Peter-Andreas v. Wolffersdorff

DOI: 10.1002/gete.201700002

Informationen und Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“

Modellierung von Geogittern bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode

Vorwort

Der Arbeitskreis (AK) 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ hat sich das langfristige Ziel gesetzt, Empfehlungen, die dem Stand der Technik unter Einbeziehung eines wissenschaftlichen Vorlaufs entsprechen, zu erarbeiten (s. a. http://ak16.arbeitskreis-dggt.de/). Es hat sich dabei als zweckmäßig erwiesen, im Unterschied zu den bisherigen Empfehlungen, die als Gesamtempfehlungen [1] vorliegen, enger gefasste Themen zu behandeln. Der Arbeitskreis strebt an, dass diese neuen Empfehlungen regelmäßig und in kürzeren Abständen in der Zeitschrift geotechnik erscheinen. Mit den hier vorliegenden Empfehlungen, die sich mit der Modellierung von Geogittern bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode beschäftigen, wird diese neue Reihe gestartet.

Die Empfehlungen bauen auf den EANG [1] auf und enthalten darüberhinausgehende Erläuterungen zur genannten Thematik.

Es werden Zuschriften mit Ergänzungen und Hinweisen bis Ende Juli 2017 erbeten.

Obmann
Prof. Dr.-Ing. habil. *Peter-Andreas von Wolffersdorff*

1 Anwendungsbereich

Die folgenden Informationen und Empfehlungen befassen sich mit der Modellierung von Geogittern als Tragelemente bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) für geotechnische Aufgabenstellungen.

Die verschiedenartigen Konstruktionen, bei denen Geogitter zum Einsatz kommen, werden insoweit behandelt, wie es im Zusammenhang mit der Modellierung von Geogittern notwendig ist.

2 Einführende Erläuterungen

Bei der Modellierung von Geogittern ist zwischen zwei verschiedenen Belastungsarten zu unterscheiden:

1. Belastung des Geogitters vorwiegend parallel zur Tragrichtung des Geogitters (Bild 1, links),
2. Belastung des Geogitters vorwiegend senkrecht zur Tragrichtung des Geogitters (Bild 1, rechts).

Folgende in den Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO [2] genannte Konstruktionsart ist der ersten Belastungsart zuzuordnen:
– Stützkonstruktion mit bewehrten Erdkörpern.

Folgende in [2] genannten Konstruktionsarten sind der zweiten Belastungsart zuzuordnen:
– bewehrte Gründungspolster,
– bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern,
– geokunststoffummantelte Säulen,
– Überbrücken von Erdeinbrüchen.

Folgende in [2] genannten Konstruktionsarten sind nicht eindeutig den beiden Belastungsarten zuordenbar:
– Dämme auf wenig tragfähigem Baugrund,
– oberflächenparallele Bewehrungen im Deponiebau.

Im Hinblick auf die Modellierung von Geogittern mit der Finite-Elemente-Methode werden die folgenden Erläuterungen zum Materialverhalten von Geogittern – gemäß EBGEO auch Kraft-Dehnungs-Verhalten genannt – gegeben:

– Das Tragverhalten ist entsprechend den orthogonalen, kreuzweise verbundenen Geogittersträngen axial geprägt. *Einaxiale Geogitter* besitzen einen Hauptstrang, der die Hauptzugrichtung (auch Längsrichtung genannt) repräsentiert, und einen Nebenstrang (auch Querrichtung genannt), der im Vergleich zum Hauptstrang weicher ist und eine geringere Kraft aufnehmen kann. *Biaxiale Geogitter* haben zwei Hauptstränge, d. h. zwei Hauptzugrichtungen mit gleichem Kraft-Dehnungs-Verhalten.
– Das Kraft-Dehnungs-Verhalten ist in allen Tragrichtungen nichtlinear. Sowohl das Dehnungsverhalten als auch die aufnehmbaren Zugkräfte sind zeitabhängig. In Bild 2 ist das nichtlineare, zeitabhängige Kraft-Dehnungs-Verhalten von Geogittern schematisch dargestellt.
– Gemäß EBGEO wird zwischen Kurz- und Langzeitverhalten mit folgenden charakteristischen Werten (Index k) unterschieden:
  - Kurzzeitdehnsteifigkeit J_{k0} in Verbindung mit der Kurzzeitzugfestigkeit R_B, k_0,
  - Langzeitdehnsteifigkeit $J_{k,t}$ in Verbindung mit der Langzeitzugfestigkeit $R_{B,k}$.

 © Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

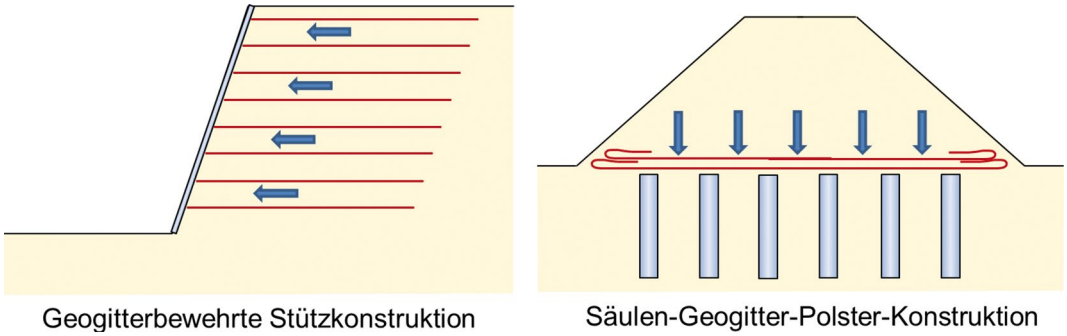

Bild 1. Beispiele für geogitterbewehrte Konstruktionen mit unterschiedlichen Belastungsrichtungen der Geogitter
Fig. 1. Examples for geogrid reinforced constructions with different loading directions to the geogrids

Diese Kenngrößen sowie geeignete elastische und plastische Modellierungen für die Anwendung der FEM sind in Bild 2 dargestellt. Zur Bestimmung bzw. Festlegung der o.g. Dehnsteifigkeiten und Zugfestigkeiten wird auf die EBGEO verwiesen.

Geogitter können bei dreidimensionaler Betrachtung grundsätzlich mit den folgenden Typen von Strukturelementen modelliert werden (s. Bild 3):

- *eindimensionale Elemente*, kreuzweise angeordnet in Abständen der Geogittermaschenweiten, mit Dehnsteifigkeiten und Biegesteifigkeiten für die einzelnen Geogitterstränge in beiden axialen Richtungen entsprechend des zu modellierenden Geogitters,
- *zweidimensionale Membranelemente* mit Dehnsteifigkeiten ohne Biegesteifigkeiten,
- *zweidimensionale Schalenelemente* mit Dehnsteifigkeiten und Biegesteifigkeiten.

Im Anhang werden die drei o.g. Modellierungsmöglichkeiten anhand eines einfachen Berechnungsbeispiels demonstriert. Die Biegesteifigkeit ist beim realen Tragverhalten der Geogitter von untergeordneter Bedeutung. Für sie muss aber in Abhängigkeit von der Elementart bei der numerischen Berechnung ein kleiner fiktiver Wert eingegeben werden, damit die Berechnung stabil ist. Die Biegesteifigkeit darf nicht zu groß sein, damit sie nicht dazu führt, dass rechnerisch Biegemomente Teile des Lastabtrags übernehmen, die später gar nicht nachgewiesen werden können. Das Gleiche gilt für die Schubsteifigkeit, die bei Membranelementen angegeben sein muss, aber in der Realität bei Geogittern nicht vorhanden ist.

Für dreidimensionale (3D) Finite-Elemente-Modellierungen können bei Anwendung der in Bild 3 dargestellten drei Modellierungsmöglichkeiten unter Annahme linearelastischen Verhaltens die anisotropen Material- bzw. Struktureigenschaften der Geogitter wie folgt definiert werden:

- Dehnsteifigkeiten der Geogitterstränge $E_{Strang,i} \cdot A$,
- Biegesteifigkeiten der Geogitterstränge $E_{Strang,i} \cdot I$,
- Dehnsteifigkeiten der Geogitter $J_i = (E \cdot A)_i$ bzw. $E_i \cdot A$,
- Biegesteifigkeiten der Geogitter $E_i \cdot I$

Dabei bezeichnet der Index i die beiden Tragrichtungen 1 und 2 des Geogitters.

Für die verschiedenen einzelnen Modellierungsarten gilt (s. Bild 4):

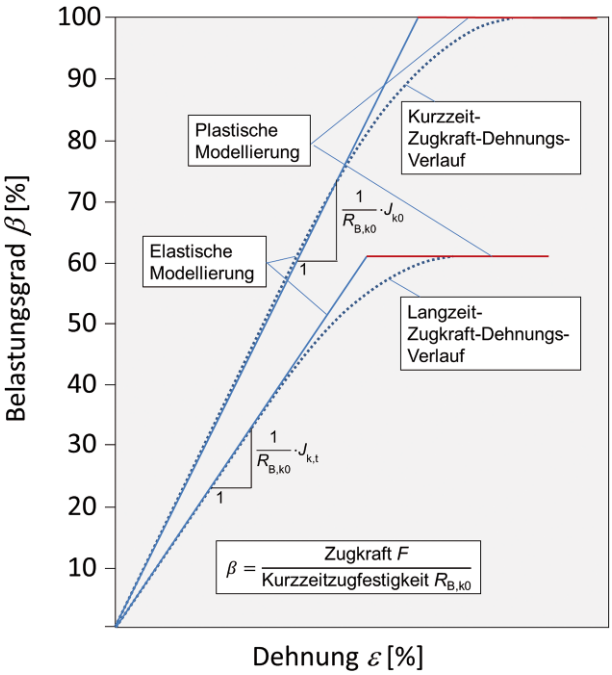

Bild 2. Beispielhafte Modellierungen des nichtlinearen, zeitabhängigen Belastungs-Dehnungs-Verhaltens von Geogittern
Fig. 2. Exemplary modelling of a non-linear, time-dependent stress-strain behaviour of geogrids

- Biaxiale Geogitter mit eindimensionalen Elementen: Dehn- und Biegesteifigkeiten der Geogitterstränge mit $E_{Strang,2} = E_{Strang,1}$.
- Einaxiale Geogitter mit eindimensionalen Elementen: Dehn- und Biegesteifigkeiten der Geogitterstränge mit $E_{Strang,2} \neq E_{Strang,1}$.
- Biaxiale Geogitter mit zweidimensionalen Membranelementen: Anisotropes Materialverhalten mit Dehnsteifigkeiten mit $J_2 = J_1$ und $G_{12} = G_{13} = G_{23} \approx 0$ sowie $\nu_{12} = 0$.
- Einaxiale Geogitter mit zweidimensionalen Membranelementen: Anisotropes Materialverhalten mit Dehnsteifigkeiten mit $J_2 \neq J_1$ und $G_{12} = G_{13} = G_{23} \approx 0$ sowie $\nu_{12} = 0$.
- Biaxiale Geogitter mit zweidimensionalen Schalenelementen: Anisotropes Materialverhalten mit Dehn- und Biegesteifigkeiten mit $E_2 = E_1$ und vernachlässigbar klei-

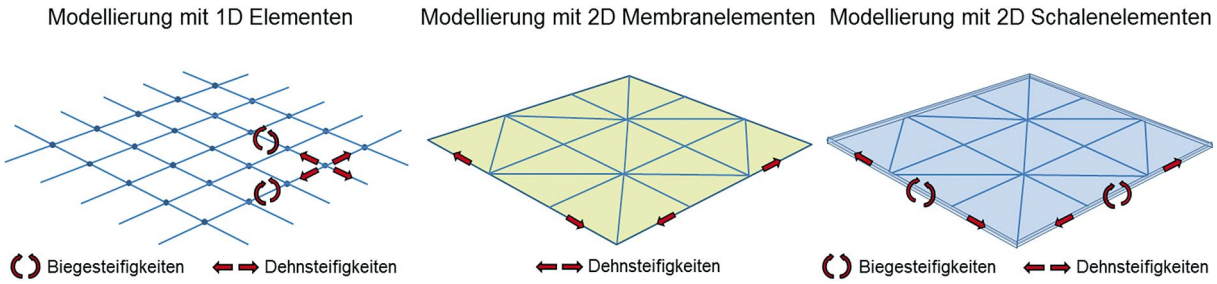

Bild 3. Modellierung von Geogittern mit eindimensionalen (1D) Elementen sowie mit zweidimensionalen (2D) Membran- und Schalenelementen
Fig. 3. Modelling of geogrids with one-dimensional (1D) elements as well as two-dimensional (2D) membrane and shell elements

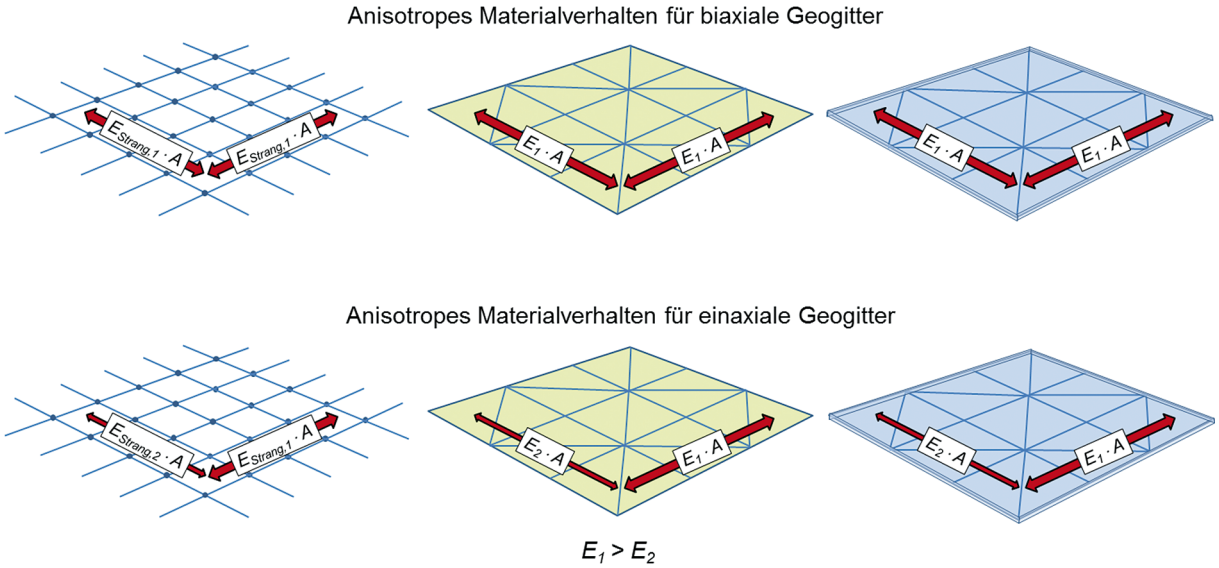

Bild 4. Material- und Struktureigenschaften biaxialer und einaxialer Geogitter bei der Modellierung mit eindimensionalen Elementen sowie mit zweidimensionalen Membran- und Schalenelementen
Fig. 4. Material and structural properties of biaxial and uniaxial geogrids in case of modelling with one-dimensional elements as well as with two-dimensional membrane and shell elements

nen Schubsteifigkeiten mit $G_{12} = G_{13} = G_{23} \approx 0$ sowie $\nu_{12} = 0$.

– Einaxiale Geogitter mit zweidimensionalen Schalenelementen:
  Anisotropes Materialverhalten mit Dehn- und Biegesteifigkeiten mit $E_2 \neq E_1$ und vernachlässigbar kleinen Schubsteifigkeiten mit $G_{12} = G_{13} = G_{23} \approx 0$ sowie $\nu_{12} = 0$.

Anhand des im Anhang enthaltenen Berechnungsbeispiels wird gezeigt, wie bei Anwendung von Schalen- oder Membranelementen anisotropes Materialverhalten für biaxiale und einaxiale Geogitter modelliert werden kann und welche Auswirkungen diese verschiedenen Modellierungen und unterschiedlichen Ansätze für das Materialverhalten auf die berechneten Verformungen und Schnittgrößen des Geogitters haben. Das Berechnungsbeispiel demonstriert außerdem die Auswirkungen von fehlerhaften bzw. nichtplausiblen Eingabewerten bzw. Modellierungen, z. B. nicht realistisches isotropes Materialverhalten.

Das Interaktionsverhalten zwischen Geogittern und Boden ist i. d. R. dadurch maßgeblich charakterisiert, dass sich eine Verzahnung der Bodenpartikel zwischen den Geogitteröffnungen einstellen kann und somit ein besonderes Verbundverhalten entsteht.

In diesem Sinne kann das Interaktions- bzw. Verbundverhalten zwischen Geogittern und umgebendem Boden bei der Anwendung von Membran- bzw. Schalenelementen wie folgt modelliert werden:

– direkter Verbund der Strukturelemente mit den angrenzenden Kontinuumselementen des umgebenden Bodens,
– Anordnung von Interface-Elementen bzw. Kontaktformulierungen zwischen den Strukturelementen und den angrenzenden Kontinuumselementen für den Boden; ggf. Zuweisung von gesonderten Materialeigenschaften für die Interface-Elemente.

3 Empfehlungen

3.1 Berechnung und Diskretisierung

(1) Finite-Elemente-Berechnungen für die hier beschriebenen Modellierungsmethoden von Geogittern sind grundsätzlich geometrisch nichtlinear durchzuführen. Die geometrische Nichtlinearität ist dadurch definiert, dass bei der Berechnung von dem jeweiligen Verformungszustand des FE-Modells ausgegangen wird und die sich daraus er-

gebenden Dehnungen und Starrkörperdrehungen schrittweise berücksichtigt werden. Diese Berechnungsweise wird auch als Berechnung mit endlich großen Verformungen (Berechnung am verformten Netz) bezeichnet. Diese Empfehlung gilt sowohl für 2D- als auch für 3D-FE-Modellierungen.

(2) Bei der Modellierung von Geogittern mit eindimensionalen Elementen zu einem zusammenhängenden Gitternetz, welche eine 3D-FE-Modellierung voraussetzt, ergeben sich infolge der i. d. R. sehr kleinen Gitterweiten entsprechend feine FE-Netze im Bereich des Geogitters. Es ist zu vermeiden, dass die Steifigkeit der angrenzenden Bodenelemente durch die gekoppelten Balken überschätzt wird. Dies tritt vor allem auf, wenn die Größe der Bodenelemente der Größe der Gittermaschen entspricht, sodass der Boden hier entsprechend feiner diskretisiert werden sollte.

(3) Bei der Modellierung von Geogittern mit Schalen- oder Membranelementen mit oder ohne Kontaktformulierung bzw. Interface-Elementen zwischen Geogitterelementen und umgebenden Bodenelementen ergeben sich für Berechnungen im Gebrauchszustand keine erhöhten Anforderungen an die Feinheit des FE-Netzes im Bereich der Geogitterelemente.

3.2 Modellierung mit eindimensionalen Elementen

(1) Da die Struktur des Geogitters mit einzelnen Balken als ein zusammenhängendes Gitternetz nachgebildet wird, ist es die detaillierteste, jedoch auch aufwendigste Vorgehensweise zur Modellierung von Geogittern mit einem sehr feinen 3D-FE-Netz im Bereich des Geogitters. Eine derart detaillierte Modellierung empfiehlt sich bei Untersuchungen mit stark begrenzter Modellgröße und zur Analyse des Geogitters selbst, jedoch nicht für numerische Analysen von geotechnischen Konstruktionen mit Geogittern.

(2) Die lokalen Materialeigenschaften des Gittermaterials (einzelne Geogitterstränge) werden den Balkenelementen zugewiesen, und die Eigenschaften der Gesamtgitterstruktur ergeben sich implizit aus dem Netz aus Balken. Es ist zu prüfen, ob die Eigenschaften des modellierten Gitters den Eigenschaften des abzubildenden Geogitters entsprechen.

3.3 Modellierung mit Membranelementen

(1) Die Modellierung mit Membranelementen stellt eine einfache und effiziente Art zur Abbildung von Geogittern dar. Der Vorteil des Membranelements liegt darin, dass es nur Kräfte in der Elementebene aufnehmen kann. Somit kann die Biegesteifigkeit des Geogitters nicht überschätzt werden. Es ist zu kontrollieren, ob in einzelnen Bereichen der Membranelemente rechnerisch Druckkräfte ermittelt werden. In diesem Fall ist zu überprüfen, ob solche Kräfte vom jeweiligen Geogitter aufgenommen werden können. Andernfalls ist die Berechnung mit angepassten Dehnsteifigkeiten zu wiederholen, die einen Ausfall des Geogitters im betreffenden Bereich simulieren.

(2) Bei 3D-FE-Modellierungen dürfen keine isotropen Materialeigenschaften für die mit Membranelementen modellierten Geogitter angesetzt werden. Je nach der Tragwirkung der Geogitter sind die in Abschnitt 2 beschriebenen anisotropen Material- bzw. Struktureigenschaften in der Elementebene zu verwenden. Die globalen Materialeigenschaften des tatsächlichen Geogitters, wie z. B. Dehnsteifigkeiten, werden den Membranelementen direkt zugewiesen.

3.4 Modellierung mit Schalenelementen

(1) Die Modellierung von Geogittern mit Schalenelementen ist der Modellierung mit Membranelementen sehr ähnlich und für numerische Analysen von geotechnischen Aufgabenstellungen mit Geogitterkonstruktionen geeignet. Da die Schalenelemente jedoch zusätzlich Biegemomente übertragen, ist darauf zu achten, dass bei der Modellierung keine unzulässig großen Biegemomente auftreten. Dies kann dadurch realisiert werden, indem linear-elastische Biegesteifigkeit der Elemente sehr gering angesetzt wird.

(2) Es gelten die in Abschnitt 3.3 (2) gegebenen Aussagen sinngemäß.

3.5 Modellierung des Kurzzeit- und Langzeitverhaltens von Geogittern

(1) Da i. d. R. spezielle Stoffmodelle für Geogitter, mit denen das nichtlineare, zeitabhängige Dehnungs- und Bruchverhalten erfasst werden kann, nicht verfügbar sind, sollten bei Spannungs-Verformungs-Berechnungen im Sinne von Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen linearisierte Material- bzw. Struktureigenschaften im Sinne linear-elastischen Verhaltens (Dehnsteifigkeiten gemäß Bild 2 oder gemäß EBGEO bzw. daraus abgeleitete Ersatzsteifigkeiten) den Membran- oder Schalenelementen unter Beachtung der in Abschnitt 3.3 (2) und 3.4 (2) gegebenen Empfehlungen zugewiesen werden. Bei der Verwendung von eindimensionalen Elementen sind diesen Elementen dementsprechende lokale Materialeigenschaften des Gittermaterials (einzelne Geogitterstränge) zuzuweisen.

(2) Für Spannungs-Verformungs-Berechnungen mit Geogittern ist es i. d. R. ausreichend, die beiden Grenzfälle „Kurzzeitverhalten“ und „Langzeitverhalten“ als zwei separate Berechnungsläufe durchzuführen. Unter Beachtung von (1) sind in den jeweiligen Berechnungsläufen linearisierte Material- bzw. Struktureigenschaften für Kurzzeit- und Langzeitverhalten im Sinne linear-elastischen Verhaltens Kurzzeit- bzw. Langzeitdehnsteifigkeiten $J_{i,0}$ bzw. $J_{i,t}$ gemäß Bild 2 oder EBGEO anzusetzen.

(3) Bei Berechnungen, die auch plastisches Verhalten von Geogittern einschließen, kann das nichtlineare zeitabhängige Dehnungs- und Bruchverhalten von Geogittern vereinfacht als linear-elastisches, ideal-plastisches Verhalten mit zugewiesenen Bruchfestigkeiten des Geogitters $R_{B,i}$ modelliert werden. Gemäß (2) sind für die jeweiligen Berechnungen Kurzzeitbruchfestigkeiten $R_{B,i0}$ bzw. Langzeitfestigkeiten $R_{B,i}$ vorzugeben.

3.6 Modellierung des Verbundverhaltens von Geogitterelementen und umgebenden Bodenelementen

(1) Für Berechnungen von Gebrauchszuständen ist eine direkte Kopplung der Strukturelemente des Geogitters mit den angrenzenden Bodenelementen i. d. R. ausreichend.

(2) Treten in der Umgebung der Geogitter größere plastische Verformungen im Boden auf, kann es zweckmäßig sein, die Interaktion zwischen Strukturelementen und angrenzenden Bodenelementen durch Kontaktformulierungen bzw. durch Interface-Elemente abzubilden.

Anhang

Vergleichsberechnungen für das Tragverhalten von Geogittern anhand von 3D-Finite-Elemente-Modellierungen

A.1 Vorbemerkungen

Das im Folgenden dokumentierte Berechnungsbeispiel gibt die Simulation eines fiktiven Modellversuchs wieder, bei dem ein Geogitter, das auf einer festen Unterlage aufliegt, durch eine gleichmäßige Flächenlast senkrecht zu seinen Tragrichtungen belastet wird. Durch Generierung eines kreisrunden Lochs in der Unterlage wird in diesem Bereich die Flächenlast auf das Geogitter wirksam, und es wird so gleichmäßig beansprucht, dass das axial geprägte Tragverhalten von Geogittern analysiert werden kann.

Der Zweck dieses fiktiven Modellversuchs besteht nur darin, das axial geprägte Tragverhalten von Geogittern zu simulieren und zu analysieren. Es handelt sich hierbei um keine geotechnische Modellierung, in der die Interaktion zwischen Geogitter und angrenzendem Boden betrachtet wird. Somit kommen auch keine bodenmechanischen Stoffmodelle zur Anwendung. Die feste Unterlage wird zweckmäßigerweise als linear-elastisch angenommen.

A.2 3D-Finite-Elemente-Modelle

Es wurden drei verschiedene 3D-FE-Modelle für den fiktiven Modellversuch erstellt. Sie unterschieden sich prinzipiell durch die verschiedenen Modellierungsarten für Geogitter. Dabei wird das jeweilige Geogittermodell auf eine 1 m dicke linearelastische Basisschicht aufgebracht. Da die gewählte Flächenlast von 50 kN/m^2 nicht numerisch stabil direkt auf die Geogittermodelle aufgebracht werden kann, wurde zwischen dem Geogitter und der Flächenlast eine 10 cm dicke Ausgleichsschicht, deren Materialverhalten mit dem linear-elastischen, ideal-plastischen Mohr-Coulomb-Modell beschrieben wird, angeordnet. Die Beanspruchung des Geogitters wird bei aktivierter Flächenlast von 50 kN/m^2 erzeugt, indem ein kreisrundes Loch mit einem Durchmesser von 2 m in der linear-elastischen Basisschicht generiert wird.

Bild A.1 zeigt die 3D-Berechnungsmodelle im Endzustand bei vorhandenem Loch und deformiertem Geogitter infolge aufgebrachter Auflast.

Zur Minimierung des Berechnungs- und Auswertungsaufwands wurden zwei durch den Lochmittelpunkt orthogonal verlaufende Symmetrieachsen zugrunde gelegt, sodass die jeweiligen 3D-FE-Modelle sich auf ein Viertel des Lochs mit einem angrenzenden Berechnungsausschnitt von 5 × 5 m erstrecken.

Im oberen Teil von Bild A.1 ist links die Modellierung des Geogitters mit Balkenelementen abgebildet. Da die realistische Abbildung des Geogitters ein extrem aufwendiges, sehr kleinmaschiges Netz zur Folge gehabt hätte, wurde vereinfachend ein gröberes Raster von 10 × 10 cm verwendet.

Im oberen Teil von Bild A.1 sind ebenfalls die Modellierungen der Geogitter mit Schalenelementen (in der Mitte blau) sowie mit Membranelementen (rechts gelb) dargestellt.

A.3 Berechnungsablauf, Materialparameter und Berechnungsvarianten

Die folgenden Erläuterungen zum Berechnungsablauf gelten für alle drei verwendeten 3D-FE-Modelle. Dabei wurde von folgender Ausgangsgeometrie ausgegangen: linear-elastische Basisschicht ohne Loch, Geogitter, linear-elastische, ideal-plastische Ausgleichsschicht ohne Auflast. Der Berechnungsablauf erfolgte in insgesamt fünf Schritten:

Initialphase:	Initialisierung der Spannung nach K0-Prozedur für die Ausgangsgeometrie,
Phase 2:	Nullschritt zur Gewährleistung des Kräftegleichgewichts,
Phase 3:	Erzeugung des Lochs in der Basisschicht,
Phase 4:	Aufbringen einer Auflast von 5 kN/m^2,
Phase 5:	Steigerung der Auflast auf 50 kN/m^2.

Alle Berechnungsschritte wurden unter Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität durchgeführt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Auflast in zwei Schritten (Phasen 4 und 5) aufzubringen.

In Tabelle A.1 sind die Materialparameter für die elastische Basisschicht und für die linear-elastische, ideal-plastische Ausgleichsschicht angegeben.

In Tabelle A.2 bis A.4 sind die Materialparameter für die Schalen-, Membran- und Balkenelemente angegeben. Hierbei gelten die in Abschnitt 2 der Empfehlungen angegebenen Bezeichnungen und Definitionen für die anisotropen Elastizitätsparameter.

Für alle drei Modellierungsvarianten der Geogitter wurden Vergleichsberechnungen mit Materialparametern für jeweils ein biaxiales und ein einaxiales Geogitter durchgeführt. Um den Einfluss der in den Schalen- und Balkenelementen enthaltenen Biegesteifigkeit zu quantifizieren, wurden weitere Berechnungsvarianten mit unterschiedlichen Dicken der Schalen- bzw. Balkenelemente durchgeführt. Darüber hinaus wurden Vergleichsberechnungen mit Schalenelementen mit linearelastisch, isotropem Verhalten durchgeführt, um zu zeigen, dass ein solches Materialverhalten für die Modellierung von Geogittern ungeeignet ist.

Gemäß den o. g. Varianten für das Tragverhalten von Geogittern und unterschiedlicher Dicken haben sich insgesamt 39 Berechnungsvarianten ergeben.

Grundsätzlich hat die in den Schalen- und Balkenelementen enthaltene Biegesteifigkeit mehr oder weniger starken Einfluss auf das Tragverhalten der Schalenelemente bzw. auf die Tragstruktur eines Geogitters aus sich kreuzenden Balkenelementen.

A.4 Ausgewählte Berechnungsergebnisse

Eine weitgehend vollständige Berechnungsdokumentation, wie sie vom AK 1.6 in der EANG gefordert ist, wird

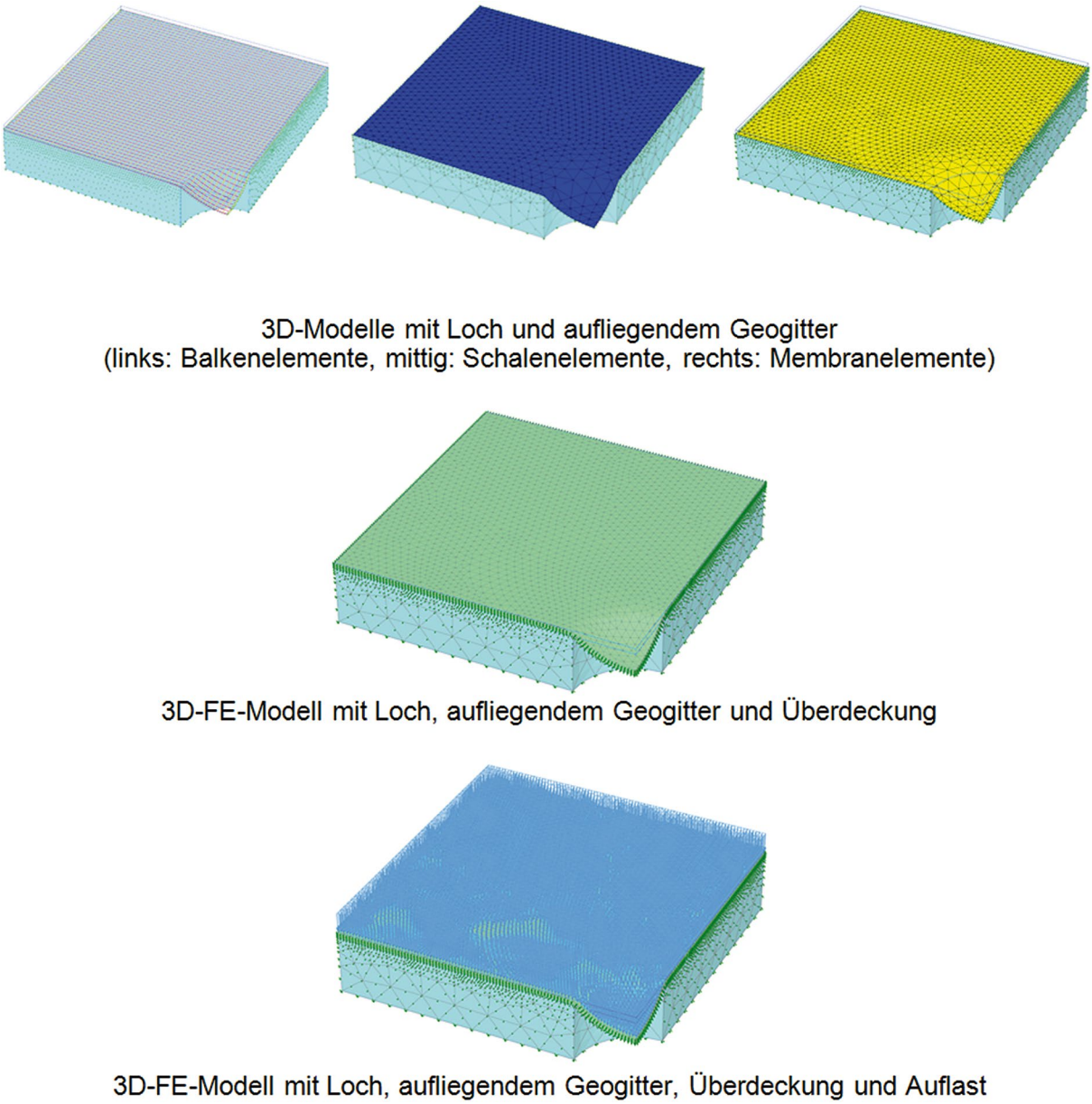

Bild A.1. 3D-FE-Modelle für die Vergleichsberechnungen – oben: 3D-Modelle mit Loch und aufliegendem Geogitter; Balkenelemente (links), Schalenelemente (Mitte), Membranelemente (rechts); Mitte: 3D-FE-Modell mit Loch, aufliegendem Geogitter und Überdeckung; unten: 3D-FE-Modell mit Loch, aufliegendem Geogitter, Überdeckung und Auflast
Fig. A.1. 3D finite element models for comparative calculations – top: 3D models with hole and overlying geogrid; beam elements (left), shell elements (center), membrane elements (right); center: 3D finite element model with hole, overlying geogrid and cover; bottom: 3D finite element model with hole, overlying geogrid, cover and surcharge

hier nicht vorgenommen, da hier nur die Auswirkungen der unterschiedlichen Ansätze aufgezeigt werden sollen.

Im Bild A.1 sind beispielhaft für die drei verschiedenen 3D-FE-Modelle die deformierten Netze im Endzustand nach Aufbringen der Auflast dargestellt.

Die Ergebnisauswertung beschränkt sich im Folgenden für die drei verschiedenen Modellierungsvarianten nur auf den maximalen Durchhang der Geogitter und die orthogonal zueinander liegenden Geogitterzugkräfte bzw. die jeweils maximale Geogitterzugkraft.

Bild A.2 zeigt beispielhaft bei Anwendung von Schalenelementen mit einer ausgewählten Dicke den Verlauf der Normalkräfte in den Geogittern bei einaxialem und biaxialem Tragverhalten. Die Normalkräfte wurden bezüglich eines sich drehenden Koordinatensystems ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass sich die Normalkräfte N_1 und N_2 bei der Drehung des Koordinatensystems ändern und bei einer Drehung um 90° genau den entgegengesetzten Kräfteverlauf aufweisen. Auf diese Weise wird das vordefinierte axiale Tragverhalten des Geogitters offensichtlich.

Im Unterschied dazu ist in Bild A.3 der Verlauf der beiden Normalkräfte N_1 und N_2 unter der Annahme linear-elastisch isotropen Materialverhaltens dargestellt. Die Kräfteverläufe sind hier unabhängig von der Drehung des Koordinatensystems. Ein solches Verhalten entspricht nicht annähernd dem realen Tragverhalten der Geogitter, da hier abweichend von dem realen Tragverhalten von Geogittern die Schubsteifigkeit abgebildet wurde.

Tabelle A.1. Materialparameter für die Basis- und Ausgleichsschicht
Table A.1. Material parameters for the base and compensating layer

Materialparameter		Ausgleichsschicht (d = 0,1 m) elasto-plastisches MC-Modell	Basisschicht (d = 1,0 m) linear-elastisches Modell
γ	[kN/m³]	19	19
ν	[–]	0,2	0,2
G	[kN/m²]	8.333	8.333
c	[kN/m²]	0,1	–
φ	[°]	35	–
ψ	[°]	0	–
K_0	[–]	0,4264	–

Tabelle A.2. Materialparameter für Schalenelemente
Table A.2. Material parameters for shell elements

Materialparameter linearelastisches Modell		Dicke d [m]	Schale isotrop	Schale biaxial (orthotrop)	Schale einaxial (anisotrop)
E_1	[kN/m²]	0,0055	363.600		
		0,01	200.000		
		0,025	80.000		
		0,05	40.000		
		0,075	26.667		
		0,1	20.000		
		0,15	13.333		
		0,2	10.000		
E_2	[kN/m²]	0,0055	363.600		36.360
		0,01	200.000		20.000
		0,025	80.000		8.000
		0,05	40.000		4.000
		0,075	26.667		2.667
		0,1	20.000		2.000
		0,15	13.333		1.333
		0,2	10.000		1.000
$G_{12} = G_{13} = G_{23}$	[kN/m²]	0,0055	181.800	18,18	
		0,01	100.000	10	
		0,025	40.000	4	
		0,05	20.000	2	
		0,075	13.333	1,33	
		0,1	10.000	1	
		0,15	6.667	0,67	
		0,2	5.000	0,5	
ν	[–]	–	0		

Tabelle A.3. Materialparameter für Membranelemente
Table A.3. Material parameters for membrane elements

Materialparameter linear-elastisches Modell		Membran isotrop	Membran biaxial orthotrop	Membran einaxial anisotrop
$E_1 \cdot A$	[kN/m]	2.000	2.000	200
$E_2 \cdot A$	[kN/m]	2.000	2.000	2.000
$G \cdot A$	[kN/m]	1.000	0,1	0,1

Tabelle A.4. Materialparameter für Balkenelemente
Table A.4. Material parameters for beam elements

Materialparameter linearelastisches Modell		Balken biaxial	Balken einaxial	
			Längsrichtung	Querrichtung
Anzahl pro lfd. m	[–]	10		
Querschnitt A	[m²]	0,01		
E	[kN/m²]	20.000	20.000	2.000
Dicke d/ Breite b	[m]	0,117/0,085		
		0,077/0,129		
		0,060/0,167		
		0,049/0,204		
		0,035/0,289		
		0,024/0,408		
E_{I3}/E_{I2}	[kNm]	2,3/1,2	2,3/1,2	0,23/0,12
		1,0/2,8	1,0/2,8	0,10/0,28
		0,6/4,6	0,6/4,6	0,06/0,46
		0,4/6,9	0,4/6,9	0,04/0,69
		0,2/13,9	0,2/13,9	0,02/1,39
		0,1/27,8	0,1/27,8	0,01/2,78

In den Bildern A.4 und A.5 sind die berechneten maximalen Durchhänge und maximalen Längskräfte in Abhängigkeit der Dicke der für die Modellierung der Geogitter verwendeten Finite-Elemente-Typen (alle 39 Berechnungsvarianten) dargestellt.

In den oberen Grafiken der Bilder A.4 und A.5 sind jeweils die Verläufe des Durchhangs und der Längskraft bis zu einer nicht mehr sinnvollen Dicke von 20 cm dargestellt. Die unteren Grafiken zeigen einen vergrößerten Ausschnitt für eine Dicke bis max. 7,5 cm.

Diese Ergebnisse zeigen keinen Einfluss der Ersatzdicke der Schalenelemente auf die Längskraft und den Durchhang bei einaxialem und biaxialem Tragverhalten. Weiterhin ist erkennbar, dass die Ergebnisse mit denen der Membranelemente übereinstimmen. Da nicht gesichert ist, dass die gezeigten Ergebnisse generell für beliebige Randwertprobleme gelten, wird empfohlen, nur sinnvolle Ersatzdicken von ca. 1 cm vorzugeben.

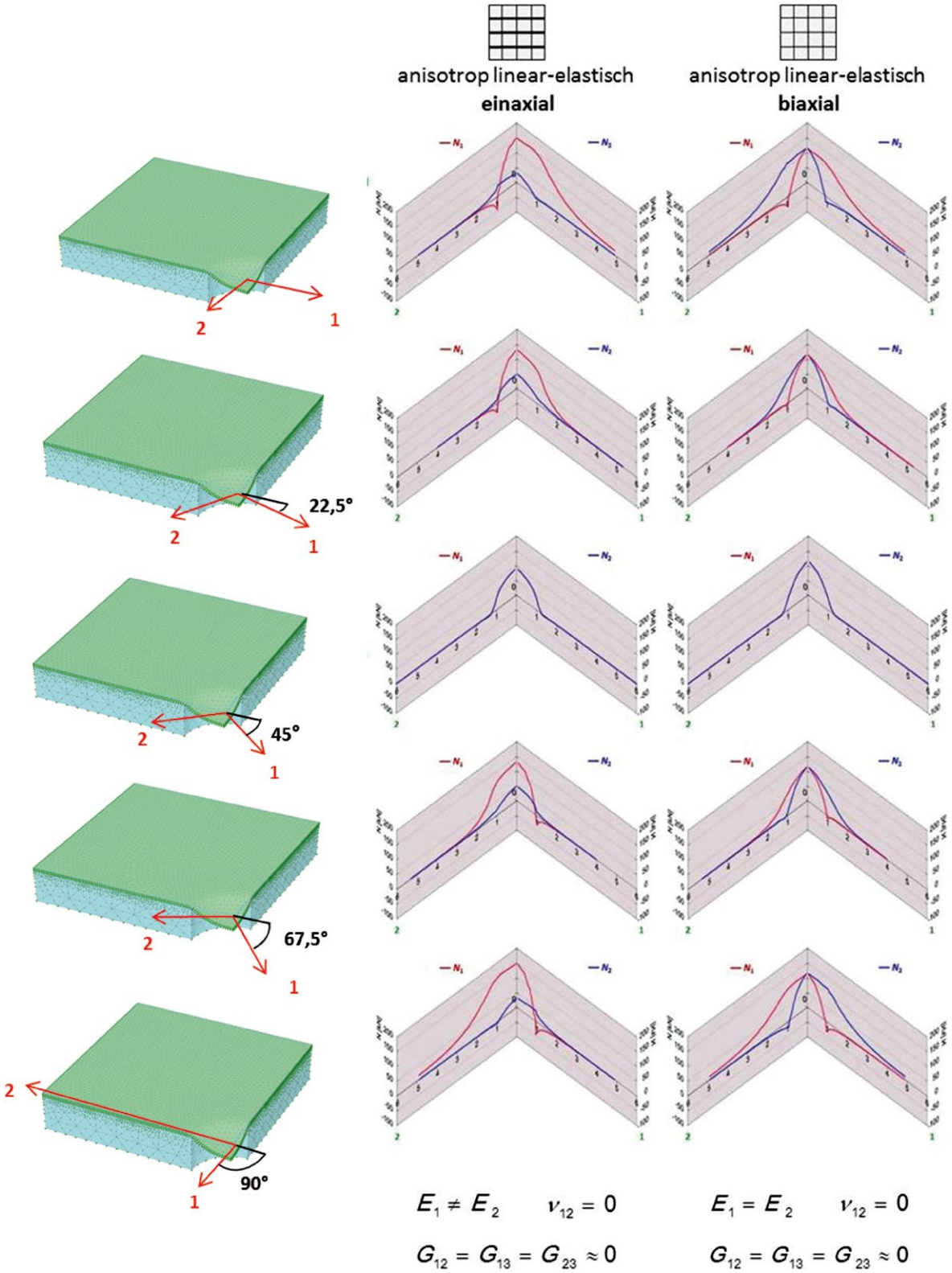

Bild A.2. Berechnungsergebnisse mit Schalenelementen – Verlauf von Längskräften bei einaxialem und biaxialem Tragverhalten bei rotierendem Bezugssystem
Fig. A.2. Results of calculations with shell elements – Development of longitudinal forces with uniaxial and biaxial bearing behaviour with rotating frame of reference

Aus den Bildern A.4 und A.5 wird weiterhin deutlich, dass bei der Verwendung von Schalenelementen mit isotropem Tragverhalten die Ersatzdicke der Schalenelemente einen Einfluss auf Durchhang und Längskräfte im Geogitter hat. Auch diese Ergebnisse bestätigen, dass Schalenelemente mit isotropen Materialeigenschaften für die Modellierung von Geogittern ungeeignet sind, da die in der Realität nicht vorhandene Schubsteifigkeit maßgeblich am Lastabtrag beteiligt ist.

Die in den Bildern A.4 und A.5 dargestellten Ergebnisse zeigen weiterhin, dass bei der Anwendung von Balkenelementen für die Modellierung von Geogittern die

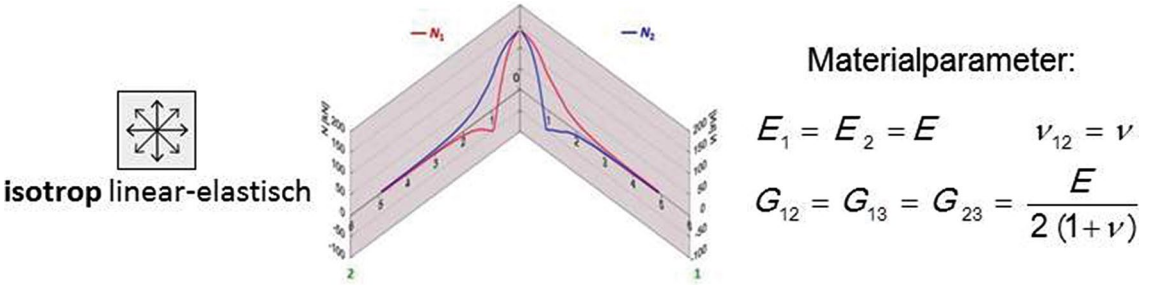

Bild A.3. Berechnungsergebnisse mit Schalenelementen – Verlauf von Längskräften bei isotropem Tragverhalten
Fig. A.3. Results of calculations with shell elements – Development of longitudinal forces with isotrope bearing behaviour

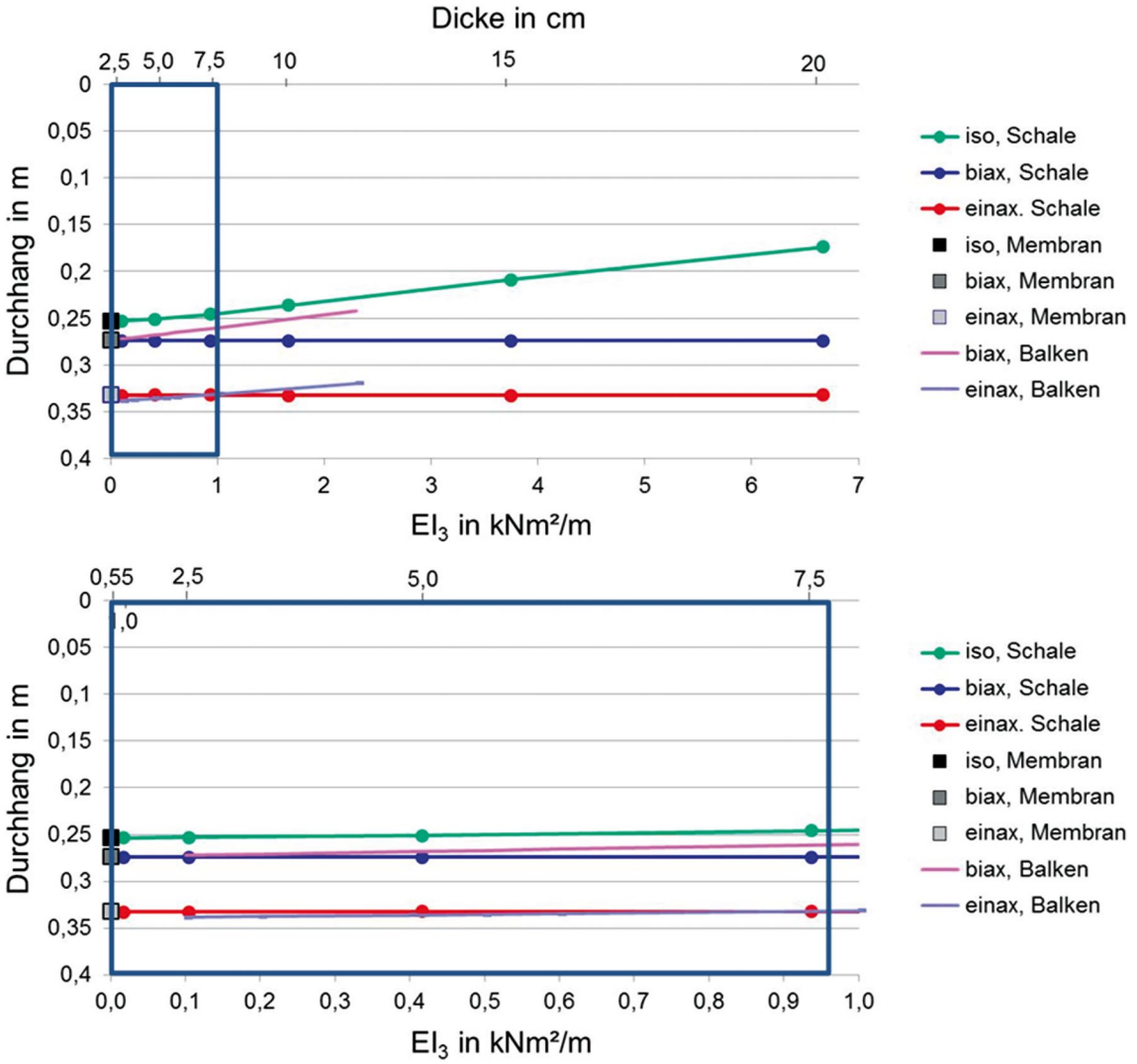

Bild A.4. Berechnete maximale Durchhänge in Abhängigkeit von der Dicke der Elementtypen für die Geogitter; Dickenbereich von 0 bis 20 cm (oben), Dickenbereich 0 bis 7,5 cm (unten)
Fig. A.4. Calculated maximum sagging in relation to the thickness of element types for geogrids, range of thickness from 0 to 20 cm (top), range of thickness from 0 to 7.5 cm (bottom)

Dicke der jeweiligen Balkenelemente die Größen des Durchhangs und der repräsentativen Geogitterlängskraft maßgeblich beeinflusst.

A.5 Bewertung der Ergebnisse

Die in Abschnitt A.4 dokumentierten maßgeblichen Berechnungsergebnisse werden in Bezug auf die Modellierung von Geogittern wie folgt bewertet:

- Bei der Verwendung von Membran- oder Schalenelementen mit isotropem Tragverhalten wird zusätzlich zum axial geprägten Tragverhalten von Geogittern die in der Realität nicht vorhandene Schubsteifigkeit berücksichtigt. Die Ergebnisse belegen, dass sie die Tragfähigkeit überschätzt und ein solches Materialverhalten für Geogitter daher ungeeignet ist.
- Bei der Verwendung von Schalenelementen für die Modellierung von Geogittern mit einaxialem bzw. biaxi-

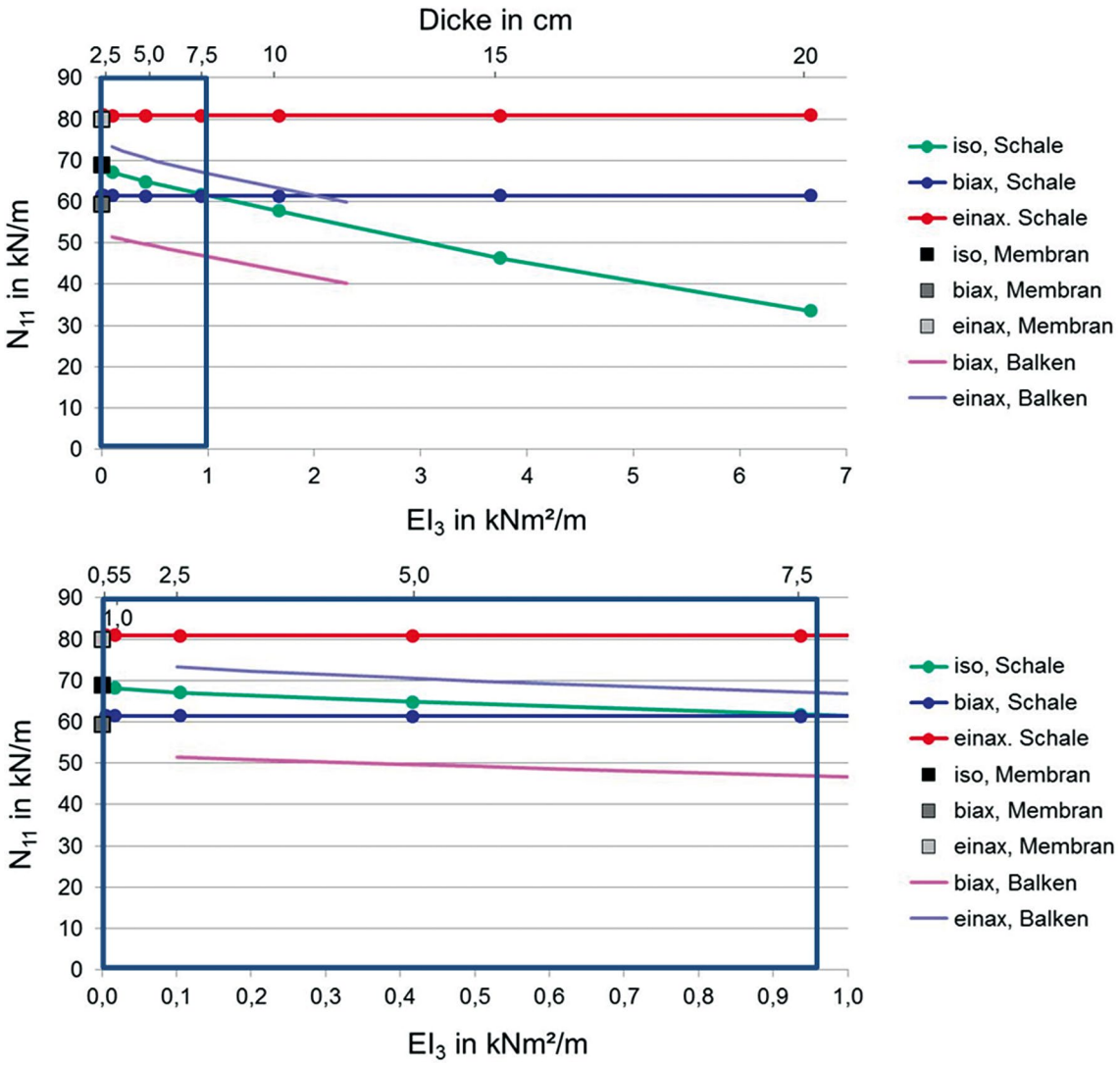

Bild A.5. Berechnete Längskräfte N_{11} in Abhängigkeit von der Dicke der Elementtypen für die Geogitter; Dickenbereich von 0 bis 20 cm (oben), Dickenbereich 0 bis 7,5 cm (unten)
Fig. A.5. Calculated longitudinal forces N11 subject to the thickness of element types for geogrids; range of thickness from 0 to 20 cm (top), range of thickness from 0 to 7.5 cm (bottom)

alem Materialverhalten und sinnvoll angesetzten, sehr kleinen Werten für die Ersatzdicke (≤ 1 cm) hat diese einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Größe der Verformungen und die Normalkräfte von Geogittern.
- Membran- und Schalenelemente mit einaxialem bzw. biaxialem Materialverhalten sind gleichermaßen für die Modellierung von Geogittern geeignet.
- Bei der Modellierung von Geogittern mit Balkenelementen gilt analog zu den Schalenelementen, dass nur eine kleine Dicke für die Balkenelemente vorgegeben werden sollte, die z. B. der realen Dicke der Geogitterstränge (< 1 cm) entspricht.

Die Berechnungen wurden unter Leitung des Obmanns Prof. *P.-A. v. Wolffersdorff* bei BAUGRUND DRESDEN durchgeführt und ausgewertet. Hierfür wurde die Software PLAXIS 3D verwendet. Vergleichende Berechnungen mit der Software TOGNOG wurden unter Leitung des Arbeitskreismitglieds Prof. *O. Reul* an der Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik vorgenommen. Die Berechnungsergebnisse der Universität Kassel ergaben eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den hier gezeigten Ergebnissen und belegen somit deren Plausibilität.

Literatur

[1] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (Hrsg.): Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ (EANG). Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
[2] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (Hrsg.): Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO). Berlin: Ernst & Sohn, 2010.

Arbeitskreis 1. 6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)
http://ak16.arbeitskreis-dggt.de

Obmann
Prof. Dr.-Ing. habil. *Peter-Andreas von Wolffersdorff*