

Швердт С. Разработка метода расчета армирования оснований геосинтетическими материалами при провалах грунта и оседаниях земной поверхности (статья на нем. яз.) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 132–147. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.14

Schwerdt S. Development of a design method for bridging systems in areas with dolines and sinkholes using geosynthetic reinforcements. *PNRPU Bulletin Construction and architecture*. 2016. Vol. 7, No. 2. Pp. 132-147. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.14



**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 7, № 2, 2016
PNRPU BULLETIN
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.14

УДК 624.138.9

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА АРМИРОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ПРОВАЛАХ ГРУНТА И ОСЕДАНИЯХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENS ZUR BEMESSUNG VON GEOKUNSTSTOFFBEWEHRUNGEN BEI DER ÜBERBRÜCKUNG VON ERDFÄLLEN UND TAGESBRÜCHEN

С. Швердт

Университет Магдебург-Стендаль, Магдебург, Германия

О СТАТЬЕ

Получена: 29 марта 2016
Принята: 15 апреля 2016
Опубликована: 30 июня 2016

Ключевые слова:

провал, оседание поверхности, армирование геосинтетикой, В.Г.Е.-метод, однородный геосинтетический материал, неоднородный геосинтетический материал

АННОТАЦИЯ

Для армирования грунтовых оснований на карстоопасных и подрабатываемых территориях все чаще используются геосинтетические материалы. При этом для расчетов используют различные методы. В статье рассмотрен В.Г.Е.-метод (Das Verfahren zur Bemessung von Geokunststoffbewehrungen von Erdenbrüchüberbrückung – метод определения параметров армирования оснований геосинтетическими материалами при провалах грунта). Его можно использовать при расчетах всех видов анизотропных и изотропных геосинтетических материалов. Также представлены результаты исследований, предшествовавших разработке метода. Кроме того, приведены расчеты армирования геосинтетикой оснований с возможными провалами согласно правилам EBGEO.

© ПНИПУ

© **Свен Швердт** – доктор технических наук, профессор, e-mail: sven.schwerdt@hs-magdeburg.de.

Sven Schwerdt – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: sven.schwerdt@hs-magdeburg.de.

DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR BRIDGING SYSTEMS IN AREAS WITH DOLINES AND SINKHOLES USING GEOSYNTHETIC REINFORCEMENTS

S. Schwerdt

University of Magdeburg-Stendal, Magdeburg, Germany

ARTICLE INFO

Received: 29 March 2016
Accepted: 15 April 2016
Published: 30 June 2016

Keywords:

sinkholes, geosynthetic reinforcement, B.G.E.-method, homogeneous geosynthetics, inhomogeneous geosynthetics

ABSTRACT

The B.G.E.-method can be used for the design of bridging systems using all kinds of anisotropic or isotropic geosynthetics as well as for geosynthetics made from one or several kinds of raw material in areas prone to subsidence. This method allows the calculation of tensile forces in the geogrid depending on the kind of geosynthetic material used, the number of geosynthetic layers, and the orientation of layers. An overview of the development of the B.G.E.-method will be given.

© PNRPU

1. Problemstellung

Wenn Verkehrswege, wie Bahntrassen oder Straßen, in erdfall- und tagesbruchgefährdeten Gebieten errichtet werden müssen, sind Sicherungsmaßnahmen gegen die Gefahr des plötzlichen Erdeinbruches erforderlich. Dabei können verschiedene Verfahren angewendet werden. Wenn der Einbruchdurchmesser begrenzt ist und der Verkehrsweg auf einem Damm errichtet werden soll, sind Sicherungsmaßnahmen unter Verwendung von Geokunststoffen die kostengünstigste Lösung.

Gemäß EBGEO versteht man unter Erdfällen „...Hohlräume (, die) durch natürliche Lösungs- und Subrosionsvorgänge von lösungs- und erosionsempfindlichen Gesteinen entstanden (sind). Tagesbrüche (...) bilden sich durch den Hochbruch untertägiger, unzureichend verwahrter Bergwerksanlagen...“ [1].

Die Abbildung lenthält eine Zusammenstellung der gemessenen Erdfalldurchmesser in Sachsen-Anhalt (Deutschland).

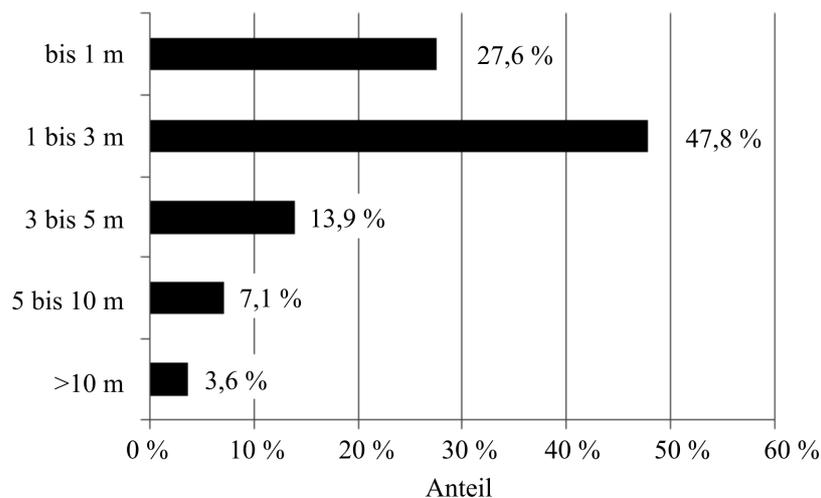


Abb. 1. Registrierte Erdfalldurchmesser in Sachsen-Anhalt [2]

Fig. 1. Registered diameters of dolines in Saxony-Anhalt [2]

Es wird deutlich, dass die Erdfälle überwiegend Durchmesser von bis zu 5 m aufweisen. Daneben können Tagesbrüche auftreten, wenn das stützende Bodengewölbe über künstlichen Hohlräumen einbricht. Erdfälle und Tagesbrüche werden gemeinsam als Erdeinbrüche bezeichnet.

2. Sicherheitskonzepte beim Bauen in einbruchgefährdeten Gebieten

2.1. Richtlinien und Regelungen

Für das Bauen in einbruchgefährdeten Gebieten existieren in Deutschland verschiedene Regelungen, z.B. FGSV Richtlinie zum Bauen in erdfallgefährdeten Gebieten [3] oder die EBGEO [1] für die Bemessung von Geokunststoffbewehrungen. Daneben gibt es weitere Regelungen, die nur in einzelnen Bundesländern gelten, z.B. IEBB Karst [8]; GSbS Sachsen-Anhalt [4]. Darin sind beispielsweise die zugrunde liegenden Sicherungskonzepte enthalten.

Die nachfolgende Tabelle 1 enthält die angewandten Sicherungskonzepte bei der Überbrückung von Erdeinbrüchen.

Sicherungskonzepte nach GSbS Sachsen Anhalt und IEBB Karst

Tabelle 1

Table 1

Safety concepts according to GSbS Sachsen Anhalt and IEBB Karst

Konzept der Teilsicherung	Konzept der Vollsicherung
<ul style="list-style-type: none"> – Sicherung für einen bestimmten Zeitraum – definierte Verformungen an der Oberfläche – nach Einbruch: Sanierung erforderlich – Verwendung von Geokunststoffen oder Stahlbetonlösungen möglich – Vorteil: kostengünstig bei der präventiven Sicherung größerer Bereiche – Nachteil: begrenzter Erdeinbruchdurchmesser 	<ul style="list-style-type: none"> – dauerhafte Sicherungslösung nach Einbruch: Sanierung nicht erforderlich – meist Einbau einer Stahlbetonplatte oder einer Brückenkonstruktion im gefährdeten Bereich – Vorteil: keine Nutzungseinschränkungen bzw. Sanierung – Nachteil: sehr kostenintensiv bei der Sicherung großer Bereiche

Das Konzept der Teilsicherung geht davon aus, dass an der Fahrbahnoberfläche eine lokale Einsenkung zugelassen wird. Diese darf innerhalb der vorgegebenen Beanspruchungsdauer ein bestimmtes Maß nicht überschreiten, um die Verkehrssicherheit zu gewährleisten. Der Grenzwert der Einsenkung hängt von der Art der Fahrzeuge und der Verkehrsbelastung ab. Die Beanspruchungsdauer ist so zu wählen, dass in dieser Zeit die Fahrbahneinsenkung mit Sicherheit erkannt wird. Sie beträgt im Straßenbau in der Regel wenige Wochen. Unmittelbar nach dem Erkennen der Fahrbahneinsenkung sind Maßnahmen zur Verkehrssicherung und zur Sanierung des aufgetretenen Einbruchs zu ergreifen.

Bei der Vollsicherung wird davon ausgegangen, dass während des gesamten Nutzungszeitraumes des Verkehrsbauwerkes die Standsicherheit gewährleistet ist. Eine Sanierung ist nicht vorgesehen. Bei der Vollsicherung sind die Verformungen der Fahrbahnoberfläche sehr gering.

2.2. Systematik der Geokunststoffbewehrungen

Die unterschiedlichen Geokunststoffe für Bewehrungsaufgaben können hinsichtlich ihrer Lastabtragung in isotrope und anisotrope Materialien unterteilt werden. Ein isotropes Lastabtragungsverhalten ist durch gleiche Dehnsteifigkeit, Dehnung und Zugfestigkeit in Längs- und Querrichtung gekennzeichnet. Dabei ist es unerheblich, ob dieses Lastabtragungsverhalten aus der Verwendung von einer oder mehreren isotropen Geokunststofflagen herrührt, oder ob mehrere Bahnen rechtwinklig zueinander angeordnet werden.

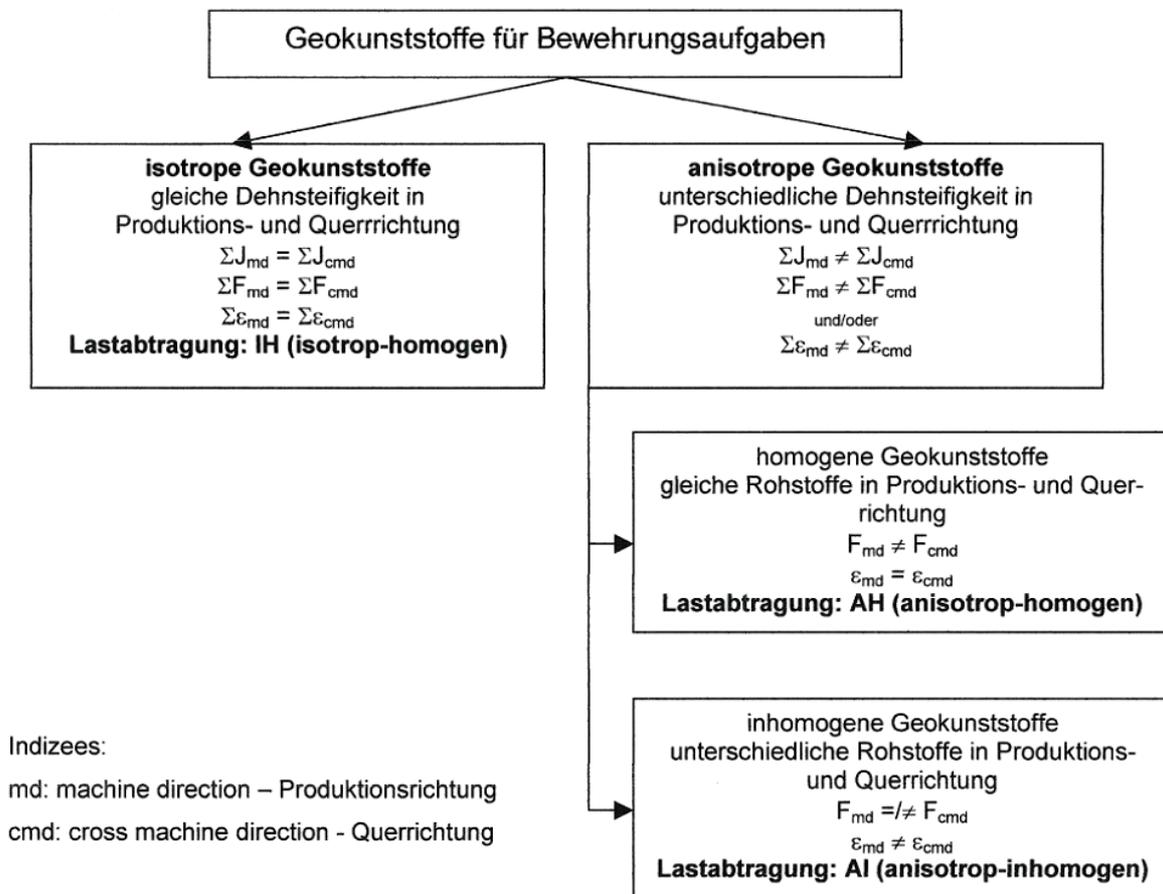


Abb. 2. Geokunststoffe für Bewehrungsaufgaben [5]:

J – Dehnsteifigkeit [kN/m]; F – Kurzzeitzugfestigkeit; ε – Grenzdehnung bei Kurzzeitzugfestigkeit; md – Längsrichtung; cmd – Querrichtung

Fig. 2. Types of geosynthetics for reinforcement [5]:

J – axial stiffness [kN/m]; F – short-term tensile strength; ε – maximum strain with short-term tensile strength; md – machine direction; cmd – cross machine direction

Die anisotropen Geokunststoffe sind durch unterschiedliche Dehnsteifigkeiten und unterschiedliche Zugfestigkeiten in Längs- und Querrichtung gekennzeichnet. Eine weitere Unterteilung kann bei diesen Materialien in homogene und inhomogene Kunststoffe vorgenommen werden. Bei homogenen Geokunststoffen werden gleiche Rohstoffe in Längs- und Querrichtung verwendet, so dass hier die Grenzdehnungen gleich sind. Bei inhomogenen Geokunststoffen werden unterschiedliche Rohstoffe für die Längs- und Querrichtung verwendet, was zu unterschiedlichen Grenzdehnungen führt. Üblicherweise ist dabei die Grenzdehnung in der Querrichtung des Materiales größer als in Längsrichtung.

Hinsichtlich des unterschiedlichen Lastabtragungsverhaltens der Geokunststoffe können somit drei Hauptgruppen für die Bemessung unterschieden werden:

1. Isotrop-homogen (IH)
2. Anisotrop-homogen (AH)
3. Anisotrop-inhomogen (AI)

Für isotrop homogene und anisotrop homogene Geokunststoffe waren bereits in der Vergangenheit Bemessungsverfahren veröffentlicht worden ([6] oder R.A.F.A.E.L.-Verfahren [7]). Für anisotrop homogene Geokunststoffe gab es bis zur Einführung des B.G.E.-Verfahrens kein anwendbares Bemessungsverfahren.

3. Untersuchungen zur Entwicklung des B.G.E.-Verfahrens

3.1. Untersuchungskonzept

Das Fehlen eines Bemessungsverfahrens für anisotrop homogene Geokunststoffe führte zur Konzipierung eines Untersuchungsprogrammes, um ein allgemeingültiges Bemessungsverfahren für alle Arten von Geokunststoffen bei der Überbrückung von Erdeinbrüchen zu entwickeln.

Die dazu notwendigen Versuchsaufbauten, -durchführung und Ergebnisse sind detailliert in [8] enthalten. Es wurde ein gestuftes Untersuchungsprogramm verwendet, das aus klein- und großmaßstäblichen Laborversuchen sowie numerischen Berechnungen bestand. Die nachfolgende Tabelle 2 enthält das Versuchsprogramm.

Tabelle 2

Untersuchungsprogramm zur Entwicklung des B.G.E.-Verfahrens

Table 2

Steps for development of B.G.E.-method

Versuche	Kurzbeschreibung	Kenntnis über:
Bodenmechanische Versuche		Parameter der verwendeten Mineralgemische
Scher- und Reibungsversuche	Scherversuche zwischen Geokunststoffen und/oder Mineralgemischen	Scherparameter
Berstversuche	Untersuchungen zum Tragverhalten der Geokunststoffe unter radialer Belastung	Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Berstverhalten, Grenztragfähigkeit, Verhalten im Überlappungsbereich
Erdfall-Großversuche	Untersuchungen zum Tragverhalten der geokunststoffbewehrten Mineralgemische unter ständiger und Verkehrsbelastung	Tragverhalten der Geokunststoffe; Ausbildung Traggewölbe; Einsenkung der Fahrbahnoberfläche
Numerische Berechnungen	Nachrechnung der durchgeführten Versuche Verifizierung der Versuchsergebnisse	Bestätigung der Ergebnisse der Versuche

3.2. Berstversuche

3.2.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Berstversuche sind allgemein bekannt zur Prüfung von geosynthetischen Materialien insbesondere von Geomembranen. Die Versuchsdurchführung ist in der DIN EN ISO 14151 (2010) [9] beschrieben. Die Proben haben üblicherweise einen Durchmesser von 20 cm. Für die Ermittlung des Lastabtragungsverhaltens von Geokunststoffen bei der Überbrückung von Erdeinbrü-

chen waren jedoch größere Probendurchmesser erforderlich, so dass ein „Großes Berstdruckgerät“ mit 1 m Probendurchmesser entwickelt wurde. Damit konnte das Dehnungsverhalten und die Zugkraftausbildung in Längs- und Querrichtung untersucht werden. Insbesondere konnten dabei Unterschiede zwischen den homogenen und inhomogenen bzw. isotropen und anisotropen Geokunststoffen festgestellt werden. Die Abb. 3 zeigt das verwendete Gerät.

Beim Versuch wird der Geokunststoff auf einer Grundplatte aufgelegt und durch einen Anpressring fixiert. Unterhalb der Probe befindet sich eine Folie, um die Wasserdichtigkeit zu gewährleisten. Anschließend wird von unten ein radialer hydraulischer Druck erzeugt. Dieser wird stufenweise aufgebaut bis zum Versagen der Probe. Es wurden Versuche mit und ohne Überlappung der Geokunststoffprobe im Messbereich durchgeführt.

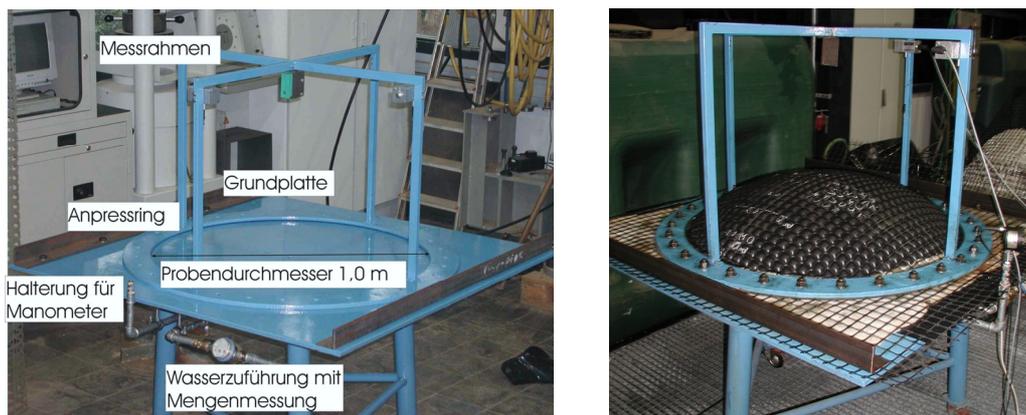


Abb. 3. Versuchsgerät Berstversuch (links) mit eingebauter Probe (rechts)

Fig. 3. Test apparatus for Burst tests (left) with prepared sample (right)

Die folgenden Messgrößen wurden aufgenommen: radialer hydraulischer Druck, Aufwölbungshöhe an 5 Messpunkten der Probe in Längs- und Querrichtung, Dehnung des Geokunststoffs in beiden Richtungen, Wasservolumen und maximaler Berstdruck/Berstversagen.

3.2.2. Versuchsergebnisse

Folgende Ergebnisse wurden in den Versuchen festgestellt:

Berstversagen

Bei **homogenen** Materialien versagte die Längs- oder Querrichtung. Eine Vorhersage war nicht möglich. Dies gilt auch für anisotrope Materialien. Bei **inhomogenen** Materialien versagte immer die Längsrichtung.

Dehnungen

Bei homogenen Geokunststoffen war die Dehnung kurz vor dem Versagen im Bereich der Grenzdehnung (in Längs- und Querrichtung). Bei inhomogenen Geokunststoffen war die Grenzdehnung nur in Längsrichtung erreicht (siehe Abb. 5).

Aufwölbungsfigur

Bei der Aufwölbungsfigur wurden Unterschiede zwischen den homogenen und inhomogenen Geokunststoffen festgestellt. Die Aufwölbungsfigur lässt sich in allen Fällen mathematisch beschreiben. Für homogene Geokunststoffe erfolgt dies mit Hilfe quadratischer Gleichungen für die Längs- und Querrichtung. Für inhomogene Geokunststoffe kann die quadratische Gleichung

ebenfalls zur Beschreibung der Aufwölbung in der Längsrichtung angewandt werden, während für die Querrichtung eine elliptische Funktion ermittelt wurde.



Abb. 4. Berstversagen; homogenes Geogitter (links), inhomogener Geokunststoff (rechts)
 Fig. 4. Burst failure; homogenous geogrid (left); inhomogenous geogrid (right)

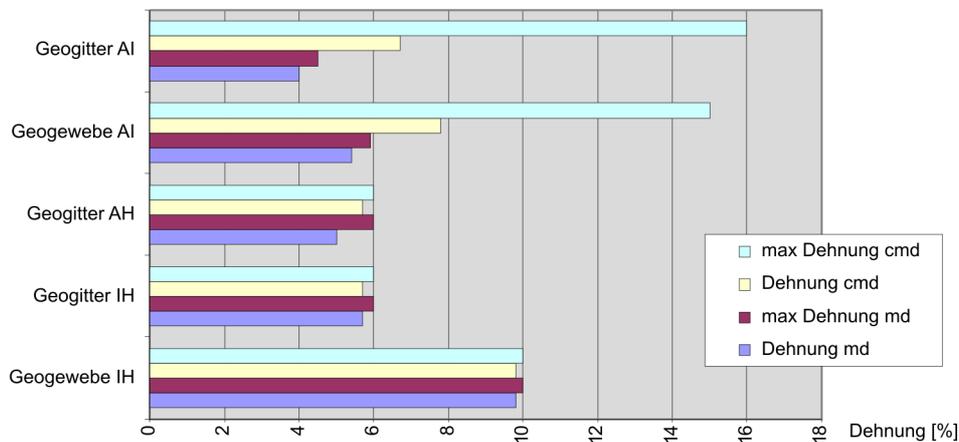


Abb. 5. Gemessene Dehnungen vor dem Bersten und maximale Dehnungen der getesteten Geogewebe und Geogitter
 Fig. 5. Measured strains before bursting and maximum strains of tested geosynthetics and geogrids

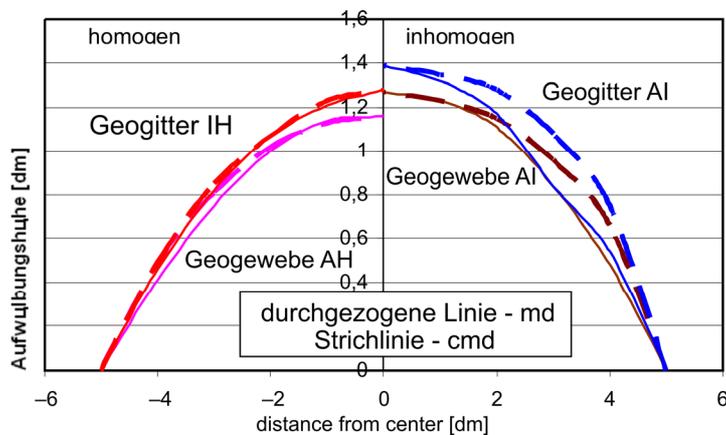


Abb. 6. Aufwölbung vor dem Bersten für homogene Geokunststoffe (links) und inhomogene Geokunststoffe (rechts)
 Fig. 6. Height of bulge before bursting for homogenous geosynthetics (left) and inhomogenous geosynthetics (right)

3.2.3. Schlussfolgerungen aus den Berstversuchen

Die Berstversuche zeigen, dass es signifikante Unterschiede zwischen homogenen und inhomogenen Geokunststoffen aber nicht zwischen isotropen und anisotropen Produkten gibt. Dies bedeutet, dass das Versagen für homogene Produkte sowohl in Längs- als auch in Querrichtung auftreten kann, auch wenn es sich um anisotrope Produkte handelt. Daraus wird geschlossen, dass die Zugkraft sowohl in Längs- als auch in Querrichtung bemessen werden muss. Für inhomogene Produkte tritt das Versagen generell in der Richtung auf, die die geringere Grenzdehnung aufweist. Dabei handelt es sich meist um die Längsrichtung. In der Querrichtung ist lediglich eine strukturerhaltende Festigkeit erforderlich.

Aus den Berstversuchen konnte eine Beziehung abgeleitet werden, mit deren Hilfe die Zugkräfte in Produktions- und Querrichtung ermittelt werden konnten. Die zugehörigen Gleichungen finden sich in Abschnitt 0.

3.3. Erdfall-Großversuche

3.3.1. Versuchsaufbau

Mit den Erdfallgroßversuchen wurde praxisnahe Erdfalldurchmesser ($d = 1,6 \text{ m}$) simuliert. Die Versuchsrinne, in der die Versuche durchgeführt wurden, ist in Abb. 7 (links) zu sehen. Die Versuchseinrichtung weist folgende Abmessungen auf: Länge: 4,70 m, Breite: 3,0 m, Durchmesser des Hohlraums: ca. 1,6 m, Höhe der Überschüttung über dem Geokunststoff: 1,6–1,7 m. Die Belastung erfolgte quasi dynamisch (Simulation eines rollenden LKW-Rades) mit 300.000 Lastwechseln innerhalb von 2 Wochen. Danach wurde die Verkehrsbelastung auf das bis zu 2,4-fache erhöht, bis es zum Versagen der Konstruktion kam. Die Abb. 7 (rechts) zeigt die Belastungseinrichtung.

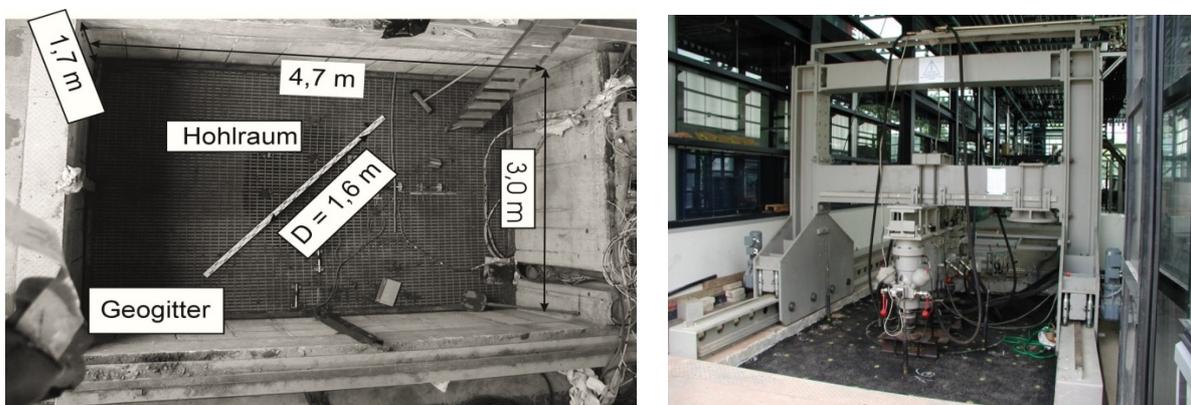


Abb. 7. Versuchsrinne für die Erdfall-Großversuche (links) und Belastungseinrichtung (rechts)
Fig. 7. Test pit for large scale tests (left) and loading device (right)

Folgender Schichtenaufbau wurde gewählt (siehe Abb. 8): von oben: 5 cm Asphalt; 40 cm Schottertragschicht 0/32; 85 cm Kiessand 2/8; 50 cm Schottertragschicht 0/32, darin Geokunststoff; Untergrund mit Hohlraum.

Es wurden insgesamt 10 Versuche durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Geokunststoffe verwendet. Es kamen anisotrop-inhomogene Geogewebe bzw. Geoverbundstoffe sowie isotrop-homogene, anisotrop-homogene und anisotrop-inhomogene Geogitter zum Einsatz.

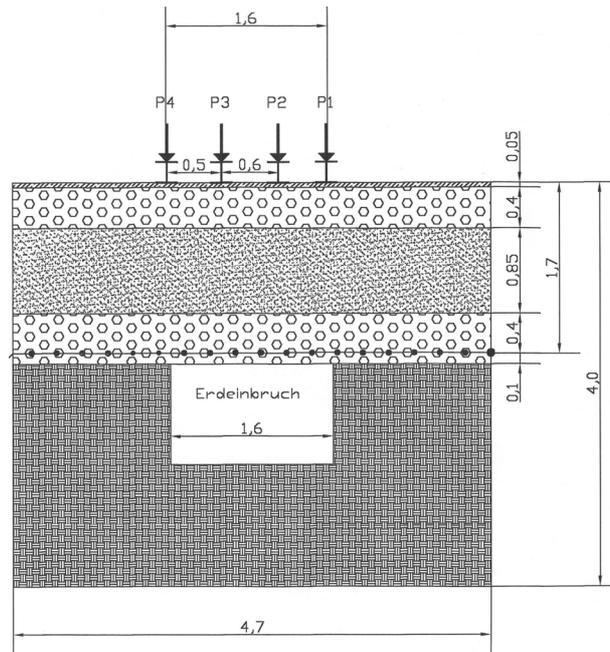


Abb. 8. Längsschnitt durch die Versuchsgrube [8]
 Fig. 8. Test pit longitudinal section [8]

Die Dehnungen des Geokunststoffs wurden gemessen, ebenso wie die vertikalen Einsenkungen des Geokunststoffs sowie der Bodenschichten in verschiedenen Höhen. Die Vertikalspannungen wurden mittels Erddruckmessdosen bestimmt.

3.3.2. Versuchsergebnisse

Eine detaillierte Zusammenstellung der Versuchsergebnisse ist in [8] und [10] enthalten. Die nachfolgenden Ergebnisse sind daraus entnommen.

Einsenkungen des Bodens

Die Einsenkungen des Geokunststoffs wurden mit den Einsenkungen der Bodenschichten ins Verhältnis gesetzt. Abb. 9 zeigt die ermittelten Verhältnismerte für ausgewählte Versuche.

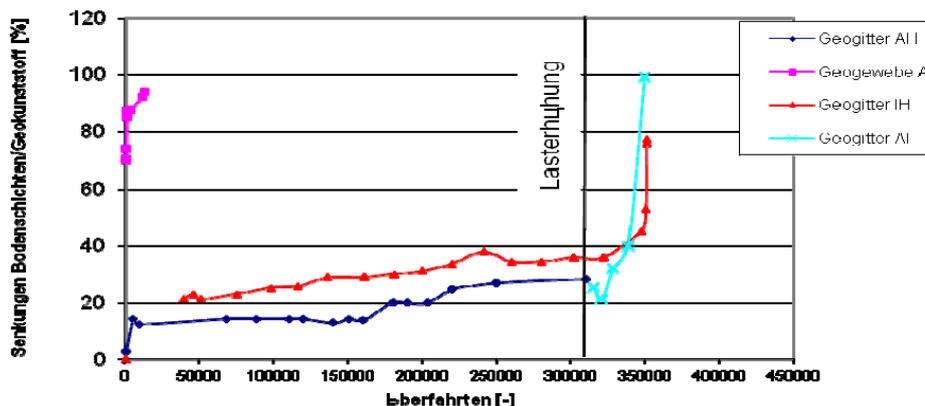


Abb. 9. Einsenkungen der Bodenschichten im Vergleich zur Einsenkung der Fahrbahnoberfläche in den Großversuchen

Fig. 9. Comparison between depressions of soil layers and sinking of road surface during large-scale tests

Sobald der Verhältniswert 100 % erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass das Traggewölbe über dem Geokunststoff bis zur Fahrbahnoberfläche hochgewandert ist. Es ist erkennbar, dass dies in einem Versuch bereits nach wenigen Lastwechseln erfolgt ist. Bei den Versuchen mit den Geogittern waren die Traggewölbe während der planmäßigen Versuchszeit stabil. Nach der Lasterhöhung kam es dann teilweise zu einem Versagen.

In den Versuchen konnten Einsenkungs- und Auflockerungsbereiche aus den Einsenkungen der Bodenschichten bzw. Geokunststoffe abgeleitet werden. Unter einem Einsenkungsbereich versteht man den Bereich, in dem Einsenkungen der Schichten bzw. der Fahrbahnoberkante festgestellt wurden. Einsenkungen traten bei allen Versuchen auf (siehe Abb. 10, links). Bei den Versuchen, bei denen das Traggewölbe instabil wurde, wurde zusätzlich im Inneren ein Auflockerungsbereich festgestellt (siehe Abb. 10, rechts).

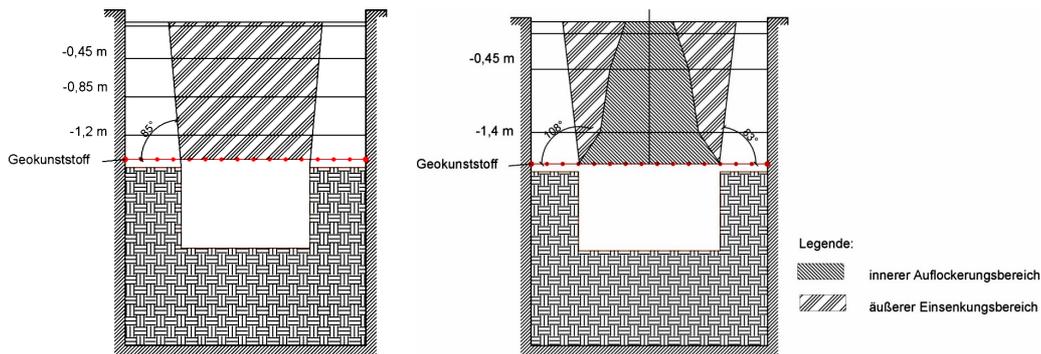


Abb. 10. Einsenkungsbereich bei stabilem Traggewölbe (links); Einsenkungs- und Auflockerungsbereich bei instabilem Traggewölbe (rechts)

Fig. 10. Sinking zone in tests with stable vault (left); loosening and sinking zone in tests with instable vault

Vertikalspannungen

Die gemessenen Vertikalspannungen zeigen eine deutliche Konzentration an den Rändern bzw. neben dem Hohlraum. Direkt über dem Hohlraum sind die Vertikalspannungen dagegen deutlich geringer (siehe Abb. 11).

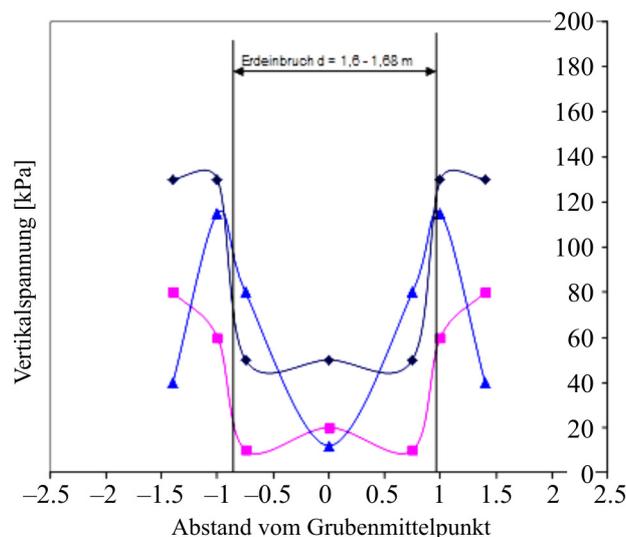


Abb. 11. Vertikalspannungen bei ausgewählten Versuchen in der Geokunststoffebene

Fig. 11. Vertical stresses on the geosynthetic planes, in selected tests

Dehnungen/Zugkräfte

Die gemessenen Dehnungen sind in Tabelle 3 enthalten. Während der planmäßigen Versuche waren die Dehnungen bei den Geogittern sehr gering. Sie lagen beim Versuch mit dem AH-Geogitter bei maximal 3,3 % und damit immer noch weit von der zulässigen Grenzdehnung entfernt. Bei der nachfolgenden Zusatzbelastung stiegen die Dehnungen bei einigen Produkten an. Bei den Versuchen mit den Geogeweben waren die gemessenen Dehnungen deutlich größer.

Tabelle 3

Gemessene Dehnungen in den Großversuchen

Table 3

Measured strains in large-scale tests

Versuch	Dehnungen md [%]		Dehnungen cmd [%]	
	Mitte	Rand	Mitte	Rand
Geogitter AH	0	1,1	0,2	3,3
Geogitter IH einlagig 347.000 Üf.	0,7	0,6	0,8	0,8
Versuchsende	3,6	>10,0	4,5	5,8
Geogitter IH zweilagig untere Lage 300.000 Üf.	0,18	0,02		0,02
450.000 Üf.	0,43	0,03		0,02
Geogitter IH zweilagig obere Lage 300.000 Üf.	0,08	0,01		0,02
450.000 Üf.	0,17	0,2		0,02
Geogitter AI 300.000 Üf.	0,4	0,2	0,3	0,2
Versuchsende	3,9	4,5	6,5	8,9
Geogewebe AI	2,0	4,8	3,0	7,7
			im Überlappungsbereich 2,3 % obere Lage; 3,0 % untere Lage	
Gewebe AI	7,0	5,3	7,5	13,0

Mit der nachstehenden Beziehung lässt sich die Zugkraft im Geokunststoff bestimmen.

$$F = J \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

mit J – Dehnsteifigkeit; ε – Dehnung.

Die angegebenen Dehnsteifigkeiten sind Kurzzeitwerte. Es werden daher die Dehnungen am Versuchsbeginn betrachtet. Der Vergleich der gemessenen Zugkräfte mit den berechneten Werten, basierend auf den Gleichungen, die in den Berstversuchen ermittelt wurden und in Abschnitt 0 enthalten sind, führt zu folgender Abbildung:

Es zeigt sich, dass zwischen den gemessenen Zugkräften und den berechneten ein guter Zusammenhang besteht. Lediglich für den Fall, dass die Einsenkungen und Dehnungen sehr klein sind, weist das Verfahren größere Abweichungen auf.

3.3.3. Zusammenfassung der Erdfall-Großversuche

Die Ergebnisse der Erdfallgroßversuche lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Das Traggewölbe über dem Geokunststoff ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie Art und Größe der Belastung, Art des Geokunststoffs, Überdeckungshöhe und Scherparameter des Bodens. Teilweise wurde ein „Hochwandern“ des Traggewölbes beobachtet. Die gemessenen Kräfte stimmen mit den berechneten überein.

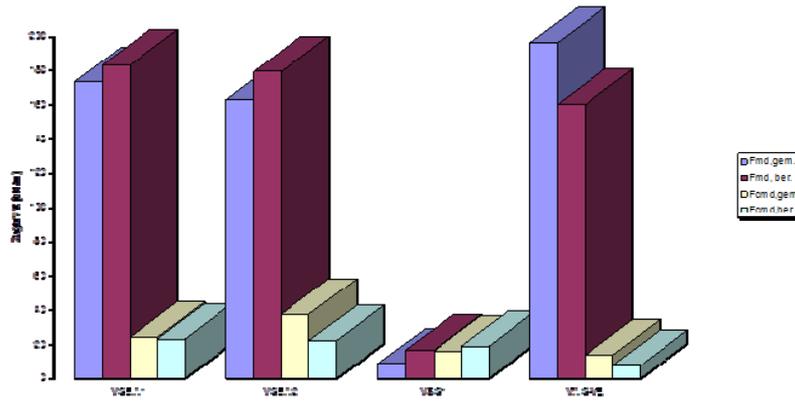


Abb. 12. Vergleich der gemessenen und berechneten Zugkräfte
 Fig. 12. Comparison between measured and calculated forces

4. Verfahren zur analytischen Bemessung

Das Verfahren zur Bemessung der Geokunststoffbewehrungen für die Erdenbruchüberbrückungen auf der Basis der vorgestellten Versuche wurde in [8] entwickelt und in [10] der Öffentlichkeit vorgestellt. Es fand mit einigen Abweichungen Eingang in die EBGEO [1].

Das nachfolgende Diagramm gibt einen Überblick über die Arbeitsschritte:

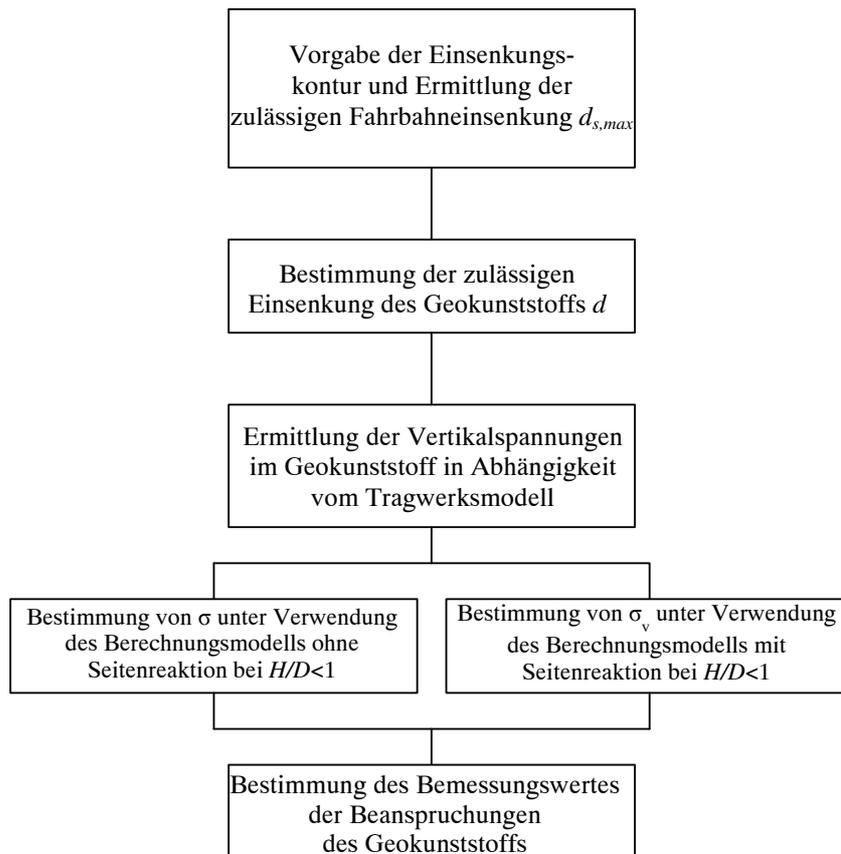


Abb. 13. Diagramm mit den erforderlichen Arbeitsschritten im B.G.E.-Verfahren
 Fig. 13. Flow diagram for B.G.E. method

4.1. Geometrische Randbedingungen

Der Durchmesser des Erdeinbruchs D ist gegeben; der Abstand H zwischen Geokunststoff und Fahrbahnoberfläche ist bekannt. Die Ermittlung des Einbruchdurchmessers D_s an der Fahrbahnoberfläche erfolgt unter Berücksichtigung des Aufweitungswinkels θ (siehe Abb. 14).

$$D_s = D + \frac{2H}{\tan \theta_k}, \quad (2)$$

mit: D_s – Durchmesser der Einsenkung an der Fahrbahnoberfläche; D – berechneter Durchmesser des Erdeinbruchs; H – Abstand zwischen Geländeoberkante und Geokunststofflage; θ_k – Aufweitungswinkel ($\theta_k = 85^\circ$ wenn keine anderen Ergebnisse vorliegen).

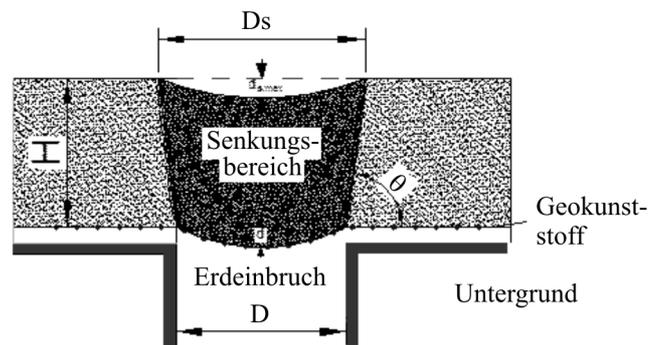


Abb. 14. Darstellung des Senkungsbereiches beim Erdeinbruch

Fig. 14. Diagram of sinking area during collapse

Die zulässige Einsenkung auf der Fahrbahn ist von den verkehrlichen Randbedingungen abhängig. Die EBGEO gibt beispielsweise einen Verhältniswert von d_s/D_s von 1/100 für Autobahnen an.

4.2. Zulässige Einsenkung des Geokunststoffs

Für die zulässige Einsenkung des Geokunststoffs sind zwei Bedingungen einzuhalten:

- 1. Bedingung:

$$d = d_{s,max} + 2H(C_e - 1), \quad (3)$$

mit C_e – Auflockerungsfaktor (1,03–1,05).

- 2. Bedingung:
 d so wählen, dass die zulässige Dehnung des Geokunststoffs nicht überschritten wird.

4.3. Ermittlung der Vertikalspannungen auf dem Geokunststoff in Anlehnung an EBGEO (DGGT, 2010)

Die Vertikalspannung auf dem Geokunststoff ist entsprechend dem Berechnungsmodell in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis H/D zu wählen. Für Standardanwendungen ist bei einem Verhältnis von $H/D < 1$ ist ein Berechnungsmodell ohne Seitenreaktion anzuwenden. Bei Verhältniswerten von $H/D \geq 1$ ist das Einbruchmodell mit Seitenreaktion anzuwenden.

Berechnungsmodell ohne Seitenreaktion

Die charakteristischen Vertikalspannungen können folgendermaßen berechnet werden:

$$\sigma_{v,G,k} = \gamma_k H, \quad (4)$$

$$\sigma_{v,Q,k} = q_k, \quad (5)$$

mit γ_k – charakteristisches Bodeneigengewicht; q_k – charakteristische Verkehrsbelastung.

Berechnungsmodell mit Seitenreaktion

Die Normalspannungen werden auf der Basis des Modells von TERZAGHI berechnet (siehe [11]).

$$\sigma_{v,G,k} = \frac{D}{2} \cdot \left(\gamma_k - \frac{4 \cdot c_k}{D} \right) \cdot \left[1 - e^{-K_{a,k} \cdot \tan \varphi_k \cdot \left(\frac{4H}{D} \right)} \right], \quad (6)$$

$$\sigma_{v,Q,k} = q_k \cdot e^{-K_{a,k} \cdot \tan \varphi_k \cdot \left(\frac{4H}{D} \right)}, \quad (7)$$

mit c_k – charakteristische Kohäsion (sollte = 0 sein für Standardanwendungen); $K_{a,k}$ – charakteristischer Erddruckbeiwert (für $\delta = 0$); φ_k – charakteristischer Reibungswinkel.

4.4. Berechnung der Zugkraft des Geokunststoffs

Für homogene Geokunststoffe muss die Zugkraft in Längs- und Querrichtung berechnet werden. Für Geokunststoffe mit einer bekannten Steifigkeit lässt sich das Dehnsteifigkeitsverhältnis folgendermaßen berechnen:

$$\omega = \frac{J_{cmd}}{J_{md}}, \quad (8)$$

mit ω – Dehnsteifigkeitsverhältnis; J_{cmd} – Dehnsteifigkeit in Querrichtung für eine vorausgesetzte Dehnung und Beanspruchungsdauer; J_{md} – Dehnsteifigkeit in Längsrichtung für eine vorausgesetzte Dehnung und Beanspruchungsdauer; für isotrope Geokunststoffe $\omega = 1,0$.

Mit bekanntem ω ergeben sich die Lastanteilsfaktoren in Längs- und Querrichtung folgendermaßen:

$$X_{md} = \frac{1}{1 + \omega}, \quad (9)$$

$$X_{cmd} = 1 - X_{md}. \quad (10)$$

Die Bemessungswerte der Horizontalkräfte ergeben sich unter Verwendung der folgenden Gleichungen [8].

$$H_{md,d} = \frac{X_{md} \cdot (\gamma_G \cdot \sigma_{v,G,k} + \gamma_{v,Q} \cdot \sigma_{Q,k}) \cdot D^2}{8 \cdot d} \quad (11)$$

$$H_{cmd,d} = \frac{X_{cmd} \cdot (\gamma_G \cdot \sigma_{v,G,k} + \gamma_Q \cdot \sigma_{v,Q,k}) \cdot D^2}{8 \cdot d} \quad (12)$$

Die Bemessungswerte der Horizontalkräfte ergeben sich dann unter Verwendung der folgenden Gleichungen.

$$E_{md,d} = F_{md,d} = \frac{H_{md,d}}{\cos \alpha} \quad (13)$$

$$E_{cmd,d} = F_{cmd,d} = \frac{H_{cmd,d}}{\cos \alpha} \quad (14)$$

mit α – Neigung des Geokunststoffs am Einbruchrand, abhängig vom Geokunststofftyp, dem Einbruchdurchmesser, der Geometrie des Einbruchrandes.

Für homogene Geokunststoffe kann α folgendermaßen berechnet werden:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y}{r-x}\right) \quad (15)$$

mit x, y Wertepaar mit $(r-x) = 0,1 \cdot r$ und $y = ax^2 + d_{\max}$

Für inhomogene Geokunststoffe siehe [8].

5. Implementierung in EBGeo 2010 (DGGT, 2010)

Das B.G.E.-Verfahren wurde in die EBGeo aufgenommen. Zusätzlich zu den hier vorgestellten Formeln sind dort weitere Angaben zur Berechnung der Überlappungs- und Verankerungslänge enthalten.

Die EBGeo enthält damit neben den bereits bekannten Verfahren nach BS 8006 und nach R.A.F.A.E.L. auch ein Verfahren, mit dem Geokunststoffbewehrungen zur Überbrückung von Erdenbrüchen unter Verwendung von anisotrop homogenen Geokunststoffen berechnet werden können. Das Verfahren ist ebenfalls auf isotrop-homogene und anisotrop-inhomogene Geokunststoffbewehrungen anwendbar.

References

1. DGGT EBGeo. Empfehlungen für Planung und Bemessung von Bewehrungen mit Geokunststoffen / Hrsg. Geotechnik Deutsche Gesellschaft für. – Berlin: Verlag W.Ernst und Sohn, 2010.
2. Heckner J., Herold U., Strobel G. Zum Baugrund- und Subrosionsgeschehen in Sachsen-Anhalt [Artikel] // Mitt. Geol. Sachsen-Anhalt (4). – Halle, 1998. – S. 101–121.
3. FGSV. Hinweise zum Straßenbau in Erdfallgebieten. – FGSV-Verlag, 2010.

4. LSBB ST. Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Geokunststoffen zur Sicherung bruchgefährdeter Straßenbereiche in Altbergbau- und Subrosionsgebieten für den Landesbetrieb Bau Sachsen-Anhalt. – Halle, 2006.

5. Schwerdt und Bromen. Development and application of a new design method for geosynthetic reinforcements to protect embankments in areas prone to subsidence [Konferenz] // *Proc. 10th Int. Conference on Geosynthetics*. – Berlin: International Geosynthetics Society, 2014. – Bd. 3. S. auf CD.

6. BS 8006-1 // BSI: British Standard Institution: Code of practice for strengthened/reinforced earths and other fills. – London, 2010.

7. Blivet. Design method for geosynthetics as reinforcement for embankments subjected to localized subsidence [Buchabschnitt]. *Proc. 7th ICG*, Buchverf. Delmas, Gourc und (ed) Girard. – Sweets&Zeitlinger, 2002.

8. Schwerdt S. Untersuchungen zur Ableitung eines Bemessungsverfahrens für die Überbrückung von Erdeinbrüchen unter Verwendung von Geokunststoffbewehrungen [Buch]. – Clausthal: Institut für Geotechnik und Markscheidewesen Technische Universität Clausthal, 2004.

9. DIN EN 14151 // Geokunststoffe: Bestimmung der Berstdruckfestigkeit. – Beuth Verlag, 2010.

10. Schwerdt, Meier, Paul. Der Einsatz des B.G.E.-Verfahrens bei der Bemessung von Geokunststoffbewehrungen zur Überbrückung von Erdeinbrüchen [Konferenz] // 9 Informations- und Vortragstagung “Kunststoffe in der Geotechnik”. – München, 2005. – S. 281–287.

11. Design of Soil Layer – Geosynthetic systems overlying Voids / J.P. Giroud [et al.] // *Geotextiles and Geomembranes*. – 1990. – 1: Bd. 9. – S. 11–50.

12. LA StB ST. Handlungsempfehlungen zur ingenieurgeologischen Erkundung und bautechnischen Beherrschung von Karsterscheinungen bei Straßenbauvorhaben für den Dienstaufsichtsbereich des Landesamtes für Straßenbau Sachsen-Anhalt. – Halle, 2003.