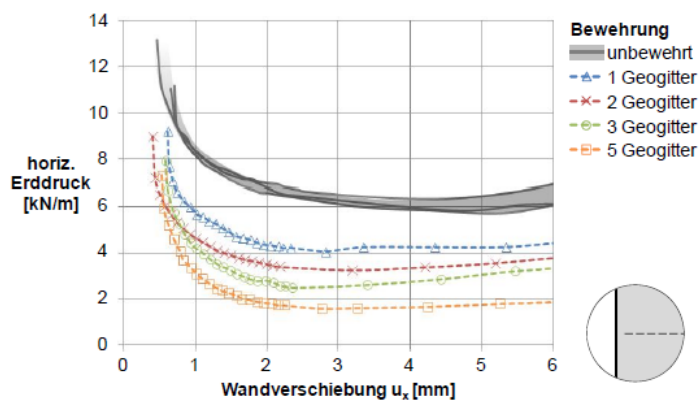


Abb. 2.14: Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckentwicklung (Geogitter GL-1155, nicht am Facing angeschlossen). Ruiken (2013)

Durch die Erhöhung der Dehnsteifigkeit der Bewehrung konnte der Erddruck bei nicht mit dem Facing rückverankerten Geogittern reduziert werden. Bei rückverankerten Geogittern hingegen konnte dieser Effekt durch Verformungsreduzierung nicht beobachtet werden.

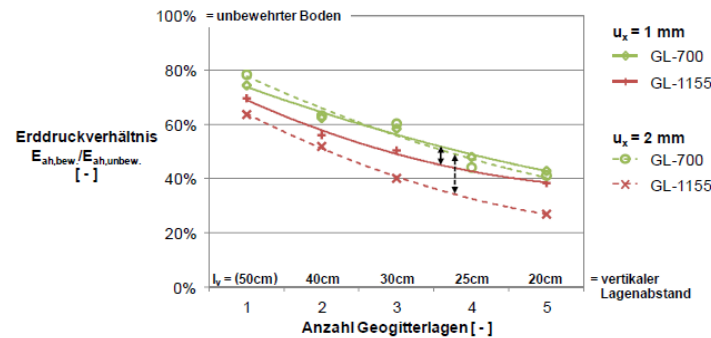


Abb. 2.15: Zusammenhang zwischen Erddruck und Bewehrungsgrad.

In Abb. ref3.2.15 ist am Erddruckverlauf zu erkennen, dass der Erddruck bereits ab der ersten Bewehrungslage vom Geogitter aufgenommen wird. Hierbei ist beim Erddruckverlauf qualitativ kein Unterschied zwischen einfach eingelegten und rückverankerten Geogittern zu erkennen.

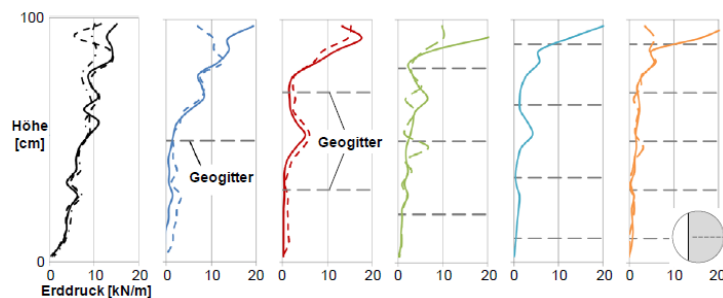


Abb. 2.16: Erddruckverteilung auf das Facing bei unbewehrtem und verschiedenfach geogitterbewehrtem Boden nach $u_x = 2$ mm Wandverschiebung. Ruiken (2013)

Durch dehnstefere Bewehrung wurden eine Zunahme der Zugkräfte im Geogitter und eine reduzierte Wandverschiebung gemessen. Entscheidend für die Wandverschiebung ist die Aufbringung der Last. Hier wird zwischen zwei Fällen unterschieden. In Abb a wurde erst die Last aufgebracht und danach eine Wandverschiebung zugelassen und in Abb b wurde erst eine Wandverschiebung zugelassen und danach die Last aufgebracht. Hier kommt Ruiken (2013) zu dem Ergebnis, dass durch die größere Normalspannung im Boden vor dem Zulassen der Verschiebung, resultierend aus der Auflast, der Kraftschluss verbessert wird und somit die Wandverschiebung abnimmt.

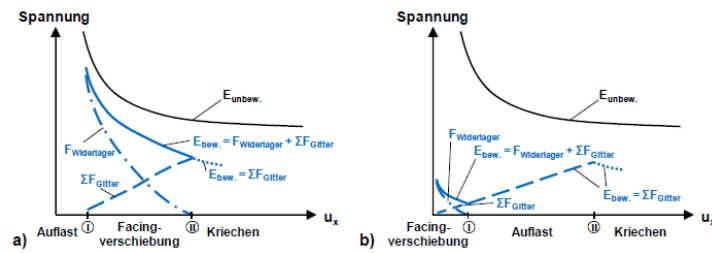


Abb. 2.17: Qualitative Darstellung der verformungsabhängigen Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Arten der Versuchsdurchführung. Ruiken (2013)

Aufgrund des Bodenaufbaus durch Einrieseln und die daraus resultierende fehlende Verdichtung konnte bei längerer Belastung eine zunehmende Wandverschiebung bei gleichzeitigem Reduzieren des Erddrucks festgestellt werden.

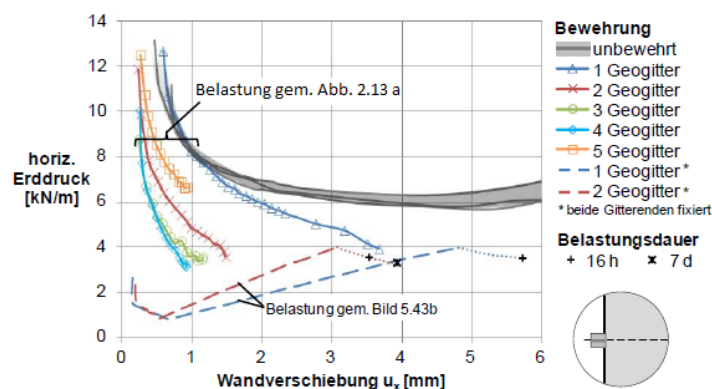


Abb. 2.18: Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckentwicklung (Gitter GL-700, Verschiebung des Facings mit angeschlossenen Geogittern). Ruiken (2013)

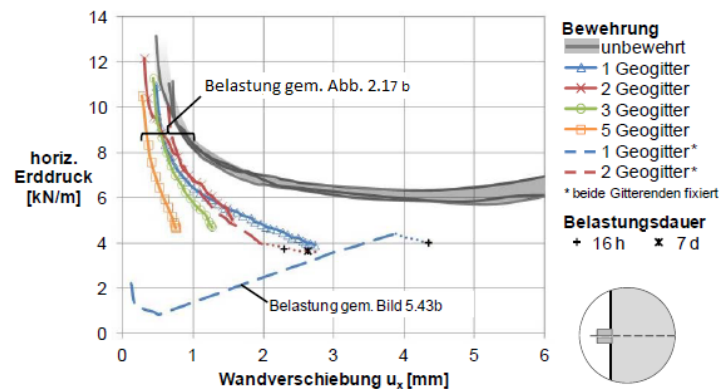


Abb. 2.19: Einfluss des Bewehrungsgrads auf die verformungsabhängige Erddruckentwicklung (Gitter GL-1155, Verschiebung des Facings mit angeschlossenen Geogittern). Ruiken (2013)

Die Aufnahmen der Partikelverschiebung Abb.2.20 zeigen, dass bei Verwendung mehrerer Geogitterlagen das System gestärkt und die Verformung reduziert wird. Die Gleitfläche wandert nach vorne und es entstehen mehrere Scherfugen.

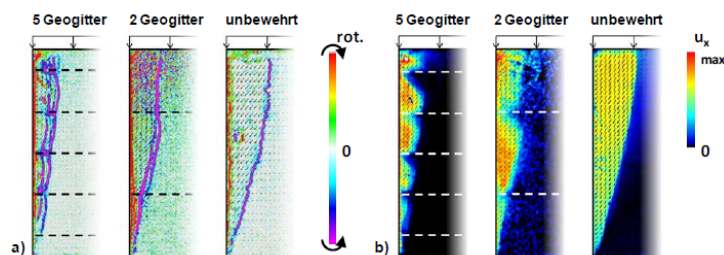


Abb. 2.20: Partikelrotationen (a) und horizontale Partikelverschiebungen (b) in unbewehrten, 2- und 5-fach geogitterbewehrten Probekörpern nach $u_x = 10$ mm Wandverschiebung. Ruiken (2013)

2.4 Erddruckumlagerung

EAU

Bei der EAU (2012) werden zur Erddruckumlagerung sechs Fälle unterschieden. Die ersten drei Fälle werden nach dem Verfahren Abgrabung an der Wand ausgewählt und die Fälle vier bis sechs nach dem Verfahren hinterfüllte Wand. Für die Berechnung werden drei Bereiche des Ankerkopfabstandes a differenziert:

- $0 \leq a \leq 0,1 \cdot H_E$
- $0,1 \cdot H_E \leq a \leq 0,2 \cdot H_E$
- $0,2 \cdot H_E \leq a \leq 0,3 \cdot H_E$

Die Größe des Mittelwertes der Erddruckverteilung e_m ist über folgende Formel definiert:

$$e_m = e_{ahm,k} = \frac{E_{ah,k}}{H_E} \quad (2.7)$$

Für Ankerköpfe die außerhalb des Bereiches $a \leq 0,30 \cdot H_E$ liegen, gelten die in Abb.2.23 und Abb.2.21 dargestellten Lastfiguren nicht. Für diese Fälle ist der Erddruck im Einzelfall zu ermitteln. Das Verfahren abgegrabene Wand darf nur angewendet werden, wenn der Erddruck durch ausreichende Wandverformung auf steifere Auflagerbereiche umlagern kann. Hierdurch entsteht ein vertikales Erddruckgewölbe zwischen Ankerpunkt und Bodenaufleger. Zusätzlich darf das Verfahren abgegrabene Wand nicht verwendet werden, wenn vor der Spundwand nicht ausreichend tief gebaggert werden kann oder die Stützwand die geforderte Wanddurchbiegung nicht aufweist und dadurch keine ausreichende zusätzliche Durchbiegung entsteht, die für die Gewölbebildung erforderlich ist. Für diese Fälle ist das Verfahren der hinterfüllten Wand zu wählen. EAU (2012)

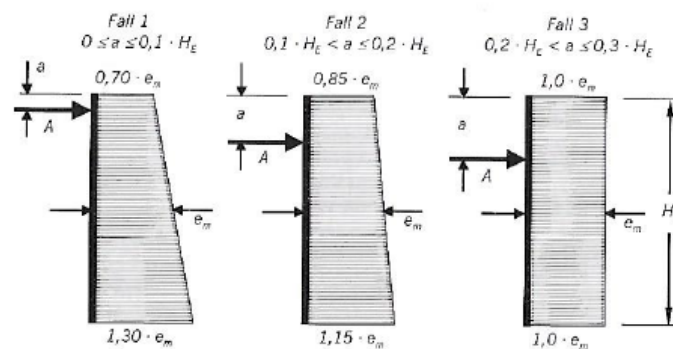


Abb. 2.21: Erddruckumlagerung für das Herstellverfahren Abgegrabene Wand, EAU (2012)

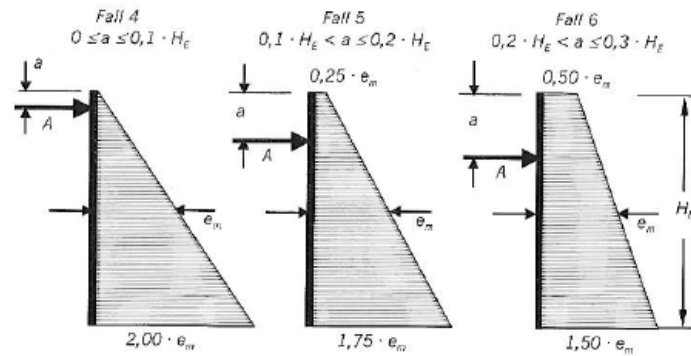


Abb. 2.22: Erddruckumlagerung für das Herstellverfahren Hinterfüllte Wand, EAU (2012)

EAB

Die EAB (2013) geht von einer Erddruckumlagerung von Geländeoberfläche bis Baugrubensohle aus. Dabei bleibt der klassische Erddruckverlauf von Baugrubensohle bis zum Wandfuß unverändert. Bei einmal gestützten Spundwänden wird zwischen drei Lastfiguren unterschieden. Für das Anwenden der Lastfigur ist das Verhältnis der Höhe, von Geländeoberfläche bis Baugrubensohle, zur Ankerlage entscheidend. Die Lastfiguren nach EAB (2013) sind in Abb. 2.23 dargestellt.

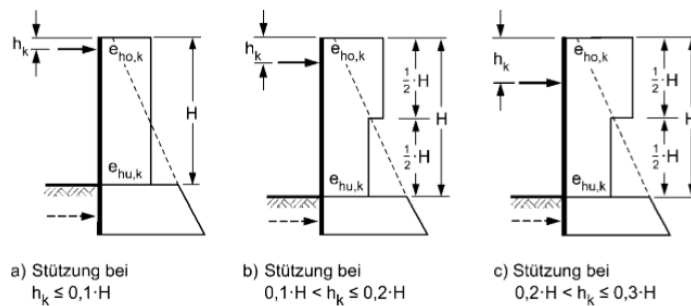


Abb. 2.23: Lastfiguren für einmal gestützte Spundwände und Ortbetonwände, EAB (2013)

3 Methode

3.1 Hintergrund

Der Windpark Krammer besteht aus 34 Windenergieanlagen. Die Windenergieanlagen sind an einer Uferböschung mit einer zum Ufer hin offenen Spundwandkonstruktion errichtet worden. Hierbei sind die Spundwände AZ 13-700 und AZ 18-700 mit abwechselnder Einbindetiefe verbaut worden. Zur Erstellung der Fundamente wurde die Spundwand mit drei Geogittern an unterschiedlichen Höhen rückverankert und mit Sand hinterfüllt. Die zur Rückverankerung genutzten Geogitter F200T besitzen eine Zugfestigkeit von 200 kN/m und wurden gestaffelt und mit einer Neigung von 4% verlegt. Dabei wurden die Geogitter wie in zu sehen mit einer Umlenkrolle und durch U-förmige Bauteile an der Spundwand rückverankert. Die Tragfähigkeitsbemessung ergab für das System eine ausreichende Tragfähigkeit. Zur Verifizierung der Bemessungsberechnung wurde ein Monitoring eingerichtet. Dabei wurde das Gewicht mittels einer Totlast simuliert und gleichzeitig wurden über das Monitoring die auftretenden Kräfte, die Verformung, die Dehnung und die Setzung der Konstruktion erfasst. Darüber hinaus wurde die Konstruktion des Windparks Krammer zur Validierung der Ergebnisse in Plaxis-2D modelliert. Spingher erkannte, dass der Verbund aus Geogitter und Boden durch Auflast gestärkt wird und ein Lastabtrag größtenteils im spundwandnahen Bereich stattfindet. Zudem reduziert eine größere Dehnsteifigkeit, sowie eine Vorspannung der Geogitter die Setzung der Totlast. Spingher (2018)

3.2 Laborversuch

Zur weiteren Untersuchung des Tragverhaltens der mit Geogittern rückverankerten Spundwand, wurde ein Laborversuch nach Abb.3.1 erstellt. Der Plexiglas-Container hat die Abmessungen $H \times L \times W = 0,3 \times 0,4 \times 0,1 \text{ m}^3$ und wird jeweils über eine 0,1 m lange Platte in zwei verschiedenen Positionen belastet. Position eins befindet sich in einem Abstand von

0,03 m zur Spundwand und Position zwei in einem Abstand von 0,132 m. Am Fußpunkt der Spundwand befindet sich ein Silikonblock mit den Maßen $H \times L \times W = 0,05 \times 0,1 \times 0,1 \text{ m}^3$. Die Spundwand wird zum Versuchsbeginn über zwei Geogitter auf den Höhen $-0,05 \text{ m}$ und $-0,13 \text{ m}$ rückverankert. Die obere Geogitterlage hat eine Länge von 18 cm und die untere Geogitterlage eine Länge von 11 cm. Im weiteren Versuchsablauf wird die untere Geogitterlage entfernt und die Geogitterlänge der oberen Geogitterlage variiert. Untersucht wird die Verformung, die Spundwandverschiebung und die Belastung. Deltares [2020]

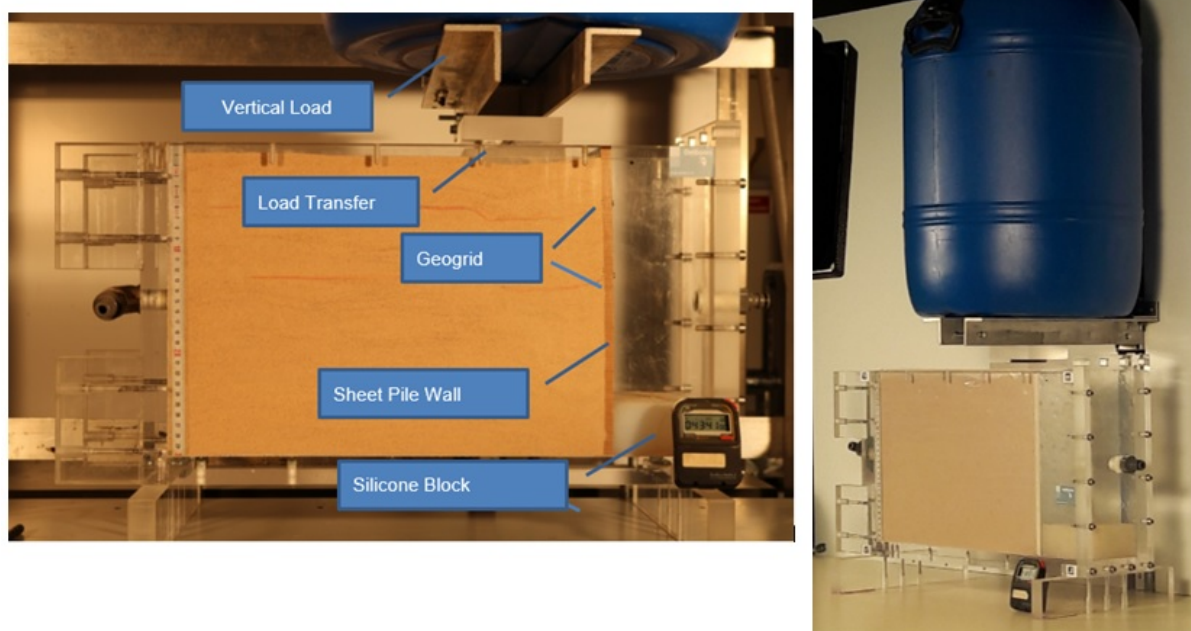


Abb. 3.1: Laborversuch, Deltares (2020)

3.3 Grundmodell

Auf Grundlage der Laborversuche wurde das in Abb.3.2 dargestellte Modell in PLAXIS2D übertragen. Durch numerische Berechnungsprogramme wie PLAXIS2D kann das Modell weiter variiert werden. Für den hinterfüllten Sand wird das Stoffgesetz nach Hardening Soil und für den Silikonblock ein linear elastisches Stoffgesetz angesetzt.

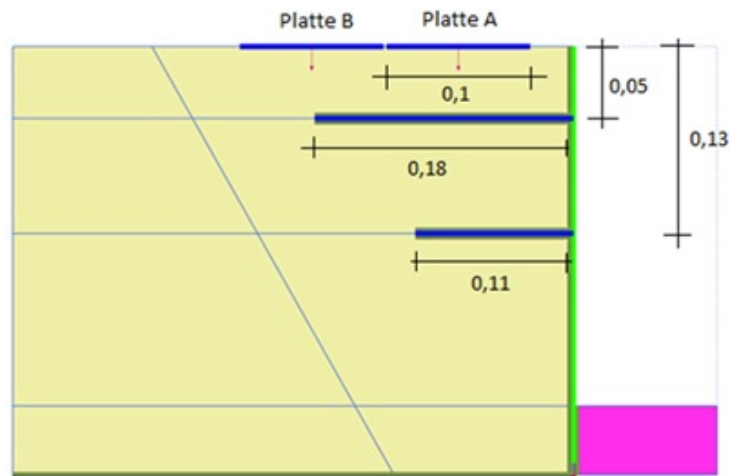


Abb. 3.2: Plaxis2D-Modell nach Laborversuch

Im Folgenden wird das numerische Modell weiter vereinfacht, um den Einfluss von Geogittern auf die Tragkonstruktion besser untersuchen zu können. Die untere Geogitterlage wird hierzu entfernt. Das entstandene und in Abb.3.3 dargestellte Modell bestehend aus einer Geogitterlage wird über zwei Platten belastet. Dieses Modell dient für alle weiteren Variationen als Grundlage.

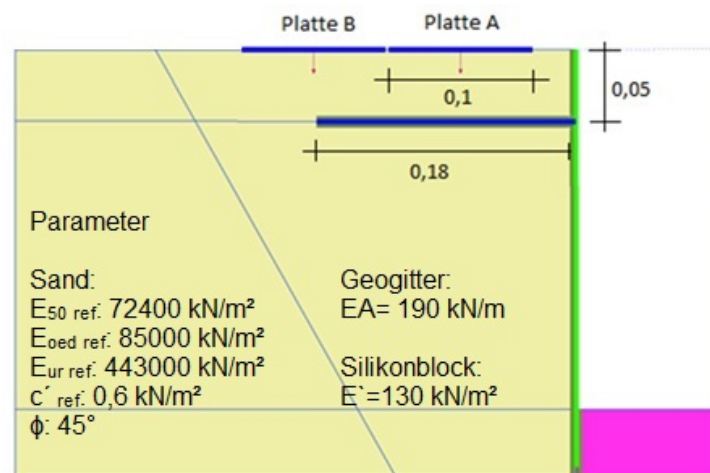


Abb. 3.3: Plaxis2D-Grundmodell

Modellvariante 1

Zu Beginn der numerischen Versuche wird dem Modell über Platte C eine weitere Lastposition hinzugefügt. Platte C hat genau wie Platte A und B eine Breite von 1 cm und liegt

in einem Abstand von 2 mm hinter Platte B. Alle drei Platten werden einzeln mit einer Verschiebung von 5 mm in Plattenmitte belastet. Zusätzlich zur Variation der Lastposition wird die Höhe der Geogitterlage verändert. Das im Grundmodell dargestellte Geogitter liegt auf einer Höhe von 5 cm unterhalb der Geländeoberfläche und wird hier auf 7 cm und 9 cm unterhalb der Geländeoberfläche gelegt und erneut über die Platten A bis C einzeln belastet. Die in Modellvariation 1 durchgeführten Veränderungen sollen Aufschluss über den Einfluss der Lastposition auf das System liefern. Weiter wird untersucht, welchen Effekt das Verschieben der Höhen der Geogitterlage hat.

Modellvariante 2

Modellvariante 2 schließt sich an Modellvariante 1 an und soll die Ergebnisse verifizieren und weiterführende Ergebnisse über den Einfluss der Lastposition liefern. Hierzu wird das System bis zum Versagen durch eine Teillast belastet. Aufgebracht wird die Teillast plattenmittig auf Platte A und B. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird genau wie in Modellvariante 1 die Höhe der Geogitterlage geändert. Gleichzeitig kann überprüft werden, ob sich durch die veränderte Belastungsart qualitative Unterschiede einstellen. Durch die maximal aufgebrachte Belastung können zusätzlich Aussagen über den Versagensmechanismus und die Stabilität getroffen werden.

Modellvariante 3

In den ersten beiden Fällen wurde immer eine Kombination aus veränderter Lastposition und veränderter Höhe der Geogitterlage untersucht. Deswegen wird in Modellvariante 3 eine Flächenlast über die gesamte Oberflächenlänge aufgebracht und ausschließlich die Höhe der Geogitterlage variiert. Die Flächenlast wird für jede Geogitterlage einzeln bis zum Versagen gesteigert. Die Ergebnisse werden hinsichtlich der maximal aufgebrachten Last und der hieraus resultierenden optimalen Geogitterlage untersucht.

Modellvariante 4

Zur Validierung der Laborergebnisse wird die Länge des Geogitters von 18 cm auf 11 cm und 6 cm reduziert. Angewendet wird die Reduzierung der Geogitterlänge bei der ursprünglichen Höhe der Geogitterlage von 5 cm unter der Bodenoberfläche. Der Verbund wird erneut über Platte A und B belastet. Die aufgebrachte Teillast wird bis zum Versagen gesteigert. Analysiert wird, inwieweit die Kürzung der Geogitterlänge Einfluss auf die Tragfähigkeit des Systems nimmt.

Modellvariante 5

Bei den Laborversuchen konnte bei einer Lasteinleitung über Platte A und einer Geogitterlänge von 18 cm beobachtet werden, dass ein Stück des Geogitters außerhalb des

Gleitkeils liegt und die Spundwand weiterhin rückverankert. Durch diese Rückverankerung kommt es zu einer Kopfpunktdrehung. Da bei den numerischen Modellen ausschließlich ein Kippen der Spundwand zu erkennen ist, wird in Modellvariante 5 die Steifigkeit des Silikonblocks am Fußpunkt verändert. Die Steifigkeit wird sowohl herabgesetzt als auch erhöht. Die Ergebnisse werden im Anschluss mit den Laborergebnissen verglichen.

Modellvariante 6

Die Ergebnisse der vorherigen Modellvariation deuten darauf hin, dass das Geogitter neben der Rückverankerung der Spundwand weiteren Einfluss auf den Boden und das System nimmt. Zur Überprüfung wird in Modellvariation 6 die Geogitterlage entfernt und durch eine Steife ersetzt. Die Steife wird hierbei wie in Abb.3.4 zu erkennen angesetzt und lässt die gleiche Verformung wie das Geogitter zu. Durch die Auswertung und den Vergleich zu den vorangegangenen Ergebnissen lassen sich Aussagen zu weiteren Effekten der Geogitterbewehrung treffen.

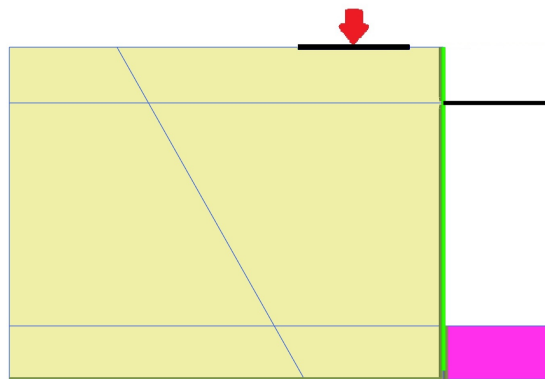


Abb. 3.4: Steife

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden hinsichtlich der maximalen Spundwandverschiebung, des Biegemoments auf die Spundwand, der Kräfte im Geogitter, der Spundwandverschiebung auf Höhe des Geogitters, dem Erddruckverlauf und des resultierenden Erddrucks zusammengefasst.

4.1 Auswirkung der Lastposition und der Geogitterlage

Für Modellvariante 1 stellt sich beim Vergleich der maximalen Spundwandverschiebung der drei verschiedenen Lastpositionen Platte A, Platte B und Platte C die größte Verschiebung für Lastposition Platte C ein und die geringste Spundwandverschiebung für die Lasteinleitung über Platte B ein. Dies gilt unabhängig von der Höhe der Geogitterlage. Während es bei Platte A zu einer Parallelverschiebung der Spundwand kommt, kann bei zunehmender Entfernung der Lasteinleitung zur Spundwand (Platte B und Platte C) ein immer stärkeres Kippen der Spundwand um den Fußpunkt beobachtet werden. Werden die Ergebnisse nach Höhe der Geogitterlage differenziert, ist deutlich zu erkennen, dass die niedrigste Spundwandverschiebung unabhängig von der Lastposition bei einer Höhe der Geogitterlage von 5 cm unter der Bodenoberfläche stattfindet. Bei einer Höhe von 7 cm unter der Oberfläche tritt bei allen drei Lastposition der Höchstwert auf, während sich die maximale Spundwandverschiebung bei 9 cm unter Bodenoberfläche wieder reduziert.

Tab. 4.1: Maximale Spundwandverschiebung für Modellvariante 1 [mm]

Geogitterlage h [m]	Platte A	Platte B	Platte C
-0,05	6,178	5,372	6,533
-0,07	6,561	5,496	7,090
-0,09	6,222	5,413	7,085

Die Aussagen über die maximale Spundwandverschiebung lassen sich auf die Spundwandverschiebung am Geogitteranschluss übertragen.

Tab. 4.2: Spundwandverschiebung am Geogitteranschluss für Modellvariante 1 [mm]

Geogitterlage h [m]	Platte A	Platte B	Platte C
-0,05	6,110	4,741	6,533
-0,07	6,512	5,245	6,584
-0,09	6,146	5,385	6,432

Bei dem maximal auftretenden Biegemoment auf die Spundwand muss wieder nach Lastposition und Höhe der Geogitterlage unterschieden werden. Allgemein nimmt das Biegemoment bei zunehmender Entfernung der Lastposition ab. Dieser Effekt wird besonders deutlich von Lastposition Platte B auf Lastposition Platte C. Zudem nimmt für die Lastposition Platte A und Platte B das Biegemoment mit zunehmender Tiefe der Geogitterbewehrung ebenfalls ab. Bei Platte C bleibt das Biegemoment bei unterschiedlicher Bewehrungshöhe weitestgehend gleichbleibend.

Tab. 4.3: Maximales Biegemoment an der Spundwand für Modellvariante 1 [Nm]

Geogitterlage h [m]	Platte A	Platte B	Platte C
-0,05	20,95	19,59	11,56
-0,07	20,76	16,71	11,93
-0,09	18,60	15,22	11,70

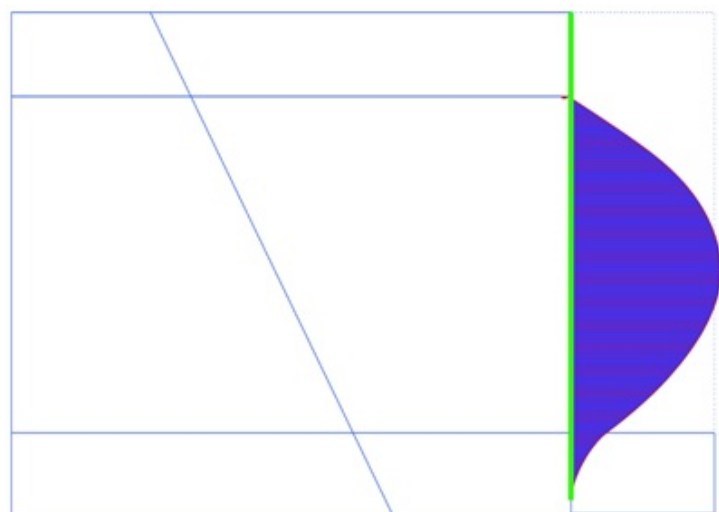


Abb. 4.1: Biegemoment der Spundwand für Platte A Geogitterlage -0,05m

In Abb.4.2-Abb.4.4 sind die Verläufe der Kräfte im Geogitter für die einzelnen Lastpositionen aufgeteilt nach der Bewehrungshöhe dargestellt. Hierbei fällt auf, dass sich die Verläufe für die einzelnen Lastpositionen voneinander unterscheiden. Während sich beim Einleiten der Kraft über Patte A die Kräfte im Geogitter über die gesamte Länge verteilen, kommt es beim Einleiten über Platte B zu einem lokalen Hochpunkt der Kräfte bei einer Geogitterlänge von ca. 13 cm. Des Weiteren hat die Höhe der Bewehrungslage bei Platte A den größten Einfluss auf die Kräfte im Geogitter. Mit zunehmender Bewehrungstiefe ist hier eine Zunahme der Kräfte im Geogitter zu verzeichnen. Für Platte B verhalten sich die Kräfte genau entgegengesetzt. Beim Einleiten der Kraft über Platte C sind die Kräfte im Geogitter deutlich reduziert. Werden weitergehend die in Tab abgebildeten Kräfte im Geogitter am Spundwandanschluss miteinander verglichen, fällt auf, dass diese bei Platte A am größten sind.

Tab. 4.4: Kraft am Geogitteranschluss für Modellvariante 1 [kN/m]

Geogitterlage h [m]	Platte A	Platte B	Platte C
-0,05	0,405	0,207	0,068
-0,07	0,491	0,177	0,073
-0,09	0,493	0,183	0,090

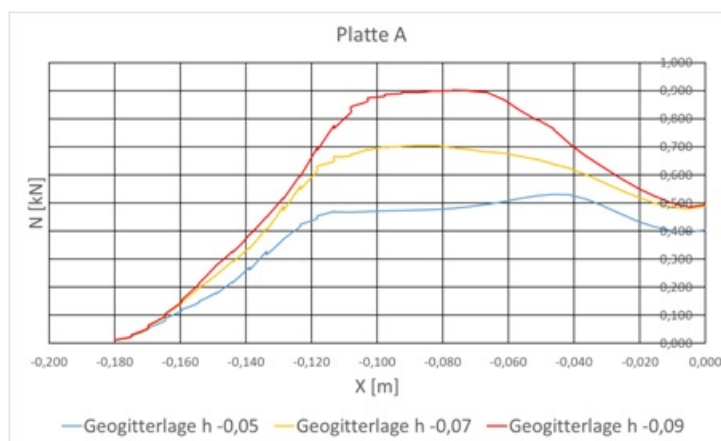


Abb. 4.2: Kräfte im Geogitter für Platte A für Modellvariante 1

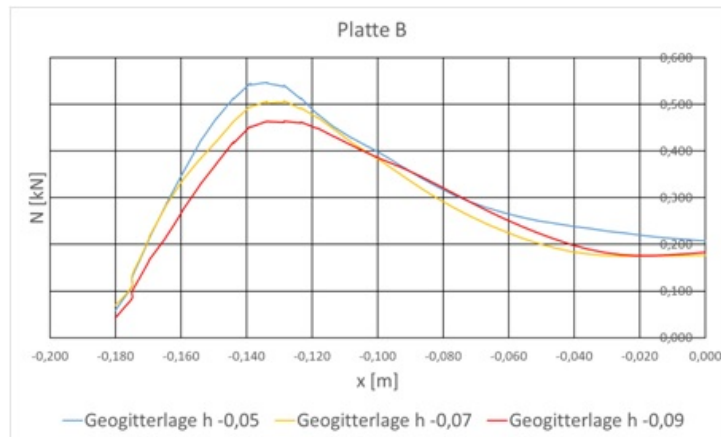


Abb. 4.3: Kräfte im Geogitter für Platte B für Modellvariante 1

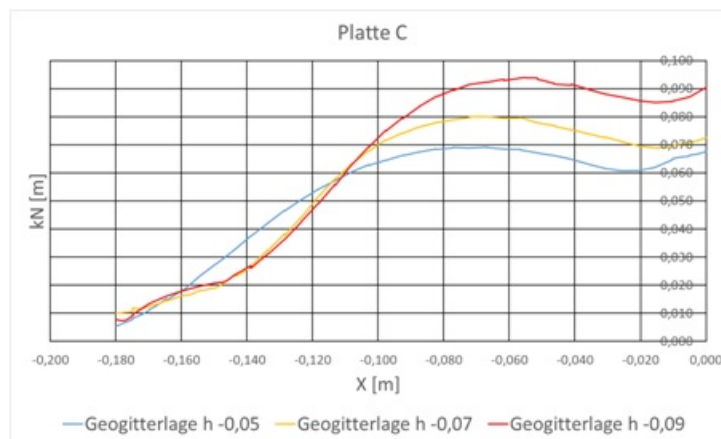


Abb. 4.4: Kräfte im Geogitter für Platte C für Modellvariante 1

Allgemein lässt sich zu den Erddruckverläufen sagen, dass oberhalb des Geogitters und in einem kleinen Bereich direkt unterhalb des Geogitters kaum Erddruck auftritt. Auf Höhe der einzelnen Geogitterlagen ist ein Ausschlag des Erddrucks zu beobachten. Für die einzelnen Lastpositionen stellen sich verschiedene Erddruckverläufe ein. Während bei Platte A der resultierende Erddruck bei hoher Geogitterlage am geringsten ist, ist bei Platte B der resultierende Erddruck bei tiefer Geogitterlage am geringsten. Für Platte C nimmt der Erddruck mit zunehmender Geogittertiefe zu, wobei der Erddruck hier am wenigsten ausgeprägt ist.

Tab. 4.5: Resultierender Erddruck an der Spundwand für Modellvariante 1 [kN/m²]

Geogitterlage h [m]	Platte A	Platte B	Platte C
-0,05	0,854	0,591	0,552
-0,07	0,986	0,557	0,577
-0,09	0,840	0,577	0,618

Die Scherfugenverläufe von Platte A für die oberen beiden Geogitterpositionen verlaufen gleich. Es bilden sich zwei Scherfugen vom Plattenanfang und Plattenende aus. Die erste Scherfuge verläuft vom Plattenanfang schräg zur Spundwand und die hintere Scherfuge vertikal zum Geogitter. Zusätzlich entsteht eine V-förmige Scherfuge, dessen spitzes Ende vom Geogitterende zur Geländeoberfläche verläuft. Unterhalb vom Geogitter verläuft eine Scherfuge zum Fußpunkt der Spundwand. Bei der Geogitterhöhe von 7 cm unterhalb der Erdoberfläche findet ein Zusammenschluss zwischen dieser Scherfuge und der V-förmigen Scherfuge statt. Für die Geogitterhöhe – 9 cm bildet sich vom hinteren Punkt der Platte eine Scherfuge aus, die das Geogitter schneidend zum Fußpunkt der Spundwand verläuft. Wird die Last auf Platte B aufgebracht, bildet sich ebenfalls eine Scherfuge vom Plattenende zum Fuß der Spundwand aus. Durch die veränderte Lastposition schneidet diese jedoch, für die oberen Geogitterlagen, nicht das Geogitter. Für die unterste Geogitterlage berührt die Scherfuge das Ende vom Geogitter. Außerdem entsteht ein dreieckiger Scherfugenverlauf vom Plattenanfang und genau wie bei Platte A eine V-förmige Scherfuge. Abschließend deuten die Scherspannung bei Platte C auf ein Tiefes-Gleitfugen Szenario hin. Die Scherfuge verläuft vollständig hinter dem Geogitter.

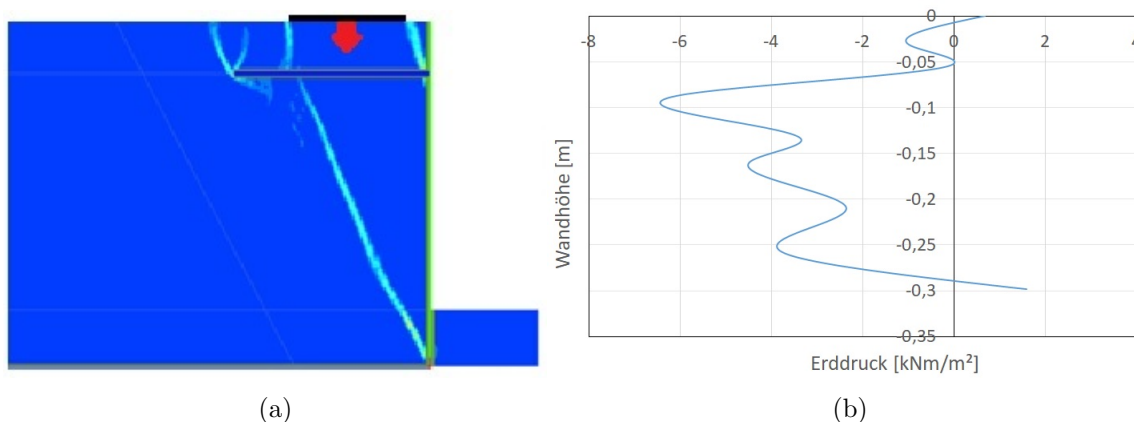


Abb. 4.5: Modellvariante 1 Platte A Geogitterlage -0,05 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

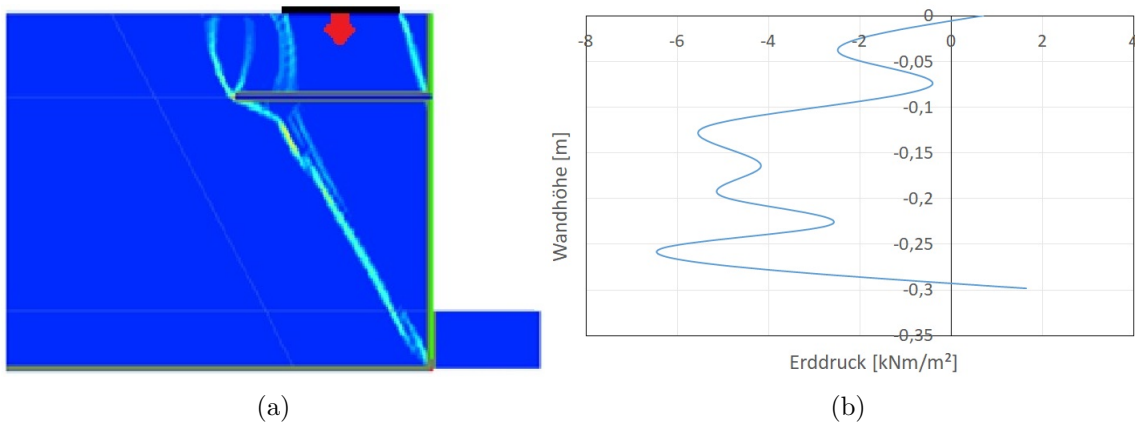


Abb. 4.6: Modellvariante 1 Platte A Geogitterlage -0,07 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

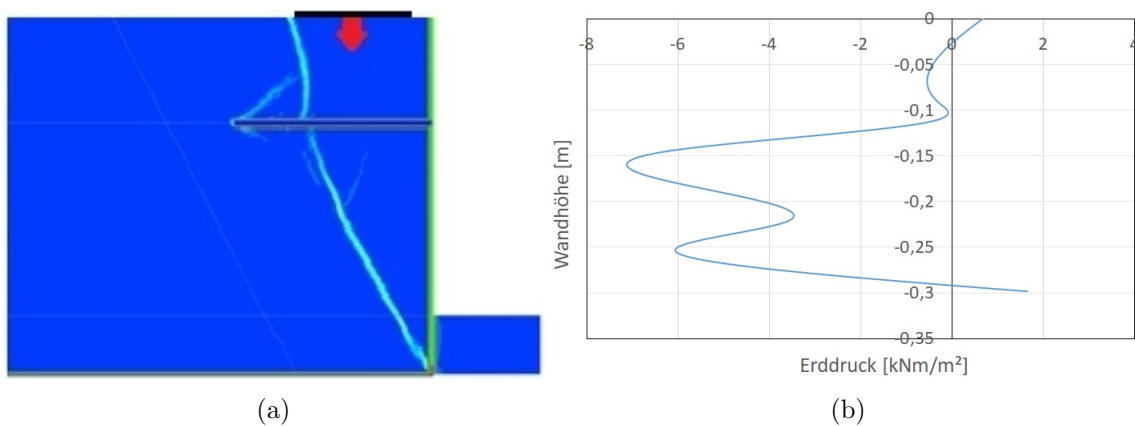


Abb. 4.7: Modellvariante 1 Platte A Geogitterlage -0,09 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

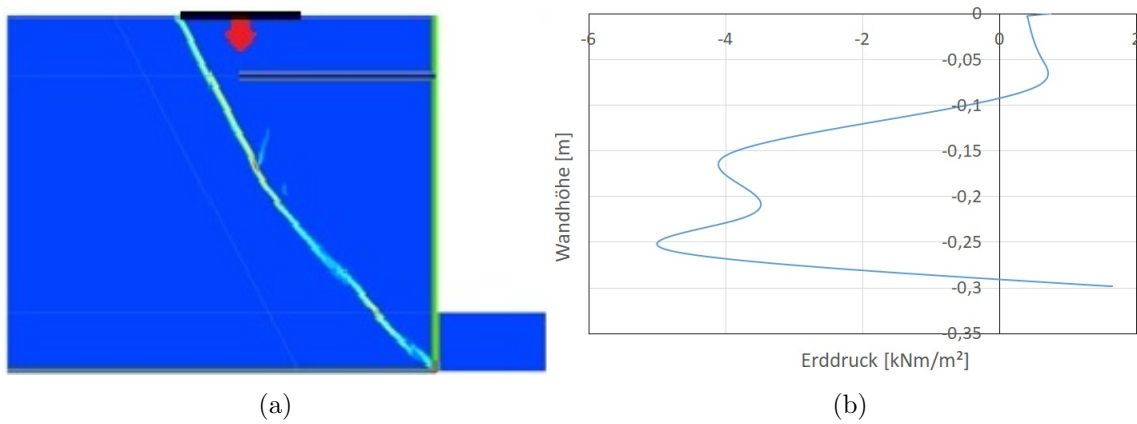


Abb. 4.8: Modellvariante 1 Platte B Geogitterlage -0,05 m
(a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

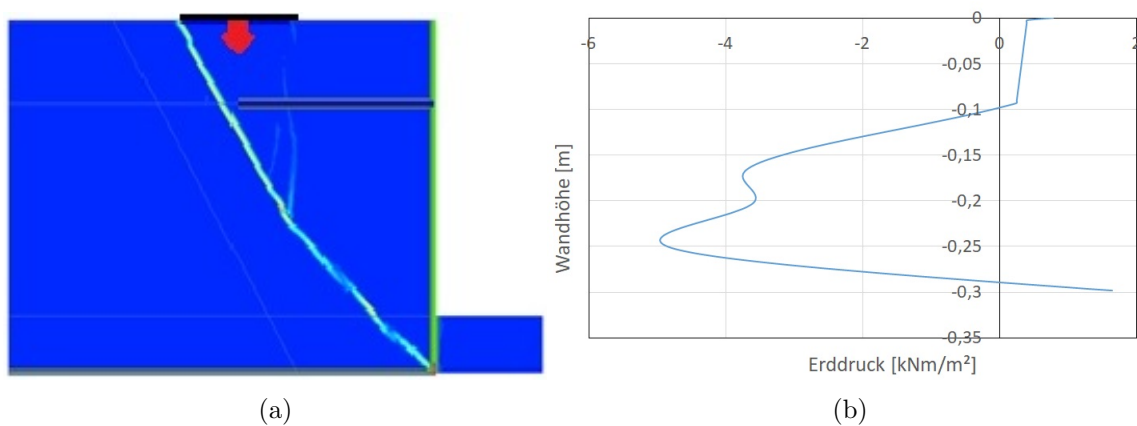


Abb. 4.9: Modellvariante 1 Platte B Geogitterlage -0,07 m
(a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

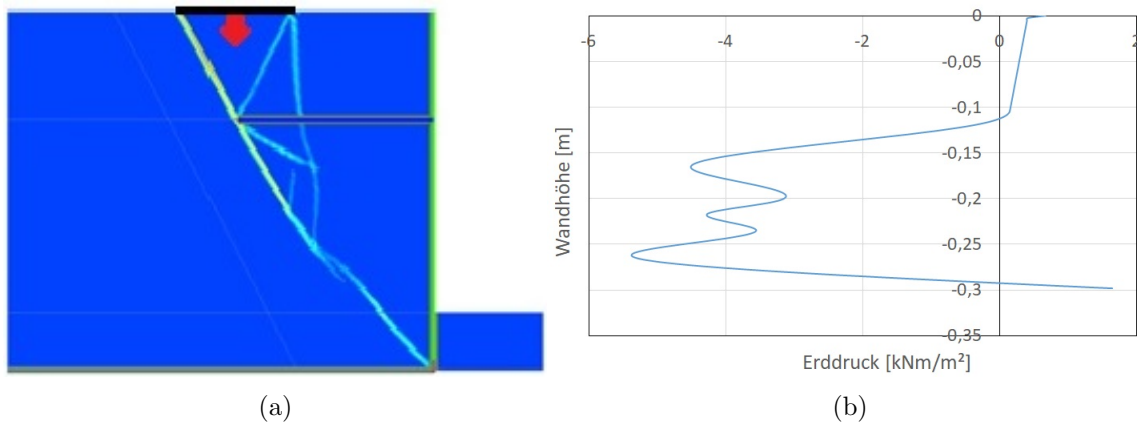


Abb. 4.10: Modellvariante 1 Platte B Geogitterlage -0,09 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

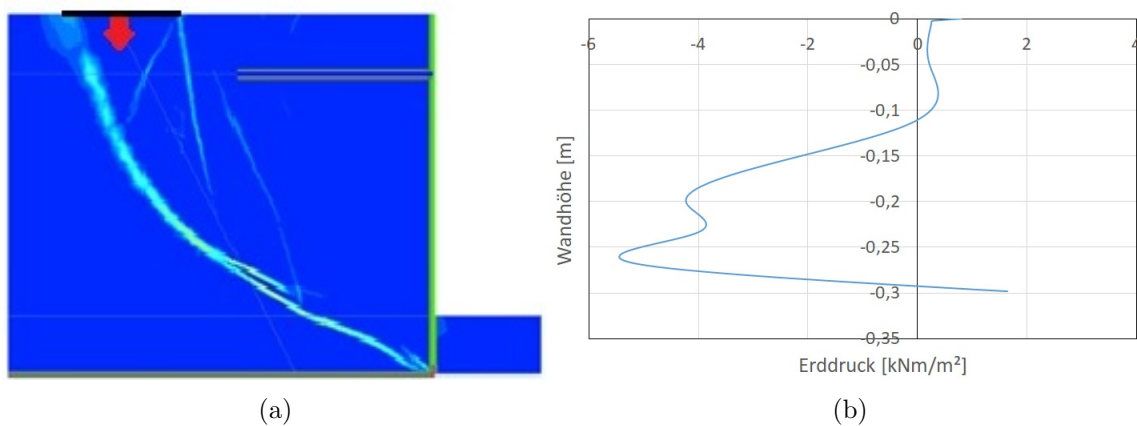


Abb. 4.11: Modellvariante 1 Platte C Geogitterlage -0,05 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

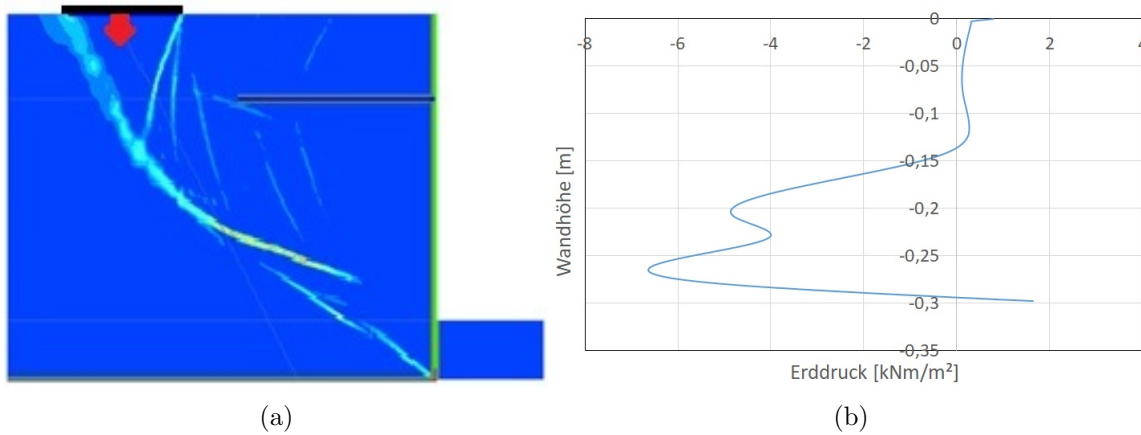


Abb. 4.12: Modellvariante 1 Platte C Geogitterlage -0,07 m
(a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

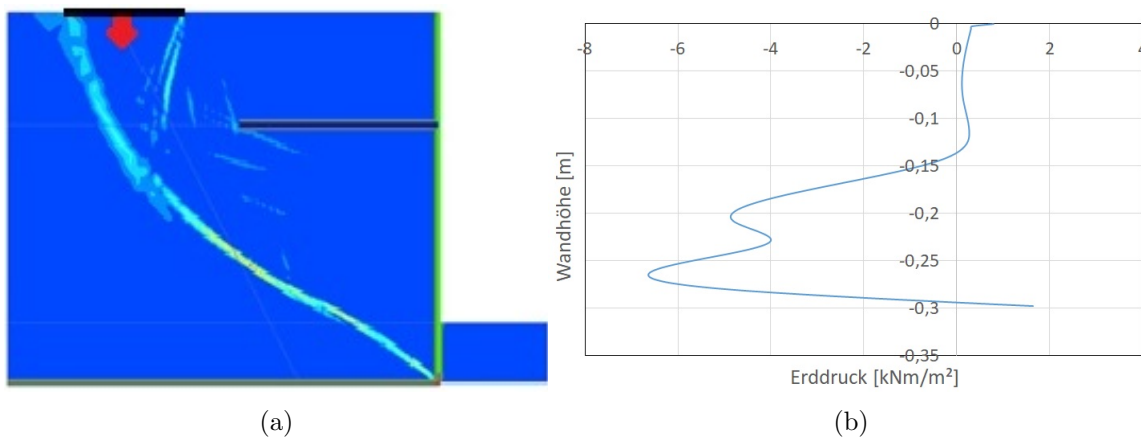


Abb. 4.13: Modellvariante 1 Platte C Geogitterlage -0,09 m
(a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

Für Modellvariante 2 stellen sich, da nur die Art der Belastung unterschiedlich ist, qualitativ ähnliche Ergebnisse ein. Jedoch liefert Modellvariante 2 zusätzliche Ergebnisse zur maximalen Belastung. Platte A kann mit zunehmender Geogittertiefe größere Lasten aufnehmen und Platte B mit zunehmender Geogittertiefe weniger Lasten.

Tab. 4.6: Maximale Belastung für Modellvariante 2 [kN/m]

Geogitterlage h [m]	Platte A	Platte B
-0,05	0,610	0,670
-0,07	0,710	0,580
-0,09	1,060	0,570

4.2 Flächenlast

Für die in Modellvariante 3 aufgebraute Flächenlast kann das System durch Herabsetzen der Geogitterlage mehr Last aufnehmen. Dabei wird in den tieferen Geogitterlagen mehr Last in das Geogitter geleitet. Die hierdurch entstehenden Kraftverläufe im Geogitter verlaufen für alle drei Lagen parallel. Beim aufgebrauchten Biegemoment auf die Spundwand sind Unterschiede zwischen den Geogitterpositionen -5 cm, -7 cm und -9 cm zu erkennen. Während das Biegemoment für die Lagen -5 cm und -7 cm gleichbleibend ist, ist das Biegemoment für die unterste Lage deutlich reduziert. Die Spundwandverschiebung der Flächenlast verhält sich wie die Plattenverschiebung in Modellvariante 1. Diese nimmt für die mittlere Lage Höchstwerte an. Die Scherfuge bildet sich von der Oberflächenmitte zum Fußpunkt der Spundwand aus. Mit zunehmender Tiefe entsteht ein V-förmiger Verlauf zum Geogitterende. Hervorzuheben ist, dass bei der Geogitterlage -9 cm die Scherfuge unterhalb des Geogitters durch die tiefe Lage getrennt wird.

Tab. 4.7: Ergebnisse Flächenlast

Geogitterlage h [m]	Maximal aufbringbare Belastung [kNm/m]	Kraft am Geogitteranschluss [kN/m]	Maximales Biegemoment [Nm/m]
-0,05	2,50	0,062	2,037
-0,07	2,60	0,086	2,044
-0,09	2,70	0,087	1,559

Tab. 4.8: Ergebnisse Flächenlast

Geogitterlage h [m]	Maximale Spund- wandverschiebung [mm]	Spundwandverschie- bung am Geogitter [mm]	Resultierender Erddruck [kN/m ²]
-0,05	0,768	0,550	0,344
-0,07	0,897	0,502	0,355
-0,09	0,881	0,484	0,374

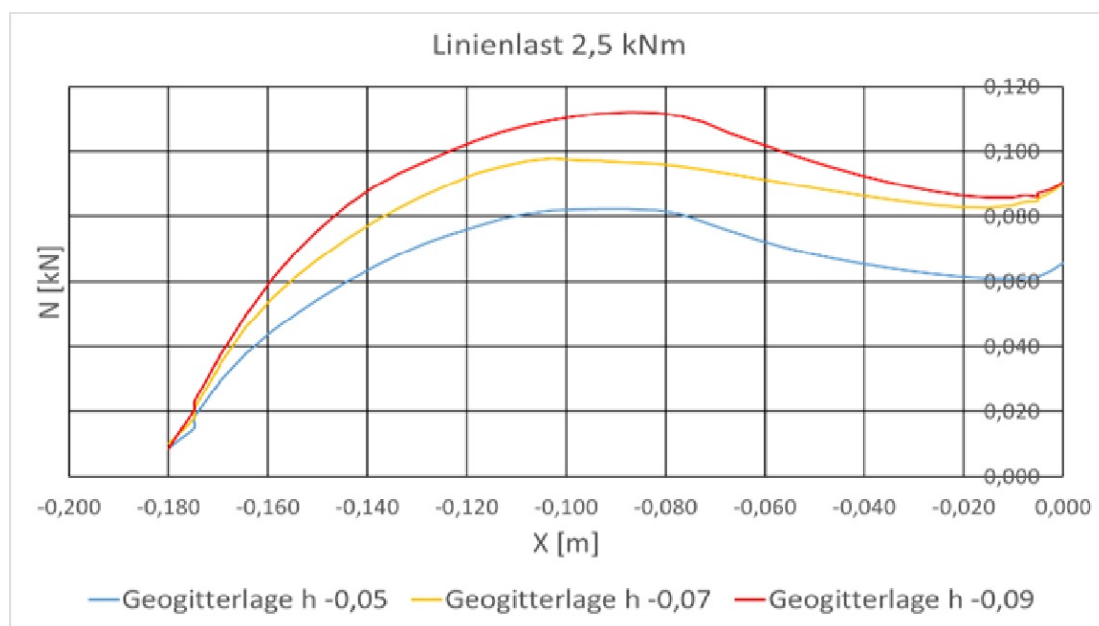


Abb. 4.14: Kräfte im Geogitter für Flächenlast Modellvariante 3

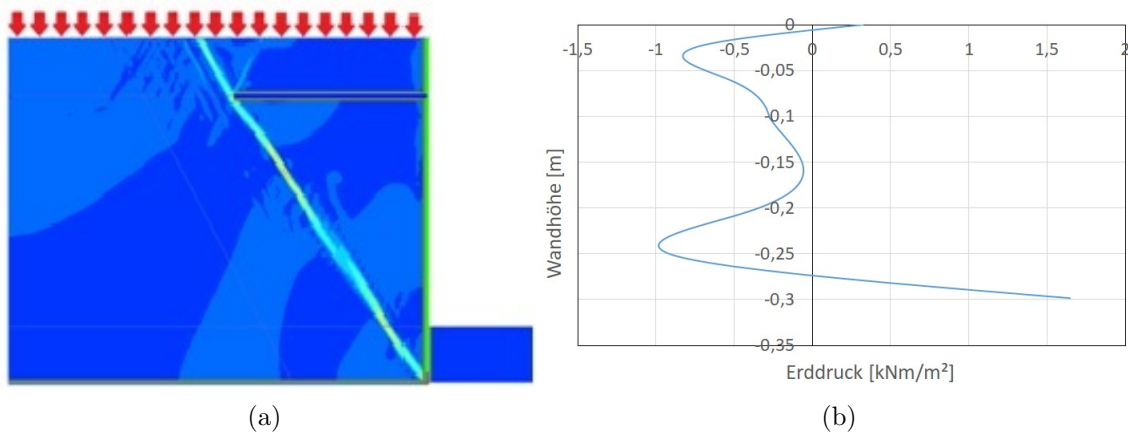


Abb. 4.15: Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,05 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

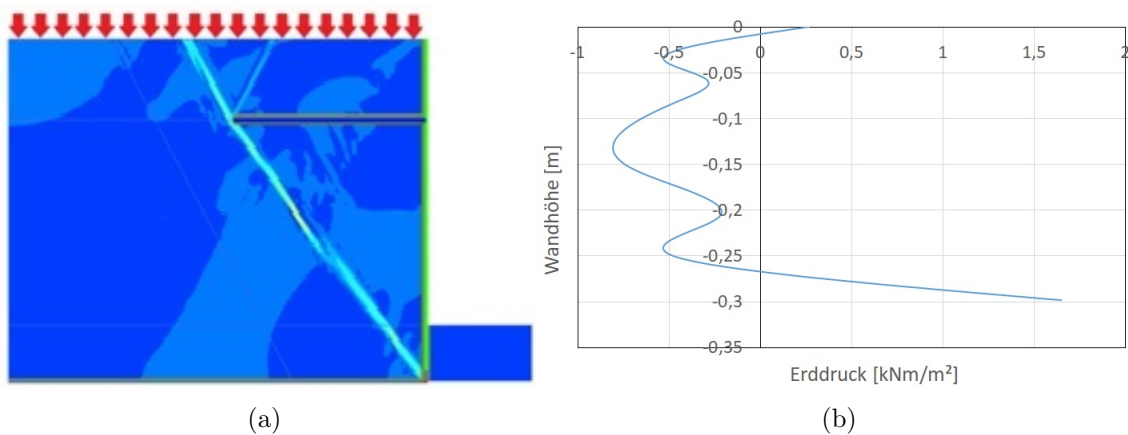


Abb. 4.16: Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,07 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

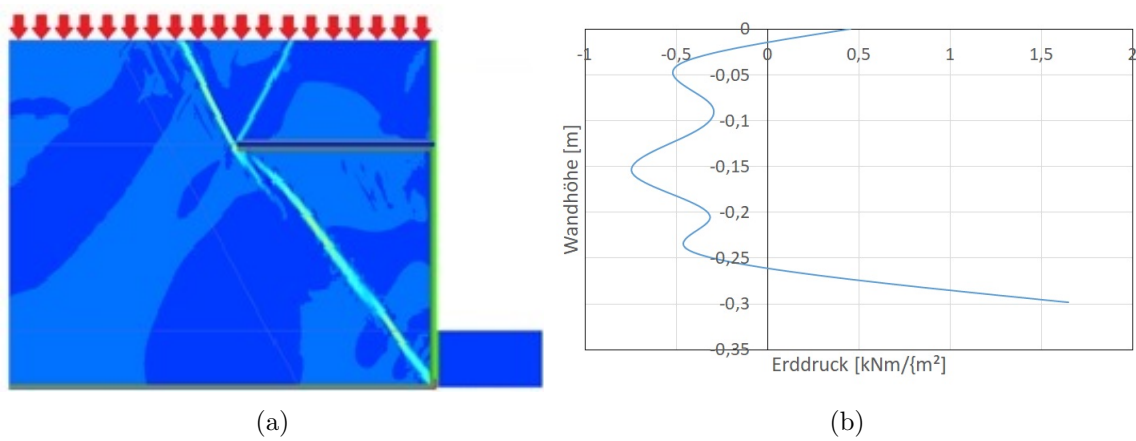


Abb. 4.17: Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,09 m
(a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

4.3 Geogitterlänge

Durch die in Modellvariante 4 angesetzte reduzierte Geogitterlänge reduziert sich die maximal aufbringbare Last auf das System und die Kräfte im Geogitter. Hierbei ist der Effekt für die Reduzierung von 18 cm auf 11 cm stärker ausgeprägt als die Reduzierung von 11 cm auf 6 cm. Im direkten Vergleich der Geogitterlängen 11 cm und 6 cm sind die Kräfte fast gleich groß bzw. für die Geogitterlänge 6 cm sind leichte Zunahmen zu erkennen. Die Spundwandverschiebung verschiebt sich für alle drei Geogitterlängen parallel. Am stärksten für die Geogitterlänge 6 cm. Dies gilt sowohl für die maximale Spundwandverschiebung als auch für die Spundwandverschiebung am Geogitteranschluss.

Tab. 4.9: Ergebnisse Geogitterlänge

Geogitterlänge l [cm]	Maximal aufbringbare Belastung [kN/m]	Kraft am Geogitteranschluss [kN/m]	Maximales Biegemoment [Nm/m]
6	0,3	0,074	4,540
11	0,2	0,056	4,578
18	0,61	0,132	3,671

Tab. 4.10: Ergebnisse Geogitterlänge

Geogitterlänge l [cm]	Maximale Spundwandverschiebung [mm]	Spundwandverschiebung am Geogitter [mm]	Resultierender Erddruck [kN/m ²]
6	1,484	1,466	0,189
11	1,175	1,124	0,119
18	1,015	0,998	0,178

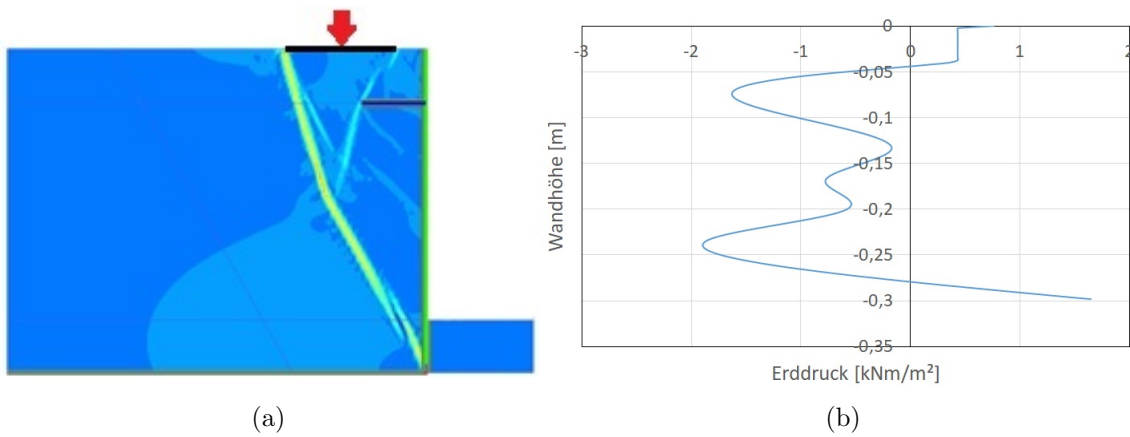


Abb. 4.18: Modellvariante 4 Geogitterlänge 6 cm Geogitterlage -0,05 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

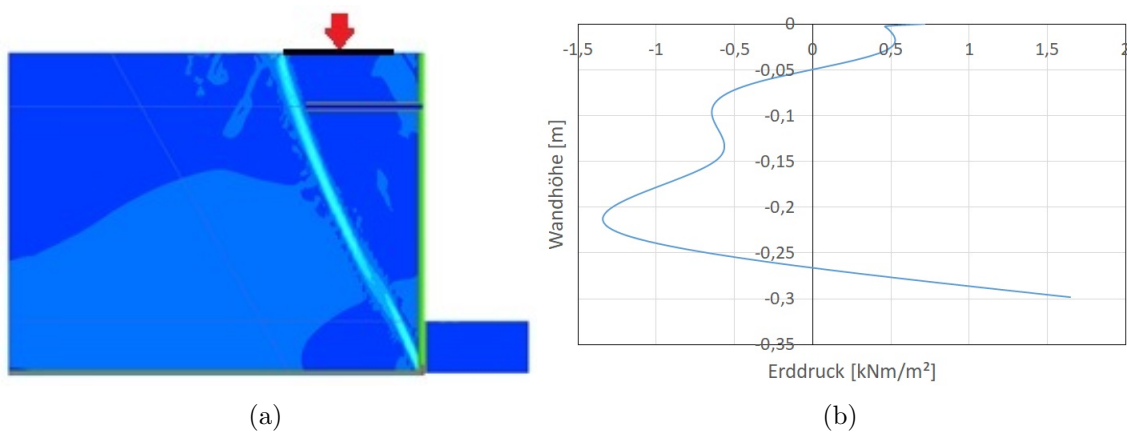


Abb. 4.19: Modellvariante 4 Geogitterlänge 11 cm Geogitterlage -0,05 m
 (a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

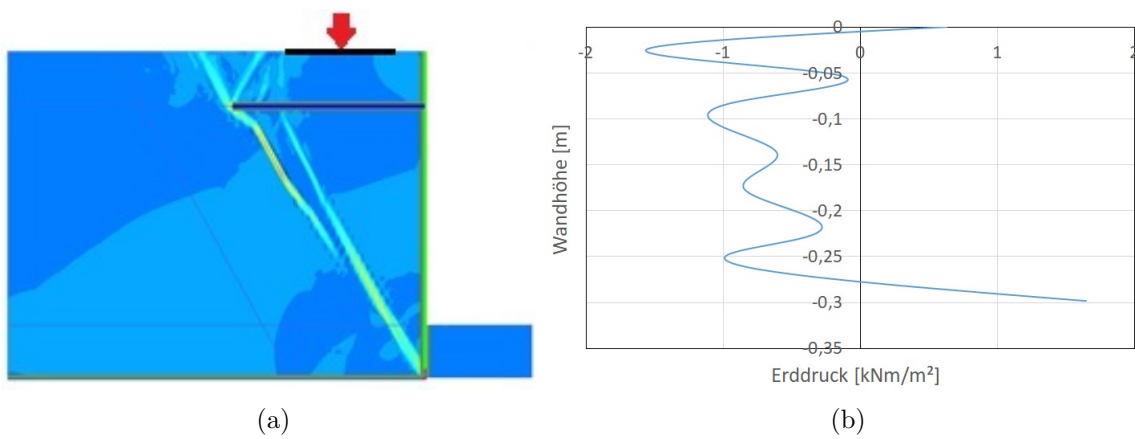


Abb. 4.20: Modellvariante 4 Geogitterlänge 18 cm Geogitterlage -0,05 m
(a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

Bei den durchgeführten Laborversuchen ist bei einer Geogitterlänge von 18 cm ein drehen um den Kopfpunkt zu erkennen. Dies findet in der numerischen Berechnung nicht statt, daher wurde in Modellvariante 5 die Steifigkeit des Silikonblock verändert. Die Steifigkeit wurde einmal von 130 kN/m^2 auf $0,13 \text{ kN/m}^2$ und auf 13000 kN/m^2 gesetzt. In beiden Fällen tritt keine Verdrehung um den Kopfpunkt auf. Die Spundwand mit dem weichen Silikonblock in Abb.4.21a verschiebt sich parallel und der steife Silikonblock in Abb.4.21b wirkt wie eine Einspannung und lässt am Fußpunkt keine Verschiebung zu.

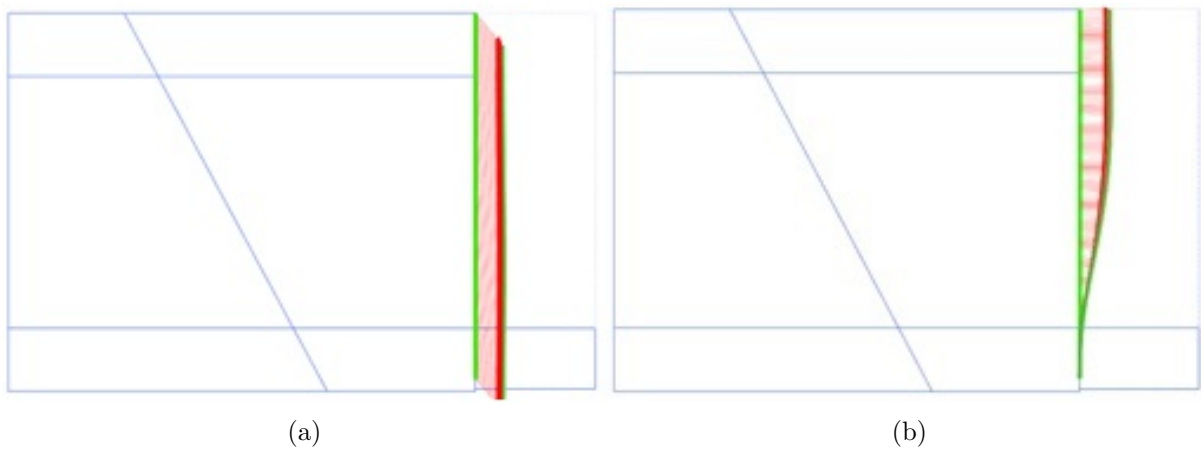


Abb. 4.21: Modellvariante 5 Variation des Silikonblocks
(a)Silikonblock weich (b)Silikonblock steif

4.4 Steife

In Modellvariante 6 wurde die Geogitterlage entfernt und eine Steife auf gleicher Höhe angebracht. Hieraus resultiert dass, das Modell bei einer Belastung von 0,4 kN versagt. Dabei verläuft die Scherdehnung wie bei einem unbewehrten System. Der resultierende Erddruck liegt bei 0,079 kNm/m².

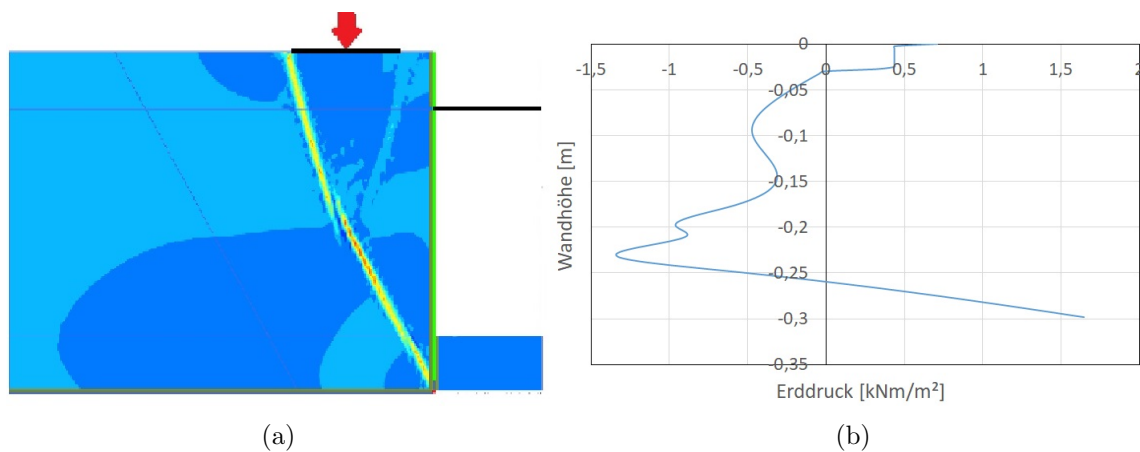


Abb. 4.22: Modellvariante 6 Steife
(a) Scherdehnung (b) Erddruckverlauf nach Spline-Interpolation

5 Auswertung

In Abb.5.1a ist die Scherdehnung eines unbewehrten Bodens im Vergleich mit einem mit Geogittern bewehrten Boden dargestellt. Beide Systeme werden über Platte A belastet. Die Geogitterlage befindet sich bei Abb.5.1b auf der Position -0,05 m. In beiden Fällen sind zwei Scherfugen zu erkennen. In dem System mit der Geogitterlage ist deutlich zu erkennen, dass sich der Verlauf der oberen Scherfuge durch das Geogitter verändert. Das Geogitter nimmt Kräfte auf und stabilisiert die Spundwand. Als Folge ist die Scherfuge weniger ausgeprägt. Die untere Scherfuge ist ebenfalls gerade im Bereich unterhalb der Geogitterlage im Vergleich der Konstruktionen weniger ausgeprägt. Während es beim unbewehrten Boden zu einem Tiefen-Gleitfugen-Szenario kommt, rückverankert das Geogitter die Spundwand. Dies ist ebenfalls an der maximalen Last die auf Platte A aufgebracht werden kann bevor das System versagt, zu beobachten. Während der mit Geogittern bewehrte Boden 0,61 kN aufnehmen kann, versagt das System ohne Bewehrung bereits bei 0,1 kN.

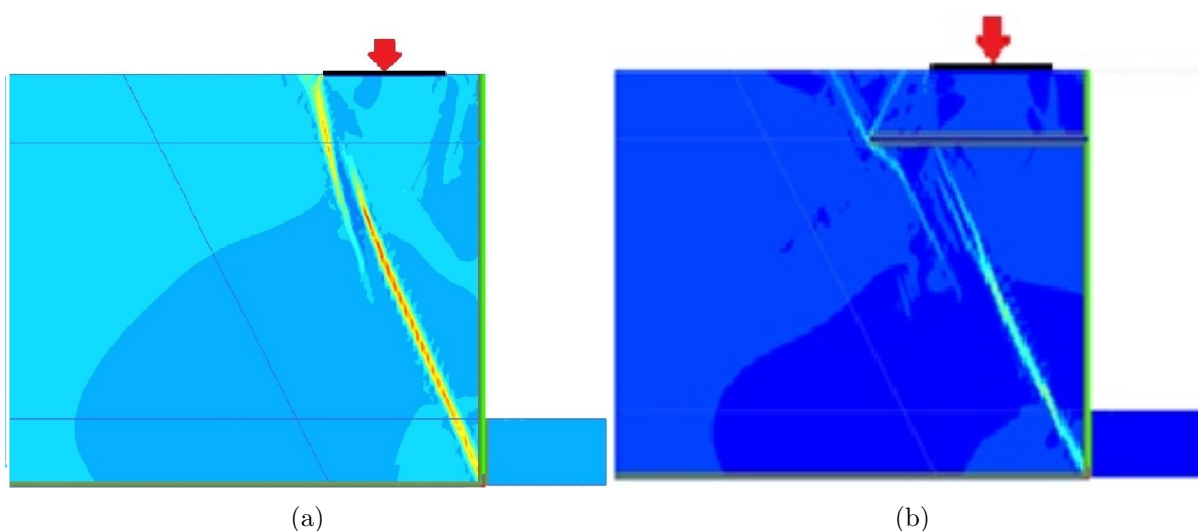


Abb. 5.1: Vergleich der Scherdehnung eines unbewehrten und eines bewehrten Systems
(a) Scherdehnung ohne Bewehrung (b) Scherdehnung Platte A Geogitterlage -0,05

Weiter sind in Abb. 5.2 die beiden Erddruckverläufe der Konstruktionen gegenübergestellt. Abb. 5.2a zeigt das unbewehrte System und Abb. 5.2b das System mit Geogitterbewehrung. Beim unbewehrten System wird der Erddruck fast ausschließlich über den Fußpunkt der Spundwand und den Silikonblock abgetragen. Hierdurch kann das System deutlich weniger Erddruck und somit Belastung aufnehmen. Hervorzuheben ist, dass im Bereich des Geogitters der Erddruck reduziert ist. Der Verbund aus Geogitter und Boden scheint hier die Erddruckkräfte aufzunehmen. Dadurch liegt der resultierende Erddruck, bei gleicher Belastung von 0,1 kN, im unbewehrten System bei 0,0831 kN/m² und beim bewehrten System bei 0,0616 kN/m². Das entspricht einer Reduzierung von ca. 12% des Erddrucks.

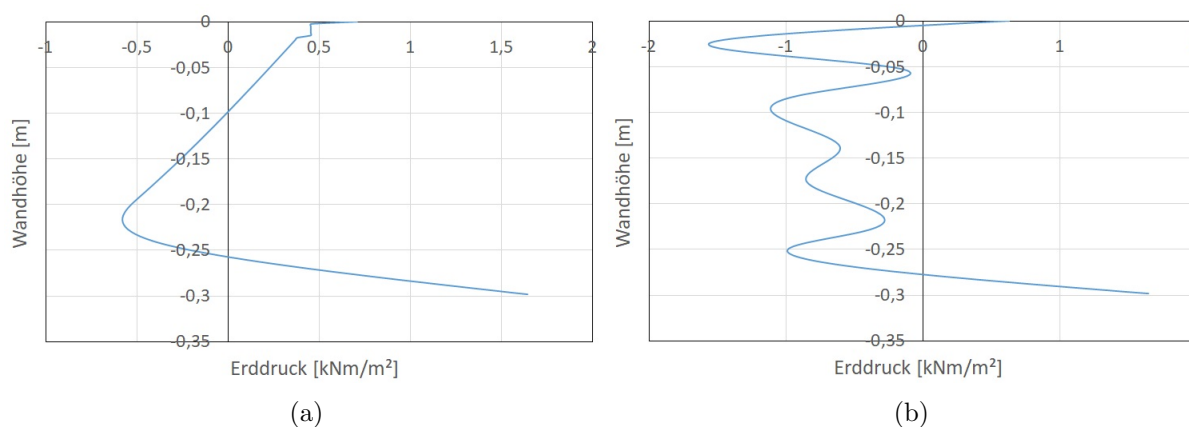


Abb. 5.2: Vergleich des Erddrucks eines unbewehrten und eines bewehrten Systems
 (a) Erddruck Platte A ohne Bewehrung (b) Erddruck Platte A Geogitterlage -0,05

5.1 Lastposition

Die Position der angreifenden Kraft, sowie die Lage der Geogitterbewehrung haben Einfluss auf den Erddruck. Hierzu sind in Abb. 5.4 der resultierende Erddruck in Abhängigkeit der Lasteinleitung über die einzelnen Platten und der Höhe der Geogitter dargestellt. Auffällig ist, dass sich der Erddruck für die Lastposition Platte A und Platte B genau entgegengesetzt verhält. Während bei Platte A der Erddruck in mittlerer Geogitterlage von -0,07 m unter Bodenoberfläche den größten Wert annimmt, resultiert bei Platte B hier der niedrigste Wert. Weitergehend ist für Platte C mit zunehmender Tiefe der Geogitterlage auch eine Zunahme des Erddrucks zu erkennen.

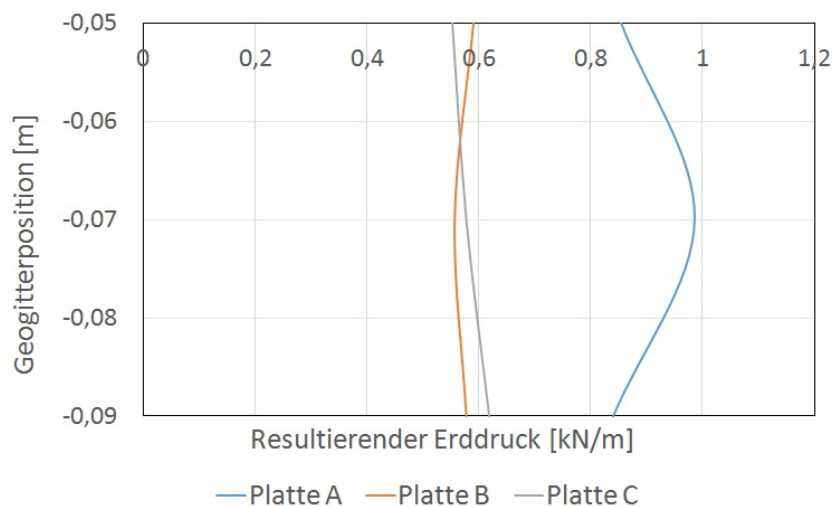


Abb. 5.3: Erddruck in Abhängigkeit der Lastposition und der Geogitterlage

Bei der maximalen Last bevor das System versagt, verhalten sich Platte A und Platte B ebenfalls entgegengesetzt zueinander. In Abb.5.4 ist die Last im Versagensfall in Abhängigkeit der Lastposition und der Geogitterhöhe dargestellt. Bei Platte A kann mit zunehmender Tiefe der Geogitterlage auch mehr Kraft aufgebracht werden bevor das System versagt. Für Platte B ist für die Geogitterhöhe -0,05 m und -0,07 m eine Reduzierung der Last zu beobachten. Für die Höhe -0,07 m und -0,09 m bleibt die aufnehmbare Kraft konstant.

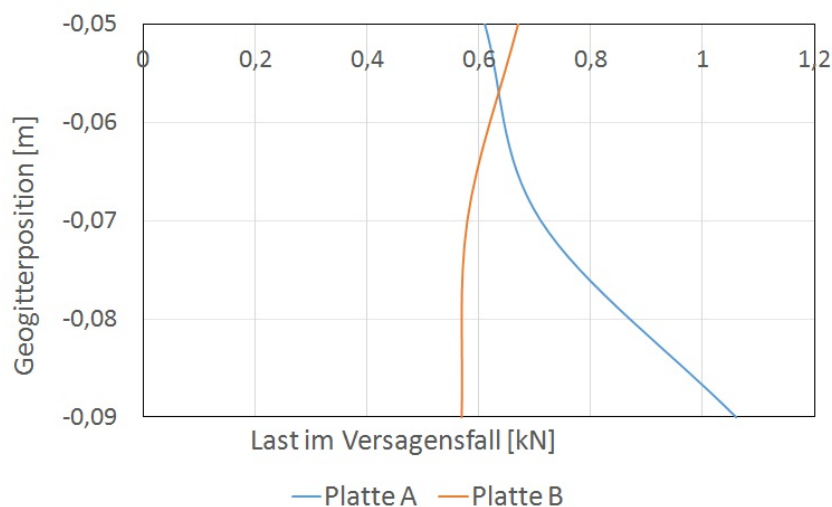


Abb. 5.4: max Last in Abhängigkeit der Lastposition und der Geogitterlage

5.2 Vergleich der Ergebnisse mit den Laborversuchen

Ruiken (2013) hat in seinem Versuch, der in Kapitel 2 vorgestellt wurde, mit Geogittern bewehrte Konstruktionen ganzflächig über ein Druckkissen belastet. Die Erddruckverläufe werden im Folgenden mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung der Flächenlast verglichen. Hierzu werden in Abb.5.5 und Abb.5.6 die Erddruckverläufe gegenübergestellt. Qualitativ zeigt sich, dass der Erddruck im Bereich um das Geogitter reduziert wird. Oberhalb des Geogitters nimmt der Erddruck den größten Wert an. Bei den Versuchen nach Ruiken (2013) ist der Erddruck unterhalb des Geogitters stark reduziert. Im Gegensatz hierzu ist bei den Ergebnissen der numerischen Berechnung zum Fußpunkt eine Zunahme des Erddrucks zu verzeichnen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Silikonblock am Fußpunkt.

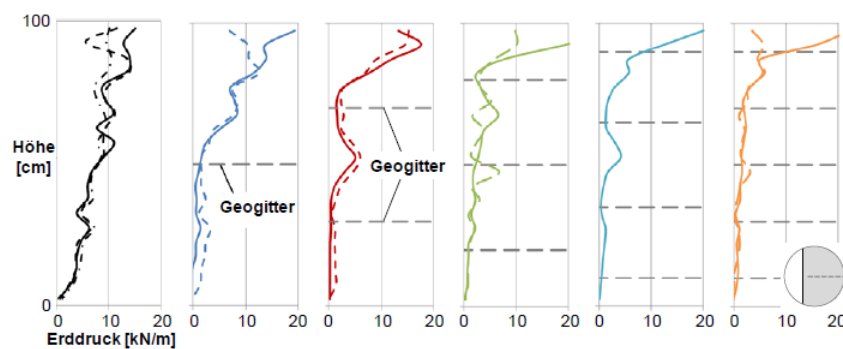


Abb. 5.5: Erddruckverteilung auf das Facing bei unbewehrtem und verschiedenen Geogitterbewehrtem Boden nach $u_x = 2$ mm Wandverschiebung. Ruiken (2013)

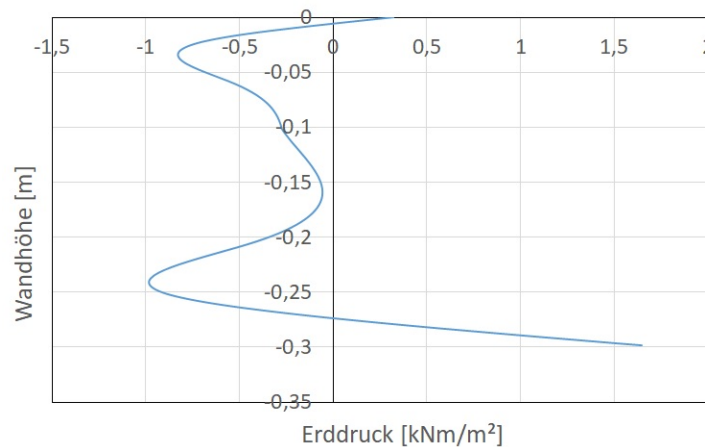


Abb. 5.6: Scherdehnung für Modellvariante 3 Flächenlast Geogitterlage -0,05 m

Bei den Laborversuchen aus Kapitel 3 wurde unter anderem die Länge des Geogitters variiert. Beim Vergleichen der im Laborversuch auftretenden Verformungen mit der in PLAXIS berechneten Scherdehnung stellen sich qualitativ gleiche Verläufe ein Abb.5.7 bis Abb.5.9

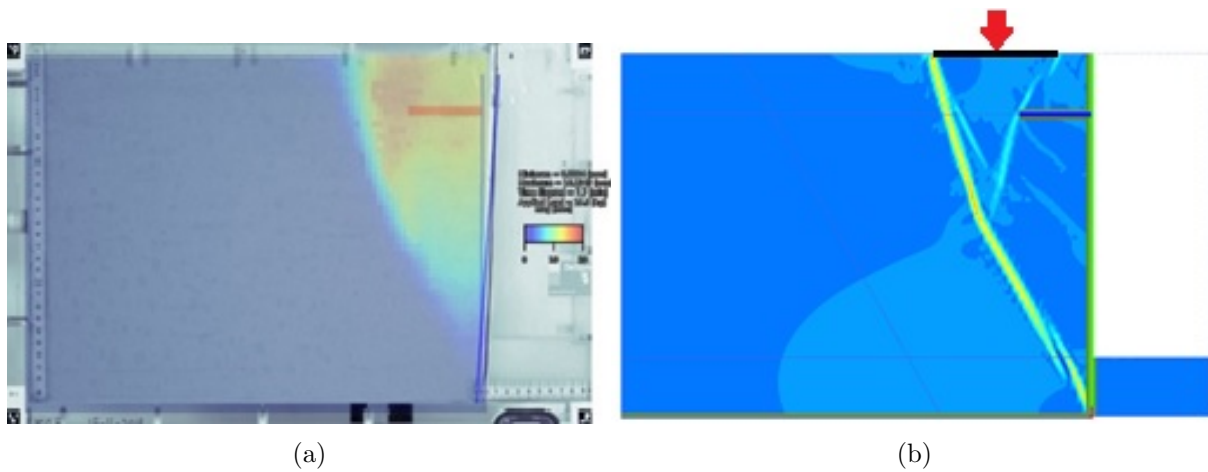


Abb. 5.7: Vergleich des Laborversuches mit numerischen Ergebnissen für Platte A Geogitterlänge 6 cm

(a) Verformung Platte A (b) Scherdehnung Platte A

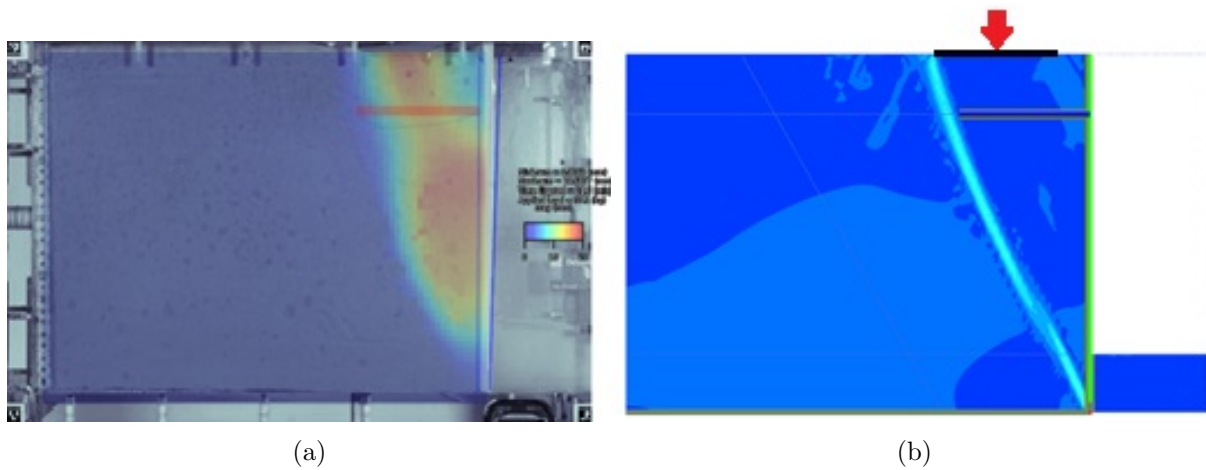


Abb. 5.8: Vergleich des Laborversuches mit numerischen Ergebnissen für Platte A Geogitterlänge 11 cm

(a) Verformung Platte A (b) Scherdehnung Platte A

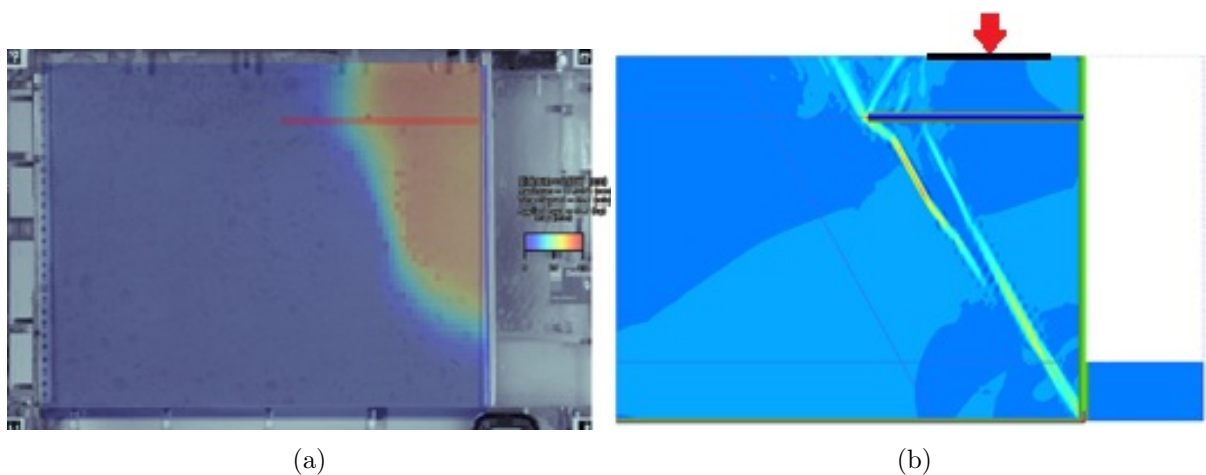


Abb. 5.9: Vergleich des Laborversuches mit numerischen Ergebnissen für Platte A Geogitterlänge 18 cm

(a) Verformung Platte A (b) Scherdehnung Platte A

Bei der Geogitterlänge von 18 cm ist im Laborversuch zu beobachten, dass das Ende vom Geogitter außerhalb des verformten Bereiches liegt. Damit liegt ein Teil des Geogitters außerhalb der tiefen Gleitfuge und erfüllt weiterhin eine Spundwand rückverankernde Funktion. Dadurch kommt es bei der Geogitterlänge von 18 cm zu einer Drehung der Spundwand um den Kopfpunkt. Bei den Geogitterlängen 6 cm und 11 cm dreht sich die Spundwand um den Fußpunkt. Eine Kopfpunktdrehung konnte bei den numerischen Berechnungen nicht beobachtet werden. Wie in Abb.5.10 bis Abb.5.12 zu erkennen verschiebt sich die Spundwand je nach Position der Last parallel oder es kommt zu einer Fußpunktdrehung.

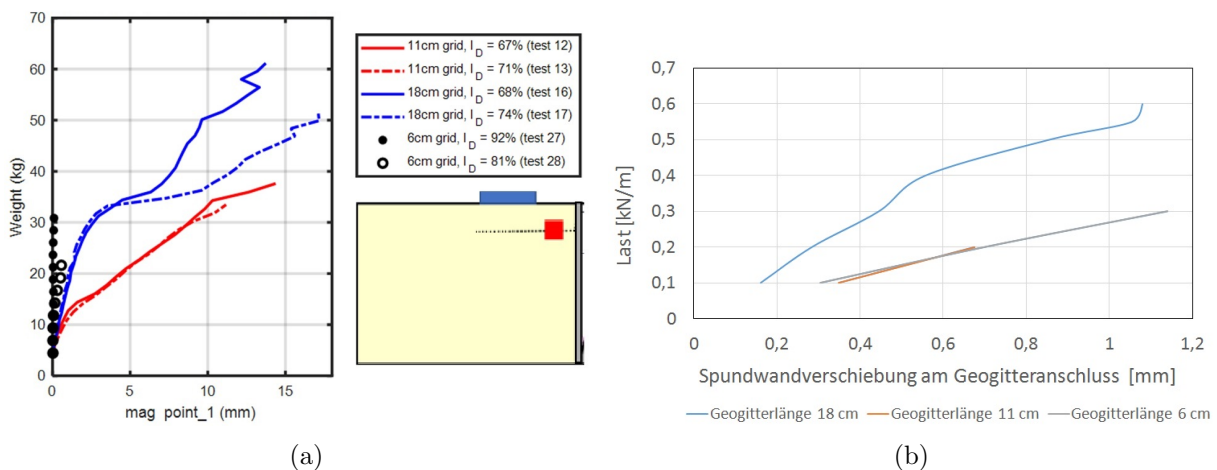


Abb. 5.10: Vergleich der Spundwandverschiebung am Geogitteranschluss

(a) Laborversuch (b) numerische Berechnung

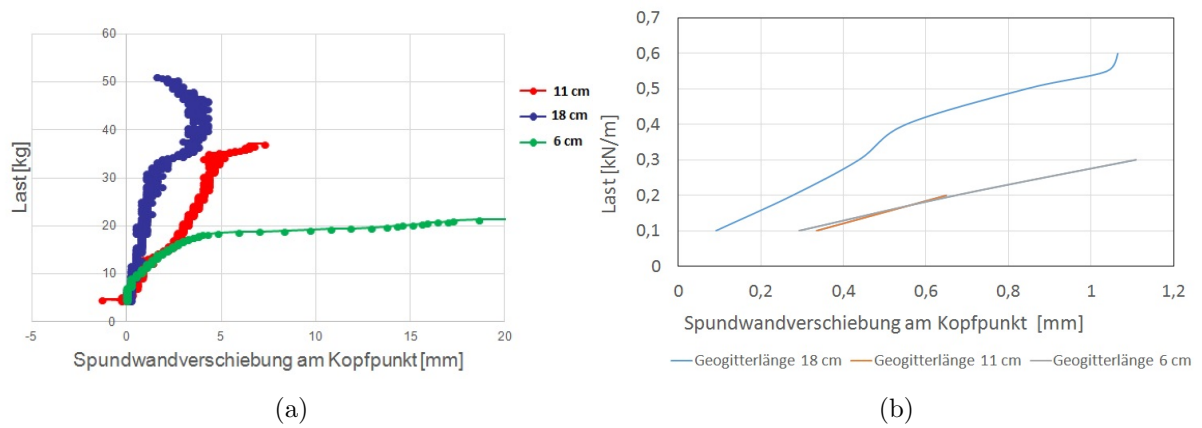


Abb. 5.11: Vergleich der Spundwandverschiebung am Kopfpunkt
(a) Laborversuch (b) numerische Berechnung

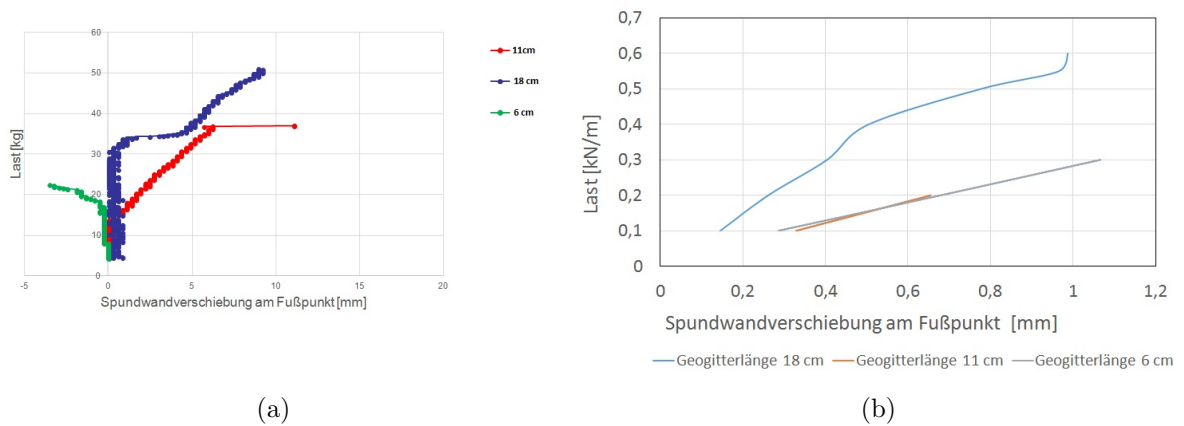


Abb. 5.12: Vergleich der Spundwandverschiebung am Fußpunkt
(a) Laborversuch (b) numerische Berechnung

5.3 Vergleich Steife und Geogitter

Beim Vergleich zwischen Geogitter und Steife fällt auf, dass das Geogittermodell höhere Lasten aufnehmen kann. In Abb.5.13 ist der resultierende Erddruck im Vergleich zur Dehnsteifigkeit der Steife dargestellt. Bei gleicher Dehnsteifigkeit von Geogitter und Steife und gleicher Belastung von 0,3 kN liegt der resultierende Erddruck für die Steife bei 0,034 kN/m² und für das Geogitter bei 0,014 kN/m².

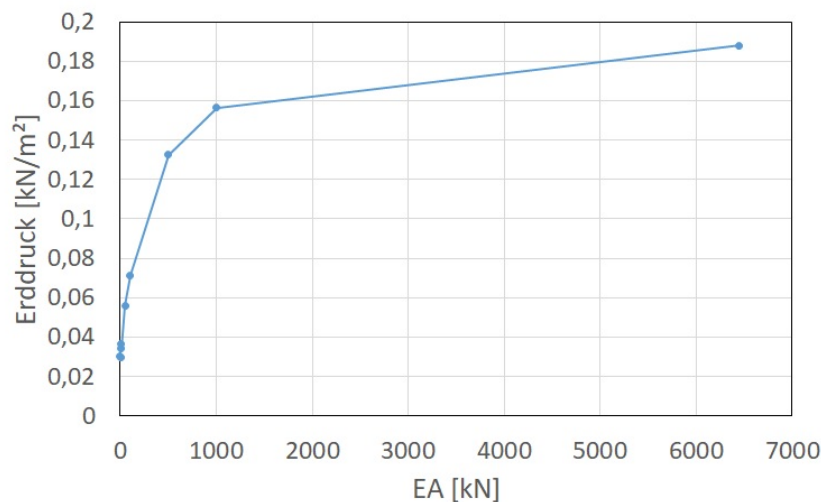


Abb. 5.13: Resultierender Erddruck in Abhängigkeit der Dehnsteifigkeit der Steife

5.4 Vergleich nach EAB und EAU

Für die Berechnung des resultierenden Erddrucks wurde für die Erddruckumlagerung nach EAB (2013) und EAU (2012) das numerische Modell übernommen und das Geogitter durch einen verlegten Anker ersetzt. In Abb.5.14 ist auf der x-Achse der Erddruck in kNm/m² und auf der y-Achse die Wandhöhe in m angegeben. Der Erddruck der Flächenlast 2,5 kNm wurde jeweils für die Geogitterlagen -0,05 m, -0,07 m und -0,09 m berechnet. Durch den kleinen Maßstab des Modelles sind die Berechnungen nach EAB und EAU nur minimal unterschiedlich und lassen sich nicht darstellen. Der berechnete Erddruck ist für alle drei Ankerlagen gleich. Durch die unterschiedliche Höhe der Ankerlage ändert sich die Verteilung des Erddrucks aber nicht der Wert des resultierenden Erddrucks. Bei der mit Geogittern bewehrten Tragkonstruktion, hat die Höhe der Belehrungslage, bei gleicher Belastung, direkten Einfluss auf den Erddruck. Für die Geogitterlage -0,05 m ist, im mit Geogittern bewehrten Modell, der meiste Erddruck vorhanden. Dieser reduziert sich für

die Lage -0,07 m und bleibt dann annähernd konstant für die Lage -0,09 m. Zusätzlich liegt der Erddruck für das mit Geogittern bewehrte Modell für alle Geogitterpositionen unter den Vergleichsrechnungen nach EAB und EAU.

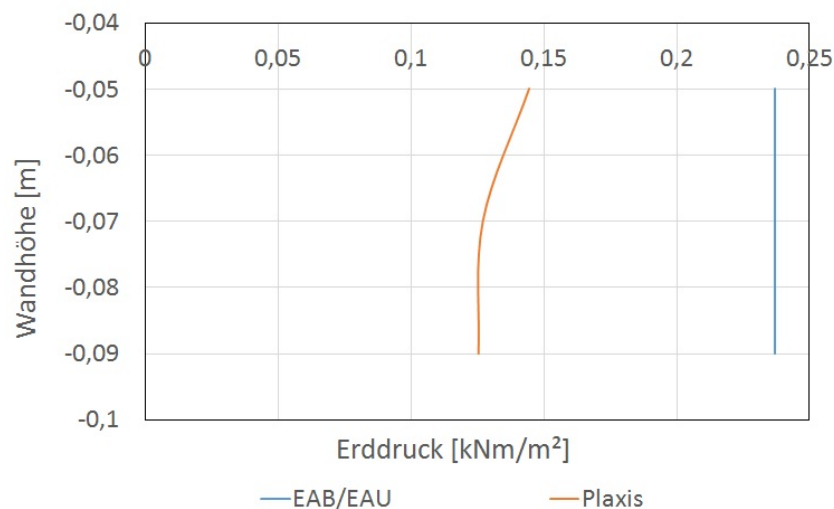


Abb. 5.14: Resultierender Erddruck der Flächenlast nach EAB/EAU und Plaxis

Darüber hinaus sind in Abb.5.15 der resultierende Erddruck differenziert nach Lastposition und Geogitterlage für das numerische Modell und für die Vergleichsrechnung nach EAB aufgeführt. Die Vergleichsrechnungen wurden erneut für einen verlegten Anker durchgeführt. Der Erddruck für diesen Fall ist im Vergleich zu der Bewehrung mit Geogittern höher. Nach EAB verläuft der Erddruck unabhängig von der Höhe der Bewehrung konstant. Im Gegensatz hierzu resultieren sowohl für Platte A als auch für Platte B differenziert nach Bewehrungshöhe und Lastposition unterschiedliche Werte für den Erddruck.

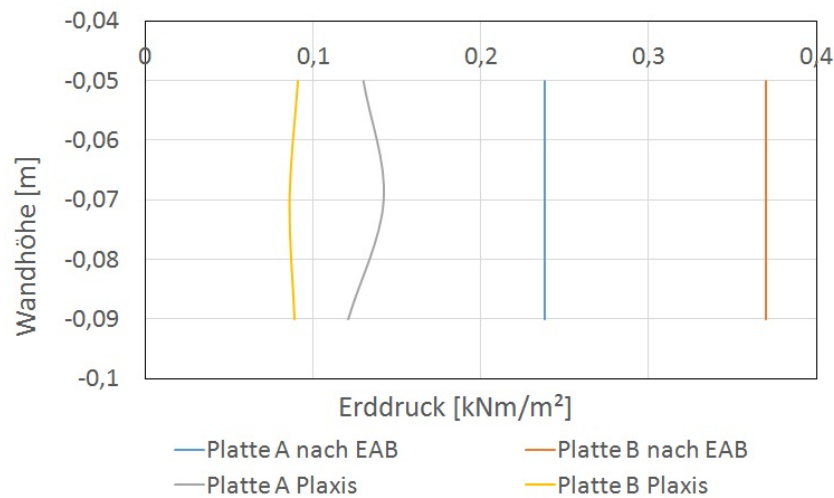


Abb. 5.15: Resultierender Erddruck für Platte A und Platte B nach EAB und Plaxis

5.5 Nachweis der tiefen Gleitfuge

Der Nachweis der tiefen Gleitfuge dient der Standsicherheit des mit Bewehrung versehenen Bodens. Dabei wird nachgewiesen, dass die Verankerung der Bewehrung außerhalb des Gleitkeils liegt, um eine Rückverankerung der Spundwand zu gewährleisten. Über den Nachweis der tiefen Gleitfuge wird auch die Länge der Bewehrung des mit Ankern bewehrten Bodens bestimmt. Im Gegensatz zu Ankern tragen Geogitter die Kräfte über die gesamte Länge ab. Daher lässt sich der Nachweis der tiefen Gleitfuge nicht übertragen. Ein möglicher Ansatz um die erforderliche Länge des Geogitters zu bestimmen, ist nach EAU (2004) der Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge bei Zugpfählen und Verpressankern mehrerer Ankerlagen Abb.5.16. Genau wie beim Geogitter erfolgt der Lastabtrag bei Zugpfählen und Verpressankern über Reibung. Schneidet bei mehrlagiger Verankerung die tiefe Gleitfuge die Krafteinleitungsstrecke darf die restliche Länge im unbewegten Boden berücksichtigt werden. Dabei wird die freigeschnittene Ankerkraft $A_{2,k}^*$ über die gleichmäßige Verteilung der Ankerkraft $A_{2,k}$ und die Krafteinleitungsstrecke l_r ermittelt. Übertragen auf ein mit Geogittern bewehrtes System, könnte dadurch die notwendige Länge des Geogitters hinter der tiefen Gleitfuge und somit die Gesamtlänge berechnet werden.

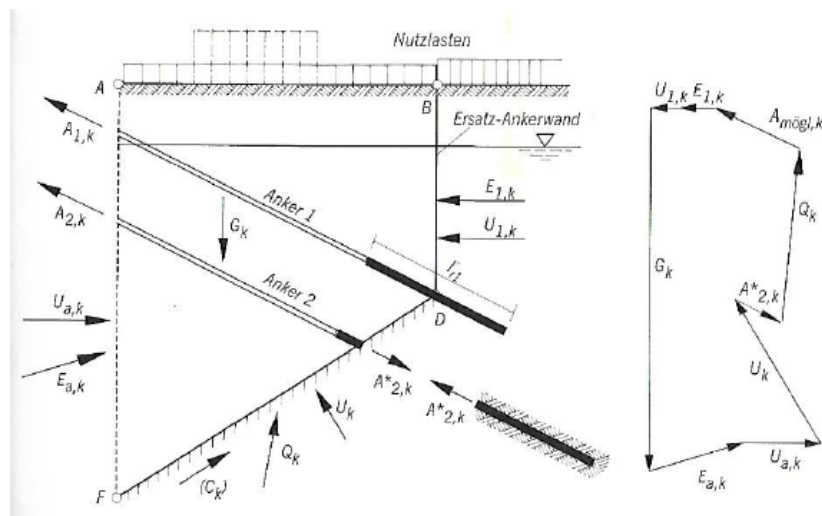


Abb. 5.16: Nachweis der tiefen Gleitfuge bei mehrfacher Verankerung, EAU (2004)

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde das Tragverhalten und die Erddruckentwicklung mit Geogittern rückverankerter Spundwände untersucht. Durch die numerischen Modelle in PLAXIS2D konnten verschiedene Modellvariationen durchgeführt werden. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine Bewehrung aus Geogittern sich grundsätzlich positiv auf das Tragverhalten auswirkt. Die Bewehrung aus Geogittern erhöht die Stabilität des Bodens und damit das Tragverhalten. Dies wird besonders im Vergleich zwischen der Bewehrung mit einer Steife und der Bewehrung mit einem Geogittern deutlich. Beide Bewehrungssysteme haben die gleiche Dehnsteifigkeit, trotzdem kann ein mit Geogittern bewehrtes Modell deutlich höhere Kräfte aufnehmen. Durch Vergleichsrechnungen nach EAB (2013) und EAU (2012) konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass der resultierende Erddruck auf die Spundwand durch eine Bewehrung aus Geogittern reduziert wird. Dabei haben sowohl die Lastposition als auch die Höhe der Geogitterlage Einfluss auf das Tragverhalten und den Erddruck. Diese Eigenschaft unterscheidet das Geogitter von anderen Bewehrungsmethoden. Im Vergleich mit den aufgeführten Laborversuchen stellen sich größtenteils qualitativ gleiche Ergebnisse ein. Lediglich für die Lastposition Platte A mit der Geogitterlänge 18 cm konnten, entgegen des Laborversuchs, keine Kopfpunktdrehung beobachtet werden. Für die Verifizierung der Ergebnisse kann das Grundmodell aus PLAXIS2D in PLAXIS3D übertragen werden. Dadurch können weitere numerische Vergleichsrechnungen durchgeführt werden. Zusätzlich kann das Grundmodell weiter verändert werden. Möglichkeiten hierfür wären das Geogitter schräg einzulegen, die Parameter der Spundwand oder des Geogitters zu ändern, das Geogitter vorzuspannen oder den Verbund aus Boden und Geogitter während des Einbaus zu verdichten. Für die Bestimmung der Geogitterlänge kann der unter Kapitel 5.4 vorgestellte Ansatz verwendet werden. Ziel sollte es sein weitere Erkenntnisse zu erlangen und Lastfiguren zur Erddruckumlagerung zu erstellen.

Literaturverzeichnis

Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben". EAB (2013). 5., ergänzte und erweiterte Auflage, 1. korrigierter Nachdruck. Berlin: Ernst & Sohn.

A. Ruiken (2013): Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Verbundbaustoffs „geogitterbewehrter Boden“. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen. Fakultät für Bauingenieurwesen.

Arbeitsausschuß "Üfereinfassungen", Hafenbautechnische Gesellschaft e.V.; Arbeitskreis 2.2 "Üfereinfassungen", Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Üfereinfassungen - Häfen und Wasserstraßen" - EAU 2004. 10. Aufl.

Arbeitsausschuss "Üfereinfassungen"; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik; Wilhelm Ernst & Sohn (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Üfereinfassungen". Häfen und Wasserstraßen EAU 2012. 11. vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Ernst & Sohn. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10692126>.

C. Jenner (2009): Significant Developments over the Last 25 Years. In: Jubilee Symposium Polymer Geogrid Reinforcement (1-10).

Deltares (2020): TKI- Geogrid anchorage sheet pile walls 6th meeting experiments Deltares. Technische Universität Delft. Delft, 13.01.2020.

E. M. Palmeira (1987): The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests. Dissertation. University of Oxford, Magdalen College.

F. Schlosser, N. T. Long (1972): Comportement de la Terre Armée dans les Ouvrages de Soutènement. 5th European. In: Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 1), S. 299–306.

F. Schlosser, P. Delage (1987): Reinforced soil retaining structures and polymeric materials. The application of polymeric reinforcement in soil retaining structures. In: Research Workshop of Polymeric Reinforcement in Soil Retaining Structures NATO Advanced, S. 3–65.

fr, Deutsche Gesellschaft (2011): Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO). Hoboken: John Wiley Sons. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=850319>.

H. Ochiai, J. Otani, S. Hayashic, T. Hirai (1996): The Pull-Out Resistance of Geogrids in Reinforced Soil. In: Geotextiles and Geomembranes 1996 (Vol. 14), S. 19–42.

H. Vidal (1969): The Principle of Reinforced Earth. In: Geotechnical Special Publication (Vol. 118 (2)), 1331–1346.

I. Yogarajah (1993): Effects of Construction Procedures on the Behaviour of Geogrid Reinforced Soil Walls. Ph.D.-Thesis. University of Strathclyde, Glasgow. Dept. of Civil Engineering. M. Matys, R. Baslik (2004): Study of Interlocking Effect by the Push Test. In: GeoAsia2004.

M. R. Husemann, I. K. Lee: Strength characteristics of reinforced soil. Int. Symposium: New Horizons in Construction Materials. In: Envo Publ Co, Inc, Lehigh 1976 (Vol. 1), S. 165–176. R. A. Jewell (1985): Limit Equilibrium Analysis of Reinforced Soil Walls. In: Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (11th Int. Conference), S. 1705–1708. Rügger, Rudolf; Hufenus, Rudolf (Hg.) (2003): Bauen mit Geokunststoffen. Ein Handbuch für den Geokunststoff-Anwender. St. Gallen: SVG.

S. Q. Lou, S. A. Tan, K. Y. Young (2000): Pull-out resistance mechanism of a soil nail reinforcement in dilative soils. In: Soils and Foundations (Vol. 40), S. 47–56.

S. Spingher (2018): Modellvalidierung einer mit Geogittern rückverankerten Arbeitsplattform zum Bau von Offshorewindenergieanlagen. Master's thesis. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften.

W. Müller (2011): Zur Bemessung der Verankerung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff beim Schutz von Böschungen vor hangparallelem Gleiten. In: Bautechnik (Vol. 88 Heft 6), S. 347–361.

Y. Derin (2019): Untersuchung des Tragverhaltens mit Geogittern rückverankerter Spundwände. Bachelor thesis, Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften.

Z. Yang, A. Singh (1974): Strength and deformation characteristics of reinforced sand. In: ASCE National Meeting on Water Resources Engineering.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Bochum, Datum

Name