

Bundesamt für Strassen

Anforderungen an Geokunststoffe mit den Aufgaben Bewehren und Schützen

Exigences relatives aux fonctions de renforcement et de protection pour géosynthétiques



Rudolf Hufenus

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, St. Gallen

Rudolf Rügger, Daniel Flum

Rügger Systeme AG, St. Gallen

Felix P. Jaecklin, Andreas Brinkmann, Paul Zeiter

Dr. Felix P. Jaecklin GmbH, Baden

Ivo Sterba

Institut für Geotechnik, ETH Zürich

Forschungsauftrag VSS 1999/124 (16/99)

24. Mai 2002

Zusammenfassung

Ziel des Projektes war es, Grundlagen zur Voraussage der Gebrauchstauglichkeit und des Langzeitverhaltens von Geokunststoffen mit den Funktionen Bewehren und Schützen zu liefern.

Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgabe verfestigen den Boden durch die Aufnahme von Zugspannungen derart, dass er die Funktion eines bewehrten Bauteils übernimmt. Massgebend für entsprechende Geokunststoffe sind ihre mechanischen Eigenschaften (Kraft-Dehnungs- und Zeitstandverhalten), die Beständigkeit gegen chemisch-physikalische Angriffe und das Reibungsverhalten im Boden.

Geokunststoffe mit Schutzaufgabe bewahren empfindliche Bauteile wie Dichtungsmembranen oder Isolationselemente vor mechanischen Beschädigungen. Damit Geokunststoffe eine Schutzfunktion ausüben können, müssen sie einen hohen Widerstand gegen Perforation und eine gewisse Dicke aufweisen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die einschlägige Literatur systematisch aufgearbeitet. Die wichtigsten Forschungsergebnisse wurden ausgewertet und mit eigenen Untersuchungsergebnissen verglichen. Bestehende Empfehlungen, Normen und Normvorschläge wurden gegenübergestellt.

Umfangreiche Feld- und Laborversuche dienten zur Bestimmung der Mindestanforderungen an Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgabe. Hierzu wurden 35 verschiedene Geotextilien und Geogitter beschafft. Zur Ermittlung der Einbaubeanspruchung wurden Einbauversuche im Massstab 1:1 mit feinkörnigem Sandboden und mit gemischtkörnigen Böden aus rundem und gebrochenem Kies durchgeführt. Die Verdichtung erfolgte unter für bewehrte Konstruktionen üblichen Bedingungen.

Kornverteilung und Geometrie der Komponenten des Bodenmaterials haben einen wesentlichen Einfluss auf die Beschädigung einzelner Geokunststofftypen. Die Widerstandsfähigkeit eines Geokunststoffs gegen Einbaubeanspruchung hängt primär von der Herstellungsart und nur sekundär vom polymeren Rohstoff ab. Dabei hat sowohl die Art der Zugelemente als auch der Aufbau des Flächengebildes einen starken Einfluss auf die Robustheit. Der Verlauf der Kraft-Dehnungskurve wird durch eine Einbaubeanspruchung in den meisten Fällen nicht relevant verändert, d.h. der E-Modul bleibt auch bei einer Abnahme von Zugfestigkeit und Höchstzugkraftdehnung in etwa gleich.

Ein Laborversuch zur Ermittlung des Einflusses von Einbaubeanspruchungen wurde aufgebaut und validiert. Für einzelne Prüfanordnungen wurde eine brauchbare Korrelation zwischen Labor- und Feldversuch gefunden. Mit Mindestanforderungen an die Widerstandsfähigkeit gegen Einbaubeschädigung, welche sich auf die vorgestellte Labor-Einbausimulation abstützen, liegt man in den meisten Fällen auf der sicheren Seite.

Mit ausgewählten Geokunststoffen wurden Kriech- und Zeitstandversuche an schmalen Gitter- und Gewebestreifen unter verschiedenen Temperaturen vorgenommen. Diese dienten primär zur Beurteilung der Tauglichkeit von in der Literatur vorgeschlagenen Zeitrafferversuchen zur wirtschaftlicheren Ermittlung des Kriech- und Zeitstandverhaltens von Geokunststoffen. Dabei zeigte sich, dass Kriechversuche nur mit langen Prüfzeiten und optimal angepassten Klemmsysteme erfolgversprechend sind, und dass die Aussagekraft von zeitraffenden Kriechversuche unter erhöhten Temperaturen kritisch hinterfragt werden muss.

Mehrmonatige Freibewitterungsversuche dienten zur Abschätzung des Einflusses von Einbauverzögerungen, bei welchen der Geokunststoff nicht sofort nach dem Verlegen überdeckt wird. Die Untersuchungen zeigten, dass die Witterungsbeständigkeit neben dem Polymeren Rohstoff stark von den zugefügten UV-Stabilisatoren abhängt. Die Bewitterung erfolgte auch an Proben unter Spannung, um beispielsweise die Beanspruchung von Geokunststoffen beim Einbau in Stirnflächen von bewehrten Steilböschungen zu simulieren. Dabei zeigte sich, dass die aufgebrachte Spannung zwar in einigen Fällen die Alterung beschleunigt, eine Korrelation zum spannungsfreien Zustand aber nicht vorliegt.

Basierend auf den Erkenntnissen aus den eigenen Untersuchungen und aus der Literatur wurden Empfehlungen für struktur- und rohstoffabhängige Anforderungskriterien und Sicherheitswerte zur Bemessung von Geokunststoffen mit permanenter Bewehrungs- und Schutzfunktion erarbeitet. Diese Empfehlungen sollen den wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Einsatz von Geokunststoff-bewehrten Bauwerken fördern helfen und Schäden an solchen Konstruktionen verhindern.

Résumé

Ce projet avait pour but de jeter les bases pour une prédiction fiable de l'aptitude au service et du comportement à long terme des géosynthétiques destinés à renforcer et à protéger des éléments de construction.

En absorbant les contraintes de traction, les géosynthétiques à effet de renforcement stabilisent le sol qui devient ainsi un élément de construction renforcé. Les propriétés mécaniques de ces premiers (comportement force-allongement, ainsi que comportement de rupture au fluage en traction), la résistance contre les attaques chimico-physiques et enfin le comportement au frottement dans le sol sont déterminants pour la qualité.

Les géosynthétiques à effet de protection doivent préserver les éléments de construction sensibles - comme les membranes d'étanchéité ou des éléments d'isolation - contre des dommages d'origine mécanique. Une telle fonction protectrice requiert une grande résistance à la perforation et une certaine épaisseur.

Dans le cadre de ce projet, une étude approfondie et systématique de la littérature spécialisée a permis d'évaluer les résultats de recherche les plus importants et de les comparer aux propres analyses. En outre, les recommandations, normes et projets de norme existants ont été confrontés.

Des essais très étendus, aussi bien en laboratoire que in situ, ont servi à déterminer les exigences minimales pour les géotextiles synthétiques avec des fonction de renforcement. 35 géotextiles et grilles géotextiles différents ont été acquis à cet effet. Afin de déterminer la contrainte liée à la mise en oeuvre, des essais à l'échelle de 1:1 ont été effectués avec du sable fin et avec un mélange de gravier à grains arrondis et concassés. Le compactage a été fait ensuite dans les conditions habituelles pour les constructions armées.

La granulométrie et la géométrie des composants du sol ont un impact considérable sur les dégâts causés à certains types de géosynthétiques. La capacité de ces derniers à résister à la contrainte qu'engendre la mise en oeuvre dépend en premier lieu du mode de fabrication et en deuxième lieu seulement du polymère utilisé comme matière première. A ce propos, le type des éléments de traction, tout autant que de la construction du tissu lui-même, ont une forte influence sur la robustesse des géotextiles. Dans la plupart des cas, le tracé de la courbe effort - allongement ne subit pas de modification notable suite à la mise en oeuvre, c'est-à-dire que le module d'élasticité reste plus ou moins égal, même si la résistance à la traction et l'allongement maximale sous traction diminuent.

Un essai de laboratoire pour déterminer l'influence des contraintes liées à la mise en oeuvre a été élaboré et validé. Pour certains dispositifs d'essai, une corrélation valable entre les résultats des essais de laboratoire et des essais in situ a été obtenue. Avec des exigences minimales pour la résistance contre les dommages dus à la pose, fondées sur la simulation de la mise en oeuvre en laboratoire (simulation décrite dans le présent rapport), on aura, dans la plupart des cas, une sécurité suffisante.

Pour une sélection de géosynthétiques, des essais de fluage et de rupture au fluage en traction ont été effectués sur d'étroites bandes de géotextiles et de géogrilles, à des températures diverses,. Il s'agissait, tout d'abord, d'évaluer l'efficacité des essais accélérés, proposés dans la littérature pour une détermination plus rationnelle du comportement des géosynthétiques au fluage et à la rupture au fluage en traction. Cependant, il s'est avéré que seuls des essais de fluage de longue durée, avec des systèmes de serrage optimaux, permettent d'obtenir des résultats fiables. La valeur des essais accélérés à températures plus élevées doit être remise en question.

L'influence de retards lors de la mise en oeuvre - c'est-à-dire lorsque le géosynthétique n'est pas immédiatement recouvert après sa pose - a été évaluée par d'essais d'exposition aux intempéries pendant plusieurs mois à ciel ouvert. Il s'est avéré que leur résistance aux intempéries, outre les matières premières en polymère qui les composent, dépend également des stabilisateurs UV ajoutés. De plus, certains des échantillons exposés aux intempéries ont été mis sous tension, afin de simuler la contrainte que subissent les géosynthétiques lors de leur intégration à la surface de talus raides renforcés, par exemple. Les résultats ont démontré que si la tension a accéléré le vieillissement dans certains cas, il n'existe cependant pas de corrélation avec les essais sans ajout de tension.

En vertu des conclusions fondées d'une part sur les résultats de nos propres recherches et d'autre part sur les données empruntées à la littérature spécialisée, nous avons élaboré des recommandations pour des critères d'exigence et des facteurs de sécurité, indépendants des structures et des matières premières, pour le dimensionnement des géosynthétiques devant assurer en permanence des fonctions de renforcement et de protection. Ces recommandations ont pour but d'aider à promouvoir l'utilisation économique et écologique des ouvrages renforcés avec des géosynthétiques et à éviter les dommages.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	7
1.1	Problemstellung	7
1.1.1	Aufgabe Bewehren.....	7
1.1.2	Aufgabe Schützen.....	7
1.1.3	Langzeitverhalten.....	8
1.1.4	Feststellungen aus der Baupraxis.....	9
1.2	Zielsetzung.....	9
1.3	Vorgehensweise.....	9
1.3.1	Literaturauswertung	10
1.3.2	Feld- und Laborversuche	10
1.3.3	Umsetzung der Ergebnisse.....	10
2.	Literaturauswertung und allgemeine Grundlagen.....	11
2.1	Geokunststoffe	11
2.1.1	Geokunststoff-Typen.....	11
2.1.1.1	Geovlies	11
2.1.1.2	Geogewebe	11
2.1.1.3	Geogewirk	11
2.1.1.4	Geogitter.....	12
2.1.1.5	Geoverbundstoff (Geokomposit).....	12
2.1.2	Eigenschaften von Rohstoffen und Endprodukten	12
2.1.2.1	Polyethylen (PE)	13
2.1.2.2	Polypropylen (PP)	13
2.1.2.3	Polyethylenterephthalat (PET)	13
2.1.2.4	Polyamid (PA)	14
2.1.2.5	Aramide.....	14
2.1.2.6	Polyvinylalkohol (PVA)	14
2.1.2.7	Glasfasern.....	14
2.1.2.8	Polyvinyl-Beschichtung	14
2.1.3	Geokunststoff-Normen.....	14
2.1.3.1	Die europäische Normung	15
2.1.3.2	Die Schweizer Normen	16
2.2	Geokunststoffe mit der Aufgabe Bewehren	17
2.2.1	Anwendungsfälle.....	17
2.2.2	Massgebende Randbedingungen und Geokunststoff-Eigenschaften	18
2.2.3	Ermittlung der Langzeit-Zugfestigkeit von Bewehrungs-Geokunststoffen.....	20
2.2.4	Literaturauswertung und Umfragen zur Bewehrung mit Geokunststoffen.....	20
2.2.4.1	Normen und Richtlinien.....	20
2.2.4.2	Zulassungen und Submissionsvorschriften	21
2.2.4.3	Umfragen zu Abminderungsfaktoren und Sicherheitsbeiwerten.....	21
2.3	Abminderungsfaktoren und Sicherheitsbeiwerte	25
2.3.1	Abminderungsfaktor für das Zeitstand- und Kriechverhalten (A_1)	25
2.3.1.1	Kriech- und Relaxationsverhalten	26
2.3.1.2	Spannungsrisssbildung.....	26
2.3.1.3	Prüfung des Kriech- und Zeitstandverhaltens.....	27
2.3.1.4	Aktuelle Untersuchungen zum Kriech- und Zeitstandverhalten.....	29
2.3.2	Abminderungsfaktor für die Beschädigung durch Transport, Einbau und Verdichtung (A_2)	32
2.3.2.1	Transport und Verlegen der Geokunststoffe.....	33
2.3.2.2	Einbauverzögerungen	33
2.3.2.3	Beschüttung	34
2.3.2.4	Einbaubeanspruchung (Verdichtung)	34
2.3.2.5	Vorhersage der Widerstandsfähigkeit gegen Einbaubeanspruchung	35
2.3.2.6	Simulation einer Einbaubeanspruchung im Labor	36
2.3.2.7	Partikeleinlagerungen	37
2.3.2.8	Einfluss von Einbauschäden auf das Kriechverhalten.....	38
2.3.3	Abminderungsfaktor für die Verarbeitung (A_3).....	38
2.3.4	Abminderungsfaktor für Umgebungseinflüsse (A_4).....	39
2.3.4.1	Chemische Einflüsse.....	39
2.3.4.2	Biogene Einflüsse	40
2.3.5	Abminderungsfaktor für dynamische Einflüsse (A_{dyn})	41
2.3.6	Tragsicherheitsbeiwert (γ)	42

2.4	Witterungsbeständigkeit	42
2.4.1	Witterungseinflüsse.....	42
2.4.2	Prüfung der Witterungsbeständigkeit.....	43
2.5	Felduntersuchungen zur Beschädigung von Geokunststoffen beim Einbau.....	45
2.6	Interaktionsverhalten Boden - Geokunststoff	54
2.6.1	Prüfung des Scherverhaltens	56
2.6.2	Prüfung des Ausziehverhaltens.....	56
2.6.3	Untersuchungen zum Interaktionsverhalten Geokunststoff - Boden	57
2.7	Nachweis der Standsicherheit von Geokunststoff-bewehrten Konstruktionen.....	61
2.8	Geokunststoffe mit der Aufgabe Schützen.....	63
2.8.1	Massgebende Randbedingungen und Geokunststoff-Eigenschaften	63
2.8.1.1	Geokunststoff-Eigenschaften für die Aufgabe Schützen.....	64
2.8.1.2	Nebenaufgabe Drainieren.....	64
2.8.1.3	Brandverhalten.....	65
2.8.2	Anwendungen von Geokunststoffen mit Schutzfunktion	65
2.8.2.1	Deponiebau.....	65
2.8.2.2	Tunnelbau	69
2.8.2.3	Oberflächennahe Anwendungen	71
3.	Untersuchungen zur Abschätzung der Abminderungsfaktoren und der Standsicherheit.....	72
3.1	Auswahl der Geokunststoffe.....	72
3.2	Zugversuche	73
3.3	Einbauversuche im Feld	74
3.3.1	Ablauf des Feldversuchs	74
3.3.1.1	Testanlage	74
3.3.1.2	Probenbefestigung.....	76
3.3.1.3	Versuchsablauf	77
3.3.1.4	Witterungsverhältnisse.....	79
3.3.2	Bodenkennwerte	80
3.3.2.1	Korngrößenverteilung.....	81
3.3.2.2	Deformationsmessungen während dem Verdichten (Nivellement)	81
3.3.2.3	Plattendruckversuche	82
3.3.2.4	Verdichtungsversuch (Proctor-Standard-Versuch).....	84
3.3.2.5	Raumgewichtsbestimmung.....	85
3.3.2.6	Sandersatz-Methode.....	87
3.3.2.7	Wassergehalt Schüttmaterial.....	88
3.3.2.8	Pyknometeranalyse	88
3.3.3	Einfluss der Einbaubeanspruchung auf die chemische Beständigkeit.....	88
3.4	Einbausimulation im Labor	88
3.5	Kriech- und Zeitstandverhalten.....	90
3.6	Versuche zur Ermittlung der Witterungsbeständigkeit.....	91
3.6.1	Exposition vorgängig zum Einbau	91
3.6.2	Freibewitterungen	93
3.6.2.1	Bestrahlung.....	93
3.6.2.2	Spannungseinfluss.....	94
3.7	Herausziehversuche	95
4.	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	98
4.1	Einbauversuche im Feld	98
4.1.1	Beschädigung der Geokunststoffe beim Einbau	98
4.1.2	Beurteilung der Einbaubeanspruchung im Feldversuch.....	99
4.1.3	Auswirkung einer Einbaubeanspruchung auf den Kraft-Dehnungsverlauf.....	103
4.1.4	Restfestigkeiten verschiedener Geokunststofftypen	105
4.1.5	Einflussfaktoren auf die Auswirkung von Einbaubeanspruchungen.....	106
4.1.6	Wirkung von Partikeleinlagerungen.....	108
4.1.7	Beeinflussung der chemischen Beständigkeit durch den Einbau.....	108
4.2	Einbausimulation im Labor	110
4.2.1	Beurteilung der Einbaubeanspruchung im Laborversuch.....	110
4.2.2	Einfluss der Prüfparameter	111
4.2.3	Korrelation zum Feldversuch	112
4.3	Kriech- und Zeitstandsversuche	115
4.3.1	Langzeit-Kriechversuche bei Raumtemperatur	115
4.3.2	Zeitraffende Kriechversuche unter erhöhter Temperatur	116
4.4	Labor- und Freibewitterungen.....	119
4.4.1	Beurteilung der Witterungsbeständigkeit.....	119

4.4.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	122
4.4.3	Einfluss einer Zugspannung auf die Witterungsbeständigkeit	124
4.4.4	Einfluss einer kurzzeitigen Bewitterung auf die Robustheit gegenüber Einbau	125
4.4.5	Wetterschutz von äusseren Geokunststofflagen	125
4.5	Herauszieh Widerstand	126
4.5.1	Untersuchungsergebnisse externer Institute	126
4.5.2	Diskussion der Herausziehversuche	127
5.	Schlussfolgerungen	128
5.1	Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgaben	128
5.1.1	Projekttablauf	128
5.1.2	Funktion Bewehren	130
5.1.2.1	Ermitteln von Zugkräften in der Bewehrung	130
5.1.2.2	Verformungskriterien	131
5.1.2.3	Verbundstoffmodelle	131
5.1.2.4	Verbindungen	132
5.1.2.5	Mindestanforderungen an Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion	132
5.1.2.6	Bewehrungs-Geokunststoffe mit zusätzlicher Trennfunktion	133
5.1.2.7	Bewehrungs-Geokunststoffe mit zusätzlicher Drainagefunktion	133
5.1.2.8	Einbauhinweise	133
5.1.3	Abminderungsfaktoren und Tragsicherheitsbeiwert	133
5.1.3.1	Abminderungsfaktor A_1 (Kriechen)	134
5.1.3.2	Abminderungsfaktor A_2 (Einbau)	135
5.1.3.3	Abminderungsfaktor A_3 (Anschlüsse)	136
5.1.3.4	Abminderungsfaktor A_4 (Dauerhaftigkeit)	137
5.1.3.5	Tragsicherheitsbeiwert γ	137
5.1.4	Interaktion Geokunststoff - Boden	138
5.1.4.1	Beiwerte für die Ermittlung der Scherfestigkeit	138
5.1.4.2	Bemessungswert der spezifischen Gleit- bzw. Ausziehkraft	139
5.2	Geokunststoffe mit Schutzaufgaben	140
5.2.1	Funktion Schützen	141
5.2.1.1	Randbedingungen	141
5.2.1.2	Beschreibung und Bewertung der Randbedingungen	141
5.2.1.3	Quantifizierung der Einflüsse	142
5.2.2	Mindestanforderungen an Geokunststoffe mit Schutzfunktion	143
5.2.2.1	Allgemeine Mindestanforderungen	143
5.2.2.2	Anwendungsspezifische Anforderungen	144
6.	Zukünftiger Forschungsbedarf	146
6.1	Forschungsbedarf für Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgabe	146
6.1.1	Stützbauwerke, Bewehrte Dämme	146
6.1.2	Verstärkung von Fundationsschichten	147
6.2	Forschungsbedarf für Geokunststoffe mit Schutzaufgabe	147
7.	Literaturverzeichnis	148
7.1	Fachliteratur	148
7.2	Normen und Richtlinien	151

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Geokunststoffe in Form von Geotextilien und Geogittern sind Bauelemente, die heute aus dem Erd-, Strassen- und Bahnbau nicht mehr wegzudenken sind. Sie übernehmen Aufgaben der Materialtrennung, der Filterung und - meist als Sonderprodukte - auch der Drainierung. Neuer sind Einsätze als Schutzschichten für Dichtungsmembranen (Tunnel- und Deponiebau), als Bewehrungselemente für Konstruktionen nach der Art der "bewehrten Erde" oder für Sonderanwendungen im Deponiebau.

1.1.1 Aufgabe Bewehren

Geokunststoffe bewehren (verstärken), indem sie durch die Aufnahme von Zugspannungen den Boden derart verfestigen, dass er die Funktion eines bewehrten Bauteils übernimmt. Anwendungsbeispiele für Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgaben sind verstärkte Fundationsschichten, Dammaufstandsflächen, bewehrte Steilböschungen sowie rückverhängte Stütz- und Verkleidungsbauwerke (Abb. 1). Geokunststoffbewehrte Konstruktionen bieten eine qualitativ hochstehende und wirtschaftliche Alternative zu massiven Bauwerken aus Beton, Steinblöcken, etc. Mit Boden als Hauptbaustoff ist der Anteil fremder Baustoffe minimal.

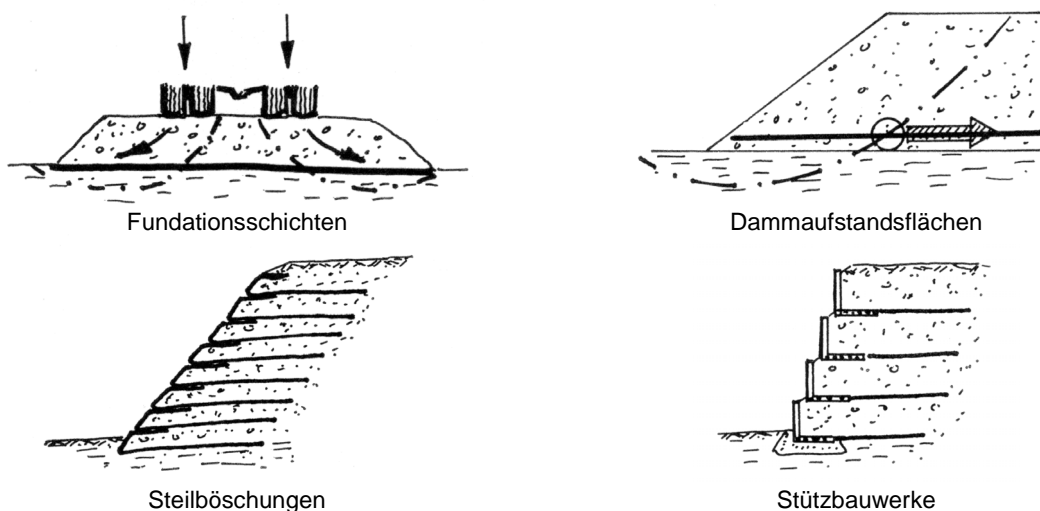


Abb. 1 Anwendungsbeispiele für Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgaben.

Massgebend für Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgaben sind in erster Linie ihre mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Dehnungsverhalten, Zeitstandverhalten, Kriechmass) sowie die Beständigkeit gegen chemische, biologische und physikalische Angriffe (Abb. 2). Am Ende der für ein bestimmtes, Geokunststoff-bewehrtes Bauwerk erwarteten oder verlangten Gebrauchsdauer muss noch eine bestimmte Restsicherheit gegenüber einem Versagen des Bauwerkes infolge Bruch der Bewehrung vorhanden sein (Tragsicherheit). Zusätzlich soll die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes z.B. durch eine Begrenzung der Deformationen bis zum Ende der Gebrauchsdauer gewährleistet sein (Gebrauchstauglichkeit).

Neben der reinen Beurteilung der Zeitstandsicherheit eines Bauwerkes (Sicherheit) ist auch das Deformationsverhalten (Gebrauchstauglichkeit) über die ganze Gebrauchsdauer zu untersuchen. Für die Bemessung bewehrter Konstruktionen ist zusätzlich die Kenntnis des Reibungsbeiwertes wichtig. Je nach Anwendung übernehmen die Geokunststoffe auch noch Aufgaben des Trennens, Filterns und Drainierens, wobei sie dann auch die entsprechenden Anforderungen erfüllen müssen.

1.1.2 Aufgabe Schützen

Geokunststoffe mit Schutzaufgabe bewahren empfindliche Bauteile wie zum Beispiel Dichtungsmembranen (Kunststoffdichtungsbahnen), Isolationselemente oder andere Bauteile vor mechanischen Beschädigungen (z.B. bei Tunnelbauisulierungen, Deponien, Speicherbecken, Kanälen, Flachdächern oder Rohrleitungen). Die mechanischen Beschädigungen entstehen insbesondere durch das statische und auch dynamische Eindringen von Grobkorn aus Locker- oder Felsgestein sowie durch Scheuerbewegungen zwischen dem zu schützenden Bauteil und der Umgebung (beispielsweise Setzungen einer Hinterfüllung).

Damit Geokunststoffe eine Schutzfunktion ausüben können, sollen sie einen hohen Widerstand gegen Perforation (beispielsweise simuliert durch den Durchschlagversuch) und eine gewisse Dicke aufweisen (damit der Geokunststoff als lastverteilendes Kissen wirkt). Unter Umständen können Schutz-Geokunststoffe

auch eine kombinierte Aufgabe übernehmen. So kann es sinnvoll sein, wenn diese gleichzeitig eine Drainaufgabe erfüllen.

Bezüglich des Langzeitverhaltens ist die Festigkeit von untergeordneter Bedeutung, wenn der Geokunststoff den Einbau selbst schadlos übersteht und die Schutzaufgabe während dem ganzen Einbauvorgang übernehmen kann. Beispielsweise sind Mindestanforderungen an den Durchschlagwiderstand und den Scheuerwiderstand zu stellen. Für den langfristigen Schutz genügt es im Wesentlichen, wenn die Fasern erhalten bleiben und keinem Abbau unterworfen sind. Ausnahmen sind Schutz-Geokunststoffe, die einer wechselnden permanenten Belastung (zum Beispiel einer dynamischen Scheuerbewegung) ausgesetzt sind, und/oder wenn eine permanente Drainfunktion gefordert ist. Eine solche dynamische Beanspruchung des Geokunststoffs sollte jedoch durch geeignete bauliche Massnahmen in Permanentbauwerken von vorneherein ausgeschlossen werden.

1.1.3 Langzeitverhalten

Die Eigenschaften eines Geokunststoffs sind im Allgemeinen zeitabhängig. In Abb. 2 ist die Eigenschaftsveränderung als Funktion von Beanspruchung und Zeit schematisch dargestellt. Die obere Kurve repräsentiert die Veränderung einer Messgrösse (beispielsweise der Zugfestigkeit) aufgrund von Einflüssen, welchen der Geokunststoff von der Herstellung bis zum Ende seiner Funktionstüchtigkeit standhalten muss. Die Anforderungen, welchen eine Geokunststoff-Eigenschaft je nach Beanspruchungssituation genügen muss, sind in der unteren Kurve dargestellt.

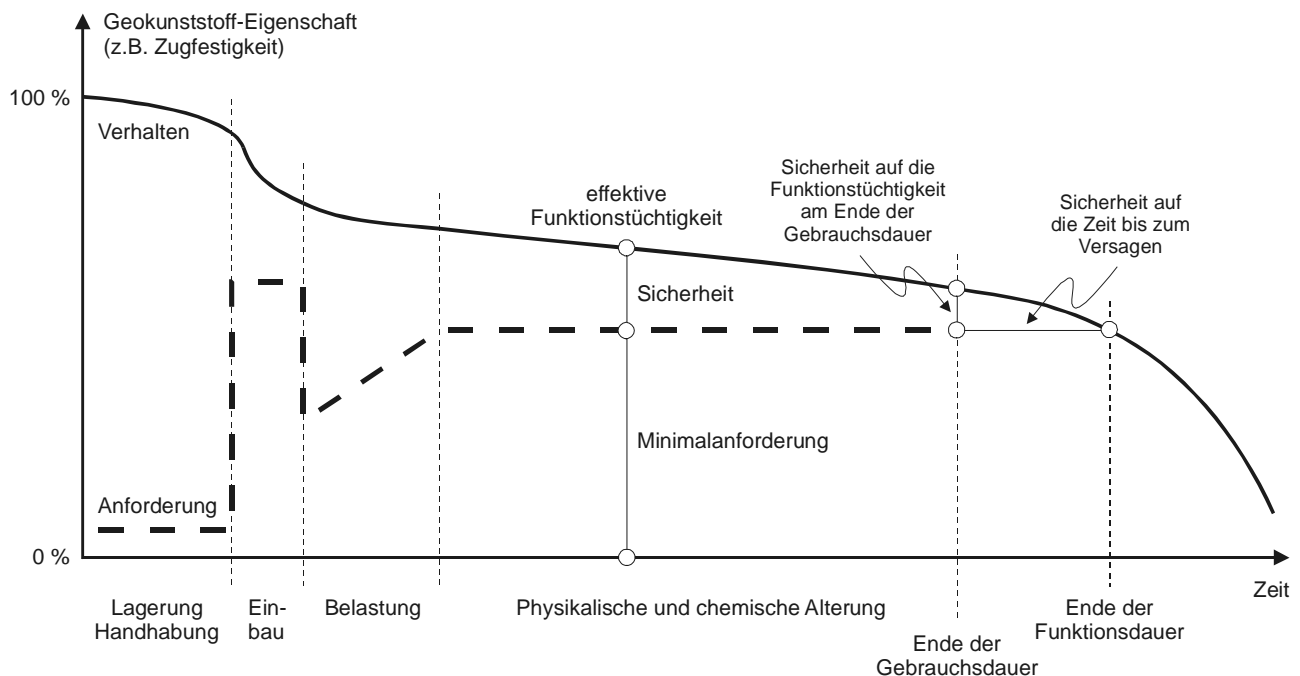


Abb. 2 Schematische Darstellung der Zeitabhängigkeit von verfügbarer und verlangter Geokunststoffeigenschaft (CR ISO 13434, 1998).

Forschungsarbeiten zum Thema Langzeitverhalten von Geokunststoffen mit Bewehrungs- und Schutzaufgaben wurden in den letzten Jahren vermehrt angegangen, weil sich gezeigt hat, dass routinemässige Laboruntersuchungen nur beschränkt eine Vorhersage der Lebensdauer eines mit Geokunststoffen ausgeführten, permanenten Bauwerks erlauben. Diese Arbeiten haben zur Hauptsache immer differenziertere Aussagen zu immer enger eingegrenzten Randbedingungen und Einflüssen zum Ziel. Daraus abgeleitete Interpretationen über das Verhalten in der Praxis, d.h. bei einem kombinierten Auftreten verschiedenster Einflüsse, sind meist zu spezifisch und als Hilfsmittel für den Anwender im Allgemeinen nicht zu gebrauchen.

Das Langzeitverhalten von Geokunststoffen wurde im Auftrag des Schweizerischen Verbandes der Geotextilfachleute SVG auf der Basis von umfangreichen Literaturrecherchen und eigenen Prüfergebnissen untersucht (Hufenus et al., 1997). Innerhalb dieser Arbeit war es aber nicht möglich, Mindestanforderungen an Geokunststoffe mit Bewehrungs- und Schutzaufgaben herzuleiten. (Die korrekte Anwendung von Geokunststoffen für die Funktionen Trennen, Filtern und Drainieren ist in der Norm SN 640 552, 1997 geregelt.)

1.1.4 Feststellungen aus der Baupraxis

Jeder Kanton und auch die Gemeinden schreiben Geokunststoff-bewehrte Stützmauern oder Steilwälle regelmässig aus. Es besteht somit ein Markt, und es bemühen sich zahlreiche Bewerber und viele Unternehmer daran teilzunehmen.

Die Ausschreibungen bezeichnen meist ein einziges System (z.B. Anzahl Baupakete eines bestimmten Produktes). Diese Methode der Ausschreibung entspricht nicht den heutigen gesetzlichen Anforderungen für kontrollierbare und nachvollziehbare Submissionen. Die Ausschreibung eines einzigen Systems ohne nachvollziehbare Anforderungen öffnet Tür und Tor für Unternehmervarianten als "Billigvarianten" mit geringeren Material- und Sicherheitseigenschaften als der Projektverfasser und/oder Bauherr ursprünglich planten. Seitens der ausschreibenden Stelle (Ingenieurbüro, Bauleitung und Bauherrschaften) fehlt oft das spezialisierte Fachwissen um die Materialanforderungen in der Verhandlungsphase einzufordern oder am Bau durchzusetzen.

Um allgemein die Anforderungen an Geokunststoff-Bewehrungen durchzusetzen, fehlen in der Schweiz die erforderlichen Normen und Regeln der Baukunde. Offertausschreibungen können sich somit nicht, wie in anderen Tiefbauarbeiten (z.B. Anker oder Pfähle) auf eine einschlägige Norm als "mitgeltend" abstützen, sondern haben (vorläufig) die Regeln der Baukunde und die geologischen Grundlagen sowie Anforderungen an die Materialien und an die Bemessung klarzustellen. Nur so erfüllen Unternehmervarianten die erwartete Qualität und schliessen schlechtere Billigvarianten aus.

Besonders auffällig ist das Sparen bei Unternehmervarianten bezüglich der zu liefernden Geokunststoff-Bewehrung, weil jede Reduktion der Sicherheit um 10 % oder 20 % auch eine Reduktion der Menge Bewehrung und damit gegenüber der Konkurrenz einen Preisvorteil ergibt. Um Varianten für den Bauherr, Unternehmer oder Lieferanten kostengünstig erscheinen zu lassen, wird daher oft an der Sicherheit der Geokunststoff-Bewehrung gespart durch das Berücksichtigen von zu geringen (versteckten) Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit war es, Grundlagen zur Voraussage des Langzeitverhaltens von Geokunststoffen mit der Funktion Bewehren und Schützen zu liefern. Insbesondere galt es, den Einfluss der Voralterung durch mechanische Einbaubeanspruchung und Bewitterung sowie den Einfluss von Zugspannungen auf das Alterungsverhalten der Geokunststoffe zu ermitteln. Für den sicheren Einsatz von Geokunststoffen müssen deren Langzeiteigenschaften aufgrund der Ergebnisse von geeigneten Standardversuchen an Neuprodukten abgeschätzt werden können.

Durch die enorme Aktivität der europäischen Normenorganisation CEN kommt eine Flut neuer Prüfnormen und -resultate auf den Anwender von Geokunststoffen zu. Die vorliegende Arbeit liefert Erläuterungen und Kommentare zu den hier relevanten europäischen Normen. Der Anwender muss die Resultate von einzelnen Prüfungen interpretieren können und das Verhalten eines Geokunststoffs unter kombinierten Einflüssen und damit Einsatzgrenzen und Sicherheitsbeiwerte für die Bemessung der Bewehrungs- und Schutzlagen kennen.

Basierend auf Erkenntnissen aus eigenen Untersuchungen und aus der Literatur wurden Empfehlungen für struktur- und rohstoffabhängige Anforderungskriterien und Sicherheitswerte zur Bemessung von Geokunststoffen mit permanenter Bewehrungs- und Schutzfunktion erarbeitet. Die Forschungsergebnisse sind so aufbereitet, dass sie als Basis für entsprechende Normen dienen, welche dem Anwender die korrekte Auswahl und Anwendung von Geokunststoffen für die Funktionen Bewehren und Schützen ermöglichen.

Diese Empfehlungen sollen den wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Einsatz von Geokunststoff-bewehrten Bauwerken fördern helfen und Schäden an solchen Konstruktionen verhindern. Sie schaffen für die verschiedenen Anbieter auf dem Markt klare Vorgaben und liefern dem Abnehmer Kontrollinstrumente für die Überprüfung der Projekte und der Ausführung. Zur Feststellung, ob ein Geokunststoff den aus Projekt und Bemessung resultierenden Mindestanforderungen über die verlangte Gebrauchsdauer des Bauwerkes genügt, muss der Anwender die an den Geokunststoff zu stellenden mechanischen und hydraulischen Anforderungen sowie die erwartete minimale Lebensdauer kennen oder aus der Bemessung des Gesamtbauwerkes bzw. des Bauteiles herleiten können.

1.3 Vorgehensweise

Die aus den Zielen abzuleitenden Aufgaben lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erarbeiten der Grundlagen zur korrekten Auswahl und Anwendung von Geokunststoffen mit Bewehrungs- und Schutz-Aufgaben: Minimalanforderungen an mechanische und evtl. hydraulische Langzeit-

Eigenschaften. Beurteilung der Aussagefähigkeit gängiger Laboruntersuchungen. Vorschlag für eine Schweizer Norm.

- Erarbeitung und Validierung eines Laborversuches zur Ermittlung des Einflusses von Einbauschädigungen und eines Zeitrafferversuches zur schnellen/wirtschaftlichen Ermittlung des Zeitstandverhaltens.
- Wissenschaftlich fundierte Abschätzung der Abminderungsfaktoren (Zeitstandverhalten, Einbau-Beschädigung, Verarbeitung, Umgebungseinflüsse) und des Interaktionsverhaltens Geokunststoff - Boden zur Ermittlung der zulässigen Gebrauchsfestigkeit aus der Zugfestigkeit im Neuzustand.

1.3.1 Literaturlauswertung

Robustheit (Widerstand gegen Beschädigung bei Transport, Einbau und Verdichtung) und Langzeitverhalten (Zeitstandverhalten und physiko-chemische Alterung) von Geokunststoffen sind Thema zahlreicher Untersuchungen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die einschlägige Literatur systematisch aufgearbeitet. Die wichtigsten Forschungsergebnisse wurden ausgewertet und mit eigenen Untersuchungsergebnissen verglichen. Bestehende Empfehlungen, Normen und Normvorschläge wurden gegenübergestellt. Es galt zu klären, was bereits durch andere zufriedenstellend untersucht wurde, was direkt übernommen werden kann, was angezweifelt werden muss und wo Wissenslücken bestehen (insbesondere bezüglich der Aussagefähigkeit von Laboruntersuchungen, d.h. der Übertragung bzw. Extrapolation von Labor-Versuchsergebnissen auf das Langzeitverhalten der Geokunststoffe im Bauwerk).

1.3.2 Feld- und Laborversuche

Bei den meisten üblichen Anwendungen sind die Geokunststoffe beim Einbau den stärksten physikalischen Beanspruchungen ausgesetzt. Daher konzentrierten sich die eigenen Untersuchungen auf die hierbei auftretenden Einflüsse und ihre Wirkung. 35 verschiedene Geotextilien und Geogitter wurden für die Durchführung umfangreicher Feld- und Laborversuche beschafft. Zur Ermittlung der Einbaubeanspruchung wurden Einbauversuche im Massstab 1:1 mit feinkörnigem Sandboden und mit gemischtkörnigen Böden aus rundem und gebrochenem Kies durchgeführt. Die Verdichtung erfolgte unter für bewehrte Konstruktionen üblichen Bedingungen.

Zur Kontrolle der Verdichtung und zur Feststellung der Bodenkennwerte der Schüttmaterialien wurden verschiedene Untersuchungen vor Ort sowie im Labor durchgeführt. Die ausgebauten Proben wurden auf mechanische Schäden wie Löcher, Brüche, etc. untersucht. Neben Festigkeitsprüfungen wurden sie auch Alterungsprüfungen unterzogen, um eine eventuelle Verminderung der chemischen Beständigkeit durch den Einbau festzustellen. In Ergänzung zu den Feldversuchen wurden Labor-Einbausimulationen mit Bodenmaterial aus den Feldversuchen sowie einem künstlichen Kiesersatz vorgenommen (als Ersatz für grossflächige, aufwendige Feldversuche).

Mehrmonatige Freibewitterungsversuche dienten zur Abschätzung des Einflusses von Einbauverzögerungen, bei welchen der Geokunststoff nicht sofort nach dem Verlegen überdeckt wird. Die Bewitterung erfolgte auch an Proben unter Spannung, um beispielsweise die Beanspruchung von Geokunststoffen beim Einbau in Stirnflächen von bewehrten Steilböschungen zu simulieren.

Mit ausgewählten Geokunststoffen wurden Kriech- und Zeitstandversuche an schmalen Gitter- und Gewebestreifen unter verschiedenen Temperaturen vorgenommen. Diese dienten primär zur Beurteilung der Tauglichkeit von in der Literatur vorgeschlagenen Zeitrafferversuchen zur wirtschaftlicheren Ermittlung des Kriech- und Zeitstandverhaltens von Geokunststoffen. Darüberhinaus wurden einzelne Ausziehversuche extern in Auftrag gegeben.

1.3.3 Umsetzung der Ergebnisse

Der Literatur entnommene Untersuchungsergebnisse und eigene Resultate wurden herangezogen, um Anforderungen für den Einsatz von Geokunststoffen als Schutz und/oder Bewehrung zu definieren und die erforderlichen Nachweise festzulegen. In der Form je eines Normentwurfs für die Aufgaben Bewehren und Schützen wurde - basierend auf Normen, Empfehlungen und Fachliteratur - ein Hilfsmittel für den Geokunststoff-Anwender ausgearbeitet.

2. Literaturlauswertung und allgemeine Grundlagen

Dieses Kapitel liefert einerseits eine Einführung in die Thematik der Geokunststoffe und ihrer Aufgaben Bewehren und Schützen, andererseits gibt es ausführlich den Stand der Technik in diesem Bereich wieder. Eigene Untersuchungen werden in den späteren Kapiteln vorgestellt.

2.1 Geokunststoffe

Geokunststoffe sind polymere, meist flächenhafte Strukturen, welche bei geotechnischen und bautechnischen Anwendungen eingesetzt werden. Als Antwort auf die anwendungsspezifischen Anforderungen existiert eine Vielzahl von Geokunststoffen mit unterschiedlichsten mechanischen und hydraulischen Eigenschaften. Die vorliegende Arbeit handelt ausschliesslich von Geotextilien (wasser- und luftdurchlässige, textile Flächegebilde) und Geogittern (regelmässige, flache Gitter mit fest verbundenen Längs- und Querelementen).

2.1.1 Geokunststoff-Typen

2.1.1.1 Geovlies

Geotextil, das aus einer Faserschicht von ausgerichteteten oder wirt gelegten Fasern oder Filamenten durch Vernadeln (Abb. 3) und/oder thermische bzw. adhäsive Verfestigung (Abb. 4) hergestellt wird.

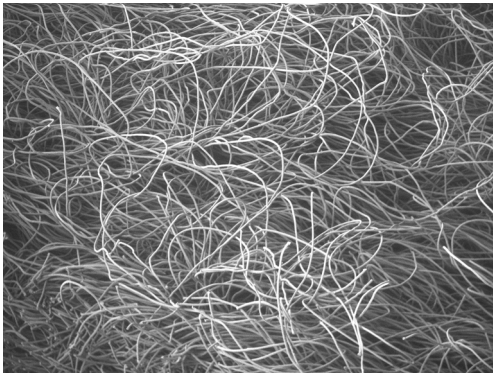


Abb. 3 Vernadeltes Geovlies (Makroaufnahme 1:10).

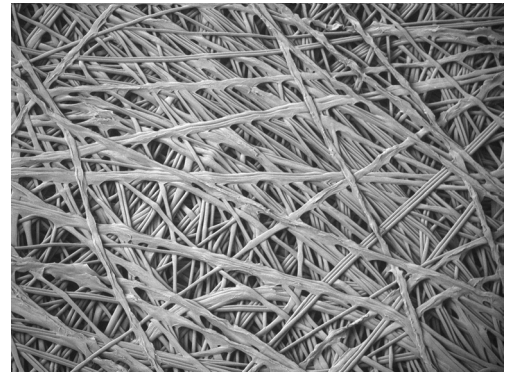


Abb. 4 Thermisch verfestigtes Geovlies (Makroaufnahme 1:10).

2.1.1.2 Geogewebe

Geotextil, das durch in der Regel rechtwinklige Verkreuzung von zwei oder mehr Systemen aus Fäden, Fasern, Filamenten, Bändchen oder anderen Elementen hergestellt wird. Beispiele sind Monofilgewebe, Multifilgewebe (Abb. 5) oder Bändchengewebe (Abb. 6).

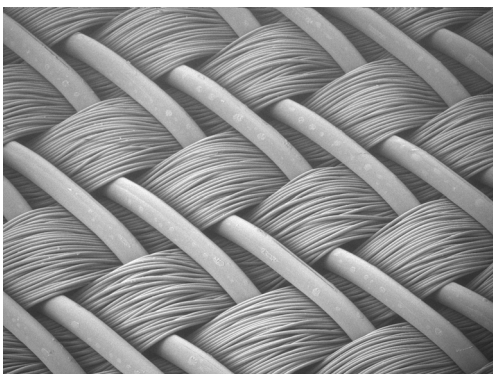


Abb. 5 Geogewebe mit Monofil-Kette und Multifil-Schuss (Makroaufnahme 1:10).

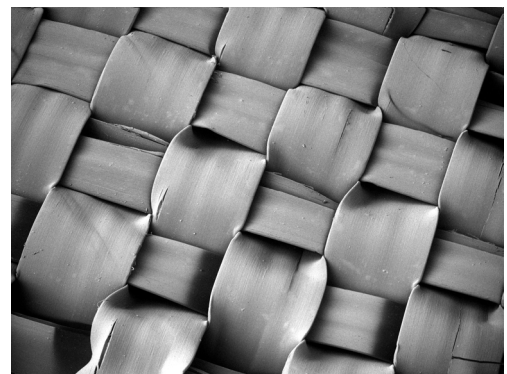


Abb. 6 Bändchengewebe (Makroaufnahme 1:10).

2.1.1.3 Geogewirk

Geotextil, das aus einem oder mehr Systemen von Fäden, Fasern, Filamenten oder anderen Elementen durch Maschenbildung hergestellt wird.

2.1.1.4 Geogitter

Regelmässiges flaches Gitter mit fest verbundenen Längs- und Querelementen, dessen Öffnungen grösser als die Fäden bzw. Streben sind. Die Verbindung erfolgt beispielweise durch Extrudieren (Abb. 7), Verweben (Abb. 8), Verschweissen (Abb. 9) oder Kettenwirken.

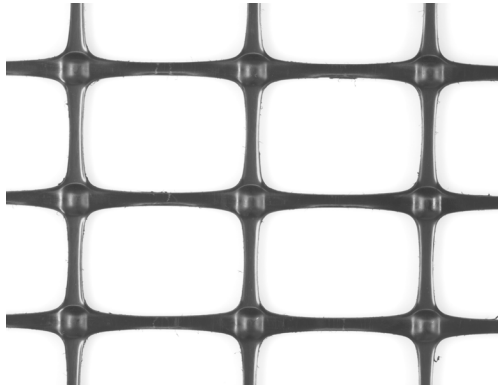


Abb. 7 Aus extrudierter Kunststoffbahn gestanztes und biaxial gerecktes Geogitter.

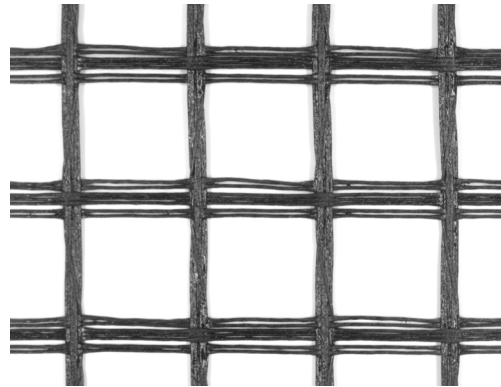


Abb. 8 Gittergewebe mit Kunststoff-Ummantelung.

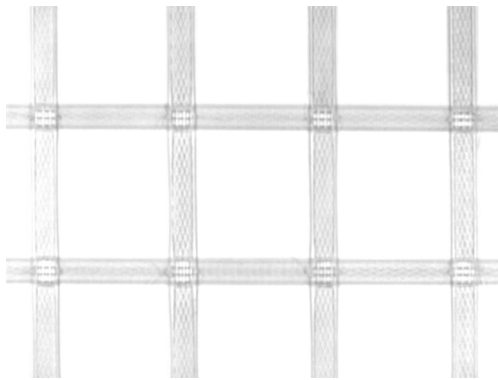


Abb. 9 Geogitter aus gelegten und verschweissten Flachstäben.

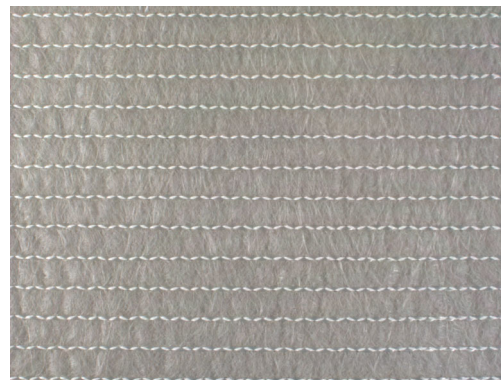


Abb. 10 Mit Multifilamentgarn verstärktes Vlies (Kettengewirk).

2.1.1.5 Geoverbundstoff (Geokomposit)

Aus Komponenten aufgebautes Flächengebilde, das in geo- und bautechnischen Bereichen verwendet wird. Es ist industriell vorgefertigt und besteht aus mindestens einem Geokunststoff (Abb. 10).

2.1.2 Eigenschaften von Rohstoffen und Endprodukten

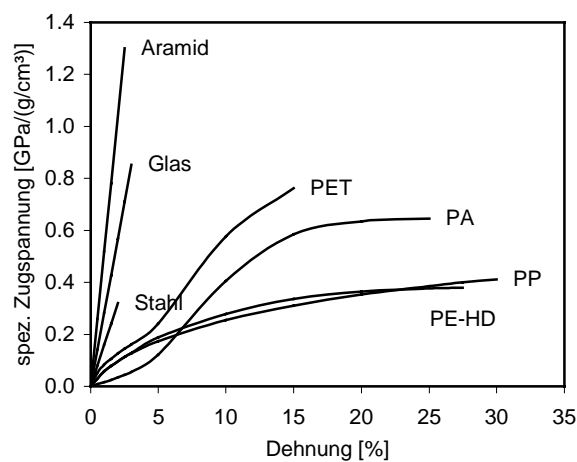


Abb. 11 Typische Kraft-Dehnungs-Kurven gebräuchlicher Fasern. Die Kurven zeigen die materialspezifischen Zugspannungen (bezogen auf die Rohstoffdichte), welche zur Erreichung einer bestimmten Dehnung aufgebracht werden müssen. Das effektive Kraft-Dehnungs-Verhalten eines Geokunststoffs hängt neben dem Rohstoff vor allem auch von der Herstellungsart ab.

Die Rohstoffe für beständige Geokunststoffe sind synthetische polymere Materialien, die aus Erdölderivaten hergestellt werden. Diese setzen sich aus Makromolekülen zusammen, die ihrerseits aufgebaut sind aus einer Vielzahl kleiner, ähnlich strukturierter Einheiten, den Monomeren. Durch Polymerisation oder Polykondensation werden die Grundbausteine zu Makromolekülen zusammengefügt. Die molekulare Struktur dieser Polymere bestimmt ihre individuellen Eigenschaften (Abb. 11).

Die Rohstoffe werden von der chemischen Industrie als Pulver oder Granulat geliefert. Die drei wichtigsten Vertreter für Geokunststoffe sind *Polyethylen* (PE), *Polypropylen* (PP) und *lineare Polyester* (PET). Neben den unterschiedlichen Ausgangsmaterialien ermöglichen entsprechende Behandlungs- und Produktionsverfahren die Herstellung der verschiedenen Geokunststoffe mit ihren charakteristischen Eigenschaften. Weil die Dichte eines Ausgangsmaterials stark vom jeweiligen Produktionsprozess abhängt, wird im Folgenden nur die rohstoffspezifische und damit produktunabhängige Dichte angegeben.

2.1.2.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen besteht aus linearen Ketten von Methylengruppen $-CH_2-$ (Abb. 12). Seine physikalischen Eigenschaften werden massgeblich durch den Grad der Kristallinität bzw. der Verzweigung der Kettenmoleküle beeinflusst. Der Grad der Kristallinität bestimmt die Dichte, die schliesslich für die Unterscheidung zwischen PE-LD und PE-HD herangezogen wird. Für die Herstellung von Geokunststoffen wird in erster Linie PE-HD (High Density Polyethylene) verwendet.

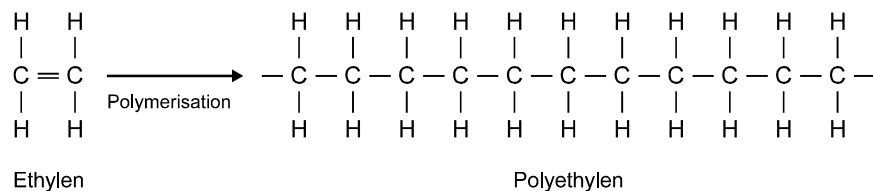


Abb. 12 Chemische Struktur von Polyethylen (Dichte PE-HD: 0,935 ... 0,970 g/cm³).

Unter andauernder Bewitterung (Einfluss von UV-Strahlen, Temperatur und Feuchtigkeit) verschlechtern sich die Eigenschaften des PE, das Material wird spröde. Durch Beimengung von UV-Stabilisatoren kann jedoch ein weitgehender Schutz vor derartigen Alterungsprozessen erreicht werden, sofern die Zusätze selbst langzeitstabil sind und nicht zum Beispiel ausgewaschen werden. Sehr oft wird Carbon Black zur Verbesserung der UV-Stabilität eingesetzt.

Aus PE-HD werden gereckte Geogitter (aus gestanzten, extrudierten Bahnen), Stapelfaservliese (vorwiegend als Schutzvliese für Geomembranen) und Gewebe hergestellt. Wegen ihrer allgemein hohen chemischen Beständigkeit eignen sich diese Produkte vor allem auch für den Deponiebau.

2.1.2.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen entsteht durch die Polymerisation von Propylen-Monomer (Abb. 13). Polypropylen ist der leichteste unter den erwähnten Kunststoffen. Man unterscheidet zwischen Homopolymeren und Copolymeren. Die homopolymere Form besitzt eine höhere Kristallinität und ist steifer.

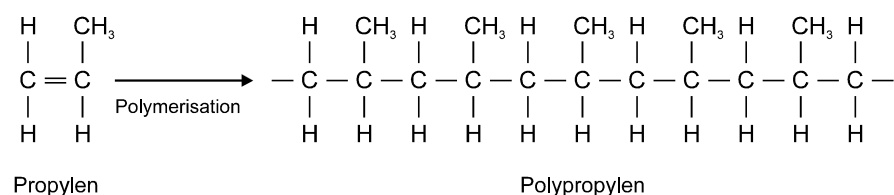


Abb. 13 Chemische Struktur von Polypropylen (Dichte: 0,902 ... 0,910 g/cm³).

Durch das Beimischen von Antioxidantien wird ein Oxidationsprozess verhindert und die Gebrauchsdauer signifikant verlängert. Höhermolekulare Antioxidantien sind resistenter gegen Auswaschung als niedermolekulare Verbindungen. Sehr oft wird Carbon Black zur Verbesserung der UV-Stabilität eingesetzt.

Aus Polypropylen werden unterschiedlichste Geokunststoffe für verschiedenste Verwendungszwecke hergestellt (vor allem Vliese, Bändchengewebe und aus extrudierten, gestanzten Bahnen biaxial gereckte Geogitter).

2.1.2.3 Polyethylenterephthalat (PET)

PES wird als Überbegriff für alle Polyesterarten verwendet. Geokunststoffe werden aber nur aus einer bestimmten Polyesterart, nämlich Polyethylenterephthalat (PET) hergestellt, das durch die Polykondensation

von Ethylenglykol ($\text{HOCH}_2\text{-CH}_2\text{OH}$) und Dimethylterephthalat ($\text{H}_3\text{COOC-C}_6\text{H}_4\text{-COOCH}_3$) oder Terephthalsäure ($\text{HOOC-C}_6\text{H}_4\text{-COOH}$) entsteht (Abb. 14).

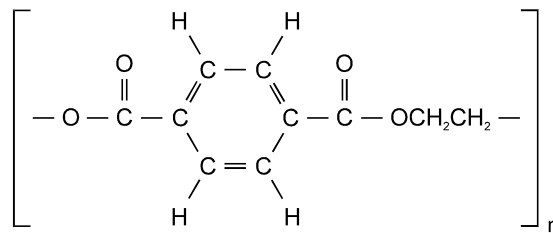


Abb. 14 Chemische Struktur von Polyethylenterephthalat (Dichte: $1,360 \text{ g/cm}^3$).

Polyethylenterephthalat (PET) weist im Vergleich zu den anderen Rohstoffen ein höheres spezifisches Gewicht und allgemein auch eine höhere Festigkeit sowie ein geringeres Kriechmass auf. PET kann durch Hydrolyse in stark alkalischem Milieu geschädigt werden. Die Beständigkeit gegenüber Licht ist relativ gut, so dass keine spezifische UV-Stabilisierung erforderlich ist.

Aus PET wird eine breite Palette von Geokunststoffen hergestellt, angefangen von Vliesen bis zu Geweben und Gittergeweben, die dank ihrer hohen Festigkeit bei gleichzeitig vergleichsweise geringem Kriechmass vor allem für Bewehrungszwecke verwendet werden.

2.1.2.4 Polyamid (PA)

Die zwei wichtigsten Polyamide, die bei der Geokunststoffherstellung Anwendung finden, sind Polyamid 6 und Polyamid 6.6, beides aliphatische Polymere (Moleküle, die keine Ringstrukturen einschliessen). Polyamid 6 entsteht durch die Polymerisation von ϵ -Caprolactam, Polyamid 6.6 durch die Polykondensation von Adipinsäure ($\text{HOOC-(CH}_2)_4\text{-COOH}$) und Hexamethyldiamin ($\text{H}_2\text{N-(CH}_2)_6\text{-NH}_2$).

Geokunststoffe aus Polyamid sind eher selten, unter Anderem weil sich die an sich guten mechanischen Eigenschaften bei Einwirkung von Wasser merklich verschlechtern. So vermindert sich ihre Festigkeit durch Wasseraufnahme und die Fasern längen sich. Polyamid wird beispielsweise in Geoverbundstoffen eingesetzt, bei denen ein elastisches Verhalten verlangt wird.

2.1.2.5 Aramide

Aramide (Aromatische Polyamide) sind temperaturbeständig, chemikalienresistent, aussergewöhnlich fest, sehr steif (hoher Elastizitätsmodul) und neigen kaum zum Kriechen. Nachteilig ist die schlechte Lichtbeständigkeit und die Empfindlichkeit gegen Druckbelastung quer zur Faserachse.

2.1.2.6 Polyvinylalkohol (PVA)

Polyvinylalkohol (PVA) ist in wasserunlöslicher und wasserlöslicher Form erhältlich. Hochfestes (wasserunlösliches) PVA besitzt ähnlich vorteilhafte Eigenschaften wie PET (hohe Festigkeit, geringe Kriechneigung, gute Witterungsbeständigkeit). Im Gegensatz zu PET ist PVA aber alkaliresistent. Geokunststoffe aus hochfesten PVA-Fasern sind relativ neu auf dem Markt und Langzeiterfahrungen aus der Praxis fehlen weitgehend.

2.1.2.7 Glasfasern

Glasfasern weisen allgemein hohe Zugfestigkeiten bei geringer Dehnung auf. Das Spannungs-Dehnungsverhalten ist bis zum Bruch linear (vollelastische Dehnung). Glas ist anorganisch und daher nicht brennbar, witterungsbeständig sowie unempfindlich gegenüber Ölen und Lösungsmitteln. Glasfasern weisen aber eine extreme Sprödigkeit auf und sind im Allgemeinen nicht alkaliresistent.

2.1.2.8 Polyvinyl-Beschichtung

Zur Fixierung und zum Schutz der Filamente werden Polyester- und Glasfaser-Gewebe oft mit Polyvinyl (z.B. PVC) umhüllt.

2.1.3 Geokunststoff-Normen

Geokunststoffe werden leider primär über den Preis verkauft. In vielen Fällen werden keine Anforderungen an das Produkt gestellt oder sie sind unsachgemäß und verlangen beispielweise nur ein minimales Flächengewicht. Das mangelnde Qualitätsbewusstsein vieler Anwender und Ihr Verzicht auf Kontrollen einer Lieferung verbilligt vielleicht den ohnehin preiswerten Geokunststoffeinsatz, kann aber teure Schadenfälle zur Folge haben.

Es scheint, dass ein Grossteil der am Bau Beteiligten die Geokunststoff-Normen und -Empfehlungen nicht kennt oder zumindest aus Kosten- oder anderen Gründen nicht umsetzt. Und dies trotz der grossen Anstrengungen des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS und des Schweizerischen Verbandes der Geotextilfachleute SVG, europäische Normen umzusetzen und durch Schweizer Normen und Richtlinien zu ergänzen.

2.1.3.1 Die europäische Normung

Europäische Normen können folgende technischen Spezifikationen enthalten:

- Festlegung der zur Beschreibung eines Produktes erforderlichen Eigenschaften (Datenblatt).
- Beschreibung von Prüfverfahren (zur Bestimmung der Produkt-Eigenschaften).
- Definition von Mindestanforderungen oder Leistungsklassen.

Die Konformität der Produkte in Bezug auf die harmonisierten Spezifikationen wird durch das CE-Zeichen (Abb. 15) bestätigt. Um die Konformität zu bescheinigen, sieht die Bauprodukterichtlinie Materialprüfungen und Produktionskontrollen im Werk vor. Das CE-Zeichen auf der Verpackung und dem Begleitdokument ist eine Bedingung für das Inverkehrbringen von Produkten, und zwar nicht nur in der EU, sondern auch in der Schweiz.



Abb. 15 CE-Zeichen zur Bestätigung der Konformität eines Produktes mit den Anforderungen der CEN.

Ab September 2002 dürfen in der EU nur noch Geokunststoffe mit CE-Kennzeichnung auf den Markt kommen. Zur Erlangung des CE-Zeichens für Geokunststoffe muss ein Qualitätssicherungssystem mit werkseigener Produktionskontrolle und Produkteprüfung vorliegen. Das System schliesst die Fremdüberwachung durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle ein, welche aber weder eine Probenahme noch eine unabhängige Prüfung der Produkteigenschaften umfasst. Das CE-Zeichen ist daher keine Qualitätsgarantie.

Die Normen gemäss Tab. 1 legen die Deklaration der wichtigsten Eigenschaften von Geokunststoffen sowie die geeigneten Prüfverfahren zur Bestimmung dieser Eigenschaften fest. Sie bestimmen, was Hersteller und Händler bei der Angabe von Produkteigenschaften zu beachten haben. Zudem enthalten sie Verfahrensweisen für die Konformitätsbewertung und die werkseigene Produktionskontrolle.

Euronorm	Anwendungsbereich
EN 13249 (2000)	Bau von Strassen und sonstigen Verkehrsflächen (Ausnahme: Eisenbahnbau, bitumenhaltige Schichten des Strassenbaus)
EN 13250 (2000)	Eisenbahnbau: Bereich zwischen Schwellenunterkante und Untergrund (Planum)
EN 13251 (2000)	Erd- und Grundbau; Stützbauwerke
EN 13252 (2000)	Drainageanlagen
EN 13253 (2000)	Erosionsschutzanlagen (Küstenschutz und Deckwerksbau, ohne Oberflächenerosionsschutz)
EN 13254 (2000)	Bau von Rückhaltebecken und Staudämmen
EN 13255 (2000)	Kanalbau
EN 13256 (2000)	Tunnelbau und Tiefbauwerke
EN 13257 (2000)	Entsorgung fester Abfallstoffe
EN 13265 (2000)	Projekte zum Einschluss flüssiger Abfallstoffe

Tab. 1 Geokunststoff-Normen zur Erlangung des CE-Zeichens (je nach Anwendung geforderte Eigenschaften).

In den europäischen "Anforderungsnormen" (Tab. 1) werden lediglich die Eigenschaften festgelegt, deren Prüfung für die Erteilung des CE-Zeichens vorausgesetzt wird. Die Anforderungen, die von einem Produkt für eine bestimmte Anwendung zu erfüllen sind, sind in nationalen Normen vorzugeben. Für die Ausschreibung sind somit weiterhin die in den Schweizer Normen festgelegten Mindestanforderungen relevant. Die Euronormen halten dabei ausdrücklich fest, dass in den nationalen Bestimmungen auch Prüfergebnisse gefordert werden dürfen, welche zur Erlangung des CE-Zeichens nicht verlangt werden.

2.1.3.2 Die Schweizer Normen

Die Norm SN 640 550 (1996) schreibt vor, dass Geokunststoffe durch den Hersteller oder Lieferanten mit einem Datenblatt zu beschreiben sind. Damit stellt sie sicher, dass dem Anwender sämtliche für die Hauptaufgaben Trennen, Filtern und Drainieren relevanten Daten über ein Geokunststoff zur Verfügung stehen. Die europäischen Normen gemäss Tab. 1 verlangen die Angabe von Nominalwerten mit Toleranzen, wohingegen SN 640 550 (1996) Mindest- und Höchstwerte vorschreibt. Diese sind für den Anwender eindeutig und können ohne weiteren Sicherheitszuschlag direkt für die Auswahl der geeigneten Geokunststoffe verwendet werden. Die Mindest- und Höchstwerte können aus dem Nominalwert durch Addition bzw. Subtraktion der Toleranz hergeleitet werden.

Die Norm SN 640 552 (1997) enthält mechanische und hydraulische Anforderungen für die Geokunststoff-Hauptfunktionen Trennen, Filtern und Drainieren (Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4). Anhand verschiedener typischer Anwendungsfälle aus der Praxis erläutert die Norm das Vorgehen zur Bestimmung der Mindestanforderungen für relevante Eigenschaften. Sie enthält ferner Empfehlungen zur Überprüfung der gelieferten Ware auf der Baustelle, Vorschriften bezüglich Lagerung und Einbau des Geokunststoffs sowie Mindestanforderungen an das Langzeitverhalten.

Teilfunktion	Eigenschaft	Parameter
Mechanische Funktion	Festigkeit	Zugfestigkeit Höchstzugkraft-Dehnung Durchschlagwiderstand Stempeldurchdrückkraft
	Verhinderung von Durchmischung und Durchspülung von Material	charakteristische Öffnungsweite
Hydraulische Funktion	Durchlässigkeit	Durchlässigkeit

Tab. 2 Zum Trennen massgebende Eigenschaften.

Teilfunktion	Eigenschaft	Parameter
Mechanische Funktion	Filterung, Verhinderung der Materialdurchspülung	charakteristische Öffnungsweite
Hydraulische Funktion	Durchlässigkeit	Durchlässigkeit

Tab. 3 Zum Filtern massgebende Eigenschaften.

Teilfunktion	Eigenschaft	Parameter
Hydraulische Funktion	Durchlässigkeit in der Ebene (Drainung)	Transmissivität
	seitlicher Wasserzustrom	Durchlässigkeit
Mechanische Funktion	Filterung, Verhinderung der Materialausspülung	charakteristische Öffnungsweite

Tab. 4 Zum Drainieren massgebende Eigenschaften.

Teilfunktion	Eigenschaft	Parameter
Mechanische Funktion	Festigkeit Deformation	Zugfestigkeit Höchstzugkraft-Dehnung Kraft-Dehnungs-Verhalten
	Kriechen Reibung Boden - Geokunststoff	Kriechdehnung Reibungswinkel
Hydraulische Funktion	Verhinderung eines Wasserstaus	Durchlässigkeit

Tab. 5 Zum Bewehren massgebende Eigenschaften.

Teilfunktion	Eigenschaft	Parameter
Mechanische Funktion	Widerstand gegen statische Eindrückung	Stempeldurchdrückkraft
	Widerstand gegen dynamische Eindrückung	Durchschlagwiderstand
	Widerstand gegen Scheuern	Scheuerwiderstand

Tab. 6 Zum Schützen massgebende Eigenschaften.

Zur Anwendung von Geokunststoffen mit den Funktionen Bewehren und Schützen (Tab. 5, Tab. 6) fehlen in der Schweiz vorläufig die entsprechenden Normen und Richtlinien. Um Varianten für den Bauherr, Unternehmer oder Lieferanten kostengünstig erscheinen zu lassen, wird beispielsweise - durch Verwendung zu geringer Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren - oft an der Sicherheit einer Geokunststoff-Bewehrung gespart.

2.2 Geokunststoffe mit der Aufgabe Bewehren

Für das Bewehren muss der Geokunststoff Zugkräfte aufnehmen und über Reibung in den Kontaktboden übertragen können (Abb. 16). Je nach Anwendungsfall sind Nebenaufgaben nützlich, sinnvoll oder unerlässlich. Nebenaufgaben sind vor allem Trennen und Drainieren.

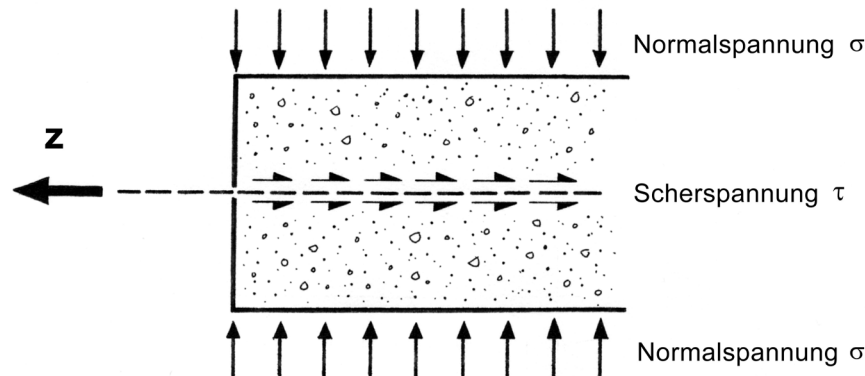


Abb. 16 Bodenbewehrung mit Geokunststoff (z = Zugfestigkeit).

Die Grundanforderungen sind:

- *mechanisch:*
Aufnahme und Übertragung von Zugkräften unter begrenzter Deformation über die geforderte Gebrauchsdauer des Bauwerkes, sowie ausreichende Widerstandskraft gegen Beschädigungen durch den Einbau.
- *hydraulisch:*
Ausreichende Durchlässigkeit zur Verhinderung eines Wasserstaus über oder unter dem Geokunststoff mit gefährlichem Scherfestigkeitsverlust durch Reduktion der auf den Geokunststoff wirkenden Normalkraft infolge der Bildung von Porenwasserdruck.
- *Langzeitverhalten:*
Die oben genannten Anforderungen müssen über die geforderte Gebrauchsdauer des bewehrten Bauwerkes / Bauteils erhalten bleiben. Durch Kriechen des Zuggliedes (Geokunststoff) darf es nicht zu einem vorzeitigen Bruch kommen, und es dürfen keine langfristigen, unzulässigen Deformationen eintreten. Die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse (Atmosphäre, Boden, Wasser) ist über die Gebrauchsdauer zu gewährleisten.

2.2.1 Anwendungsfälle

Für das Formulieren der Anforderungen an Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion ist eine Übersicht über mögliche Anwendungen erforderlich. Abb. 17 enthält typische Anwendungen mit Geokunststoff-bewehrung in Anlehnung an den Arbeitsentwurf CEN/TC288/WG9/N69E (2000).

Konstruktionen aus bewehrter Erde vom Typ Mauer, Widerlager oder übersteile Böschung benötigen in der Regel eine Verkleidung bzw. Fassade (facing), welche die Erosion und das unzulässige Ausquetschen von Schüttdoden verhindert. Die Art der Verkleidung und die Kraftübertragung von der Verkleidung auf die Bewehrung kann bezüglich der Anforderungen an den Bewehrungs-Geokunststoff (Klemmung, Verhängung, Verankerung, etc.) entscheidend sein.

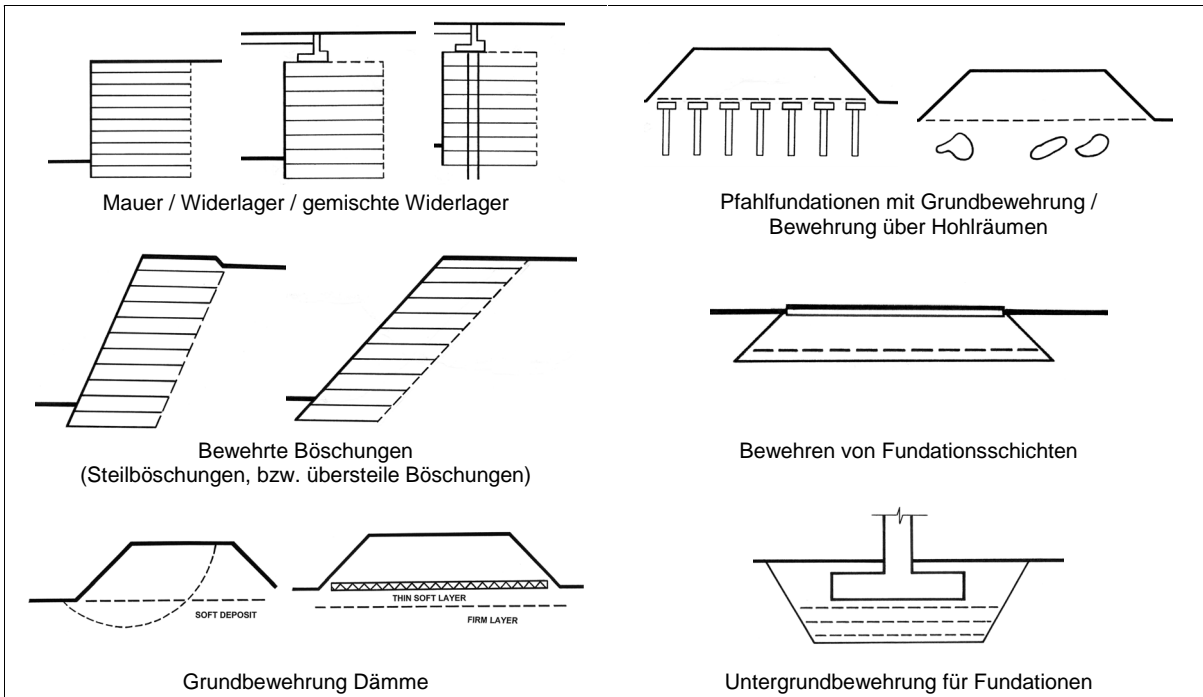


Abb. 17 Anwendungsfälle mit Bewehrungsgeokunststoffen (CEN/TC288/WG9/N69E, 2000).

2.2.2 Massgebende Randbedingungen und Geokunststoff-Eigenschaften

Die mechanischen Mindestanforderungen an Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion sind im Allgemeinen das Resultat einer erdmechanischen Bemessung bzw. von Tragsicherheitsnachweisen. Wie für andere Erdbauwerke üblich, wird dabei zwischen der äusseren (Abb. 18) und der inneren (Abb. 19) Tragsicherheit unterschieden.

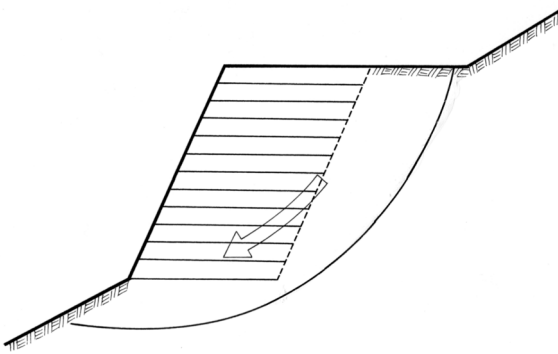


Abb. 18 Äussere Tragsicherheit (Bruch ausserhalb der Bewehrung)

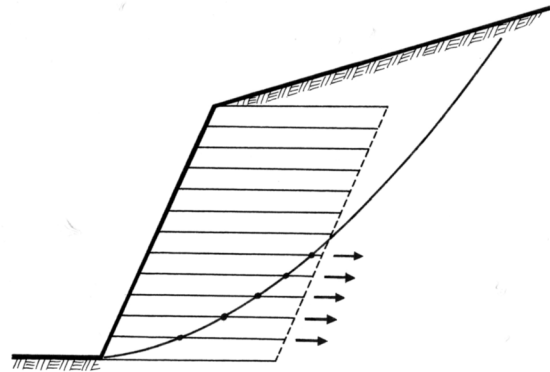


Abb. 19 Innere Tragsicherheit (Bruch durch die Bewehrung)

Die äussere Tragsicherheit muss für jedes andere Bauwerk mit vergleichbarer Aufgabe ebenfalls nachgewiesen werden. Bei der inneren Tragsicherheit ist auch die Bewehrung beteiligt. Diese ist somit massgebend für das Bemessen der Bewehrung bzw. das Ermitteln der an diese zu stellenden Mindestanforderungen. Abb. 18 und Abb. 19 zeigen deutlich, dass die Brüche durch den Untergrund resp. die Schüttung gehen. Ihre Scherfestigkeitseigenschaften sind daher für die Tragsicherheit entscheidend.

Folgende Randbedingungen sind für das Projekt und die Bemessung einer Geokunststoff-bewehrten Konstruktion massgebend (Abb. 20):

- **Geometrie:** Geländeprofil (in einem für die Bemessung und die Nachweise der inneren und äusseren Tragsicherheit ausreichenden Bereich), Höhe, Breite der Konstruktion
- **Untergrund:** Schichtaufbau des Untergrundes mit massgebenden, charakteristischen Kennwerten (Raumgewicht, Reibung, Kohäsion, Zusammendrückbarkeit)

- Schüttung: verfügbares Material mit massgebenden, charakteristischen Kennwerten (Raumgewicht, Reibung, Kohäsion, Zusammendrückbarkeit aus Mindestanforderungen an die Verdichtung)
- Wasser: Grundwasserspiegel / Hangwasserspiegel, bei Einstau: Wasserspiegelschwankungen, Wellenschlag, Schleppkraft
- Belastungen: ständige Lasten (z.B. Bauwerke, Materialdeponien), bewegliche Lasten (z.B. Verkehrslasten), dynamische Belastungen (z.B. aus Verkehr, Erdbeben)
- Gebrauchsdauer: temporär bis 5 Jahre, permanent mit den Bereichen 5...25 Jahre, über 25 Jahre
- Umwelteinflüsse: spezielle Einflüsse aus Atmosphäre, Boden, Wasser (z.B. auch direkte Bewitterung im Frontbereich)

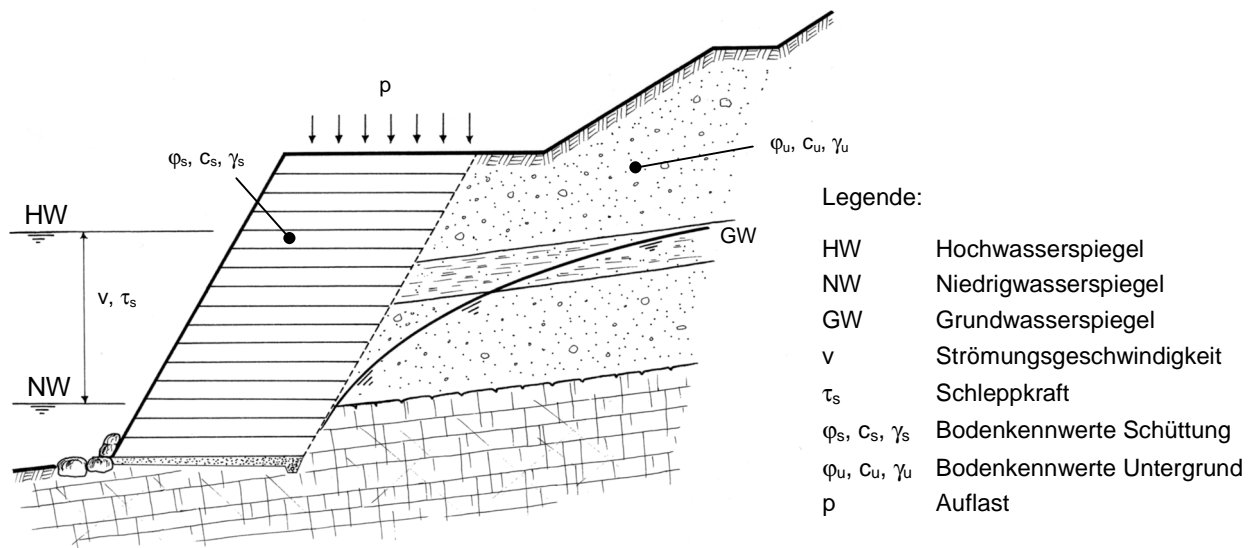


Abb. 20 Massgebende Randbedingungen, nicht abschliessend.

Da Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion im Allgemeinen eine permanente Aufgabe erfüllen müssen, ist neben den mechanischen Eigenschaften, welche das Zeitstandverhalten (Kriechen) miteinschliessen, auch die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse entscheidend.

Geokunststoffaufgabe	Geokunststofffunktion	charakterisiert durch die Parameter	
Hauptaufgabe	Bewehren	Übertragung von Zugkräften	Zugfestigkeit längs Kraft-Dehnungskurve Langzeitzugfestigkeit in Abhängigkeit der Gebrauchsdauer Kriechdehnungen in Abhängigkeit von Beanspruchung und Dauer
		Widerstand gegen Beschädigung	Zugfestigkeit längs/quer Produkt aus (Zugfestigkeit • Dehnung unter Höchstzugkraft)
		Scherkraftübertragung in den Kontaktboden	Interaktion Geokunststoff - Boden Gleitwiderstand Auszieh Widerstand
		Gewährleistung Durchlässigkeit	Durchlässigkeit senkrecht zur Ebene
		Widerstand gegen Umwelteinflüsse	Beständigkeit gegen Bewitterung, chemische und biologische Einflüsse
Nebenaufgabe	mechanisches Trennen	Verhindern der Materialdurchdringung	Charakteristische Öffnungsweite
	hydraulisches Filtern	Begrenzung Materialdurchspülung Gewährleisten Wasserdurchfluss	Durchlässigkeit senkrecht zur Ebene
	Drainieren	Gewährleisten Wasserdurchfluss in der Ebene	Transmissivität (Durchlässigkeit in der Ebene)

Tab. 7 Massgebende Geokunststoffeigenschaften für die Aufgabe Bewehren.

Die für die Aufgabe Bewehren massgebenden charakteristischen Eigenschaften sind in Tab. 7 aufgeführt. Die Nebenaufgaben sind abhängig vom Anwendungsfall und auch nur in bestimmten Fällen nützlich oder erforderlich.

2.2.3 Ermittlung der Langzeit-Zugfestigkeit von Bewehrungs-Geokunststoffen

Wegen der notwendigen Abminderungsfaktoren und Sicherheitsbeiwerte ist die zulässige Langzeit-Zugfestigkeit bei Bewehrungs-Geokunststoffen viel kleiner als die Kurzzeit-Zugfestigkeit. Für den Bemessungswert der Langzeit-Zugfestigkeit von Bewehrungs-Geokunststoffen gilt der Ansatz:

$$z = \frac{r}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_{dyn} \cdot \gamma}$$

wobei

- z = Mindestwert Bemessungszugfestigkeit für eine Gebrauchsdauer der Zeit t
- r = Mindestwert Kurzzeit-Zugfestigkeit aus dem Streifenzugversuch (EN ISO 10 319, 1996)
- A₁ = Abminderungsfaktor für das Zeitstandsverhalten bzw. Verformungsverhalten unter Dauerlast (Kriechen) und damit abhängig von der Gebrauchsdauer
- A₂ = Abminderungsfaktor für die Beschädigung der Bewehrung durch Transport, Einbau und Verdichtung
- A₃ = Abminderungsfaktor für die Verarbeitung (Verbindungsstellen, Anschlüsse an Bauteile)
- A₄ = Abminderungsfaktor für Umgebungseinflüsse (Beständigkeit gegen Chemikalien und Mikroorganismen), welche sich auf die Langzeitzugfestigkeit auswirken
- A_{dyn} = Abminderungsfaktor für dynamische Einflüsse (z. B. ständige dynamische Einwirkungen auf Bewehrungslagen unter Bahngleisen)
- γ = Tragsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Vereinfachungen und Ungenauigkeiten des Berechnungsmodells sowie Abweichungen in der Geometrie des Bauwerkes.

Die Abminderungsfaktoren sind produktespezifisch und dabei stark abhängig von den verwendeten Rohstoffen (Polymeren) und der Machart des Geokunststoffes mit Bewehrungsfunktion (Gewebe, Gitter, Vlies). Einige Abminderungsfaktoren sind nicht nur vom Geokunststoff selbst, sondern auch von äusseren Einflüssen (Boden, Verdichtung) und der Zeit abhängig (Tab. 8).

Abminderungsfaktor	abhängig von:
A ₁ (Kriechen)	Zeit, Temperatur (mittlere Bodentemperatur)
A ₂ (Einbau)	Korngrössenverteilung, Kornform des Kontaktbodens, Tragfähigkeit des Verlegeplanums, Verdichtungsenergie
A ₃ (Anschlüsse)	Art des Anschlusses, der Verbindung, Zeit, Temperatur
A ₄ (Dauerhaftigkeit)	Umgebungseinflüsse aus Boden und Wasser (atmosphärische Einflüsse sind i.A. nur für den Einbau relevant)
A _{dyn}	Grösse einer dynamischen Belastung im Verhältnis zur statischen Grundbelastung, Frequenzen, Zeit der Beanspruchung

Tab. 8 Abhängigkeiten der Abminderungsfaktoren.

Für die Abminderungsfaktoren und Sicherheitsbeiwerte werden national und international die verschiedensten Zahlenwerte eingesetzt, welche meist ohne wissenschaftliche Basis hergeleitet werden. Dabei sind es genau diese Faktoren, welche darüber entscheiden, ob die Bewehrung eines Bauwerkes mit Geokunststoffen unwirtschaftlich ist (überdimensionierter Geokunststoff-Einsatz aufgrund zu grosser Sicherheiten) oder ein Sicherheitsrisiko darstellt (zu kleine Sicherheiten). Die geokunststoffbedingte Gesamtsicherheit variiert nach internationalen Richtlinien zwischen 3 und 4.5 für PET-Produkte und zwischen 4.5 und 9 für PP- und PE-Produkte.

2.2.4 Literaturlauswertung und Umfragen zur Bewehrung mit Geokunststoffen

2.2.4.1 Normen und Richtlinien

Fast alle Länder verfügen über Normvorschriften für Erdarbeiten, aber nur wenige über solche für Steilböschungen oder gar Geokunststoff-bewehrte Stützmauern. Im In- und Ausland sind vor allem Normen für Betonmauern gebräuchlich, modernerweise auch über verankerte Bauwerke, kaum jedoch über Geokunststoff-bewehrte Konstruktionen. Die europäischen CEN-Normen enthalten nur Ausführungshinweise, aber keine Bemessungsanforderungen, was ein Mangel ist. Dieser Punkt erlaubt es dafür der

Schweiz, in diesem Sektor eigene Normen zu gestalten, was sonst gemäss CEN-Reglementarium nicht erlaubt wäre.

Die wichtigsten Normen und Richtlinien zur Technologie der bewehrten Erde finden sich in der folgenden Literatur:

- EBGEO (1997) enthält Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen und gilt heute als deutsches Standardwerk zur Anwendung. Es ist praktisch orientiert und mit vielen Rechenbeispielen versehen. Einige Einzelheiten sind umstritten und befinden sich in Überarbeitung.
- Das Werk des Ministère des Transports (1979) bildet den Klassiker unter der Literatur der bewehrten Erde und beruht auf ausgedehnten wissenschaftlichen Untersuchungen und Feldversuchen. Darin wird hauptsächlich die Verwendung der Terre Armée detailliert reglementiert, also der Vorgängertechnologie der Geokunststoff-Einlagen zur Bewehrung des Bodens (damals ausschliesslich mit Stahlbändern). Die Terre Armée wird nach wie vor weltweit mit Erfolg eingesetzt, fand aber im deutschsprachigen Raum weniger Verbreitung. Die französische Norm NF P 94-220-0 (1998) ist das modernere, revidierte Standardwerk für Terre Armée. Eine Fortsetzung für Geokunststoff-bewehrungen ist in Arbeit.
- Das bedeutende Werk BS 8006 (1995) beschreibt und regelt die Verwendung von bewehrter Erde im britischen Sprachraum in umfassender Weise.
- CEN/TC/288/WG9/N69E (2000) ist noch nicht veröffentlicht. Dieser CEN-Normentwurf beschreibt im Detail die Bauausführung von bewehrter Erde (reinforced fill), ohne Berechnung und Bemessung. Dabei ist die zukünftige europäische Norm in erster Linie eine Ausführungsnorm, welche keine direkten Hinweise für den Entwurf und die Bemessung solcher Konstruktionen beinhaltet.
- Das Merkblatt FGSV (1985) regelte als erste im deutschen Sprachraum die Bemessung und den Bau von nicht konventionellen Stützmauern (Raumgitterwände und -wälle). FGSV (2001) beschreibt den Entwurf und die Bemessung von Stützkonstruktionen aus Betonelementen, Blockschichtungen oder Gabionen und ist die Fortsetzung und Erweiterung von FGSV (1985). Ein Projektmitglied war bei der Erarbeitung beider Merkblätter aktiv mitwirkend.

2.2.4.2 Zulassungen und Submissionsvorschriften

Ausländische Ämter erlauben den Gebrauch bestimmter Materialien nur, falls eine Zulassung dafür besteht. Diese Zulassungen enthalten oft interessante Bemessungsvorschriften mit allgemeiner Gültigkeit, die eine weit über das geprüfte Material hinaus angewandte Verbreitung finden. Im Rahmen des Projektes wurden diese Konzepte sinngemäss in Schweizer Verhältnisse übertragen und in einem Normentwurf allgemein formuliert.

Bekannt sind die Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, welche jahrelange Versuchs- und Prüfphasen verlangen, bis bestimmte Materialien zugelassen sind. Besonders aufschlussreich und verwendbar sind die übersichtlichen Zulassungen des British Board of Agreement (BBA), UK, welche die Materialanforderungen detailliert erfassen, und dazu die Grundsätze der Bemessung und der wichtigen Abminderungsfaktoren für diese Materialien festschreiben. Diese Zertifikate gelten zusammen mit der ausführlichen Norm BS 8006 (1995) zur Bemessung von Stützmauern.

Weil die Zulassungsbehörden unterschiedliche Interpretationen erlauben, werden nicht nur nach Anwendungsfall, sondern auch nach Land unterschiedliche materialtechnologisch Anforderungen an die Geokunststoffe und deren Anwendung gestellt. Physikalische oder chemische Aspekte prägen gewisse (vor allem deutsche) Zulassungen mit teilweise praxisfernen Spitzfindigkeiten (gemäss Auskunft erfahrener Fachleute aus Frankreich, Belgien oder den Niederlanden), die dann überbewertet erscheinen mögen. Ein Beispiel ist die Schädlichkeit eines hohen pH-Wertes auf PET-Materialien, nur schon im Kontakt mit einem längst ausgehärteten und dem Regen exponierten Beton.

Gewisse Ämter erlassen spezielle Submissionsvorschriften, um den Wildwuchs von qualitativ minderwertigen Ausführungen auszuschliessen. Einzelne Ingenieurbüros erarbeiteten eigene "spezielle Bestimmungen", die den Submissionen beigefügt werden, um die Mindestanforderungen festzunageln. Die Existenz solcher Unterlagen beweisen die Notwendigkeit und Dringlichkeit, durch allgemein gefasste und dem modernen Stand der Technik entsprechende Anforderungen an die Mindestqualität sicherzustellen. Solange diese Anforderungen offen und qualitätsorientiert formuliert sind, bleiben die Türen für zukünftige Entwicklungen offen.

Die Richtlinie RIL (1999) der Deutschen Bahn empfiehlt, auch eine Bewertung der dynamischen Einflüsse im Sinne einer dynamischen Bemessung durchzuführen, insbesondere bei kritischen Böden und für Strecken mit höheren Geschwindigkeiten. Da die entsprechenden Werte in Diskussion sind, enthält die Richtlinie noch keine konkreten Mindestanforderungen. Bewehrungsprojekte im Bereich der Deutschen Bahn AG erfordern jedoch generell eine Zustimmung im Einzelfall.

2.2.4.3 Umfragen zu Abminderungsfaktoren und Sicherheitsbeiwerten

Es wurde eine weltweite Umfrage bei bekannten Fachleuten (Hersteller, Forschungsinstitute) durchgeführt, um die Unterschiede in der Bemessung einer Musterwand zu erkennen und daraus Folgerungen für die schweizerische Baupraxis zu ziehen. Charakteristische und informative Einzelheiten werden nachstehend beleuchtet, wobei die befragten Personen und die genannten Produkte nicht namentlich erwähnt werden.

Angaben von Hochschulen:

- a) Wertvolle Hinweise auf das Merkblatt FGSV (1994) mit der Anforderung an den Tragsicherheitsbeiwert $\gamma = 1.75$ als Gesamtfaktor einschliesslich Produktionsschwankungen, Ausführungsproblemen, etc.. Dieser hohe Sicherheitsbeiwert steht weltweit einmalig da. Demgegenüber verlangt EBGEO (1997) nur ein $\gamma = 1.4$, jedoch als Partialsicherheitsbeiwert. Bei Standsicherheitsberechnungen sind somit Sicherheiten von $\gamma = 1.4$ nach Globalsicherheit und $\gamma = 1.0$ bei Partialsicherheit erforderlich. Die EBGEO (1997) ist auf Partialsicherheit ausgerichtet, wird jedoch in der Praxis kaum so verwendet, weil eher unübersichtlich.
- b) Handberechnungen nach den Vorschriften in der EBGEO (1997), was ein detailliertes Studium und eine Kontrolle erlaubt. Nicht enthalten sind die Gesamtsicherheitsnachweise. Die Berechnung basiert auf der unwirtschaftlichen Verankerungslänge von 7.0 m, statt der minimal erforderlichen von ca. 4.0 m, was Vergleiche mit anderen Berechnungen erschwert. Angegeben sind die berücksichtigten Abminderungsfaktoren und Sicherheiten:

PET-Geokunststoffe	Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranz	1.0	weil garantierter Mindestwert
Blockgleiten	1.25	eher tief, üblich 1.3 bis 1.35
Einbauschäden F-inst	1.5	Mindestwert nach EBGEO
Dauerhaftigkeit F-dur	2.0	Mindestwert nach EBGEO
Kriechen für PET F-creep	2.5	Mindestwert nach EBGEO
Ausziehen des Geogitters	1.5	normal
Interaktion auf der Foundation	0.667 (1/1.5)	
Interaktion der Geokunststofflagen	0.667 (1/1.5)	eher tief
Blockgleiten	1.5	
Grundbruch	2.0	normal
Geometrie und Sicherheit	$\gamma - B = 1.4$	normal
$GF = F\text{-inst} \times F\text{-dur} \times F\text{-creep}$	$x (\gamma - B) = GF$	Definition
$GF = 1.5 \times 2.0 \times 2.5 = 7.5$	$x 1.4 = 10.5$	sehr hoch

- c) Keine detaillierten Angaben zu Abminderungsfaktoren und Gesamtfaktor GF:

HDPE-Geogitter	Faktoren	Kommentar:
Kriechen	2.4 - 2.5	sehr tief, nur mit Nachweis
Dauerhaftigkeit	1.0	Min. in USA 1.1

- d) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

Geogitter	HDPE	PP	PET	Kommentar:
Fabrikationstoleranz	1.0	1.0	1.0	OK
Einbauschäden, Kiessand	1.05	1.05	1.05	tief, in F min. 1.3
Dauerhaftigkeit	1.10	1.10	1.10	OK
Kriechen	2.15	2.15	1.40	z.T. sehr tief, Nachweis?
Interaktion Geogitter/Boden	0.9	0.9	0.9	OK
Gleiten unter Geogitter	0.95	0.95	0.95	ca. OK
Bodenfestigkeit ϕ, c	1.0	1.0	1.0	OK
Blockgleiten	1.5	1.5	1.5	OK
Ausziehen	1.5	1.5	1.5	OK
Tiefe Gleitkreise	1.3	1.3	1.3	OK
Kippen	1.5	1.5	1.5	OK
Tragfähigkeit	2.0	2.0	1.0	OK, aber alle 2.0!
Zugfestigkeit (overstress)	1.0	1.0	1.0	
"Gesamtfaktor GF" FS (FHWA)	1.5	1.5	1.5	$\sim \gamma - B = 1.4$
$GF = 1.05 \times 1.1 \times 2.15 = 2.483$	$x 1.5 = 3.725$			tief für HDPE, PP
$GF = 1.05 \times 1.1 \times 1.40 = 1.617$			$x 1.5 = 2.426$	tief für PET

Angaben von Produzentenvertretern:

- a) Das verwendete Computerprogramm POWA Version 2.0 (1997) zur Bemessung erscheint nicht ganz zeitgemäss, geht jedoch von üblichen Sicherheitsbeiwerten aus:

PET-Geokunststoffe	Faktoren	Kommentar:
Interaktionskoeffizient Boden-Gitter	0.85 und 1.0	normal
Innere Standsicherheit	1.4	offenbar γ - B
Kippsicherheit	1.5	normal
Gleitsicherheit	1.5	normal
Grundbruchsicherheit	2.0	normal

Problematischer erscheinen die verwendeten Abminderungsfaktoren, offenbar zum Zwecke eines tieferen Preises:

PET-Geokunststoffe	Faktoren	Kommentar:
Dauerhaftigkeit (chem., biol.)	1.0	statt min. 1.1, wie in USA
Kriechfaktor	1.3	statt min. 1.67, Nachweis?
Geometrie	1.4	offenbar γ - B
Beschädigung beim Einbau	1.2	eher tief
GF = 1.2 x 1.0 x 1.3 = 1.56	x 1.4 = 2.18	ist für PET extrem tief

- b) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

PET-Geogitter	Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranz	1.15 ... 1.3	Garantie?
Einbauschäden	1.1 ... 1.14	tief, in F min. 1.3
Dauerhaftigkeit	1.05 ... 1.15	in USA min. 1.1
Kriechen	1.6 ... 1.52	sehr tief, Nachweis?
GF	2.125 ... 2.591	sehr tief, ohne γ - B

- c) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

PVC-beschichtete PET-Geogitter	Faktoren	Kommentar:
Delta = 0.6 - 1.0 φ	19° - 32°	ca. 20°, OK
Fabrikationstoleranz	1.05	zusätzlich zu Garantie, gut
Einbauschäden	1.15	sehr wenig, in F min. 1.3
Dauerhaftigkeit	1.0	in USA min. 1.1
Kriechen	1.67	OK, nachgewiesen
Geokunststoff Sicherheit γ	1.3	~ OK, γ - B = 1.4
GF = 1.05 x 1.15 x 1.0 x 1.67 = 2.017	x 1.3 = 2.621	recht tief

- d) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

HDPE Geogitter	Faktoren	Kommentar:
Einbauschäden	1.15	eher gering
Dauerhaftigkeit	1.10	OK
Kriechen	2.60	OK mit Nachweis
Overall factor (γ - B)	1.50	OK
GF = 1.15 x 1.10 x 2.60 = 3.289	x 1.5 = 4.934	OK, gut so

- e) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

PET-Geogitter	Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranz	1.0 für 5% Fraktile	OK
Einbauschäden Kiessand	1.31 - 1.39	OK
Siltsand <1mm	1.03 - 1.07	sehr tief
Kiessand <20mm	1.11 - 1.21	in F min. 1.3
Geröll <75mm	1.21 - 1.39	üblich 1.3-1.5-2.0
Dauerhaftigkeit pH=4-9	1.0	tief, in USA min. 1.1
für pH < 4	1.1	
für pH > 9	1.15	für PET nicht geeignet!
Kriechen für PET (120J)	1.47	sehr tief, Nachweis?
F-m12 extrapol. Tests	1.21	zusammen ~ γ - B
F-n 'ramification'	1.10	d.h. 1.21 x 1.1 = 1.331
GF = 1.11 x 1.0 x 1.47 = 1.632	x 1.331 = 2.172	sehr tief

- f) Bemessung immer auf Bruch (ultimate state) und praktisch nie auf Verformung (ultimate serviceability), nur für sehr hohe Bauwerke und starke Belastung.

PET- und PVA Geogitter mit PVC Umhüllung	Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranz	1.0	weil 95%-Fraktile
Einbauschäden, je nach Fall	1.05 - 1.5	siehe Tab. 9
Dauerhaftigkeit, je nach Fall	1.15	siehe Tab. 9
Kriechen (120 Jahre), je nach Produkt	1.67 - 2.00	EBGEO (1997), PP: 2.5 ohne Test, PET: 5.0 ohne Test
Bauwerksicherheit γ - B	1.75	für globale Sicherheit nach DIN
	1.40	für partielle Sicherheiten, EBGEO (1997)
	1.40	für globale bei Bishop, Blockgleiten
	1.30	nach BBA-Zertifikat
	1.00	in USA, falls alle Faktoren gesichert
Interaktionskoeffizient für Gitter	0.8 beim Ausziehen, 1.0 beim Abscheren	
Interaktionskoeffizient für Gewebe	0.6 - 0.9 Ausziehen, 0.7 - 0.9 Abscheren	
Sicherheit gegen Ausziehen	1.5	nach DIN
Interaktionswinkel	$\delta = 1 \times \varphi'$	Vergleiche m. F:
Einbau Schichtdicke	min. 0.30 m, max. 0.60m	1.0 m machbar, braucht aber Zwischeneinlagen gegen Verformung
GF = min. 1.05 x 1.15 x 1.67 = 2.017	x 1.75 = 3.53	
GF = max. 1.5 x 1.15 x 2.00 = 3.45	x 1.40 = 4.83	

Abminderungsfaktor A_1 für das Kriechen												
Dauer	1 Std.	1 Tag	1 Wo.	1 Mt.	1 Jahr	2 Jahre	3 Jahre	5 Jahre	10 J.	60 J.	120 J.	
A_1	1.2	1.28	1.33	1.37	1.43	1.47	1.49	1.50	1.53	1.56	1.67	
Gültig für Bodentemperaturen unter 30°C und 95%-Vertrauensbereich, Zwischenwerte interpolierbar												
Abminderungsfaktor A_2 für Einbauschäden (Produktbezeichnung: Zugfestigkeit längs/quer - Gitterabstand)												
Boden	35/20-20		55/30-20		80/30-10		80/30-20		110/30-20			
feinkörnig	1.05		1.02		1.02		1.02		1.02			
gemischtkörnig	1.10		1.05		1.10		1.05		1.05			
grobkörnig	1.40		1.30		1.40		1.20		1.05			
Gemäss diesen Werten sind Geogitter vor allem empfindlich auf grobkörnige Böden und das besonders bei leichten Geogittern, während feinkörnige Böden kaum eine Beschädigung hervorrufen, besonders bei schweren Geogittern.												
Abminderungsfaktor A_4 für die Dauerhaftigkeit infolge chemisch-physikalischer Einflüsse (Hydrolyse)												
pH-Wert des Bodens	2.0 ... 4.0 (sauer)				4.1 ... 8.9 (neutral)				9.0 ... 9.5 (basisch)			
A_4	1.1				1.0				1.15			
Demgemäss dürfen die Geogitter nicht in Böden mit einem pH-Wert über 9.5 eingesetzt werden. Oft wird für PET auch die Grenze bei 8.5 angegeben												

Tab. 9 Dehnungsbezogene Bemessung nach BS 8006 (1995) gemäss Messwerten des Herstellers PVC-beschichtete gewobene PET-Geogitter, mit Isochronen bezüglich der Sicherheit und der Zeitdehnung.

- g) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

PET-verstärkte PP-Geovliese	Faktoren	Kommentar:
<i>Abminderungsfaktoren</i>		
Fabrikationstoleranz	1.05	Garantie
Einbauschäden	1.1	tief, in F min. 1.3
Dauerhaftigkeit	1.1	OK
Kriechen	1.89	OK, falls Nachweis
<i>Interaktionsfaktoren</i>		
Interaktion Geokunststoff/Boden	0.9	OK
Interaktion unter Foundation	1.0	eher 0.7-0.8-0.9
<i>Sicherheitsfaktoren</i>		
Bodenfestigkeit	1.3	für Methode Teilsicherheit
Blockgleiten	1.1	zu tief, min. 1.3-1.35
Ausziehen	1.5	OK
GF = 1.05 x 1.1 x 1.89 = 2.183	x 1.3 = 2.838	für PET

h) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

PET-Geokunststoffe		Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranz		1.2	
Einbauschäden	im Sand	1.1	OK
	im Kies	1.3	nach Gourc, OK
	in Schotter	1.5	OK
Dauerhaftigkeit	für PET	1.111	OK
Kriechen	für PET	1.5	tief, Nachweis?
Bauwerksicherheit		1.5	= γ - B, OK
GF= F-fabr x F-inst x F-dur x F-creep x (γ - B)			
	für PET im Sand	3.3	in F geforderte Sicherheitsbeiwerte für 70 Jahre
	für PET im Schotter	4.5	Gebrauchsdauer
PP-Geokunststoffe		Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranz		1.2	
Einbauschäden	im Sand	1.1	OK
	im Kies	1.3	nach Gourc, OK
	in Schotter	1.5	OK
Dauerhaftigkeit	für PP	1.111	
Kriechen	für PP	3.0	
Bauwerksicherheit		1.5	= γ - B
GF= F-fabr x F-inst x F-dur x F-creep x (γ - B)			
	für PP im Sand	6.6	in F geforderte Sicherheitsbeiwerte für 70 Jahre
	für PP im Schotter	9.0	Gebrauchsdauer

i) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

HDPE Monofil		Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranzen		1.1	für garantierten Mindestwert
Einbauschäden		1.1 - 1.3	OK
Dauerhaftigkeit		1.1	OK
Kriechen		2.7	OK, falls Nachweis
GF = 1.1 x 1.1 x 1.1 x 2.7 = 3.59		x 1.4(?) = 5.03	für HDPE sehr tief

j) Abminderungsfaktoren/Sicherheiten:

HDPE Geokunststoff		Faktoren	Kommentar:
Fabrikationstoleranzen		1.0	garantiert durch 5%-Fraktile
Einbauschäden bei kantigem Schotter		1.1	viel zu tief, in F min. 1.5-2.0
Bei Kiessand, Sand, siltiger Sand		1.0	viel zu tief, in F min. 1.3
Dauerhaftigkeit (chem., biol.)		1.0	in USA min. 1.1
Kriechen		2.4	sehr tief, Nachweis?
Knotenfestigkeit		1.0	OK
Interaktion Boden-Geokunststoff		0.85	OK
Ausziehen		1.5	OK
GF = 1.1 x 1.0 x 2.4 = 2.64		x 1.4(?) = 3.70	extrem tief für HDPE

Die erhaltenen Angaben erweisen sich als stark unterschiedlich, je nach Land und Verfasser. Dazu ist zu bemerken, dass die maximale Beanspruchung der eingesetzten Baumaterialien (Geokunststoffe) immer kleiner sein sollte als deren Tragwiderstände (normalerweise als Sicherheit definiert). Einige Anwender bzw. Hersteller vergessen diese Sicherheit oder kennen sie nicht. Oft werden Abminderungsfaktoren mit Sicherheiten verwechselt.

2.3 Abminderungsfaktoren und Sicherheitsbeiwerte

2.3.1 Abminderungsfaktor für das Zeitstand- und Kriechverhalten (A_1)

Werden Geokunststoffe in bewehrten Konstruktionen eingesetzt, müssen sie permanenten Zug- und Druckkräften standhalten. In solchen Anwendungen muss die Bewehrung so ausgelegt sein, dass der Geokunststoff insbesondere der Zugkraft widersteht, ohne zu reißen. Auch muss die Dehnung unter dem maximal erlaubten Wert bleiben. Der Abminderungsfaktor A_1 beschreibt das Zeitstandverhalten bzw. das Verformungsverhalten unter Dauerlast (Kriechen) und ist damit abhängig von der Gebrauchsdauer. Er ist zudem stark rohstoffabhängig.

2.3.1.1 *Kriech- und Relaxationsverhalten*

Die in Geokunststoffen verwendeten polymeren Materialien verhalten sich viskoelastisch, das heisst sie zeigen ein zeitabhängiges mechanisches Fliessverhalten. Wirkt auf ein viskoelastisches Material eine konstante Kraft, nimmt die Dehnung oder Stauchung nach einem raschen Anstieg mit der Zeit kontinuierlich zu (Kriechen). Wird das Material entlastet, nimmt die Dehnung nach einer Zugbeanspruchung sofort um einen bestimmten Wert ab, um sich dann allmählich um den Betrag der elastischen Nachwirkung auf eine bleibende Restdehnung zu verkürzen.

Wird statt der Kraft die Dehnung beziehungsweise Stauchung konstant gehalten, so wird die dazu benötigte Zug- beziehungsweise Druckkraft infolge molekularer Umlagerungen mit der Zeit abnehmen und schliesslich vernachlässigbar klein werden. Sowohl Kriech- als auch Relaxationsvorgänge verlaufen in etwa exponentiell, das heisst proportional zum Logarithmus der Zeit.

Das Kriech- und Relaxationsverhalten von Geokunststoffen ist neben den externen Faktoren wie Zeit, Belastung und Temperatur vom Polymer, vom Verarbeitungsprozess und von der Flächenstruktur abhängig.

Weil die molekulare Beweglichkeit eingeschränkt und damit die Umordnung von Molekülen erschwert ist, ist bei Temperaturen unterhalb ihrer Glastemperatur das Kriech- und Relaxationsverhalten von Polymeren weit weniger ausgeprägt als oberhalb. PE und PP besitzen eine Glastemperatur unterhalb der Gebrauchstemperatur von Geokunststoffen. Daher kriechen Geokunststoffe aus diesen Polymeren im allgemeinen stärker als solche aus PET oder PA. Nur auf den Rohstoff bezogen verschlechtert sich das Kriechverhalten in der Reihenfolge PET, PA, PP und PE (den Hoedt, 1986).

PET-Kriechraten werden unterhalb der Kriechgrenze kaum von der Belastung beeinflusst (Viezee et al., 1990), wo hingegen die Kriechrate von PP und HDPE empfindlich auf die Belastungsstärke reagiert. Bei PET liegen Höchstzugkraft-Dehnung und Zeitstand-Bruchdehnung nahe beieinander (Allen & Bathurst, 1996).

Durch Erhöhung der Kristallinität oder Ausrichtung der Molekülketten wird das Kriechverhalten verfahrenstechnisch erheblich verbessert. Auch die Geokunststoff-Struktur hat einen wesentlichen Einfluss auf das Kriechverhalten (Tab. 10), denn die Fasern, Garne, Drähte oder Gitterelemente liegen selten gerade und genau in der Richtung der aufgetragenen Spannung. Die spannungsinduzierte Neuorientierung von Fasern trägt vor allem bei Geovliesen stark zur Kriechdehnung bei.

Geokunststoffstruktur	strukturell bedingter Verformungsanteil
Gitter	0... 2 %
Gewebe	2... 10 %
Verfestigtes Vlies	5... 25 %
Nicht verfestigtes Vlies	10... 50 %

Tab. 10 Geschätzter Einfluss der Geokunststoffstruktur auf das Kriechverhalten (Kriechdehnung nach 500 Stunden bei einer Belastung von 25% der Höchstzugkraft). Die Kriechdehnung setzt sich hauptsächlich zusammen aus dem Verformungsanteil und dem durch das Polymer bedingten Kriechdehnungsanteil, welcher zusätzlich ungefähr 2% bis 20% ausmacht. Die Daten basieren auf umfangreichen Untersuchungen der EMPA sowie Angaben aus den Hoedt (1986). Zu beachten ist, dass diese (Labor-)Werte ohne Bodenkontakt ermittelt wurden und daher nur bedingt einen Rückschluss auf die Einbaueigenschaften im Einbauzustand zulassen.

Einerseits beeinträchtigt eine Einbaubeanspruchung das Kriechverhalten, andererseits wird die Geokunststoffstruktur durch den Einbau im Boden fixiert und damit das Kriechverhalten verbessert und die Verformbarkeit zum Teil erheblich reduziert, wobei aber die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Polymere von grosser Bedeutung sind (Bauer, 1997). Wichtig ist auch der Einfluss der Temperatur, denn schon bei einer Temperaturerhöhung von wenigen Grad kann sich die Kriechrate eines Geokunststoffes vervielfachen. Ebenfalls erhöht sich die Kriechdehnung, wenn die statischen Belastungen durch dynamische überlagert werden (zum Beispiel bei unter Fahrbahnen verlegten Geokunststoffen).

Studien an Geotextil-Garnen, Geogeweben und Geogittern zeigten eine Abnahme der Kriechdehnung nach einer Einbaubeanspruchung. Hingegen wurde kein Einfluss des Einbaus auf die Kriechrate festgestellt (Wulffhorst & Becker, 1992; Billing et al., 1990; Viezee et al., 1990).

2.3.1.2 *Spannungsrisssbildung*

Das Deformations- und Bruchverhalten von Polymeren wird durch die Begriffe spröde (brittle) und zäh (duktile) charakterisiert. Während ein sprödes Material fast unverformt bricht, überschreitet ein zähes Material die Fliessgrenze und verformt sich irreversibel weiter bis zum Bruch. Dasselbe Material kann sprödes oder duktiler Verhalten zeigen, da je nach Temperatur und Dauer von Belastungen unterschiedliche

Verformungsmechanismen wirksam werden. Beim Kriechen wird vor allem statische Ermüdung zum Problem, welche hauptsächlich auf die folgenden zwei Arten zum Materialversagen führt:

- *Sprödes Versagen*
Wenn Spannungsüberhöhungen im Material nicht durch strukturelle Relaxationsprozesse abgebaut werden, besteht die Tendenz zur Bildung von Rissen. Das Versagen (Bruch) wird durch die Kinetik langsamen Risswachstums bestimmt. Im Material vorhandene Defekte spielen bei der Entstehung von Rissen eine zentrale Rolle.
- *Duktiler Versagen*
Jenseits der Fließgrenze werden Schermechanismen aktiv, durch welche Molekülkettensegmente irreversibel aneinander abgleiten. Bei grosser Verformung ist schliesslich das Reißen einer Materialprobe die Folge. Als Ausgangspunkt der Schervorgänge werden submikroskopische Orientierungsinhomogenitäten bei den Hauptketten angesehen. Von diesen breiten sich Spannungszustände aus, welche das Material durch Umlagerung atomarer Gruppen auszugleichen sucht. Solche Relaxationsvorgänge sind an die Existenz von sekundären Übergängen und an die für das Wirksamwerden nötigen Bedingungen (entsprechende Temperatur und genügend Zeit) geknüpft.

Die Zeitstand-Bruchdehnung nimmt für PET (brüchiges Verhalten) mit zunehmender Zeit bis zum Bruch ab, für Polyolefine (duktiler Verhalten) zu. Allen & Bathurst (1996) schliessen aus ihren Beobachtungen, dass eine mit zunehmender Zeit bis zum Bruch zunehmende Bruchdehnungen als Indiz für duktiler Verhalten, abnehmende Bruchdehnungen als Indiz für brüchiges Verhalten gilt.

Die Bildung sogenannter „Crazes“, die bei Polymeren unter Spannung mitunter zu beobachten ist, hängt ebenfalls mit der Aktivierung von Schermechanismen zusammen. Crazes sind linsenförmige Zonen elektronenmikroskopischer Dimension, in denen das Material in verdünntem, hoch verstrecktem Zustand vorliegt. Liegen diese Crazes an der Materialoberfläche, sind sie fast immer Ausgangspunkt für das Entstehen von Rissen, die zum Bruch (meistens bei 60% bis 80% der spröden Bruchdehnung) führen. Oberflächencrazes entstehen an Fehlstellen und Kratzern, bei denen Spannungsüberhöhungen auftreten. Die nachfolgende Spannungsrisbildung wird durch verschiedene strukturelle Faktoren beeinflusst. Begünstigend wirken sich beispielsweise breite Molmassenverteilung, niedrige mittlere Molmasse, hohe Kristallinität, Eigenspannungen und uniaxiale Orientierungsbereiche aus.

Die Ausbildung von Spannungsrisen in teilkristallinen Polymeren wird auch durch die Existenz sogenannter tie-Moleküle erklärt. Diese sind mit den Molekülketten der kristallinen Bereiche und untereinander verschlauft und sorgen damit für eine mechanische Kopplung der kristallinen Phasen. Das Überschreiten einer kritischen Dehnung führt nach diesem Modell zur Entschlafung oder zum Reißen von tie-Molekülen und als Folge davon zum Versagen (spröder Bruch) des Materials.

Für Geokunststoffe werden teilkristalline Polymere verwendet. Diese bestehen aus amorphen und kristallinen Bereichen, wovon letztere durch tie-Moleküle verbunden sind. Unter Belastung formieren sich desorientiert vorliegende Molekülsegmente, wodurch primär beanspruchte Bindungen entlastet werden, jedoch nur in dem Umfang, in dem tie-Moleküle noch entknäuelbar sind. Bei hohen Kräften oder langen Belastungszeiten überlagern sich zusätzliche spannungsabbauende Prozesse wie Reißen stark belasteter tie-Moleküle oder ihr parzielles Herausziehen aus den Kristalliten. Das heisst, ein polymeres Material unter andauernder Belastung wird schliesslich versagen (Spannungsrisbildung).

Eine aufgebrachte Spannung bewirkt neben dem Kriechen auch eine merkliche Beschleunigung anderer Alterungsvorgänge im Polymer (wie Oxidation oder Hydrolyse). Ebenfalls kann ein Polymer durch die gleichzeitige Einwirkung von Spannung und aggressiven Medien brüchig werden (Spannungsriskorrosion).

Spannungsriskorrosion tritt zwar unter dem Einfluss eines oberflächenaktiven Mediums (Netzmittel) auf, beruht aber nicht auf der chemischen Reaktion des Polymers mit dem Medium. Das Netzmittel diffundiert lediglich in die Oberfläche eines Polymers und vermindert damit die gegenseitige Anziehung der Polymermoleküle. Somit führen Netzmittel zu einer Abnahme der kohäsiven Kräfte, welche die Verschlaufung der tie-Moleküle aufrecht erhalten, beziehungsweise zu einer beschleunigten Aufweitung von Crazes. Dadurch entstehen Risse bereits bei Spannungen, welche unter dem materialspezifischen Versagenskennwert liegen.

Untersuchungen an PP-Bändchen zeigten, dass ein oxidativer Abbau ab einer Belastung von ungefähr 10% der Höchstzugkraft durch die induzierte Spannung beschleunigt wird (Wisse & Birkenfeld, 1982; Horrocks & d'Souza, 1990). Hohe relative Feuchtigkeit verstärkt die Spannungsempfindlichkeit bei der oxidativen Alterung zusätzlich (Horrocks & d'Souza, 1990).

2.3.1.3 Prüfung des Kriech- und Zeitstandverhaltens

Das Kriech- und Zeitstandverhalten ist insbesondere für Geokunststoffe relevant, die für Bewehrungszwecke eingesetzt werden. Die Dauer einer Prüfung wird aber kaum je in die Nähe der anvisierten Gebrauchsdauer

kommen, weshalb sich ein Geokunststoffanwender auf Extrapolation abstützen muss. Wenn eine quasilineare Beziehung zwischen Dehnung beziehungsweise Bruchlast und dem Logarithmus der Zeit erkennbar ist, ist eine Extrapolation zwar leicht vorzunehmen, der Anwender muss jedoch die Verlässlichkeit einer Extrapolation immer hinterfragen. Extrapolationen sind nur in beschränktem Ausmass zulässig, da die Linearität selten über einen grösseren Bereich zutrifft.

Im Kriechversuch wird eine Probe einer gleichbleibenden Belastung ausgesetzt und die Dehnung als Funktion der Zeit beobachtet (Abb. 21). Die Prüfung dient zur Abschätzung einer maximalen Deformation bis zum Erreichen der Gebrauchsdauer bei gegebener Spannung. Das Kriechverhalten wird als Verhältnis der Dehnung zum Logarithmus der Zeit dargestellt. So kann das Kriechverhalten über die vorgesehene Gebrauchsdauer linear extrapoliert werden (Abb. 22).

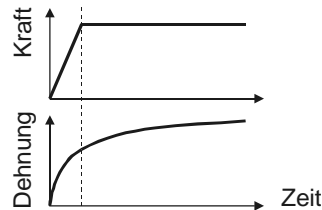


Abb. 21 Kriechen: Wirkt auf ein Polymer eine (konstante) Kraft, nimmt als Folge die Dehnung (oder Stauchung) mit der Zeit kontinuierlich zu.

Zur Abschätzung der maximal zulässigen Langzeitbelastung dient die Prüfung des Zeitstandverhaltens (Fokus auf das Endverhalten = Bruch). Sie wird mit der gleichen Prüfeinrichtung wie der Kriechversuch durchgeführt, wobei aber statt der Dehnung die zum Versagen führende Kraft in Funktion der Belastungszeit (logarithmischer Skala) erfasst wird. Die Zeitstand-Kurven sind üblicherweise fast linear oder bilinear. Bilineare Umhüllende sind das Resultat einer Änderung im Bruchmechanismus (z.B. Übergang von duktil zu brüchig).

Für Geokunststoffe, bei welchen die so aufgezeichneten Kurven relativ gerade verlaufen, ist eine Extrapolation zur Gebrauchsdauer relativ einfach. Im Allgemeinen ist aber weder die Zeit noch die Dehnung vorhersagbar, bei welcher es beim Kriechen unter schwacher Belastung zum Bruch kommt. Um eine sinnvolle Extrapolation zu machen (und damit das Spannungsrisssverhalten bei kleinen Kräften abzuschätzen) müssen daher viele Versuche mit unterschiedlich hohen Kräften durchgeführt werden (Abb. 22).

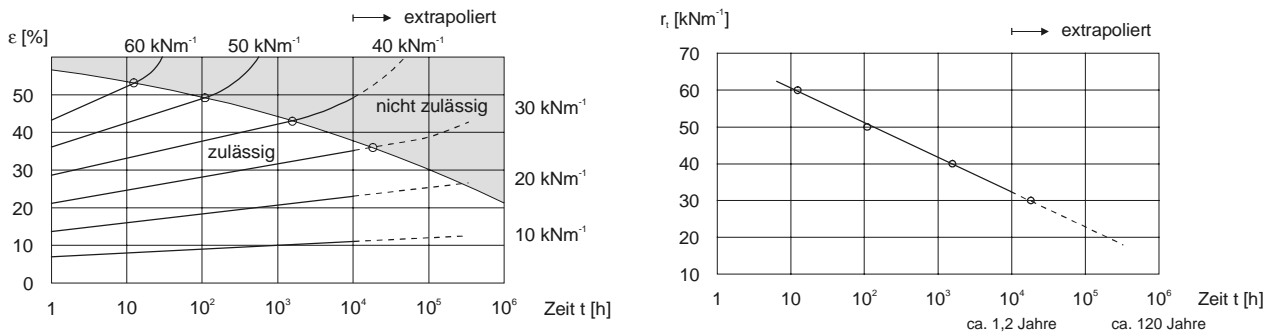


Abb. 22 Zeitstandversuche werden bei verschiedenen Belastungsstufen durchgeführt (Bild links). Die Langzeitstandfestigkeit ist vorhersagbar, wenn die Dehnungskurven bei logarithmischer Zeitachse geradlinig sind. Die minimale Standfestigkeit als Funktion der Zeit wird aus dem Verlauf der Kurven für die verschiedenen Belastungsstufen hergeleitet (Bild rechts).

Das halblogarithmische Modell für das Zeitstandverhalten basiert nur auf dem Reißen von Molekülverbindungen, was aber nur beim Aufbringen von hohen Zugspannungen zutrifft. Wenn Neuarrangements der Verbindungen in Betracht gezogen werden (was bei tieferen Zugkräften und damit langen Zeiten der Fall ist), dann ist das Modell nichtlinear (Lothspeich & Thornton, 2000).

Zur Ermittlung des Abminderungsfaktors A_1 beaufschlagt BS 8006 (1995) die Ergebnisse eines Zeitstandversuches je nach Prüfdauer (üblicherweise 1 Jahr) und verlangter Gebrauchsdauer mit dem Sicherheitsfaktor

$$\log \left(\frac{\text{Gebrauchsdauer}}{\text{Prüfdauer}} \right).$$

D.h. wenn die Prüfdauer kürzer als 10% der Gebrauchsdauer des Bauwerks ist, dann muss die durch Extrapolation ermittelte Langzeit-Zugfestigkeit mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt werden, was auf Kosten der Konkurrenzfähigkeit des untersuchten Produktes geht. Die Ergebnisse einer 1-Jahres-Prüfung

beispielsweise müssen für eine Gebrauchsdauer von 100 Jahren mit einem Sicherheitsfaktor von 2.0 multipliziert werden.

In Ergänzung zur erhöhten Zugbelastung kann eine zusätzliche Beschleunigung der Prüfung durch parallele Prüfserien bei höheren Temperaturen erreicht werden. Die bei verschiedenen Temperaturen ermittelten Kriechdehnungskurven werden dabei entlang der logarithmischen Zeitachse verschoben, bis sie übereinander zu liegen kommen (Zeit-Temperatur-Superposition).

Bei der Zeit-Temperatur-Superposition wird eine Masterkurve durch Verschiebung von bei verschiedenen Temperaturen gewonnenen Kriechkurven entlang der logarithmischen Zeitachse konstruiert. Für den Zeit-Verschiebungsfaktor (time shift factor) a gilt:

$$\text{Dehnung}(T_1, t) = \text{Dehnung}(T_2, t/a)$$

Dabei ist a eine Funktion von Referenz- und Prüftemperatur sowie der Zugkraft und kann mit Hilfe der Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF) oder grafisch ermittelt werden (Cazzuffi & Sacchetti, 1999).

Der Ansatz der Zeit-Temperatur-Superposition ist insbesondere bei der dehnungsbasierten Beschreibung des Kriechens sinnvoll, welche sich auf das Verhalten vor dem Bruch konzentriert. Für Polyolefine (PE, PP) wird dieses Prinzip erfolgreich zur Vorhersage des Kriechens eingesetzt. Nach Wrigley et al. (1999) ist die Zeit-Temperatur-Superposition für HDPE-Gitter nur bei Versuchen bis maximal 50 °C zulässig. Zur Extrapolation des Kriechens von PET-Geokunststoffen ist die Zeit-Temperatur-Superposition nicht sehr hilfreich, da PET mit seiner hohen Glassübergangstemperatur nicht sehr empfindlich auf moderate Temperaturen reagiert (Allen & Bathurst, 1996).

Das Problem dieser Methode ist, dass Material-Inhomogenitäten und Schwankungen in den Prüfbedingungen zu Unterschieden der bei gleichbleibender Temperatur ermittelten Kriechdehnungskurven führen können, welche in der gleichen Grössenordnung liegen wie die bei verschiedenen Temperaturen gemessenen Dehnungsunterschiede (Greenwood & Voskamp, 2000).

Die durch Thornton et. al (1998) beschriebene und Greenwood & Voskamp (2000) modifizierte SIM-Methode (stepped isothermal method) zur zeitraffenden Prüfung des Kriech- und Zeitstandverhaltens ist wie folgt konzipiert:

- Bei stufenweise erhöhter Temperatur wird ein Kriechversuch an jeweils einer einzigen Probe durchgeführt, um Schwankungen aufgrund von herstellungsbedingten Streuungen im Produkt zu vermeiden.
- Jedes Temperaturniveau ist mindestens 2.5 Stunden beizubehalten und die Temperaturstufen sollten nicht grösser als 15 °C sein.
- Auf die so erhaltenen Zeitstand-Bruchdehnungskurven wird das Zeit-Superposition-Prinzip angewandt, wobei die Verschiebungsfaktoren so gewählt werden müssen, dass sie gegen die Temperatur aufgetragen auf einer Gerade bzw. einer kontinuierlichen Kurve verlaufen.
- Die Versuche werden an mindestens 12 Proben bei unterschiedlichen Zugbelastungen (z.B. zwischen 56% und 80% der Ausgangsfestigkeit) vorgenommen.

Der SIM-Test ist normiert in GRI GS10 (2000). Er ermöglicht - basierend auf zwei bis drei Wochen dauernden Prüfungen - die Aufzeichnung einer simulierten Zeitstand-Bruchdehnungskurve, welche theoretisch eine Gebrauchsdauer von 100 Jahren repräsentiert. Ergebnisse von SIM-Versuchen sollten aber nur für Materialien akzeptiert werden, für welche die Methode validiert wurde. Dies ist bisher nur für PET-Geokunststoffe der Fall (Greenwood & Voskamp, 2000). Bei PET sind die Resultate sogar noch bei 90 °C gültig, obwohl der Glasübergang in den amorphen Regionen des PET bei 70 °C beginnt. Der Grund liegt vermutlich darin, dass die Kriecheigenschaften durch die kristallinen Regionen und die Tie-Moleküle bestimmt sind, und zwar unabhängig vom Zustand der amorphen Regionen (Thornton et. al, 1998).

2.3.1.4 Aktuelle Untersuchungen zum Kriech- und Zeitstandverhalten

Im Folgenden werden einige aktuelle Untersuchungen zum Kriech- und Zeitstandverhalten vorgestellt. Dabei ist anzumerken, dass die meisten Studien nur relativ kurze Zeitspannen (~ 1000 h bzw. < 1 Jahr) umfassen, welche für zuverlässige Extrapolationen auf die für Bewehrungsaufgaben verlangte Lebensdauer von 50 bis 100 Jahren oft nicht genügen.

Wrigley et al. (1999)

Einjährige Kriech- und Zeitstandversuche an einem mit Muster Nr. 16 vergleichbaren HDPE-Gitter (nominelle Zugfestigkeit längs: 64.5 kN/m) ergaben die Kriechdehnungen bzw. Dauer bis zum Bruch gemäss Tab. 11. Zum Bruch kam es erst bei Dehnungen > 10 %, was für die Konstruktion von Polymergitter-bewehrten Bauwerken als Maximaldehnung gilt.

Zugkraft	Dehnung nach 1 Jahr
8.8 kN/m (= 14 %)	3 %
19.8 kN/m (= 31 %)	6 %
22 kN/m (= 34 %)	7 %
24.2 kN/m (= 38 %)	8 %
	Zeit bis zum Bruch
33.8 kN/m (= 52 %)	146 Std.
35.8 kN/m (= 56 %)	94 Std.

Tab. 11 Nach 1 Jahr ermittelte Kriechdehnung bzw. Zeit bis zum Bruch eines HDPE-Gitters in Abhängigkeit der Zugkraft.

Cazzuffi & Sacchetti (1999)

Kriechversuche bis 1000 Std., bei Temp. von 10, 20 und 40 °C und Zugkräften von 20, 30 und 50 % der Kurzzeitzugfestigkeit an:

- HDPE-Gitter vergleichbar mit Muster Nr. 29 (Zugfestigkeit längs: 52.7 kN/m)
- PET-Gitter vergleichbar mit Muster Nr. 22 (Zugfestigkeit längs: 48.9 kN/m)
- PET-verstärktes PP-Vlies vergleichbar mit Muster Nr. 30 und 31 (Zugfestigkeit längs: 53.7 kN/m)

Ergebnisse:

- Das Kriechverhalten des HDPE-Gitters wird instabil mit dominantem "secondary creep", wenn eine Kraft > 50 % der Zugfestigkeit aufgebracht wird.
- Das Kriechverhalten der PET-Produkte ist für alle Zugkräfte und Temperaturen stabil, d.h. das halblogarithmische Kriechverhalten gilt über die gesamte Zeitspanne.
- Die Temperatureinflüsse zeigen sich deutlich beim HDPE-Gitter und sind sehr klein beim PET-Gitter.

Carrubba et al. (2000)

Parameter: vertikale Stützwand, 4 m hoch (3 Bewehrungslagen, 2.2 bzw. 2.0 m tief), 10 m lang (2 × 5 m), Rückverhängung mit zwei verschiedenen Geogittern (PP-Gitter vergleichbar Muster Nr. 26 mit 20 kN/m längs, HDPE-Gitter vergleichbar Muster Nr. 29 mit 45 kN/m längs), Front = "verlorene Draht-Schalung", Instrumentierung (Gitter: Dehnungsaufnehmer, Kraftmesszellen, Verschiebungs-Sensoren; Konstruktion: Druckaufnehmer), Überwachung vom Bau bis zum Versagen (22 Monate), GC-Bodenmaterial ($C_u=130$, $C_c=19$, $w_L=28$, $w_p=20$, $I_p=8$).

Die 2 Sektionen wurden mit dem Grenzgleichgewicht-Ansatz nach Leshchinsky bemessen. Betrachtete Bruchmechanismen: Bruch (PP-Gitter) bzw. Ausziehen (HDPE-Gitter) der Rückverhängung. Gesamt-Sicherheitsfaktor wurde auf 1 gesetzt (Bruch unter Vollast), dyn. Verdichtung in 0.3 m dicken Schichten.

Die Zugdehnung hängt hauptsächlich von der Zugspannung während der Belastung, zusätzlich vom Gittertyp und den Kriecheigenschaften ab. Die Kriechrate wächst mit zunehmender Belastung und Zeit, beim PP-Gitter (nahe 100 % der Zugfestigkeit) stärker als beim HDPE-Gitter (45 % der Zugfestigkeit).

Beobachteter Bruchmechanismus: Abreißen der obersten Bewehrungslage beim PP-Gitter (Dehnung > 4 %) bzw. Ausziehen der oberen und mittleren Bewehrungslage beim HDPE-Gitter (Dehnung 1 ... 2 %).

Lineares Kriechverhalten mit Ausnahme der oberen Lage des PP-Gitters: Dehnung von ca. 4 % induziert nicht mehr lineares Kriechverhalten (starke Verlängerung).

Floss & Stiegeler (2000)

Polsterwand-Konstruktion mit HDPE-Gitter vergleichbar Muster Nr. 16 (nominelle Zugfestigkeit längs: 110 kN/m) und siltig-tonigem feinem und mittlerem Sand als Schüttmaterial:

- Stabilitätsbetrachtungen: Interne Stabilität mit ebenen Bruchflächen (nach Janbu), externe Stabilität mit Bruchkreisen (nach Bishop).
- Der Abminderungsfaktor für die Einbaubeanspruchung wurde in einer Versuchs-Installation mit 1.03 gemessen (Sand).
- Die maximal im Gitter gemessenen Deformationen bis Vollendung des Bauwerks (Mai 1998) betragen 0.33 % (Dehnung), danach max. 0.36 %. Kriechdehnungen konnten keine festgestellt werden.
- Die horizontalen und vertikalen Verschiebungen an der Stirnseite sowie die Deformationen (Triveo- und Inklinometer) waren geringer als erwartet, d.h. eine zusätzliche Sicherheitsreserve kann angenommen werden - das System funktioniert.

Greenwood & Voskamp (2000)

An einem mit Muster Nr. 12 vergleichbaren gelegten PET-Geogitter (Längszugfestigkeit: 105 kN/m) wurden 12 SIM-Versuche mit Zugbelastungen zwischen 56 und 80 % der Ausgangsfestigkeit durchgeführt. Nach dem Temperaturversatz waren die Bruchlasten proportional zum jeweiligen Logarithmus der Zeit bis zum Bruch. Aus den Versuchen liess sich ein Abminderungsfaktor für das Zeitstandverhalten von 1.5 ableiten (ohne Beaufschlagung einer Sicherheit).

Greenwood et al. (2000)

An folgenden Bewehrungs-Geokunststoffen wurden bis 12 Jahre (100000 h) dauernde Kriech- und Zeitstandversuche vorgenommen:

- PP-Gewebe 570 g/m², 206/33 kN/m bzw. 240 g/m², 49/49 kN/m
- PET/PA-Gewebe 400 g/m², 203/48 kN/m
- LDPE-beschichtetes PET-Gewebeband 90 mm, 58 kN
- extrudiertes HDPE-Gitter, 81 kN/m

Ergebnisse PP-Gewebe:

- abrupte Veränderungen in der Kriechdehnungsrate wurden keine festgestellt
- die nach 12 Jahren gemessenen Kriechdehnungen sind um 3 ... 14 % (relativ) höher als die nach einer Versuchsdauer von 6 Jahren vorhergesagten Dehnungen
- mit zunehmender Zugkraft nimmt die Zeit bis zum Bruch ab und die Bruchdehnung zu
- bei einer Belastung mit 27 bzw. 31 % der Zugfestigkeit wurden nach 12 Jahren Kriechdehnungen von 7.8 bzw. 14.3 % erreicht, ohne dass es zum Bruch gekommen ist
- bei einer Belastung mit 41 bzw. 55 % der Zugfestigkeit sind die Proben nach etwa 3.5 bzw. 1 Jahr gerissen

Ergebnisse PET-Gewebe:

- auch nach 12 Jahren verhält sich die Kriechdehnung proportional zum Logarithmus der Belastungszeit, wodurch Vorhersagen des Verhaltens während 120 Jahren zuverlässig vorgenommen werden können
- bei einer Belastung der PET-Gewebe mit 47 % der Zugfestigkeit wurden nach 12 Jahren Kriechdehnungen von 6.5 % erreicht, ohne dass es zum Bruch gekommen ist
- eine durch den Einbau in grobem Kalkstein vorbeanspruchte Probe zeigte unter einer Zugbelastung von 22 % der Zugfestigkeit - verglichen mit einer im Neuzustand belasteten Probe - keinen Unterschied in der Kriechdehnungsrate, auch wenn sich die Anfangsdehnungen unterschieden
- Zeitstandversuche an den PET-Gewebebändern ergaben einen ungefähren Abminderungsfaktor für das Zeitstandverhalten von 1.9 bei einer Gebrauchsdauer von 120 Jahren
- an 8 identischen Proben bei einer Belastung von 77 % der Zugfestigkeit durchgeführte Zeitstandversuche ergaben Zeiten bis zum Bruch, welche von 190 bis 6400 Stunden variierten (1.5 Zeitdekaden)

Ergebnisse HDPE-Gitter:

- Zeitstandversuche lieferten einen ungefähren Abminderungsfaktor für das Zeitstandverhalten von 3.2 bei einer Gebrauchsdauer von 120 Jahren (siehe Abb. 23)

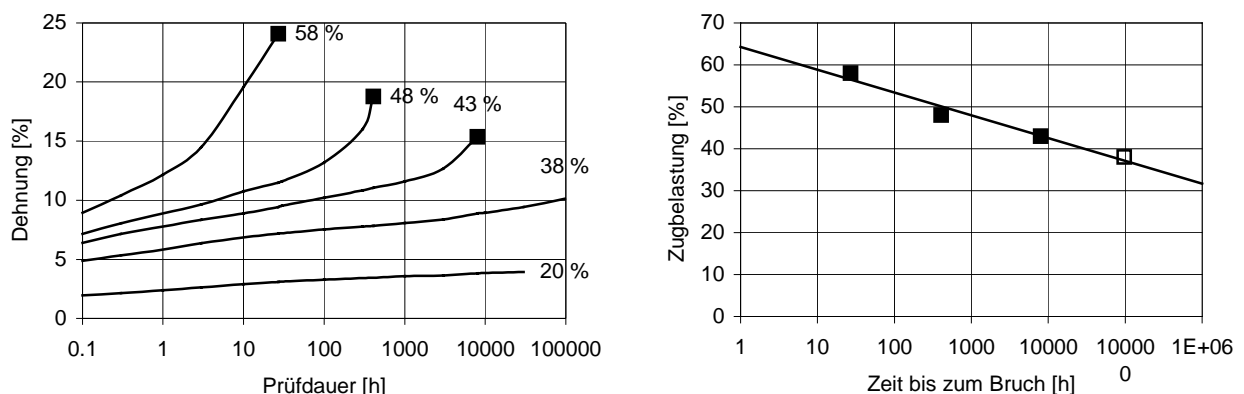


Abb. 23 Zeitstandversuche an HDPE-Gittern: Die Regressionsgerade inkl. unbeendetem Versuch (darf berücksichtigt werden, wenn Ergebnis auf der rechten Seite der Regressionsgeraden liegt) liefert eine Gebrauchslast von 31 % der Zugfestigkeit und damit einen Abminderungsfaktor A_1 von 3.2.

- die nach 12 Jahren gemessenen Kriechdehnungen sind um 18 % (relativ) höher als die nach einer Versuchsdauer von 6 Jahren vorhergesagten Dehnungen, da die Kriechdehnungsrate mit der Zeit zugenommen hat.

Lothspeich & Thornton (2000)

- SIM-Tests an Geogittern (Extrapolation auf 100 Jahre) lieferten die Ergebnisse gemäss Tab. 12, wobei die Eignung der SIM-Methode für Polyolefine nicht bewiesen ist.

	PVA	Aramid	PA	PET	PP	HDPE
Maximal zulässige Kraft (in % der Zugfestigkeit)	69.0	67.1	50.5	62.2	30.5	37.2
erreichte Dehnung in %	5.7	2.3	11.6	9.8	37.8	23.3
Abminderungsfaktor Zeitstandverhalten	1.6	1.5	2.0	1.6	3.3	2.7

Tab. 12 SIM-Tests an Geogittern.

Navarette et al. (2000)

Bis 10000 Stunden (=1.14 Jahre) dauernde Zeitstand- und Kriechversuche wurden an PET-Gittergeweben und gereckten HDPE-Gittern bei 30, 45, 55 und 65 °C, 30, 40 und 50 % der Zugfestigkeit in verschiedenen Lösungen durchgeführt (Tab. 13).

Zugbelastung	30 %	40 %	50 %	30 %	40 %	50 %
Temperatur	gerecktes HDPE-Gitter			PET-Gittergewebe		
30 °C	8.5 ... 9	11 ... 11.5	17.5 ... 20.5	2.7 ...3.2	3.4 ...4	6.3 ...6.9
45 °C	10 ... 11	16 ... 19	34 ... 39	5.2 ...5.9	5.6 ...6.5	8.4 ...9.8
55 °C	10.5 ... 11.5	23 ... 27	46 ... 53	5.3 ...5.9	7.9 ...8.8	10.2 ...11
65 °C	17 ... 19	28 ... 33	46 ... 56	6 ...6.6	9.2 ...10.2	13 ...14

Tab. 13 Kriechdehnungen in % von PET- und HDPE-Gittern nach 10000 h bzw. vor dem Bruch bei verschiedenen Zugbelastungen und Temperaturen.

Ergebnisse:

- die Lösungen, welche unterschiedliche Grundwässer simulieren sollten, hatten keinen nennenswerten Einfluss auf die Kriechdehnungsrate
- die PET-Gittergewebe sind während der Prüfdauer von 1.14 Jahren nicht gerissen
- die HDPE-Gitter sind bei 50 % und - bei den Temperaturen 55 und 65 °C - auch bei 40 % der Zugfestigkeit gerissen (Tab. 14)
- bei den HDPE-Gittern nahmen mit zunehmender Temperatur und Zugbelastung die Bruchdehnungen zu und die Zeit bis zum Bruch ab

Zugbelastung	40 %	50 %
30 °C	-	3576 ...8520
45 °C	-	360 ...528
55 °C	2256 ...4392	48 ...144
65 °C	96 ...240	3 ...7

Tab. 14 Zeitstandverhalten von HDPE-Gittern: angegeben ist die Zeit (in Stunden) bis zum Bruch unter verschiedenen Bedingungen.

2.3.2 Abminderungsfaktor für die Beschädigung durch Transport, Einbau und Verdichtung (A₂)

Der Abminderungsfaktor A₂ beschreibt den möglichen Zugfestigkeitsverlust durch die Beschädigung der Bewehrung während dem Transport, dem Einbau und der Verdichtung. Geokunststoffe sind oftmals beim Einbau den höchsten mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt, beispielsweise beim Aufbringen und Verdichten von grobem, kantigem Schüttmaterial (lokale Belastungsspitzen). Aus dem Vergleich der Kurzzeitzugfestigkeiten vor und nach einem Einbau können Aussagen über den Beschädigungsgrad der einzelnen Geokunststofftypen in Abhängigkeit des verwendeten Schüttmaterials gemacht werden. Dies dient der Festlegung des Abminderungsfaktors A₂ infolge Einbau und Verdichtung, welcher generell in der Bemessung Geokunststoff-bewehrter Konstruktionen zur Ermittlung der Langzeitzugfestigkeit zu berücksichtigen ist.

2.3.2.1 *Transport und Verlegen der Geokunststoffe*

Um eine hohe Effizienz bei der Verlegung auf der Baustelle zu erreichen und möglichst wenig Geokunststoff-Überlappungen in Kauf nehmen zu müssen, werden oft möglichst breite Rollen angefordert. Für den korrekten Umgang mit diesen schweren und unhandlichen Geokunststoffrollen fehlt aber auf der Baustelle meist die geeignete Ausrüstung. Zudem ist das Personal auf der Baustelle oft weder geschult noch gewohnt, diese Baustoffe mit der nötigen Sorgfalt zu behandeln.

Ein Transport von Hand ist aufgrund des hohen Rollengewichtes kaum möglich. Die Hersteller und Lieferanten setzen für den schonenden Transport stabile Traversen (Dorne) ein, welche z.B. an einem Hubstapler oder Bagger montiert in die Rolle eingeführt werden können. Sie stützen die Rolle über die ganze Länge, verhindern damit ein Knicken und ermöglichen ein problemloses Abrollen.

Auf der Baustelle fehlt diese Einrichtung weitgehend. Als Folge werden Baggerschaufeln, Ketten, Seile oder andere ungeeignete Hilfsmittel eingesetzt, um die Kunststoffrolle abzuladen, an den Einsatzort zu heben oder zu schleifen, auszurichten und auszurollen. Hierdurch kann ein empfindlicher Geokunststoff bereits einen erheblichen Schaden erleiden, welcher vor allem die äusseren Lagen, durch Knicken der Rolle auch innere Lagen betreffen kann. Diese Einflüsse können aufgrund der fehlenden Reproduzierbarkeit kaum dimensioniert werden.

Beschädigungen bei Transport und Verlegung müssen durch eine entsprechende Sensibilisierung auf der Baustelle und den Einsatz geeigneter Hilfsmittel (Transport- und Ausrolltraversen) verhindert werden. Bei jedem Um- und Abladen ist darauf zu achten, dass die äusseren Lagen der Rollen nicht mechanisch verletzt werden (Löcher, Anrisse usw.).

(Quelle: Bräu, 1999)

2.3.2.2 *Einbauverzögerungen*

Nach heutiger Erkenntnis ist davon auszugehen, dass es keine für Geokunststoffe gebräuchlichen, synthetischen Rohstoffe gibt, aus denen Fasern oder Bändchen hergestellt werden können, die zu 100% witterungsbeständig sind und die unter der direkten Bewitterung über Jahre oder gar Jahrzehnte ihre Ursprungsfestigkeit behalten. Das Merkblatt FGSV (1994) empfiehlt daher in Abhängigkeit der Witterungsbeständigkeit die maximal zulässigen Auslage- oder Expositionszeiten gemäss Tab. 15.

Eine Ausnahme bilden allenfalls Geogitter, die eine grosse Materialstärke (> 1 mm) aufweisen. Der witterungsbedingte Alterungsprozess beginnt an der Oberfläche, das heisst die äusseren Schichten werden zuerst geschädigt. Geogitter mit geringem Querschnitt verlieren dabei ihre Festigkeit schneller als Geogitter mit grösserer Materialstärke.

Geokunststoffe sind für den Einsatz im Boden konzipiert und sollten daher im eingebauten Zustand keinen Witterungseinflüssen ausgesetzt sein. In der Praxis kommt es aber oft vor, dass bereits verlegte Geokunststoffe aufgrund von Einbauverzögerungen mehrere Tage unbedeckt liegen bleiben, ohne vor der schädigenden Sonneneinstrahlung geschützt zu werden. Bei zu begründeten Steilböschungen kann es sogar Wochen und Monate dauern, bis die Kunststoffbewehrung an der Stirnfläche durch eine Begrünung geschützt wird.

Die Normen zur Erlangung des CE-Zeichens (Tab. 1) verlangen für Geokunststoffe, welche als "sofort zu überdecken" deklariert werden, keine Überprüfung der Witterungsbeständigkeit. Wie Untersuchungen zeigen, können nicht UV-stabilisierte Produkte aber bereits nach wenigen Tagen im Freien markante Festigkeitseinbussen erleiden.

Liegen keine Angaben zur Witterungsbeständigkeit vor, können Einbauverzögerungen zu unvorhersehbaren Folgen für die Funktionstüchtigkeit der Konstruktion führen. Die Schweizer Norm SN 640 550 (1996) schreibt daher für alle Geokunststoffe eine Laborbewitterung vor. Ist danach keine Festigkeitsabnahme (< 5 %) feststellbar, darf das Produkt ohne Bedenken für einige Tage unbedeckt liegen bleiben. Dauert dieser Zustand aber voraussichtlich mehrere Wochen, muss eine Prüfung nach EN 12224 (2000) beweisen, dass das Produkt dafür geeignet ist. Es gelten die Mindestanforderungen gemäss Tab. 15.

Maximal zulässige Zeit bis zur Überdeckung	Maximal zulässiger Festigkeitsabfall nach Bewitterung		Bewertung der Witterungsbeständigkeit nach FGSV (1994)
	Prüfung nach EN 12224 (2000)	Prüfung nach SN 640 550 (1996)	
1 Monat (Sommer) bis 4 Monate (Winter)	20 %	nicht anwendbar	hoch
2 Wochen	40 %	5 %	mittel
max. 2 Tage	*	*	niedrig

* In der Praxis kann kaum sichergestellt werden, dass der Geokunststoff sofort nach der Anlieferung auf der Baustelle verlegt und mit Bodenmaterial überdeckt wird. Daher sollte immer eine minimale Witterungsbeständigkeit verlangt werden.

Tab. 15 Bewertung der Witterungsbeständigkeit (Langzeitfestigkeit erforderlich).

2.3.2.3 Beschüttung

Es ist zu empfehlen, das Bodenmaterial nicht direkt auf den Geokunststoff fallenzulassen, sondern auf bereits bedeckte Flächen, und es mit geeignetem Gerät zu verteilen. Bräu (2001) stellt grossmassstäbliche Beschüttungsversuche mit variierendem Untergrund, Schüttmaterial und Schütthöhe vor. Für Geovliese mit einem Flächengewicht zwischen 150 und 300 g/m², Sand als Untergrund, Beschüttung mit unsortiertem Felsgestein 56 ... 200 mm und einer Fallhöhe von 2 m ergaben sich Restfestigkeiten zwischen 70 und 95 % und ein Lochflächenanteil < 5 %. Die Beschädigungen beim Beschütten waren geringer als diejenigen beim Verdichten und Befahren.

Weil grossmassstäbliche Beschüttungsversuche zeit- und kostenintensiv sind, wird beispielsweise der Kegelfallversuch nach EN 918 (1996) zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegen Beschüttung angewandt. Insbesondere wegen der fehlenden Bodenunterlage und des schwierig ermittelnde Lochdurchmessers sind die Korrelationen zur Praxis aber unbefriedigend (Bräu, 2001). Der Pyramiden-Fallversuch mit natürlicher oder künstlicher Bodenunterlage zeigte im Gegensatz zum Kegelfallversuch eine gute Korrelation zu Praxisresultaten (Bräu et al., 1992).

2.3.2.4 Einbaubeanspruchung (Verdichtung)

Bei den meisten üblichen Anwendungen sind die Geokunststoffe beim Einbau den höchsten mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Eine Ausnahme besteht bei Geokunststoffen mit ausgesprochener Verstärkungs- oder Bewehrungsfunktion. Aber auch hier überwiegen vor allem im kleinräumigen Bereich oft die Einbaubeanspruchungen, beispielsweise beim Aufbringen und Verdichten von grobem, kantigem Schüttmaterial.

Grossmassstäbliche Befahrungsversuche mit weichem Untergrund (breiiger, leicht plastischer Ton) und Tragschicht aus Kies-Sand (Rundkorn) bzw. gebrochenem Schotter (0 ... 56 mm und 56 ... 130 mm) zeigten, dass Schichtdicken unter 30 cm mit üblichem Erdbaugerät - auch mit hochfesten Geokunststoffen - nicht tragfähig herzustellen sind (nur wenige Überfahrten möglich) und somit in der Praxis die unterste Grenze darstellen (Laier et al., 1990). Die dynamisch-mechanische Beanspruchung (Walkarbeit), die aus Radüberfahrten resultiert, kann zu Beschädigungen wie Scheuerungen, Eindrückungen, Ausdünnungen oder Lochaufweitungen führen.

Ähnliche Ergebnisse fand Bräu (1996) für den Einbau von Geokunststoffen als Trennlage zwischen weichem Untergrund und Tragschicht: Eine minimale Beschüttungsdicke von 30 cm ist nötig, um das System vor dem Bruch und den Geokunststoff vor einer Perforation zu bewahren. Eine Erhöhung der Beschüttungsdicke auf 50 cm führt zu einer grösseren möglichen Zahl an Überfahrten als die Verwendung stärkerer Geokunststoffe.

Die traditionelle Beurteilung der Einbau-Robustheit ("survivability") ist für Verlegen auf weichem Untergrund für Trenn- und Filteraufgaben konzipiert. Bei bewehrten Konstruktionen ist aber Untergrund und Beschüttung im Allgemeinen identisch bezüglich Bodenmaterial (körnig) und Verdichtung (hoch), weshalb die Anforderungen nicht übertragbar sind. Installationen in körnigem Bodenmaterial (üblich für bewehrte Konstruktionen) stellen die strengste Einbauanforderung dar (Richardson, 1998).

Das Mass einer Einbauschädigung hängt neben dem Geokunststoff von folgenden Parametern ab (Greenwood, 1998; Hsieh et al., 2000):

- Korngrößenverteilung und Kantigkeit von Untergrund und Schüttmaterial
- Methoden zum Aufbringen und Verteilen des Bodenmaterials
- Gewicht und Typ des Verdichtungsgerätes
- Verdichtungsenergie und Mächtigkeit der eingebauten Schicht(en)

Einbauschäden treten verstärkt auf bei grobem, ungleichmässigem und gefrorenem Planum, geringer Schichtdicke der Beschüttung, schwerem Verdichtungsgerät sowie grossen Korngrössen und schlechter Abstufung des Schüttmaterials (Koerner & Koerner, 1990). Dabei ist der wichtigste Faktor die Kantigkeit und die mittlere Korngrösse des Bodenmaterials (FHWA, 2000). Statt mit hoher Zugfestigkeit bei grosser Dehnsteifigkeit (z.B. Gewebe mit grossem E-Modul) ein Eindrücken zu verhindern, kann den lokalen Beanspruchungen beim Eindrücken von Steinen auch mit einem grossen Dehnvermögen (z.B. Vliese mit kleinem E-Modul) begegnet werden (Bräu, 1996).

Einbauversuche haben gezeigt, dass sich der Verlauf der Kraft-Dehnungs-Kurve (E-Modul) trotz Beschädigungen in den meisten Fällen kaum verändert (Bush, 1988; Troost & Ploeg, 1990; Watts & Brady, 1990 & 1994). Einbauschäden treten als lokale Defekte bzw. Einkerbungen der Fasern oder Gitterelemente in Erscheinung, welche zu lokalen Spannungserhöhungen führen. Dadurch versagen die Fasern bzw. Gitterelemente vor Erreichen der Höchstzugkraftdehnung im Neuzustand, ohne dass sich die Form der Kraft-Dehnungs-Kurve ändert (d.h. die grundlegenden Eigenschaften der Polymere werden durch eine Einbauschädigung nicht verändert).

Gebrauchsdehnungen, welche üblicherweise in Geokunststoff-bewehrten Konstruktionen gemessen werden, liegen im Allgemeinen zwischen 1 % und 2 %. Bei so kleinen Dehnungen hat eine moderate Einbaubeanspruchung daher meist keinen Einfluss auf das Langzeitverhalten der Konstruktion. Wenn aber eine signifikante Anzahl Fasern bzw. Gitterelemente durchtrennt wird, erniedrigt sich die zur Erreichung einer bestimmten Dehnung erforderliche Kraft, d.h. der E-Modul nimmt ab (Allen & Bathurst, 1996).

Einbauschäden sind durch die richtige Bemessung und Auswahl des Geokunststoffes zu verhindern. Einbauschäden oder -beanspruchungen haben nur eine Bedeutung für das Langzeitverhalten, wenn dadurch Schäden beziehungsweise Veränderungen am Geokunststoff entstehen, die zu einem zeitabhängigen Prozess führen, der die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften für die Ausübung der verlangten Funktion nachhaltig und ungünstig verändert.

Basierend auf mehreren Untersuchungen verschiedener Autoren legt die amerikanische Richtlinie FHWA (2000) für Einbaubeanspruchungen die Abminderungsfaktoren für Bewehrungsanwendungen gemäss Tab. 16 fest.

Geokunststoff	Max. Korn 102 mm mittl. Korn 30 mm	Max. Korn 20 mm mittl. Korn 0.7 mm
einaxiales HDPE-Gitter	1.20 ... 1.45	1.10 ... 1.20
biaxiales PP-Gitter	1.20 ... 1.45	1.10 ... 1.20
PVC-beschichtetes PET-Gitter	1.30 .. 1.85	1.10 ... 1.30
Acryl-beschichtetes PET-Gitter	1.30 ... 2.05	1.20 ... 1.40
PP & PET Gewebe	1.40 ... 2.20	1.10 ... 1.40
PP & PET Vlies	1.40 ... 2.50	1.10 ... 1.40
PP-Bändchengewebe	1.60 ... 3.00	1.10 ... 2.00

Tab. 16 Abminderungsfaktoren für die Einbaubeanspruchung (gilt nur für Geokunststoffe mit einem Flächengewicht grösser 270 g/m²).

2.3.2.5 Vorhersage der Widerstandsfähigkeit gegen Einbaubeanspruchung

Die mechanischen Mindestanforderungen sind generell so anzusetzen, dass der Geokunststoff durch den Einbau nicht derart beschädigt wird, dass es seine verlangte Aufgabe oder Funktion nicht mehr erfüllen kann. Bei statischer Anforderung darf die Festigkeit des Geokunststoffes durch den Einbau nicht unzulässig abgemindert werden. Bei Trenn- und Filteraufgaben dürfen keine Löcher entstehen, welche beispielsweise die Filterwirksamkeit in Frage stellen. Um genügend Widerstand gegen Einbauschädigungen zu garantieren, werden für Trenn- und Filtergeotextilien minimale mechanische Eigenschaften und für Bewehrungsprodukte entsprechende Festigkeitsreserven verlangt.

Watn & Zeniti (1997) haben gefunden, dass die Kraft-Dehnungs-Kurve zur Vorhersage der Verformungen während des Einbaus geeignet ist, und ein Geokunststoff mit höherem Anfangsmodul geringere Verformung erfährt. Feld-Einbauversuche mit verschiedenen Geovliesen (Tab. 17) zeigten eine gute Korrelation zwischen der Anfälligkeit für Beschädigung und dem „Arbeitsvermögen“, berechnet aus:

$$\text{Arbeitsvermögen [kN/m]} = \frac{\text{Zugfestigkeit [kN/m]} \times \text{Dehnung (absolut)}}{2}$$

Korngrösse [mm]	Flächengewicht [g/m ²]	Arbeitsvermögen [kJ/m]	Beschädigung
< 60	110 ... 145	0.9	sehr stark
		1.5 ... 1.8	mässig
		2.4 ... 4.5	gering
< 500	300 ... 360	3.2	stark
		4.8 ... 7.2	mässig
		4.7 ... 9.5	gering

Tab. 17 Visuelle Beurteilung der Einbaubeschädigungen als Funktion der Korngrösse des Schüttmaterials, der flächenbezogenen Masse der Geovliese und des Arbeitsvermögens (Watn & Eiksund, 2000).

Gestützt auf Labor- und Feldversuchen an Trenn- und Filtervliesen schlagen Watn & Eiksund (2000) vor, das Arbeitsvermögen (Integral unter der Kraft-Dehnungskurve) des Geokunststoffes als Kriterium für die Beständigkeit gegen Einbaubeanspruchung heranzuziehen (siehe Abb. 24). Auch die Schweizer Norm SN 640 550 (1996) sowie die amerikanische Klasseneinteilung AASHTO M288-96 (1996) verlangt (bei Trenn- und Filteranwendungen) höhere Festigkeiten für Geotextilien mit niederer Dehnung, was einer Minimalanforderungen an das Arbeitsvermögen entspricht.

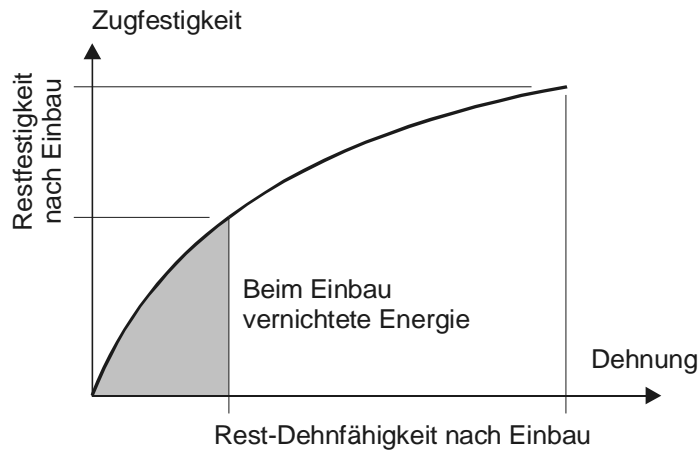


Abb. 24 Energieprinzip nach Watn & Eiksund (2000).

2.3.2.6 Simulation einer Einbaubeanspruchung im Labor

ENV ISO 10722-1 (1998) beschreibt ein Verfahren zur Laborsimulation der Einbaubeanspruchung, bei welchem ein Geokunststoff zwischen zwei Bodenschichten eingebaut und dynamisch belastet wird. 1993 unternommene, internationale Rundversuche zur Validierung der europäischen Vornorm haben folgende optimalen Parameter ergeben: 10 x 25 cm Platte, 900 kPa Belastung, 200 Zyklen. 5 Bewehrungsprodukte wurden entsprechend geprüft und die Ergebnisse mit Freifeldversuchen verglichen. Dabei hat sich ergeben, dass die Laborergebnisse mit Aluminiumkorrund zwischen den Feldergebnissen für Sand (mittl. Korngrösse 0.28 mm) und Kalkstein (mittl. Korngrösse 14 mm) zu liegen kamen (Greenwood, 1998).

Die Verwendung von Aluminiumkorrund ermöglicht den Einsatz von ähnlichem Material in ganz Europa. Es wirft aber auch verschiedene Probleme auf. Insbesondere der vom Kornmaterial abgeriebene, sehr scharfkantig Staub, kann in die Geokunststoffstruktur gelangen und die Filamente oder Bändchen auch ohne dynamische Belastung anritzen bzw. durchtrennen (Bräu, 2001).

In Laboreinbauversuchen nach ENV ISO 10722-1 (1997) wurden die Restfestigkeiten gemäss Tab. 18 gefunden (Lopes et al., 2000).

Geokunststoff (<i>Zugfestigkeit</i>)	Restfestigkeit [%]	Variationskoeff. [%]
PP-Bändchengewebe (22 kN/m)	10	22
PP-Bändchengewebe (40 kN/m)	28	5
PP-Bändchengewebe (65 kN/m)	43	12
gewobene PET-Geogitter (60/30 kN/m)	75	9
gewobene PET-Geogitter (55 kN/m)	60	7
beschichtetes Aramid mit PET-Vlies (40 kN/m)	37	3
extrudiertes PP-Gitter (40 kN/m)	100	1
Kern-Mantel-Faser (Kern PET, Mantel PP, 50 kN/m)	88	4

Tab. 18 Restfestigkeiten (inkl. Variationskoeffizient) nach Einbausimulation im Labor.

Versuche in Anlehnung an ENV ISO 10722-1 (1997) mit alternativer Wahl der Prüfparameter lieferten die Restfestigkeiten gemäss Tab. 19 (Khay, 1998).

Prüfparameter	vernadeltes PET-Vlies 300 g/m ² , 20 kN/m	therm. verf. PET-Vlies 260 g/m ² , 15 kN/m	PP-Gewebe 500 g/m ² , 88 kN/m
5 ... 200 kPa, 100 Zyklen	97	100	97
5 ... 500 kPa, 100 Zyklen	84	87	91
5 ... 900 kPa, 50 Zyklen	61	80	88
5 ... 900 kPa, 100 Zyklen	52	65	80
5 ... 900 kPa, 200 Zyklen	49	69	74

Tab. 19 Restfestigkeiten in % nach Labor-Einbausimulation.

Laboreinbauversuche mit einer 67 × 47 cm Stahlwanne, einer 46 × 35 cm Belastungsplatte (längs), 200 Zyklen bei 1 Hz und 5 ... 900 kPa lieferte für die Aggregate Aluminiumoxid, Sand und sandiger Kies < 50 mm die Restfestigkeiten gemäss Tab. 20 (Cancelli & Montanelli, 2000). Verglichen mit Feldversuchen waren die im Labor ermittelten Festigkeitsabnahmen etwas kleiner, da hierbei nur Durchdrück- und kaum Scherkräfte auftreten.

Gittertyp	Restfestigkeiten [%]
extrudiert	> 95
gewoben	50 ... 80

Tab. 20 Restfestigkeiten in % nach Labor-Einbausimulation (Geogitter identisch Tab. 36).

Versuche mit Aluminiumkorrund < 10 mm, statischer Vorbelastung mit 200 kPa, einer Belastungsplatte 10 × 22 cm, 0 ... 820 kPa zyklischer Belastung und 2000 Zyklen (bei einer bezüglich Normentwurf reduzierten Frequenz von 0.5 Hz) lieferten Restfestigkeiten von 40 ... 80 %, im Widerspruch zu Ergebnissen aus Feldversuchen mit weichem Untergrund (30 cm Beschüttung, mit 13-Tonnen-Walze verdichtet) aber keine visuell feststellbaren Beschädigungen (Bräu, 2001). Ein modifizierter Laborversuch mit weichem Untergrund (Glyben = Mischung aus Glycerin und Bentonit) zeigte hingegen Beschädigungen (Löcher, Risse) ähnlich den Feldversuchen.

2.3.2.7 Partikeleinlagerungen

Geotextilien - speziell Geovliese - weisen ein grosses Porenvolumen auf. Werden Geovliese als Filter eingesetzt, verhalten sie sich wie Tiefenfilter, das heisst die zurückzuhaltenden Partikel werden teilweise eingelagert. Bei hydraulischen Aufgaben werden Bodenpartikel in die Geotextilstruktur gespült und - falls ihre Grösse nahe der Porenöffnungsweite liegt - im Textil festgehalten. Nicht bindige Böden mit ungleichförmiger Korngrössenverteilung und hohe hydraulische Gradienten begünstigen die Eintragung von Feinanteilen ins Geotextil.

Bei dynamisch beanspruchten Bauwerken gelangen Bodenpartikel auch in Abwesenheit von fliessendem Wasser in die Geotextilstruktur. Bei nasser Witterung hat eine starke dynamische Belastung auch Pumpeffekte und damit Feinmaterialeintragungen zur Folge. Sind Eisenpartikel in Boden oder Wasser vorhanden, so können sie sich durch Oxidation vergrössern und damit im Geotextil steckenbleiben.

Bei Geovliesen kann die eingelagerte Bodenmenge das Mehrfache der Fasermasse betragen, wodurch sich das freie Porenvolumen reduziert. Der hauptsächliche Bodeneinlagerungsprozess erfolgt beim Einbau, anschliessend bleibt das freie Porenvolumen in etwa stabil (Werner & Pühringer, 1990).

In Geovliesen schränken Partikeleinlagerungen die Beweglichkeit der Fasern ein (Versteifung), wodurch sich die mechanischen Eigenschaften des Geotextils ändern. Insbesondere wird der Dehnungs- und Kriechdehnungsanstieg bei Belastung vermindert (Beispiel in Abb. 25). Bei dynamischer Beanspruchung erhöhen eingelagerte Partikel die Gefahr von Schädigungen durch Scheuern (Cai et al., 1989).

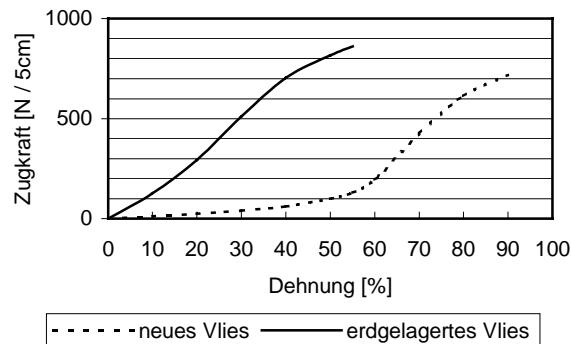


Abb. 25 Kraft-Dehnungsverhalten von neuem und erdgelagertem vernadeltem 450 g·m⁻²-Geovlies (Hillig & Lieberenz, 1986). Das Geovlies war 7 Jahre in einem Bahnkörper eingebaut (gesamte Verkehrsbelastung: 125 Millionen Tonnen). Im ausgegrabenen Geotextil war in etwa 2,4 kg·m⁻² Bodenmaterial eingelagert.

Bodenteilchen lagern sich in die Geotextilstruktur ein und Behindern so Verformung und Ausrichtung der Fasern unter Zugspannung. Die regellos angeordneten Fasern bei Vliesen werden so in ihrer Lage fixiert. Diese Fixierung ist umso stärker, je höher die Auflast ist und je leichter sich Bodenteilchen in die Geotextilstruktur einlagern können (Bauer, 1997).

Eingelagerte Teilchen tragen einerseits durch mechanische Schädigung der Fasern (in Form von Kratern, Kerben, Längsrissen und abgelösten Faserteilen) zum Alterungsverhalten von Geokunststoffen bei. Solche Schäden resultieren aus abrasiver Beanspruchung und treten bereits bei sehr moderaten Einbaubeanspruchungen auf (Ehrler, 1999). Andererseits können solche Partikel chemische Schädigungen induzieren, indem Wasser Bestandteile vom Teilchen löst, welche als hochkonzentrierte Chemikale lokal an der Faseroberfläche wirksam werden (Ehrler, 1999).

2.3.2.8 Einfluss von Einbauschäden auf das Kriechverhalten

Der konventionelle Partialsicherheitsansatz ($z = r/A_1 \times A_2 \times \dots$) impliziert, dass es keine synergistischen Effekte zwischen den verschiedenen festigkeitsreduzierenden Faktoren gibt. Kriechversuche an einbaubeanspruchten Geokunststoffen zeigten, dass die Unterschiede zwischen dem konventionellen Ansatz zur Berechnung des kombinierten Effekts von Einbau und Kriechen und an ausgebauten Proben ermittelten Kriechdaten vernachlässigbar klein sind. Der konventionelle Ansatz ($A_1 \times A_2$) ist im Allgemeinen konservativ, d.h. man ist auf der sicheren Seite (Allen & Bathurst, 1996).

Einbauschäden beeinflussen primär das Zeitstandverhalten (Cancelli & Montanelli, 2000). Die Kriechdehnungseigenschaften ändern sich durch Einbauschäden kaum, einzig die Anfangsdehnungen beim Aufbringen der Last sind reduziert (Greenwood, 1998). Kriechversuche (20000 Std., 40 % der Maximalfestigkeit, 20 °C) an uniaxialen extrudierten Gittern, welche im Anschluss an einen Einbau in Schotter ausgeführt wurden, zeigten im Vergleich zum Original nur kleine Kriechdehnungs-Unterschiede (Cancelli & Montanelli, 2000).

Kriech- und Zeitstandversuche nach EN ISO 13431 (1999) an neuen und eingebauten PP-Bändchengeweben (Zugfestigkeit 65 kN/m) und gewobenen PET-Geogitter (Zugfestigkeit 55 kN/m) zeigten, dass die ein- und wieder ausgebauten Proben im Zeitstandversuch bei tendenziell höheren Festigkeiten reißen, als aus der Kombination der Zeitstandfestigkeiten des Originals und den Restfestigkeiten nach dem Einbau zu erwarten wäre (Lopes et al., 2000).

2.3.3 Abminderungsfaktor für die Verarbeitung (A_3)

Der Abminderungsfaktor A_3 für Verbindungsstellen und Bauteil-Anschlüsse ist sehr stark abhängig vom Produkt und der Art der Verbindung (Klemmung, Verschraubung, Verankerung durch Stäbe, etc.). Es sind daher keine generellen Angaben möglich. Die Werte sind auf jeden Fall durch Versuche zu ermitteln. Gewöhnliche Stöße oder Überlappungen sind in der Hauptkraftrichtung ohne besondere Nachweise nicht verantwortbar. Zeitstandversuche an Verbindungselementen liefern direkt $A_1 \cdot A_3$.

2.3.4 Abminderungsfaktor für Umgebungseinflüsse (A_4)

Der Abminderungsfaktor A_4 (Dauerhaftigkeit) beschreibt den möglichen Zugfestigkeitsverlust infolge von Umgebungseinflüssen (Beständigkeit gegen Chemikalien und Mikroorganismen). Der härteste Umgebungseinfluss für Geokunststoffe ist die Bewitterung, welche aber nur beim Einbau relevant ist und durch Mindestanforderungen an die Witterungsbeständigkeit berücksichtigt wird. Einmal eingebaut, sind die chemischen und biologischen Umgebungseinflüsse nur dann vernachlässigbar, wenn es sich um natürliche Böden mit pH-Werten zwischen 4 und 9 handelt.

2.3.4.1 Chemische Einflüsse

Geokunststoffe werden im Allgemeinen in natürliche Böden eingebaut und sind natürlichem Grundwasser ausgesetzt. Normale, nicht kontaminierte Böden weisen üblicherweise keine Chemikalien auf, die für Geokunststoffe kritisch sind. Dies gilt solange, als dass sich der pH-Wert der Böden im Bereich von 4 bis 9 bewegt. Bei der Untersuchung von 235 Proben aus für eine Bodenbewehrung geeigneten Böden wurde festgestellt, dass deren 233 einen pH < 9 aufwiesen und nur zwei einen pH zwischen 10 und 11 (Blivet et al., 1992).

In sauren und stark alkalischen Böden ist hingegen eine exaktere Analyse angezeigt. Die chemische Beständigkeit der einzusetzenden Geokunststoffe muss auch für solche Anwendungsfälle genauer untersucht werden, bei welchen Chemikalieneinwirkungen wahrscheinlich sind. Tab. 21 enthält Beispiele chemischer Einflüsse, welchen Geokunststoffe je nach Verwendungszweck ausgesetzt sein können.

Einsatz	mögliche chemische Einflüsse
Strassen	Treibstoff, Streusalz
Schienenwege	Unkrautvernichter
Tunnel	Bergwasser
Bewehrte Erdkörper	Frischbeton, Kalkstabilisierung
Deponien	Lösungsmittel

Tab. 21 Chemische Umgebungseinflüsse.

Wirken Lösemittel in hoher Konzentration auf einen Geokunststoff ein, so besteht lokal die Gefahr der Quellung und Auflösung (unbegrenzte Quellung). Im gequollenen Zustand erhöht sich die Gefahr von Spannungsrissbildungen. Die alte Chemiker-Faustregel, dass Ähnliches von Ähnlichem gelöst wird, mag bei ersten Abschätzungen über die Gefährdung vorgegebener Polymere durch bestimmte Lösemittel hilfreich sein. Für solche Abschätzungen werden die Polyolefine (PP, PE) als unpolar, PA und PET dagegen als polar angesehen. Abb. 26 gibt Anhaltspunkte für die Polarität einiger Lösemittelgruppen.

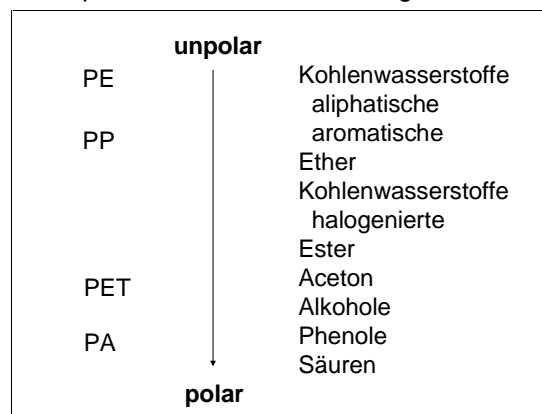


Abb. 26 Polarität ausgewählter Polymere und Lösemittel (Hufenus et al., 1997).

Bei der Prüfung der chemischen Beständigkeit nach EN 14030 (2001) wird ein Kontakt mit flüssigen Chemikalien wie Säuren oder Alkalien simuliert. Um eine beschleunigende Wirkung der chemischen Einflüsse zu erhalten, werden die Konzentrationen der Chemikalien und die Temperatur erhöht. Zur Prüfung werden die Proben bei 60 °C während 72 Stunden in zwei Lösungen eingelegt:

- anorganische Säure: 0,025 M Schwefelsäure
- anorganische Lauge: 2,5 g/l Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ("Kalkmilch", pH 12,5).

Hydrolyse

Eine mögliche Gefahr für eingebaute Geokunststoffe ist die unter dem Einfluss von Wasser erfolgende Hydrolyse. Bei der Hydrolyse wird die Hauptkette des Polymers durch Reaktion mit einem Wassermolekül

gespalten, was einen Festigkeitsabfall zur Folge hat. Sie wird durch tiefe oder hohe pH-Werte (Säuren beziehungsweise Basen) sowie Wärmezufuhr stark beschleunigt. PA und PET sind hydrolyseanfällig, die Polyolefine PP und PE sind dagegen hydrolysebeständig. Zum Schutz (und zur mechanischen Stabilisierung) werden insbesondere PET-Gewebe oft mit PVC umhüllt. Die Beschichtung muss dabei so robust sein, dass sie den Einbau schadlos übersteht.

Die alkalische Hydrolyse ist stark von Ionengehalt und -art des wässrigen Mediums abhängig. Im Vergleich zu anderen Ionen wird eine klare Beschleunigung in Gegenwart von Ca^{2+} festgestellt (Schröder et al., 2001b). Die Geschwindigkeit der Hydrolyse ist proportional zur Konzentration der Hydroxylionen, deshalb ist sie bei pH-Werten bis 9 bei normalen Bodentemperaturen vernachlässigbar. So zeigte ein PET-Gewebe, welches als Bewehrung in einer Polsterwand eingesetzt wurde, im inneren Bereich der Stützwand auch nach 20 Jahren praktisch keine Verschlechterung, d.h. die Molmasse und der Carboxylendgruppengehalt blieben unverändert (Risseeuw & Alexiew, 2001). Ungünstig auf die Hydrolysebeständigkeit wirkt sich in manchen Fällen auch eine vorgängige Bewitterung aus (Schröder et al., 1992).

EN 12447 (2001) dient zur Bestimmung der Hydrolysebeständigkeit von Polyesterfasern, welche in Geokunststoffen eingesetzt werden. Es handelt sich um einen einfachen Indextest, bei welchem die Festigkeitsabnahme nach einer 8-wöchigen Immersion in Wasser bei 95 °C gemessen wird. Er basiert auf Methoden zur Qualitätssicherung bei der Herstellung von Polyesterfasern. Die europäische Norm dient Produzenten zur Feststellung der Widerstandsfähigkeit des Fasermaterials. Korrelationen zu Schadensmechanismen, welche im praktischen Einsatz von Geokunststoffen auftreten, sind aber nicht bekannt. Das Verfahren ist daher nicht geeignet, um darauf basierende Mindestanforderungen an die Hydrolysebeständigkeit von Geokunststoffen aufzustellen, und somit für den Anwender nicht relevant.

Da PET-Materialien sehr empfindlich auf hohe pH-Werte reagieren, dürfen sie nicht bei Kalkstabilisierung oder im Kontakt mit Frischbeton verwendet werden. Eine spezielle Umfrage bezüglich Kontakt von PET-Material mit ausgehärtetem Beton oder Fertigteilen ergab sehr unterschiedliche Ergebnisse: Wenige Spezialisten in Deutschland sehen auch darin eine Gefahr für PET, sogar im Kontakt mit längst erhärteten Fertigteilen, die im Regen standen, oder abgewaschenem Beton. Ohne Bedenken lassen Ingenieure in Frankreich, Belgien und den Niederlanden das Berühren von Polyester mit Betonfertigteilen zu. Allgemein gelten mit PVC überzogene Geogitter aus PET als kaum gefährdet, weil speziell geschützt.

Oxidation

In der Praxis ist an den meisten Alterungsvorgängen von organischen Werkstoffen der Sauerstoff beteiligt (Oxidation). Bei permanent hohen Temperaturen und gleichzeitiger Anwesenheit katalytisch wirkender Ionen (wie beispielweise Fe^{3+}) sowie beim Kontakt mit einem stark oxidierend wirkenden Medium (z.B. Salpetersäure, Schwefelsäure, Chlor, Brom, Ozon) ist mit einem oxidativen Angriff zu rechnen. Besonders oxidationsanfällig sind Polymere mit Doppelbindungen oder tertiär gebundenem Kohlenstoff (beispielsweise Polypropylen PP). Der Abbau durch oxidierend wirkende Medien äussert sich in einer grossen Veränderung der mechanischen Eigenschaften. Die Widerstandsfähigkeit gegen thermooxidativen Abbau ist abhängig von der Zusammensetzung des Polymers und kann durch Zusatz geeigneter Stabilisatoren (Antioxidantien) verbessert werden.

Bei zeitraffenden Prüfungen des Oxidationsverhaltens müssen die physiko-chemischen Gegebenheiten mit hinreichender Genauigkeit beachtet werden. Temperaturerhöhungen können leicht physikalische und chemische Änderungen hervorbringen, die das eigentliche Verhalten verfälschen. In ENV ISO 13438 (1999) wird ein neuartiges Prüfverfahren zur Oxidationsbeständigkeit vorgeschlagen, welches eine Oxidation mit erhöhter Sauerstoffkonzentration in wässrigem Medium beinhaltet und zum Screening der Funktionstüchtigkeit der Stabilisatoren (z.B. sterisch gehinderte Phenole, HALS) dient (Schröder et al., 2001a).

2.3.4.2 Biogene Einflüsse

Der biogene Einfluss auf Geokunststoffe geschieht entweder biochemisch-chemisch (Bewuchs, Säureausscheidung) durch Mikroorganismen (z.B. Bakterien, Pilze, Algen) oder mechanisch (Frass, Wurzeldurchdringung) durch grössere Lebewesen. Reine Polymere aus PE, PP, PET oder PA sind im Neuzustand beständig gegen eine Zerstörung durch Mikroorganismen (Abb. 27). Mechanische Schäden durch Nagetiere, Vögel, Insekten, Pflanzen, etc. sind durch bauliche Massnahmen zu verhindern und können nicht mit einem Abminderungsfaktor wettgemacht werden.

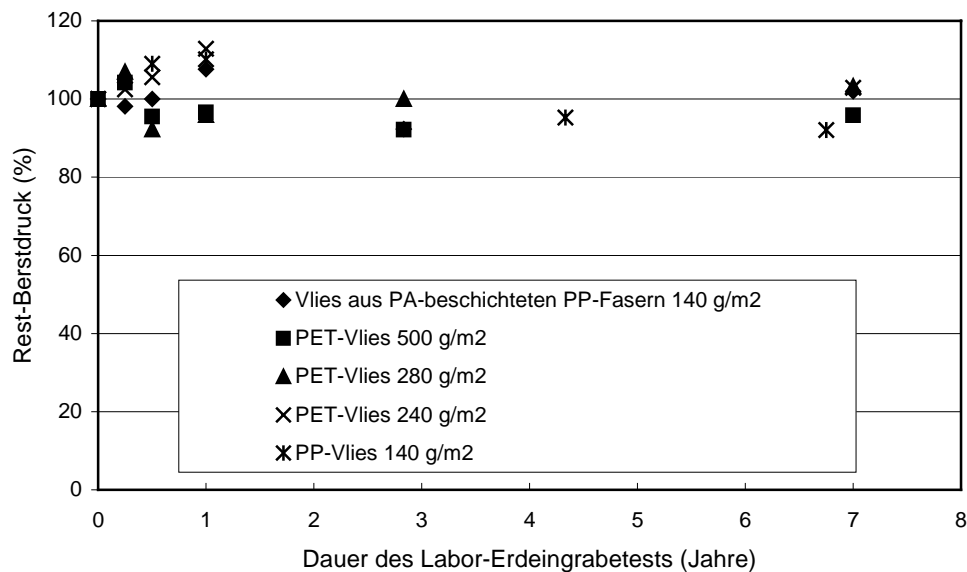


Abb. 27 Ergebnisse eines 7-jährigen Labor-Erdeingrabetests in feuchter Komposterde bei einer Temperatur von 29°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 - 90 % (Colin et al., 1986).

Für Geokunststoffe gilt der Erdeingrabetest nach EN 12225 (2000) als praxisnahe Laborprüfung zur Feststellung von Veränderungen der mechanischen Eigenschaften durch Bodenmikroorganismen (Raschle, 1983). Zur Untersuchung einer möglichen Zerstörung durch Vögel, Nagetiere oder Pflanzen existieren bisher nur Verfahren zur Prüfung der Wurzelbeständigkeit.

2.3.5 Abminderungsfaktor für dynamische Einflüsse (A_{dyn})

Für viele Geokunststoffanwendungen, insbesondere für Bewehrungskonstruktionen, muss eine gute Kraftübertragung zwischen Boden und Geokunststoff gewährleistet sein. Diese Übertragung erfolgt durch Reibungskräfte, welche zum Teil vom Reibungskoeffizient des Polymers, vor allem aber von der Oberflächenstruktur des Geokunststoffes und der Beschaffenheit des umgebenden Bodens abhängt. Die Reibung hat aber auch unvermeidlich ein Scheuern und somit einen Abrieb (Materialabtrag) des Geokunststoffes zur Folge. Insbesondere während des Einbaus, beim Verlegen, Überschütten und Verdichten ist eine starke Scheuerbeanspruchung zu erwarten. Reibungsbedingte Langzeitschäden sind bei statischen Konstruktionen aber kaum zu beobachten.

Anders ist die Situation bei dynamisch beanspruchten Bauwerken wie Schienenwegen oder Baustrassen. Wird die dynamische Scheuerbeanspruchung vom Oberbau auf den Geokunststoff übertragen, kommt es zu einer erheblichen Scheuerwirkung und damit zur Aufrauung der Geokunststoff-Oberfläche bis hin zur Lochbildung (zum Beispiel durch Verschieben, Ausziehen und Reißen von Fasern oder Garnen). In Bauwerken mit permanenter dynamischer Beanspruchung muss eine andauernde Scheuerbeanspruchung des eingesetzten Geokunststoffes durch geeignete bauliche Massnahmen ausgeschlossen werden.

Aus 15 australischen Schienenwegen (nach einer Verkehrsbelastung von 25 bis 40 Millionen Tonnen) ausgegrabene Geokunststoffe wiesen zum Teil starke Scheuerschäden auf, welche sich in einer Abnahme der Zugfestigkeit um 15% bis 73% äusserten (Hausmann et al., 1990).

Mit der Gleitblockprüfung nach EN ISO 13427 (1998) wird eine Scheuerbeschädigung simuliert. Das Scheuerprüfgerät besteht aus zwei parallelen Platten, von denen die untere - auf welcher das Scheuermittel mit definierter Oberflächeneigenschaft (Schleifpapier) aufgebracht ist - horizontal und einaxial bewegt wird. Die obere Platte drückt eine aufgespannte Geokunststoffprobe mit definierter Normalkraft auf das Scheuerelement. Nach einer Scheuerbeanspruchung von 750 Zyklen wird der prozentuale Verlust der maximalen Zugfestigkeit bestimmt.

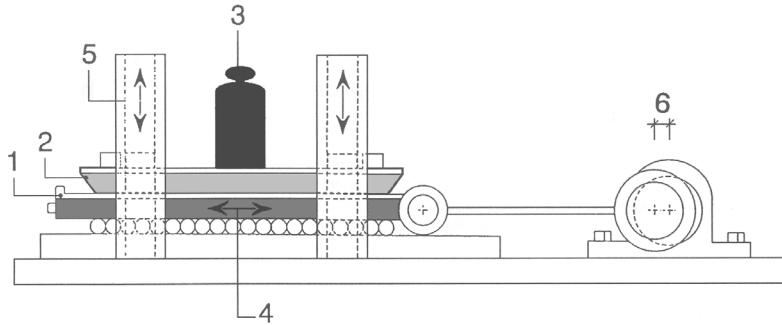


Abb. 28 Scheuerprüfgerät nach EN ISO 13427 (1998) (1: Gleitblock mit Scheermittel, 2: Geokunststoff-Messprobe 50 x 300 mm, 3: Gesamtmasse 6 kg, 4: lineare Bewegung 25 mm, 5: vertikale Führung, 6: Exzentrizität 12,5 mm).

2.3.6 Tragsicherheitsbeiwert (γ)

Der Tragsicherheits- oder Bauteilsicherheitsbeiwert dient zur Berücksichtigung von Vereinfachungen und Ungenauigkeiten des Berechnungsmodells sowie Abweichungen in der Geometrie des Bauwerkes. Er wird für Geokunststoffe üblicherweise zu 1.2 bis 1.5 angesetzt, wodurch geringe Einbauabweichungen berücksichtigt werden.

Nach EBGEO (1997) werden mit dem Tragsicherheitsbeiwert γ auch Abweichungen der charakteristischen Werte des Geokunststoffes gegenüber den im Labor ermittelten Werten einbezogen. Diese Abweichungen sowie herstellungsbedingte Streuungen im Produkt werden aber in der Schweiz bereits mit der Angabe von Mindest- und/oder Höchstwerten berücksichtigt (SN 640 550, 1996).

2.4 Witterungsbeständigkeit

Ausser bei speziellen Anwendungen, bei denen der Geokunststoff während längerer Zeit exponiert ist, ist die Anforderung an die Witterungsbeständigkeit nur für den Einbau relevant und daher nicht im A_4 -Faktor zu berücksichtigen.

2.4.1 Witterungseinflüsse

Geokunststoffe werden primär im Boden eingebaut und sind damit vor der Sonnenstrahlung geschützt. Ihre Witterungsbeständigkeit ist trotzdem relevant, denn Bauverzögerungen können nie ganz ausgeschlossen werden. Bereits eine einwöchige Exposition im Freien kann einen nicht UV-beständigen Geokunststoff markant schädigen. Noch kritischer wird die Situation bei Anwendungen, in welchen Geokunststoffe längere Zeit exponiert sind, beispielsweise beim Einbau in Stirnflächen von bewehrten Steilböschungen.

Bei der Bewitterung wirkt auf das Polymer eine Kombination verschiedener Klimaeinflüsse, wobei die Zufuhr von ultravioletter Strahlung, Sauerstoff, Wärme und Feuchtigkeit als Alterungsursachen überwiegen (Abb. 29). Die durch gleichzeitige Einwirkung mehrerer Klimafaktoren hervorgerufene Veränderung entspricht nicht der Summe der Veränderungen, die durch die isoliert einwirkenden Faktoren eintreten. Die Klimaeinflüsse wirken in manchen Fällen einander entgegen. Dann ist die resultierende Eigenschaftsänderung geringer als die kumulierte Auswirkung der einzelnen Einflüsse. In vielen Fällen hingegen vervielfacht sich die Wirkung gleichzeitig auftretender Einflüsse.

Als wichtigster atmosphärischer Einfluss auf die Alterung von Polymeren hat sich der ultraviolette Anteil der Sonnenstrahlung im Wellenlängenbereich von 290 bis 400 nm erwiesen (die kürzeste Wellenlänge der zur Erdoberfläche gelangenden Sonnenstrahlung liegt bei etwa 290 nm). Im nicht UV-stabilisierten Polymer reicht die Energie dieser Strahlung aus, um chemische Bindungen zu spalten und eine photooxidative Alterung zu initiieren. Die Energie der Sonnenstrahlung verringert sich mit zunehmender Dicke der zu durchdringenden Luftschicht und ist somit abhängig von der Tages- und Jahreszeit sowie der geographischen Breite.

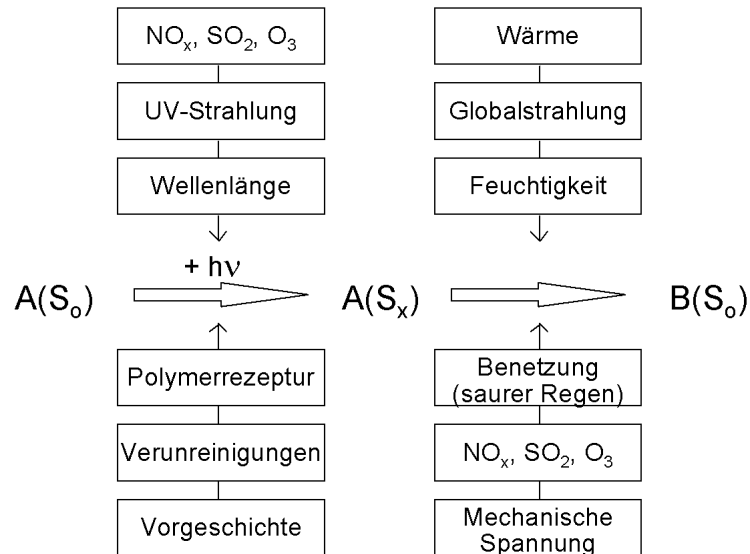


Abb. 29 Schema der kombinierten Wirkung von Witterungseinflüssen Trubiroha (1994). Dargestellt sind die Strahlungsaktivierung $A(S_0) \rightarrow A(S_x)$ und Deaktivierung $A(S_x) \rightarrow B(S_0)$ eines Polymermoleküls sowie die Hauptfaktoren, welche die Umwandlungsreaktionen beeinflussen (A = Ausgangsmolekül, B = Reaktionsprodukt, S_0 = Grundzustand, S_x = angeregter Zustand).

Wärme beschleunigt den chemischen Abbau während der atmosphärischen Alterung von hochmolekularen Stoffen. Eine Verdoppelung der Alterungsgeschwindigkeit wird in vielen Fällen schon durch eine Temperaturerhöhung um etwa 10°C bewirkt. Die Photooxidation der (feuchtigkeitsunempfindlichen) Polyolefine und von PET wird kaum von der relativen Luftfeuchtigkeit beeinflusst, wohingegen PA empfindlich darauf reagiert (Tabor & Wagenmakers, 1992).

Für Geokunststoffe ist die Bewitterung als sehr harter Umgebungseinfluss einzustufen. Die Witterungsbeständigkeit verschiedener Geokunststoffe variiert erheblich. Dabei ist der entscheidende Faktor neben dem polymeren Rohstoff (die Witterungsbeständigkeit nimmt in der Reihenfolge $\text{PET} > \text{PA} > \text{PE} > \text{PP}$ ab) vor allem die Ausrüstung (UV-Stabilisation, Pigmente), der Produktionsprozess und die Konstruktion (Faserfeinheit, Dicke etc.). Entsprechend ausgerüstete Geokunststoffe können mehrere Monate der Sonnenstrahlung ausgesetzt werden, ohne kritische Festigkeitseinbußen in Kauf nehmen zu müssen.

Im Allgemeinen erfahren gebräuchliche Geokunststoffe unter permanenter Sonneneinstrahlung massive Festigkeitseinbußen. Eine ständige Bewitterung ist daher bei Langzeitfunktionen generell auszuschließen. Da sich der witterungsbedingte Alterungsprozess von aussen nach innen fortsetzt, verlieren Geogitter aus massiven Elementen ihre Festigkeit langsamer als Geokunststoffe mit geringer Materialstärke.

2.4.2 Prüfung der Witterungsbeständigkeit

Gemeinsam mit der BAM, Berlin, hat die EMPA St. Gallen die europäische Norm EN 12224 (2000) zur Bestimmung der Witterungsbeständigkeit von Geokunststoffen erarbeitet und validiert (Greenwood et al., 1996, Hufenus et al., 2001). Zum Einsatz kamen verschiedene Bewitterungsgeräte, in welchen neun repräsentative Geotextilmuster gealtert und anschliessend beurteilt wurden.

Abb. 30 zeigt einen Vergleich der Restfestigkeiten verschiedener natürlich und künstlich bewitterter Geokunststoffe. Die Laborbewitterung erfolgte mittels UVA-340-Leuchtstofflampen nach ISO 4892-3, 50°C Schwarz-Standard-Temperatur, periodische Besprühung mit entsalztem Wasser. Die UV-Bestrahlung betrug 10 MJ/m^2 , 50 MJ/m^2 bzw. 100 MJ/m^2 . Die 27-monatige Freibewitterung wurde an vier sehr unterschiedlichen Standorten in der Schweiz durchgeführt (UV-Bestrahlung zwischen 539 und 617 MJ/m^2).

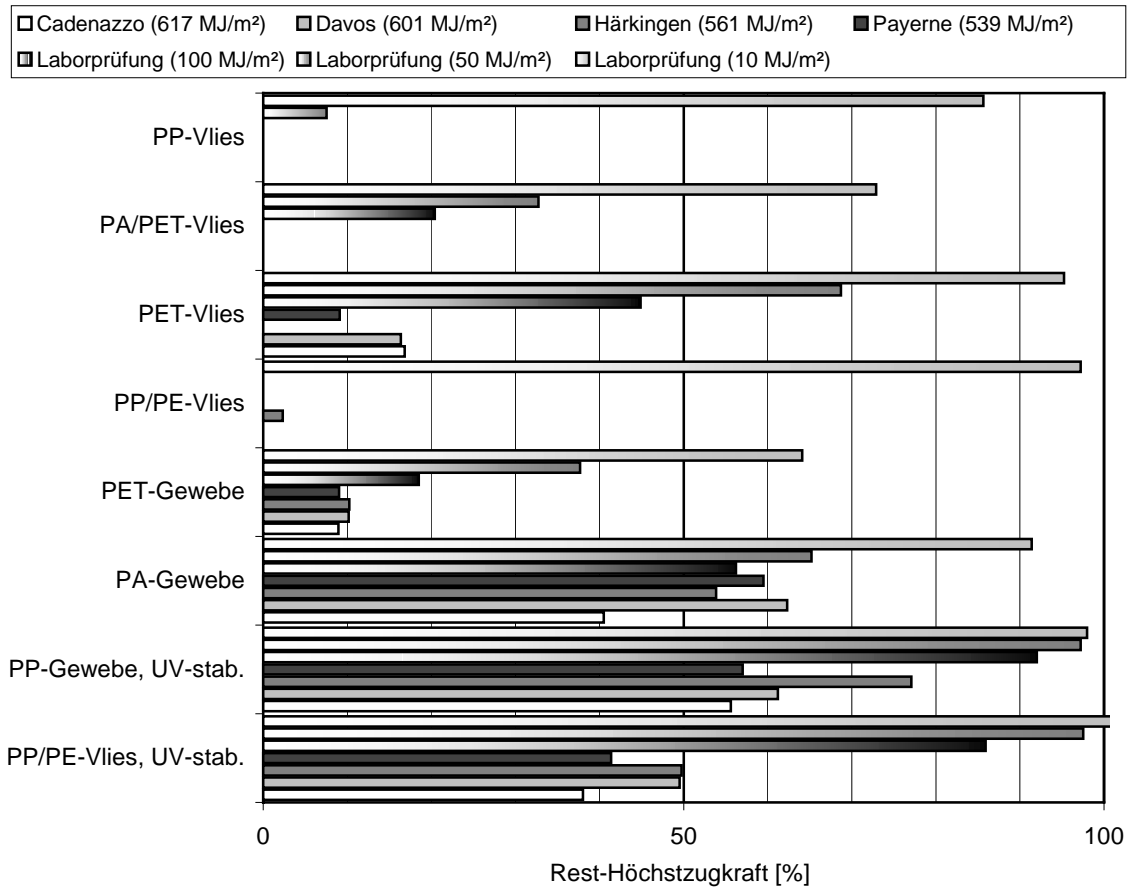


Abb. 30 Vergleich der Restfestigkeit bewitterter Geokunststoffe (Hufenus et al., 2001).

Die Laborversuche mit Weatherometer (Xenonbogenlampe Bor/Bor), QUV (UVA 340 Leuchtstofflampen) und Global-UV (Leuchtstofflampen-Kombination) wurden untereinander und zusätzlich mit Freibewitterungsversuchen in Berlin und Bandol (Südfrankreich) verglichen (Abb. 31). Dabei ergaben sich recht gute Übereinstimmungen zwischen Labor- und Freibewitterungsergebnissen.

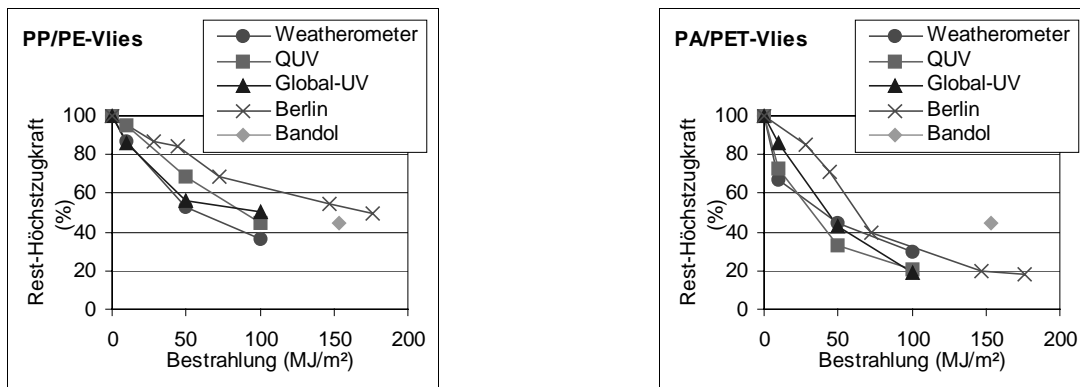


Abb. 31 Labor- und Freibewitterungen (Trubiroha & Schröder, 1997, Hufenus et al., 2001).

Einzig die Polyamid-Produkte zeigten anfangs nicht erklärbare Unstimmigkeiten, welche sich aber nach weiteren Abklärungen auf die Säureempfindlichkeit von PA zurückführen liessen (Abb. 32). Durch Bewitterungsversuche mit zusätzlicher Beanspruchung durch (künstlichen) sauren Regen kann diese Empfindlichkeit des Polyamid recht gut simuliert und damit die Witterungsbeständigkeit besser abgeschätzt werden.

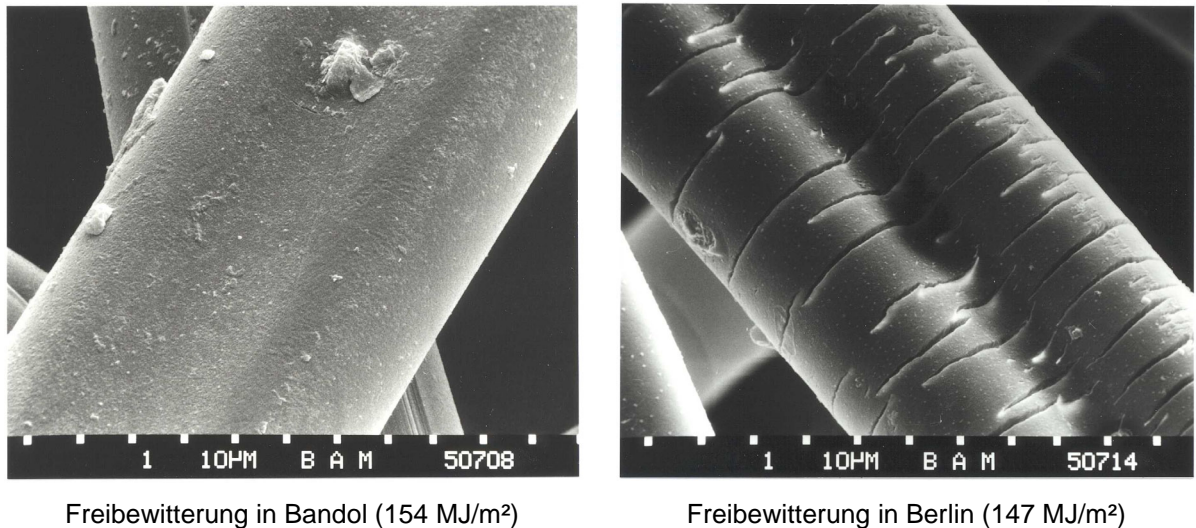


Abb. 32 Typische Faseroberflächen eines PA/PET-Vlieses nach Freibewitterung an verschiedenen Standorten mit vergleichbarer Strahlungs dosis (Trubiroha & Schröder, 1997). Die Oberflächen der in Bandol bewitterten Proben sind weitgehend unversehrt, die im schadstoffbelasteten Berlin exponierten hingegen zeigen deutliche Korrosionsspuren (Spannungsrisse).

Abb. 33 zeigt die Ergebnisse einer Bewitterung im Global-UV-Tester (Bestrahlung: 50 MJ/m²). Die Prüfung wurde zuerst nach EN 12224 (2000) unter periodischer Beregnung mit entsalztem Wasser durchgeführt. Dann wurde der Versuch unter Verwendung eines künstlichen sauren Regens (Säurelösung, pH 3.5, mit Schwefel-, Salpeter- und Salzsäure im Verhältnis 6:2:1) wiederholt. Die Kombination von Strahlung und Säureeinwirkung beschleunigte die Alterung der beiden Polyamid-Produkte (PA/PET-Vlies und PA-Gewebe) deutlich.

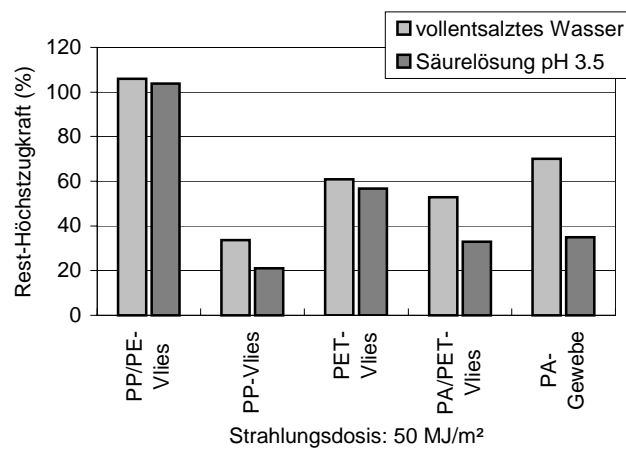


Abb. 33 Bewitterung mit saurem Regen.

Wärme beeinflusst den chemischen Abbau während der atmosphärischen Alterung von Kunststoffen. Eine Verdoppelung der Alterungsgeschwindigkeit wird in vielen Fällen schon durch eine Temperaturerhöhung um etwa 10°C bewirkt. Damit lässt sich erklären, warum die Festigkeiten der in Berlin exponierten Proben nach 28 und 44 MJ/m² im Vergleich wenig abnahmen (Abb. 31), denn diese Bewitterungsversuche wurden in der kälteren Jahreszeit bei relativ niedrigen Temperaturen durchgeführt.

2.5 Felduntersuchungen zur Beschädigung von Geokunststoffen beim Einbau

Die Problematik der Einbaubeanspruchung (Abschnitt 2.3.2.4) wurde im vorliegenden Forschungsprojekt - insbesondere in den Feld- und Laborversuchen - spezielle Aufmerksamkeit geschenkt. Zur Beurteilung der Anfälligkeit von Geokunststoffen gegen Beschädigung beim Einbau wurden in den letzten Jahren zahlreiche Felduntersuchungen angestellt, welche im folgenden auszugsweise wiedergegeben sind.

Bush (1988)

Parameter:

- Geokunststoff: Geogitter vergleichbar Muster Nr. 16 (nominelle Zugfestigkeit längs 80 kN/m)
- Schüttmaterial: Kalkstein
 - feinkörniger Boden < 10 mm
 - Boden mittlerer Körnung < 75 mm
- Verdichtung: Walzenzug 3300 kg/m, 4 Überfahrten
- Schichtstärke: 1 x 20 cm sowie 2 x 20 cm (Zweifachschicht)
- direkte Beschüttung (schlechte Baupraxis, aber realitätsnah)
- Zugversuch: Dehnungsrate 2 % pro min

Ergebnisse (Restfestigkeiten) siehe Tab. 22

Schichtstärke	Boden < 10 mm	Boden < 75 mm
1 x 20 cm	96	83
2 x 20 cm	92	88

Tab. 22 Restfestigkeiten in % als Funktion von Schichtstärke und Bodenart.

Koerner & Koerner (1990)

75 verschiedene Geokunststoffe wurden in 48 Baustellen ein- und wieder ausgebaut (i.A. innerhalb Stunden). Für den Einbau wurden keine Vorgaben gemacht (Schichtstärken: 15 ... 30 cm). Die Ergebnisse sind in Tab. 23 zu finden, wobei eine Einteilung in verschiedene Einbaubedingungen vorgenommen wurde.

Einbaubedingungen	Bändchen- gewebe	Monofil- gewebe	thermisch verfestigtes Vlies	mechanisch verfestigtes Vlies	uniaxiales Gitter	biaxiales Gitter
glattes Planum und geringe Verdichtung	75 ... 92	75 ... 98	81 ... 89	72 ... 95	100	-
Planum ohne grosse Steine, mittlere Verdichtung	51 ... 93	82 ... 93	-	77 ... 96	93 ... 98	71 ... 84
unbearbeitetes Planum oder starke Verdichtung	13 ... 66	84	48	35 ... 95	-	80
unbearbeitetes Planum und starke Verdichtung	30 ... 59	49	37 ... 66	31 ... 71	68 ... 71	80

Tab. 23 Restfestigkeiten in % als Funktion von Einbaubeanspruchung und Geokunststoff-Typ.

Watts & Brady (1990)

Parameter:

- Schüttmaterial: Kalkstein gebrochen (< 40 mm)
- Verdichtung mit 8.5 t Tandem Vibro Walze (Verdichtung beim optimalen Wassergehalt von 4 %):
 - Standardverdichtung: 4 Übergänge (strenge aber nicht unrealistische Simulation: Grossbaustelle)
 - Überverdichtung: 10 Übergänge
- Schichtstärke: 17.5 cm
- Versuchsablauf:
 - 2 x 2 m Stahlplatte, 6 mm dick, auf Betonboden
 - verdichtete Bodenschicht über und um Platte
 - Geokunststoff auflegen, beschütten und Material verdichten
 - Platte 0.5 m anheben (Geokunststoff einseitig an Platte fixiert)
 - Platte horizontal wegziehen, damit Beschüttung abfällt
- Zugversuch:
 - 1 m breite Proben (defekte Stellen besser integriert)
 - Einspannlänge 1.5 m
 - Abzugsrate 2.5 % pro h (Auswirkung von Beschädigungen besser erkennbar)
 - Rollenklammern für Gewebe

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 24

- kaum Unterschiede zwischen Ausbau maschinell und von Hand

Geokunststoff (Längs-Zugfestigkeit)	Standardverdichtung Ausbau maschinell	Standardverdichtung Ausbau von Hand	Überverdichtung Ausbau maschinell
PP-Gewebe (190 kN/m)	93 %	96 %	64 %
PP-Gewebe (46 kN/m)	96 %	85 %	46 %
PET/PA-Gewebe (PET: 188 kN/m)	67 %	63 %	35 %
HDPE-Gitter (54 kN/m)	92 %	92 %	87 %

Tab. 24 Restfestigkeiten in % als Funktion von Geokunststoff-Typ, Verdichtung und Ausbau.

Troost & Ploeg (1990)

Parameter:

- Geokunststoffe:
 - Gewebe mit PET-Kette und PA-Schuss (vergleichbar Muster Nr. 24), Zugfestigkeit längs 150 ... 600 kN/m, quer 45 ... 50 kN/m
 - PVC-beschichtete PET-Gitter (vergleichbar Muster Nr. 22, Gitterabstand 20 mm), Zugfestigkeit längs 20 ... 110 kN/m, quer 13 ... 30 kN/m
 - HDPE-Gitter
- Schüttmaterial:
 - gut abgestufter Sand < 2 mm
 - sandigem Kies < 100 mm, $D_{50} = 0.3$ mm, halbkantiges Korn
 - gut abgestufter Basalt < 200 mm, $D_{50} = 30$ mm, sehr hart und kantig mit messerscharfen Kanten
- Verdichtung
 - Sand: oben und unten 6 Übergänge mit einer schweren Vibrationsplatte (Handgerät), 95 % Proctor
 - Kies, Basalt: 8 Übergänge mit Bomag Tandemwalze 2250 kg/m
- Schichtstärke
 - Sand: unten und oben 20 cm
 - Kies, Basalt: 15 ... 20 cm Schüttung auf gleichmässig verdichtetem Planum

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 25.
- Bei sehr hohen Festigkeitsabnahmen verkleinerten gerissene oder angerissene Garne den E-Modul.

Restfestigkeit (%)	Sand	Kies	Basalt
PET/PA-Gewebe 150/45 kN/m	85	75	46
PET/PA-Gewebe 200/45 kN/m	86	-	-
PET/PA-Gewebe 400/50 kN/m	92	88	65
PET/PA-Gewebe 600/50 kN/m	93	91	75
PET-Gitter 20/13 kN/m	92	-	-
PET-Gitter 35/20 kN/m	92	87	85
PET-Gitter 55/30 kN/m	98	97	82
PET-Gitter 80/30 kN/m	100	98	97
PET-Gitter 110/30 kN/m	100	-	-
HDPE-Gitter	-	97	82

Tab. 25 Restfestigkeiten in % als Funktion von Geokunststoff-Typ und Bodenmaterial.

Leqlercq et al. (1990)

Parameter:

- 13 verschiedene Geokunststoffe
- Schüttmaterial: Kies < 60 mm
- Verdichtung: Walzenzug 300 N/cm, 5 Übergänge
- Schichtstärke: oben und unten 0.3 m
- Planum: $E_v = 50$ MPa

Ergebnisse siehe Tab. 26.

Geokunststoff	Restfestigkeit
mech. verfestigte PET-Vliese (190 ... 550 g/m ²)	77 ... 92
therm. verfestigte PET-Vliese (95 ... 275 g/m ²)	88 ... 95
durch PET-Gitter verstärktes mech. verf. PET-Vlies	80
PET-Multifilgewebe	65 ... 70
PP-Bändchengewebe	85 ... 91
PP-Monofilgewebe	78

Tab. 26 Restfestigkeiten in % als Funktion des Geokunststoff-Typs.

Bräu et al. (1992)

Parameter:

- Schüttmaterial: rundkörniger Kies < 76 mm
- Verdichtung: 10 t Vibrationswalzenzug, 2 Übergänge mit grosser Amplitude (entspricht in Deutschland dem Standardfall für den Einbau in Steilböschungen)
- Schichtstärke: 25 cm
- Planum: stark verdichteter Kies < 76 mm
- Festigkeitsprüfungen:
 - PET-Gewebe: Streifenzugversuch
 - Vliesstoffe, PP-Bändchengewebe: Stempeldurchdruckversuch

Ergebnisse:

- Die freigelegten Proben zeigten teilweise deutliche Beschädigungen und Festigkeitsverluste (Restfestigkeiten siehe Tab. 27).
- Tendenziell erhöhten sich die Restfestigkeiten mit zunehmender Ausgangsfestigkeit der Produkte.
- Die Produkte mit hoher Dehnung (Vliesstoffe) wiesen nach dem Einbau eine höhere Restfestigkeit auf als solche mit geringerer Dehnung (Bändchengewebe). Die Bändchengewebe erreichten erst bei deutlich höheren Festigkeiten ähnlich geringe Beschädigungen wie bei den Vliesstoffen.

Geokunststoff	Restfestigkeiten [%]
Vliesstoffe	60 ... 100
PP-Bändchengewebe	40 ... 60
PET-Gewebe (Zugfestigkeit längs 200 kN/m)	80
PET-Gewebe (Zugfestigkeit längs 100 kN/m)	50

Tab. 27 Restfestigkeiten in % als Funktion des Geokunststoff-Typs.

Bei einer Versuchsstrecke mit Ton (stark sandig, weiche Konsistenz) und einer 30 cm Tragschicht (Dolomitschotter 0 - 56 mm) wurden nach 6 Übergängen mit einem 10 t Vibrations-Walzenzug (grosse Amplitude) Rest-Stempeldurchdruckwerte zw. 80 % und 100 % ermittelt.

Rainey & Barksdale (1993)

Parameter:

- 11 verschiedene Geogitter
- Schüttmaterial:
 - Schotter < 50 mm (GP)
 - Sand, gebrochen (SP, Tendenz zu SW)
 - lehmiger Sand (SC)
- Schichtstärke: 15 und 25 cm
- Verdichtung: 4 Übergänge (nach dem letzten Übergang trat kein Heben/Senken mehr auf: somit konnte die Verdichtung als genügend angenommen werden)
- Verdichtungsgeräte:
 - Schotter & Sand 15 cm: Wacker W55 Walzenzug
 - Schotter & Sand 25 cm: grosse Bomag BW212D Walze
 - siltiger Sand 15 cm: Thomas SDT30 Schaffuss-Doppel-Walzenzug
 - siltiger Sand 25 cm: grosse Bomag BW212D Schaffuss-Walze

- Untergrund: 10 cm Schicht (verdichtet) des entsprechenden Bodenmaterials auf verfestigtem Planum (95 % Standard-Proctor-Verdichtung angestrebt)
- Die Kies- und Sand-Beschüttung wurde mit Wasser abgespritzt, der siltige Sand wurde mit der Schaufel (von Hand) entfernt.

Restfestigkeit (%)	Sand	Schotter	siltiger Sand
	<i>Schichtdicke 15 cm</i>		
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	89...100	88...95	95...100
biaxial gestreckte PP-Gitter	100	92...100	98...100
PVC-beschichtete PET-Gitter	77...93	65...79	88...100
Acrylatbeschichtete PET-Gitter	73...78	67...68	89
	<i>Schichtdicke 25 cm</i>		
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	89...100	70...89	93...97
biaxial gestreckte PP-Gitter	100	67...88	90...100
PVC-beschichtete PET-Gitter	82...86	54...61	88...98
Acrylatbeschichtete PET-Gitter	75...87	50...53	87...95

Tab. 28 Restfestigkeit in % als Funktion von Bodenmaterial und Schichtdicke (Beschüttung).

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 28.
- Die Schadensanfälligkeit (Festigkeitsabnahme) ist primär abhängig von der Korngrößenverteilung der Beschüttung sowie - bei kiesigen Böden - von der Schichtdicke und der Verdichtungsenergie (bei Sand & Silt hatte die Verdichtungsenergie keinen grossen Einfluss).
- Die Beschichtungen der PET-Gitter waren an einigen Stellen aufgebrochen (die entsprechende Beschädigungsanfälligkeit nahm mit der Korngrösse zu).

Sandri et al. (1993)

Parameter:

- 4 Gittergewebe aus hochfesten, acrylatbeschichteten PET-Multifilamenten
- Schüttmaterial: kantiges Korn < 75 mm, $D_{50} = 3$ mm
- Verdichtung:
 - Caterpillar D-8 Schaffuss-Walze
 - statische 10 t Glattwalze Ingersol Rand SP 45
- Schichtstärke: 23 cm (95 % modifizierte Proctor-Verdichtung angestrebt)

Ergebnisse:

- Visuelle Beurteilung zeigte kaum Defekte.
- Restfestigkeiten siehe Tab. 29.

PET-Gittergewebe (beschichtet)	Restfestigkeit (%)
Zugfestigkeit längs 29 kN/m, quer 23 kN/m	85
Zugfestigkeit längs 53 kN/m, quer 41 kN/m	85 ... 92
Zugfestigkeit längs 93 kN/m, quer 41 kN/m	88 ... 95
Zugfestigkeit längs 124 kN/m, quer 41 kN/m	87 ... 88

Tab. 29 Restfestigkeit in % als Funktion der Zugfestigkeit des Geogitters.

Watts & Brady (1994)

Parameter:

- Schüttmaterial: gut abgetufter gebrochener (crushed) Kalkstein < 38 mm, $D(50) = 15$ mm, 175 mm Schütthöhe (verdichtet)
- Verdichtung: Bomag 160 AD Tandem-Vibro-Walze (2510 kg/m pro Walze); 2 bzw. 5 Übergänge (d.h. 4 bzw. 10 pro Walze), ersteres in Übereinstimmung mit den Spezifikationen für bewehrte Erde
- Schichtstärke: 17.5 cm (verdichtet)

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 30
- die Beschädigungsrate nimmt mit der Verdichtungsenergie zu
- PP-Fasern scheinen weniger anfällig auf Beschädigung zu sein als PET-Fasern

Geokunststoff (<i>Längs-Zugfestigkeit</i>)	4 Übergänge	10 Übergänge
PP-Gewebe (200 kN/m)	100	86
PP-Gewebe (45 kN/m)	68	65
Gewebe mit PET-Kette (200 kN/m)	46	31
90 cm PET-Gewebeband (50 kN Höchstzugkraft)	100	98
HDPE-Gitter vergleichbar Muster Nr. 16 (80 kN/m)	81	76
HDPE-Gitter vergleichbar Muster Nr. 29 (80 kN/m)	100	98
PET-Gitter vergleichbar Muster Nr. 22 (55 kN/m, Gitterabstand 20 mm)	58	67

Tab. 30 Restfestigkeit in % als Funktion von Geokunststofftyp und Anzahl Walzenübergänge.

Allen & Bathurst (1996)

Aus verschiedenen Feldeinbauversuchen (u.a. Tab. 31) liess sich folgendes ableiten:

- Einbauschäden beeinflussen den Zugdehnungsanstieg (E-Modul) von Geweben und Gittern aus PET, HDPE und PP kaum, solange das Schadensniveau klein bleibt (d.h. Restfestigkeit > 70 %).
- Bei Vliesen haben Einbaubeschädigungen einen signifikanten Einfluss auf den E-Modul.

PP-Gewebe	PET-Gewebe	Quelle
93 ... 100	62 ... 88	Corbet 1994 (unveröffentl.)
60 ... 90	60 ... 72	Allen 1989 (unveröffentl.)

Tab. 31 Restfestigkeiten in % nach Feldeinbauversuchen.

Bräu (1996)

Parameter:

- ca. 30 verschiedene Geokunststoffe: mechanisch und thermisch verfestigte Vliese, Bändchen- und Spleissgarngewebe, Verbundstoffe) und versch. Tragschichtmaterialien (50 cm Tragschichtdicke)
- Versuchsablauf:
 - Einbau als Trennlage zwischen weichem Untergrund und Tragschicht
 - Proben 5 × 2 m, Produktionsrichtung (5 m) senkrecht zur Fahrtrichtung
 - Tragschicht mit Raupe vorsichtig verteilt, kein direktes Beschütten
 - Verdichtung und Befahrung
 - sorgfältiger Ausbau, z.T. von Hand (keine Beschädigung durch Ausbau)
- Untergrund: Ton (Lösslehm), schluffig, fein- bis mittelsandig, TL bis TM, Konsistenz weich, Tragfähigkeit gering, Rammsondierung (DIN 4094, DPL-5): 2 - 5 Schläge (nicht für Stützkonstruktionen geeignet)
- Schüttmaterial:
 - stark sandiger Kies < 58 mm, Rundkorn, Feinkornanteil < 2 %
 - Schotter < 56 mm, gebrochener Granit, scharfkantig, abriebfest
 - unsortierte Felsschüttung < 300 mm, heterogen, schlecht abgestuft, scharfkantiger, gebrochener Granit
- Schichtstärke: 50 - 55 cm (unverdichtet)
- Verdichtung: mit Walzenzug Bomag BW 217 D2: 1 Übergang (hin & her) statisch, 2 mit kleiner, 1 mit grosser Amplitude
- Befahrung: beladener LKW, jeweils 6 Überfahrten, nur 1 Radspur über Probenfläche (Viertelspunkt)
- Die drei Hauptbeanspruchungen Beschütten, Verdichten und Befahren wurden in separaten Versuchfeldern untersucht.

Ergebnisse:

- siehe Tab. 32
- Restfestigkeit bei Schotter und Felsschüttung i.A. deutlich niedriger als bei Kies/Sand

Tragschichtmaterial	visuelle Beurteilung	Restfestigkeit [%]	Beobachtungen
sandiger Kies	fast keine Beschädigungen	60 - 105	
Schotter	beschädigte Fläche: < 10% (Verdichtung) < 70% (Befahrung)	60 - 90 (Verdichtung) 0 - 80 (Befahrung)	deutlicher Unterschied ohne und mit Befahrung; z.T. grosse Spurrinnen gingen mit Verformungen und deutlichen Beschädigungen einher
Felsschüttung	beschädigte Fläche: < 30% (Verdichtung) < 50% (Befahrung)	40 - 80 (Verdichtung) 20 - 90 (Befahrung)	Beschädigung ohne und mit Befahrung sehr ähnlich; Produkte mit Stempeldurchdruckkraft > 4 kN zeigten gute Beständigkeit

Tab. 32 Visuelle und mechanische Beurteilung von Einbauschädigungen.

Khay (1998)

Parameter:

- Schüttmaterial: alluvialer Sandkies < 100 mm
- Verdichtung: Tandemwalze mit 2750 kg/m
- Schichtstärke: 25 cm (verdichtet)

Ergebnisse siehe Tab. 33.

Geokunststoff	Restfestigkeit [%]
vernadeltes PET-Vlies 190 g/m ²	77
vernadeltes PET-Vlies 550 g/m ²	92
therm. verfestigtes PET-Vlies 95 g/m ²	95
therm. verfestigtes PET-Vlies 185 g/m ²	92
therm. verfestigtes PET-Vlies 275 g/m ²	88
PET Gewebe-Vlies-Komposit 325 g/m ²	80
PET-Gewebe 350 g/m ²	70
PET-Gewebe 290 g/m ²	65
PE-Gewebe 280 g/m ²	78
PP-Gewebe 120 g/m ²	87
PP-Gewebe 195 g/m ²	88
PP-Gewebe 225 g/m ²	85
PP-Bändchengewebe 500 g/m ²	91
extrudiertes HDPE-Gitter 290 g/m ²	100

Tab. 33 Restfestigkeit in % als Funktion des Geokunststofftyps.

Richardson (1998)

Parameter:

- Schüttmaterial: kantiger Granit ohne Feinanteile
- Verdichtung: min. 20 Übergänge mit Caterpillar D7 Planierdraupe, anschl. 100 Übergänge mit beladenem Lastwagen (Simulation des Baustellenverkehrs: Befahrung in Bauphase)
- Schichtstärke: 10 ... 56 cm

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 34.
- Die Festigkeitsabnahme reduziert sich mit zunehmender Schichtdicke; sie ist aber kaum abhängig von der Korngrösse.
- Die Richtlinie AASHTO M288-96 (1996) definiert - basierend auf Standardprüfungen - drei Robustheitsklassen; diese sind aber für bewehrte Konstruktionen (Einbau in feste, körnige Böden) nicht zutreffend.
- Für Beschüttungshöhen > 10 cm (Kies) sind die Abminderungsfaktoren nach FHWA (2000) zutreffend.
- Bei nur 10 cm Überdeckung waren fast bei allen Produkten deutliche Schäden sichtbar; daher wird eine minimale Beschüttungshöhe von 25 cm empfohlen.
- Drehen der Einbau-/Verdichtungsgeräte über dem Geokunststoff sollte vermieden werden.
- Die Korngrösse sollte 25 % der Schichtstärke nicht überschreiten.

- Die nachträgliche Befahrung hatte einen minimalen Zusatzeffekt.

Schichtstärke	10 cm	25 cm	36 cm	56 cm
Kantiger Granit < 19 mm, ohne Feinanteile				
PP-Bändchengewebe	36	46	71	-
mech. verf. PP-Vliese	46 ... 72	64 ... 88	75 ... 100	80 ... 100
PET-Gewebe	46 ... 54	42 ... 70	62 ... 82	81
extrudiertes HDPE-Gitter	-	98	94	94
PET-Gitter	71 ... 84	71 ... 80	93 ... 94	88 ... 93
Kantiger Granit < 38 mm, ohne Feinanteile				
mech. verf. PP-Vliese	39 ... 75	67 ... 75	80 ... 100	89 ... 100
PET-Gewebe	47 ... 54	54 ... 59	58 ... 74	79
extrudiertes HDPE-Gitter	-	98 ... 100	97 ... 100	97 ... 100
PET-Gewirk	54	58	65	-
PET-Gitter	43 ... 45	62 ... 86	78 ... 85	82 ... 88

Tab. 34 Restfestigkeit in % als Funktion von Schüttmaterial und Schichtstärke.

Sprague et al. (1999)

- Geokunststoffe:
 - 1 Acryl-beschichtetes PET-Gitter
 - 3 PVC-beschichtete PET-Gitter
 - 1 PET-Gewebe
- Schüttmaterialien:
 - Sand < 5 mm
 - Kiessand < 30 mm
 - Schotter < 40 mm
- Verdichtung: senkrecht zur Produktionsrichtung (Verdichtung üblicherweise parallel zur Front der Stützkonstruktion), mit 0.8 m breiter Walze (Belastung statisch 11.6 kN, dynamisch 32.6 kN)
- Versuchsablauf: Auf Stahlplatten 1.1 x 1.3 m wurden 20 cm Bodenmaterial aufgebracht und verdichtet, anschl. der Geokunststoff aufgelegt und beschüttet. Die Beschüttung wurde auf eine Dicke von 15 ... 20 cm verdichtet (90 ... 100 % mod. Proctor). Anschliessend wurde die Stahlplatte geneigt (ca. 45 °) und abgeklopft. Die in die Geokunststoffstruktur eingedrungenen Bodenpartikel wurden nicht ausgewaschen.
- Zugversuch: Prüfung in Produktionsrichtung

Ergebnisse:

- Restzugfestigkeiten siehe Tab. 35.
- Es wurde keine Korrelation zwischen Beschädigungsanfälligkeit und Flächengewicht gefunden.
- Die Beschichtung spielt eine sehr wichtige Rolle für die Widerstandsfähigkeit gegen Einbaubeanspruchung.
- Die ermittelten Abminderungsfaktoren passen sehr gut mit den in FHWA (2000) vorgeschlagenen Faktoren überein.

Geokunststoff	Sand < 5 mm	Kiessand < 30 mm	Schotter < 40 mm
Acryl-beschichtetes PET-Gitter	82 ... 99	77 ... 90	83 ... 97
PVC-beschichtete PET-Gitter	87 ... 96	78 ... 97	85 ... 100
PET-Gewebe	66 ... 77	72 ... 76	74 ... 76

Tab. 35 Restzugfestigkeit in % als Funktion von Schüttmaterial und Geokunststofftyp.

Paulson (1999)

Parameter:

- Geokunststoff: beschichtetes Glas-Gittergewebe
- Schüttmaterial: relativ scharfkantig, < 45 mm, mittl. Korngrösse 9 mm
- Versuchsablauf: nach Watts & Brady (1990)

Ergebnisse:

- Restfestigkeit: durchschnittlich 82 %
- Restdehnung: durchschnittlich 87 %
- Glasfasern reagieren i.A. empfindlich auf Biegebeanspruchungen. Durch eine Beschichtung kann die Widerstandsfähigkeit gegenüber einer zyklischen Biegebeanspruchung deutlich erhöht werden.

Cancelli & Montanelli (2000)

Parameter:

- Geogitter:
 - 9 uniaxial und 8 biaxial extrudierte Gitter (während Extrusion gestanzt: Molekülketten verlaufen durchgehend in ausgezeichneten Richtungen)
 - 5 uniaxial und 4 biaxial gestanzte Gitter (aus extrudierter Bahn gestanzt)
 - 7 gewobene PET- und PP-Gitter
- Versuchsablauf nach Watts & Brady (1990):
 - 2 m × 2 m, 6 mm dicke Stahlplatte auf Betonboden
 - Beschüttung mit Untergrundboden, Verdichtung, Geokunststoffauflage
 - Aufbringen & Verdichten der Oberschicht, anschl. Kippen der Platte

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 36.
- Gewobene Geogitter reagieren am empfindlichsten (Grund: stark orientierte Filamentstruktur; dünne Filamente zwischen scharfkantigen Steinen).
- Bei den gestanzten Geogittern führt die nicht optimale Anordnung der Molekülketten zu inneren Spannungen und zur Brüchigkeit der Knoten und Zugelemente; die brüchige Struktur äussert sich in Aufspalten und Zersplittern.

Gittertyp	Restfestigkeiten [%]	Abminderungsfaktor (Vorschlag)
extrudiert	> 95	1.05 für die meisten Einbausituationen
gestanzt	75 ... 95	1.30 ... 2.00 für PET-Gewebe (Kies)
gewoben	50 ... 90	1.10 ... 1.15 für biaxiale Gitter (Kies) 1.30 ... 1.50 für uniaxiale Gitter (Kies)

Tab. 36 Restfestigkeiten und Abminderungsfaktoren als Funktion des Geogittertyps.

Hsieh et al. (2000)

Parameter:

- Geokunststoffe: einaxiale, PVC-beschichtete, flexible PET-Geogitter (Zugfestigkeiten 60 und 150 kN/m)
- Schüttmaterial: CL, SP, GP-GM, GC, GW
- Verdichtung: dynamisch mit Walzenzug
- Schichtstärke: 15 bzw. 30 cm (nach Beschüttung)

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 37
- Restfestigkeiten der Verbindungen: 71 ... 100 %

Schüttmaterial	Restfestigkeiten [%]
feinkörniger Boden	83 ... 99
sandiger Boden	85 ... 96
Kies mit Feinanteilen	66 ... 95
gebrochener Kies	57 ... 88
Abminderungsfaktoren (Vorschlag)	
CL	1.01 ... 1.20
SP	1.04 ... 1.18
GW	1.14 ... 1.74
GC	1.05 ... 1.19
GM	1.13 ... 1.52

Tab. 37 Restfestigkeiten und Abminderungsfaktoren für ein beschichtetes PET-Geogitter.

FHWA (2000)

Parameter:

- Geokunststoff: HDPE-Gitter
- Verdichtung: 4 bis über 8 Übergänge mit einer schweren Vibrationswalze
- Schichtdicke: 150 ... 230 mm

Ergebnisse:

- Die Festigkeitsabnahme nahm mit zunehmender Korngrösse logarithmisch zu.
- Weder die variierende Schichtdicke noch Verdichtungsenergie hatten einen grossen Einfluss auf die Restfestigkeit. D.h. bei einer Schichtdicke > 150 mm ist primär die Charakteristik des Schüttmaterials für eine Festigkeitsabnahme verantwortlich.

Diederich (2001)

Parameter:

- Geokunststoffe: 14 Geotextilien für Trennaufgaben
- Schüttmaterial: Hochofenschlacke (40 ... 60 mm)
- Verdichtung: 4 Überfahrten mit 7 t Tandem-Vibro-Walze
- Schichtstärke: 25 cm
- Untergrund: 25 cm verdichtetes weiches Planum auf Stahlplatten

Ergebnisse:

- Restfestigkeiten siehe Tab. 38.
- Zwischen Arbeitsvermögen und Einbauwiderstand wurde eine gute Korrelation gefunden, unabhängig von Herstellungsverfahren und Struktur des Geotextils.
- Zwischen Kegelfallversuch und Einbaubeschädigung wurde keine Korrelation gefunden. Dies kann auf die geringe Fallhöhe beim Beschütten zurückzuführen sein.
- Minimalanforderungen an die flächenbezogene Masse lassen sich technisch nicht begründen. Eventuelle Korrelationen zwischen Flächenmasse und Widerstandsfähigkeit gegenüber Einbaubeanspruchung sind auf die ähnlichen Herstellungsverfahren der jeweils verglichenen Produkte zurückzuführen.

Trenn-Geotextil	Höchstzugkraft-Dehnung [%]	Flächengewicht [g/m ²]	Restfestigkeit [%]
mech. verf. PP-Vliese	> 75	110 ... 160	79 ... 82
therm. verf. PP/PE-Vliese	< 25	110 ... 130	49
therm. verf. PP-Vliese	> 40	90 ... 170	67 ... 83
PP-Bändchengewebe	11 ... 37	90 ... 180	62 ... 97

Tab. 38 Restfestigkeiten als Funktion des Geotextiltyps.

2.6 Interaktionsverhalten Boden - Geokunststoff

Die Bemessung von Geokunststoff-bewehrten Erdkonstruktionen beinhaltet die Untersuchung von diversen verschiedenen Bruchmechanismen und die Evaluation des massgebenden Bruchmechanismus. Über Gleichgewichtsbetrachtungen werden treibende und rückhaltende Kräfte miteinander verglichen und entsprechende Sicherheiten formuliert. Die Geokunststoffe werden dabei als stabilisierend wirkende Zuelemente berücksichtigt.

Die eingesetzten Geokunststoffe müssen in der Lage sein, die rechnerisch erforderlichen Zugkräfte über die gesamte Lebensdauer des Bauwerkes aufzunehmen und in den Untergrund abzutragen. Dabei ist einerseits die Langzeitzugfestigkeit der Geokunststoffe massgebend. Andererseits muss gewährleistet werden, dass die Geokunststoffe nicht aus dem Untergrund hinter der massgebenden Gleitfläche bzw. aus dem Schüttmaterial im bewehrten Stützkörper vor der massgebenden Gleitfläche ausgezogen werden. Das Reibungsverhalten zwischen Boden und Geokunststoff ist hierfür entscheidend.

Die Kraftübertragung Boden - Geokunststoff über das Abscheren oder Ausziehen ist eine für die Nachweise der Tragsicherheit Geokunststoff-bewehrter Konstruktionen wichtige Grösse. Nach ihr richten sich die minimal erforderlichen Einbindetiefen beidseitig massgebender Gleitflächen (Verankerungslänge). Das Interaktionsverhalten Boden-Geokunststoff mittels Reibung und/oder Verzahnung muss bekannt sein.

Weil die Oberflächenstruktur der Geokunststoffe durch die unterschiedlichen Rohstoffe und Herstellungsweisen sehr vielfältig ist, kann das Verbundverhalten von Boden und Geokunststoff - wie der Scherwiderstand von Böden - nur experimentell untersucht werden. Die am einfachsten zu untersuchende Art der Scherbeanspruchung wird durch den direkten Scherversuch oder den Herausziehversuch nachvollzogen.

Wesentlich beeinflusst werden die Reibungs- und Adhäsionswerte durch folgende Faktoren:

- Korngrößenverteilung des Kontaktbodens
- Reibung/Kohäsion des Kontaktbodens
- Öffnungs-/Maschenweiten des Geokunststoffes
- Oberflächenstruktur des Geokunststoffes
- Wasser in feinkörnigen, wenig durchlässigen Kontaktböden (Bildung von Porenwasserüberdruck auf der Kontaktfläche)

Für die charakteristische spezifische Scherkraft Geokunststoff - Boden τ_k (kN/m^2) gilt:

$$\tau_k = a_\varphi \cdot (\sigma \cdot \tan \varphi_k) + a_c \cdot c_k$$

wobei

σ = Überlagerungsdruck

a_φ = Beiwert für die Reibung

a_c = Beiwert für die Kohäsion zur Ermittlung der Adhäsion Boden - Geokunststoff

c_k = charakteristischer Wert der Kohäsion Boden

φ_k = charakteristischer Wert der Reibung

Zwischen dem einseitigen Gleiten und dem zweiseitigen Ausziehen können die Faktoren variieren. Diese werden in der Regel durch getrennte Versuche ermittelt (Abb. 35, Abb. 36). Entsprechend sind auch die Beiwerte zu unterscheiden.

Der allgemeine Ansatz lautet:

Reibung: $\tan \varphi_k$ (Geokunststoff - Boden) = $a_{\varphi G,A} \cdot \tan \varphi_k$ (Boden)

Adhäsion: c_k (Geokunststoff - Boden) = $a_{c G,A} \cdot c_k$ (Boden)

Beiwerte für die Reibung:

$a_{\varphi G}$ = Beiwert für die Reibung beim Gleiten (einseitig, Abb. 35)

$a_{\varphi A}$ = Beiwert für die Reibung beim Ausziehen (zweiseitig, Abb. 36)

Beiwerte für die Kohäsion:

$a_{c G}$ = Beiwert für die Kohäsion beim Gleiten (einseitig, Abb. 35)

$a_{c A}$ = Beiwert für die Kohäsion beim Ausziehen (zweiseitig, Abb. 36)

Der Einfluss der Kohäsion kann sehr gross sein. Die Angabe des Wertes der Kohäsion ist jedoch oft wenig zuverlässig. Es ist daher in der Praxis üblich, die Kohäsion nicht, oder nur sehr vorsichtig zu berücksichtigen. In vielen Fällen ist es besser, mit einem sogenannten Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ^* zu operieren, welcher indirekt in bindigen, kohäsiven Böden einen Kohäsionsanteil berücksichtigt (Abb. 34).

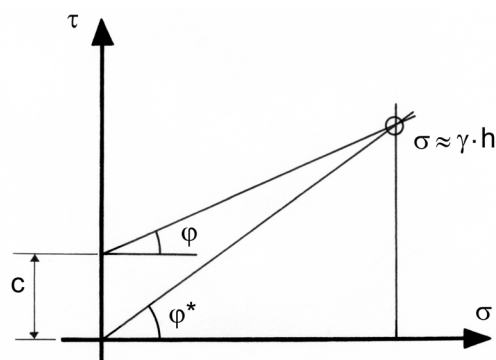


Abb. 34 Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ^* für einen kohäsiven Boden für den effektiven Spannungsbereich $\sigma = \gamma \cdot h$ mit γ = Raumgewicht, h = Überlagerung.

2.6.1 Prüfung des Scherverhaltens

Die Bestimmung der Scherparameter Geokunststoff - Boden kann prinzipiell im Rahmenschergerät durchgeführt werden, welches auch in der Bodenmechanik verwendet wird. Die Scherparameter können dabei zuerst im Boden (vorwiegend Funktion der Korngrößenverteilung, der Kornform, der Kornrauigkeit und des Wassergehaltes des Bodens) und nachträglich im System Boden - Geokunststoff bestimmt werden. Abklärungen haben ergeben, dass in der Schweiz keine genügend grossen Rahmenschergeräte im Einsatz sind, welche zur Prüfung der Reibungseigenschaften Geokunststoff - Boden geeignet wären.

prEN ISO 12957-1 (1997) beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung der Reibungskenngrößen von Geokunststoffen in Kontakt mit einem Normsand oder mit dem auf der Baustelle verwendeten Bodenmaterial. Die Prüfung erfolgt im Direktschergerät (Scherkasten) mit vertikal aufgebrachtener Normalkraft und horizontal eingeleiteter Schubkraft (Abb. 35). Der Scherweg ist bei diesem Prüfverfahren begrenzt.

Sind niedrige Normalspannungen (Auflasten kleiner 50 kPa) zu erwarten, kann der Reibungswinkel Boden-Geokunststoff alternativ auch mit dem Schiefe-Ebene-Versuch nach prEN ISO 12957-2 (1997) bestimmt werden. Gemessen wird der Winkel, bei welchem ein mit Bodenmaterial gefüllter Kasten auf einer geneigten Geokunststoffunterlage abrutscht. Es handelt sich hier um eine Gebrauchsprüfung, bei welcher die spezifischen Böden der Baustelle eingesetzt werden (z.B. bei der Gefahr des Abrutschens von Schichten im Deponiebau).

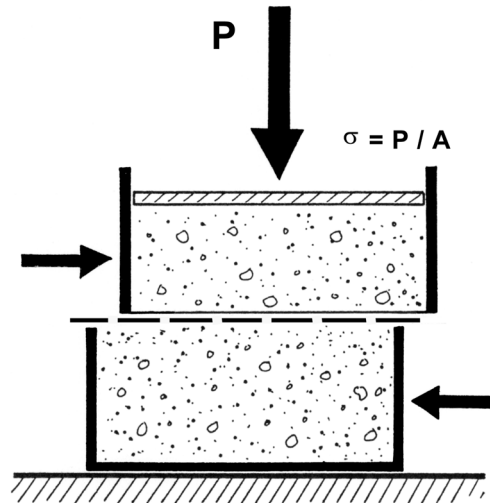


Abb. 35 Direktschergerät (Scherkasten) mit vertikal aufgebrachtener Normalkraft σ und horizontal eingeleiteter Schubkraft.

2.6.2 Prüfung des Ausziehverhaltens

Bei Verzahnungen entwickelt sich keine Reibung, da die hierzu nötige Relativbewegung des Bodens zum Geokunststoff ausbleibt. Diese Situation kann in einem Scherversuch nicht reproduziert werden und wird daher mit Ausziehversuchen simuliert, in welchen die Bewehrung aus einem Bodenkörper herausgezogen wird. Ausziehversuche dienen zur Ermittlung der minimalen Verankerungslänge und der maximalen Kräfte, die über den Boden in den Geokunststoff eingeleitet werden können.

Beim Ausziehversuch nach prEN 13738 (1999) greift an einer zwischen zwei Bodenschichten eingebetteten Messprobe in horizontaler Richtung eine Kraft an (Abb. 36). Die auf die obere Schicht aufgebraachte Normalspannung wird von Versuch zu Versuch gesteigert. Gemessen wird die Kraft, welche zum Auszug der Probe aus dem Boden erforderlich ist (Auszugswiderstand). Das Verfahren wird unter Verwendung standortspezifischer Böden durchgeführt.

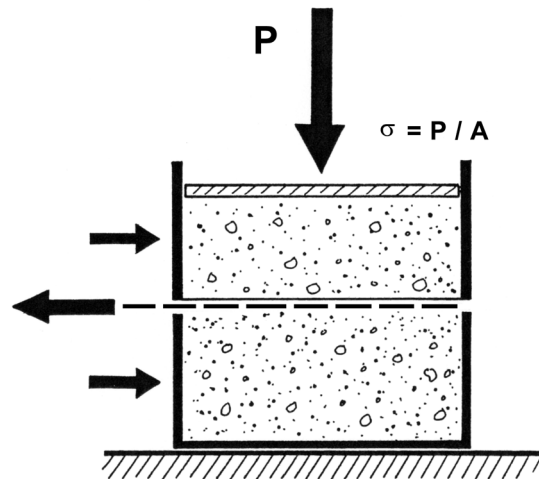


Abb. 36 Schematischer Aufbau eines kleinen Herausziehkastens mit vertikal aufgebrachtener Normalkraft.

2.6.3 Untersuchungen zum Interaktionsverhalten Geokunststoff - Boden

In der Literatur sind zahlreiche Beiträge zum Thema Direktscher- und Ausziehversuche zu finden. Im Folgenden wird ein Überblick über die verschiedenen Ergebnisse einiger aussagekräftigen Publikationen gegeben. Dabei wird versucht, die Ergebnisse in Abhängigkeit der verwendeten Bodenmaterialien, der eingesetzten Testeinrichtungen sowie der massgebenden Eigenschaften der verwendeten Geokunststoffe aufzuzeigen. Ziel ist es, mit Hilfe von bereits durchgeführten Versuchen für die unterschiedlichen, auf dem Markt vorhandenen Geokunststofftypen in Abhängigkeit der verwendeten Bodenmaterialien Beiwerte zu bestimmen, welche das Verhältnis zwischen dem Reibungswinkel des unmittelbar anstehenden Bodens und dem Reibungswinkel zwischen Boden und Geokunststoff über den Tangens beschreiben.

Koutsourais et al. (1998)

- Durchgeführte Versuche:
 - Direktschertest nach ASTM D5321 (1992)
 - Ausziehversuche
- Verwendete Bodenmaterialien für Direktschertest und Ausziehversuche:
 - Feiner Sand (SP), Reibungswinkel $\varphi = 32^\circ$, Trockenraumgewicht $\gamma_d = 17.2 \text{ kN/m}^3$, Wassergehalt $w = 17.4 \%$
 - toniger Silt mit Sand (CL), Reibungswinkel $\varphi = 38^\circ$, Trockenraumgewicht $\gamma_d = 17.5 \text{ kN/m}^3$, Wassergehalt $w = 11.5 \%$
- Verwendete Geokunststoffe:
 - PP-Geogewebe
relativ steife, rauhe Oberflächentextur, gewoben
relativ geringe Öffnungsfläche ($< 30\%$)
Flächengewicht = 420 g/m^2
Kurzzeitzugfestigkeit = 70 kN/m
 - PET- Geogewebe
flexible, glatte Oberflächentextur, gewoben
kleine Öffnungsfläche
Flächengewicht = $440 \dots 950 \text{ g/m}^2$
Kurzzeitzugfestigkeit = $105 \dots 300 \text{ kN/m}$
 - PET-Geogitter, gewoben
flexible, grosse Öffnungsfläche ($> 30 \%$)
Flächengewicht = $186 \dots 390 \text{ g/m}^2$
Kurzzeitzugfestigkeit = $39 \dots 109 \text{ kN/m}$
- Abmessungen der Proben:
 - im Direktscherversuch: Breite = 305 mm , Länge = 305 mm
 - im Auszugversuch: Breite = 457 mm , Länge = 915 mm
- Ergebnisse siehe Tab. 39
- Bemerkungen
 - Im Allgemeinen sind die Ergebnisse aus den Ausziehversuchen im tonigen Silt ähnlich mit denen aus den Direktschertests.

- Die Ausziehversuche ergeben im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Direktschertests allgemein ca. 13...17 % grössere Interaktionswerte bei geringen Normalspannungen von weniger als 20 Pa und ungefähr die gleichen bei höheren Normalspannungen (> 28 Pa).
- Die flexiblen PET-Geotextilien ergeben ungefähr 25% grössere Interaktionswerte verglichen mit steifen PP- Geogeweben.
- Die PET-Geogewebe zeigen ähnliche Interaktionswerte wie die PET-Geogitter.

Boden	Geokunststoff	Reibungswinkel δ	$\tan \delta / \tan \varphi$
Direktscherversuche			
Sand	PP-Geogewebe	30 Grad	0.9
	PET-Geogewebe	32 Grad	1.0
	PET-Geogitter, gewoben	-	-
toniger Silt (CL)	PP-Geogewebe	28 Grad	0.58 - 0.64
	PET-Geogewebe	38 - 39 Grad	0.71 - 0.93
	PET-Geogitter, gewoben	36 - 37 Grad	0.79 - 0.89
Ausziehversuche			
toniger Silt (CL)	PP-Geogewebe	-	0.66 - 0.71
	PET-Geogewebe	-	0.82 - 0.91
	PET-Geogitter, gewoben	-	0.83 - 0.89

Tab. 39 Ergebnisse Direktscher- und Ausziehversuche nach Koutsourais et al. (1998).

Sprague (1998)

- Durchgeführte Versuche:
 - Direktscherversuche (Ergebnisse früherer Studien)
 - Ausziehversuche (Ergebnisse früherer Studien)
- Verwendete Bodenmaterialien für Direktscherversuche und Ausziehversuche:
 - Sand
 - Ton
- Verwendete Geokunststoffe:
 - PP-Geogewebe
 - PET-Geogewebe
 - PET-Geogitter, gewoben
 - PE-Geogitter, extrudiert
- Ergebnisse siehe Tab. 40

Boden	Geokunststoff	Normalspannung	$\tan \delta / \tan \varphi$
Direktscherversuche			
Sand	PP-Geogewebe	24 - 48 kN/m ³	0.85 - 0.90
	PET-Geogewebe		0.90 - 0.95
	PET-Geogitter, gewoben		0.90 - 0.95
	PE-Geogitter, extrudiert		> 0.90
Ton	PP-Geogewebe		0.60
	PET-Geogewebe		0.75 - 0.90
	PET-Geogitter, gewoben		0.80 - 0.90
	PE-Geogitter, extrudiert		> 0.70
Ausziehversuche			
Sand	PP-Geogewebe	24 - 48 kN/m ³	0.90
	PET-Geogewebe		0.95 - 1.00
	PET-Geogitter, gewoben		0.90 - 1.00
	PE-Geogitter, extrudiert		> 0.90
Ton	PP-Geogewebe		0.60 - 0.70
	PET-Geogewebe		0.70 - 0.90
	PET-Geogitter, gewoben		-
	PE-Geogitter, extrudiert		> 0.70

Tab. 40 Ergebnisse Direktscher- und Ausziehversuche nach Sprague (1998).

Athanasopoulos (1996)

- Definitionen:
 - δ [Grad] = Reibungswinkel Geokunststoff - Boden
 - ϕ' [Grad] = Reibungswinkel Boden
 - c' [kN/m²] = Kohäsion Boden
 - c_α [kN/m²] = Adhäsion Boden - Geokunststoff
- Zahlreiche Triaxialversuche, Direktscherversuche und Ausziehversuche zur Untersuchung des Verhaltens von mit Geokunststoffen bewehrtem, tonigem Silt sind durchgeführt und entsprechende physikalische Modelle entwickelt worden. Dabei wurde grundsätzlich festgestellt, dass
 - das Verhältnis c_α / c' bei Ausziehversuchen eher klein ist (im Bereich von 0.20),
 - das Verhältnis c_α / c' bei Direktscherversuchen relativ hoch ist (im Bereich von 0.90),
 - bei Direktscher- und Ausziehversuchen unter Verwendung von Geovliesen das Verhältnis c_α / c' im Bereich von 0.52 - 1.65 liegt,
 - bei Direktscher- und Ausziehversuchen unter Verwendung von Geogeweben das Verhältnis c_α / c' im Bereich von 0.37 - 1.08 liegt,
 - bei Direktscher- und Ausziehversuchen unter Verwendung von Geogittern das Verhältnis c_α / c' im Bereich von 0.46 - 1.02 liegt (Fourie und Fabian, 1987).
- Die zahlreichen, durchgeführten Triaxial-, Direktscher- und Ausziehversuche zeigen deutlich auf, dass die Durchlässigkeit der Geokunststoffe in der Ebene bei Verwendung von feinkörnigem Bodenmaterial wie z.B. tonigem Silt eine entscheidende Rolle bezüglich des Interaktionsverhaltens Boden - Geokunststoff spielt.
- Weist der tonige Silt einen Wassergehalt auf, der deutlich über dem optimalen liegt (z.B. nahezu der Sättigung), und werden Geokunststoffe mit einer genügenden Durchlässigkeit in der Ebene eingesetzt (z.B. Vliese), so kann das „freie“ Wasser abgeführt und Porenwasserüberspannungen können rasch abgebaut oder nahezu ganz verhindert werden. Dadurch wird das Reibungs- sowie das Adhäsionsverhalten nicht negativ oder je nach Situation sogar positiv beeinflusst.
- Werden hingegen Geokunststoffe mit einer sehr geringen bis keiner Durchlässigkeit in der Ebene wie z.B. PP - Bändchengewebe oder extrudierte Geogitter eingesetzt, so kann das im Bereich der Bewehrung anfallende Wasser nicht genügend oder gar nicht abgeführt werden. Als Folge davon können Porenwasserüberdrücke über die Geokunststoffe nicht oder nur ungenügend abgebaut werden. Das Reibungsverhalten sowie die Adhäsion zwischen Boden und Geokunststoff werden dadurch deutlich negativ beeinflusst, d.h. es können deutlich geringere Kräfte vom Geokunststoff über Reibung und Adhäsion in den Untergrund eingeleitet werden.

Reda et al. (1998)

Eine Zusammenstellung einiger Grossversuche an bewehrten Böden kann Tab. 41 entnommen werden.

Methode	Bewehrung	ϕ	δ	$\tan \delta / \tan \phi$
Scherversuch	Geogitter	34	35 - 65	> 1.00
	Extrudiertes Geogitter	32	30	0.92
	Stahlbänder	38	28	0.68
	Stahlbänder	31	21	0.64
Ausziehversuch	Geogitter	34	40 - 71	> 1.00
	Extrudiertes Geogitter	32	18	0.52
	Stahlgitter	35	54 - 82	> 1.00

Tab. 41 Ergebnisse von Grossversuchen an bewehrten Sand-Böden (Reda et al., 1998).

Eigene Scher- und Ausziehversuche wurden mit einem eigens dafür hergestellten Bodenmaterial durchgeführt, welches aus leicht kantigen, rauen Partikeln mittlerer Härte besteht. Das Material basiert auf Ton und Schiefer, welches in einem rotierenden Brennofen bei einer Umgebungstemperatur von ca. 1090 °C aufgearbeitet wurde. Es kann als schlecht abgestufter Kies mit Sand (GP) klassifiziert werden. Der durchschnittliche Wassergehalt betrug 7.2 %, das mittlere Feuchtraumgewicht 2.09 kN/m³ und das Trockenraumgewicht 1.52 - 1.59 kN/m³. Als Bewehrung wurde ein einaxial gerecktes PE-Geogitter verwendet.

Ergebnisse (einaxial gerecktes PE-Geogitter):

- Reibungswinkel des Bodens: $\phi = 52^\circ$
- Reibungswinkel Geogitter-Boden: $\delta = 48^\circ$
- $\tan \delta / \tan \phi = 0.87$

Tan et al. (1998)

Es wurden Ringscherversuche mit mittlerem, gut abgestuftem Sand (SW) an PP-Geovliesen (Flächengewicht 130 - 400 g/m², Zugfestigkeit 9.2 - 26.8 kN/m) durchgeführt. Der Reibungswinkel des Bodens wurde als $\varphi = 32 \dots 38^\circ$ angenommen.

Reibungswinkel Geokunststoff-Boden:

- Anfangsgleiten: $\delta = 30 - 32^\circ$ ($\tan \delta / \tan \varphi = 0.75 - 1.00$)
- Weitergleiten: $\delta = 24 - 26^\circ$ ($\tan \delta / \tan \varphi = 0.55 - 0.80$)

Farrag (1995)

Die durchgeführten Ausziehversuche an Geogittern in kohäsivem Boden haben eine Abhängigkeit zwischen Feuchtigkeitsgehalt des Bodens und der übertragbaren Kräfte vom Boden auf das Geogitter ergeben: Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt der maximale Auszieh Widerstand ab. Zudem verringert sich der Weg bis zur Mobilisation des maximal möglichen Auszieh Widerstandes.

Nataraj et al. (1995)

Es wurden Scherversuche in 6.4 cm bzw. 10.2 cm grossen Kästen bei einer Auflast von 24 - 460 kPa durchgeführt. Verwendete Bodenmaterialien:

- Sand (SP), $\varphi = 35 \dots 36^\circ$, $c = 0 \text{ kN/m}^2$
- Ton (CL), $\varphi = 35^\circ$, $c = 3.2 \text{ psi}$ (6.4 cm Kasten) bzw. $\varphi = 34^\circ$, $c = 4.0 \text{ psi}$ (10.2 cm Kasten)

Ergebnisse siehe Tab. 42. Die Reibungsparameter Geokunststoff-Boden hängen grundsätzlich von der Dichte, der Kantigkeit und der Gleichförmigkeit des Bodens ab. Die Scherversuche haben bei der Verwendung von Sand als Bodenmaterial eine tendenzielle Abhängigkeit des Reibungswinkels δ von der Dicke der getesteten Geovliese gezeigt, indem dickere Geovliese eher höhere Reibungswinkel δ aufwiesen als dünnere der gleichen Art. Der Grund könnte darin liegen, dass die dickeren Geovliese vermehrt Sandpartikel einlagern, wodurch die Geotextiloberfläche rauher und damit die Reibung zwischen Geotextil und Boden tendenziell grösser wird.

Boden	Geokunststoff	Reibungswinkel δ	$\tan \delta / \tan \varphi$	
Sand (SP)	Geovlies	29 - 35 Grad	0.79 - 0.96	
	Geogewebe	31 - 32 Grad	0.83 - 0.86	
Ton (CL)	Geovlies	24 - 32 Grad	0.64 - 0.93	
	Geogewebe	29 - 32 Grad	0.82 - 0.89	
Kohäsion (10.2 cm Kasten) *				
Boden	Geokunststoff	c	C _a	c / C _a
Ton (CL)	Geovlies	4.0 psi	1.5 - 2.4 psi	0.38 - 0.60
	Geogewebe	4.0 psi	2.4 psi	0.60
* Die im 6.4 cm Scherkasten gemessenen Werte der Kohäsionen variieren sehr stark				

Tab. 42 Ergebnisse Scherversuche nach Nataraj et al. (1995).

Bergado et al. (1995)

Es wurden Direktscherversuche in einem grossem Kasten (Länge = 1.27 m, Breite = 0.76 m, Höhe = 0.51 m) bei Auflasten von 25 - 125 kN/m² durchgeführt. Als Bodenmaterial wurde ein siltiger Sand (optimaler Wassergehalt = 9.5 %, maximales Trockenraumgewicht $\gamma_d = 18.3 \text{ kN/m}^3$) verwendet. Der effektiv vorhandene Wassergehalt betrug 13 %. Dabei wurde der Feuchtigkeitsgehalt sowie der Grad der Verdichtung mit Hilfe der Troxler Sonde und der Sandersatz-Methode bestimmt. Die Versuche (Tab. 43) haben gezeigt, dass der Reibungswinkel δ je nach verwendetem Boden und eingesetzten Geokunststoffen auch grösser als der Reibungswinkel φ des Bodens sein kann.

Geotextil	Flächengewicht	Zugfestigkeit	φ	δ	$\tan \delta / \tan \varphi$
Vliesstoff	280 g/m ²	18 kN/m	26.5 Grad	27.5 Grad	1.04
Gewebe	700 g/m ²	200 kN/m	26.5 Grad	31.5 Grad	1.23

Tab. 43 Ergebnisse Gross-Direktscherversuche nach Bergado et al. (1995).

Bräu & Bauer (2001)

Herausziehversuche sind bezüglich ihrer Aussagekraft umstritten. Zum Vergleich des Tragverhaltens verschiedener Geogitter wurden Herausziehversuche mit einem Scherkasten 50 x 50 cm (2 Bodenschichten zu je 25 cm) bei Auflasten von 10, 40 und 80 kPa durchgeführt:

- Schüttmaterial:
 - enggestufter Sand (SE) < 2 mm, trocken
 - gebrochener, scharfkantiger Granit-Schotter (enggestufter Kies, GE) < 8 mm, trocken
- Geokunststoffe:
 - extrudiertes PP-Gitter (39 mm Gitterabstand), Zugfestigkeit längs und quer 30 kN/m
 - PVC-beschichtetes, gewebtes PET-Gitter (20 mm Gitterabstand), Zugfestigkeit längs 35 kN/m, quer 30 kN/m
 - Gitter aus gelegten, verschweissten PET-Flachstäben (40 mm Gitterabstand), Zugfestigkeit längs 40 kN/m, quer 40 kN/m

Die Ergebnisse (Tab. 44) zeigen, dass die maximalen Ausziehkraften für alle Produkte annähernd gleich sind, die zum Erreichen der Maximalkraft benötigten Wege beim gelegten Gitter aber am geringsten sind.

Boden	Sand			Schotter		
<i>Auflast [kPa]</i>	10	40	80	10	40	80
Geogitter	Ausziehkraft [kN]					
<i>extrudiert</i>	7	19	29	27	31	31
<i>gewebt</i>	8	14	30	23	32	33
<i>gelegt</i>	8	14	25	23	28	26

Tab. 44 Resultate der Herausziehversuche mit Geogittern.

Aus Kies gebaute Modell-Polsterwände weisen deutlich grössere Traglasten und geringere Verformungen auf als solche aus Sand. Die Bruchlasten beim Einbau von Vliesstoffen sind in der gleichen Grössenordnung wie bei Gittern, jedoch bei grösseren Verformungen.

Stowahse & Blümel (2001)

Ringversuche mit unterschiedlich konstruierten Gross-Rahmenschergeräten zur Ermittlung der Reibung zw. Geokunststoff und nicht bindigem Boden (rundkörniger trockener Sand ohne Kohäsion und Kapillarkräfte):

- ein Teil der Versuchsstreuungen sind gerätetechnisch bedingt
- bei Geräten mit vertikal fixiertem Rahmen führen die Zwängungskräfte zu erhöhten Messwerten und damit zu fiktiven Adhäsionswerten; daraus ergeben sich zu grosse Reibungswinkel, was zur unsicheren Bemessung führen kann
- Reibungsparameter aus Versuchen mit Geräten mit feststehendem Rahmen sollten nicht für Standsicherheitsberechnungen verwendet werden bzw. mit höheren Sicherheitbeiwerten beaufschlagt werden
- wenn Sandkörner in das Geotextil eindringen (Formschluss), verlagert sich die Bruchfuge in den Sand und die Materialeigenschaften des Sandes werden massgebend
- aufgrund der Untersuchungen mit verschiedenen geführten oberen Rahmen wird die Variante mit vertikal beweglich geführtem oberem Rahmen als Standardprüfung für Reibungsversuche empfohlen.

2.7 Nachweis der Standsicherheit von Geokunststoff-bewehrten Konstruktionen

Die Wirkungsweise bewehrter Böden lässt sich am besten durch die Darstellung von zwei steilen Böschungen (Abb. 37) betrachten, bei denen die eine bewehrt ist und die andere nicht. Durch die Einlage einer Bewehrung in einen Boden wird die Dehnungsverteilung, die sich einstellen würde, wenn die Bewehrung nicht da wäre, gestört.

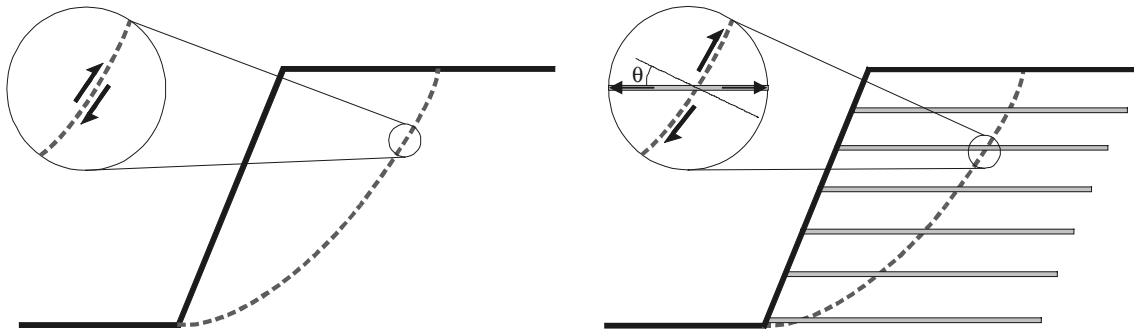


Abb. 37 Bewehrte (links) und unbewehrte (rechts) steile Böschungen (CIRIA, 1996). Die Bruchfläche ist gestrichelt dargestellt.

Die Bewehrung verhindert die Ausbildung von durchgehenden Bruchflächen im Boden mit dem Ergebnis, dass der Boden sowohl verbesserte Steifigkeit als auch verbesserte Scherfestigkeit zeigt (Abb. 38).

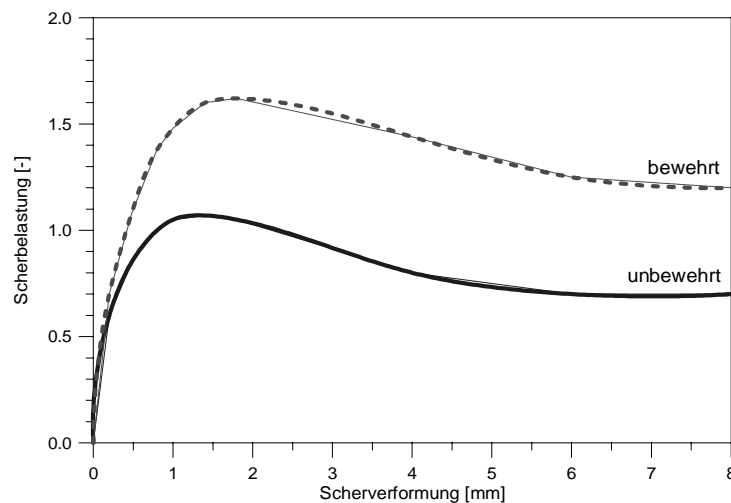


Abb. 38 Scherkraft-Scherweg-Ergebnisse aus Scherversuchen mit bewehrtem und unbewehrtem dicht gelagerten Sand (Jewell, 1980).

Die Berechnung Geokunststoff-bewehrter Konstruktionen basiert auf der Modellierung des Verhaltens der verschiedenen Bauelemente Boden und Geokunststoff einzeln und im Verbund. Die Bemessung muss alle möglichen Arten des Versagens sowie die Gebrauchstauglichkeit während der Nutzungsdauer in Betracht ziehen. Zur Bemessung von Geokunststoff-bewehrten Konstruktionen und Verstärkungen existieren die verschiedensten Ansätze, welche in entsprechenden Computerprogrammen von Instituten oder Geokunststoffherstellern verwendet werden.

Die Vergleiche der Methoden ergeben sehr unterschiedliche Resultate, insbesondere weil oft nicht alle kritischen Lastfälle (Bruchmechanismen) untersucht werden und weil die Bauteilsicherheiten unterschiedlich gehandhabt werden. Oft ist das Berechnungsverfahren kaum nachvollziehbar (Black-Box-Effekt). Es bleibt unklar, ob die kritischen Gleitflächen wirklich gefunden werden. Die Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren sind oft nicht klar ersichtlich. Auch bezüglich der Abschätzbarkeit des Deformationsverhaltens bestehen noch grosse Diskrepanzen zwischen der Theorie (Modellversuche und -berechnungen) und der Praxis.

Der Ingenieur ist verunsichert und muss vielfach auf Bemessungsmethoden von Herstellern zurückgreifen, die selten produkteneutral sind und verschiedene wichtige Aspekte unterschiedlich betrachten. Umgekehrt können Projekte, die beispielsweise als Unternehmensvarianten von Produzenten oder Systemlieferanten erarbeitet wurden, nicht nach einheitlichen Kriterien beurteilt und verglichen werden. Dies kann bei unterschiedlichen Bemessungsannahmen zu Wettbewerbsverzerrungen und unterschiedlichen Sicherheitsstandards führen. Misserfolge sind nicht ausgeschlossen und können solche Bauwerke bzw. Bauverfahren als Ganzes in Misskredit bringen.

Interessant sind die Aussagen von Professor R. Floss (TU München) in seinem Einführungsreferat "Normative Sicherheitsnachweise für geotextilbewehrte Böschungen und Stützkonstruktionen", das er an der KGEO 2001 im März 2001 in München gehalten hat, welche aufzeigen, dass gerade bezüglich der Nachweise der Deformationen und damit der Gebrauchstauglichkeit solcher Konstruktionen offene Fragen bestehen und diesbezüglich Forschungsbedarf besteht. Andere Autoren weisen auf das Problem der fehlenden Kenntnis des Einflusses von Bewehrungen auf das Verhalten von Fundamentalschichten für eine Beurteilung des möglichen Sparpotentials durch eine zulässige Verringerung der Schichtstärken hin.

In einigen Ländern bestehen heute bereits Vorschriften und Richtlinien für die Planung, Bemessung und Ausführung solcher Konstruktionen. Diese werden teilweise kurz nach dem Erscheinen wieder überarbeitet, da sie nicht in allen Punkten dem Stand der Technik und der Praxis dieser verhältnismässig neuen Baumethode entsprachen.

Auf die Berechnung von Geokunststoff-bewehrten Erdbauwerken wird im vorliegenden Projekt nicht weiter eingegangen.

2.8 Geokunststoffe mit der Aufgabe Schützen

Die Hauptaufgabe eines Schutz-Geokunststoffs ist es, eine Abdichtung (z.B. Geomembran bzw. Kunststoffdichtungsbahn) vor mechanischen Einwirkungen (Perforieren, Scheuern, Scheren oder Quetschen) durch das Einpressen von Körnern, Kanten oder Spitzen im Kontaktmaterial und vor dem Einfluss von Bewegungen des Kontaktmaterials relativ dazu zu schützen (Abb. 39). Je nach Anwendungsfall ist auch die Nebenaufgabe Drainieren nützlich, sinnvoll oder für gewisse abzudichtende Bauwerke unerlässlich. Weitere Aufgaben werden selten mit der Hauptaufgabe Schützen kombiniert. Im Deponiebau kann es jedoch vorkommen, dass der Geokunststoff mit der Schutzaufgabe eine zusätzliche Abdichtungsfunktion übernehmen soll (Bilden einer zusätzlichen Schutzbarriere).

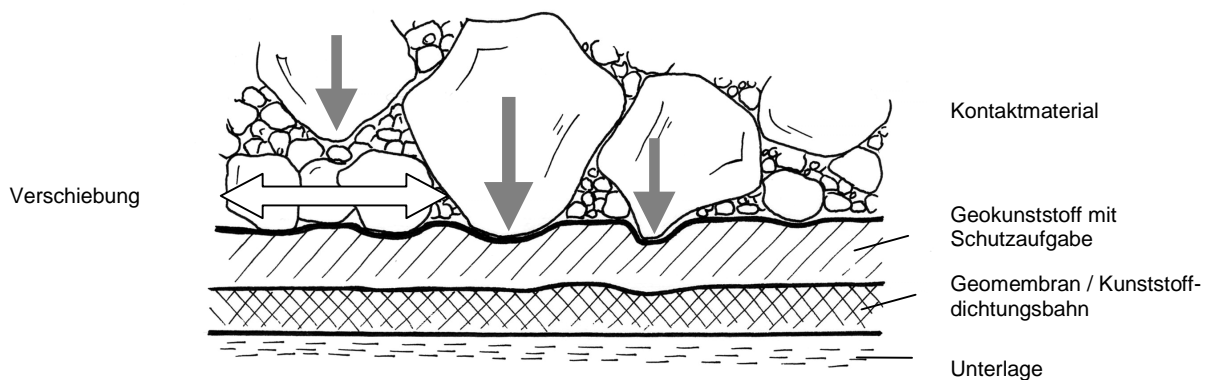


Abb. 39 Schützen

Die Grundanforderungen sind:

- *mechanisch:*
Aufnehmen und Verteilen von konzentrierten Kräften, so dass die zu schützende Unterlage resp. Abdichtung nicht derart mechanisch beschädigt wird, dass ihre Funktion (meist Abdichtung) unzulässig vermindert wird.
- *hydraulisch:*
Ausreichende Durchlässigkeit in der Ebene des Geokunststoffes, damit aus dem Kontaktboden zuströmendes Wasser mit möglichem geringem Druckverlust bei weitgehendem Verhindern des Einschwemmens von Feinmaterial abgeführt werden kann. Oft ist im Untertagebau für das Betonieren gegen die Abdichtung auch eine minimale Luftdurchlässigkeit gefordert.
- *Langzeitverhalten:*
Die oben genannten Anforderungen müssen meist über die geforderte Gebrauchsdauer des abzudichtenden, zu schützenden Bauwerkes / Bauteils erhalten bleiben. Bei Geokunststoffen mit zusätzlicher Aufgabe des Drainierens darf es durch Stauchen nicht zu einer Abminderung der Durchlässigkeit in der Ebene kommen. Die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse (Atmosphäre, Boden, Wasser) ist über die Gebrauchsdauer zu gewährleisten.

2.8.1 Massgebende Randbedingungen und Geokunststoff-Eigenschaften

Folgende Randbedingungen sind für den Einsatz von Geokunststoffen als Schutz von Abdichtungssystemen massgebend:

- Kontaktmedien:
 - Kontaktmaterial aussen (Untergrund)
 - Abdichtung (Membran, Kunststoffdichtungsbahn)
 - Kontaktmaterial innen (unter Abdichtung)
 - Auflageverhältnisse (eben, unregelmässig, glatt, rauh)
- Beanspruchungen:
 - Druck (durch Kontaktmaterial / Wasser)
 - Scheuerbewegung, wenn ja: klein / gross; einseitig / alternierend

- bei zusätzlicher Drainagefunktion:
 - Wasserdruck (maximaler, ohne Absenkung)
 - Maximal tolerierbarer Wasserdruck
 - Wassermenge
 - Gradient i
 - Wassermenge bei einem bestimmten Gradienten
- Gebrauchsdauer:
 - mechanische Schutzfunktion
 - hydraulische Drainagefunktion
- zusätzliche Anforderungen:
 - Brandverhalten
 - Kontaminierte Kontaktmedien

2.8.1.1 Geokunststoff-Eigenschaften für die Aufgabe Schützen

Geokunststoffaufgabe		Geokunststofffunktion	charakterisiert durch die Parameter
Hauptaufgabe	Schützen	Widerstand gegen Beschädigung	Stempeldurchdrückkraft Durchschlagwiderstand Pyramidendruckkraft Masse (Masse pro Fläche) Scheuerwiderstand
		allgemeine Einbaubeanspruchungen	Zugfestigkeit Dehnung unter Höchstzugkraft Produkt aus (Zugfestigkeit • Dehnung unter Höchstzugkraft)
		Reibung zur Unterlage	Reibungskoeffizient Geokunststoff - Abdichtung
		Widerstand gegen Umwelteinflüsse	Beständigkeit gegen Bewitterung, chemische und biologische Einflüsse
Nebenaufgabe	Drainieren	Gewährleisten Wasserdurchfluss in der Ebene	Transmissivität (Durchlässigkeit in der Ebene)
		Begrenzung der Feinmaterialeinspülung in den Geokunststoff	Charakteristische Öffnungsweite Durchlässigkeit senkrecht zur Ebene
		Langzeitfunktion	Stauchung in Abhängigkeit der Druckbeanspruchung und Dauer

Tab. 45 Massgebende Geokunststoffeigenschaften für die Aufgabe Schützen.

Geokunststoffe mit Schutzfunktion erfüllen im Allgemeinen eine permanente Aufgabe. Daher ist neben den mechanischen Eigenschaften auch das Zeitstandverhalten relevant und damit die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse. Die für die Aufgabe Schützen massgebenden charakteristischen Eigenschaften sind in Tab. 45 aufgeführt.

2.8.1.2 Nebenaufgabe Drainieren

Bei einer zusätzlichen Drainagefunktion ist auch die begrenzte Stauchung entscheidend, damit die Durchlässigkeit in der Ebene erhalten bleibt. Die Auflast des Bodens bewirkt ein mehr oder weniger starkes Zusammendrücken des Geokunststoffes, und als Folge nimmt seine Dicke und damit seine Wasserdurchlässigkeit in der Ebene mit der Zeit ab (Abb. 40). EN 1897 (2001) dient zur Abschätzung der Langzeitstabilität von Geokunststoffen unter Normal- und Scherbeanspruchung.

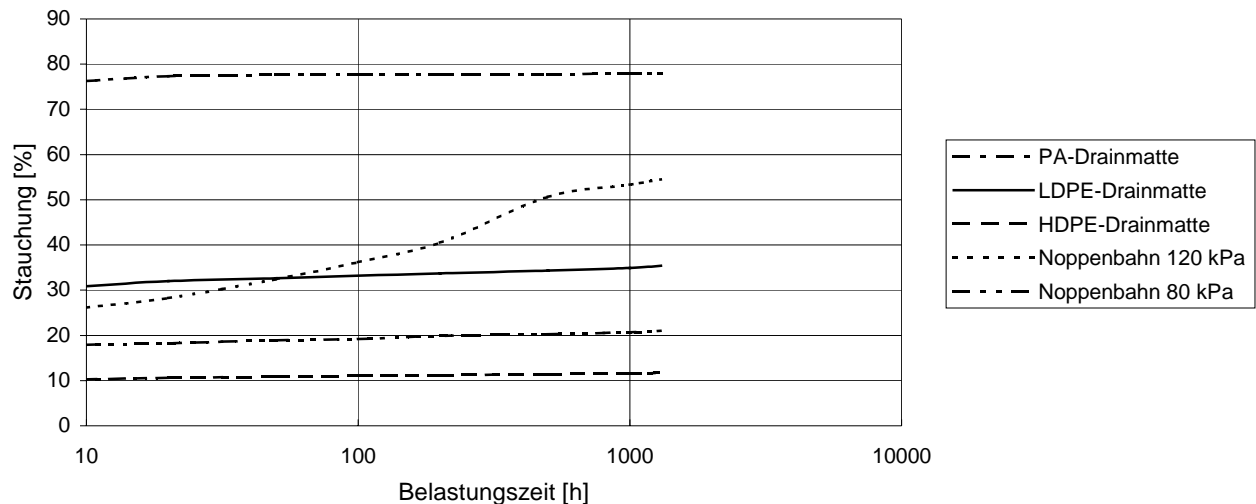


Abb. 40 Beispiele für das Kriechverhalten von Geoverbundstoffen bei Druckbeanspruchung. Dargestellt ist die prozentuale Stauchung als Funktion der Zeit von Drainmatten mit Sickerkörper aus PE-HD (flächenbezogene Masse $1350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), PE-LD (flächenbezogene Masse $950 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) und PA (flächenbezogene Masse $950 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Die Drainmatten wurden mit einer Drucklast von 200 kPa geprüft (Cancelli et al., 1987). Als Vergleich sind Kriechwerte einer PE-HD-Noppenbahn (flächenbezogene Masse $580 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) aufgetragen. Die Werte wurden bei einer Druckbeanspruchung von 80 kPa respektive 120 kPa ermittelt (Ensinger, 1995).

2.8.1.3 Brandverhalten

Der Brandschutz wird in der Schweiz durch kantonale Bestimmungen geregelt. Als Vorlage dienen die von der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) erarbeiteten Richtlinien für Feuerversicherungen. In diesen technischen Richtlinien sind die Anforderungen bezüglich des Feuerwiderstandes festgelegt. Die Produkte, die den Bestimmungen entsprechen, werden durch Vergabe eines schweizerischen Brandschutz-Zertifikates amtlich zugelassen. Die Liste der Brandschutz-Zertifikate ist im schweizerischen Brandschutzregister aufgeführt, das jährlich von der VKF herausgegeben wird. Die Kriterien, die bei der Erstellung eines Gebäude-Brandschutzkonzeptes berücksichtigt werden müssen, sind in der 1993 von der VKF veröffentlichten Brandschutznorm aufgeführt.

Im Untertagebau dürfen nur Geokunststoffe eingesetzt werden, welche bezüglich dem Weiterbrennen und der Rauchentwicklung bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Zudem dürfen keine giftigen Gase entstehen. Das Mass für das Brandverhalten ist die sogenannte Brandkennziffer (BKZ), welche sich aus dem Brennbarkeitsgrad und dem Qualmverhalten zusammensetzt (vgl. dazu SIA 280, 1996 bzw. SIA 183, 1996).

Geokunststoffe, welche im Untertagebau eingesetzt werden, müssen mindestens die Brandkennziffer BKZ = 4.1 aufweisen. Diese Kennziffer entspricht einem Brennbarkeitsgrad 4 = mittelbrennbar und einem Qualmgrad 1 = starke Qualmbildung. Ein Brennbarkeitsgrad 5 würde schwer brennbar (bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$) und ein Qualmgrad 2 = mittlere Qualmbildung bedeuten.

2.8.2 Anwendungen von Geokunststoffen mit Schutzfunktion

Zum Themengebiet "Schützen mit Geokunststoffen" wurden vornehmlich Kongressbände der "International Conference on Geosynthetics" und der "European Geosynthetics Conference" ausgewertet. Daneben wurden Kontakte zu deutschen Forschungseinrichtungen (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover) hergestellt und die Firmen Sika AG, Sytec Bausysteme AG, Kiener + Wittlin AG und Sarnafil International AG kontaktiert.

2.8.2.1 Deponiebau

Die Literaturrecherche ergab, dass nur für Abdichtungssysteme von Deponien (Abb. 41) umfangreiche Richtlinien und abgeschlossene Untersuchungen zur Geokunststoff-Aufgabe "Schützen" vorliegen. In der Schweiz liegt für den Deponiebau die Norm SIA 203 (1997) vor. Für Geokunststoffe mit der Funktion des Schützens einer Abdichtungsschicht ist die Schutzwirkung projektspezifisch mit statischen Belastungsversuchen (Labor) und dynamischen Feldversuchen (Einbau- und Fahrversuche) zu ermitteln, soweit nicht Erfahrungswerte unter vergleichbaren Bedingungen vorhanden sind.

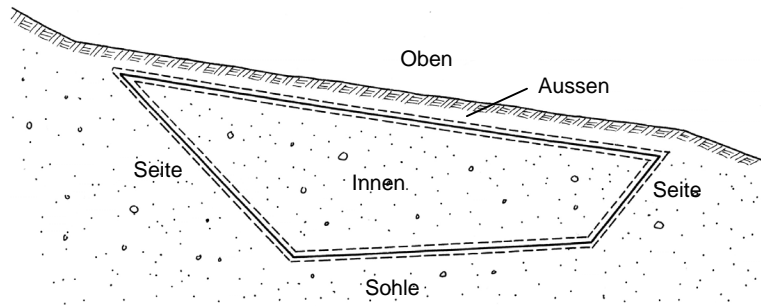


Abb. 41 Deponieabdichtungen (Abdichtungen: Oben / Seite / Sohle, Schutzgeokunststoff: Aussen / Innen)

In Österreich besteht die Norm ÖNORM S 2076 (1993), in der Anforderungen an Geokunststoff-Schutzlagen definiert werden. Die mechanische Schutzwirkung prüft ein Versuch, bei dem ein Stempel durch einen Probekörper gedrückt wird (Abb. 42). Gemessen wird die Kraft, die die pyramidenförmige Spitze zum Durchdringen des Probekörpers benötigt (Pyramidendurchdrückkraft). Die Eignung des Pyramidendurchdruckversuchs zur Beurteilung der Schutzwirkung von Geokunststoffen wurde beispielsweise durch Brummermann et al. (1999) gezeigt.

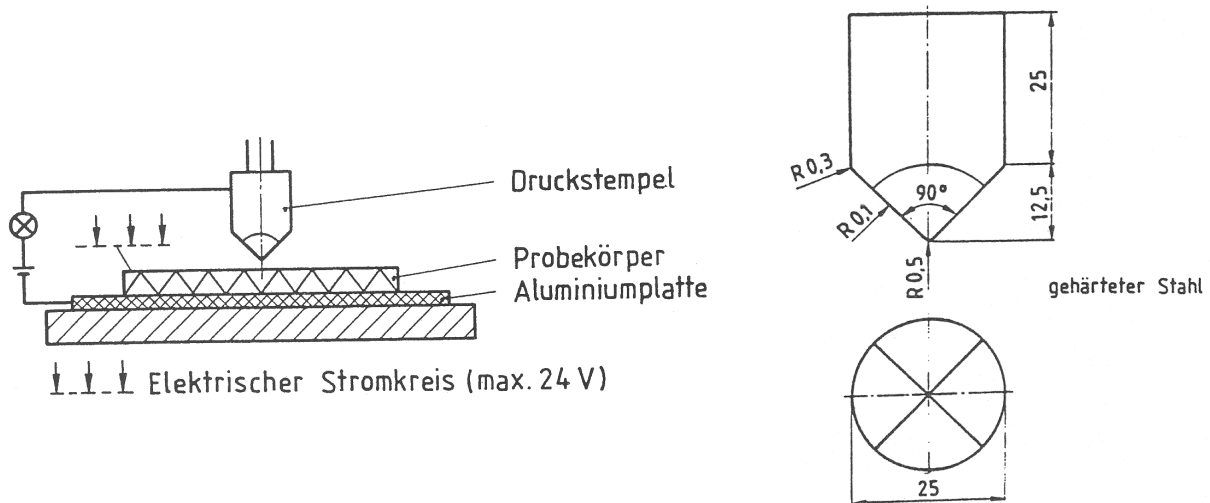


Abb. 42 Versuchsaufbau Pyramidendruckversuch (ÖNORM S 2076, 1993).

Überlagerungsdruck (kPa)	Grösstkorn			
	16 mm	26 mm	32 mm	45 mm
< 150	1000	1000	1000	1150
150 ... 250	1000	1000	1200	1520
250 ... 350	1000	1050	1250	2050
350 ... 450	1000	1150	1450	2350
450 ... 600	1000	1330	1770	2820
600 ... 700	1000	1510	1960	3150
700 ... 800	1000	1650	2050	3550
900 ... 1000	1100	2010	2610	4290

Tab. 46 Erforderliche Mindest-Pyramidendurchdrückkraft (in N) für Geokunststoff-Schutzlagen in Abhängigkeit von Überlagerungsdruck und Rundkorn (nach ÖNORM S 2076, 1993).

Es werden erforderliche Mindest-Pyramidendurchdrückkräfte in Abhängigkeit der Normalspannung und der Korngröße der Dränageschicht angegeben (Tab. 46). Zusätzlich wird auf die Entwicklung von Drucktopfversuchen verwiesen, welche realitätsnah die Verhältnisse an der Dichtungsbahn simulieren. Weiter sind Eignungsnachweise zur chemischen Beständigkeit, zur UV-Beständigkeit und zur biologischen Beständigkeit angegeben (Tab. 47).

Eigenschaft	Einheit	Prüfvorschrift	Anforderung
Dicke bei 2 kPa Belastung	mm	EN 964-1 (1995)	Identifikationswert
Flächenbezogene Masse	g/m ²	EN 965 (1995)	Identifikationswert
Stempeldurchdrückkraft	N	EN ISO 12236 (1996)	Identifikationswert
Streifenzugfestigkeit längs/quer	kN/m	EN ISO 10319 (1996)	≥ 30 kN/m
Streifenzugdehnung längs/quer	%	EN ISO 10319 (1996)	Identifikationswert
Pyramidendurchdrückkraft	N	ÖNORM S 2076 (1993), Anhang C.1	siehe Tab. 46
Chemische Beständigkeit	% (relativ)	ÖNORM S 2073 (1998), Lagerung in Medien	Festigkeitsabfall ≤ 30 %
UV-Beständigkeit	% (relativ)	EN ISO 4892-2 (1999), 1 GJ/m ² Strahlung	Festigkeitsabfall ≤ 10 %
Biologische Beständigkeit	% (relativ)	ÖNORM S 2073 (1998), Tabelle 4, Prüfung 2	Festigkeitsabfall ≤ 10 %
Güteüberwachung		DIN 18200 (2000)	2 mal jährlich

Tab. 47 Eignungsnachweis von Geokunststoff-Schutzlagen gemäss ÖNORM S 2076 (1993).

Die umfangreiche Richtlinie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM, 1995) beschreibt die Anforderungen an Geokunststoff-Schutzschichten und definiert - im Gegensatz zur ÖNORM S 2076 (1993) - die mechanische Schutzwirkung über zulässige Dehnungen in der Kunststoffdichtungsbahn. Zur Identifikation und zur Qualitätssicherung der Geokunststoffe werden allgemeine Eigenschaften verlangt sowie Anforderungen an die Beständigkeit und Alterung gestellt (Tab. 48).

Beständigkeit gegen	Prüfgrösse	zulässige Abnahme	Prüfverfahren
hochkonzentrierte flüssige Medien	Masse pro Flächeneinheit	≤ 15 %	Einlagerung in ausgewählten Medien Dauer: 7, 28 und 90 Tage Temperatur: 23 ± 2 °C
	Höchstzugfestigkeit	≤ 25 %	
	Höchstzugkraft-Dehnung	≤ 25 %	
Witterung	Höchstzugfestigkeit	≤ 20 %	6-monatige Freibewitterung nach DIN 53386 (1982) oder künstliche Bewitterung nach EN 12224 (2000)
thermisch-oxidativen Abbau	Höchstzugfestigkeit	≤ 25 %	Warmlagerungsversuche Dauer: 360 Tage Temperatur: 80 °C
	Höchstzugkraft-Dehnung	≤ 25 %	
	Kristallinität	≤ 10 %	
Mikroorganismen	Höchstzugfestigkeit	≤ 10 %	Erdeingravingsversuch nach EN 12225 (2000)
	Höchstzugkraft-Dehnung	≤ 10 %	

Tab. 48 Anforderungen an die Beständigkeit und das Alterungsverhalten der Geokunststoff-Komponenten gemäss BAM (1995).

In GDA (1997) und Seeger et al. (1995) sind mechanischen Versuche für die Eignungsprüfung der Geokunststoffe beschrieben (Abb. 43). In einem Zylinder mit 30 ... 50 cm Durchmesser wird als Unterlage eine ca. 20 cm dicke Elastomerscheibe der Shore-A-Härte 45 ... 50, darauf ein 0.5 ... 1 mm starkes Weichblech, ein Ausschnitt aus der Dichtungsbahn und der Schutzschicht, eine Dränkieslage und schliesslich über einem Trennvlies eine lastverteilende Sandschicht eingebaut. Mit einem Druckstempel wird dann die gewünschte Auflast aufgebracht und mit einer Kraftmesseinrichtung unterhalb der Elastomerlage kontrolliert.

Die im Weichblech konservierte Eindellung unterhalb der Dichtungsbahn wird unter Zugrundelegung eines Kreisabschnittes mit der kleinsten Ausdehnung der Delle als Sehnenlänge und der grössten Tiefe der Delle als Höhe gemessen. Schutzschichten gelten als geeignet, wenn die nach der mechanischen Schutzwirksamkeitsprüfung (1000 h, 40°C) mit einer bestimmten Auflast im Weichblech konservierten Eindellungen nur Wölbogendehnungen kleiner als 0.25% zeigen (Abb. 44).

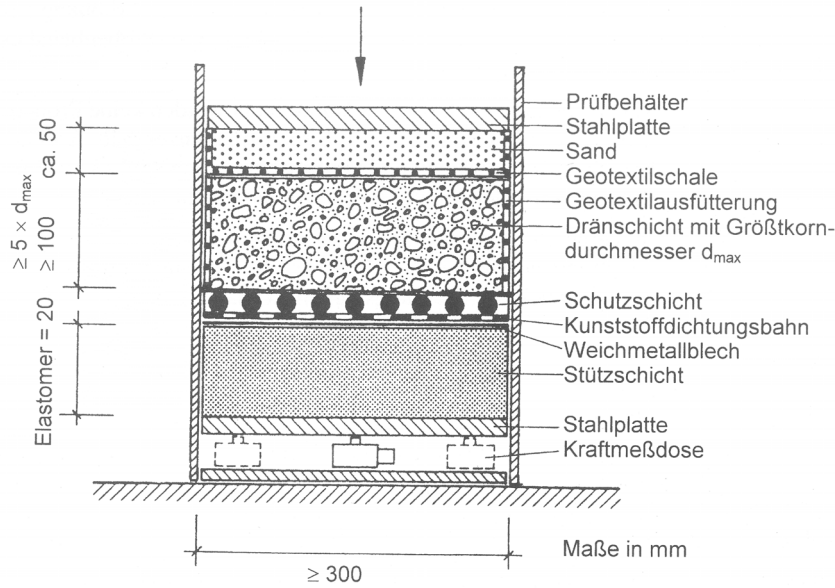


Abb. 43 Prüfsystemaufbau von Druckversuchen mit Dränmaterial (GDA, 1997).

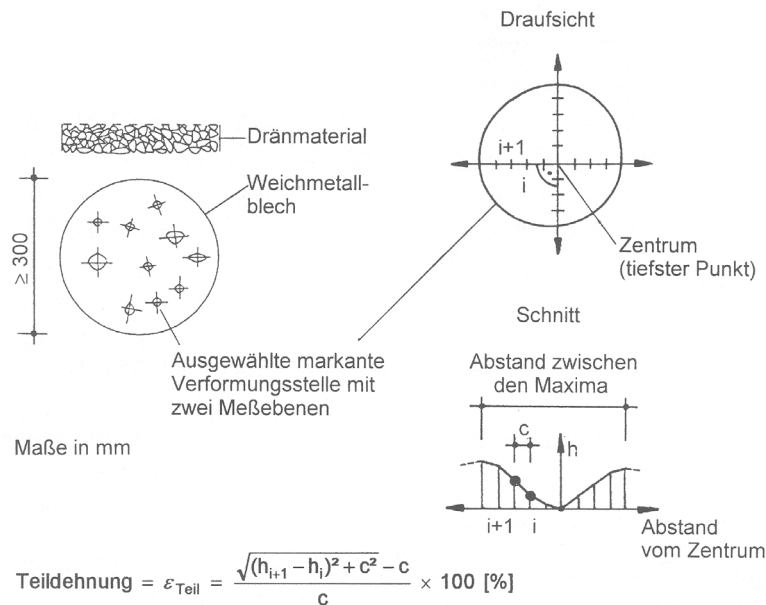


Abb. 44 Dehnungsermittlung an Weichmetallblechen aus Druckversuchen mit Kies (GDA, 1997).

Das Europäische Komitee für Normung hat den Entwurf prEN 13719 (1999) herausgegeben. Darin wird ein Indexprüfverfahren festgelegt, mit dessen Hilfe die Schutzwirksamkeit von Geokunststoffen bestimmt werden kann. Die Prüfeinrichtung entspricht der in Abb. 43 gezeigten, mit zwei Änderungen: Zum einen wird auf die Kunststoffdichtungsbahn zwischen Geokunststoff und Weichblech verzichtet, zum anderen wird anstatt einer Kiesschicht eine simulierte Standardkörnung bestehend aus M 16 Muttern benutzt.

In mehreren Europäischen Ländern werden die Geokunststoff-Schutzschichten ähnlich GDA (1997) danach ausgewählt, wie gut sie Dehnungen in der Kunststoffdichtungsbahn begrenzen. Dagegen werden in den USA Schutzlagen ausschliesslich nach dem Flächengewicht definiert, was einen mechanischen Schaden (Riss, Loch) verhindern soll. Anhand von Versuchen an drei verschiedenen vernadelten Geovliesen mit gleichem Flächengewicht, haben Jones et al. (2000) untersucht, ob das in den USA übliche Verfahren eine Gewähr für einen ausreichenden Schutz liefert. Demgemäss reicht das Flächengewicht allein nicht aus, da die untersuchten Vliese bei gleichem Flächengewicht deutlich unterschiedliche Schutzwirkungen zeigen.

Im Deponiebau können Geokunststoffe, und damit auch allfällige innere Schutzschichten in Kontakt mit kontaminierten Festsubstanzen, mit belastetem Wasser und Gasen kommen. Die entsprechende Beständigkeit ist zusätzlich zu den Standardprüfungen nachzuweisen. Tab. 49 liefert eine Liste gebräuchlicher Rohstoffe und der jeweiligen kritischen Medien.

Rohstoff	kritische Medien
Polyethylen (PE)	oxidierende Säuren Ketone aromatische Kohlenwasserstoffe chlorierte Kohlenwasserstoffe Detergenzien
Polypropylen (PP)	oxidierende Säuren aromatische Kohlenwasserstoffe chlorierte Kohlenwasserstoffe starke Oxidationsmittel
Polyester (PET)	starke Säuren starke Laugen Phenol
Polyamid (PA):	Säuren starke Laugen
Polyvinylchlorid (PVC) (z.B. als Schutz für Polyester)	Ketone / Ester aromatische Kohlenwasserstoffe chlorierte Kohlenwasserstoffe (nach Art der Weichmacher)

Tab. 49 Liste gebräuchlicher Rohstoffe und der jeweiligen kritischen Medien (Kisskalt, 1992).

Eine Beurteilung darf aber nicht allein aufgrund der generellen Empfindlichkeit des Rohstoffes erfolgen, da der Aufbau des Produktes (Dicke, Faserstärke und weitere Eigenschaften) sowie die eingesetzten Stabilisatoren ebenfalls eine entscheidende Rolle spielen. Die Beständigkeit der Produkte aus den einzelnen Rohstoffen kann mit der Zugabe spezieller Stabilisatoren günstig beeinflusst werden. Viele Alterungsvorgänge sind zudem stark temperaturabhängig. Es ist somit wichtig zu wissen, welchen Temperaturen der Geokunststoff über seine Gebrauchsdauer ausgesetzt ist. In Deponien können beispielsweise ohne weiteres höhere Temperaturen von 30°C bis 60°C über lange Zeiträume auftreten.

2.8.2.2 Tunnelbau

Zur Anwendung von Geokunststoffen im Tunnelbau (Abb. 45, Abb. 46) sind momentan in der Schweiz und in Deutschland Forschungsprojekte in Arbeit, deren Ergebnisse in nächster Zukunft veröffentlicht werden.

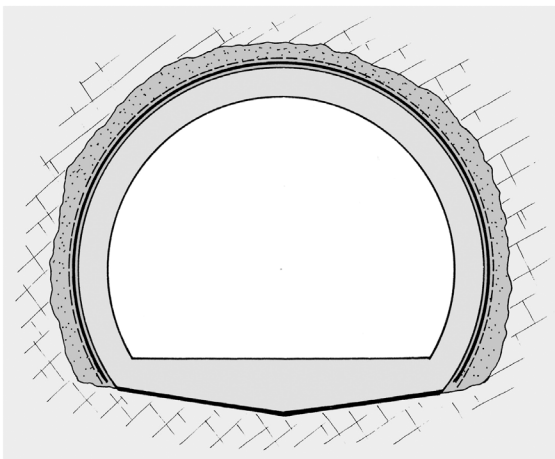


Abb. 45 Tunnel, Stollen und Kavernenbau mit bergmännischem Vortrieb (Druckbereich 100...1000 kPa und über 1000 kPa)

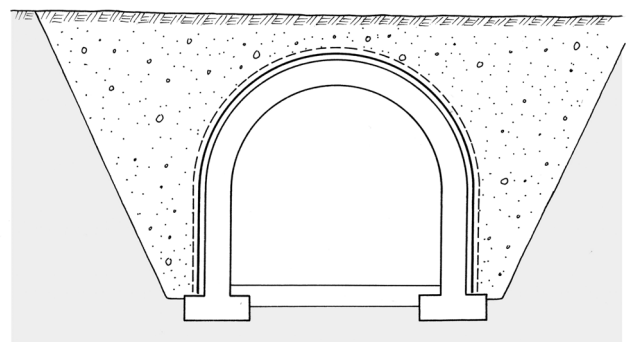


Abb. 46 Tunnel im Tagbau (Druckbereich ca. 100...500 kPa)

Unter Leitung der EMPA erfolgen zur Zeit für die beiden AlpTransit-Achsen (Neat-Basistunnel) Zulassungsprüfungen für Abdichtungssysteme in Tunneln. In Flüeler et al. (2001) sind Angaben zum Evaluationsverfahren und zu den verwendeten Versuchseinrichtungen sowie Untersuchungsergebnisse zu finden. Bei diesen Projekten hat der Geokunststoff die Hauptaufgabe, das aus dem Fels austretende Wasser abzuleiten. Die durchgeführten Versuche konzentrieren sich daher auf das Erhalten der Drainagewirkung unter den vorhandenen Randbedingungen.

Die Bewerbungsunterlagen für die Zulassungsprüfung für die Abdichtungssysteme von AlpTransit bieten Informationen und Grundlagen für die Materialprüfungen der Flächendrainage. Durchgeführt werden Wasserlagerungen bei unterschiedlichen Temperaturen und die Beständigkeit gegen alkalische und saure Medien sowie der Widerstand gegen Mikroorganismen wird untersucht. Ausserdem wird am Gesamtsystem die Perforationsfestigkeit getestet. Dazu werden Versuche zum Dauerdruckverhalten und zum Druck-Schubverhalten durchgeführt.

Die Deutsche Bahn AG fordert das Einhalten der Richtlinie RIL 836 (1999) sowie der Technischen Lieferbedingungen DB AG-TL 918039 (1997). Diese definiert die Anforderungen an Geokunststoffe als Schutzelement bei der Abdichtung von Eisenbahntunneln in Untertagebauweise (Tab. 50), als auch für abdichtende Massnahmen in Erdbauwerken (Tab. 51). Falls beim Tagbau erhebliche Beanspruchungen durch Verkehrsbelastungen auftreten oder der umgebende Boden scharfkantig ist, werden höhere Anforderungen an die Masse pro Flächeneinheit und an die Dicke bei 20 kPa Auflast gestellt.

Parameter	Anforderung	
Masse pro Flächeneinheit	500 ... 700 g/m ²	700 ... 1000 g/m ²
Dicke bei 20 kPa Auflast	≥ 4 mm	≥ 6 mm
Höchstzugkraft in beiden Hauptrichtungen	≥ 7 kN/m	≥ 10 kN/m
Höchstzugkraftdehnung in beiden Hauptrichtungen	≥ 70 %	
Stempeldurchdrückkraft	≥ 1500 N	
Wasserdurchlässigkeit senkrecht bei 20 kPa Auflast	≥ 10 ⁻³ m/s	
Wasserdurchlässigkeit horizontal bei 20 kPa Auflast	≥ 10 ⁻³ m/s	
Brandverhalten und Brandnebenschienungen	siehe DB AG-TL 918039 (1997)	

Tab. 50 Anforderungen nach DB AG-TL 918039 (1997) an Geokunststoffe als Schutzelement bei der Abdichtung von Eisenbahntunneln (Untertagebau).

Parameter	Anforderung
Art des Geokunststoffes	Geovlies oder Geovlies-Verbundstoff aus PP oder HDPE
Masse pro Flächeneinheit	≥ 500 g/m ²
Dicke bei 20 kPa Auflast	≥ 2.5 mm
Stempeldurchdrückfestigkeit	≥ 2500 N
Höchstzugkraft in beiden Hauptrichtungen	≥ 10 kN/m
Höchstzugkraftdehnung in beiden Hauptrichtungen	≥ 50 %
Wasserdurchlässigkeit senkrecht bei 20 kPa Auflast	≥ 10 ⁻⁴ m/s
Wasserdurchlässigkeit horizontal bei 20 kPa Auflast	≥ 10 ⁻⁴ m/s
Wirksame Öffnungsweite	0.06 ... 0.20 mm

Tab. 51 Anforderungen nach DB AG-TL 918039 (1997) an Geokunststoffe als Schutzelement bei der Abdichtung von Erdbauwerken (Tagbautunnel).

ZTV-Tunnel (1995) stellt für Strassentunnel die Anforderungen an Geokunststoff-Schutzunterlagen gemäss Tab. 52 auf, welche ähnlich zu denen der Tab. 51 sind.

Stoffeigenschaften	Norm	Anforderung
Nennflächengewicht	EN 965 (1995)	≥ 500 g/m ²
Unterschreitung des geforderten Nennflächengewichtes	EN 965 (1995)	≤ 10 %
Nennstärke	EN 964-1 (1995)	≥ 3 mm
Unterschreitung der geforderten Nennstärke	EN 964-1 (1995)	≤ 10 %
Reissfestigkeit längs, quer, diagonal	EN ISO 10319 (1996)	≥ 250 N/mm ² ≥ 50 N/mm ²
Reissdehnung längs, quer, diagonal	EN ISO 10319 (1996)	≥ 70 %
Stempeldurchdrückkraft	EN ISO 12236 (1996)	≥ 2.5 kN

Tab. 52 Mechanische Anforderungen an Schutzunterlagen bei Strassentunneln (ZTV-Tunnel, 1995).

Die in Deutschland gültigen Richtlinien werden zur Zeit überarbeitet und sollen 2002 vorliegen. Im Rahmen dieser Forschungsvorhaben wurden zum Teil neue Versuchseinrichtungen entwickelt, die bei Brummermann et al. (2001) beschrieben werden. Die Autoren unterscheiden bei den mechanischen Anforderungen an die

Geokunststoffe zwischen Belastungen während des Einbaus, während der Montage des Betonstahls und des Betonierens der Betoninnenschale sowie während dem Betrieb etwa infolge von Gebirgsdruck.

2.8.2.3 Oberflächennahe Anwendungen

Für den Einsatz von Geokunststoffen zum Schutz einer Abdichtung im allgemeinen Tiefbau (Abb. 47, Abb. 48) existieren in der Schweiz bisher keine speziellen Richtlinien oder definierte Anforderungen. Die Schweizer Norm SIA 280 (1996) legt 18 Prüfungen für Kunststoff-Dichtungsbahnen inklusive Anforderungswerte fest, die u.a. die Dickenmessung, die Reissdehnung, die thermische Alterung, die Brandkennziffer und die mechanische Durchschlagfestigkeit umfassen. Für den einzelnen Anwendungsfall werden von einzelnen Herstellern aufgrund von Erfahrungswerten Empfehlungen für die Wahl des geeigneten Geokunststoffes gegeben.

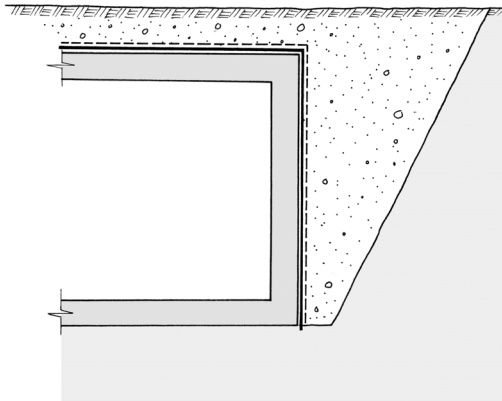


Abb. 47 Tiefgaragen, Untergeschosse, Reservoirs
(Druckbereich ca. 50...200 kPa)

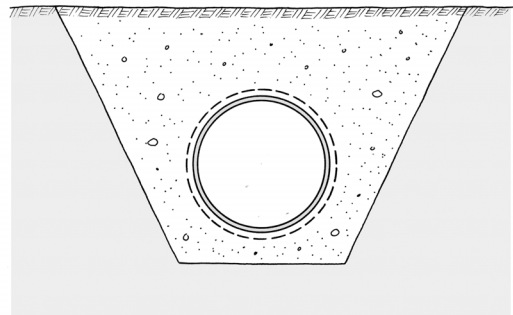


Abb. 48 Schutz von Rohrleitungen und anderen
Bauteilen

3. Untersuchungen zur Abschätzung der Abminderungsfaktoren und der Standsicherheit

3.1 Auswahl der Geokunststoffe

16 Geokunststoff-Produzenten haben das Angebot in Anspruch genommen, ihre Produkte den im Forschungsprojekt geplanten Versuchen unterziehen zu lassen. Es wurden 23 sehr unterschiedliche Bewehrungs-Geokunststoffe untersucht, vom Vliesstoff über verschiedene Gewebe bis zu extrudierten Gittern aus den unterschiedlichsten Rohstoffen (Tab. 53). Zusätzlich wurden 11 für den Trenn- und Filtereinsatz vorgesehene Geotextilien sowie ein Vegetationsgitter (Muster Nr. 14) in das Versuchsprogramm mit aufgenommen. In Abb. 49 sind die ausgewählten Produkte abgebildet.

Nr.	Produkttyp	Nennge- wicht [g/m ²]	Gitterab- stand [mm]	Zugfestigkeit längs [kN/m]
01	PP-Bändchengewebe	495	-	116.6 ± 3.3
02	PP-Bändchengewebe	330	-	77.3 ± 2.5
03	PP-Endlofaservlies vernadelt	700	-	92.8 ± 18.1
04	PP-Endlofaservlies vernadelt	350	-	59.6 ± 11.2
05	PP-Endlofaservlies vernadelt *	350	-	27.9 ± 6.7
06	PP-Stapelfaservlies vernadelt & thermisch verfestigt *	180	-	13.7 ± 0.9
07	PP-Endlofaservlies vernadelt *	180	-	13.7 ± 1.1
08	PP-Endlofaservlies vernadelt & thermisch nachbehandelt *	150	-	8.2 ± 1.3
09	PP-Stapelfaservlies vernadelt & thermisch nachbehandelt *	230	-	18.7 ± 1.6
10	PP-Stapelfaservlies vernadelt & thermisch verfestigt *	200	-	13.6 ± 2.1
11	Gewebe (Kette: PE-Monofil; Schuss: PP-Bändchen) *	100	-	15.9 ± 1.4
12	Gitter aus gelegten und verschweissten PET-Flachstäben	265	47.4	64.9 ± 3.7
13	Gitter aus gelegten und verschweissten PP-Flachstäben	230	47.8	39.4 ± 1.1
14	beschichtetes Glasfaser-Gitter *	190	9.1	29.3 ± 2.2
15	PVC-beschichtetes Gewebe aus PET-Endlofasern *	225	-	38.3 ± 1.0
16	uniaxial gestrecktes HDPE-Gitter aus extrudierter Bahn	290	21.5	66.2 ± 0.3
17	PP-Stapelfaservlies vernadelt *	200	-	10.0 ± 0.3
18	PET-Kettengewirk	825	-	423.8 ± 16.0
19	biaxial gestrecktes PP-Gitter aus extrudierter Bahn	200	62.5	24.2 ± 0.3
20	mit gewirktem PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	600	4.2	87.7 ± 2.3
21	mit gewirktem PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	500	8.4	86.8 ± 2.6
22	PVC-beschichtetes gewobenes PET-Gitter	700	40.2	160.4 ± 7.7
23	PP-Bändchengewebe *	185	-	44.8 ± 2.6
24	Multifilament-Gewebe mit PET-Kette und PA-Schuss	950	-	386.8 ± 7.9
25	Multifilament-Gewebe mit PET-Kette und PA-Schuss	1900	-	994.6 ± 34.8
26	biaxial gestrecktes PP-Gitter aus extrudierter Bahn	420	29.4	35.8 ± 1.5
27	5-lagiges biaxial gestrecktes PP-Gitter	330	57.8	35.9 ± 1.9
28	PVC-beschichtetes gewobenes PET-Gitter	330	34.0	51.7 ± 0.3
29	uniaxial gestrecktes HDPE-Gitter aus extrudierter Bahn	400	20.5	63.8 ± 3.2
30	mit PET-Multifilament längsverstärktes PP-Vlies	280	8.5	46.9 ± 0.8
31	mit PET-Multifilament längsverstärktes PP-Vlies	340	8.4	97.9 ± 4.1
32	Gitter aus gelegten und verschweissten PET-Flachstäben	300	38.2	40.8 ± 3.4
34	PET Multifilament-Gewebe	360	-	126.8 ± 3.6
35	in PET-Vliese eingebettetes, beschichtetes Aramid-Gitter	150	13.0	48.5 ± 1.6
37	PP/PE-Endlofaservlies thermisch verfestigt *	190	-	15.0 ± 1.6

* nicht für Bewehrungsaufgaben vorgesehen

Tab. 53 Liste der geprüften Geokunststoff-Muster (Muster-Nr., Herstellungsart, flächenbezogene Nennmasse, Abstand der längsorientierten Gitterelemente, Zugfestigkeit in Produktionsrichtung inkl. 95 % Vertrauensbereich).

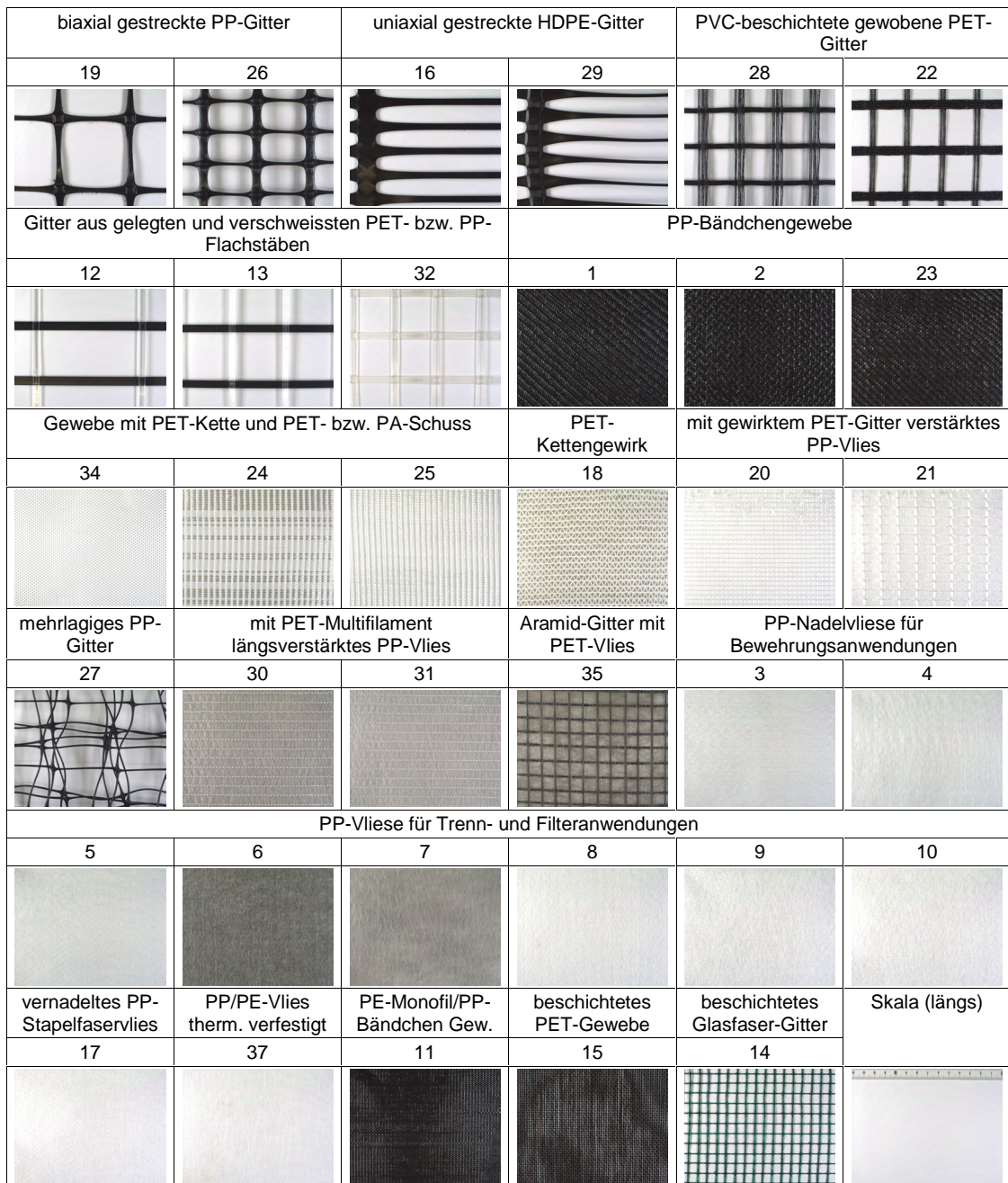


Abb. 49 Aufnahmen der geprüften Geokunststoffe (Grösse des Ausschnitts jeweils 14 x 11 cm; Produktionsrichtung verläuft horizontal).

3.2 Zugversuche

Zugversuche dienen zur Beurteilung von Veränderungen des Kraft-Dehnungs-Verhaltens nach einer Beanspruchung (Einbausimulation, Bewitterung, etc.). Mit dem t-Test nach Student wurde der Mittelwert der Referenzproben mit denjenigen der beanspruchten Proben verglichen. Angegeben wird die Restfestigkeit in Prozent, wenn der Mittelwert der behandelten Proben mit 95% statistischer Wahrscheinlichkeit gesichert kleiner als der Mittelwert der Referenzproben ist.

Das Kraft-Dehnungsverhalten wurde nach EN ISO 10319 (1996) längs zur Produktionsrichtung an im Allgemeinen fünf 200 mm breiten Proben bestimmt, bei einer Einspannlänge von 100 mm und einer Dehnungszunahme von 20 ± 5 % pro Minute (Abb. 50). Die Klemmen müssen eine optimale Kraftübertragung gewährleisten, ohne die Proben zu beschädigen. In der Praxis gleitet immer ein Teil der Probe aus den Klemmen. Die Verformung wird daher mit Dehnungsaufnehmern gemessen.

Um die vorgeschriebene Dehnungsrate zu erreichen, muss die Abzugsgeschwindigkeit der Klemmen deutlich über 20 mm/min liegen, um das (gewollte) Gleiten des inneren Teils der Probe (als Folge der gleichmässigen Verteilung der Klemmlast zur Vermeidung von Kraftspritzen an den Klemmkanten) zu kompensieren. Die korrekte Abzugsrate wird durch Vorversuche bestimmt.

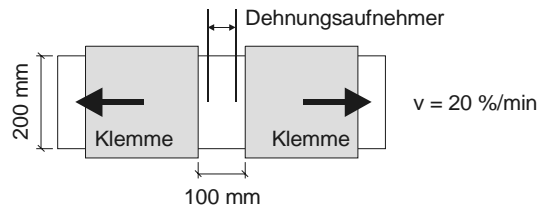


Abb. 50 Vorrichtung zur Bestimmung des Kraft-Dehnungsverhaltens.

Die Prüfung liefert die Zugfestigkeit in kN/m, die Dehnung bei Höchstzugkraft in % sowie die Kraft-Dehnungs-Kurve (Abb. 51). Dabei ist die Zugfestigkeit die auf einen Meter Breite bezogene Höchstzugkraft. Das Arbeitsvermögen (Arbeit, die zum Erreichen der Höchstzugkraft aufgewendet werden muss) entspricht der Fläche unter der Kraft-Dehnungs-Kurve.

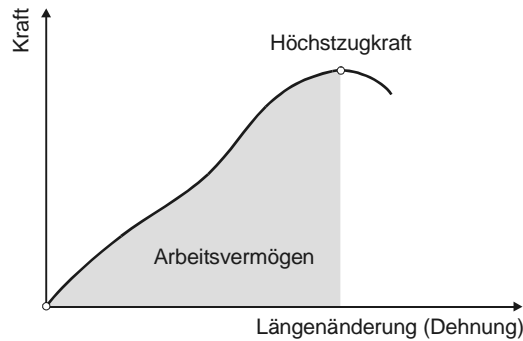


Abb. 51 Kraft-Dehnungs-Diagramm: Auf der senkrechten Achse ist die aufgebrauchte Kraft, auf der waagrechten Achse die resultierende Dehnung aufgetragen.

Der Hauptunterschied zwischen diesem und anderen Verfahren zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Flächengebilden liegt in der Breite der Proben, welche grösser ist als deren Einspannlänge. Die grössere Breite reduziert die Tendenz einiger Produkte, sich unter Zugbeanspruchung quer zur Krafrichtung einzuschnüren.

Die Veränderung des Kraft-Dehnungsverhaltens von Proben, welche einer Beständigkeitsprüfung unterzogen wurden, wurde nach EN 12226 (2000) bestimmt. An den behandelten Proben und den Referenzproben wurde ein Zugversuch an jeweils mindestens 5 im Allgemeinen 50 mm breiten Streifen durchgeführt. Dabei betrug die Prüfgeschwindigkeit 100 mm/min und die Einspannlänge 200 mm. Bei Spezialprodukten wurden davon abweichende Probengrössen verwendet, um einen repräsentativen Ausschnitt aus einem Muster zu prüfen.

3.3 Einbauversuche im Feld

Um den Einfluss von Einbaus Schäden auf die Zugfestigkeit von Geokunststoffen zu ermitteln, wurden im Sommer 2000 durch das Ingenieurbüro Rüeegger Systeme AG St. Gallen (Bauleitung), unter Beizug der Tiefbau-Unternehmung HASTAG St. Gallen, Einbauversuche im Massstab 1:1 vorgenommen. Die Anlage war so konzipiert, dass ein rascher, einfacher und zerstörungsfreier Ausbau der Geokunststoff-Proben möglich war.

Insgesamt wurden in acht Versuchsserien 35 verschiedene Produkte (Tab. 53) im unbewitterten und bewitterten Zustand getestet. Die unbewitterten Proben wurden in den drei charakteristischen Schüttmaterialien Sand (0 ... 4 mm), Wandkies (rund, 0 ... 60 mm) und Schotter (Planiekies, 0 ... 22 mm) ein- und wieder ausgebaut. Die bewitterten Proben wurden nur in Schotter eingebaut. Das Muster Nr. 32 wurde zu spät geliefert und konnte daher nicht mehr bewittert werden.

Das Institut für Geotechnik IGT der ETH Zürich führte Kontrollen der Verdichtung und Untersuchungen der Eigenschaften der Schüttmaterialien vor Ort und im Labor durch. Zur Ermittlung der Kurzzeitzugfestigkeiten vor und nach dem Einbau wurden Streifenzugversuche nach EN ISO 10319 (1996) im Labor der EMPA in St. Gallen vorgenommen.

3.3.1 Ablauf des Feldversuchs

3.3.1.1 Testanlage

Die Einbauversuche wurden vom 10. bis 17. Juni 2000 und vom 14. bis 17. August 2000 in der Kiesgrube der Firma HASTAG in Niederbüren SG durchgeführt (Abb. 52). Das Testfeld wies eine Gesamtlänge von ca. 33 m und eine Breite von ca. 6 m auf (Abb. 53).

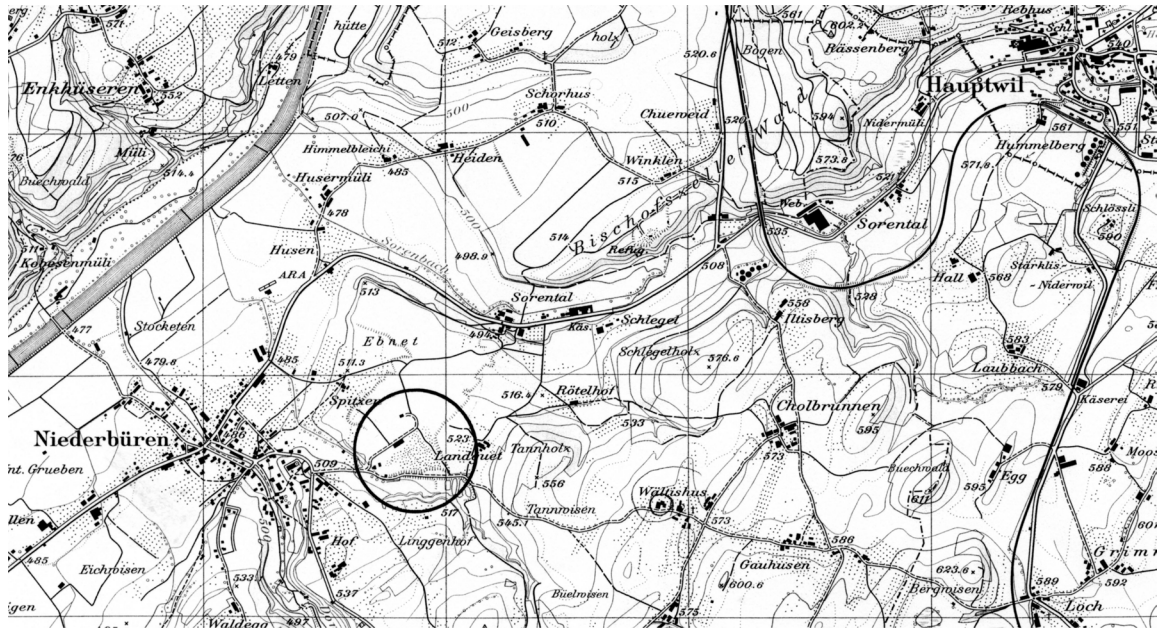


Abb. 52 Standort des Testfeldes.

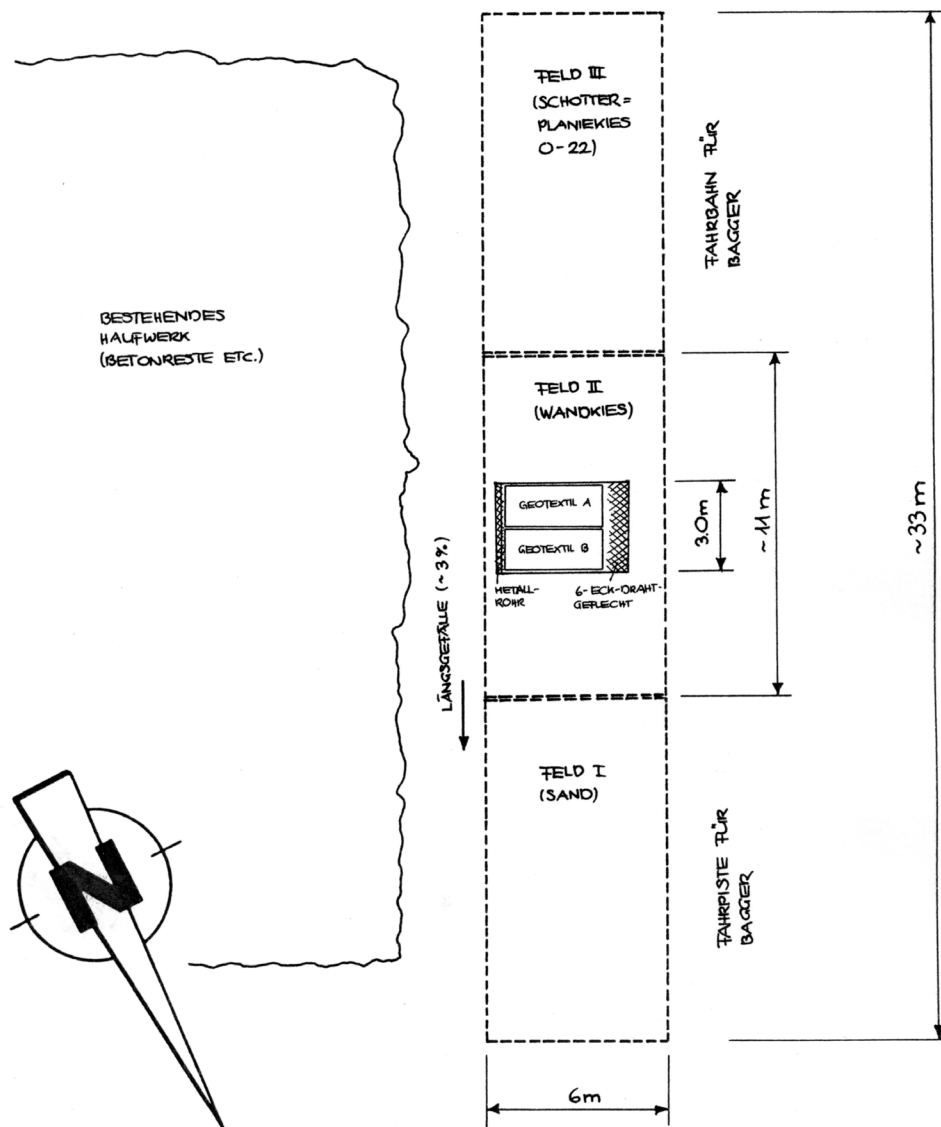


Abb. 53 Situationsplan.

Die Anordnung der Geokunststoffe in den einzelnen Versuchsserien ist in Abb. 54 dargestellt. Die Versuchsanlage war in drei gleich grosse Felder aufgeteilt. In den Versuchsserien mit unbewitterten Proben wurde im Feld I (nördlichstes Feld) Sand, im Feld II Wandkies und im Feld III Schotter eingebaut. In den Versuchsserien Nr. 6 und Nr. 7 vom 15.08. und 16.08.2000 wurde für die Untersuchung der Einbeschädigung an bewitterten Proben in allen drei Feldern Schotter eingebracht.

Versuchsserie 1 (Geokunststoffe unbewittert): 11.07.2000																	
13 S	12 S	19 S	16 S	11 S	15 S	13 K	12 K	19 K	16 K	11 K	15 K	13 G	12 G	19 G	16 G	11 G	15 G
Versuchsserie 2 (Geokunststoffe unbewittert): 12.07.2000																	
9 S	10 S	07 S	08 S	14 S	06 S	09 K	10 K	07 K	08 K	14 K	06 K	09 G	10 G	07 G	08 G	14 G	06 G
Versuchsserie 3 (Geokunststoffe unbewittert): 13.07.2000																	
17 S	05 S	03 S	04 S	18 S	21 S	17 K	05 K	03 K	04 K	18 K	21 K	17 G	05 G	03 G	04 G	18 G	21 G
Versuchsserie 4 (Geokunststoffe unbewittert): 14.07.2000																	
23 S	24 S	20 S	01 S	02 S	22 S	23 K	24 K	20 K	01 K	02 K	22 K	23 G	24 G	20 G	01 G	02 G	22 G
Versuchsserie 5 (Geokunststoffe unbewittert): 14.08.2000																	
26 S	29 S	28 S	27 S	30 S	31 S	26 K	29 K	28 K	27 K	30 K	31 K	26 G	29 G	28 G	27 G	30 G	31 G
Versuchsserie 6 (Geokunststoffe bewittert): 15.08.2000																	
12 B	27 B	29 B	19 B	26 B	13 B	34 B	16 B	02 B	01 B	22 B	15 B	11 B	10 B	23 B	28 B	25 B	14 B
Versuchsserie 7 (Geokunststoffe bewittert): 16.08.2000																	
06 B	37 B	21 B	07 B	09 B	08 B	31 B	30 B	24 B	35 B	20 B	17 B	03 B	18 B	05 B	04 B	-	-
Versuchsserie 8 (Geokunststoffe unbewittert): 17.08.2000																	
25 S	34 S	35 S	37 S	32 S	-	25 K	34 K	37 K	35 K	32 K	-	25 G	34 G	37 G	35 G	32 G	-

Abb. 54 Einbauprogramm. S = Sand, K = Kies ab Wand, G = Gebrochenes Material (Schotter), B = Bewitterte und in Schotter eingebaute Muster.

Abb. 55 zeigt eine Aufsicht der Versuchsanlage. Den Untergrund bildete ein gut verdichteter Planiekies (gebrochenes Material). Der M_{E1} -Wert des Planums betrug ca. 90 MN/m^2 (Plattendruckversuch nach SN 670 317, 1998), das Längsgefälle ca. 3 %.



Abb. 55 Übersicht Versuchsanlage.

3.3.1.2 Probenbefestigung

Ein Drahtgeflecht diente dem einfachen, rationellen und trotzdem möglichst schonenden Ausbau der Geokunststoffe durch einseitiges Anheben und Herausziehen aus der Schüttung. 3 m breite Drahtgeflechte wurden einseitig um ein Stahlrohr gewickelt und mit einem Stahlseil mit Durchmesser 6 mm vernäht. Die

Geokunststoffe wurden mit Hilfe von zwei verschraubten Flachstähen am Geflecht befestigt (Abb. 56). Pro Geflecht wurden zwei ca. 1.7 m breite und 3.5 m lange Geokunststoffproben eingebaut (Abb. 57).



Abb. 56 Befestigung der Geokunststoffproben am Geflecht.



Abb. 57 Fixierung der Geokunststoffproben.

3.3.1.3 Versuchsablauf

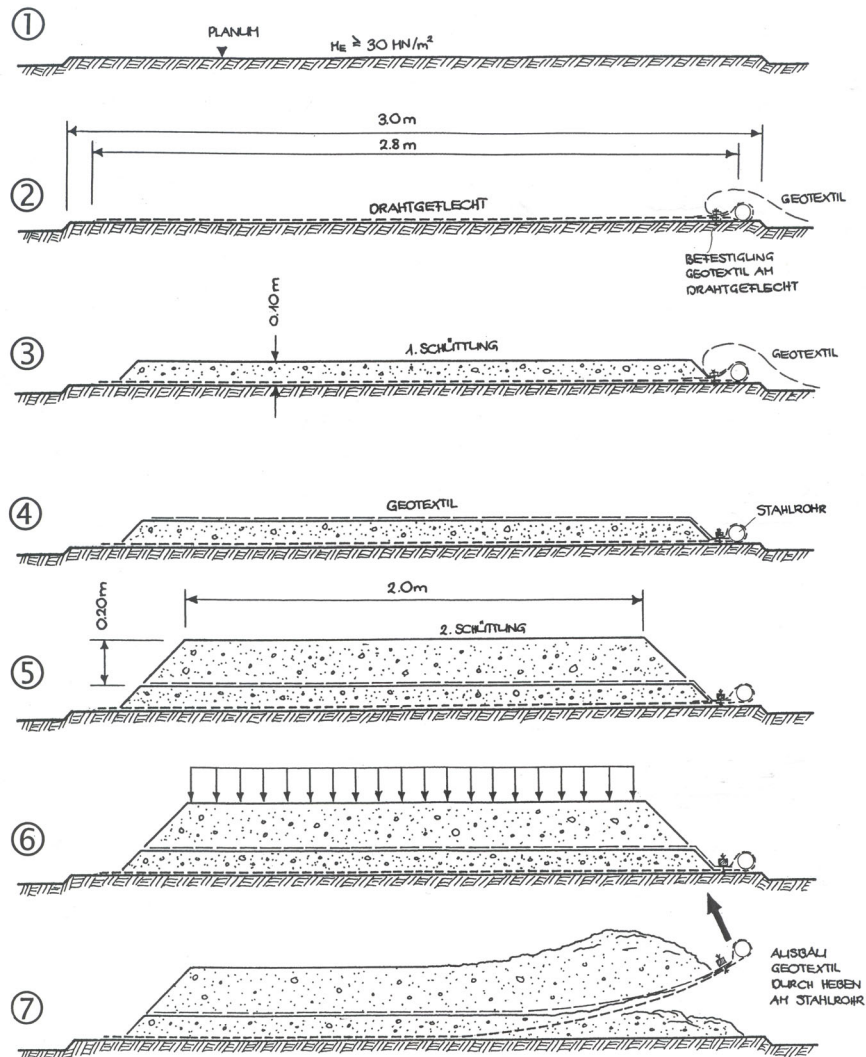


Abb. 58 Versuchsablauf: Ein Drahtgeflecht wird auf das vorbereitete Planum gelegt. Die daran befestigten Geokunststoffe werden nach hinten geschlagen. Anschliessend wird das Geflecht mit 0.12 m Schüttmaterial lose bedeckt. Die Geokunststoffproben werden ausgelegt und mit weiteren 0.23 m Schüttmaterial überdeckt. Nach dem Verdichten wird das Drahtgeflecht zusammen mit den daran befestigten Proben vorsichtig ausgebaut.

Feld-Einbauversuche mit den anstehenden Böden wurden erstmals von Watts & Brady (1990) beschrieben und später in BS 8006 (1995) wie folgt festgelegt:

- Versuchsfeld 3.5 × 3.5 m
- für Bewehrung auf verdichtetem Untergrund: 150 mm Beschüttung & Verdichtung (gleiches Material wie Untergrund)
- 3 versch. Bodenmaterialien: grob, mittel und fein.
- Proben nicht direkt beschütten, sondern Bodenmaterial mit Bagger darüber ausbreiten
- max. 3 Verdichtungsarten: Standard, Überverdichtet (doppelt so viele Walzenübergänge wie Standard), Zweifachschicht (2 × Standard)
- Beschüttung manuell entfernen
- Prüfung der Restfestigkeit nach EN ISO 10319 (1996)

Der Versuchsablauf ist in Abb. 58 in sieben Schritten vereinfacht dargestellt. Das gewählte Konzept zum Ein- und Ausbau der Geokunststoff-Proben erlaubte eine sehr effiziente und wirtschaftliche Arbeitsweise.



Abb. 59 Auslegen der Geflechte auf Planum.



Abb. 60 Übersicht Feld II (Wandkies) und III (Schotter).



Abb. 61 Auslegen der Geokunststoffe auf 1. Schüttung.



Abb. 62 Aufbringen der 2. Schüttung (Wandkies).



Abb. 63 Aufbringen der 2. Schüttung (Feld I, Sand).



Abb. 64 Verdichtung (Feld I, Sand).

Das Geflecht wurde mit nach hinten geschlagenen Geokunststoffen auf das vorbereitete Planum gelegt (Abb. 59) und mit 0.12 m Sand, Wandkies oder Schotter lose bedeckt (Abb. 60). Durch das Abstreichen mit dem Baggerlöffel wurde die Oberfläche plan gedrückt und musste mit einem Rechen wieder aufgelockert werden. Anschliessend wurden die Geokunststoffproben plan auf die erste Schüttung ausgelegt (Abb. 61) und mit weiteren 0.23 m Schüttmaterial überdeckt (Abb. 62, Abb. 63). Die Gesamtschichtstärke der Schüttung im unverdichteten Zustand betrug somit ca. 0.35 m. Die dynamische Verdichtung erfolgte mit einer Tandem-Vibro-Walze vom Typ „BW 75 S“ (Breite 0.89 m, statische Auflast 1025 kg, Abb. 64).

Nach dem Verdichten (Gesamtschichtstärke nach dem Verdichten = 0.30 m) und den Kontrollmessungen wurde das Drahtgeflecht zusammen mit den daran befestigten Geokunststoffproben durch Anheben des Rohres mit Hilfe eines Baggers vorsichtig ausgebaut (Abb. 65, Abb. 66). Dabei wurde auf eine möglichst schonende Behandlung der Proben während dem Ausbau geachtet (das Ausgraben der Proben kann mehr Schaden verursachen als die vorausgegangenen Aktivitäten; nachträglich ist es meist nicht möglich herauszufinden, welche Defekte durch die Ausgrabung selbst impliziert wurden).



Abb. 65 Ausbau Geokunststoffe im Sand.



Abb. 66 Ausbau Geokunststoffe im Schotter.

3.3.1.4 Witterungsverhältnisse

Die Witterungsverhältnisse waren in der Zeit vom 10.07. bis am 17.07.2000 sehr wechselhaft. Die Regenereignisse dauerten zwischen 10 und 120 Minuten und waren von schwacher bis mittlerer Intensität. In der Woche vom 14.08. bis 17.08.2000 herrschte durchgehend sehr schönes Wetter mit sehr sommerlichen Temperaturen. Tab. 54 gibt einen Überblick.

Datum	Witterungsverhältnisse	Temperatur
10.07.2000	temp. Regen	15 - 20 °C
11.07.2000	temp. Regen	15 - 20 °C
12.07.2000	regnerisch	10 - 15 °C
13.07.2000	trocken, bewölkt	20 °C
14.07.2000	regnerisch	15 - 20 °C
17.07.2000	leicht bewölkt, trocken	20 - 25 °C
14.08.2000	schön, trocken	30 °C
15.08.2000	schön, trocken	30 °C
16.08.2000	schön, trocken	30 °C
17.08.2000	schön, trocken	30 °C

Tab. 54 Witterungsverhältnisse beim Einbau.

Die Witterungsbedingungen konnten im Freiversuch nicht beeinflusst werden. Der effektiv vorhandene Wassergehalt wurde massgeblich durch die vorhandenen Witterungsbedingungen beeinflusst und lag v.a. in der zweiten, sehr trockenen Versuchsperiode vom 14. bis am 18. August 2000 deutlich unter dem optimalen Wassergehalt, ermittelt mit dem Proctor-Standard-Versuch. Aufgrund der für eine optimale Verdichtung meist zu geringen Wassergehalte betrugen die in den Feldversuchen gemessenen, durchschnittlichen Raumgewichte γ_{eff} bei bestmöglicher Verdichtung auch nur 92.5 ... 95.6% von γ_{opt} . Inwieweit die Abweichung des effektiv vorhandenen Wassergehaltes vom optimalen, bezüglich maximal mögliche Verdichtung, einen Einfluss auf die Beschädigung der Geokunststoffe hat, ist schwierig abzuschätzen.

Während dem Feldversuch wurden die Proben - soweit ausführungstechnisch möglich - vor der Bewitterung geschützt. Die Lufttemperaturen während der Lagerung der Materialien an der EMPA St. Gallen bzw. auf der

Baustelle im Barackenwagen sowie während dem Ein- und Ausbau betrogen zwischen ca. 15°C und max. 35°C. Die Temperaturen im Schüttmaterial lagen sicherlich unter 30°C. Es ist denkbar, dass sich während der zweiten, sehr warmen Versuchsperiode im August vor allem die dunklen bzw. schwarzen Geokunststoff-Produkte an der Sonne kurzfristig bis möglicherweise ca. 50°C erwärmt haben. Die erhöhten Temperaturen können in Abhängigkeit der verarbeiteten Materialien einen Einfluss auf die Dehnfähigkeit haben. Die Zugfestigkeit wird dadurch jedoch kaum beeinflusst. Eine erhöhte Dehnung kann auch das Arbeitsvermögen erhöhen und damit die Beschädigungsanfälligkeit reduzieren.

3.3.2 Bodenkennwerte

Um den Einfluss des Schüttmaterials auf die Einbaubeschädigung zu untersuchen, wurden die drei Schüttmaterialien Sand, Kies und Schotter gemäss Tab. 55 verwendet. Zur Kontrolle der Verdichtung und der Untersuchung der Eigenschaften der Schüttmaterialien wurden verschiedene Versuche vor Ort sowie im Labor durchgeführt.

- Versuche vor Ort während bzw. nach Verdichtung:
 - Deformationsmessungen während dem Verdichten (Nivellement)
 - Plattendruckversuche
 - Messungen mit dem Isotopengerät
 - Sandersatz-Methode
- Laborversuche am Institut für Geotechnik, ETH Zürich:
 - Siebanalyse
 - Proctor-Standard-Versuch
 - Bestimmung Wassergehalt
 - Pyknometeranalyse

Methode	Eigenschaft	Sand (SP) Rundkorn 0 ... 4 mm	Wandkies (GP-GM) Rundkorn 0 ... 60 mm	Schotter (GP-GM) Planiekies 0 ... 22 mm
Plattendruckversuch	M_{E1} [MN/m ²]	35.3	40.3	46.9
	M_{E2} [MN/m ²]	89.8	129.8	122.6
	E_{v1} [MN/m ²]	26.2	31.5	31.9
	E_{v2} [MN/m ²]	97.0	115.2	160.6
Isotopensonde	w [%M]	5.6	6.7	3.3
	γ_d [kN/m ³]	17.4	20.2	20.9
	γ [kN/m ³]	18.4	21.5	21.6
	γ_{opt} [kN/m ³]	19.9	22.5	23.1
Proctor-Standard-Versuch	γ / γ_{opt} [%]	92.5	95.6	93.5

Tab. 55 Eigenschaften der Schüttmaterialien (Zusammenfassung).

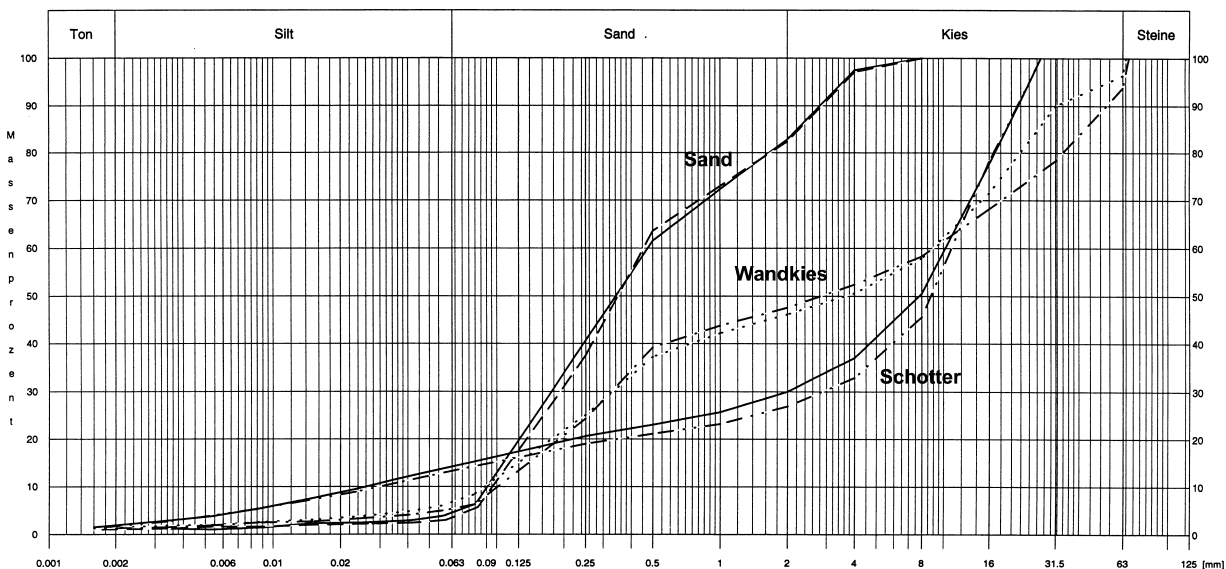


Abb. 67 Korngrössenverteilung der Schüttmaterialien. Aufgetragen ist der Siebdurchgang (in Masseprozent) gegen den Korndurchmesser im logarithmischen Massstab.

3.3.2.1 Korngrößenverteilung

Wichtig für die Bodeneigenschaften ist die Korngrößenverteilung, die durch die Kornverteilungskurve charakterisiert wird. Die Bestimmung erfolgt durch Siebung des Grobanteiles (Siebanalyse nach SN 670 810, 1985 für Korndurchmesser $\geq 0,1$ mm) und durch Schlämmen des Feinanteiles (Schlammanalyse nach SN 670 816, 1989 für Korndurchmesser $< 0,1$ mm) von Bodenproben. Die Kornverteilungskurven der drei Materialien sind in Abb. 67 dargestellt. Der Wandkies enthielt teils deutlich grössere Komponenten als 60 mm, welche soweit möglich von Hand aussortiert wurden.

3.3.2.2 Deformationsmessungen während dem Verdichten (Nivellement)

Zur Kontrolle der Verdichtung der Schüttung wurden in der mittleren Achse jedes Feldes 5 Nägel in Abständen von je 2 m eingesteckt, deren Setzungen mit einem Nivelliergerät nach je 2 Walzdurchgängen ermittelt wurden. Abb. 68 zeigt das Beispiel einer Deformationsmessung beim Verdichten.

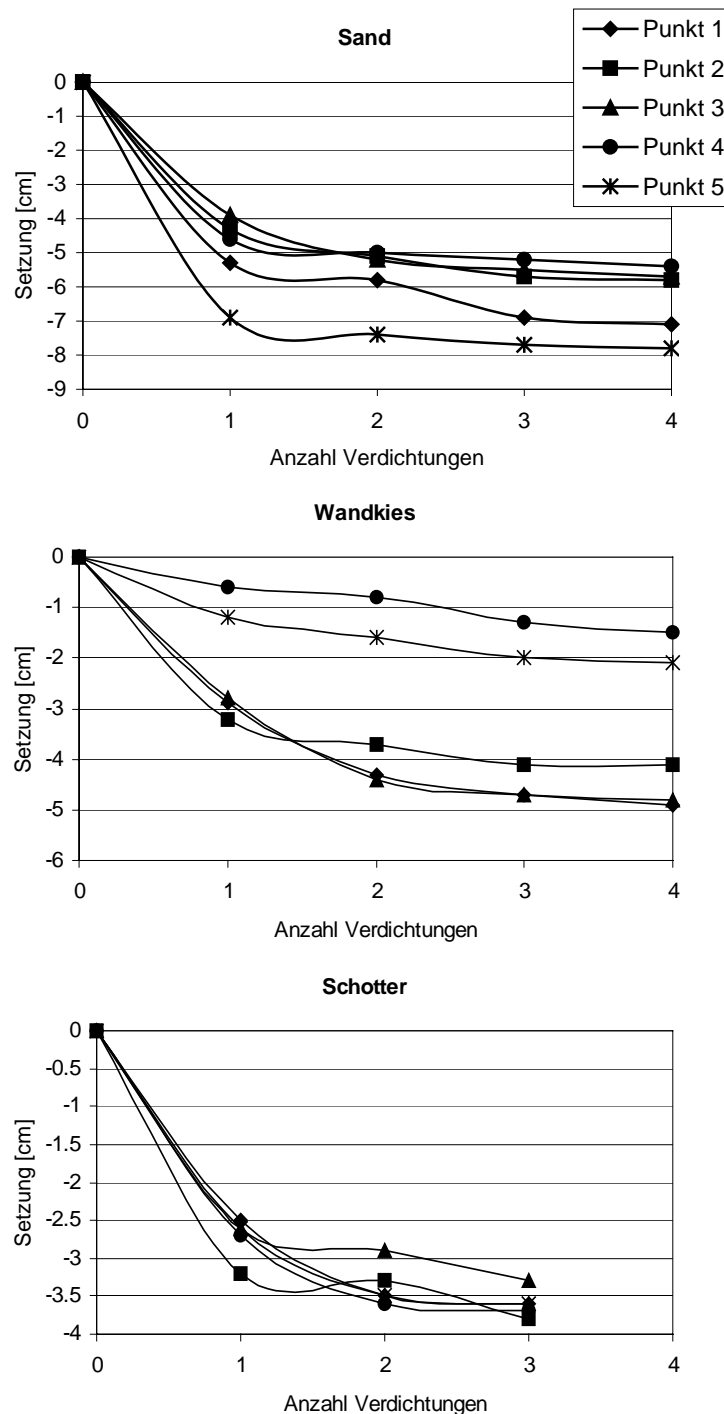


Abb. 68 Typisches Setzungs-Verhalten beim Verdichten (Deformationsmessung vom 12.07.2000).

Die Nullmessung erfolgte im unverdichteten Zustand. Die Schüttung galt als genügend verdichtet, wenn die Setzungsdifferenz von der letzten zur vorletzten Messung weniger als 2 mm betrug.

3.3.2.3 Plattendruckversuche

Die Zusammendrückung eines Bodens wird in der Regel mit dem Plattendruckversuch nach SN 670 317 (1998) bestimmt. Gemessen wird die Setzungen einer stufenweise be- und entlasteten kreisförmigen Platte mit einer Fläche von 700 cm² (Abb. 69). Die mittleren Normalspannungen unter der Platte und die zugehörigen Setzungen der einzelnen Laststufen werden in einem Drucksetzungsdiagramm dargestellt (Abb. 70).

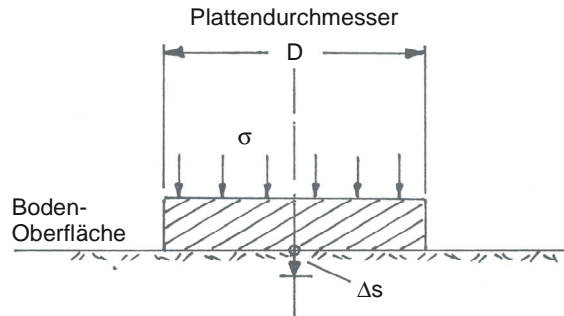


Abb. 69 Plattendruckversuch: Eine kreisrunde Platte wird mit zunehmender Normalspannung belastet. Gemessen wird die Einsenkung.

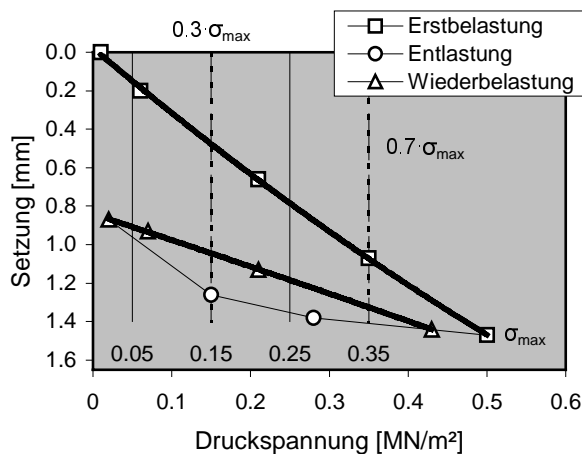


Abb. 70 Drucksetzungsdiagramm: Bestimmung der Verformungsmoduli am Beispiel des Planums (Plattendruckversuch vom 17.07.2000).

Die Verformungsmoduli E_V und M_E sind Kenngrößen für die Verformbarkeit des Bodens. Sie basieren auf verschiedenen Berechnungsmodellen und sind wie folgt definiert (der E_V -Wert darf nicht einfach als 0,75 mal M_E berechnet werden, da die Auswertemethoden für die beiden Plattendruckwerte grundsätzlich verschieden sind):

$$E_V = 0,75 \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \cdot D \quad [\text{MN/m}^2]$$

$$M_E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \cdot D \quad [\text{MN/m}^2]$$

$\Delta\sigma$ [MN/m²] Differenz der von der Platte auf den Boden übertragenen Normalspannung zwischen den zwei Laststufen σ_1, σ_2

D [mm] Plattendurchmesser

Δs [mm] Differenz der Setzungen der Platte bei Änderung der Normalspannung um $\Delta\sigma$

Der Verformungsmodul E_V wird anhand der Setzungen bei den zwei Laststufen $0,3 \cdot \sigma_{\max}$ und $0,7 \cdot \sigma_{\max}$ bestimmt (σ_{\max} = maximale mittlere Normalspannung der Erstbelastung), M_E anhand der Belastungsstufen gemäss Tab. 56. Die jeweiligen Setzungswerte ermittelt man aus den geglätteten Drucksetzungslinien (Abb. 70).

	σ_1 [MN/m ²]	σ_2 [MN/m ²]
Untergrund und Unterbau	0,05	0,15
Fundationsschicht	0,15	0,25
Tragschicht	0,25	0,35

Tab. 56 Laststufen (σ = von der Platte auf den Boden übertragene Normalspannung,) für die Berechnung von M_E (SN 670 317, 1998).

Die Verformungsmoduli der Erstbelastung werden mit dem Index 1 (M_{E1} , E_{V1}), diejenige der Wiederbelastung mit dem Index 2 (M_{E2} , E_{V2}) bezeichnet (Abb. 70). Das Verhältnis M_{E2}/M_{E1} kann sehr gut zur Beschreibung und Quantifizierung des Verdichtungszustandes herangezogen werden.

Zur Ermittlung der $M_{E1,2}$ -Werte bzw. der $E_{V1,2}$ -Werte an der Oberfläche der verdichteten Schüttungen wurde in den Versuchsserien mit unbewitterten Proben pro Schüttmaterial je ein Plattendruckversuch und in den Serien mit bewitterten Proben je zwei Plattendruckversuche nach SN 670 317 (1998) durchgeführt (Abb. 71). Die Plattendruckversuche vom 10.07.2000 wurden nicht ausgewertet, da die Deformationsmessuhren unsachgemäß angebracht worden sind. In Tab. 57 sind die Versuchsergebnisse zusammengestellt.

Datum	M_{E1} [MN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]
Planum						
17.07.2000	92.0	220.3	2.40	74.9	157.3	2.10
Sand						
11.07.2000	38.4	135.5	3.53	32.5	122.5	3.77
12.07.2000	31.2	105.3	3.38	22.7	89.7	3.95
13.07.2000	(14.2)	(59.1)	(4.16)	(12.0)	(48.3)	(4.03)
14.07.2000	31.9	89.5	2.80	28.5	83.4	2.92
14.08.2000	32.8	118.6	3.61	22.0	95.0	4.32
17.08.2000	42.1	123.1	2.92	25.3	94.4	3.73
Durchschnitt	35.3	89.8	3.25	26.2	97.0	3.74
Wandkies						
11.07.2000	25.2	102.5	4.07	23.1	94.5	4.08
12.07.2000	24.6	93.9	3.81	20.9	100.9	4.83
13.07.2000	26.8	84.5	3.15	18.2	72.2	3.98
14.07.2000	35.8	116.8	3.26	29.1	104.6	3.59
14.08.2000	67.2	197.2	2.93	49.8	157.8	3.17
17.08.2000	62.3	183.7	2.95	47.7	160.9	3.38
Durchschnitt	40.3	129.8	3.36	31.5	115.2	3.84
Schotter						
11.07.2000	59.6	126.1	2.12	42.2	101.4	2.40
12.07.2000	32.0	108.4	3.39	26.1	101.1	3.87
13.07.2000	29.1	91.8	3.15	22.4	76.9	3.44
14.07.2000	40.4	100.1	2.48	30.6	81.0	2.65
14.08.2000	55.3	149.5	2.70	39.8	117.0	2.94
15.08.2000	64.1	141.3	2.20	50.3	143.2	2.85
15.08.2000	47.1	109.7	2.33	27.4	104.0	3.79
16.08.2000	55.1	128.5	2.33	31.5	114.5	3.64
16.08.2000	48.8	121.2	2.48	24.9	109.7	4.40
17.08.2000	37.7	149.8	3.98	24.2	117.5	4.86
Durchschnitt	46.9	122.6	2.72	31.9	160.6	3.48

Tab. 57 Plattendruckversuche nach SN 670 317 (1998).

Bei den Feldversuchen wurde ein verhältnismässig leichtes Verdichtungsgerät eingesetzt, wie es vor allem bei kleineren Geokunststoff-bewehrten Stützkonstruktionen verwendet wird. Die damit erreichten Verdichtungswerte (Tab. 57) entsprechen durchaus den üblichen Anforderungen an solche Bauwerke.



Abb. 71 Plattendruckversuch.

3.3.2.4 Verdichtungsversuch (Proctor-Standard-Versuch)

Für jedes der drei Schüttmaterialien wurde ein Proctor-Standard-Versuch nach SN 670 330 (1989) durchgeführt (Abb. 72, Abb. 73, Abb. 74). In Tab. 58 sind die daraus resultierenden, optimalen Einbauwassergehalte w_{opt} , die Trocken- und Nassraumgewichte $\gamma_{d,opt}$ bzw. γ_{opt} sowie das Verhältnis γ zu γ_{opt} zusammengestellt, wobei die Werte für γ aus Tab. 59 stammen und mit Hilfe der Troxler-Sonde ermittelt wurden.

		Sand	Wandkies	Schotter
w_{opt}	[%]	11.8	7.5	6.3
$\gamma_{d,opt}$	[kN/m ³]	17.8	20.9	21.7
γ_{opt}	[kN/m ³]	19.9	22.5	23.1
γ / γ_{opt}	[%]	92.5	95.6	93.5

Tab. 58 Ergebnisse Proctor-Standard-Versuch.

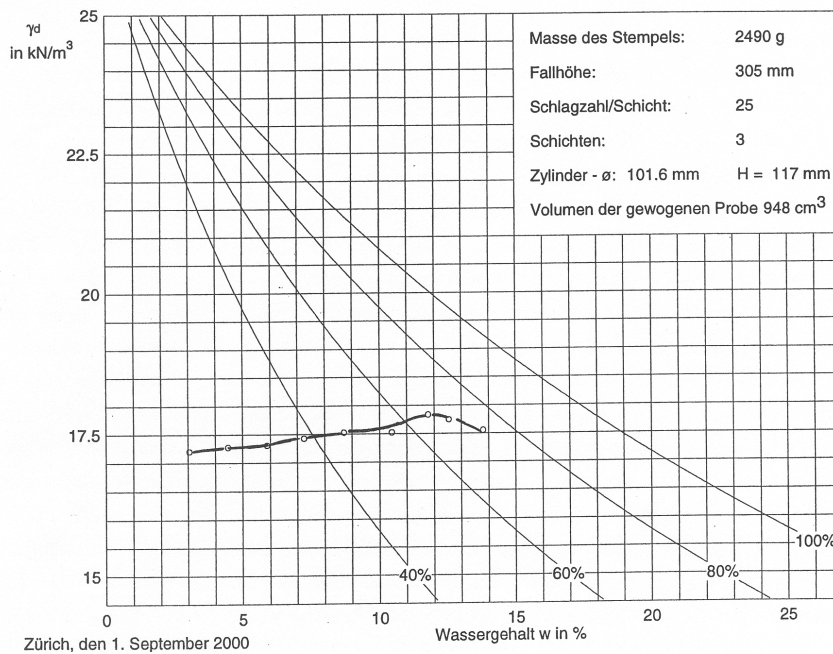


Abb. 72 Verdichtungsversuch Mauer sand.

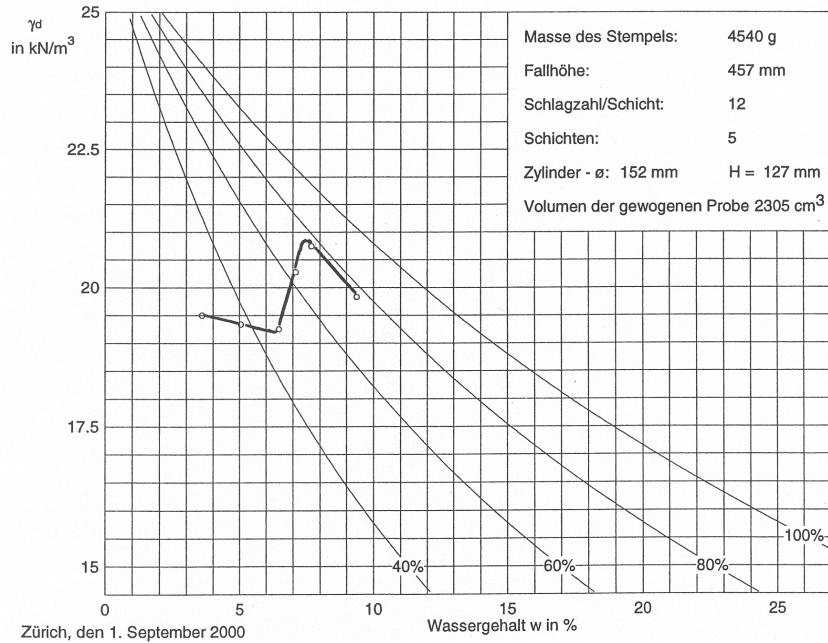


Abb. 73 Verdichtungsversuch Wandkies.

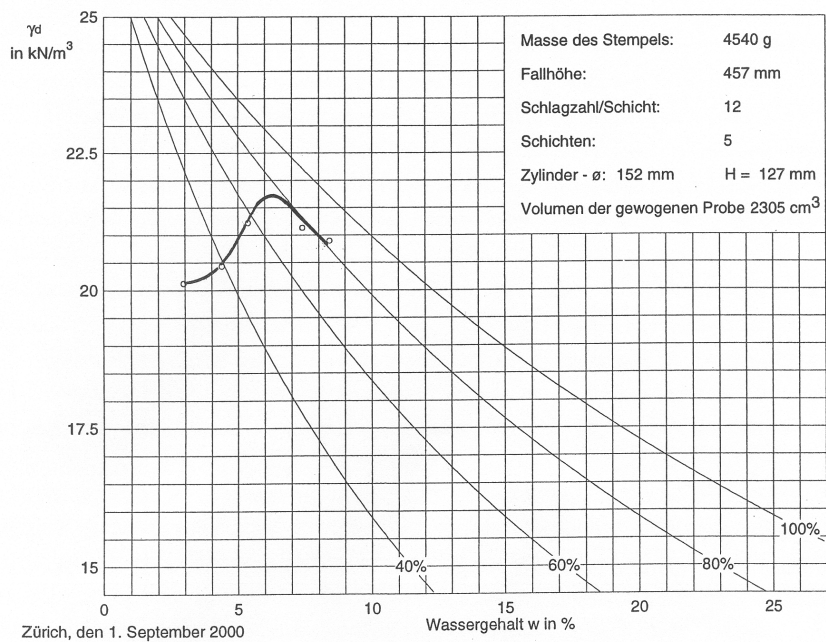


Abb. 74 Verdichtungsversuch Schotter.

3.3.2.5 Raumgewichtsbestimmung

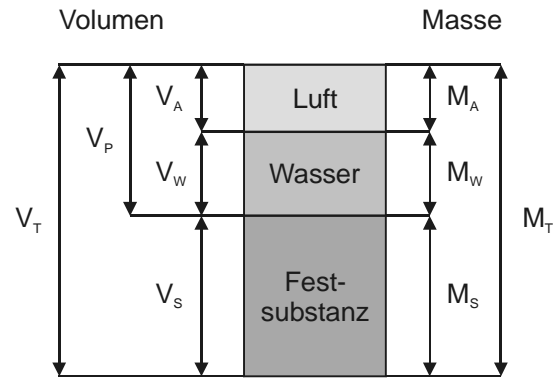
Es werden die folgenden Raumgewichte (Gewicht pro Volumeneinheit = Dichte mal Erdbeschleunigung g) unterschieden (Abb. 75):

Gewicht von Bodenmaterial und Porenwasser pro Volumeneinheit:

$$\text{Feuchtraumgewicht} \quad \gamma = \frac{M_T}{V_T} \cdot g \quad [\text{kN/m}^3]$$

Gewicht von Bodenmaterial (trocken) pro Volumeneinheit:

$$\text{Trockenraumgewicht} \quad \gamma_d = \frac{M_S}{V_T} \cdot g \quad [\text{kN/m}^3]$$



M_S, V_S = Masse, Volumen der Festsubstanz

M_W, V_W = Masse, Volumen des Wassers

M_A, V_A = Masse, Volumen der Luft ($M_A \cong 0$)

V_P = Porenvolumen

M_T, V_T = Masse, Volumen total

Abb. 75 Masse- und Volumenverhältnisse (SN 670 335, 1989).

Raumgewichtsmessungen nach SN 670 335 (1989) können am einfachsten und schnellsten mit der Isotopsonde ausgeführt werden (Abb. 76). Das Raumgewicht γ , das Trockenraumgewicht γ_d sowie der Wassergehalt w des Schüttmaterials und des Planums wurden mit Hilfe des Isotopengerätes „Troxler Mod. 3411 B“ gemessen (Tab. 59).

Datum	γ [kg/m ³]	w [%]	γ_d [kg/m ³]
Planum			
11.07.2000	2287	8.4	2112
17.08.2000	2330	3.4	2254
Durchschnitt	2309	5.9	2183
Sand			
11.07.2000	1791	5.8	1702
12.07.2000	1851	6.8	1734
13.07.2000	1820	6.1	1704
14.07.2000	1896	7.9	1757
14.08.2000	1856	3.8	1788
17.08.2000	1830	3.4	1770
Durchschnitt	1841	5.6	1743
Wandkies			
11.07.2000	2202	7.9	2042
12.07.2000	2285	10.3	2071
13.07.2000	2089	6.3	1964
14.07.2000	2161	7.7	2006
14.08.2000	2107	4.1	2024
17.08.2000	2059	3.9	1983
Durchschnitt	2151	6.7	2015
Schotter			
11.07.2000	2183	4.1	2097
12.07.2000	2167	4.3	2078
13.07.2000	2198	3.9	2116
14.07.2000	2203	5.3	2092
14.08.2000	2148	2.4	2099
15.08.2000	2111	2.6	2056
16.08.2000	2107	2.2	2063
17.08.2000	2190	1.7	2153
Durchschnitt	2163	3.3	2094

Tab. 59 Mittelwerte der Raumgewichtsmessungen mit der Isotopsonde.



Abb. 76 Messungen mit der Isotopsonde.

In den Versuchsreihen mit unbewitterten Proben wurden in jedem Feld I bis III (pro Schüttmaterial) in der Regel je 8 Messungen durchgeführt. Die Standorte der Messungen waren gleichmässig über jedes Feld verteilt. In den Versuchsreihen mit bewitterten Proben wurden jeweils pro Geflecht zwei Messungen durchgeführt.

Diese Messwerte können mit den Ergebnissen aus dem Proctor-Standard-Versuch und der Sandersatzmethode in Beziehung gesetzt werden.

3.3.2.6 Sandersatz-Methode

Arbeitsmässig aufwendig, aber von den Geräten her einfach ist die Raumgewichtsbestimmung mit der Sandersatzmethode (Abb. 77): Es wird ein halbkugelförmiges Loch ausgehoben, das mit einem Ersatzstoff (Normsand) verfüllt wird, welches für die Ermittlung des Raumgewichtes des Schüttmaterials mit der Masse des ausgehobenen Materials in Bezug gesetzt werden kann. Aus dem Gewicht des ins Loch fließenden Sandes kann nach vorheriger Eichung das Volumen berechnet werden. Bei feinkörnigen Böden werden dabei bessere Resultate erzielt als bei grobkörnigen.



Abb. 77 Raumgewichtsbestimmung mit der Sandersatz-Methode.

Am 12. Juli 2000 wurden pro Schüttmaterial zwei Sandersatz-Versuche durchgeführt. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Tab. 60 zusammengestellt.

Bodenmaterial	ρ [t/m ³]	γ [kN/m ³]	w [%]	ρ_d [t/m ³]	γ_d [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	S _r [%]
Sand	1.899	18.63	7.82	1.760	17.27	26.5	39.5
	1.793	17.59	7.04	1.680	16.48	26.3	31.4
Wandkies	2.495	24.48	8.49	2.300	22.56	26.4	134.3 *
	2.545	24.97	8.83	2.339	22.95	26.5	153.3 *
Schotter	2.011	19.73	3.71	1.939	19.02	26.6	25.3
	2.063	20.24	4.08	1.982	19.44	26.6	30.1

* physikalisch unmöglich, fehlerhafte Messung

Tab. 60 Resultate der Sandersatz-Versuche.

Der Wandkies hat aufgrund der Auswertung einen Sättigungsgrad von deutlich über 100%, was physikalisch unmöglich ist. Die Gründe für diese unrealistischen Werte könnten folgende sein:

- Grober Messfehler
- Falsche Volumenmessung
- Einfluss der starken Niederschläge

Die durchschnittlichen Trockenraumgewichte γ_d in Sand und Schotter betragen:

- Sand $\gamma_d = 16.9 \text{ kN/m}^3$
- Schotter $\gamma_d = 19.2 \text{ kN/m}^3$

Beim Vergleich der Mittelwerte des Trockenraumgewichtes nach der Sandersatz-Methode mit den Mittelwerten des Trockenraumgewichtes, ermittelt mit Hilfe der Troxler-Sonde, ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen.

3.3.2.7 Wassergehalt Schüttmaterial

In Tab. 61 sind die Ergebnisse (Mittelwerte) der Ermittlung des effektiv vorhandenen Wassergehaltes nach SN 670 340 (1989) aufgeführt. Die Wassergehalte der Schüttmaterialien waren in der zweiten Versuchsperiode bedeutend trockener als in der ersten.

	Sand	Wandkies	Schotter
W_{eff} [%] (12.07.00)	7.4	8.1	4.2
W_{eff} [%] (17.08.00)	3.3	3.9	2.0
ρ_s [kg/m^3]	2690	2690	2710

Tab. 61 Ergebnisse Untersuchung Wassergehalt und Pyknometeranalyse.

3.3.2.8 Pyknometeranalyse

Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes der Festsubstanz ρ_s wurden Pyknometeranalysen nach SN 670 335 (1989) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tab. 61 in Abhängigkeit der Schüttmaterialien zusammengestellt.

3.3.3 Einfluss der Einbaubeanspruchung auf die chemische Beständigkeit

Zum Schutz (und zur mechanischen Stabilisierung) werden insbesondere PET-Gewebe oft mit PVC umhüllt. Die Beschichtung muss dabei so robust sein, dass sie den Einbau schadlos übersteht. Um dies zu testen wurden entsprechende Muster des Feld-Einbauversuches vor und nach dem Einbau in Schotter einer Prüfung auf Hydrolysebeständigkeit unterzogen. Durchgeführt wurde ein Immersionsversuch nach SN 640 550 (1996): 15 Tage bei $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ in 2.5 g/l Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH 12.5.

3.4 Einbausimulation im Labor

ENV ISO 10722-1 (1998) beschreibt ein Verfahren zur Laborsimulation der Einbaubeanspruchung (Abb. 78), bei welchem ein Geokunststoff zwischen zwei Bodenschichten eingebaut und dynamisch belastet wird. Der stabile Prüfkasten aus Metall hat eine Innenabmessung von 300 x 300 mm und besteht aus zwei je 75 mm hohen Teilen.

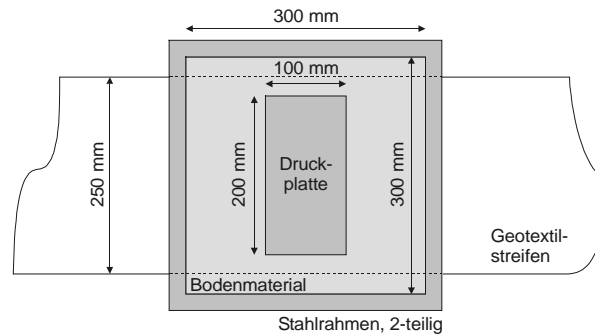


Abb. 78 Prüfanordnung nach ENV ISO 10722-1 (1998) zur Simulation einer Einbaubeschädigung: Ein in Bodenmaterial eingebauter Geokunststoff wird dynamisch belastet und anschliessend auf Eigenschaftsänderungen untersucht.

Für den Versuch wird Bodenmaterial in zwei Schichten bündig in den unteren Teil des Kastens eingebracht, wobei jede Schicht mit einer Auflast von 200 kPa während 60 s verdichtet wird (Abb. 79). 1 x 0.25 m grosse

Geokunststoff-Proben werden zentriert in den Prüfkasten eingebaut und anschliessend mit 75 mm lose eingebrachtem Bodenmaterial überdeckt (Abb. 80, Abb. 81).

Eine steife Belastungsplatte mit einer Abmessung von 100 x 200 mm wird so über dem Prüfkasten positioniert, dass seine Längsseite senkrecht zur Längsseite der Geokunststoffprobe zu liegen kommt (Abb. 78). Auf die Sandwichkonstruktion wird eine sinusförmige zyklische Belastung zwischen 5 und 900 kPa aufgebracht (Abb. 82). Gefordert werden 200 Belastungszyklen bei einer Frequenz von 1 Hz. Nach der Beanspruchung wird eine eventuelle Beschädigung visuell und anhand der prozentualen Festigkeitsabnahme (Zugfestigkeitsprüfung nach EN ISO 10319,1996) beurteilt.



Abb. 79 Verdichtung der unteren Bodenschicht.

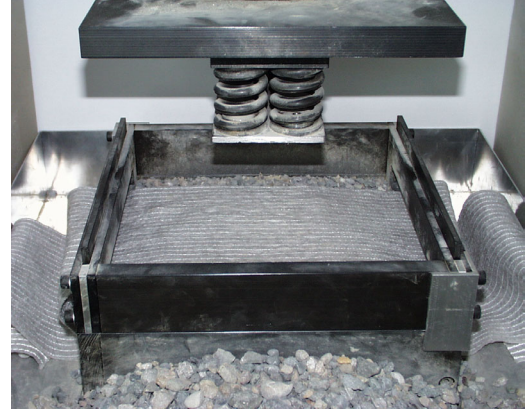


Abb. 80 Einbau der Geokunststoff-Probe.



Abb. 81 Einbringen der oberen Bodenschicht.

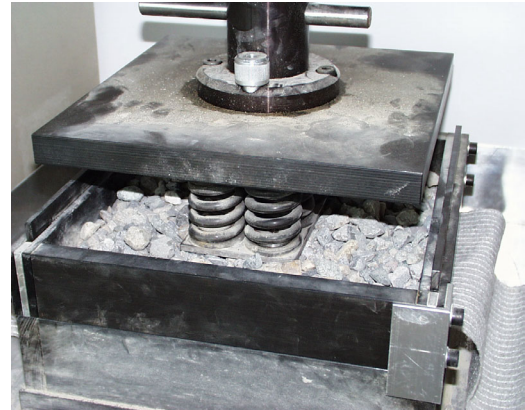


Abb. 82 Zyklische Belastung des Prüfaufbaus.

Die EMPA baute ein Prüfgerät zur Durchführung einer Einbausimulation gemäss europäischem Normvorschlag (Abb. 79 bis Abb. 82). Der Prüfkasten ist so konstruiert, dass die Proben durch ihn nicht eingeklemmt werden. Die Versuchsanordnung wurde in ein Zug- und Druckprüfgerät (Zwick Z100) integriert.

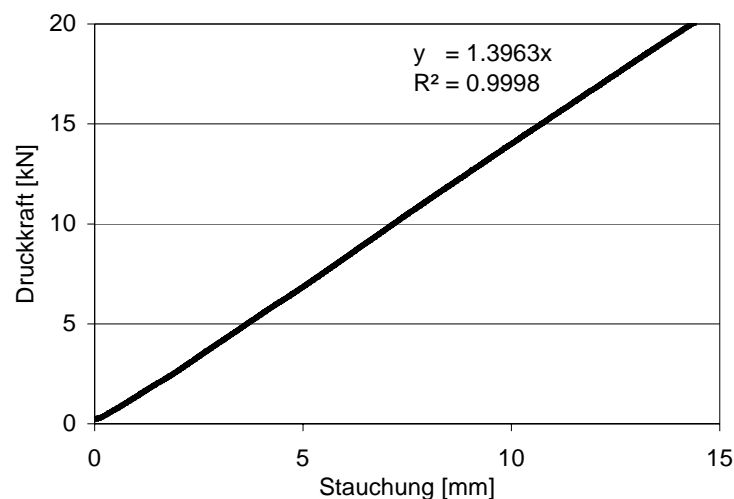


Abb. 83 Kennlinie der zwischengekoppelten Federelemente.

Aus gerätetechnischen Gründen wurde in Abänderung zum europäischen Normvorschlag mit einer Frequenz von 0.5 statt 1 Hz operiert (auch die TU München, welche grosse Erfahrung im Bereich "Einbaubeanspruchung" hat, arbeitet mit dieser Frequenz). Die für Zug-Druck-Prüfgeräte hohen Frequenzen (bei kleinen Deformationen) werden mit zwischengekoppelten, relativ steifen Federelementen erreicht (Federkennlinie siehe Abb. Abb. 83).

Im Standardversuch wird scharfkantiger, gesinterter Korund (Korndurchmesser 5 ... 10 mm) als Bodenmaterial eingesetzt. Es wurde ein entsprechender Bauxitkorund (5 ... 10 mm) der Firma Iepco AG, Höri, beschafft (Härte: Knoop 2090, Mohs 9). ENV ISO 10722-1 (1998) verlangt vom Korund einen Los-Angeles-Koeffizient (LA) von mindestens 1.9. Der Los-Angeles-Versuch nach SN 670 835 (1991) dient der Beurteilung der Widerstandsfähigkeit von Splitt- und Schotterkörnungen gegenüber einer gleichzeitigen Beanspruchung auf Schlag und Abrieb. Der LA-Koeffizient ergibt sich aus dem Verhältnis der Masse der Anteile feiner als 1.6 mm nach dem Los-Angeles-Versuch und der ursprünglichen Masse der Analyseprobe. Für das verwendete Korund wurde durch die EMPA folgender Koeffizient gemessen:

$$LA = 18.5$$

Zur exakteren Vorhersage des Praxisverhaltens sollte das auf der Baustelle anzutreffende Bodenmaterial verwendet werden. Daher wurde in den Versuchen neben dem Korund zusätzlich Sand, Schotter und Wandkies der Feldversuche als Bodenmaterial eingesetzt. Zudem wurden neben der in ENV ISO 10722-1 (1998) vorgeschlagenen Maximalbelastung von 900 kPa auch Versuche mit 450 kPa durchgeführt.

3.5 Kriech- und Zeitstandverhalten

EN ISO 13431 (1999) legt ein Verfahren zur Bestimmung der Zugkriech- und des Zeitstandsverhaltens von Geokunststoffen bei freier Querverformung fest. Die Messproben werden bei konstanten Umgebungsbedingungen mit einer konstanten statischen Zugkraft allmählich belastet, so dass die volle Zugkriechkraft innerhalb von 60 s aufgebracht wird. Die erforderlichen Kräfte hängen von der Messprobenbreite ab.

Zur Bestimmung des Zugkriechverhaltens wird die Längenänderung der Messprobe kontinuierlich aufgezeichnet oder zu bestimmten Zeitintervallen gemessen. Die Kraft wird während einer Dauer von 1000 h aufrechterhalten. Falls die Messprobe vor 1000 h versagt, wird die Zeit bis zum Bruch aufgezeichnet. Die Prüfungen sind bei 5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % oder 60 % der nach EN ISO 10319 (1996) gemessenen Höchstzugkraft durchzuführen. Die Veränderung der Messlänge wird auf $\pm 0,1$ % zu den folgenden Zeitpunkten nach Aufbringen der Kriechzugkraft gemessen:

- 1, 2, 4, 8, 15, 30 und 60 Minuten
- 2, 4, 8 und 24 Stunden
- 3, 7, 14, 21 und 42 Tage (42 Tage = 1008 h)

Zur Bestimmung des Zeitstandsversagens wird die Zugkraft beibehalten, bis die Messprobe reisst. Die Prüfung wird bei vier Zugkräften zwischen 50 % und 90 % der nach EN ISO 10319 (1996) gemessenen Höchstzugkraft durchgeführt. Der Zeitpunkt, an dem der Zeitstandsversagen erfolgt, wird festgehalten.

Die EMPA führte Kriech- und Zeitstandsversuche bei Raumtemperatur und bei erhöhten Temperaturen durch. Für die Messungen bei Raumtemperatur (20 °C) wurde die Kriechversuchseinrichtung nach alter Schweizer Norm wieder aufgebaut und in Betrieb genommen. Die entsprechende Messvorrichtung besteht aus zwei Klemmen, die parallel in einer Ebene liegen und in denen ein 100 mm breiter Geokunststoff fixiert werden kann. Die obere Klemme ist fest, die untere Klemme kann durch Anhängen von Massen mit beliebiger, konstanter Kraft versehen werden. Die Kriechversuche bereiteten aber Probleme, da die relativ einfachen Klemmen nicht für die hohen Kräfte konzipiert sind, welche bei 50 und mehr % der Zugfestigkeit auftreten. Die Proben rissen oft bereits beim Aufbringen der Last (Klemmenrisse).

Zur Prüfung des Kriech- und Zeitstandsverhaltens bei erhöhten Temperaturen wurde ein Zugprüfgerät (Zwick Z100) mit zugehöriger Temperierkammer eingesetzt. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit wurden für die Prüfserien wenn immer möglich Proben verwendet, die in Produktionsrichtung aus den gleichen Zuelementen bestanden (identischer Strang in Längsrichtung). Die Kurzzeit-Zugfestigkeit wurde ebenfalls an diesen Proben vorgenommen. Von den Geotextilien wurden im Allgemeinen 5 cm breite Proben zugeschnitten. Bei den Geogittern wurde jeweils nur ein Längselement eingespannt. Die Einspannlänge betrug 250 mm oder eine der Gitterstruktur angepasste Länge (Muster Nr. 29: 270 mm). Um Klemmenrisse vorzubeugen, wurden heikle Proben zwischen Kartonabschnitten eingespannt.

3.6 Versuche zur Ermittlung der Witterungsbeständigkeit

Die Witterungsbeständigkeit wird nach EN 12224 (2000) im einem Bewitterungsgerät mit einer definierten Kombination von Leuchtstofflampen geprüft. Die Proben sind einer kontinuierlichen Bestrahlung von total 50 MJ/m² auszusetzen, welche beim Global-UV-Gerät nach 320 Stunden erreicht wird. Die Bestrahlung ist kombiniert mit einem Nass-Trocken-Zyklus von 1 Stunde Besprühen und 5 Stunden Trocknung bei einer Schwarzstandardtemperatur von 50°C.

Anforderung an den Geokunststoff	Restfestigkeit nach Bewitterung (50 MJ/m ²)	max. zulässige Zeit bis Überdeckung
Langzeitfestigkeit erforderlich (insbes. Bewehren)	> 80 %	1 - 4 Monate *
	60 - 80 %	2 Wochen
	< 60 %	sofort überdecken
Langzeitfestigkeit nicht erforderlich (z.B. Trennen, Filtern)	> 60 %	1 - 4 Monate *
	20 - 60 %	2 Wochen
	< 20 %	sofort überdecken

* je nach Ort und Jahreszeit

Tab. 62 In CR ISO 13434 (1998) festgelegte Anforderungen an die anwendungsspezifische Witterungsbeständigkeit von Geokunststoffen.

Um sicherzustellen, dass Geokunststoffe eine kurze Zeit ohne Überdeckung schadlos überstehen, schreibt SN 640 550 (1996) eine Prüfung nach EN 12224 (2000) mit einer auf 60 Stunden verkürzten Bestrahlungszeit vor. Dies entspricht etwa einer 2-wöchigen Exposition im Freien. Diese Prüfergebnisse dürfen aber nicht zur Auswertung gemäss Tab. 62 herangezogen werden.

3.6.1 Exposition vorgängig zum Einbau

Beim Standort EMPA St. Gallen wurden im Juli/August 2000 von jedem Muster gemäss Tab. 53 (ausser Nr. 32) je eine Probe (ca. 3.2 x 1.7 m) für den nachträglichen Einbau in Niederbüren und eine Probe (ca. 60 x 60 cm) für Streifenzugversuche im Labor während 14 Tage und 6 Std. horizontal exponiert (Abb. 84).



Abb. 84 Exposition der Muster auf dem Kiesplatz "im Moos", St. Gallen, 630 m ü M (27.07.00 - 10.08.00).

In unmittelbarer Nähe der Versuchsfläche wurde eine kalibrierte Sonde (Pyranometer CM 21) zur kontinuierlichen Messung der Globalstrahlung eingesetzt. Die Daten wurden mit einer Zeitauflösung von 1 Minute elektronisch erfasst. Zum Vergleich wurden die Tages-Messwerte der durch die SMA-Wetterstation Notkersegg in St. Gallen ermittelten Globalstrahlung herangezogen (Tab. 63). Während der Exposition wurden total 80 Stunden Sonnenscheindauer und 216 mm Niederschlag registriert. Die maximale Tagestemperatur betrug im Mittel 19 °C und die mittägliche relative Luftfeuchtigkeit im Mittel 76 %.

Zum Vergleich mit Laborbedingungen wird die Bestrahlung sinnvollerweise nur für den UV-Bereich < 400 nm angegeben. Polymere Werkstoffe reagieren ohnehin nur auf diesen Bereich der Sonnenstrahlung empfindlich. Dieser Strahlungsanteil beträgt im Sommerhalbjahr ca. 5.5 % der Globalstrahlung (in MJ/m²). Die "im Moos" exponierten Proben erfuhren somit eine UV-Bestrahlung von ca. 12 MJ/m². Dies ist eine um ca. 28 % stärkere Strahlungsbeanspruchung als diejenige gemäss Bewitterungsprüfung nach SN 640 550 (1996).

Tag (Datum)	Globalstrahlung [MJ/m ²]	
	Messsonde vor Ort	SMA-Wetterstation
27.07.00 ab 10 ³⁰	18.7	19.1
28.07.00	10.3	11.0
29.07.00	11.4	11.7
30.07.00	15.9	15.7
31.07.00	28.0	27.3
01.08.00	27.6	26.7
02.08.00	11.9	12.6
03.08.00	4.6	3.9
04.08.00	12.0	11.5
05.08.00	3.4	2.1
06.08.00	2.3	1.8
07.08.00	13.5	12.5
08.08.00	17.8	18.9
09.08.00	25.9	24.7
10.08.00 bis 16 ³⁰	19.9	18.9
Summe	223.1	218.5

Tab. 63 Messresultate der Referenzsonde Pyranometer CM 21 in unmittelbarer Nähe der Versuchsfläche, verglichen mit den Tages-Messwerte der durch die Wetterstation Notkersegg in St. Gallen ermittelten Globalstrahlung.

Während der Exposition wurden auch die 3 Globalstrahlungs-Messgeräte des Freibewitterungsstandes der EMPA in St. Gallen zur Datenerfassung verwendet. Für die Vergleichsmessung wurden sie in horizontaler Lage eingesetzt, um anschliessend in die eigentliche Ausrichtung gebracht zu werden. Resultate siehe Tab. 64 und Abb. 85.

Messgerät	Ausrichtung (standardmässig)	Tages-Globalstrahlung
Sonde Nr. 1	horizontal	24.9 MJ/m ²
Sonde Nr. 2	45° gegen Nordosten geneigt	25.3 MJ/m ²
Sonde Nr. 3	45° gegen Nordwesten geneigt	26.1 MJ/m ²
Referenzsonde	horizontal	27.6 MJ/m ²

Tab. 64 Vergleich der Messresultate der 3 Globalstrahlungssonden der Freibewitterungsstation EMPA SG mit der kalibrierten Messsonde Pyranometer CM 21 am Stichtag 1. August 2000. Für die Vergleichsmessung wurden alle Sonden horizontal ausgerichtet.

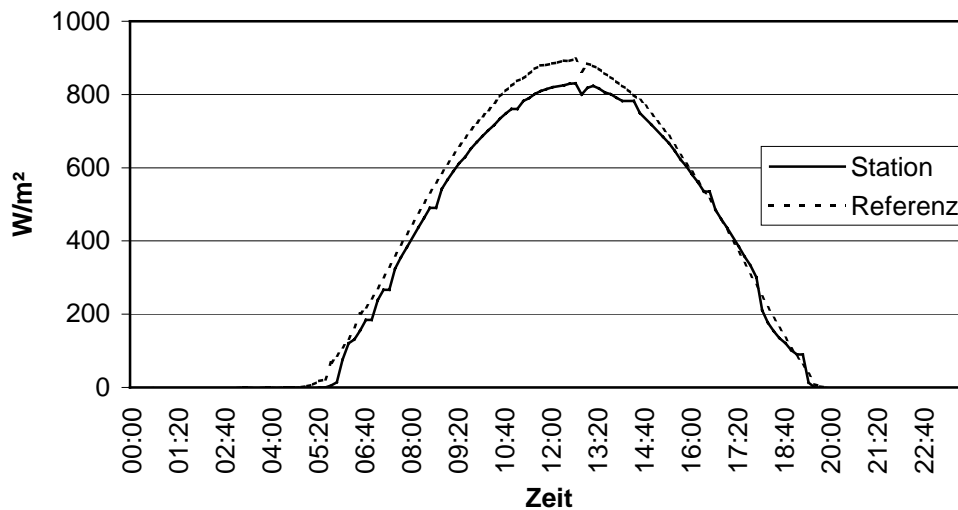


Abb. 85 Vergleich des Mittelwertes der Messresultate der 3 Globalstrahlungssonden der Freibewitterungsstation EMPA SG ("Station") mit der kalibrierten Messsonde Pyranometer CM 21 ("Referenz") am Stichtag 1. August 2000. Für die Vergleichsmessung wurden alle Sonden horizontal ausgerichtet.

3.6.2 Freibewitterungen

Im Freibewitterungsstand der EMPA St. Gallen (630 m ü M, Ausrichtung Südwest, Neigung 45°, s. Abb. 86) wurden zwei Freibewitterungsversuche durchgeführt:

- "Winter": vom 06.10.2000, 14:00 bis 10.01.2001, 10:00 (Dauer: 95 Tage und 20 Std.)
- "Sommer": vom 25.04.2001, 10:30 bis 09.11.2001, 10:30 (Dauer: 198 Tage)



Abb. 86 Exposition der Muster im Freibewitterungsstand der EMPA St. Gallen.

Von jedem Muster gemäss Tab. 53 (ausser Nr. 10 und - im Sommer 2001 - Nr. 7) wurde je eine Probe (ca. 60 x 60 cm) für Streifenzugversuche im Labor hergestellt (geprüft wurde nur die Produktionsrichtung). Die Proben wurden z.T. abgenäht, mit Ösen versehen und auf 4 Gitter (2 x 1 m) aus rostfreiem Stahl befestigt. Von Muster Nr. 6, 8 und 37 wurden je 3 Proben hergestellt und übereinander plaziert, um den Schutzeffekt einzelner Geotextillagen abschätzen zu können. Im Sommer 2001 wurden zusätzlich unter Spannung stehende Proben exponiert.

3.6.2.1 Bestrahlung

Während der Exposition wurden ein Globalstrahlungs-Messgerät sowie weitere Überwachungseinrichtungen des Freibewitterungsstandes der EMPA St. Gallen zur Datenerfassung verwendet. Die Messergebnisse sind Tab. 65 zu entnehmen.

Monat	Globalstrahlung [MJ/m ²]	Niederschlag [mm]	mittl. Luft- temperatur [°C]	mittl. rel. Feuchte [%]
Winter 00/01				
Oktober (ab 06.10.)	88.3	64.9	8.0	89.6
November	68.1	95.4	3.8	84.8
Dezember	34.5	27.6	1.9	85.5
Januar (bis 10.01.)	3.8	54.1	0.4	87.9
Summe/mw	194.7 (Σ)	242.0 (Σ)	2.8 (mw)	69.6 (mw)
Sommer 01				
April (ab 25.04.)	81.5	2.7	9.8	66.8
Mai	528.2	93.4	13.7	74.4
Juni	530.0	229.2	13.5	74.0
Juli	564.0	102.6	17.1	73.1
August	470.5	97.2	17.3	78.1
September	207.7	170.5	9.7	83.2
Oktober	190.1	48.8	11.0	88.1
November (bis 08.11.)	22.3	21.0	4.1	87.8
Summe/mw	2595.3 (Σ)	766.4 (Σ)	10.8 (mw)	69.6 (mw)

Tab. 65 Daten der Freibewitterungsstation EMPA SG.

Die Messwerten der einige km entfernten Wetterstation Notkersegg (Tab. 66) dienen zur Validierung der bei der Freibewitterungsstation gewonnenen Wetterdaten.

Monat	Globalstrahlung [MJ/m ²]	Niederschlag [mm]	Sonnenschein- dauer [h]	mittl. Luft- temperatur [°C]	mittl. rel. Feuchte [%]
Winter 00/01					
Oktober (ab 06.10.)	130.3	60.7	42.9	9.2	84
November	130.9	98.6	73.5	5.4	76
Dezember	90.4	23.1	51.4	4.0	73
Januar (bis 10.01.)	19.7	54.9	8.1	2.3	79
Summe/mw	371.3 (Σ)	237.3 (Σ)	175.9 (Σ)	4.2 (mw)	62.4 (mw)
Sommer 01					
April (ab 25.04.)	91.9	5.1	29.5	10.6	63
Mai	579.5	91.2	206.8	14.3	70
Juni	577.4	231.3	195.2	13.9	71
Juli	605.9	113.6	234.9	17.5	71
August	524.1	112.8	223.1	18.0	73
September	253.8	188.2	68.0	10.3	82
Oktober	261.9	59.8	142.9	13.0	77
November (bis 08.11.)	45.8	25.6	30.2	5.6	65
Summe/mw	2941.3 (Σ)	828.6 (Σ)	1131.6 (Σ)	11.6 (mw)	63.7 (mw)

Tab. 66 Daten der Wetterstation Notkersegg in St. Gallen.

Die beim Freibewitterungsstand gemessene Globalstrahlung betrug:

- Winter: **194.7 MJ/m²**
- Sommer: **2594 MJ/m²**

Zum Vergleich mit Laborbedingungen wird die Bestrahlung für den Bereich < 400 nm angegeben. Dieser Strahlungsanteil beträgt im Winterhalbjahr ca. 5 %, im Sommerhalbjahr ca. 5.5 % der Globalstrahlung. Die im Freibewitterungsstand der EMPA exponierten Proben erfuhren somit eine Bestrahlung < 400 nm von ca.:

- Winter: **9.7 MJ/m²**
- Sommer: **143 MJ/m²**

Die Wintersituation entsprach somit einer um ca. 3 % stärkeren Strahlungsbeanspruchung als diejenige gemäss Bewitterungsprüfung nach SN 640 550 (1996). Die Sommersituation dagegen ist mit einer etwa dreifachen Strahlungsbeanspruchung gemäss EN 12224 (2000) zu vergleichen.

3.6.2.2 Spannungseinfluss

Um den Einfluss einer Zugspannung auf die strahlungsinduzierte Alterung zu ermitteln, wurden je 2 Streifen der Muster gemäss Tab. 67 auf 25 % ihrer Zugfestigkeit verdehnt (Produktionsrichtung) und in einem Spannrahmen aus rostfreiem Stahl (Einspannlänge 200 mm, siehe Abb. 87) fixiert. Die Anzahl gespannter Zuelemente und die aufgebrachtene Spannkraft sind aus Tab. 67 ersichtlich.

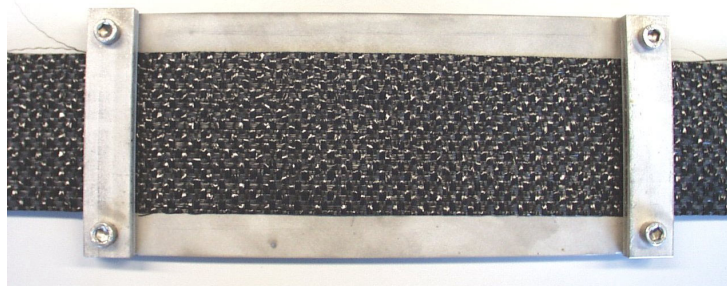


Abb. 87 Spannrahmen mit eingeklemmter Probe.

Muster Nr.	2	4	13	15	19	20	22	28	29	30
Anzahl Zuelemente	5 cm	5 cm	2 Stege	5 cm	2 Stege	12 Fäden	2 Stege	2 Stege	3 Stege	6 Fäden
Zugkraft [N]	900	678	936	490	724	737	2188	876	1070	537
Vorspannung [N]	36	27	37	20	29	29	88	35	43	21

Tab. 67 Zugspannung der Streifen in den Spannrahmen.

Die Streifen wurden auf einem Zugprüfgerät (Instron 4501) mit unten angebrachter Kraftmessdose (kN-Kraftbereich) wie folgt unter Spannung gebracht:

- Die Streifen wurden mit einer Einspannlänge von 250 mm und einer Verformungsgeschwindigkeit von 500 N/min bis zum Erreichen der Zugkraft gemäss Tab. 67 verdehnt. Anschliessend wurde die Zugkraft konstant gehalten (Kraftregelung).
- Der Spannrahmen wurde eingesetzt, die obere Klemme fest zugezogen und die untere Klemme lose angeschraubt.
- 5 Minuten nach Beginn der Verdehnung wurde das Zugprüfgerät gestoppt und die untere Klemme fest angezogen.

Die unter Spannung stehenden Proben wurden der Sommer-Bewitterung gemäss Abschnitt 3.6.2.1 unterzogen. Nach der Bewitterung wurde das Kraft-Dehnungs-Verhalten der Streifen wie folgt geprüft (Kraft-Weg-Verlauf siehe Abb. 88):

- Die Streifen wurden im eingespannten Zustand im Zugprüfgerät eingeklemmt (Einspannlänge 250 mm) und die Kraftanzeige auf Null gestellt (Kraftmessdose unten). Mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 500 N/min wurde der Streifen bis zum Erreichen der Zugkraft gemäss Tab. 67 verdehnt.
- Die Zugkraft wurde 5 Minuten (nach Ende der Verdehnung) konstant gehalten (Kraftregelung). Anschliessend wurde das Zugprüfgerät gestoppt und der Spannrahmen entfernt.
- Nach einer 5-minütigen Pause wurde der Streifen mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 10 mm/min entlastet (Klemmen zusammenfahren), bis eine Zugkraft von 1 % der Zugfestigkeit (Vorspannung gemäss Tab. 67) erreicht wurde. Anschliessend wurde der Streifen mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 100 mm/min bis zum Bruch gedehnt und das Kraft-Dehnungs-Diagramm aufgezeichnet.

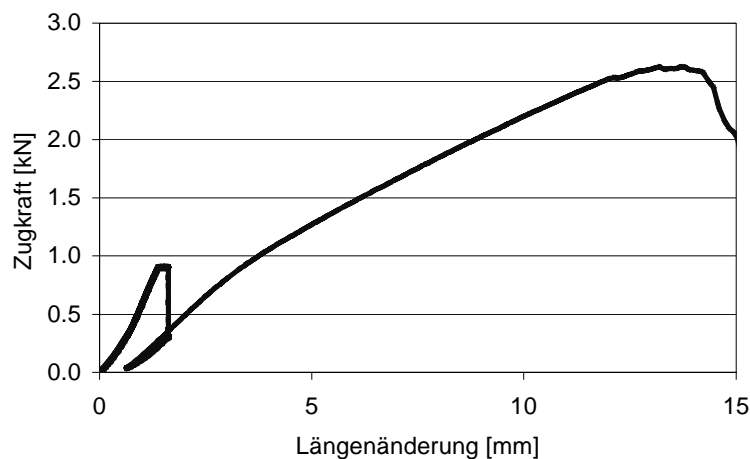


Abb. 88 Kraft-Weg-Verlauf bei Entnahme aus Spannrahmen am Beispiel von Muster Nr. 2.

3.7 Herausziehversuche

Bei Verzahnungen entwickelt sich keine Reibung, da die hierzu nötige Relativbewegung des Bodens zum Geokunststoff ausbleibt. Diese Situation kann in einem Scherversuch nicht reproduziert werden und wird daher mit Ausziehversuchen simuliert, in welchen die Bewehrung aus einem Bodenkörper herausgezogen wird. Ausziehversuche dienen zur Ermittlung der minimalen Verankerungslänge und der maximalen Kräfte, die über den Boden in den Geokunststoff eingeleitet werden können.

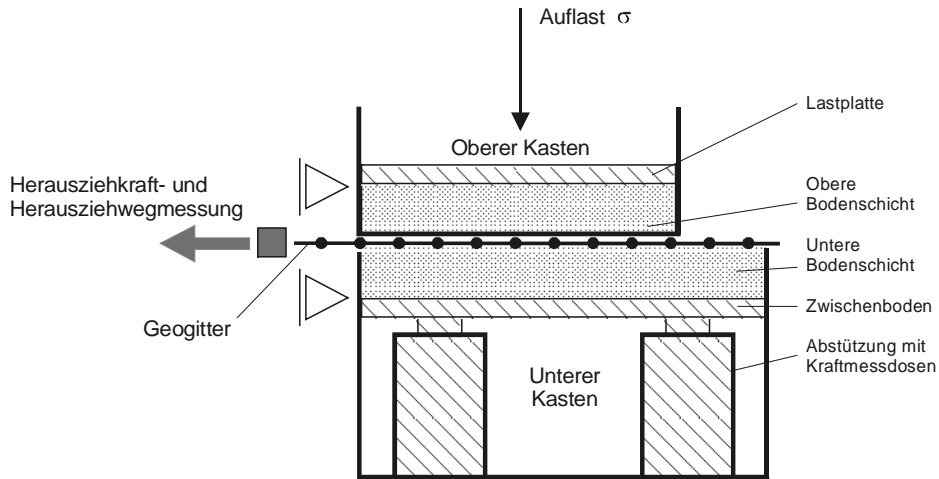


Abb. 89 Schematischer Aufbau eines kleinen Herausziehkastens mit vertikal aufgebrachtener Normalkraft σ .

Beim Ausziehversuch nach prEN 13738 (1999) greift an einer zwischen zwei Bodenschichten eingebetteten Messprobe in horizontaler Richtung eine Kraft an (Abb. 89). Die auf die obere Schicht aufgebraachte Normalspannung wird von Versuch zu Versuch gesteigert. Gemessen wird die Kraft, welche zum Auszug der Probe aus dem Boden erforderlich ist (Auszugswiderstand). Das Verfahren wird unter Verwendung standortspezifischer Böden durchgeführt.

Allgemein lässt sich der Zusammenhang zwischen maximaler Herausziehspannung τ_v und Normalspannung σ (bezogen auf eine Geokunststoffseite) mit folgender Gleichung darstellen:

$$\tau_v = f_{SG} * \tan \varphi_B * \sigma + \tau_0$$

wobei

$$\tau_v = \text{maximale Herausziehspannung [kPa]}$$

$$f_{SG} = \text{Reibungsbeiwert oder -koeffizient zwischen Geokunststoff und Boden [-]}$$

$$\varphi_B = \text{Reibungswinkel des Bodens}$$

$$\sigma = \text{Normalspannung [kPa]}$$

$$\tau_0 = \text{Strukturwiderstand [kPa]}$$

Im Rahmen des Projektes wurden der Landesgewerbeanstalt (LGA), Nürnberg, Herausziehversuche in Auftrag gegeben. Diese wurden zusätzlich mit Ergebnissen verglichen, welche die LGA bei eigenen Versuchen mit Geokunststoffen gewonnen hatte.

Die Herausziehversuche wurden mit ≥ 200 mm breiten Geokunststoff-Streifen bei 300 mm Verankerungslänge und 3 verschiedenen Auflasten durchgeführt. Die Messproben wurden entlang der Produktionsrichtung der Geogitter aus dem Herausziehkasten (Grösse: 300 mm * 300 mm) herausgezogen.

Es wurden drei verschiedene Böden eingebaut (Tab. 68):

- Rundkies, gleichkörnig, Körnung 8/16
- Mittelsand, gleichkörnig
- schluffiger Ton

Bodenmaterial	Reibungswinkel φ_B	Kohäsion c_B
Kies	34.2 Grad	9 kPa
Sand	36.4 Grad	2.4 kPa
Ton	26.6 Grad	19 kPa

Tab. 68 Kennwerte der eingesetzten Bodenmaterialien. Die angegebene Kohäsion im Kies ist sehr beachtlich und für den verwendeten Kies untypisch. Da die absolute Grösse der Kohäsion grundsätzlich mit einer grossen Unsicherheit behaftet ist, wird empfohlen, für die Ermittlung des Reibungsbeiwertes den Winkel der Gesamtscherfestigkeit zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.5)

Folgende Geokunststoffe wurden den Herausziehversuchen unterzogen:

- Muster Nr. 1, 2, 3 und 29 gemäss Tab. 53. Die Herausziehversuche wurden an 200 mm breiten Streifen ausschliesslich in Sand durchgeführt.

-
- Ein mit Muster Nr. 22 vergleichbares gewebtes Geogitter aus PET-Multifilamenten mit PVC-Beschichtung (Maschenweite 20 x 20 mm). Die Zugfestigkeit in Produktionsrichtung beträgt laut Herstellerangabe 82.7 kN/m, die Höchstzugkraft-Dehnung 11.3 %. Als Bodenmaterial wurde Kies, Sand und Ton eingesetzt. (LGA, 2000).
 - Muster Nr. 12, wobei die Probe der LGA direkt durch den Hersteller zugestellt wurde. Die Herausziehversuche wurden an mit 250 mm breiten Geogitter-Streifen durchgeführt, wobei als Bodenmaterial nur Kies eingesetzt wurde. (LGA, 2001).

4. Diskussion der Untersuchungsergebnisse

4.1 Einbauversuche im Feld

Beim Feldversuch wurden Proben in den drei charakteristischen Schüttmaterialien Sand (0 ... 4 mm), Wandkies (rund, 0 ... 60 mm) und Schotter (Planiekies, 0 ... 22 mm) ein- und wieder ausgebaut. Vorgängig exponierte Proben erfuhren eine UV-Bestrahlung von ca. 12 MJ/m², was eine um ca. 28 % stärkere Beanspruchung ist als diejenige gemäss Bewitterungsprüfung nach SN 640 550 (1996), welche zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit bei einer kurzen Einbauverzögerung dient. Die bewitterten Proben wurden nur in Schotter eingebaut.

4.1.1 Beschädigung der Geokunststoffe beim Einbau

Muster	Sand	Rundkies	Schotter	bewittert
03			schwache Sandeinlagerung	starke Sandeinlagerung
04			schwache Sandeinlagerung	starke Sandeinlagerung
05			schwache Sandeinlagerung	
06		starke Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung
07		schwache Einschnürung, starke Sandeinlagerung	starke Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung
08		schwache Sandeinlagerung	starke Sandeinlagerung	
09		starke Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung	
10		kleine Löcher, starke Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung
11	viele kleine Löcher	angerissene Bändchen	viele kleine Löcher	viele kleine Löcher, schwache Sandanlagerung
14	stark defekt	stark defekt	stark defekt	stark defekt
15	kleine Löcher und Risse	grosse Löcher, starke Sandanlagerung	starke Sandanlagerung	schwache Sandanlagerung
17	schwache Sandeinlagerung	Einschnürung, schwache Sandeinlagerung	teilweise starke Sandeinlagerung	starker Steinabdruck, starke Sandeinlagerung
18	einzelne gerissene Wirkfäden	einige gerissene Wirkfäden	viele gerissene Wirkfäden, kleine Löcher	
20	einzelne ausgerissene Fäden	einige ausgerissene Fäden	einige ausgerissene Fäden	Steinabdrücke, schwache Sandeinlagerung
21		viele ausgerissene Fäden	Löcher, einzelne ausgerissene Fäden	starke Sandeinlagerung
24		Faden gerissen, schwache Sandanlagerung	schwache Sandanlagerung	schwache Sandanlagerung
30				schwache Sandeinlagerung
31			Fadenzieher, schwache Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung
34		schwache Sandanlagerung		Fadenverschiebungen, schwache Sandanlagerung
35		starke Sandeinlagerung	kleine Löcher	schwache Sandeinlagerung
37			schwache Sandeinlagerung	schwache Sandeinlagerung

Tab. 69 Visuelle Beurteilung der Einbaubeanspruchung. Nicht aufgeführte Muster zeigten - ausser Verschmutzungen - keine visuell feststellbaren Veränderungen gegenüber dem Neuzustand.

Tab. 69 enthält eine visuelle Beurteilung der Einbaubeanspruchung, welche an den ausgegrabenen 1.7 x 3.5 m grossen Geokunststoffproben vorgenommen wurde. Aufgeführt sind nur diejenigen Muster, bei denen ein relevanter Unterschied zum Neuzustand festgestellt wurde. Die restlichen Geokunststoffe zeigten keine visuell feststellbaren Veränderungen. Bei der Probenahme zur Untersuchung des Kraft-Dehnungsverhaltens wurden stark beeinträchtigte Stellen wo möglich ausgespart.

4.1.2 Beurteilung der Einbaubeanspruchung im Feldversuch

Die Ergebnisse der Zugversuche, welche zur Beurteilung der Einbaubeanspruchung im Feldversuch durchgeführt wurden, sind in Tab. 70 und Tab. 71 zusammengefasst. Das Kraft-Dehnungsverhalten wurde jeweils nur in Produktionsrichtung untersucht, wobei die aufgeführten Daten den Mittelwert (inkl. 95 % Vertrauensbereich) von im Allgemeinen 5 Proben wiedergeben. In Tab. 70 wird die Zugfestigkeit in kN/m angegeben, welche der auf einen Meter Breite hochgerechneten Höchstzugkraft entspricht. Tab. 71 enthält die Höchstzugkraft-Dehnung in %.

Produkttyp	Muster	Original	Sand	Rundkies	Schotter	bewittert
biaxial gestreckte PP-Gitter	19	24.2 ± 0.3	21.9 ± 1.3	22.9 ± 1.6	21.0 ± 1.5	23.4 ± 0.3
	26	35.8 ± 1.5	29.8 ± 7.3	31.7 ± 1.1	32.6 ± 0.4	31.7 ± 1.3
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16	66.2 ± 0.3	65.5 ± 0.8	64.0 ± 1.6	63.4 ± 2.7	65.3 ± 1.0
	29	63.8 ± 3.2	58.1 ± 4.0	59.7 ± 4.6	59.0 ± 6.0	61.9 ± 2.7
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28	51.7 ± 0.3	46.9 ± 2.9	46.8 ± 2.6	49.0 ± 2.0	47.2 ± 1.7
	22	160.4 ± 7.7	145.2 ± 4.0	156.4 ± 4.7	142.3 ± 5.7	129.5 ± 7.8
Gitter aus gelegten und verschweissten PET/PP-Flachstäben	12	64.9 ± 3.7	57.7 ± 2.0	56.4 ± 2.9	57.0 ± 5.5	58.3 ± 5.5
	13	39.4 ± 1.1	39.3 ± 1.1	38.9 ± 1.6	39.0 ± 0.9	39.2 ± 1.3
	32	40.8 ± 3.4	42.7 ± 1.9	44.2 ± 2.9	46.9 ± 5.6	-
mehrlagiges PP-Gitter	27	7.2 ± 0.4	6.8 ± 0.7	7.2 ± 0.4	7.4 ± 0.4	6.9 ± 0.7
PP-Bändchengewebe	01	116.6 ± 3.3	115.5 ± 5.2	110.3 ± 4.4	114.7 ± 2.3	118.3 ± 1.5
	02	77.3 ± 2.5	76.4 ± 4.1	76.7 ± 3.7	71.0 ± 1.0	74.9 ± 0.9
	23	44.8 ± 2.6	44.3 ± 1.9	41.2 ± 1.3	35.2 ± 0.8	35.4 ± 0.9
Gewebe mit PET-Kette	34	126.8 ± 3.6	107.5 ± 2.3	96.8 ± 8.1	94.1 ± 7.9	79.5 ± 3.0
	24	386.8 ± 7.9	361.2 ± 11.3	348.5 ± 10.7	314.5 ± 6.0	332.7 ± 11.3
	25	994.6 ± 34.8	887.5 ± 36.0	916.0 ± 63.5	940.2 ± 21.6	816.7 ± 57.6
PET-Kettengewirk	18	423.8 ± 16.0	372.4 ± 14.6	367.2 ± 17.3	311.4 ± 13.7	355.7 ± 8.3
mit PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	20	87.7 ± 2.3	67.0 ± 4.1	60.4 ± 2.9	60.5 ± 1.7	63.1 ± 1.4
	21	86.8 ± 2.6	69.2 ± 2.5	55.9 ± 4.8	58.2 ± 3.6	65.1 ± 3.3
mit PET-Multifilament verstärktes PP-Vlies	30	46.9 ± 0.8	41.8 ± 1.9	41.7 ± 4.2	39.5 ± 3.5	34.5 ± 2.5
	31	97.9 ± 4.1	85.4 ± 5.7	81.0 ± 3.2	74.7 ± 4.0	76.1 ± 1.8
Aramid-Gitter m. Vlies	35	48.5 ± 1.6	46.5 ± 4.8	45.0 ± 4.9	38.6 ± 3.5	32.3 ± 4.3
PP-Vliese für Bewehrungszwecke	03	92.8 ± 18.1	81.7 ± 15.5	78.8 ± 12.0	67.8 ± 6.6	66.0 ± 7.9
	04	59.6 ± 11.2	54.4 ± 12.0	56.2 ± 10.7	43.7 ± 7.1	50.0 ± 9.3
PP-Vliese für Trenn- und Filteraufgaben	05	27.9 ± 6.7	27.6 ± 5.5	28.4 ± 5.2	22.5 ± 3.6	26.7 ± 3.6
	09	18.7 ± 1.6	18.8 ± 2.9	19.0 ± 2.7	18.7 ± 1.9	19.6 ± 2.5
	06	13.7 ± 0.9	15.8 ± 1.7	12.4 ± 1.6	12.5 ± 0.9	15.8 ± 1.5
	07	13.7 ± 1.1	14.2 ± 1.8	14.0 ± 2.1	12.1 ± 0.3	14.3 ± 1.5
	08	8.2 ± 1.3	6.8 ± 0.2	8.6 ± 1.7	6.0 ± 0.9	7.9 ± 2.1
	10	13.6 ± 2.1	10.9 ± 0.4	13.6 ± 1.6	11.9 ± 1.3	13.2 ± 1.0
	17	10.0 ± 0.3	11.7 ± 1.0	15.1 ± 1.3	11.3 ± 0.5	8.2 ± 0.4
PP/PE-Vlies	37	15.0 ± 1.6	14.8 ± 1.9	16.0 ± 1.7	13.4 ± 1.3	13.9 ± 1.1
PE/PP-Gewebe	11	15.9 ± 1.4	16.8 ± 1.2	16.0 ± 0.7	8.1 ± 0.5	12.5 ± 1.7
besch. PET-Gewebe	15	38.3 ± 1.0	36.2 ± 1.8	29.0 ± 4.1	24.6 ± 2.7	23.6 ± 1.7
besch. Glas-Gitter	14	29.3 ± 2.2	16.0 ± 1.6	0.0	0.0	0.0

Tab. 70 Mittelwert ± 95 % Vertrauensbereich der Zugfestigkeit [kN/m] (Prüfung nach EN ISO 10319, 1996). Die bewitterten Proben wurden in Schotter eingebaut.

Anmerkung: Die Zugfestigkeit von Muster Nr. 27 gilt für eine Lage. Sie wurde als Mittelwert von 10 Zugversuchen (2 Proben à 5 Lagen) bestimmt.

Produkttyp	Muster	Original	Sand	Rundkies	Schotter	bewittert
biaxial gestreckte PP-Gitter	19	8.9 ± 0.3	8.6 ± 1.4	9.7 ± 1.7	7.1 ± 1.2	9.2 ± 0.8
	26	12.8 ± 4.2	16.9 ± 2.7	17.4 ± 1.5	18.7 ± 2.8	15.8 ± 3.8
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16	16.2 ± 0.8	17.0 ± 0.6	16.3 ± 1.7	14.9 ± 3.1	17.3 ± 0.6
	29	19.6 ± 1.9	13.9 ± 3.6	18.4 ± 7.8	10.8 ± 27.5	19.4 ± 2.4
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28	17.7 ± 0.6	14.1 ± 0.9	13.8 ± 1.3	15.1 ± 1.0	14.3 ± 1.9
	22	11.9 ± 0.3	11.0 ± 0.7	10.7 ± 0.6	11.1 ± 0.3	10.5 ± 0.9
Gitter aus gelegten und verschweissten PET/PP-Flachstäben	12	8.9 ± 0.3	8.3 ± 0.4	8.6 ± 0.5	8.3 ± 0.7	8.5 ± 1.0
	13	8.6 ± 1.3	10.0 ± 1.7	8.7 ± 0.4	10.8 ± 1.8	7.7 ± 1.3
	32	6.4 ± 1.0	6.8 ± 1.2	6.5 ± 2.7	7.7 ± 1.8	-
mehrlagiges PP-Gitter	27	6.3 ± 1.0	5.3 ± 0.8	6.2 ± 0.9	5.6 ± 0.6	5.7 ± 1.3
PP-Bändchengewebe	01	11.8 ± 0.5	12.5 ± 1.1	12.3 ± 0.5	12.9 ± 0.4	13.0 ± 0.6
	02	10.6 ± 0.4	11.1 ± 0.7	11.2 ± 0.8	11.2 ± 0.3	11.2 ± 0.5
	23	17.3 ± 1.9	16.3 ± 0.7	17.8 ± 0.6	14.2 ± 0.9	15.9 ± 0.8
Gewebe mit PET-Kette	34	12.6 ± 0.6	10.6 ± 0.3	10.8 ± 1.0	9.8 ± 1.1	9.8 ± 0.5
	24	9.3 ± 0.6	8.9 ± 0.4	8.4 ± 0.3	8.3 ± 1.1	5.4 ± 0.3
	25	11.5 ± 0.9	11.6 ± 0.8	11.5 ± 0.3	11.5 ± 1.2	10.5 ± 0.6
PET-Kettengewirk	18	16.4 ± 2.7	8.7 ± 0.5	8.9 ± 0.6	7.6 ± 0.3	8.3 ± 0.5
mit PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	20	21.0 ± 0.6	12.6 ± 1.4	10.8 ± 0.2	9.3 ± 1.0	11.2 ± 0.4
	21	18.3 ± 1.6	10.7 ± 1.0	10.9 ± 0.4	8.8 ± 0.7	10.9 ± 0.9
mit PET-Multifilament verstärktes PP-Vlies	30	11.8 ± 0.4	10.4 ± 0.5	10.4 ± 1.3	9.7 ± 0.4	8.9 ± 0.6
	31	17.4 ± 2.2	12.0 ± 1.2	12.3 ± 0.7	11.3 ± 0.5	11.3 ± 0.5
Aramid-Gitter m. Vlies	35	3.0 ± 0.2	2.7 ± 1.0	3.0 ± 0.4	2.8 ± 0.4	2.9 ± 0.7
PP-Vliese für Bewehrungszwecke	03	44.9 ± 6.5	43.2 ± 6.0	45.1 ± 11.4	42.8 ± 7.9	49.0 ± 7.6
	04	41.4 ± 10.5	43.4 ± 9.9	36.3 ± 9.3	48.2 ± 7.8	33.8 ± 6.5
PP-Vliese für Trenn- und Filteraufgaben	05	44.8 ± 3.0	41.8 ± 4.3	44.7 ± 7.2	39.1 ± 2.9	39.8 ± 3.8
	09	48.5 ± 3.6	43.0 ± 5.9	32.6 ± 4.0	36.7 ± 3.6	39.9 ± 2.7
	06	40.6 ± 3.5	40.5 ± 3.5	29.5 ± 4.5	33.3 ± 2.2	35.2 ± 5.1
	07	97.9 ± 9.5	96.5 ± 4.4	67.1 ± 12.8	71.9 ± 6.3	93.9 ± 4.2
	08	58.1 ± 6.8	65.3 ± 5.8	46.2 ± 3.9	44.9 ± 1.0	48.7 ± 6.2
	10	68.4 ± 6.4	59.7 ± 3.7	47.5 ± 2.7	50.7 ± 1.8	55.9 ± 6.8
	17	84.3 ± 7.5	83.5 ± 14.0	60.7 ± 5.7	67.7 ± 4.4	42.5 ± 16.9
PP/PE-Vlies	37	36.3 ± 5.3	34.7 ± 0.8	31.4 ± 2.2	31.5 ± 5.0	31.3 ± 3.5
PE/PP-Gewebe	11	16.3 ± 1.3	17.5 ± 1.7	15.8 ± 1.5	9.6 ± 2.2	13.6 ± 2.7
besch. PET-Gewebe	15	12.3 ± 0.7	11.5 ± 0.6	10.2 ± 0.8	9.1 ± 0.7	8.8 ± 0.8
besch. Glas-Gitter	14	2.2 ± 0.4	-	0.0	0.0	0.0

Tab. 71 Mittelwert ± 95 % Vertrauensbereich der Höchstzugkraft-Dehnung [%] (Prüfung nach EN ISO 10319, 1996). Die bewitterten Proben wurden in Schotter eingebaut.

Anmerkung: Da die Dehnungsmessung generell mit einer Ausgangslänge von 60 mm vorgenommen wurde (zur Feststellung der Abminderung ausreichend), ist der gemessene Dehnungswert der uniaxial gestreckten HDPE-Gitter (Muster Nr. 16 und 29) grösser als die effektive Höchstzugkraft-Dehnung, welche mit einer dem Gitterabstand entsprechenden Ausgangslänge bestimmt wird.

In Tab. 72 ist die Restfestigkeit der Einbau-beanspruchten Muster, in Tab. 73 die restliche Höchstzugkraft-Dehnung in Prozent des Ausgangswertes angegeben. Ein von 100 % abweichender Wert für die Restfestigkeit ist in Tab. 72 nur dann aufgeführt, wenn der Mittelwert der beanspruchten Proben mit 95% statistischer Wahrscheinlichkeit gesichert kleiner als der Mittelwert der Referenzproben ist. In Tab. 73 wird immer dann 100 % angegeben, wenn kein statistisch gesicherter Unterschied zwischen Original und beanspruchter Probe besteht.

Produkttyp	Muster	Restfestigkeit [%]			
		<i>Sand</i>	<i>Rundkies</i>	<i>Schotter</i>	<i>bewittert</i>
biaxial gestreckte PP-Gitter	19	90	100	87	97
	26	100	89	91	88
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16	100	97	96	100
	29	91	100	100	100
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28	91	91	95	91
	22	91	100	89	81
Gitter aus gelegten und verschweissten PET/PP-Flachstäben	12	89	87	88	90
	13	100	100	100	100
	32	100	100	100	-
mehrlagiges PP-Gitter	27	100	100	100	100
PP-Bändchengewebe	01	100	95	100	100
	02	100	100	92	100
	23	100	92	79	79
Gewebe mit PET-Kette	34	85	76	74	63
	24	93	90	81	86
	25	89	92	95	82
PET-Kettengewirk	18	88	87	73	84
mit PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	20	76	69	69	72
	21	80	64	67	75
mit PET-Multifilament verstärktes PP-Vlies	30	89	89	84	73
	31	87	83	76	78
Aramid-Gitter m. Vlies	35	100	100	80	67
PP-Vliese für Bewehrungszwecke	03	100	100	73	71
	04	100	100	73	100
PP-Vliese für Trenn- und Filteraufgaben	05	100	100	100	100
	09	100	100	100	100
	06	100	100	91	100
	07	100	100	88	100
	08	83	100	73	100
	10	80	100	100	100
PP/PE-Vlies	17	100	100	100	82
PP/PE-Vlies	37	100	100	100	100
PE/PP-Gewebe	11	100	100	51	78
besch. PET-Gewebe	15	94	76	64	61
besch. Glas-Gitter	14	55	0	0	0

Tab. 72 Restfestigkeit der Einbau-beanspruchten Geokunststoffe in % der Zugfestigkeit der Referenzproben. Nur statistisch gesicherte Werte weichen von 100 % ab.

Produkttyp	Muster	Rest-Dehnung [%]			
		<i>Sand</i>	<i>Rundkies</i>	<i>Schotter</i>	<i>bewittert</i>
biaxial gestreckte PP-Gitter	19	100	100	80	100
	26	100	136	146	100
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16	105	100	100	107
	29	71	100	100	100
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28	79	78	85	81
	22	92	90	93	88
Gitter aus gelegten und verschweissten PET/PP-Flachstäben	12	93	100	100	100
	13	100	100	126	100
	32	100	100	100	-
mehrlagiges PP-Gitter	27	100	100	100	100
PP-Bändchengewebe	01	100	100	110	110
	02	100	100	106	106
	23	100	100	82	100
Gewebe mit PET-Kette	34	84	85	77	78
	24	100	91	100	59
	25	100	100	100	91
PET-Kettengewirk	18	53	54	46	51
mit PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	20	60	51	44	53
	21	59	60	48	59
mit PET-Multifilament verstärktes PP-Vlies	30	88	88	82	75
	31	69	71	65	65
Aramid-Gitter m. Vlies	35	100	100	100	100
PP-Vliese für Bewehrungszwecke	03	100	100	100	100
	04	100	100	100	100
PP-Vliese für Trenn- und Filteraufgaben	05	100	100	87	89
	09	100	67	76	82
	06	100	73	82	87
	07	100	69	73	100
	08	100	80	77	84
	10	87	69	74	82
17	100	72	80	50	
PP/PE-Vlies	37	100	100	100	100
PE/PP-Gewebe	11	100	100	59	83
besch. PET-Gewebe	15	93	82	74	71
besch. Glas-Gitter	14	-	0	0	0

Tab. 73 Rest-Dehnung der Einbau-beanspruchten Geokunststoffe in % der Höchstzugkraft-Dehnung der Referenzproben. Nur statistisch gesicherte Werte weichen von 100 % ab.

Abb. 90 vergleicht die (statistisch nicht gesicherten) Restfestigkeiten mit den Rest-Dehnungen der für Bewehrungsaufgaben vorgesehenen Geokunststoffe. Aus dem Diagramm kann abgeleitet werden, dass eine Abnahme der Zugfestigkeit tendenziell mit einer Reduktion der Höchstzugkraft-Dehnung korreliert, wobei die Abweichungen von dieser Tendenz in Einzelfällen zum Teil erheblich sind.

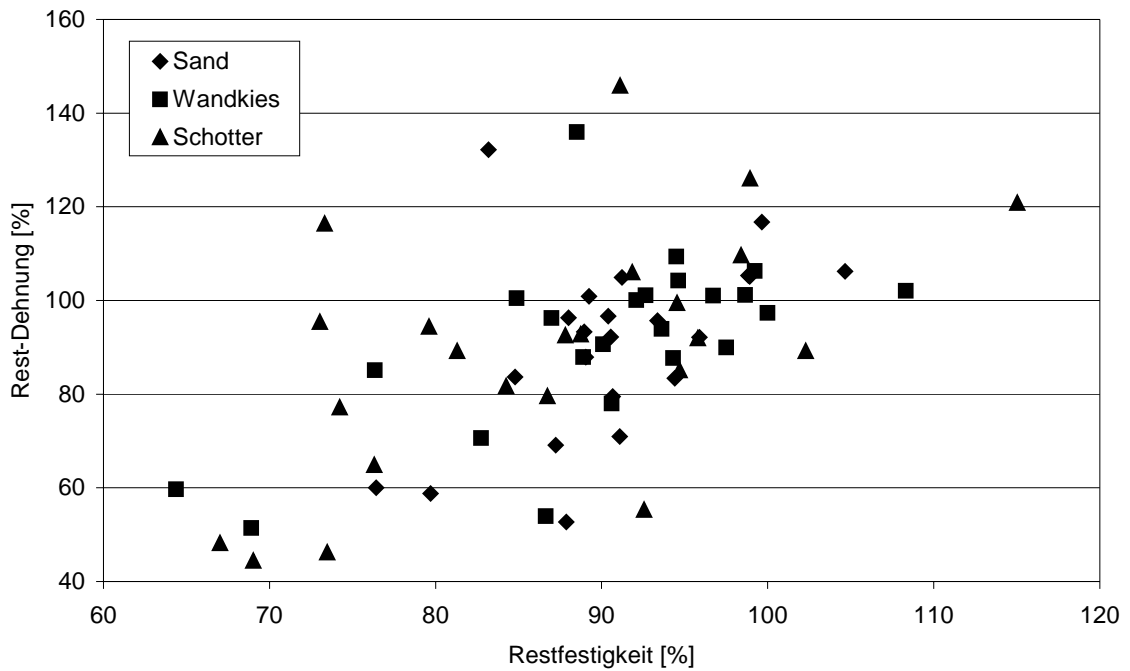


Abb. 90 Vergleich von Restfestigkeit und Rest-Dehnung der Einbau-beanspruchten Bewehrungs-Geokunststoffe.

4.1.3 Auswirkung einer Einbaubeanspruchung auf den Kraft-Dehnungsverlauf

In Abb. 91 bis Abb. 96 sind einige der Kraft-Dehnungskurven wiedergegeben, welche nach EN ISO 10319 (1996) längs zur Produktionsrichtung an den im Allgemeinen 20 cm breiten Streifenproben gemessen wurden. Die Diagramme zeigen, dass der Verlauf der Kraft-Dehnungskurve durch eine Einbaubeanspruchung in den meisten Fällen nicht relevant verändert wird, d.h. der E-Modul bleibt auch bei einer Abnahme von Zugfestigkeit und Höchstzugkraftdehnung in etwa gleich.

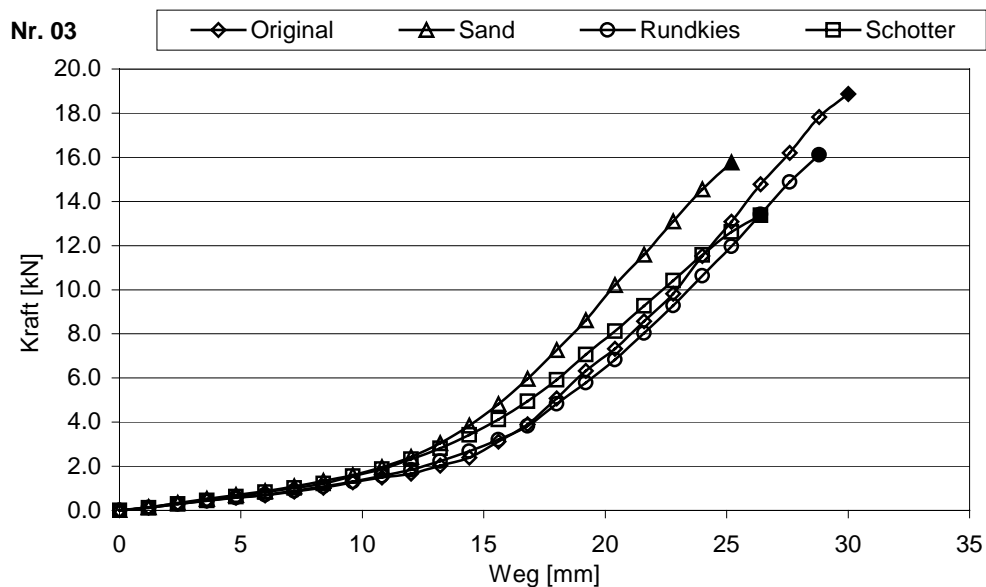


Abb. 91 Kraft-Dehnungskurven des PP-Bewehrungsvlieses Nr. 03.

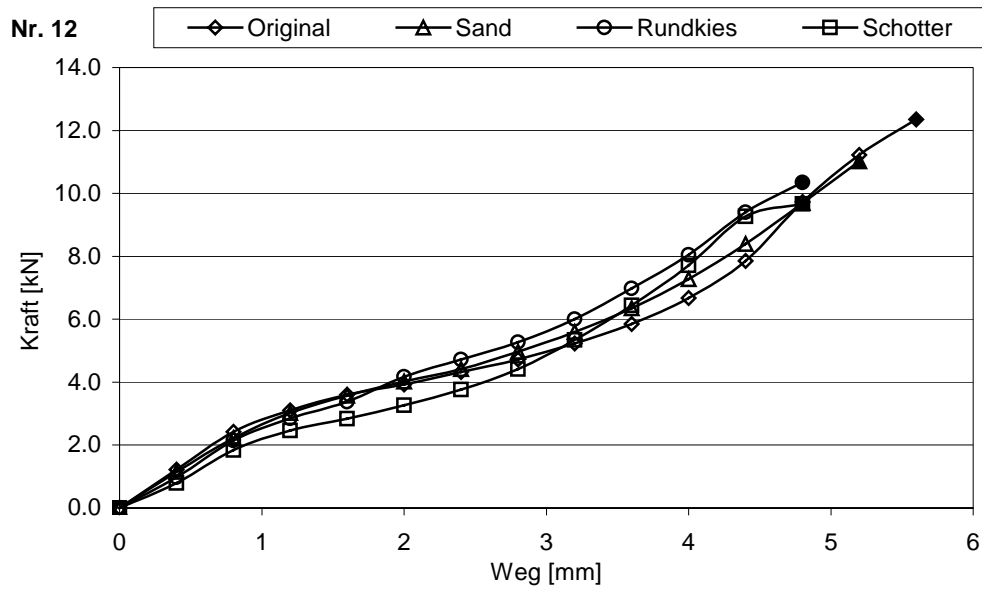


Abb. 92 Kraft-Dehnungskurven des gelegten PET-Gitters Nr. 12.

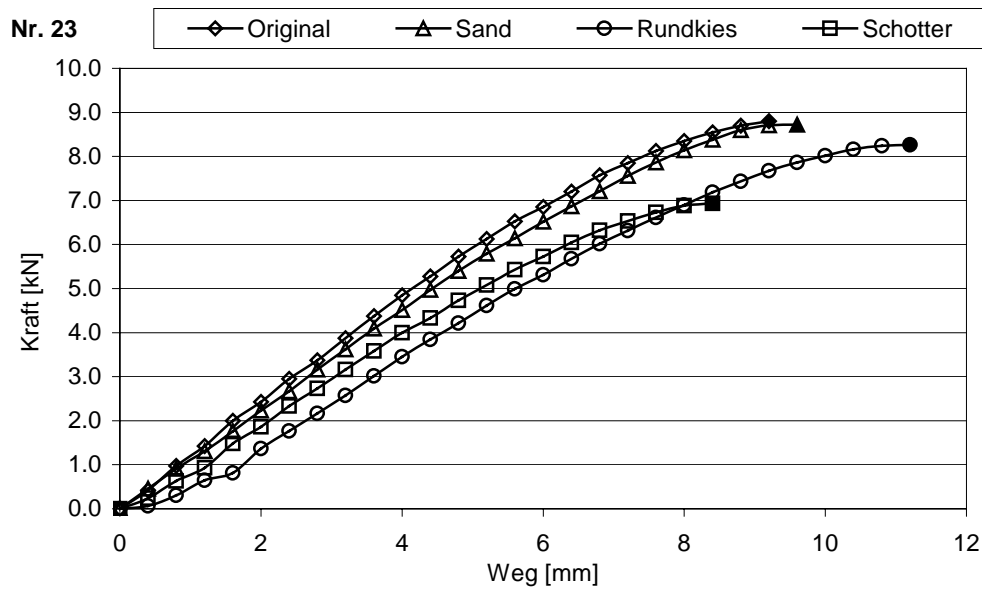


Abb. 93 Kraft-Dehnungskurven des PP-Bänchengewebes Nr. 23.

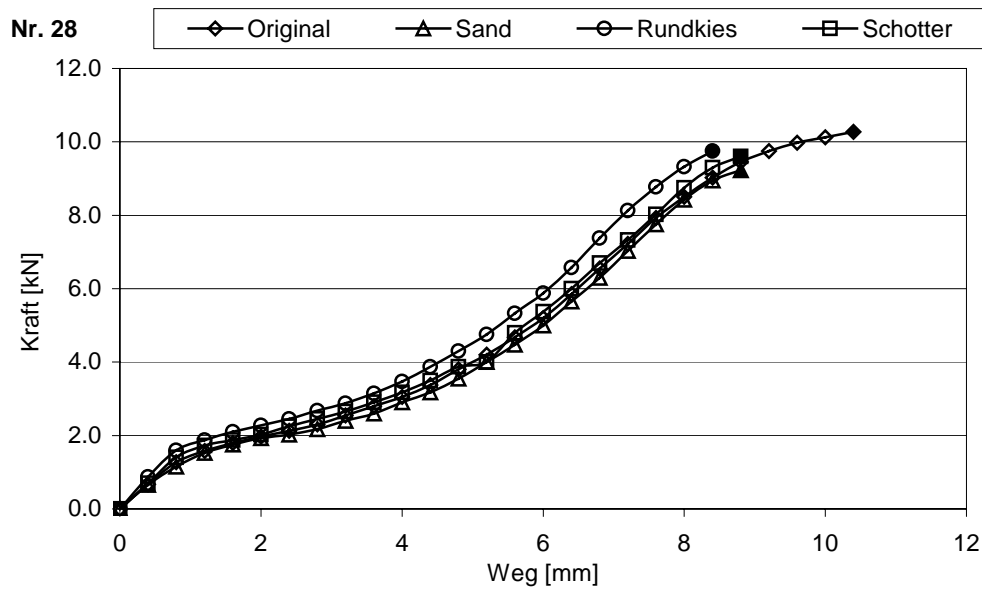


Abb. 94 Kraft-Dehnungskurven des PVC-beschichteten PET-Gittergewebes Nr. 28.

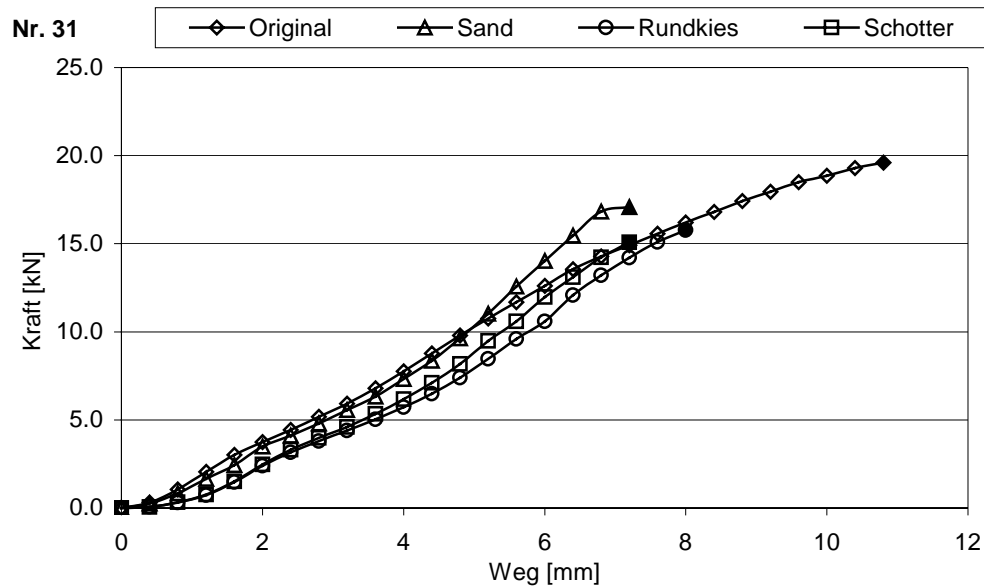


Abb. 95 Kraft-Dehnungskurven des mit PET-Multifilamenten verstärkten PP-Vlieses Nr. 31.

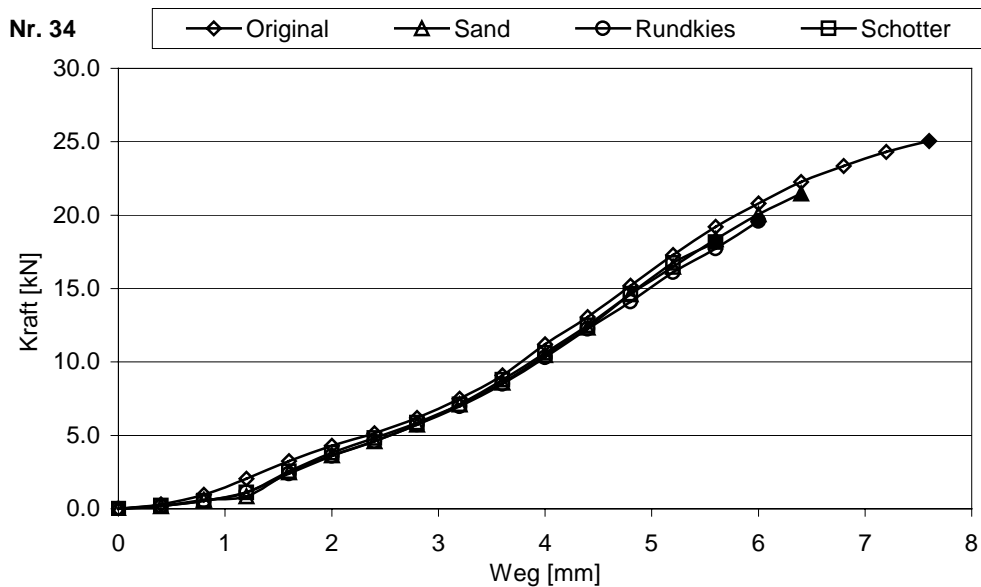


Abb. 96 Kraft-Dehnungskurven des PET-Gewebes Nr. 34.

4.1.4 Restfestigkeiten verschiedener Geokunststofftypen

In Tab. 74 und Abb. 97 sind die geprüften Geokunststoffe zu Produktfamilien zusammengefasst und die Restfestigkeiten entsprechend als Bereiche angegeben. Aufgrund der starken Schwankungen in der flächenbezogenen Masse von Geovliesen sind oftmals nur sehr deutliche Festigkeitsunterschiede statistisch gesichert nachweisbar. Aus diesem Grund sind auch statistisch nicht gesicherte Werte aufgeführt.

Produkttyp	Muster	Sand	Rundkies	Schotter
biaxial gestreckte PP-Gitter	19, 26, 27	(83) 90 ... 100	89 ... 100	87 ... 100
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16, 29	91 ... 100	(94) 97 ... 100	(93) 96 ... 100
Gitter aus verschweissten PET/PP-Stäben	12, 13, 32	89 ... 100	87 ... 100	88 ... 100
PP-Bändchengewebe	01, 02, 23	(99) ... 100	92 ... 100	79 ... 100
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28, 22	90 ... 91	91 ... 100	81 ... 95
PET-Gewebe/Kettengewirke	34, 24, 25, 18	85 ... 93	76 ... 92	73 ... 95
mit PET-Multifilament verstärkte Vliese	20, 21, 30, 31	76 ... 89	64 ... 89	67 ... 84
PP-Vliese für Bewehrungszwecke	03, 04	(88) ... 100	(85) ... 100	71 ... 100
Vliese für Trenn- und Filteraufgaben	05 - 10, 17, 37	80 ... 100	(90) ... 100	73 ... 100

Tab. 74 Bereiche der Restfestigkeiten (in %) für ausgewählte Geokunststoff-Familien. Die Werte in Klammern sind statistisch nicht gesichert.

Im Fall der Beschüttung mit Schotter wurden die Ergebnisse ohne und mit vorgängiger Exposition zusammengefasst, sofern die Bewitterung insgesamt keine nachweisliche Verschlechterung der Restfestigkeit zur Folge hatte (was nur bei Muster Nr. 34 der Fall war, siehe auch Abschnitt 4.4.4). Durch die entsprechend grössere Datenmenge sind die angegebenen Bereiche für den Einbau in Schotter repräsentativer.

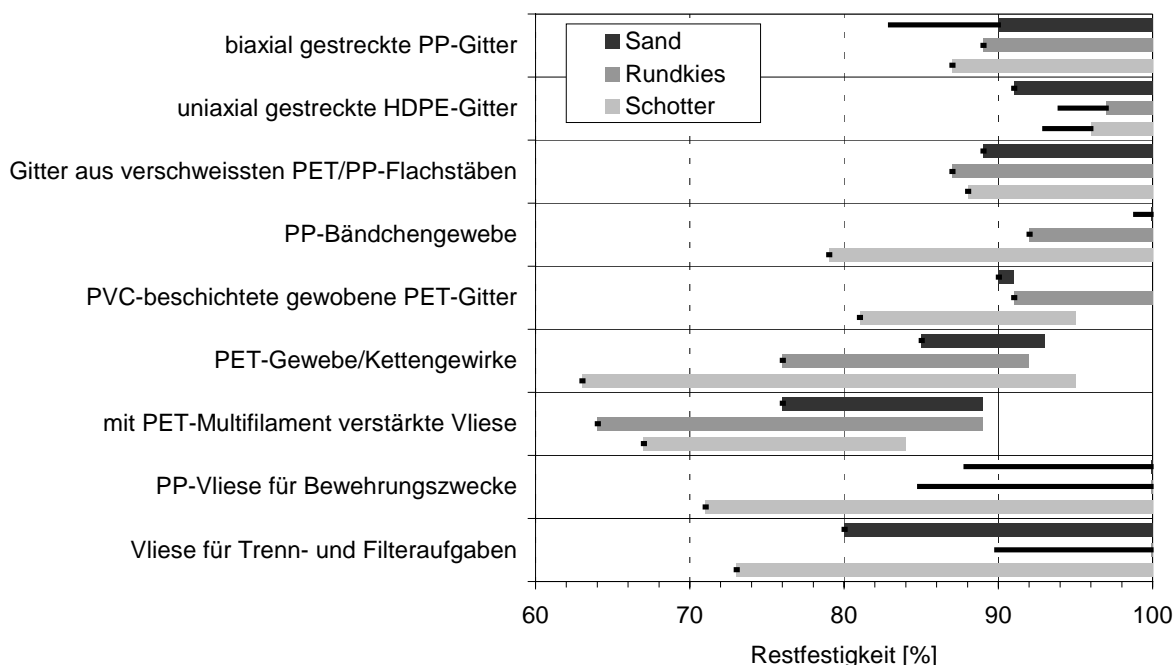


Abb. 97 Einbaubeschädigung (Festigkeitsverlust) in Funktion des Schüttmaterials und des Geokunststoff-Typs. Die Balken stellen statistisch gesicherte, die Striche nicht gesicherte Bereiche dar.

4.1.5 Einflussfaktoren auf die Auswirkung von Einbaubeanspruchungen

Aus Tab. 75 und Abb. 98 ist ersichtlich, dass die Widerstandsfähigkeit eines Geokunststoffs gegen Einbaubeanspruchung primär von der Herstellungsart und nur sekundär vom polymeren Rohstoff abhängt. Dabei hat sowohl die Art der Zugelemente als auch der Aufbau des Flächengebildes einen starken Einfluss auf die Robustheit (siehe Abb. 97).

Zugelemente	PET	PP	PE	Aramid	Glas
Fasern	64 ... 100 (11)	71 ... 100 (10)	51 ... 100 (1)	67 ... 100 (1)	0 ... 55 (1)
Bändchen	-	79 ... 100 (3)	-	-	-
gestreckte Stege	-	87 ... 100 (3)	91 ... 100 (2)	-	-
Flachstäbe	87 ... 100 (2)	100 (1)	-	-	-

Tab. 75 Restfestigkeiten in % als Funktion der Art der Zugelemente und des Rohstoffs (in Klammern: Anzahl untersuchter Produkte).

Das Ausmass einer Einbauschädigung hängt neben dem Geokunststoff von der Tragfähigkeit des Untergrundes, der Mächtigkeit der eingebauten Schichten, der Korngrößenverteilung und Kantigkeit des Schüttmaterials, der Methode zum Verteilen und Verdichten des Bodenmaterials sowie dem Gewicht und Typ des Verdichtungsgerätes ab. Im vorliegenden Projekt wurden die Einbauparameter so gewählt, dass sie bezüglich Schichtstärke und Verdichtungsenergie in etwa der Situation beim Einbau einer Bewehrungslage in eine Stützkonstruktion entspricht (gut verdichtetes Planum, Schichtstärke vor dem Verdichten grösser 20 cm, leichtes Verdichtungsgerät mit ca. 1 t statischer Auflast).

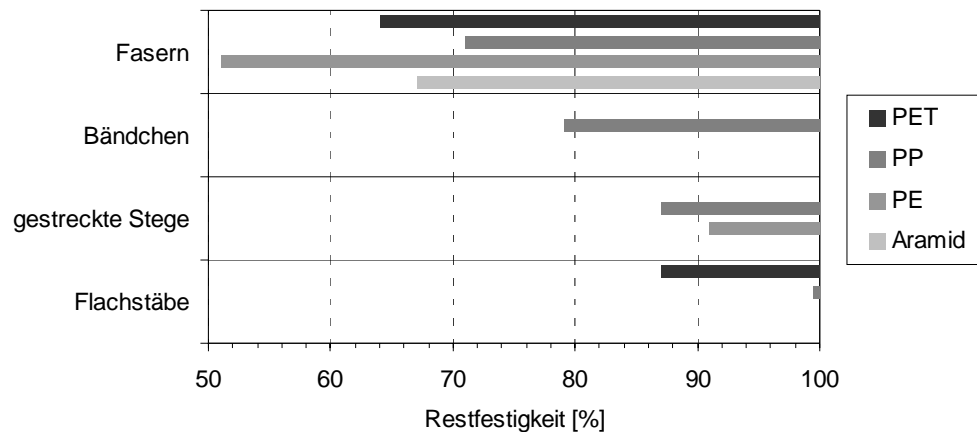


Abb. 98 Einbaubeschädigung (Festigkeitsverlust) in Funktion der Art der Zuelemente und des Rohstoffs.

Die Beanspruchung der Geokunststoffe ist beim Einsatz von feinkörnigem Material wie Sand grundsätzlich anders als unter Verwendung von grobkörnigem Schüttmaterial. Abb. 97 zeigt deutlich, dass der Bodentyp bzw. die Kornverteilung (Grösse des Maximalkornes, Feinanteil) und die Geometrie der Komponenten (rund/kantig) einen wesentlichen Einfluss auf die Beschädigung der einzelnen Geotextiltypen (Gewebe, Kettengewirke, Vliesstoffe) haben. Die Restfestigkeit der gereckten und gelegten Geogitter hängen im Unterschied dazu kaum vom eingesetzten Schüttmaterial ab (siehe auch Abb. 99).

Beinhaltet das Schüttmaterial gröbere Komponenten, so werden die Geokunststoffe bei der Verdichtung infolge lokaler Pressungen zusätzlich zur allgemeinen Dehnung in Längs- und Querrichtung wesentlich beansprucht. Sie können punktuell stark überdehnt oder regelrecht durchgestanzt werden, je nach Kantigkeit und Korngrössenverteilung des Schüttmaterials. Scharfkantige Komponenten (Schotter) können den Geokunststoff durch die konzentrierte Kräfteinleitung über die Kanten eher verletzen als runde mit einer breiteren Lastverteilung (Rundkies). Besonders anfällig sind diesbezüglich die Gewebe, Kettengewirke und Vliesstoffe, welche gemäss Abb. 99 in Schotter einen etwa doppelt so hohen maximalen Festigkeitsabfall aufweisen wie in Rundkies.

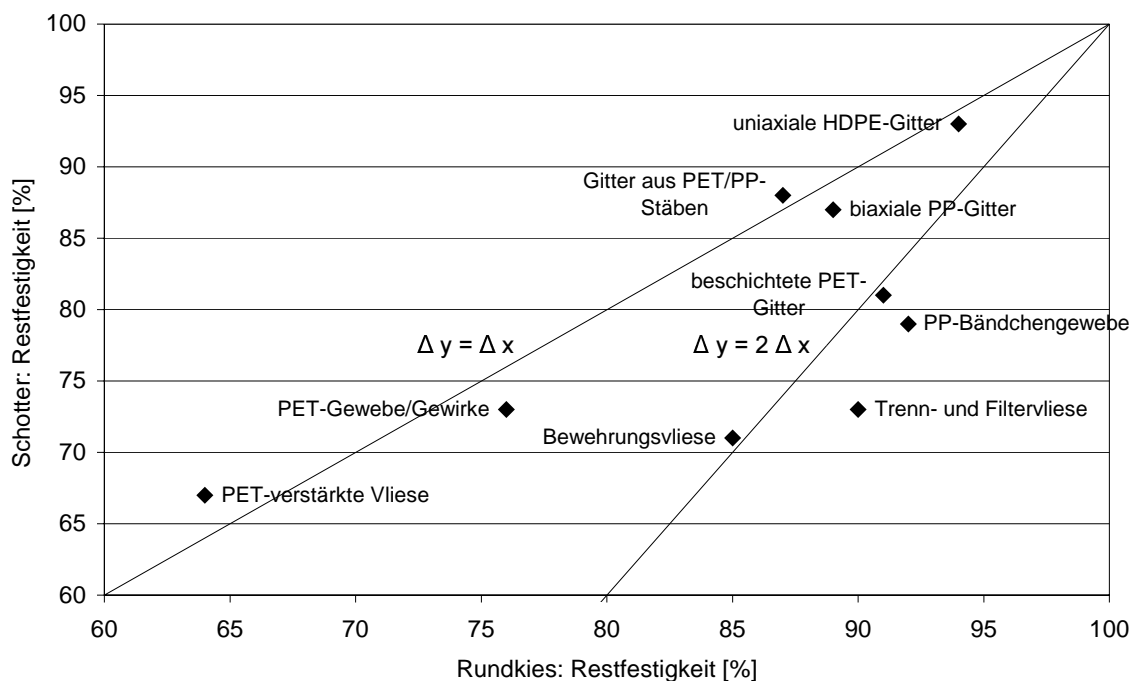


Abb. 99 Gegenüberstellung der minimal festgestellten Restfestigkeiten nach Einbau in Rundkies und Schotter (basierend auf den - teilweise nicht statistisch gesicherten - Werten aus Tab. 74). Die Linien repräsentieren die Bereiche mit identischer ($\Delta y = \Delta x$) bzw. doppelter ($\Delta y = 2\Delta x$) Festigkeitsabnahme.

Der teils deutliche Festigkeitsverlust von gereckten und gelegten Geogittern beim Einbau in Sand lässt sich am Beispiel von Muster Nr. 29 erklären. Bei den ausgebauten Proben wurden mehr oder weniger stark geknickte Stellen gefunden, welche beim Verdichten aufgrund der relativ dünnen Deckschicht von 23 cm durch Verschiebungen auftraten (Walkeffekt). Abb. 100 dokumentiert die Beanspruchung des Musters beim

Einbau in Sand. Es ist zu erwarten, dass die relativ steifen, längsgerichteten Zugelemente durch Biegebeanspruchungen an Festigkeit verlieren.



Abb. 100 Zustand der in Sand eingebauten Probe eines gereckten Gitters (Muster Nr. 29).

4.1.6 Wirkung von Partikeleinlagerungen

Bei dynamischer Beanspruchung führen eingelagerte Bodenteilchen zu einer abrasiven Beanspruchung und damit zu lokalen Schädigungen der feinen Fasern (in Form von Kratern, Kerben, Längsrissen und abgelösten Faserteilen). Dadurch lassen sich die teils erstaunlich hohen Festigkeitsverluste der aus Fasern hergestellten Flächengebilden beim Einbau in Sand erklären (Abb. 97). Da die Bändchengewebe aufgrund ihrer Konstruktion keine Bodenpartikel einlagern können, wurde hier auch keine Abnahme der Zugfestigkeit beobachtet.

In Geovliesen schränken Partikeleinlagerungen die Beweglichkeit der Fasern ein (Versteifung), wodurch sich die mechanischen Eigenschaften des Geotextils ändern. Insbesondere wird der Dehnungs- und Kriechdehnungsanstieg bei Belastung vermindert. Bei den Feldversuchen in Rundkies eingebaute Geovliese erfuhren als Folge von Bodeneinlagerungen (Tab. 69, Muster Nr. 6, 7, 9 und 10) Dehnungsabnahmen von bis zu 33 % (Tab. 73), ohne dass die Zugfestigkeit merklich beeinträchtigt wurde (Tab. 72). Die Dehnungsreduktion konnte aber durch nachträgliches Auswaschen der Vliese wieder rückgängig gemacht werden, wie Tab. 76 und Abb. 101 belegen.

Muster	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 9	Nr. 10
Original	39.2 ± 2.1	82.8 ± 3.8	42.4 ± 2.4	56.2 ± 1.1
Einbau in Rundkies	29.8 ± 2.4	70.1 ± 5.2	34.0 ± 2.1	44.5 ± 4.9
Gewaschen	40.8 ± 1.7	88.6 ± 14.6	41.4 ± 5.4	53.7 ± 2.8

Tab. 76 Mittelwert ± 95 % Vertrauensbereich der Höchstzugkraft-Dehnung [%] (Prüfung nach EN 12226, 2000).

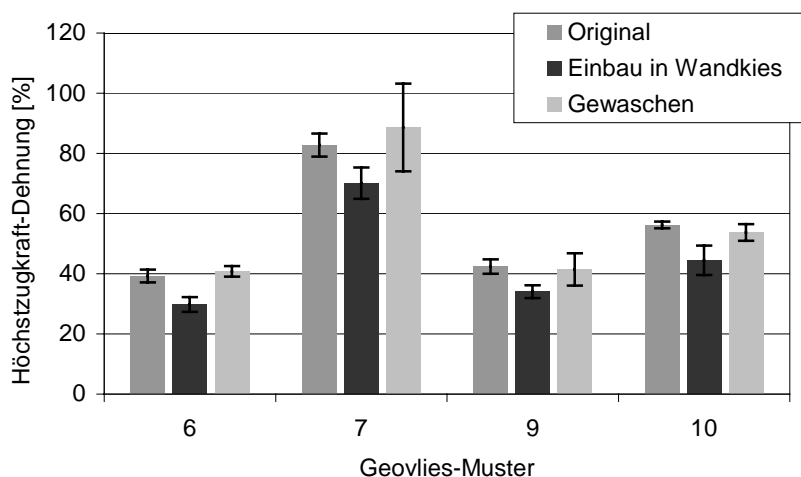


Abb. 101 Dehnungsveränderung durch Bodeneinlagerung von 4 Geovliesen.

4.1.7 Beeinflussung der chemischen Beständigkeit durch den Einbau

Die PVC-beschichteten PET-Gewebe (Muster Nr. 15, 18 und 22) wurden vor und nach dem Einbau in Schotter einer Prüfung auf Hydrolysebeständigkeit (Immersion in Kalkmilch nach SN 640 550, 1996)

unterzogen. Die Ergebnisse der im Anschluss an die Beanspruchungen (Immersion, Einbau sowie Einbau und anschließende Immersion) durchgeführten Streifenzugversuche sind in Tab. 77 und Abb. 102 zusammengestellt.

Muster	Nr. 22	Nr. 28	Nr. 15
	Höchstzugkraft [kN]		
Original	8.75 ± 0.39	3.50 ± 0.10	2.00 ± 0.02
Immersion in Kalkmilch	8.85 ± 0.48	3.49 ± 0.10	1.90 ± 0.02
Einbau in Schotter	8.43 ± 0.27	3.41 ± 0.12	1.06 ± 0.07
Einbau, anschl. Immersion	8.72 ± 0.48	3.27 ± 0.06	1.10 ± 0.07
	Höchstzugkraft-Dehnung [%]		
Original	13.6 ± 0.5	22.6 ± 1.8	18.6 ± 0.4
Immersion in Kalkmilch	13.0 ± 0.3	21.1 ± 2.2	19.0 ± 0.3
Einbau in Schotter	13.4 ± 0.4	19.1 ± 1.0	8.9 ± 0.4
Einbau, anschl. Immersion	13.2 ± 0.6	18.1 ± 0.5	9.3 ± 0.5
	Arbeitsvermögen [J]		
Original	129 ± 9	84.7 ± 12.2	34.6 ± 1.3
Immersion in Kalkmilch	121 ± 8	74.0 ± 13.6	33.8 ± 1.1
Einbau in Schotter	121 ± 11	62.0 ± 10.1	10.7 ± 0.9
Einbau, anschl. Immersion	122 ± 12	54.6 ± 4.4	11.3 ± 1.0

Tab. 77 Kraft-Dehnungsverhalten (Mittelwert ± 95 % Vertrauensbereich) der PVC-beschichteten PET-Gewebe (Prüfung nach EN 12226, 2000).

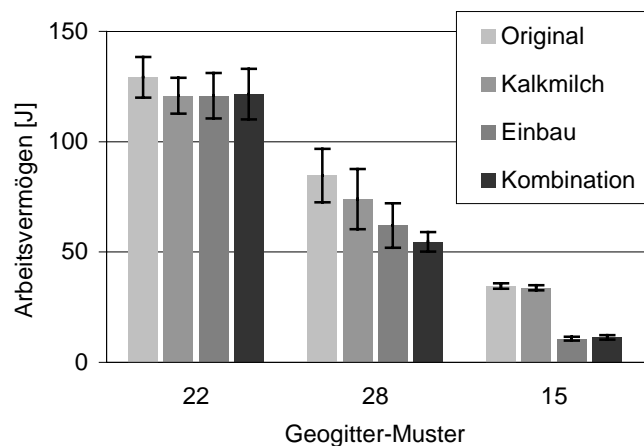


Abb. 102 Hydrolysebeständigkeit von PVC-beschichteten PET-Geweben vor und nach Einbau in Schotter.

In Abb. 103 wird das nach Einbau und anschließender Immersion gemessene Rest-Arbeitsvermögen mit einem berechneten Wert verglichen.

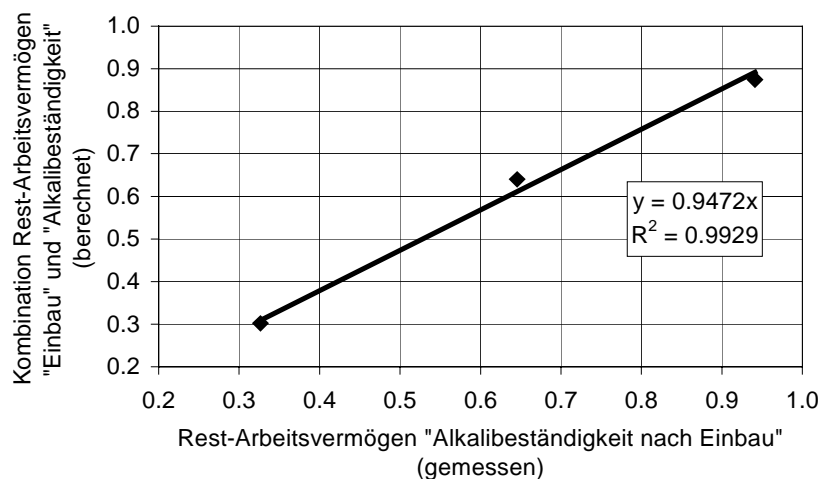


Abb. 103 Einfluss der vorgängigen Einbaubeanspruchung auf die Alkalibeständigkeit. Angegeben ist das Rest-Arbeitsvermögen (absolut).

Zur Berechnung wurde das Rest-Arbeitsvermögen, welches am in Schotter eingebauten Geokunststoff ermittelt wurde, mit demjenigen multipliziert, das am nur in Kalkmilch eingelegten gewonnen wurde. Die Gegenüberstellung zeigt deutlich, dass gemessener und berechneter Wert gut übereinstimmen. Dies bedeutet, dass die Alkalibeständigkeit durch die Einbaubeanspruchung nicht vermindert wurde. Der beim Streifenzugversuch festgestellte Festigkeitsabfall deutet somit darauf hin, dass die Schutzwirkung der Beschichtung durch den Einbau nicht beeinträchtigt wird (zumindest bei den untersuchten Geokunststoffen).

4.2 Einbausimulation im Labor

Zur Simulation der Einbaubeanspruchung wurde ein an ENV ISO 10722-1 (1998) angelegter Laborversuch mit einem 300 x 300 mm Prüfkasten, einer 100 x 200 mm Belastungsplatte, einer zyklischen Belastung zwischen 5 und 450 bzw. 900 kPa, 200 Belastungszyklen und einer Frequenz von 0.5 Hz. Als Bodenmaterial wurde Bauxitkorund (Korndurchmesser 5 ... 10 mm) sowie der Sand, Rundkies und Schotter aus dem Feldversuche eingesetzt. Nach der Beanspruchung wurde die Veränderung des Kraft-Dehnungsverhaltens einer Zugfestigkeitsprüfung nach EN ISO 10319 (1996) ermittelt.

4.2.1 Beurteilung der Einbaubeanspruchung im Laborversuch

Die Ergebnisse der Zugversuche, welche zur Beurteilung der Einbaubeanspruchung im Laborversuch durchgeführt wurden, sind in Tab. 78 und Tab. 79 zusammengefasst. Das Kraft-Dehnungsverhalten wurde jeweils nur in Produktionsrichtung untersucht, wobei die aufgeführten Daten den Mittelwert (inkl. 95 % Vertrauensbereich) von im Allgemeinen 5 Proben wiedergeben. In Tab. 78 wird die Zugfestigkeit in kN/m angegeben, welche der auf einen Meter Breite hochgerechneten Höchstzugkraft entspricht. Tab. 79 enthält die Höchstzugkraft-Dehnung in %.

Muster	Original	Sand 450 kPa	Rundkies 900 kPa	Schotter 900 kPa	Schotter 450 kPa	Korund 450 kPa
02	77.3 ± 2.5	76.0 ± 2.1	62.6 ± 9.2	42.4 ± 5.9	57.2 ± 5.5	60.4 ± 2.7
04	59.6 ± 11.2	56.2 ± 10.6	33.8 ± 14.2	34.9 ± 12.2	41.9 ± 16.6	40.4 ± 8.1
13	39.4 ± 1.1	39.3 ± 0.6	39.2 ± 0.7	39.4 ± 1.4	40.0 ± 1.3	38.8 ± 0.8
16	64.1 ± 0.3	-	-	-	61.9 ± 1.4	62.9 ± 1.8
18	423.8 ± 16.0	-	-	-	316.6 ± 8.9	325.9 ± 9.7
19	24.2 ± 0.3	23.4 ± 0.5	22.6 ± 0.4	22.1 ± 0.6	22.9 ± 0.3	23.8 ± 0.3
20	87.7 ± 2.3	74.3 ± 3.2	56.8 ± 2.3	48.8 ± 2.8	61.7 ± 3.4	65.5 ± 1.4
22	160.4 ± 7.7	141.1 ± 9.5	141.5 ± 9.5	145.7 ± 6.2	139.9 ± 5.5	147.4 ± 12.9
23	44.8 ± 2.6	-	-	-	16.1 ± 0.9	16.9 ± 1.9
24	386.8 ± 7.9	320.3 ± 8.1	235.2 ± 6.3	209.0 ± 13.2	261.4 ± 12.3	260.3 ± 11.8
26	36.9 ± 1.5	-	-	-	35.1 ± 2.7	34.6 ± 3.5
28	52.8 ± 0.3	-	-	-	46.6 ± 3.9	50.9 ± 0.7
29	63.8 ± 3.2	65.9 ± 9.7	56.5 ± 5.7	54.7 ± 3.8	60.9 ± 5.3	62.6 ± 2.7
30	46.9 ± 0.8	40.9 ± 1.7	29.5 ± 1.0	23.3 ± 1.8	33.1 ± 5.2	46.8 ± 1.6
32	38.9 ± 3.3	-	-	-	39.3 ± 2.3	38.8 ± 4.4
34	126.8 ± 3.6	-	-	-	64.3 ± 3.1	63.7 ± 2.1

Tab. 78 Mittelwert ± 95 % Vertrauensbereich der Zugfestigkeit [kN/m] (Prüfung nach EN ISO 10319, 1996).

Muster	Original	Sand 450 kPa	Rundkies 900 kPa	Schotter 900 kPa	Schotter 450 kPa	Korund 450 kPa
02	10.6 ± 0.4	11.5 ± 0.8	10.2 ± 0.9	10.6 ± 4.0	10.0 ± 0.8	10.3 ± 2.5
04	41.4 ± 10.5	32.0 ± 11.0	35.7 ± 11.0	38.6 ± 7.0	39.5 ± 8.0	37.7 ± 5.3
13	8.6 ± 1.3	11.0 ± 3.8	10.4 ± 2.9	13.1 ± 1.9	10.6 ± 2.6	10.2 ± 2.4
16	16.2 ± 0.8	-	-	-	15.2 ± 1.5	15.1 ± 1.9
18	16.4 ± 2.7	-	-	-	8.2 ± 1.6	9.7 ± 1.5
19	8.9 ± 0.3	8.9 ± 0.8	10.5 ± 0.9	8.6 ± 0.9	10.3 ± 1.2	10.4 ± 1.4
20	21.0 ± 0.8	19.9 ± 7.5	14.2 ± 4.2	11.9 ± 0.8	13.0 ± 1.5	17.0 ± 2.3
22	11.9 ± 0.3	10.8 ± 0.9	11.7 ± 0.4	11.0 ± 0.4	11.6 ± 1.4	11.6 ± 0.8
23	17.3 ± 1.9	-	-	-	14.1 ± 3.5	11.3 ± 2.8
24	9.3 ± 0.6	7.7 ± 0.4	9.0 ± 5.4	7.3 ± 0.8	7.9 ± 0.8	7.5 ± 0.6
26	12.8 ± 4.2	-	-	-	13.1 ± 1.1	9.5 ± 1.9
28	17.7 ± 0.6	-	-	-	14.5 ± 1.5	15.6 ± 0.8
29	19.6 ± 1.9	19.0 ± 0.5	16.1 ± 5.8	15.0 ± 2.4	19.1 ± 2.8	18.0 ± 1.4
30	11.8 ± 0.4	10.5 ± 0.4	9.5 ± 2.0	9.3 ± 1.9	10.4 ± 0.8	11.5 ± 0.9
32	6.4 ± 1.0	-	-	-	5.7 ± 0.8	6.2 ± 1.2
34	12.6 ± 0.6	-	-	-	9.8 ± 1.4	9.5 ± 0.4

Tab. 79 Mittelwert ± 95 % Vertrauensbereich der Höchstzugkraft-Dehnung [%] (Prüfung nach EN ISO 10319, 1996).

Abb. 104 zeigt die Restfestigkeiten der Geokunststoffe, welche allen durchgeführten Labor-Einbausimulationen unterzogen wurden. Die gelegten und gestreckten Geogitter (Muster Nr. 13, 16 19 und 32) erlitten durch die Laborbeanspruchung keine merklichen Festigkeitseinbußen.

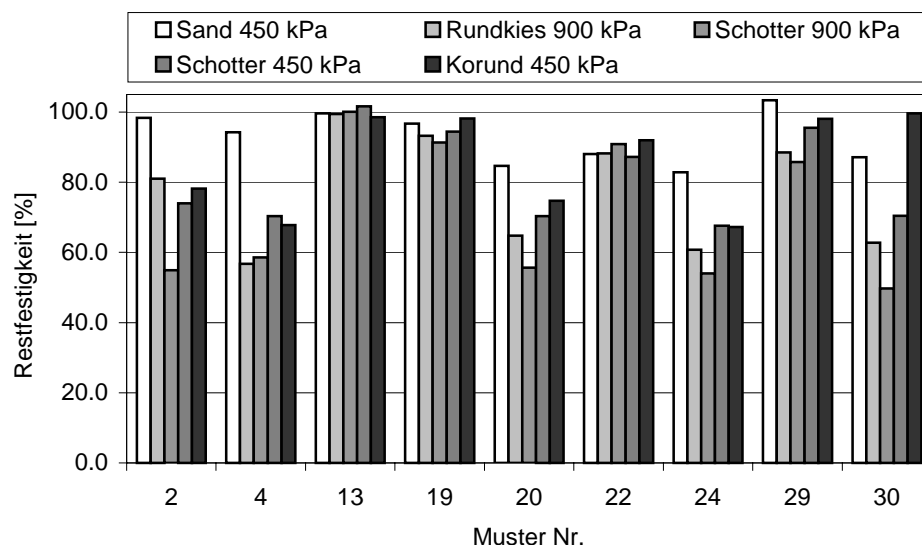


Abb. 104 Restfestigkeit in % der im Labor Einbau-beanspruchten Geokunststoffe.

4.2.2 Einfluss der Prüfparameter

Die Wirkung der Amplitudenstärke bei der zyklischen Belastung im Labor ist (im Falle des Schotters) aus Abb. 105 ersichtlich. Eine Verdoppelung der Maximallast führte bei den vorgenommenen Versuchen im Schnitt zu einer Erhöhung der Festigkeitsabnahme um den Faktor 1.5. Die Korrelation der Einbausimulation mit Schotter bei 450 und 900 kPa ist dabei recht gut (Bestimmtheitsmass = 0.92).

Vergleich man die Ergebnisse der Einbausimulation in Korund mit denjenigen in Schotter (bei identischer Maximalbelastung von 450 kPa), so fallen die Festigkeitsabnahmen bzw. Restfestigkeit in etwa gleich aus (Abb. 106). Einzig das mit PET-Endlosfasern verstärkte PP-Vlies (Muster Nr. 30) wird durch das Korund kaum geschädigt, trotz deutlicher Festigkeitsabnahme im Schotter. Diese Diskrepanz könnte dadurch erklärt werden, dass dieser Geotextiltyp empfindlich auf grössere Kornkomponenten reagiert (Korngrösse Schotter 0 ... 22 mm, Korund 5 ... 10 mm).

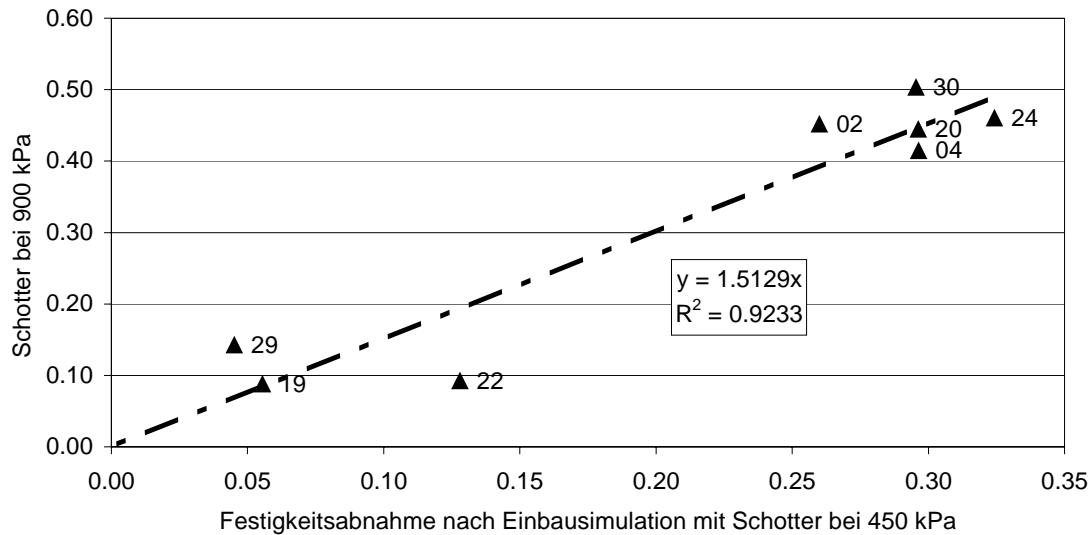


Abb. 105 Vergleich von Laborversuchen mit Schotter bei einer Maximalbelastung von 450 und 900 kPa. Angegeben sind die relativen Festigkeitsabnahmen (1 = 100 %). Die Datenpunkte sind mit den Muster-Nummern gekennzeichnet.

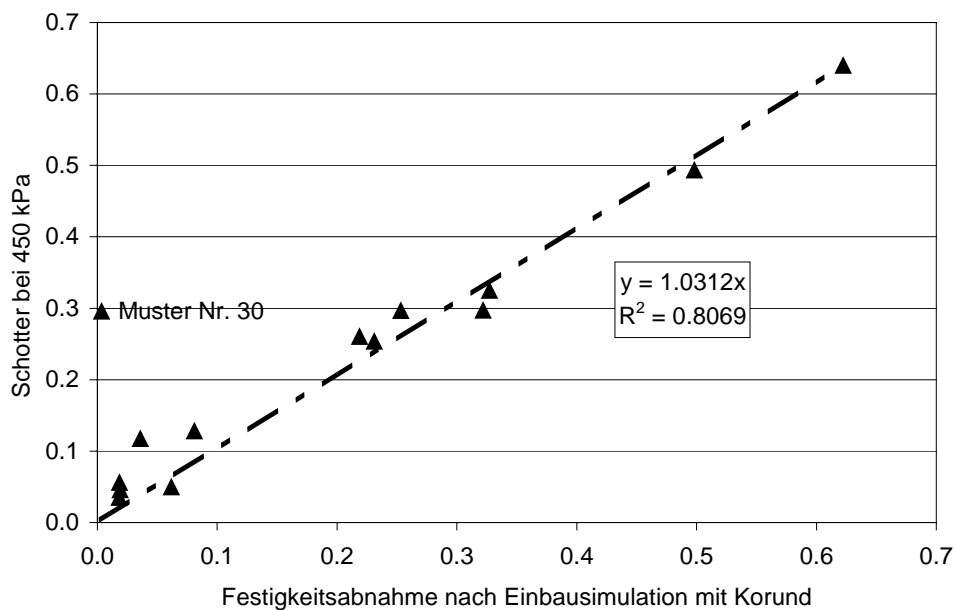


Abb. 106 Vergleich von Laborversuchen mit Schotter und Korund bei einer Maximalbelastung von 450 kPa. Angegeben sind die relativen Festigkeitsabnahmen (1 = 100 %).

4.2.3 Korrelation zum Feldversuch

In Tab. 80 wird die Restzugfestigkeit nach der Einbausimulation mit derjenigen nach dem Feldeinbau verglichen, wobei jeweils die bei gleichen Bodenmaterialien ermittelten Werte gegenübergestellt werden. Der Korund wird dabei mit dem Schotter in Relation gebracht. Ein von 1 abweichender Wert für die relative Festigkeit ist nur dann aufgeführt, wenn der Mittelwert der im Feld eingebauten Proben mit 95% statistischer Wahrscheinlichkeit gesichert kleiner oder grösser als der Mittelwert der im Labor mit gleichem Bodenmaterial beanspruchten Proben ist.

Die Gewebe und Vliese reagieren auf die Laborsimulation empfindlicher als auf die reale Einbaubeanspruchung im Feld. Insbesondere die PP-Bändchengewebe und die PET-Gewebe sind deutlich weniger anfällig auf eine Einbaubeanspruchung als aufgrund der Laborversuche zu erwarten wäre. Dies ist vermutlich auf die Scheuerempfindlichkeit dieser Geotextilien zurückzuführen, denn bei der Einbausimulation ist die Scheuerbeanspruchung höher als beim Feldeinbau. Bei der zyklischen Laborbeanspruchung können feine, scharfkantige Bodenpartikel in die Geotextilstruktur eindringen und die Filamente bzw. Bändchen anritzen und damit schwächen.

Produkttyp	Muster	Sand * 450 kPa	Rundkies ** 900 kPa	Schotter *** 900 kPa	Schotter *** 450 kPa	Korund *** 450 kPa	Mittelwert ± Stabw
biaxial gestreckte PP-Gitter	19	1.07	1	1	1.09	1.13	1.04 ± 0.05
	26	-	-	-	1	1	
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16	-	-	-	1	1	1
	29	1	1	1	1	1	
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28	-	-	-	1	1	0.99 ± 0.04
	22	1	0.90	1	1	1	
Gitter aus gelegten PET/PP-Flachstäben	13	1	1	1	1	1	0.96 ± 0.06
	32	-	-	-	0.88	0.87	
PP- Bändchengewebe	02	1	0.82	0.60	0.81	0.85	0.72 ± 0.21
	23	-	-	-	0.46	0.48	
Gewebe mit PET- Kette	34	-	-	-	0.68	0.68	0.75 ± 0.09
	24	0.89	0.67	0.66	0.83	0.83	
PET-Kettengewirk	18	-	-	-	1	1.05	1.02 ± 0.03
mit PET-Multifilament verstärkte PP-Vliese	20	1.11	0.94	0.81	1	1.08	0.93 ± 0.19
	30	1	0.71	0.59	0.84	1.18	
PP-Bewehrungsvlies	04	1	0.60	1	1	1	0.92 ± 0.18
Mittelwert ± Standardabw.		1.01 ± 0.06	0.85 ± 0.16	0.85 ± 0.19	0.91 ± 0.16	0.95 ± 0.17	0.92 ± 0.16

Tab. 80 Verhältnis Festigkeit [Laboreinbau] zu Festigkeit [Feldeinbau] (Vergleich mit Feldeinbau in *Sand, **Rundkies bzw. ***Schotter).

Die Einbausimulation im Labor mit Sand durchzuführen, ist im Prinzip nicht sehr sinnvoll. Wie Abb. 107 verdeutlicht, führt diese Beanspruchung zu einer Verformung, welche in der Praxis nicht auftritt. Der grössere Festigkeitsverlust im Feld verglichen mit dem Labor (Tab. 80) lässt sich im Falle des Sandes dadurch erklären, dass im Labor im Gegensatz zum Feld kein Walkeffekt auftritt (Muster Nr. 19) bzw. die Einbausimulation nicht zum Abreißen der gewirkten Verstärkungsfäden führt (Muster Nr. 20).



Abb. 107 Verformung des Geokunststoff-Streifens nach einer Einbaubeanspruchung im Labor mit Sand.

Die fehlende Korrelation zwischen Feld- und Laborbeanspruchung (Tab. 80) im Falle des Rundkieses (Korngrößen 0 ... 60 mm) ist vermutlich auf die relativ grossen Steine zurückzuführen, welche im kleinen Prüfkasten der Einbausimulation eine ganz andere Wirkung entfalten als bei der Verdichtung in der Praxis.

Betrachtet man die Korrelation für die Beanspruchung mit Schotter (Abb. 108), so zeigt sich für die Versuche mit einer zyklischen Belastung von maximal 450 kPa eine relativ gute Übereinstimmung mit den Feldversuchen (Bestimmtheitsmass: 0.48). Dabei werden die Bändchengewebe (Muster Nr. 02 und 23) aufgrund ihrer Scheuerempfindlichkeit im Labor deutlich stärker geschädigt als in der Praxis. Bei einer Maximalbelastung von 900 kPa (entsprechend ENV ISO 10722-1, 1998) ist die direkte Vergleichbarkeit hingegen kaum gegeben (Abb. 108).

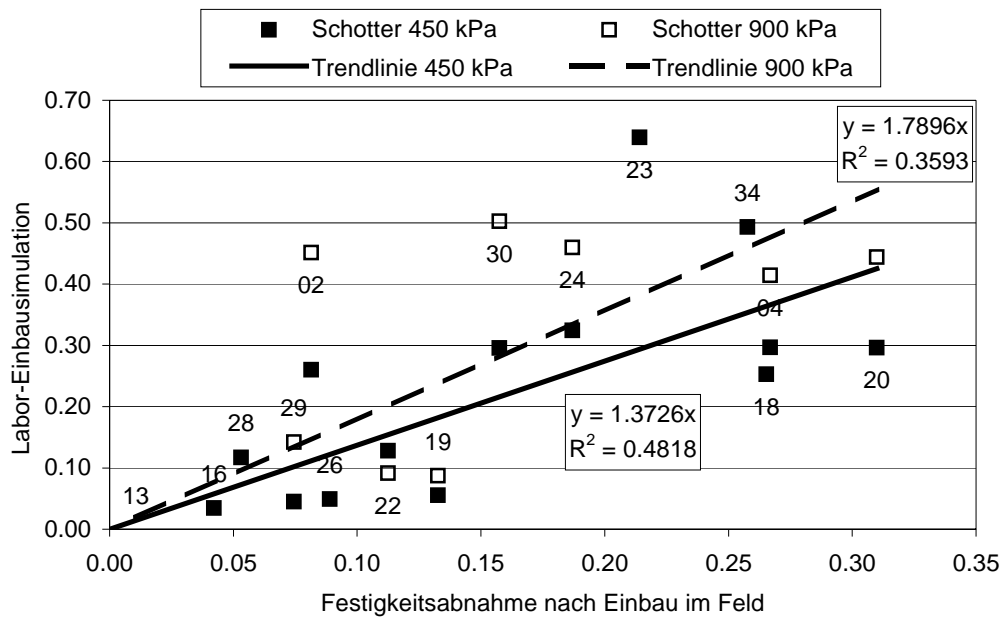


Abb. 108 Vergleich von Feld- und Laborversuchen unter Verwendung von Schotter. Angegeben sind die relativen Festigkeitsabnahmen (1 = 100 %). Die Datenpunkte sind mit den Muster-Nummern gekennzeichnet.

Wie Abb. 109 verdeutlicht, ist keine direkte Korrelation zwischen den Ergebnissen der an ENV ISO 10722-1 (1998) angelehnten Einbausimulation (zyklische Beanspruchung mit 0.5 Hz und Maximalbelastung 450 kPa) und den Festigkeitsabnahmen nach den Einbauversuchen im Feld vorhanden. Trotzdem kann bei Betrachtung der Abb. 109 folgende Tendenz beobachtet werden: Bis zu einer Festigkeitsabnahme beim Einbau der Geokunststoff-Proben im Feld von 10 bis 15% existieren zahlreiche Fälle, in welchen die Festigkeitsabnahme beim Einbau im Feld grösser ist als die Festigkeitsabnahme im Laborversuch (Punkte links der Geraden $x = y$). Bei denjenigen Geokunststoff-Proben, deren Festigkeit im Feldversuch infolge der Einbaubeanspruchung um mehr als 10 bis 15% abnimmt, ist die Festigkeitsabnahme im Laborversuch meist grösser bis deutlich grösser als diejenige beim Einbau im Feld.

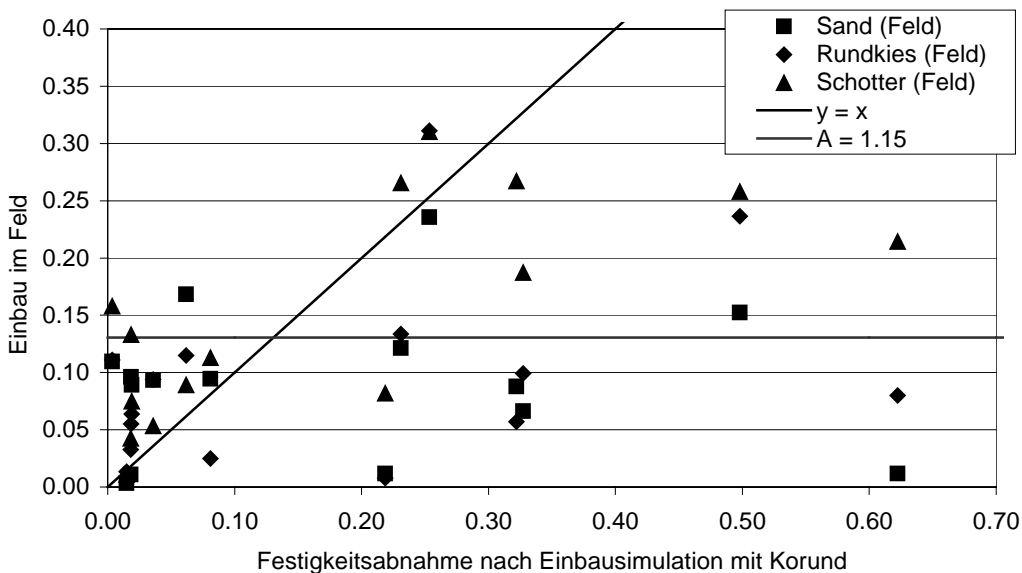


Abb. 109 Vergleich von Feld- und Laborversuchen.

Liegen keine Ergebnisse aus Feldversuchen vor und soll die Festigkeitsabnahme infolge der Einbaubeanspruchung im Feld mit Hilfe der an ENV ISO 10722-1 (1998) angelehnten Einbausimulation ermittelt werden, so ist folgendes zu berücksichtigen:

- Falls aus den Laborversuchen eine Festigkeitsabnahme von 0...10% resultiert, so ist in jedem Fall mit einer Abnahme von 10% der Festigkeit im Feld zu rechnen.

- Falls aus den Laborversuchen eine Festigkeitsabnahme von mehr als 10% resultiert, so ist es meist auf der sicheren Seite liegend zulässig, die effektive Festigkeitsabnahme im Feld der Abnahme im Laborversuch gleichzusetzen.

4.3 Kriech- und Zeitstandversuche

Die Kriech- und Zeitstandversuche wurden mit dem Ziel unternommen, eine Methodik zur besseren, rascheren und wirtschaftlicheren Ermittlung des Kriech- und Zeitstandverhalten von Geokunststoffen zu finden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Zeitrafferversuche unter erhöhter Belastung und/oder Temperatur durchgeführt.

4.3.1 Langzeit-Kriechversuche bei Raumtemperatur

Die Muster Nr. 02, 04, 13, 19, 22, 29, 30 und 34 wurden Zeitstandversuchen nach EN ISO 13431 (1999) unterzogen. Die Belastungseinrichtung besteht aus zwei parallel in einer Ebene liegenden Klemmen, in welchen ein Probestreifen um einen runden Stab (Durchmesser 15 mm) gelegt und wie in Abb. 110 skizziert durch die Zugkraft fixiert wird. Die obere Klemme ist fest, die untere wird durch direktes Anhängen von Massen mit einer konstanten Zugkraft versehen. Die jeweilige Auflast wird innerhalb einer Minute allmählich aufgebracht. Die Einspannlänge beträgt mindestens 200 mm.

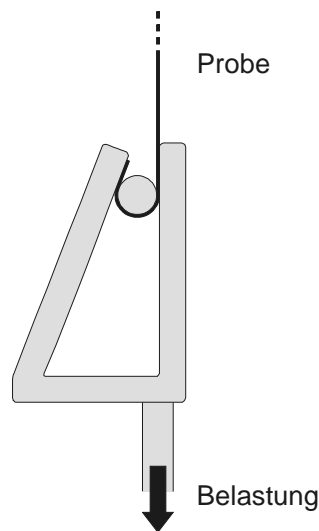


Abb. 110 Klemmvorrichtung zur Durchführung der Langzeit-Kriechversuche. Dargestellt ist nur die untere Klemme, die obere weist dieselbe Geometrie auf.

EN ISO 13431 (1999) schreibt zum Bruch führende Kriechversuche bei vier Zugkräften zwischen 50 % und 90 % der nach EN ISO 10319 (1996) gemessenen Höchstzugfestigkeit vor. Muster Nr. 22 ist bereits beim Versuch, eine Belastung von 50 % aufzubringen, gerissen. Bei 60 % der Zugfestigkeit sind auch die Muster Nr. 04, 29, 30 und 34 direkt nach Aufbringen der Last geborsten. Eine Zugspannung von 70 % führte bei allen geprüften Geokunststoffen zum sofortigen Bruch.

Zur Prüfung der Zugfestigkeit nach EN ISO 10319 (1996) werden spezielle hydraulische Klemmen verwendet, welche durch die Klemmen induzierte lokale Kraftspitzen möglichst vermeiden sollen. Solche Kraftspitzen führen zum frühzeitigen Bruch einer Probe (Klemmenriss). Für parallel durchzuführende Langzeit-Zugversuche ist der Einsatz solch anspruchsvoller Systeme aber nicht zweckmässig, weshalb auf einfachere Klemmmethoden zurückgegriffen wird. Als Folge reißen die Proben bereits bei Zugkräften, welche deutlich unter der Höchstzugkraft liegen. Andererseits sind Zeitstandversuche mit Belastungen unter 50 % der Zugfestigkeit wegen der erwartungsgemäss sehr grossen Zeitdauer bis zum Bruch oft nicht praktikabel.

Abb. 111 und Abb. 112 zeigen die Kriechdehnungskurven bei einer Belastung von 50 % bzw. 60 % der Zugfestigkeit. Angegeben ist die Kriechdehnung in Funktion der Belastungszeit, wobei die Ausgangslänge eine Minute nach Prüfbeginn (d.h. nach dem Aufbringen der Last) festgelegt wurde. Probenbrüche sind jeweils mit einem Quadrat markiert.

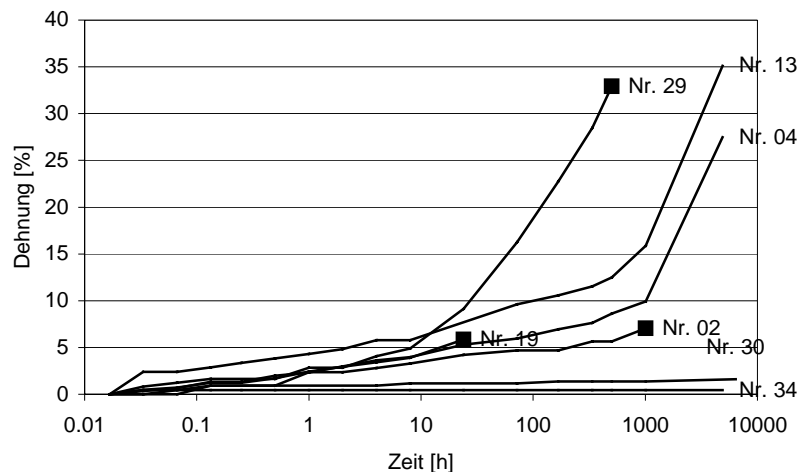


Abb. 111 Kriechversuche bei Raumtemperatur unter einer Belastung von 50 % der Zugfestigkeit.

Die Versuche mit 50 % Belastung (Abb. 111) zeigen die bekannten Unterschiede im Verhalten von Polyolefin-Geokunststoffen (Muster Nr. 02, 04, 13, 19, 29), verglichen mit Produkten aus Polyester-Multifilamenten (30, 34). Erstere kriechen stärker und reißen bei dieser (unter Berücksichtigung der Klemmenproblematik) hohen Zugkraft bereits nach kurzer Zeit bzw. zeigen einen deutlichen Knick in der Kriechkurve. Letztere hingegen weisen eine sehr niedrige, kontinuierliche Kriechrate auf. Die Versuche mit 60 % Belastung (Abb. 112) konnten aufgrund der Klemmenproblematik nur mit drei der ausgewählten Geokunststoffe durchgeführt werden.

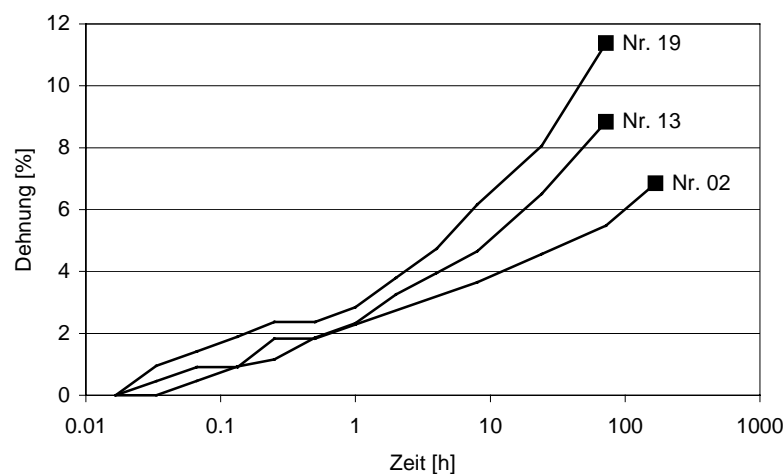


Abb. 112 Kriechversuche bei Raumtemperatur unter einer Belastung von 60 % der Zugfestigkeit.

Die wenigen Daten, die im Rahmen des Projektes ermittelt werden konnten, reichen bei Weitem nicht aus, um die Langzeit-Zugfestigkeit der untersuchten Geokunststoffe unter Berücksichtigung des Kriechverhaltens abzuschätzen. Die Versuche machen aber deutlich, dass Standard-Zeitstandversuche nur unter Verwendung optimal angepasster Klemmsysteme erfolgversprechend sind. Zudem sind diese Prüfungen nur dann für Extrapolationen im Hinblick auf eine Gebrauchsdauer von 100 Jahren zulässig, wenn die Versuchsdauer 10'000 und mehr Stunden beträgt.

In der Literatur sind häufig Versuchsergebnisse anzutreffen, die aufgrund der schlecht definierten Randbedingungen und der kurzen Prüfzeiten nicht für zuverlässige Vorhersagen des Langzeitverhaltens herangezogen werden dürfen. Es sind aber auch Untersuchungen zu finden, welche unter exakt umrissenen Bedingungen über eine ausreichende Prüfdauer (bis 12 Jahre) durchgeführt wurden und somit verlässliche Aussagen über das Kriech- und Zeitstandverhalten von Geokunststoffen zulassen (siehe Abschnitt 2.3.1).

4.3.2 Zeitraffende Kriechversuche unter erhöhter Temperatur

Weil Kriech- und Zeitstandversuche sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, wird durch die Erhöhung der Prüftemperatur eine Beschleunigung der Alterungsvorgänge angestrebt. Zur Beurteilung dieser Zeitraffermethode wurden die Muster Nr. 19 (PP-Gitter), 22 (PET-Gitter) und 29 (HDPE-Gitter) bei

unterschiedlichen Temperaturen mit konstanter Kraft belastet. Hierfür wurde ein Zugprüfgerät mit integrierter Thermokammer eingesetzt (Abb. 113). Da sich die Klemmen während dem Versuch in der Thermokammer befinden, musste auf den Einsatz hydraulischer Klemmen verzichtet werden. Somit konnten auch diese Versuche nicht mit einem optimalem Klemmsystem durchgeführt werden, was zum Teil erhebliche Streuungen in den Ergebnissen zur Folge hatte.

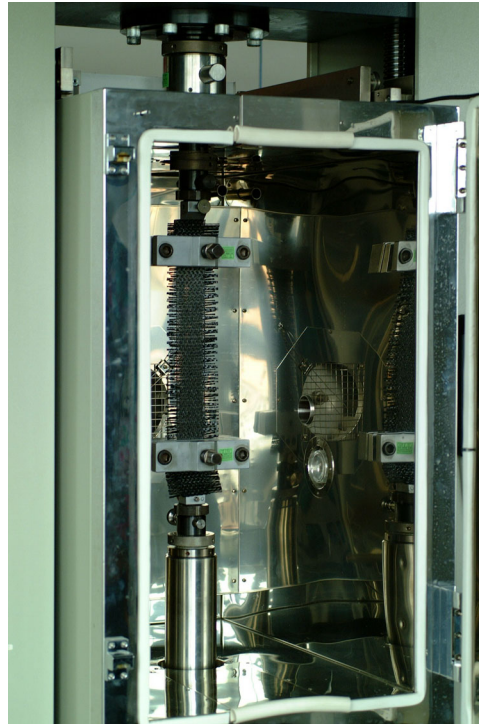


Abb. 113 Zugprüfgerät mit integrierter Thermokammer.

Die Zugkriechversuche wurden so konzipiert, dass ein einzelner Versuch höchstens einige wenige Tage in Anspruch nahm. Länger dauernde Prüfungen wurden vor dem Auftreten eines Risses abgebrochen. Tab. 81, Tab. 82 und Tab. 83 enthalten die Resultate derjenigen Versuche, welche in einer prüftechnisch vernünftigen Zeit zum Bruch führten. Angegeben ist die Prüftemperatur, die aufgebrauchte Zugkraft in % der Höchstzugfestigkeit, die Zeit bis zum Bruch sowie die Bruchdehnung. Die kursiv dargestellten Werte stammen dabei aus den in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Prüfungen.

Temp. [°C]	20	20	20	20	30	30	40	40	50
Zugkraft [%]	50	60	80	90	70	80	70	80	70
Zeit [h]	24	72	1.63	0.033	15.7	3.43	2.7	0.067	0.096
Dehnung [%]	5.9	11.4	16.4	5.4	24.3	26.6	25.2	12.4	16.6

Tab. 81 Zeitstandversuche an Muster Nr. 19 (extrudiertes PP-Gitter).

Temp. [°C]	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Zugkraft [%]	50	60	70	70	70	80	80	80	90
Zeit [h]	840	18.2	0.13	0.63	1.76	0.021	0.064	0.096	0.039
Dehnung [%]	32.9	7.1	2.8	5.3	6.4	0.9	3.0	4.1	3.4

Tab. 82 Zeitstandversuche an Muster Nr. 29 (extrudiertes HDPE-Gitter).

Temp. [°C]	20	30	40	40	50	60	60	70	70	80	80	80
Zugkraft [%]	90	80	80	80	80	70	80	60	70	60	70	80
Zeit [h]	1.35	76	0.168	1.03	0.62	8.2	0.047	2.88	0.18	5.4	0.158	0.094
Dehnung [%]	1.1	1.1	1.7	1.5	1.6	2.4	1.4	1.9	1.3	2.4	1.0	2.2

Tab. 83 Zeitstandversuche an Muster Nr. 22 (beschichtetes PET-Gitter).

Beim PP-Gitter (Muster Nr. 19) nimmt die Bruchdehnung - unabhängig von der Temperatur - mit zunehmender Zugkraft tendenziell zu, fällt aber bei sehr hohen Zugkräften aufgrund der kürzeren Zeiten bis zum Bruch wieder ab. Beim HDPE-Gitter (Muster Nr. 29) nimmt die Bruchdehnung - bei konstanter Temperatur (20 °C) - mit abnehmender Belastung bzw. zunehmender Zeit bis zum Bruch zu. Beim PET-

Gitter (Muster Nr. 22) ist die Bruchdehnung unabhängig von Prüftemperatur und Zugkraft immer in etwa gleich gross (Mittelwert: 1.63 %, Standardabweichung: 0.50 %).

Eine Erhöhung der Prüftemperatur hatte beim Muster Nr. 29 zur Folge, dass sich die zulässige Dehnung und damit die Zeit bis zum Bruch deutlich erhöhte. Daher konnten hier innerhalb prüftechnisch vernünftiger Zeiten keine Brüche bei Temperaturen über 20 °C ermittelt werden. In Abb. 114 ist das Zeitstandverhalten bei 20 °C dargestellt. Die Ergebnisse erlauben eine zuverlässige Extrapolation aber nur bis auf 10'000 Stunden (ca. 1 Jahr), für welche eine Maximalbelastung von 40.6 % der Höchstzugkraft resultiert.

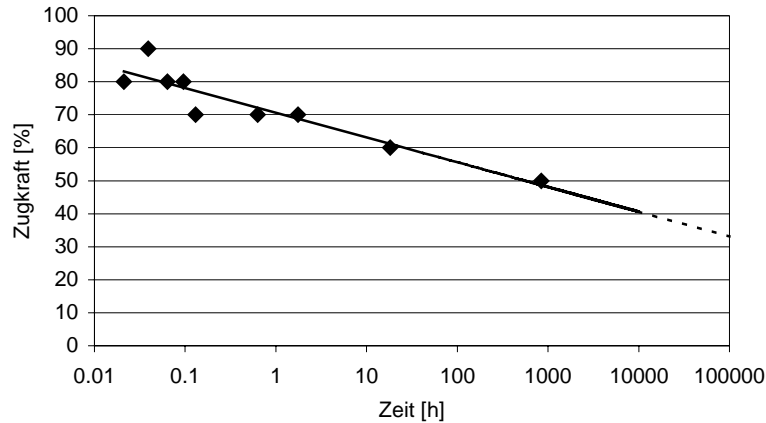


Abb. 114 Zeitstandversuche an Muster Nr. 29 bei 20 °C (Daten aus Tab. 82).

Bei der Zeit-Temperatur-Superposition werden die bei verschiedenen Temperaturen ermittelten Kriechdehnungskurven entlang der logarithmischen Zeitachse verschoben, bis Bereiche mit gleicher Kriechdehnungsrate übereinander zu liegen kommen. Dazu ist auch ein Anheben der Kurven in Richtung der Dehnungsachse erforderlich. Obwohl alle Versuche an Proben durchgeführt wurden, welche in Produktionsrichtung hintereinander entnommen wurden, führten Material-Inhomogenitäten und Unterschiede in den Prüfparametern zu sehr unterschiedlichen Kurvenverläufen, welche nur in den seltensten Fällen eine Zeit-Temperatur-Superposition erlauben. In den meisten Fällen können die gewonnenen Kurven nicht sinnvoll zu einer Masterkurve kombiniert werden. Abb. 115 zeigt eines der wenigen Beispiele, bei dem eine Aneinanderreihung der Kriechdehnungskurven ein vernünftiges Bild liefert. Die hierfür vorgenommenen Verschiebungen in Zeit- und Dehnungsachse sind in Tab. 84 aufgeführt.

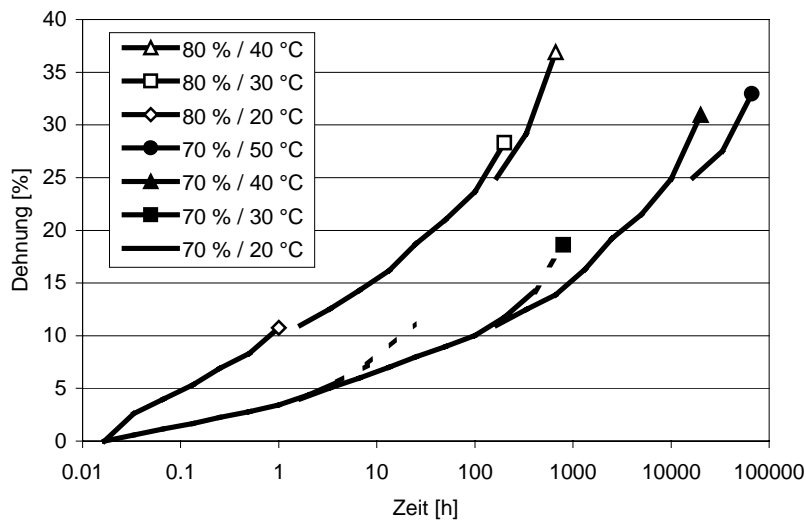


Abb. 115 Zeit-Temperatur-Superposition am Beispiel von Muster 19 bei einer Belastung von 70 % und 80 % der Höchstzugfestigkeit und Temperaturen von 20 bis 50 °C. Die hervorgehobenen Datenpunkte markieren den Bruch einer Probe. Die gestrichelten Linien repräsentieren Werte, die nach einer Belastungszeit von über 4 Stunden gewonnen wurden.

Prüftemperatur [°C]	20	30	40	50
Zeitversatz: log (Zeit [h])	0	2	4	6
Dehnungsversatz [%] (70 % Belastung)	0	4	11	25
Dehnungsversatz [%] (80 % Belastung)	0	11	25	-

Tab. 84 Zeit-Temperatur-Superposition (Muster 19): Verschiebungen in Zeit- und Dehnungsachse.

Die in Abb. 115 dargestellte Zeit-Temperatur-Superposition ist prinzipiell nicht zulässig, da die Proben bereits bei den niederen Temperaturen reissen. Würde der Versuch im Falle der Belastung mit 70 % der Höchstzugfestigkeit aber bereits nach jeweils 4 Stunden unterbrochen, würde die Konstruktion einer Masterkurve plausibel erscheinen. Die so ermittelte Zeit bis zum Bruch von über 10'000 Stunden bei 70 % Belastung steht jedoch im krassen Widerspruch zum Knick der Kraft-Dehnungskurve, welcher bei 20 °C bereits nach wenigen Stunden festgestellt werden kann.

Obiges Beispiel macht deutlich, dass die Aussagekraft der Zeit-Temperatur-Superposition auch dann kritisch hinterfragt werden muss, wenn die Herleitung einer Kriechdehnungs-Masterkurve plausibel erscheint. Zudem sind zeitraffende Versuche bei erhöhten Temperaturen nur dann für Langzeit-Vorhersagen anwendbar, wenn die gleichen physikalischen Vorgänge wie bei Raumtemperatur ablaufen. Zumindest bei den Geokunststoffen aus Polyolefin, bei welchen eine Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Prüftemperatur und der Zugkraft festgestellt wurde, ist dies aber fragwürdig.

Die Ergebnisse der am beschichteten PET-Gitter (Muster Nr. 22) durchgeführten Zugkriechversuche widersetzen sich vermutlich aus zwei Gründen einer Zeit-Temperatur-Superposition. Erstens sind die Kriechdehnungsraten bei kleinen Belastungen extrem niedrig und kaum von prüf- und materialtechnisch bedingten Verschiebungen in den Klemmen zu unterscheiden. Zweitens wirken sich die Einflüsse der Klemmen bei grossen Belastungen stark negativ aus, weil die hochfesten PET-Fasern sehr empfindlich auf Druckbelastungen quer zur Faserachse reagieren. Generell kann festgestellt werden, dass Kriechversuche nur mit optimal auf ein Produkt abgestimmten Klemmsystemen erfolgreich sein können.

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass der 10'000-Stunden-Versuch nicht zuverlässig durch einen Zeitrafferversuch unter erhöhten Temperaturen substituiert werden kann. Die generelle Unsicherheit, welche bezüglich der Bestimmung des Kriech- und Zeitstandverhaltens von Geokunststoffen herrscht, wird aber durch den relativ hohen Abminderungsfaktoren A_1 aufgefangen (Abschnitt 5.1.3).

4.4 Labor- und Freibewitterungen

In einem Freibewitterungsstand wurden Proben zur Ermittlung der Witterungsbeständigkeit im Winterhalbjahr während ca. 3 Monaten und im Sommerhalbjahr während ca. 6.5 Monaten exponiert. Um den Einfluss einer Zugspannung auf die strahlungsinduzierte Alterung zu ermitteln, wurden Proben ausgewählter Muster auf 25 % ihrer Zugfestigkeit verdehnt und unter konstanter Verdehnung der Sommerhalbjahr-Bewitterung unterzogen. Des Weiteren wurden Proben für den nachträglichen Einbau (Feldversuch) sowie gleichzeitig Proben zur Untersuchung einer Festigkeitsabnahme während ca. 14 Tagen horizontal exponiert. Einzelne Muster wurden zusätzlich im Labor auf die Witterungsbeständigkeit gemäss SN 640 550 (1996) geprüft.

4.4.1 Beurteilung der Witterungsbeständigkeit

Die Ergebnisse der Zugversuche, welche zur Beurteilung der Witterungsbeständigkeit durchgeführt wurden, sind in Tab. 85 zusammengefasst. Angegeben wird die Höchstzugkraft in kN, welche an im allgemeinen 5 cm breiten Proben ermittelt wurde. Das Kraft-Dehnungsverhalten wurde jeweils nur in Produktionsrichtung untersucht, wobei die aufgeführten Daten den Mittelwert (inkl. 95 % Vertrauensbereich) von jeweils mindestens 5 Proben wiedergeben.

In Tab. 86 ist die Restfestigkeit der bewitterten Muster in Prozent der Ausgangsfestigkeit angegeben. Ein von 100 % abweichender Wert für die Restfestigkeit wird nur dann angegeben, wenn der Mittelwert der beanspruchten Proben mit 95% statistischer Wahrscheinlichkeit gesichert kleiner als der Mittelwert der Referenzproben ist.

Produkttyp	Muster	Original	Exposition vorgängig zum Einbau	Freibewitterung Winter 00/01	Freibewitterung Sommer 01	Bewitterung unter Spannung	Witterungsprüfung SN 640 550
biaxial gestreckte PP-Gitter	19	2.90 ± 0.09	2.81 ± 0.14	2.68 ± 0.36	2.71 ± 0.27	3.02 ± 0.79	
	26	2.12 ± 0.03	2.21 ± 0.09	2.24 ± 0.06	2.02 ± 0.17		
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16	4.58 ± 0.26	4.67 ± 0.05	4.71 ± 0.03	4.51 ± 0.50		
	29	4.28 ± 0.17	4.31 ± 0.17	4.37 ± 0.19	4.33 ± 0.19	3.01	
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28	3.50 ± 0.10	3.30 ± 0.03	3.55 ± 0.05	2.81 ± 0.09	2.30 ± 0.03	
	22	8.75 ± 0.40	8.43 ± 1.02	8.96 ± 0.18	9.11 ± 0.47	9.25 ± 5.19	
Gitter aus gelegten und verschweissten PET/PP-Flachstäben	12	6.05 ± 0.18	5.99 ± 0.55	5.29 ± 0.25	4.61 ± 0.33		
	13	3.74 ± 0.09	3.86 ± 0.18	3.94 ± 0.21	3.90 ± 0.17	3.64 ± 1.10	
	32	2.72 ± 0.24	-	2.60 ± 0.10	2.48 ± 0.20		
mehrlagiges PP-Gitter	27	0.84 ± 0.06	0.86 ± 0.05	0.82 ± 0.03	0.82 ± 0.10		
PP-Bändchengewebe	01	5.80 ± 0.12	5.92 ± 0.31	6.11 ± 0.11	4.49 ± 0.14		
	02	3.60 ± 0.20	3.87 ± 0.12	3.82 ± 0.13	2.67 ± 0.12	2.65 ± 0.31	
	23	2.44 ± 0.12	2.17 ± 0.08	2.42 ± 0.04	1.09 ± 0.10		
Gewebe mit PET-Kette	34	6.72 ± 0.14	5.36 ± 0.33	5.40 ± 0.08	1.98 ± 0.04		
	24	18.66 ± 0.67	18.40 ± 0.61	20.46 ± 0.39	12.03 ± 0.35		
	25	45.82 ± 2.33	38.88 ± 3.62	41.78 ± 2.16	31.05 ± 1.98		
PET-Kettengewirk	18	21.52 ± 0.32	19.92 ± 0.65	19.64 ± 0.36	12.10 ± 0.13		
mit PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	20	3.41 ± 0.16	3.33 ± 0.50	3.60 ± 0.34	3.26 ± 0.25	1.66 ± 0.59	
	21	2.96 ± 0.08	3.21 ± 0.15	3.43 ± 0.51	2.92 ± 0.16		
mit PET-Multifilament verstärktes PP-Vlies	30	2.15 ± 0.05	2.24 ± 0.06	2.29 ± 0.03	1.43 ± 0.01	1.80 ± 0.15	
	31	4.10 ± 0.23	4.46 ± 0.08	4.48 ± 0.61	3.77 ± 0.26		
Aramid-Gitter m. Vlies	35	2.43 ± 0.24	2.31 ± 0.19	2.18 ± 0.10	1.45 ± 0.19		
PP-Vliese für Bewehrungszwecke	03	4.40 ± 0.38	4.68 ± 1.01	4.43 ± 0.81	1.79 ± 0.37		
	04	2.71 ± 0.40	2.75 ± 0.82	2.85 ± 1.06	1.23 ± 0.30	0.72 ± 0.52	
PP-Vliese für Trenn- und Filteraufgaben	05	1.62 ± 0.49	1.35 ± 0.49	1.01 ± 0.13	0.30 ± 0.06		
	09	0.87 ± 0.11	1.09 ± 0.11	0.88 ± 0.06	0.76 ± 0.08		1.00 ± 0.09
	06	0.62 ± 0.05	0.66 ± 0.10	0.63 ± 0.12	0.00		0.58 ± 0.07
	07	0.59 ± 0.06	0.64 ± 0.07	0.61 ± 0.10	0.00		0.60 ± 0.07
	08	0.29 ± 0.02	0.33 ± 0.01	0.32 ± 0.02	0.10 ± 0.01		0.30 ± 0.03
	10	0.55 ± 0.02	0.60 ± 0.04	-	-		0.43 ± 0.02
	17	0.53 ± 0.03	0.61 ± 0.13	0.31 ± 0.04	0.14 ± 0.01		0.31 ± 0.02
PP/PE-Vlies	37	0.64 ± 0.07	0.63 ± 0.06	0.64 ± 0.06	0.05 ± 0.01		0.64 ± 0.05
PE/PP-Gewebe	11	0.84 ± 0.05	0.81 ± 0.06	0.88 ± 0.03	0.30 ± 0.04		0.88 ± 0.02
besch. PET-Gewebe	15	1.96 ± 0.02	1.81 ± 0.05	1.95 ± 0.07	1.30 ± 0.04	1.19 ± 0.55	1.75 ± 0.03
besch. Glas-Gitter	14	1.77 ± 0.11	1.55 ± 0.41	1.56 ± 0.07	1.43 ± 0.11		

Tab. 85 Mittelwert ± 95 % Vertrauensbereich der Streifen-Höchstzugkraft [kN] (Prüfung nach EN 12226, 2000).

Produkttyp	Muster	Exposition	Winter 00/01	Sommer 01	unter Spannung	Labor- prüfung
biaxial gestreckte PP-Gitter	19	100	100	100	100	-
	26	100	100	100	-	-
uniaxial gestreckte HDPE-Gitter	16	100	100	100	-	-
	29	100	100	100	70	-
PVC-beschichtete gewobene PET-Gitter	28	94	100	80	66	-
	22	100	100	100	100	-
Gitter aus gelegten und verschweissten PET/PP-Flachstäben	12	100	87	76	-	-
	13	100	100	100	100	-
	32	-	100	100	-	-
mehrlagiges PP-Gitter	27	100	100	100	-	-
PP-Bändchengewebe	01	100	100	77	-	-
	02	100	100	74	74	-
	23	89	100	45	-	-
Gewebe mit PET-Kette	34	80	80	30	-	-
	24	100	100	64	-	-
	25	85	91	68	-	-
PET-Kettengewirk	18	93	91	56	-	-
mit PET-Gitter verstärktes PP-Vlies	20	100	100	100	49	-
	21	100	100	100	-	-
mit PET-Multifilament verstärktes PP-Vlies	30	100	100	66	84	-
	31	100	100	92	-	-
Aramid-Gitter m. Vlies	35	100	89	60	-	-
PP-Vliese für Bewehrungszwecke	03	100	100	41	-	-
	04	100	100	45	27	-
PP-Vliese für Trenn- und Filteraufgaben	05	100	63	19	-	-
	09	100	100	100	-	100
	06	100	100	0	-	100
	07	100	100	0	-	100
	08	100	100	35	-	100
	10	100	-	-	-	78
	17	100	58	27	-	58
PP/PE-Vlies	37	100	100	8	-	100
PE/PP-Gewebe	11	100	100	36	-	100
besch. PET-Gewebe	15	92	100	66	61	89
besch. Glas-Gitter	14	100	88	81	-	-

Tab. 86 Restfestigkeit in % der bewitterten Geokunststoffe.

In Abb. 116 sind die geprüften Geokunststoffe zu Produktfamilien zusammengefasst und die Restfestigkeiten entsprechend als Bereiche angegeben. Dank der Dicke der Zugelemente können die gereckten Polyolefin-Geogitter trotz schlechter Witterungsbeständigkeit des Rohstoffs auch einer länger andauernden Exposition im Freien standhalten. Bei einem der Gitter aus PET-Flachstäben gewährte aber die Dicke der Zugelemente bereits bei moderater Bewitterung keinen ausreichenden Schutz.

Die untersuchten PP-Bändchengewebe konnten einer kurzen Expositionsdauer gut widerstehen, bei länger andauernder Bewitterung verloren sie aber deutlich an Festigkeit. Trotz relativ guter Beständigkeit des Rohstoffes zeigten die PET-Gewebe/Gewirke deutliche Alterungserscheinung, die zur Vliesverstärkung eingesetzten PET-Multifilamente bewährten sich im Vergleich deutlich besser. Die PVC-Beschichtung kann einer Beschädigung der PET-Fasern durch die UV-Strahlung stark entgegenwirken, über längere Zeit aber auch nicht verhindern. Die grossen Restfestigkeits-Unterschiede bei den geprüften Geovliesen (Tab. 86) machen deutlich, wie stark dem polymeren Rohstoff zugefügte Stabilisatoren die Witterungsbeständigkeit beeinflussen können.

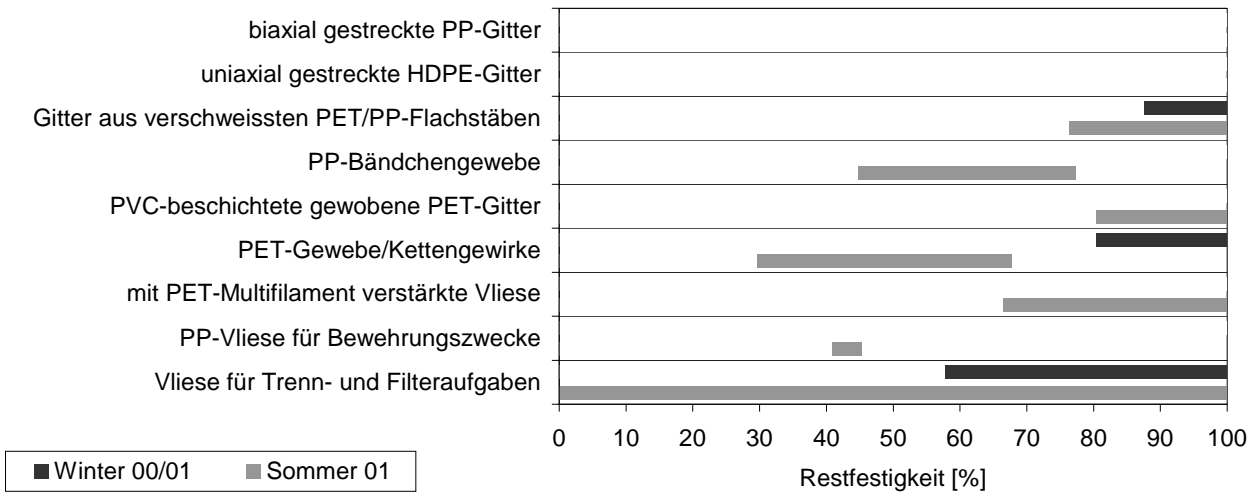


Abb. 116 Witterungsbedingte Alterung (Festigkeitsverlust) in Funktion der Exposition und des Geokunststoff-Typs.

4.4.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Abb. 117 bis Abb. 122 verdeutlichen den bei einer Bewitterung oft antreffenden Effekt der alterungsbedingten Rissbildung. Dargestellt sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahme ausgewählter Geokunststoff-Muster, welche nach der Exposition im Sommerhalbjahr 2001 deutliche Korrosionsspuren zeigten. Die jeweilige Vergrößerung kann den Abbildungen entnommen werden. Die elektronenoptisch festgestellten Schädigungen müssen sich dabei nicht direkt in einer Festigkeitsabnahme äussern, wenn beispielsweise nur der Vliesträger (Abb. 117, Abb. 118) oder die Beschichtung (Abb. 121, Abb. 122) betroffen sind.

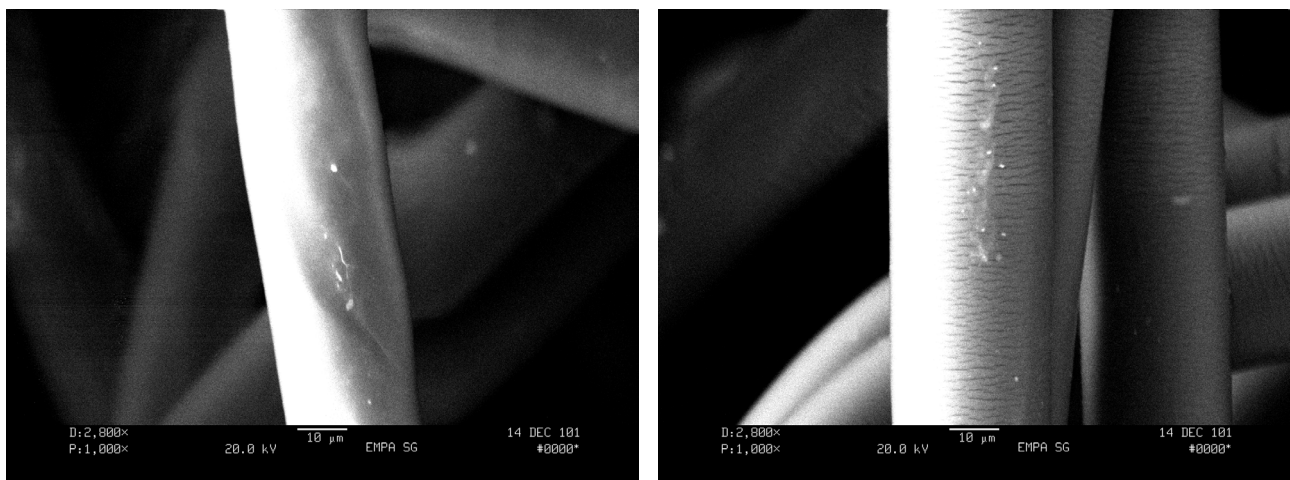


Abb. 117 PP-Vlies (Muster Nr. 30): links Neuzustand, rechts bewittert

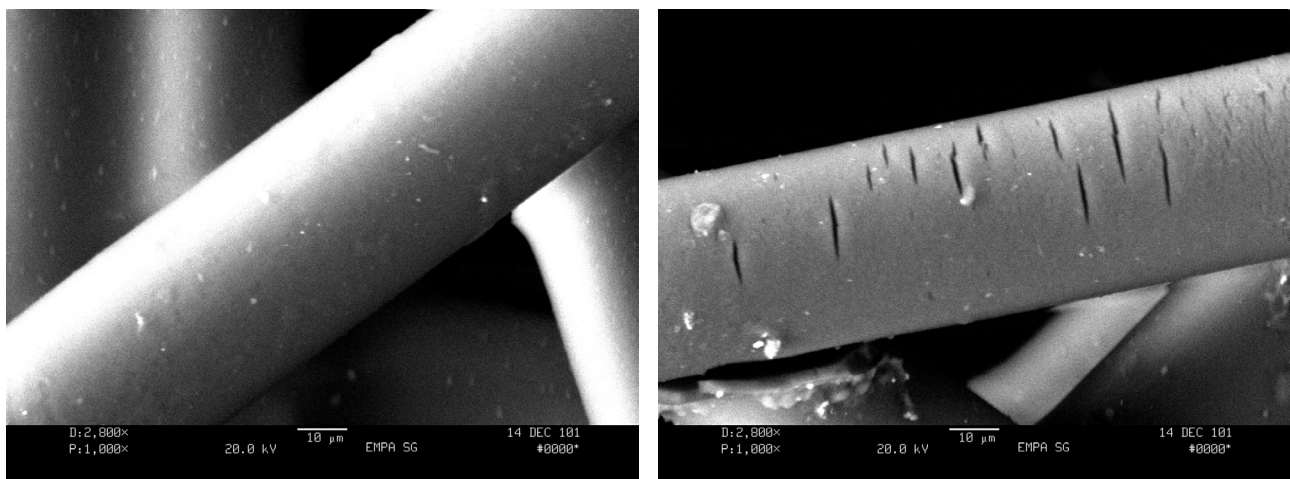


Abb. 118 PET-Vlies (Muster Nr. 35): links Neuzustand, rechts bewittert

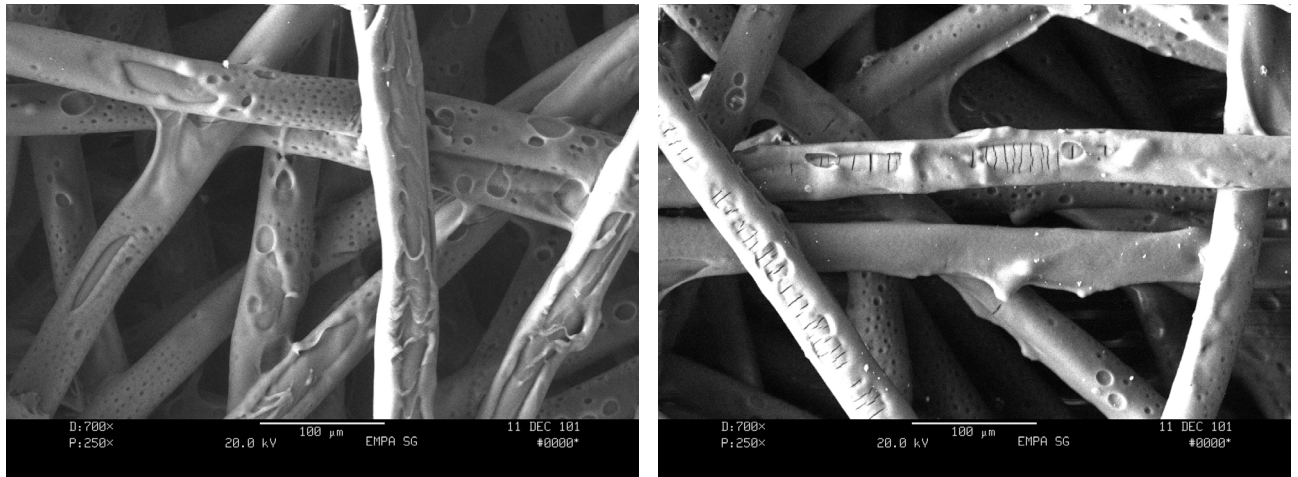


Abb. 119 thermisch verfestigtes PP/PE-Vlies (Muster Nr. 37): links Neuzustand, rechts bewittert

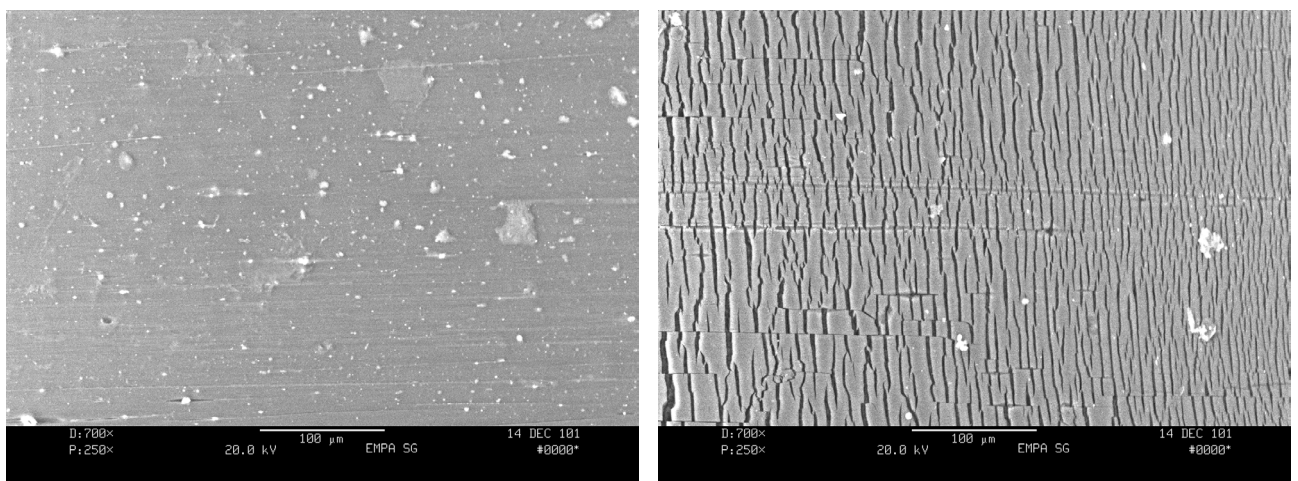


Abb. 120 PP-Bändchen (Muster Nr. 11, Schuss): links Neuzustand, rechts bewittert

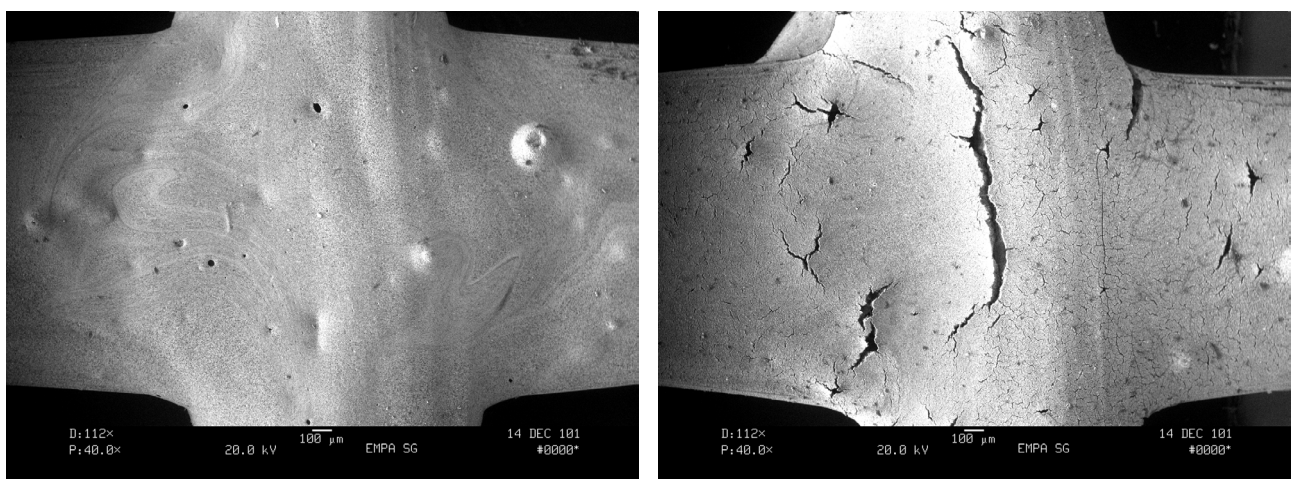


Abb. 121 beschichtetes Glasgewebe (Muster Nr. 14): links Neuzustand, rechts bewittert

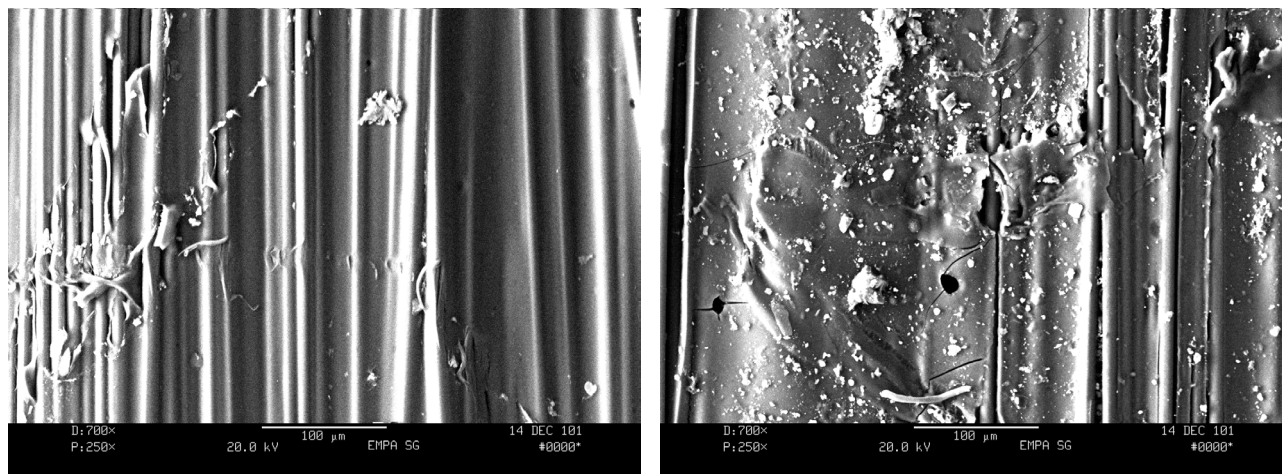


Abb. 122 beschichtete Aramidfasern (Muster Nr. 35): links Neuzustand, rechts bewittert

4.4.3 Einfluss einer Zugspannung auf die Witterungsbeständigkeit

Eine auf ein polymeres Material aufgebrachte Spannung kann eine Beschleunigung von Alterungsvorgängen bewirken. Um den Einfluss einer Zugspannung auf die strahlungsinduzierte Alterung zu ermitteln, wurden verschiedene Geokunststoff-Muster auf 25 % ihrer Zugfestigkeit verdehnt (Produktionsrichtung), in einem Spannrahmen fixiert und dem im Sommerhalbjahr 2001 angesetzten Bewitterungsversuch unterzogen.

Da während der Exposition einfachheitshalber nicht die Spannung, sondern die Dehnung konstant gehalten wurde, nahm die Zugkraft aufgrund von Relaxationsprozessen und einem eventuellen Gleiten aus den Klemmen mit der Zeit ab. Aus Tab. 87 ist ersichtlich, welche Spannung am Anfang und Ende des Versuches auf die Proben wirkte und wie stark sich diese im Verlauf der Zeit verringerte. Zu beachten ist dabei aber, dass die effektiv im Spannrahmen vorherrschenden Zugkräfte nicht direkt gemessen werden konnten.

Muster Nr.	2	4	13	15	19	20	22	28	29	30
Zugkraft beim Einspannen [N]	900	678	936	490	724	737	2188	876	1070	537
Zugkraft nach Entfernung des Spannrahmens [N]	317	209	331	283	354	352	1127	524	570	506
nach Exposition verbliebene relative Spannkraft [%]	35.2	30.8	35.4	57.8	48.8	47.7	51.5	59.8	53.3	94.1

Tab. 87 Abnahme der durch den Spannrahmen aufgebrachten Zugspannung als Folge der Relaxation der Geokunststoffproben während der Exposition. Angegeben ist die Restspannung in %.

Die Ergebnisse der nach der Exposition durchgeführten Zugversuche sind in Abschnitt 4.1.1 aufgelistet. Tab. 88 und Abb. 123 verdeutlichen, dass die aufgebrachte Spannung zwar in einigen Fällen die Alterung beschleunigt, eine Korrelation zum spannungsfreien Zustand aber nicht vorliegt. Die Alterung einzelner Muster (Nr. 19 und 30) wurde durch die aufgebrachte Spannung sogar verzögert.

Muster Nr.	02	04	13	15	19	20	22	28	29	30
Relative Zugfestigkeit [%]	100	59	100	100	112	51	100	82	69	126

Tab. 88 Relative Zugfestigkeit in % nach der Exposition unter Spannung im Sommerhalbjahr 2001 im Vergleich zur spannungsfreien Bewitterung. Bei nicht statistisch gesicherten Unterschieden wird eine Relativfestigkeit von 100 % angegeben.

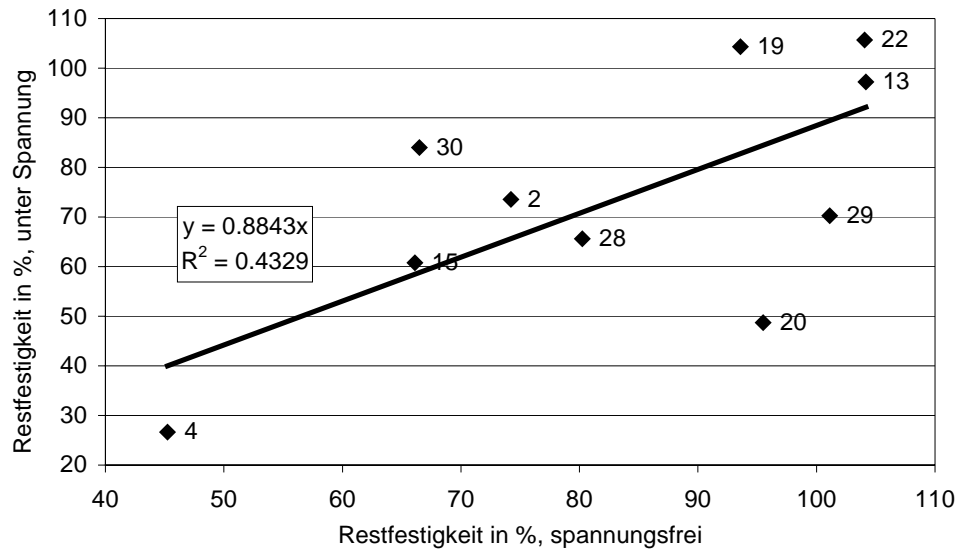


Abb. 123 Restfestigkeit nach der Freibewitterung von eingespannt exponierten Proben, verglichen mit spannungsfrei ausgelegten Proben.

4.4.4 Einfluss einer kurzzeitigen Bewitterung auf die Robustheit gegenüber Einbau

In Abb. 124 wird die nach der 14-tägigen Exposition im Freien und anschliessendem Einbau in Schotter gemessene Restfestigkeit mit einem berechneten Wert verglichen. Zur Berechnung wurde der Abminderungsfaktor, welcher aus der Restfestigkeit der bewitterten Geokunststoffe hergeleitet wurde, mit demjenigen multipliziert, welche anhand der im Neuzustand eingebauten Proben ermittelt wurde.

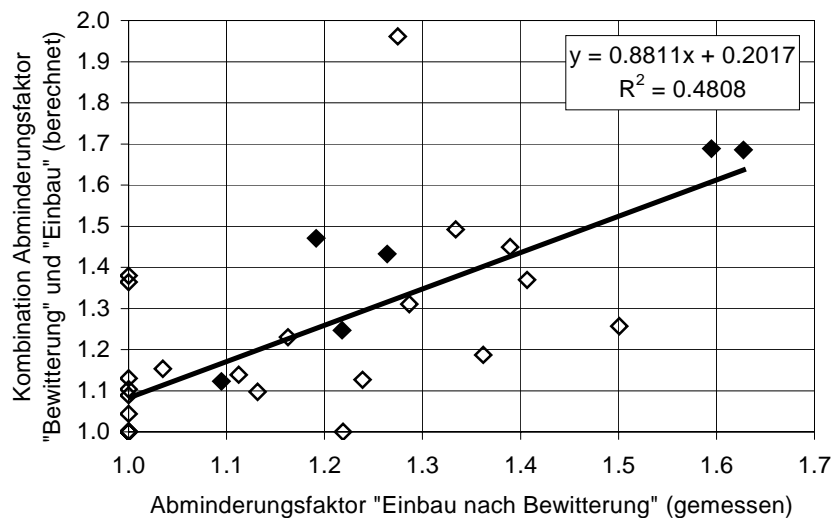


Abb. 124 Einfluss der vorgängigen Exposition auf die Einbaubeschädigung. Schwarz hervorgehoben sind die Werte derjenigen Muster, welche nach der Bewitterung eine statistisch gesicherte Festigkeitsabnahme aufwiesen (siehe Tab. 86).

Die Gegenüberstellung zeigt eine gewisse Übereinstimmung, wobei aber die ohnehin vorliegenden Unterschiede in den Restfestigkeiten der beiden Versuchsserien mit Schotter den Einfluss der Bewitterung klar überwiegen. Dies ist daraus ersichtlich, dass auch die Ergebnisse der durch die Exposition nicht geschädigten Muster (weisse Punkte in Abb. 124) stark variierten. Die gemessenen Restfestigkeiten zeigen, dass sich die Festigkeitsabnahmen aufgrund der Bewitterung und des Einbaus lediglich kumulieren, ohne dass synergistische Effekte auftreten. Das heisst, eine vorgängige, kurzzeitige Exposition im Freien erhöht die Empfindlichkeit gegenüber Einbaubeanspruchung nicht.

4.4.5 Wetterschutz von äusseren Geokunststofflagen

Die Schutzwirkung einzelner Lagen von Geokunststoffen im Falle von Witterungseinwirkung kann bei der Lagerung angefangener Rollen im Freien sowie dem Einsatz von Geokunststoffen als kurzzeitiger

Witterungsschutz für z.B. Abdichtungssysteme wichtig sein. Zu deren Beurteilung wurden Proben von drei Geovliesen in jeweils drei übereinander angeordneten Lagen während dem Sommerhalbjahr 2001 exponiert. Tab. 89 und Abb. 125 enthalten die Resultate der nach der Bewitterung vorgenommenen Streifenzugversuchen (die 1. Lage befand sich auf der sonnenzugewandten Seite).

Muster	Nr. 6	Nr. 8	Nr.37
Original	620 ± 48 (VC 11 %)	286 ± 15 (VC 7 %)	641 ± 68 (VC 15 %)
1. Lage	0	100 ± 6 (VC 5 %)	50 ± 7 (VC 12 %)
2. Lage	24 ± 11 (VC 35 %)	146 ± 8 (VC 4 %)	169 ± 20 (VC 9 %)
3. Lage	337 ± 140 (VC 34 %)	202 ± 16 (VC 6 %)	487 ± 44 (VC 7 %)

Tab. 89 Höchstzugkraft in kN (Prüfung an 5 cm breiten Streifen) von im Sommerhalbjahr 2001 übereinanderliegend exponierten Geovliesen (Mittelwert ± 95%-Vertrauensbereich sowie - in Klammern - Variationskoeffizient).

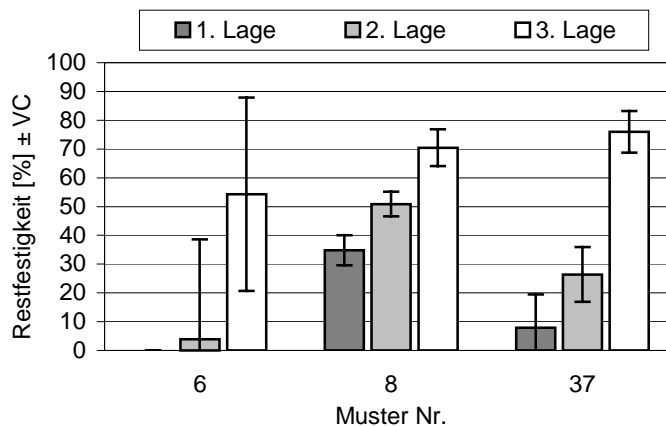


Abb. 125 Restfestigkeit in % von im Sommerhalbjahr 2001 übereinanderliegend exponierten Geovliesen. Als Fehlerindikator ist der im Zugversuch an den bewitterten Proben ermittelte Variationskoeffizient eingetragen.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch undurchsichtige Geokunststoffe genug UV-Strahlung durchlassen können, welche unter Umständen zur Schädigung darunterliegender Materialien führen. Selbst in der dritten Lage wurden noch erhebliche Festigkeitsverluste festgestellt (Abb. 125).

4.5 Herausziehwiderstand

4.5.1 Untersuchungsergebnisse externer Institute

Die Regressionsanalysen aus der Auswertung der an der LGA durchgeführten Herausziehversuche ergaben für die einzelnen Bodenmaterialien die Ergebnisse in Tab. 90. Der Reibungsbeiwert f_{SG} wurde über das Verhältnis des Winkels der Gesamtscherfestigkeit aus den Versuchen zum Winkel der Gesamtscherfestigkeit des Bodens ermittelt. Damit wird bei der Berechnung von f_{SG} indirekt auch der Strukturwiderstand τ_0 berücksichtigt. Aus dem Vergleich der Winkel der Gesamtscherfestigkeiten resultieren die Reibungsbeiwerte f_{SG} gemäss Tab. 90.

Muster	Regressionsgerade	Reibungsbeiwert f_{SG}			Bodenmaterial	Reibungswinkel ϕ_B [Grad]	Kohäsion c_B [kPa]
		30	60	90			
Normalspannung σ [kPa]		30	60	90	Sand	36.4	2.4
Nr. 01	$\tau_v = 0.72 \sigma + 4.7$	1.07	1.03	1.01			
Nr. 02	$\tau_v = 0.86 \sigma$	1.05	1.11	1.13			
Nr. 03	$\tau_v = 0.61 \sigma + 7.1$	1.04	0.94	0.90			
Nr. 29	$\tau_v = 0.34 \sigma + 2.3$	0.51	0.49	0.48			
vergleichbar mit Nr. 22	$\tau_v = 0.70 \sigma + 1.3$	0.91	0.93	0.93	Ton	26.6	19
	$\tau_v = 0.17 \sigma + 16.5$	0.63	0.54	0.49			
	$\tau_v = 0.74 \sigma + 35.2$	1.95	1.59	1.44			
Normalspannung σ [kPa]		30	50	70	Kies	34.2	9
Nr. 12	$\tau_v = 0.475 \sigma + 12.6$	0.91	0.85	0.81			

Tab. 90 Reibungsbeiwerte f_{SG} (Herausziehversuche an der LGA).

Zum Vergleich wurden weitere in externen Instituten gewonnene Prüfergebnisse hinzugezogen.

TRI Environmental Inc. unterzog folgende Geogitter Direktscher- und Ausziehversuchen nach ASTM D5321 (1992):

- Ein mit Muster Nr. 12 vergleichbares Geogitter aus gelegten und laserverschweissten PET-Flachstäben (Öffnungsweite 94 x 42 mm). Die Zugfestigkeit beträgt laut Herstellerangabe längs: 60 kN/m, quer: 35 kN/m, die Höchstzugkraft-Dehnung längs und quer < 10 %. Als Bodenmaterial wurde Betonsand (concrete sand) eingesetzt.
- Muster Nr. 13, wobei die Probe dem TRI direkt durch den Hersteller zugestellt wurde. Als Bodenmaterial kam sandiger Kies zum Einsatz.

Die Auflasten betragen 17.2, 34.4 bzw. 68.8 kPa. In Tab. 91 sind die Ergebnisse der Direktscher- und Ausziehversuche zusammengestellt.

Muster	Bodenmaterial	Direktschertest	Ausziehversuch
Nr. 13	sandiger Kies	0.93	0.87
vergleichbar mit Nr. 12	Betonsand	0.87	0.81

Tab. 91 Reibungsbeiwerte, ermittelt mit Direktscher- bzw. Ausziehversuchen (TRI, 1999).

GeoSyntec Consultants, USA, führte 1997 Ausziehversuche aus gebrochenem Bodenmaterial an Muster Nr. 35 durch, wobei die Probe dem Prüflabor direkt durch den Hersteller zugestellt wurde. Ermittelt wurden Reibungsbeiwerte zwischen **0.9 ... 1.1**.

4.5.2 Diskussion der Herausziehversuche

Die Grösse der Versuchseinrichtung hat speziell bei Geokunststoffen mit grossen Öffnungsweiten in Zugrichtung z.B. bei uniaxial gestreckten Geogittern einen wesentlichen Einfluss auf die Grösse des Reibungsbeiwertes. Werden relativ kleine Testeinrichtung mit einer Verankerungslänge der Geokunststoffe von z.B. 300 mm verwendet, so werden in vielen Fällen die Reibungsbeiwerte massiv unterschätzt, da nur wenige Querrippen Widerstand gegen ein Herausziehen leisten können.

Für die Interpretation der Versuchsergebnisse werden häufig die maximalen Herausziehspannungen τ gegen die aufgetragenen Normalspannung σ aufgetragen. Dabei verläuft die aus der Analyse der Versuchsergebnisse resultierende Regressionsgerade nur in den seltensten Fällen durch den Koordinatenursprung. Neben dem Reibungswinkel Geokunststoff - Boden ist somit meistens ein sogenannter Strukturwiderstand zu berücksichtigen.

Falls der Reibungsbeiwert gleich dem Verhältnis von Reibungswinkel Geokunststoff - Boden zum Reibungswinkel Boden über den Tangens ohne Mitberücksichtigung des Strukturwiderstandes gesetzt wird, so resultiert generell eine Unterschätzung des Reibungsbeiwertes. Dies kann vermieden werden, wenn in Abhängigkeit der Normalspannungen das Verhältnis der Gesamtscherfestigkeiten berücksichtigt wird.

5. Schlussfolgerungen

5.1 Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgaben

Die Schlussfolgerungen beinhalten Angaben über die Projektierung eines Bauobjektes mit den dafür massgebenden Randbedingungen und Einflüssen, welche für die Bemessung wichtig sind. Die Bemessung liefert die Beanspruchungen des Bauteils Geokunststoff. Für die Nachweise der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit muss das Langzeitverhalten der relevanten Eigenschaften der eingesetzten Geokunststoffe bekannt sein.

Das Hauptziel des Forschungsprojektes bestand darin, Grundlagen zur Beurteilung dieses Langzeitverhaltens zusammenzustellen und zum Teil mit eigenen Untersuchungen zu ergänzen. Es wurde versucht, die wichtigsten Ergebnisse so zusammenzufassen, dass diese direkt für den Anwender umsetzbar sind und ihm für die Projektierung und die Produktwahl wichtige Hinweise liefern. Dies soll mithelfen, grobe Fehler in der Projektierung und Bemessung einerseits und der Auswahl geeigneter Geokunststoffe andererseits zu vermeiden.

5.1.1 Projektablauf

Schritt	Tätigkeit	Ziel
1.	Planungsidee einer Problemlösung mit bewehrter Erde	
2.	Geländeaufnahmen im Objektbereich Geologisch - geotechnische Vorabklärungen	Profile, Höhenkurvenplan Aufbau Untergrund mit massgebenden Bodenschichten Grund- / Hangwasser
3.	Ermittlung der Bodenkennwerten der massgebenden Schichten	Raumgewicht Reibungswinkel Kohäsion Zusammendrückbarkeit Lagerungsdichte
4.	Ausscheiden massgebender Profile mit Projekteintrag	Objektanmessungen
5.	Äussere Randbedingungen, bewegliche Lasten (Verkehr)	ständige Lasten dynamische Belastungen (z.B. Erdbeben) Wasser (inner- und ausserhalb) Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit Gebrauchsdauer
6.	Festlegen der Geometrie, Verkleidung	Höhe Art der Verkleidung Vorwahl der Bewehrungsbreite
7.	Schüttmaterial mit Bodenkennwerten	Raumgewicht Reibungswinkel Kohäsion Zusammendrückbarkeit Lagerungsdichte Verdichtbarkeit Behandlung (Stabilisierung)
8.	Bemessung durch Nachweise der Inneren und Äusseren Tragsicherheit	Mindestanforderungen an die Bewehrung: - minimale Langzeitzugfestigkeit - maximale Deformationen - Bewehrungsbreite Fundationsmassnahmen
9.	Auswahl der Bewehrung und Nachkontrolle der Inneren Tragsicherheit	
10.	Anforderungen an die Ausführung	Masshaltigkeit Verdichtungsanforderungen Entwässerungsmassnahmen Konstruktive Hinweise
11.	Kontrollen (Kontrollplan) (Unterhaltsplan)	Einbaukontrollen Deformationskontrollen Langzeitüberwachung

Tab. 92 Projektablauf für eine geokunststoffbewehrte Konstruktion.

Die Projektierung geokunststoffbewehrter Konstruktionen muss sehr sorgfältig durchgeführt werden und erfordert Grundkenntnisse des Grundbaus und der Bodenmechanik, wie diese auch für andere Erdbauwerke mit Verankerungen oder Vernagelungen erforderlich sind. Der Projektierende muss in der Lage sein, die möglichen Gefährdungsbilder und Versagensmechanismen zu erkennen. Diese benötigt er für die erforderlichen Nachweise der Inneren und der Äusseren Tragsicherheit solcher Konstruktionen. Die über die Zeit verfügbare Zugfestigkeit der für das Bewehren eingesetzten Geokunststoffe muss dabei bekannt sein.

Die Projektierung eines Geokunststoff-bewehrten Bauwerkes ist komplex und beinhaltet umfassende Abklärungen, damit alle Eingangsparameter für die Bemessung und die Nachweise der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit bekannt sind. Schliesslich ist eine Bewehrung auszuwählen, welche allen Anforderungen genügt, und es sind die Anforderungen an die Ausführung selbst zu formulieren. Am Bau sind Materialien und Arbeiten einer Qualitätskontrolle zu unterziehen. Für das abgeschlossene Bauwerk ist ein Unterhaltsplan aufzustellen, der auch periodische Kontrollen (Aussehen, Deformationen, Schäden) vorsieht. Tab. 92 zeigt einen möglichen Projektablauf von der ersten Planungsidee bis zum Unterhaltsplan.

Das Projekt umfasst schliesslich alle erforderlichen Planunterlagen für eine Ausführung mit den Spezifikationen für das Bauwerk und den Anforderungen an die zu verwendenden Baumaterialien. Dazu gehört auch die Bewehrung mit den Geokunststoffen. Die Bemessung liefert die minimalen Anforderungen an die Bewehrung und die geometrischen Abmessungen der Konstruktion (Bewehrungstiefe).

Für die Ausführung benötigt der Unternehmer Unterlagen über alle projekt- und ausführungsrelevanten Randbedingungen und Anforderungen. Das Projekt muss Angaben enthalten über die geometrischen Abmessungen, die Foundation, den allgemeinen Bauablauf, die Materialspezifikationen bezüglich Schüttmaterialien, Baustoffe für Bewehrung und Verkleidung sowie einen allfälligen, systembedingten Aufbau mit Angabe von Einbau- und Deformationstoleranzen.

Wesentliche Angaben, welche ein Projekt für die Ausführung enthalten muss, sind in Tab. 93 aufgeführt. Die Aufzählung erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Diese Angaben sind dem Unternehmer bereits in der Offertphase zur Verfügung zu stellen, da er nur so ein vollständiges Angebot einreichen kann. Damit muss auch gewährleistet werden, dass Angebote vergleichbar sind und auch einen vergleichbaren Qualitäts- und Sicherheitslevel aufweisen.

Detail	Spezifikationen
Allgemeines	Geometrie mit Grundrissen, Schnitten, Aufbauschemen Baugrube Entwässerung Foundation Spezielle Massnahmen Aufbauphasen Überwachung Kontrollen Toleranzen Gebrauchsdauer des Bauwerkes
Schüttmaterialien	Klassifikation (Korngrössenverteilungsband) Mindestanforderungen an die Scherfestigkeit (Reibung, Kohäsion) Durchlässigkeit Einbauwassergehalt Mindestanforderungen an die Verdichtung Stabilisierung (Art des Bindemittels)
Bewehrung	Mindestanforderungen an die Bewehrung für die Gebrauchsdauer t mechanische: Bemessungswert der Langzeitzugfestigkeit Max. Dehnung unter Gebrauchskraft hydraulische: Minimale Durchlässigkeit senkrecht Beständigkeit: Normale, spezielle Zusatzanforderungen je nach Anwendung
Verkleidung	Art und Ausbildung Verbindungen Einbaurichtlinien Einbautoleranzen
Begrünung	Klassifikation für die Hinterfüllung im Frontbereich (Korngrössenverteilung) Gehalt an organischen Bestandteilen Begrenzung pH -Wert Wasserrückhaltevermögen Spezielle Anforderungen Begrünungsverfahren und Anforderungen

Tab. 93 Aufzählung der erforderlichen Projektangaben für die Ausführung.

5.1.2 Funktion Bewehren

Für das bessere Verständnis werden wichtige allgemeinen Grundlagen für geokunststoffbewehrte Konstruktionen aufgeführt und Hinweise zur Beurteilung bzw. Erfassung wichtiger Eigenschaften der Geokunststoffe gegeben.

5.1.2.1 Ermitteln von Zugkräften in der Bewehrung

Als Bewehrung übernimmt der Geokunststoff Zugkräfte, die sich durch geringe Verformungen über Reibung aus dem aktiven "bewegten" Erdkörper auf den passiven "ruhigen" Erdkörper übertragen (Abb. 126).

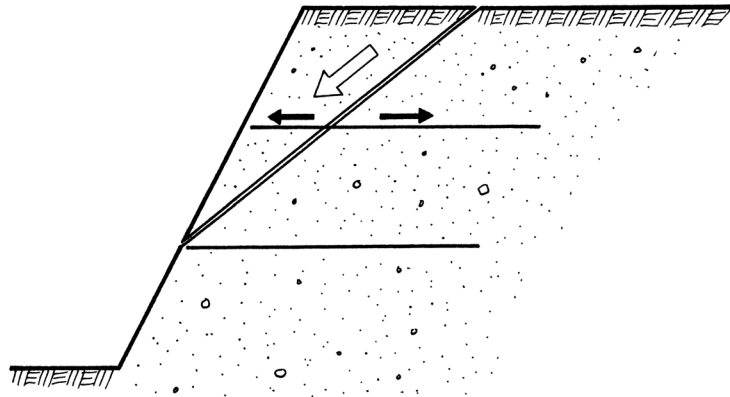


Abb. 126 Wirkung der Bewehrung.

Das Ermitteln von Zugkräften in der Bewehrung erfolgt meist mit klassischen Methoden der Geotechnik und beruht auf Gleichgewichtsbetrachtungen. Fallweise werden unterschiedliche Verfahren mit geraden, polygonalen, spiralförmigen oder kreisförmigen Gleitflächen verwendet (Abb. 127).

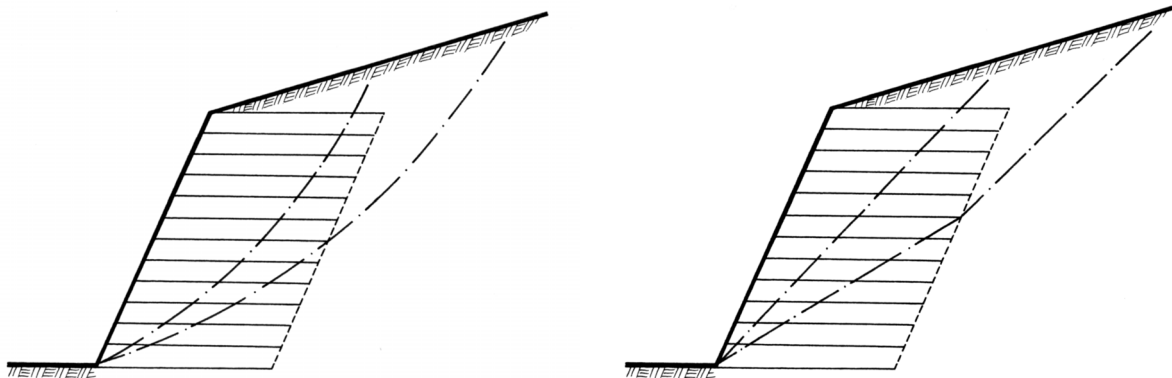


Abb. 127 Bruchmodelle bei bewehrten Erdkörpern.

Gesucht werden für die massgebenden, kritischen Gleitflächen die für die Herstellung des Gleichgewichtszustandes erforderlichen Zugkräfte. Berücksichtigt werden nur die Zugkräfte in den Geokunststoff-Lagen, welche die Gleitfläche schneiden. Die Zugkräfte sind für massgebende Lastfälle (ständige und bewegliche Lasten, dynamische Belastungen aus Verkehr, Erdbeben, etc.) entsprechend den einschlägigen Normen (SIA 160, EUROCODE 1) zu ermitteln, wobei diese mit den üblichen Partialfaktoren zu multiplizieren sind.

Nach dem Konzept mit Partialsicherheiten liefert die Bemessung dabei den Bemessungswert der Beanspruchung z auf Bemessungsniveau, welcher mit der Bemessungszugfestigkeit der Geokunststoff-Bewehrung unter Berücksichtigung des Tragsicherheitsbeiwertes γ zu vergleichen ist.

Nach altem, globalem Sicherheitskonzept erhält man ebenfalls den Bemessungswert der Beanspruchung z_d , wenn die Sicherheit gegenüber dem Auftreten eines Bruchzustandes entlang der angenommenen Bruch- bzw. Gleitfläche definiert wird. Dieser Bemessungswert der Beanspruchung muss dann kleiner sein als die zulässige Gebrauchskraft der Bewehrung. Es ist aber nicht zulässig, die Sicherheit nur auf der Bewehrung einzuführen, da dann die stark von der Scherfestigkeit des Bodens abhängige Globalsicherheit unberücksichtigt bleibt.

Unabhängig vom Sicherheitskonzept ist klarzustellen, zu welchem Zeitpunkt und für welche Zeitdauer (Beanspruchungsdauer) die ermittelten Kräfte gültig sind:

- temporärer Einbauzustand
- temporäre Ausnahmebelastung (z.B. Erdbeben)
- permanente Belastung über die gesamte Gebrauchsdauer

Bedingungen:

- für den inneren Tragwiderstand der Bewehrung:
Der Bemessungswert der Zugfestigkeit des durch eine Gleitfläche geschnittenen Geokunststoffs muss grösser sein als der Bemessungswert der Beanspruchung (= Zugkraftbedarf). Diese Bedingung liefert direkt die entsprechenden Mindestanforderungen an den Bewehrungs-Geokunststoff.
- für den äusseren Tragwiderstand der Bewehrung:
Der Bemessungswert des Ausziehwiderstandes bzw. Gleitwiderstandes des Geokunststoffs muss, ermittelt über den Überlagerungsdruck und die verfügbare Verankerungslänge, grösser sein als der Bemessungswert der Beanspruchung (= Zugkraftbedarf) in der jeweiligen Lage. Diese Bedingung bestimmt letztlich die minimale Verankerungslänge über die Kennwerte der Interaktion Boden - Geokunststoff in jeder Lage, um den Bemessungswert der Beanspruchung zu erreichen. Der Beiwert für die Interaktion Boden - Geokunststoff ist auch vom Boden abhängig und kann nicht als rein Geokunststoff-spezifische Mindestanforderung angegeben werden.

5.1.2.2 Verformungskriterien

Geokunststoffe zeigen im Boden ein anderes Verformungsverhalten (Kraft-Dehnungs-Verhalten) als im Streifenzugversuch. Besonders Produkte mit hoher Dehnung im Streifenzugversuch verhalten sich im Boden eingebettet und belastet wesentlich steifer. Praktische Erfahrungen mit Geokunststoff-bewehrten Konstruktionen zeigen allgemein wesentlich geringere Deformationen, als diese aufgrund des Verformungsverhaltens des Geokunststoffes auf dem Niveau der effektiven Beanspruchung nach den Ergebnissen im Streifenzugversuch zu erwarten wären.

Nummerische Bemessungsmodelle ergeben bisher noch kaum befriedigenden Resultate, welche sich mit der Praxis decken, und die eine generelle Formulierung von Mindestanforderungen an die Dehnung oder an das Deformationsverhalten von Bewehrungs-Geokunststoffe erlauben. Werden Verformungskriterien angegeben, sind diesen auf dem Niveau der Gebrauchskräfte **ohne** partielle oder globale Sicherheiten festzulegen, wie sie auch für die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit (Verformungen) zu berücksichtigen sind.

Anwendungsfälle, bei denen die Verformungen im Bewehrungsbereich eine wichtige Rolle spielen und bei denen gegebenenfalls Kriterien an die Verformungen zu stellen sind:

- senkrechte Mauern mit harten Verkleidungen (hard facings)
- Widerlager
- Grundbewehrung von Dämmen
- Bewehrung von Foundationsschichten

Anforderungen:

- Maximal zulässige Dehnung unter Gebrauchskraft $z_{G1,0}$ aus Kurzzeitversuch
- Maximal zulässige Kriechdehnung unter Gebrauchskraft $z_{G1,0}$ für die Gebrauchsdauer t (t in Jahren).

5.1.2.3 Verbundstoffmodelle

Dank der Interaktion Geokunststoff - Boden kann das bewehrte System auch als Verbundstoff betrachtet werden. Die Bewehrung erzeugt einen "zugfesten" Boden, also ein neues Material mit weit höherer Scherfestigkeit, wie dies Abb. 128 verdeutlicht. Dieser Effekt erklärt die in der Praxis gemessenen, gegenüber Berechnungen meist deutlich geringeren Deformationen und Beanspruchungen Geokunststoff-bewehrter Konstruktionen.

Die Bewehrung bewirkt eine Kohäsion bzw. deren Erhöhung und meist auch noch eine geringe Steigerung des Reibungswinkels. Da entsprechende Stoffgesetze zur Erfassung der Wirkung der Bewehrung fehlen, können daraus keine Mindestanforderungen an Bewehrungs-Geokunststoffe abgeleitet werden.

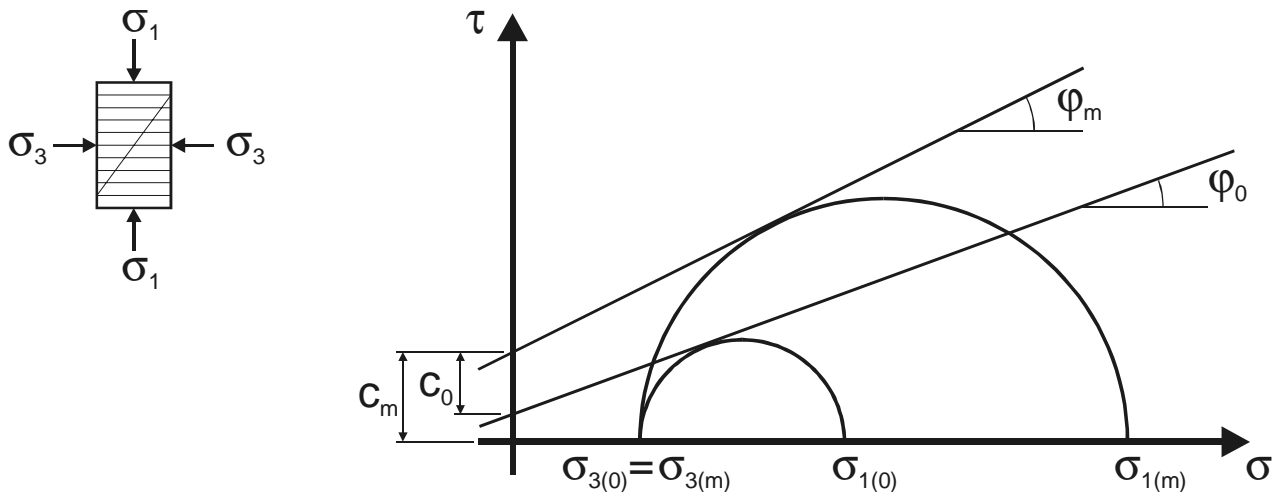


Abb. 128 Veränderung der Scherparameter durch Bewehrung.

5.1.2.4 Verbindungen

Verbindungen in der Hauptkraftrichtung von Bewehrungs-Geokunststoffen sind grundsätzlich zu vermeiden. Zulässig sind allenfalls Steckverbindungen mittels Stäben bei extrudierten Geogittern bei entsprechenden Nachweisen. In seltenen Fällen kann bei genügender und gesicherter Auflast ein Überlappen vorgenommen werden, wobei dann die Scherparameter Geokunststoff - Geokunststoff bekannt sein müssen, und rechnerisch eine ausreichende Überlappungslänge nachzuweisen ist. Allenfalls ist zwischen die zu überlappenden Geokunststoffe eine dünne Schicht Boden einzubringen, um den Gleitwiderstand zu erhöhen.

Speziell beim Einsatz in Stützmauern mit steiler Neigung der Front und einer harten Verkleidung sind statisch wirksame Verbindungen zwischen dem Geokunststoff und der Front erforderlich. Diese Verbindungen haben die auftretenden Kräfte (Erddruck auf die Verkleidung) dauerhaft aufzunehmen und zu übertragen. Es sind daher vergleichbare Nachweise erforderlich, wie sie für den Bewehrungs-Geokunststoff allein durchgeführt werden. Im Wesentlichen ist der Abminderungsfaktor A_3 (Anschlüsse) analog dem Faktor A_1 (Zeitstandfestigkeit der Verbindung) zu bestimmen und A_4 (Dauerhaftigkeit) ist dem Kontaktmedium (Beton, Stahl. etc.) anzupassen.

Wird die Langzeitzugfestigkeit der Verbindung mit separaten Zeitstandversuchen ermittelt, resultiert direkt ein Gesamtfaktor ($A_1 \cdot A_3$). Wird hingegen nur die Abminderung der Kurzzeitzugfestigkeit ermittelt, muss der Faktor A_3 mit dem am Produkt allein bestimmten Faktor A_1 multipliziert werden, wobei zu prüfen ist, ob für die Verbindung überhaupt ein analoges Zeitstandverhalten vorausgesetzt werden darf.

Erfolgt die Kraftübertragung durch Klemmen in den Fugen zwischen Blöcken, Elementen, Steinkörben, etc. sind die entsprechenden Reibungskräfte durch Ausziehversuche zu ermitteln. Die Kraftübertragung bei Verbindungen mittels Stäben, Haken, Verschraubungen, etc. ist durch Zugversuche zu ermitteln. Bei punktuellen Befestigungen ist auch das Zeitstandverhalten im Befestigungsbereich zu beachten.

Bei Verbindungen ist zu kontrollieren, wie weit diese z.B. durch Eigensetzungen der Schüttung auf Abscheren zusätzlich beansprucht werden. Dieser Fall tritt vor allem in Kombination mit starrer, vertikal unnachgiebiger Front ein.

Zwischen Betonteilen eingeklemmte Geokunststoffe sind empfindlich auf Kerbspannungen und eventuell auf chemische Einflüsse. Dies gilt besonders für Geogitter, die in frischem Mörtel oder Beton eingebettet werden. Die Alkalibeständigkeit ist dann speziell zu beachten.

5.1.2.5 Mindestanforderungen an Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion

Die projektspezifischen Anforderungen sind in der Regel bestimmend und sind das Resultat entsprechender Bemessungen. Damit Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion den Einbau möglichst ohne wesentliche grössere Beschädigungen überstehen, sollen diese mindestens die mechanischen Anforderungen an Geotextilien mit Trennaufgabe nach Norm SN 640 552 (1997) erfüllen. Für dehnungsarme Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion sind geringere Werte des Produktes (Zugfestigkeit \cdot Dehnung unter Höchstzugkraft) zulässig, wenn der Abminderungsfaktor für den Einbau A_2 für entsprechende Verhältnisse mit Einbauversuchen nachgewiesen wurde.

Mit den Beständigkeitsprüfungen nach SN 640 550 (1996) kann sichergestellt werden, dass ein Geokunststoff ausreichend langzeitbeständig ist, wenn er in natürlichem Boden und Wasser mit einem pH-

Wert zwischen 4 und 9 eingesetzt wird und die mittlere Bodentemperatur unter 25 °C liegt. Ein Freiliegedauer bis zu einer Woche ist zulässig. Für eine grössere Freiliegedauer (bis 1 Monat) ist die strengere Prüfung nach EN 12224 (2000) durchzuführen und der Abfall darf in diesem strengeren Versuch maximal 20 % betragen (z.B. bei Geokunststoffen in Polsterwänden).

5.1.2.6 *Bewehrungs-Geokunststoffe mit zusätzlicher Trennfunktion*

Bei Bewehrungs-Geokunststoffen mit zusätzlicher Trennfunktion muss die charakteristische Öffnungsweite begrenzt werden. Bei zusätzlicher Filterfunktion sind die erhöhten hydraulischen Anforderungen an Geotextilien mit Filterfunktion nach SN 640 552 (1997) zu erfüllen.

5.1.2.7 *Bewehrungs-Geokunststoffe mit zusätzlicher Drainagefunktion*

Wo Geokunststoffe eine Drainagefunktion übernehmen, haben diese eine entsprechende Transmissivität (Wasserdurchflussvermögen in ihrer Ebene) aufzuweisen. Dies kann vor allem beim Einbau in feinkörnigem, feuchtem bis nassem Schüttmaterial, das zu Konsolidationsverzug mit der Bildung von kritischem Porenwasserüberdruck neigt, wichtig oder zumindest vorteilhaft sein.

Eine solche Transmissivität fehlt Geogittern und Geweben, welche für das Bewehren im Vordergrund stehen. Damit eine Drainagefunktion möglich ist, sind in den meisten Fällen Verbundstoffe einzusetzen, die aus einem Geogitter oder Gewebe und einem speziellen Draingeotextil bestehen. Die Anforderungen an Geokunststoffe mit zusätzlicher Drainagefunktion richten sich nach den hydraulischen Anforderungen an Geotextilien mit Drainagefunktion nach Norm SN 640 552 (1997).

Bei Verbundstoffen können die Beiwerte für die Interaktion Boden - Geokunststoff und im internen Verbund des Geokunststoffs selbst abgemindert sein. Diese Werte sind daher speziell zu ermitteln und in den Nachweisen zu berücksichtigen.

5.1.2.8 *Einbauhinweise*

Bei der Lagerung sind Geokunststoffe vor UV-Strahlung und Nässe zu schützen.

Während bei Stützbauwerken, welche nach dem System der bewehrten Erde aufgebaut werden, davon auszugehen ist, dass bereits an das Grundplanum minimale Anforderungen gestellt werden, muss die Grundbewehrung von Dämmen und Foundationsschichten meist direkt auf sehr weichem bis weichem Untergrund eingebaut werden. Das Planum sollte vor dem Verlegen der Bewehrungs-Geokunststoffe leicht aufgeraut werden, damit die Reibung und die Verzahnung verbessert wird.

Geokunststoffe sind faltenfrei auf das Planum auszulegen. In Hauptkraftrichtung sind Stösse und Überlappungen unzulässig, sofern solche durch das Projekt nicht speziell mit entsprechenden Anforderungen zugelassen sind. Nach dem Verlegen sollten die Geokunststoffe möglichst rasch mit einer ersten Lage Schüttmaterial bedeckt werden, um sie vor direkter Bewitterung zu schützen. Eine Freiliegezeit von mehr als 1 Woche ist zu vermeiden.

Geokunststoffe dürfen nicht direkt mit schweren Einbaugeräten, LKW's, etc. befahren werden, und es muss vorher Material einer minimalen Dicke vorgelegt werden. Die Abminderungsfaktoren A_2 gelten allgemein für die Verdichtung mit leichteren Geräten, wie sie für den Einbau bewehrter Konstruktionen allgemein üblich sind. Bei schwereren Geräten über 50 kN muss in Abhängigkeit vom Kontaktmaterial (rund/kantig) die Überschüttung vor dem Verdichten gegebenenfalls erhöht werden, oder es wird mit Einbauversuchen nachgewiesen, dass keine erhöhten Beschädigungen auftreten, bzw. diese durch den Faktor A_2 bereits abgedeckt sind.

5.1.3 *Abminderungsfaktoren und Tragsicherheitsbeiwert*

Für Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion sind Angaben über die Abminderungsfaktoren unerlässlich. Nur so ist es möglich, die Langzeitbemessungs-Zugfestigkeit zu erhalten, welche für die Bemessung bzw. die Standsicherheitsnachweise Geokunststoff-bewehrter Konstruktionen unerlässlich sind. Die Abminderungsfaktoren sind produkteabhängig und können daher nicht generell angegeben werden.

Für den Bemessungswert der Langzeit-Zugfestigkeit von Bewehrungsgeokunststoffen gilt gemäss Abschnitt 0 der Ansatz:

$$z = \frac{r}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_{\text{dyn}} \cdot \gamma}$$

Die Abminderungsfaktoren basieren auf Einflüssen und Eigenschaften, welche die Zugfestigkeit des Geokunststoffs wesentlich reduzieren. Im Unterschied zu den bekannten Baustoffen Beton und Stahl ist bei Kunststoffen die Langzeit-Zugfestigkeit im Verhältnis zu ihrer Kurzzeitzugfestigkeit weit geringer.

Vorschriften über die Einführung und die Berücksichtigung sowie die Grösse der Abminderungsfaktoren und des Tragsicherheitsbeiwertes differieren von Land zu Land oder fehlen ganz, wie z.B. in der Schweiz. Immerhin gibt es mit dem erwähnten Ansatz und den Abminderungsfaktoren A_1 , A_2, \dots einen Konsens, der sich international langsam durchsetzt.

Für jedes Projekt ist es wichtig, jeden einzelnen Abminderungs- und Sicherheitsfaktor sorgfältig zu wählen. Dem Praktiker fällt jedoch auf, dass diese Auswahl oft verbunden ist mit einer verdeckten Tendenz, bestimmte Ziele zu erreichen. So tendiert der unerfahrene Ingenieur zu eher hohen Faktoren, um alle Gefahren sicher abzudecken, während Unternehmer und Lieferanten unter dem Wettbewerbsdruck dazu neigen, durch geringe Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren mit schwächeren (= billigeren) Produkten auszukommen.

Das Resultat ist ein Bauwerk mit geringeren Sicherheitsreserven und damit versteckt auch von geringerer Qualität. Damit steigt die Gefahr von Misserfolgen, was sich schädlich auf das Gelingen und damit auf das Vertrauen in diese moderne Technologie auswirkt. Klare und einheitliche Ansätze und Faktoren sind daher unerlässlich, damit Planer, Unternehmer, Produkte- und Systemlieferant die gleiche Sprache sprechen und mit gleichen Vorgaben operieren.

Im Folgenden werden für die verschiedenen auf dem Markt vertretenen Produktfamilien (Tab. 94) und die verwendeten Rohstoffe Bandbreiten für die Abminderungsfaktoren angegeben, welche dem Planer für Vorbemessungen dienen können. Ferner sind Mindestwerte angegeben, welche zu berücksichtigen sind, wenn eingehende Untersuchungen für ein bestimmtes Produkt fehlen bzw. Produzentenangaben nicht nachvollziehbar sind.

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe ¹⁾	Üblicher Bereich der Zugfestigkeit (kNm^{-1})	Üblicher Bereich der Dehnung unter Höchstzugkraft (%)
Extrudierte biaxial Geogitter einaxial	PP	20...50	10...20
	HDPE	40...200	10...15
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET	20...600 ²⁾	5...10
	PP	20...400	8...15
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET	30...600 ²⁾	10...20
	PVA	30...600 ²⁾	5...10
	AR	20...600 ²⁾	3...5
Multifil-Gewebe	PET	30...400 ²⁾	10...20
	PVA	30...400 ²⁾	5...10
	PP	50...200 ²⁾	15...30
Monofil-Gewebe	PE	20...50	15...40
Bändchengewebe	PP	30...100	15...30
Vliese (z.T. isotrop)	PP	20...120	30...60
	PET	20...120	30...60

1) PP = Polypropylen, PE = Polyethylen, HDPE = High Density Polyethylen, PET = Polyethylenterephthalat, PVA = Polyvinylalkohol, AR = Aramid

2) Für Spezialanwendungen können auch Gewebe, Geogitter weit höherer Zugfestigkeit bis über 1000 kN/m hergestellt werden

Tab. 94 Geokunststofffamilien mit Angabe üblicher Bereiche für die Zugfestigkeit.

Die Mindestwerte werden eher mit grossen Sicherheitsreserven angegeben, da dies die Hersteller zwingt, mit Prüfungen zu beweisen, dass geringere Anforderungen zulässig sind. Zu tiefe Mindestwerte (ohne Nachweise zu berücksichtigen) könnten dazu verleiten, auf teure Prüfungen zu verzichten.

5.1.3.1 Abminderungsfaktor A_1 (Kriechen)

Der Abminderungsfaktor A_1 (Kriechen) beschreibt das Zeitstandverhalten bzw. Verformungsverhalten unter Dauerlast (Kriechen) und ist damit abhängig von der Gebrauchsdauer. Tab. 95 liefert Angaben für A_1 für den Einsatz in permanenten Bauwerken mit einer Gebrauchsdauer deutlich über 25 Jahre, in der Regel bis 100 Jahre. Vorausgesetzt wird ferner, dass keine mittleren Bodentemperaturen über 20° zu erwarten sind.

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für A ₁	Mindestwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte biaxial Geogitter einaxial	PP	2.5...3.5	4.5
	HDPE	2.0...3.0	4.0
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET	1.7...2.0	2.5
	PP	2.5...3.5	4.5
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET	1.7...2.5	3.0
	PVA	1.7...2.5	3.0
	AR	1.7...2.5	3.0
Multifil-Gewebe	PET	1.7...2.5	3.0
	PVA	1.7...2.5	3.0
	PP	2.5...3.5	4.5
Monofil-Gewebe	PE	2.5...3.5	4.5
Bändchengewebe	PP	2.5...3.5	4.5
Vliese (z.T. isotrop)	PP	3.0...3.5	4.5
	PET	2.0...2.5	3.0

Tab. 95 Abminderungsfaktoren A₁ (Kriechen).**Bemerkungen:**

Erwartungsgemäss weisen Produkte aus den Rohstoffen PP und HDPE einen höheren Abminderungsfaktor A₁ auf. Dies kann sich auf die Wirtschaftlichkeit dieser an sich verbreiteten Geokunststoffe nachteilig auswirken. Dafür weisen diese gegenüber solchen aus PET eine gute Alkalibeständigkeit auf, was z.B. für den Einsatz in kalk- oder zementstabilisierten Böden wichtig ist.

Die Extrapolation auf 120 Jahre aus dem 10'000 Stunden Test wird nirgends einheitlich gehandhabt und der dafür in BS 8006 (1995) vorgesehene Sicherheitsfaktor 2.0 wird kaum je angewandt. Allgemein bildet der Faktor A₁ (Kriechen) für alle Materialien den wichtigsten Faktor, denn es ist der höchste und der am breitesten variierende Wert. Tiefe Werte sind nur nach Vorlegen entsprechender Prüfergebnisse, oder besser, nach anerkannten Zulassungen zu akzeptieren.

5.1.3.2 Abminderungsfaktor A₂ (Einbau)

Der Abminderungsfaktor A₂ beschreibt den möglichen Zugfestigkeitsverlust durch die Beschädigung der Bewehrung während dem Transport, dem Einbau und der Verdichtung. Massgebend ist dabei vor allem jene durch den Einbau und die Verdichtung. Dabei sind die Faktoren abhängig vom jeweiligen Schüttmaterial und auch von der Tragfähigkeit des Planums.

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für A ₂	Mindestwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte biaxial Geogitter einaxial	PP	1.0...1.2	1.3
	HDPE	1.0...1.1	1.2
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET	1.0...1.1	1.2
	PP	1.0...1.1	1.2
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET	1.0...1.1	1.2
	PVA	1.0...1.1	1.2
	AR	1.0...1.1	1.2
Multifil-Gewebe	PET	1.0...1.1	1.2
	PVA	1.0...1.1	1.2
	PP	1.0...1.2	1.3
Monofil-Gewebe	PE	1.0...1.2	1.3
Bändchengewebe	PP	1.0...1.2	1.3
Vliese (z.T. isotrop)	PP	1.0...1.1	1.2
	PET	1.0...1.1	1.2

Tab. 96 Abminderungsfaktoren A₂ (Einbau) für feinkörnige Böden (Ton, Silt, Sand).

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für A_2	Mindestwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte Geogitter biaxial einaxial	PP	1.1...1.3	1.4
	HDPE	1.1...1.2	1.3
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET	1.0...1.1	1.2
	PP	1.0...1.1	1.2
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET	1.1...1.2	1.3
	PVA	1.1...1.2	1.3
	AR	1.1...1.3	1.4
Multifil-Gewebe	PET	1.1...1.2	1.3
	PVA	1.1...1.2	1.3
	PP	1.2...1.4	1.5
Monofil-Gewebe	PE	1.2...1.4	1.5
Bändchengewebe	PP	1.2...1.4	1.5
Vliese (z.T. isotrop)	PP	1.1...1.3	1.4
	PET	1.1...1.3	1.4

Tab. 97 Abminderungsfaktoren A_2 (Einbau) für gemischtkörnige Böden mit Rundkorn bis $D = 150$ mm.

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für A_2	Mindestwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte Geogitter biaxial einaxial	PP	1.2...1.5	1.6
	HDPE	1.2...1.4	1.5
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET	1.0...1.2	1.3
	PP	1.0...1.2	1.3
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET	1.2...1.3	1.4
	PVA	1.2...1.3	1.4
	AR	1.2...1.4	1.5
Multifil-Gewebe	PET	1.2...1.4	1.5
	PVA	1.2...1.4	1.5
	PP	1.3...1.5	1.6
Monofil-Gewebe	PE	1.3...1.5	1.6
Bändchengewebe	PP	1.3...1.5	1.6
Vliese (z.T. isotrop)	PP	1.2...1.4	1.5
	PET	1.2...1.4	1.5

Tab. 98 Abminderungsfaktoren A_2 (Einbau) für gemischtkörnige Böden mit kantigen Komponenten bis $D = 150$ mm.

Die Angaben in Tab. 96, Tab. 97 und Tab. 98 gelten für ein Planum mittlerer bis hoher Tragfähigkeit, wie es in bewehrten Schüttungen und Stützbauwerken allgemein vorausgesetzt werden kann. Ferner wird eine moderate Verdichtung mit eher kleineren Geräten mit einem Gesamtgewicht bis ca. 50 kN und einer Verdichtung auf M_{E1} -Werte von 20 ... 30 MN/m², bzw. M_{E2} -Werte von 40 ... 70 MN/m² (entsprechend E_{V1} -Werte = 15 ... 25 bzw. E_{V2} -Werte = 35 ... 55 MN/m²) vorausgesetzt, wie sie für normale Dammbauten üblich sind. Die Mindestschichtstärke vor dem Verdichten bzw. Befahren soll dabei mindestens 0.2 m betragen.

Beim Einsatz auf einem Planum geringer Tragfähigkeit (z.B. Bewehrung von Fundamentalschichten auf weichem Untergrund) sind gesonderte Untersuchungen für die Ermittlung von A_2 angezeigt. Fehlen solche Versuche, sind die in den Tabellen angegebenen Faktoren um den Faktor 1.2 zu erhöhen.

Beim Einbau in sehr grobe, gemischtkörnige Böden mit grossen, auch kantigen Komponenten bis 300 mm Korndurchmesser sind unbedingt Einbauversuche durchzuführen, um die effektive Schädigung, gemessen als Abfall der Zugfestigkeit im Streifenzugversuch, festzustellen. Daraus kann dann der Abminderungsfaktor A_2 ermittelt werden. Bei Grossprojekten mit über 30'000 m² Verlegefläche können sich für die Optimierung der Bewehrung Einbauversuche mit dem vorgesehenen Schüttmaterial und der geforderten Verdichtung lohnen.

5.1.3.3 Abminderungsfaktor A_3 (Anschlüsse)

Der Abminderungsfaktor A_3 (Anschlüsse) beschreibt den möglichen Zugfestigkeitsverlust durch die Verarbeitung (Verbindungsstellen, Anschlüsse an Bauteile). Dieser ist sehr stark abhängig vom Produkt und der Art der Verbindung (Klemmung, Verschraubung, Verankerung durch Stäbe, etc.). Es sind daher keine generellen Angaben möglich. Die Werte sind auf jeden Fall durch Versuche zu ermitteln. Verlängerungen,

Fugen oder Überlappungen in der Krafrichtung von Geokunststoff-Bewehrungen sind grundsätzlich zu vermeiden.

5.1.3.4 Abminderungsfaktor A_4 (Dauerhaftigkeit)

Der Abminderungsfaktor A_4 (Dauerhaftigkeit) beschreibt den möglichen Zugfestigkeitsverlust infolge von Umgebungseinflüssen (Beständigkeit gegen Chemikalien und Mikroorganismen). Tab. 99 liefert Angaben für A_4 für den Einsatz in permanenten Bauwerken mit einer Gebrauchsdauer deutlich über 25 Jahre, in der Regel bis 100 Jahre, und gilt für folgende Randbedingungen:

- keine permanente Bewitterung
- mittlere Bodentemperaturen unter 20° C.
- normaler, natürlicher Boden und natürliches Grundwasser im Bewehrungsbereich mit einer Begrenzung des pH-Bereiches zwischen 4 und 9.
- keine mechanische Beschädigung durch grössere Lebewesen im relevanten Bewehrungsbereich
- kein Abfall der Zugfestigkeit in den normalen Beständigkeitsprüfungen für Geokunststoffe.

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für A_4	Mindestwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte biaxial Geogitter einaxial	PP	1.0...1.1	1.2
	HDPE	1.0...1.1	1.2
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET	1.0...1.1	1.2
	PP	1.0...1.1	1.2
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET	1.0...1.1	1.2
	PVA	1.0...1.1	1.2
	AR	1.0...1.1	1.2
Multifil-Gewebe	PET	1.0...1.2	1.3
	PVA	1.0...1.2	1.3
	PP	1.0...1.2	1.3
Monofil-Gewebe	PE	1.0...1.2	1.3
Bändchengewebe	PP	1.0...1.2	1.3
Vliese (z.T. isotrop)	PP	1.1...1.2	1.3
	PET	1.1...1.2	1.3

Tab. 99 Abminderungsfaktoren A_4 (Dauerhaftigkeit) für den Einsatz in normalem, natürlichem Boden und Wasser.

Für Bewehrungs-Geokunststoffe, welche mit permanenter Bewehrungsfunktion z.B. ohne verlässlichen Schutz vor Bewitterung im Frontbereich von Stützbauwerken, in kontaminierten Böden, etc. eingesetzt werden, sind spezielle Untersuchungen zur Ermittlung des Abminderungsfaktors A_4 angezeigt.

Hinweise:

- PET reagiert empfindlich in alkalischem Milieu (z.B. Frischbeton, Stabilisierungen mit hydraulischen Bindemitteln wie Kalk oder Zement) und kann bei pH- Werten > 9 durch Hydrolyse erheblich geschädigt werden. Der Einsatz von Geokunststoffen aus PET sollte in solchen Fällen vermieden werden, ausser ihre Beständigkeit wird speziell nachgewiesen.
- Für Bewehrungsgeokunststoffe, welche in direktem Kontakt mit Beton kommen (z.B. rückverhängte Elemente, Blöcke) ist die Alkalibeständigkeit ebenfalls nachzuweisen, sofern keine speziellen Schutzmassnahmen (Anstrich, Folie) getroffen werden. Dies gilt insbesondere für Geokunststoffe aus dem Rohstoff PET.
- Für Bewehrungsgeokunststoffe welche mit permanenter Bewehrungsfunktion z.B. ohne verlässlichen Schutz vor Bewitterung im Frontbereich von Stützbauwerken, in kontaminierten Böden etc. eingesetzt werden, sind spezielle Untersuchungen zur Ermittlung des Abminderungsfaktors A_4 unerlässlich.

5.1.3.5 Tragsicherheitsbeiwert γ

Zwischen Tragsicherheitsbeiwert und Abminderungsfaktoren besteht folgender Unterschied: Die Abminderungen berücksichtigen die tatsächliche Schwächung der Geokunststoffe infolge verschiedener Einflüsse im Verhältnis zur Kurzzeitzugfestigkeit. Der Tragsicherheitsbeiwert γ berücksichtigt analog zu anderen Baustoffen wie Beton und Stahl im Wesentlichen Ausführungsungenauigkeiten, Abweichungen im Untergrund und in der Schüttung und Unschärfen im Bemessungsmodell selbst.

Dabei ist es wichtig, dass bei der Angabe der Faktoren A_1 , A_2 , A_3 , A_4 ... garantierte Höchstwerte verlangt werden, welche mögliche Streuungen im Produkt bereits berücksichtigen. Der Tragsicherheitsbeiwert muss

daher keine produktebedingte Streuungen (z.B. aus der Produktion) abdecken und wird für geokunststoffbewehrte Konstruktionen im Allgemeinen zu $\gamma = 1.4$ angenommen.

Die Resultate verschiedener Bemessungsmodelle und -methoden können variieren. Wird dadurch der Bemessungswert der Beanspruchung beeinflusst, ist dies mit einem zusätzlichen Modellfaktor γ_{mod} auf der Seite der Bemessung zu berücksichtigen und soll nicht mit dem Tragsicherheitsbeiwert kombiniert werden.

5.1.4 Interaktion Geokunststoff - Boden

5.1.4.1 Beiwerte für die Ermittlung der Scherfestigkeit

Die Kraftübertragung zwischen dem Geokunststoff und dem Boden erfolgt nach dem Ansatz:

$$\tau_k = a_{\varphi} \cdot (\sigma \cdot \tan\varphi_k) + a_c \cdot c_k$$

Da die Kohäsion mit vielen Unsicherheiten behaftet ist, wird diese für die Beurteilung der Kraftübertragung Geokunststoff - Boden im Allgemeinen vernachlässigt und nur der Anteil aus der Reibung berücksichtigt. Es werden daher in der Folge auch nur Werte für die Reibung angegeben. Die Beiwerte sind dabei auch vom Untergrund abhängig. Im Allgemeinen werden für das Ausziehen (beidseitige Reibung) leicht höhere Werte gemessen. Dieser Effekt wird in Tab. 100, Tab. 101 und Tab. 102 vernachlässigt, da er auch nicht in jedem Fall gesichert auftritt.

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für $a_{\varphi,c}$	Höchstwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte biaxial Geogitter einaxial	PP HDPE	0.8...0.9 0.7...0.8	0.7 0.6
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET PP	0.8...0.9 0.8...0.9	0.7 0.7
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET PVA AR	0.8...0.9 0.8...0.9 0.8...0.9	0.7 0.7 0.7
Multifil-Gewebe	PET PVA PP	0.7...0.8 0.7...0.8 0.7...0.8	0.6 0.6 0.6
Monofil-Gewebe	PE	0.7...0.8	0.6
Bändchengewebe	PP	0.6...0.7	0.5
Vliese (z.T. isotrop)	PP PET	0.7...0.9 0.7...0.9	0.6 0.6

Tab. 100 Beiwerte $a_{\varphi,c}$ für feinkörnige Böden (bindig).

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für $a_{\varphi,c}$	Höchstwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte biaxial Geogitter einaxial	PP HDPE	0.9...1.0 0.8...0.9	0.8 0.7
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET PP	0.9...1.0 0.9...1.0	0.8 0.8
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET PVA AR	0.9...1.0 0.9...1.0 0.9...1.0	0.7 0.7 0.7
Multifil-Gewebe	PET PVA PP	0.8...0.9 0.8...0.9 0.7...0.9	0.7 0.7 0.6
Monofil-Gewebe	PE	0.7...0.8	0.6
Bändchengewebe	PP	0.7...0.8	0.6
Vliese (z.T. isotrop)	PP PET	0.8...1.0 0.8...1.0	0.7 0.7

Tab. 101 Beiwerte $a_{\varphi,c}$ für feinkörnige Böden (nicht bindig) und gemischtkörnige Böden (bindig).

Geokunststofffamilie	Übliche Rohstoffe	Üblicher Bereich für $a_{\varphi,c}$	Höchstwerte bei fehlenden Angaben
Extrudierte biaxial Geogitter einaxial	PP HDPE	0.9...1.0 0.8...0.9	0.8 0.7
Aus Flachstäben verschweisste Geogitter	PET PP	0.9...1.0 0.9...1.0	0.8 0.8
Gewobene Geogitter Maschenweite > 5 mm i. A. beschichtet (PVC)	PET PVA AR	0.9...1.0 0.9...1.0 0.9...1.0	0.8 0.8 0.8
Multifil-Gewebe	PET PVA PP	0.9...1.0 0.9...1.0 0.8...1.0	0.7 0.7 0.7
Monofil-Gewebe	PE	0.8...1.0	0.7
Bändchengewebe	PP	0.8...1.0	0.7
Vliese (z.T. isotrop)	PP PET	0.9...1.0 0.9...1.0	0.8 0.8

Tab. 102 Beiwerte $a_{\varphi,c}$ für gemischtkörnige Böden (nicht bindig) und saubere Kiese und Sande.

5.1.4.2 Bemessungswert der spezifischen Gleit- bzw. Ausziehkraft

Der Bemessungswert der spezifischen Gleit- bzw. Ausziehkraft wird mit dem Ansatz nach Abb. 129 folgendermassen ermittelt:

$$\tau_d = [a_{\varphi} \cdot (\sigma \cdot \tan \varphi_d) + a_c \cdot c_d] / \gamma_{g,a} \quad [\text{kN/m}^2]$$

wobei

$$\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / \gamma_{\varphi}$$

$$c_d = c_k / \gamma_c$$

φ_k = charakteristischer Reibungswinkel Boden

c_k = charakteristische Kohäsion Boden

γ_{φ} = Partialsicherheitsfaktor Reibung

(Richtwert: 1.25)

γ_c = Partialsicherheitsfaktor Kohäsion

(Richtwert: 1.50 ... 1.60)

$\gamma_{g,a}$ = Teilsicherheitsbeiwert für Scherkraft Geokunststoff - Boden

(Richtwert: 1.20)*

* Gilt unter der Voraussetzung, dass die spezifische Gleit- bzw. Ausziehkraft mit den Bemessungswerten für die Reibung und die Kohäsion ermittelt wird. Oft wird auch die charakteristische spezifische Gleit- und Ausziehkraft mit den charakteristischen Werten für Reibung und Kohäsion Boden ermittelt. In diesem Falle muss ein höherer Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{g,a} = 1.50$ berücksichtigt werden.

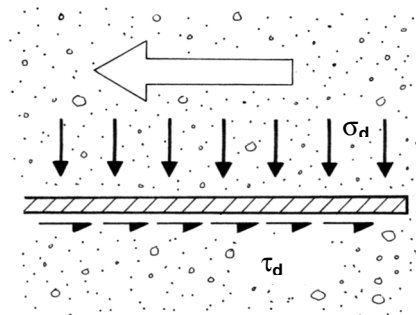


Abb. 129 Ermittlung der Scherkraft Geokunststoff - Boden.

Der Bemessungswert der Gleitkraft z_G (Gleitwiderstand) über die Gleitlänge L_G wird nach Abb. 130 berechnet zu:

$$z_G = L_G \cdot \tau_d \quad [\text{kN/m}]$$

Der Bemessungswert der Ausziehkraft z_A (Auszieh Widerstand) nach Abb. 131 zu:

$$z_A = 2 \cdot L_A \cdot \tau_d \quad [\text{kN/m}]$$

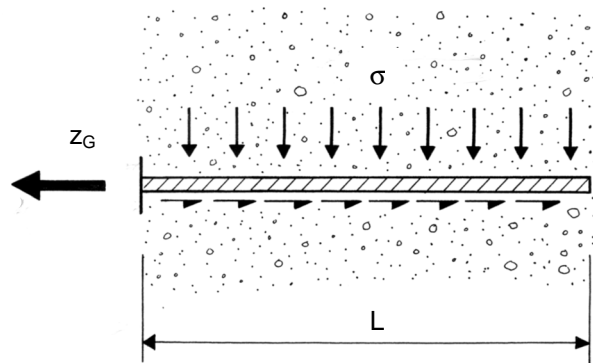


Abb. 130 Ermittlung der Gleitkraft.

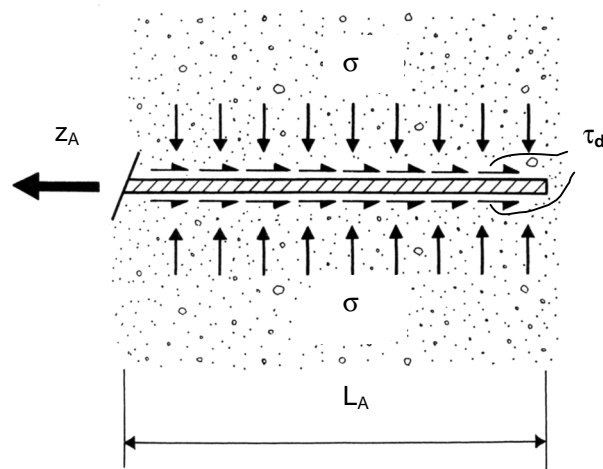


Abb. 131 Ermittlung der Ausziehkraft.

Da die Kohäsion des Bodens im Kontaktbereich zum Geokunststoff eine unsichere Grösse darstellt und auch der Beiwert a_c nur schwer zuverlässig experimentell bestimmbar ist, wird dieser Anteil meist vernachlässigt und nur der Anteil der Reibung berücksichtigt.

5.2 Geokunststoffe mit Schutzaufgaben

Die Projektarbeit zum Thema Schützen beschränkte sich vorwiegend auf Literaturrecherchen und die Auswertung einschlägiger Normen und Richtlinien aus dem Ausland. Daraus geht hervor, dass kaum einheitliche und übereinstimmende Richtlinien für Schutzgeokunststoffe existieren. Es bestehen jedoch teils nationale Vorschriften für Tunneln, Deponien etc., welche sich aber oft in den empfohlenen Prüfverfahren und den verlangten Mindestanforderungen unterscheiden.

Eine gewisse Übereinstimmung besteht in der Ansicht, dass Schutzgeokunststoffe folgende Eigenschaften aufweisen sollen, für die vielfach auch Mindestanforderungen formuliert sind:

- Flächengewicht meist über 500 gm^{-2}
- Dicke meist über 2.5 mm

zusätzlich:

- Stempeldurchdrückkraft meist über 1500 N
- Zugfestigkeit meist über 10 kNm^{-1}
- Dehnung unter Höchstzugkraft meist über 50 %
- Pyramidendurchdrückkraft (Österreich) über 1000 N
(bis über 4000 N bei grobem Korn und hohen Drücken)

Diese Anforderungen sind für den jeweiligen Schutzgeokunststoff formuliert, ohne dass auf die Art der zu schützenden Oberfläche eingegangen wird. Grundsätzlich besteht zwischen Schutzgeokunststoff und Abdichtung (Geomembran) eine Wechselwirkung. Für eine robuste, wenig empfindliche Membrane kann ein leichter Schutzgeokunststoff ausreichend sein, während bei einer empfindlicheren, dünneren Membrane ein schwerer Schutzgeokunststoff erforderlich ist, damit das Gesamtsystem gleichen äusseren Bedingungen

und Beanspruchungen Stand hält. Das Kostenverhältnis Membran - Schutzgeokunststoff kann dabei für die optimale Lösung ausschlaggebend sein.

Grundsätzlich sollten daher Prüfverfahren vorgesehen werden, welche das ganze Abdichtungssystem umfassen, also Abdichtung (Membran) plus Schutzelement (Geokunststoff). Vor allem im Tunnel- und Deponiebau geht der Trend für Untersuchungen, Prüfungen und Anforderungen in diese Richtung. Dafür geeignet ist z.B. der in Abschnitt 2.8.2.1 beschriebene Zylinderversuch (Abb. 43, Abb. 44), aber auch der Pyramidendruckversuch (Abb. 42) mit dem Gesamtsystem Membran plus Schutzgeokunststoff. Wenig Sinn macht die vereinfachte Betrachtungsweise der USA, welche für die Beurteilung der Wirkung von Schutzgeokunststoffen nur das Flächengewicht betrachtet.

Die Festlegung von Mindestanforderungen für Schutz-Geokunststoffe allein muss sich auf Anwendungen beschränken, bei welchen die äusseren Beanspruchungen (Druck, Wasser) begrenzt sind. Darunter fällt im allgemeinen Tiefbau die Abdichtung von Untergeschossen, Tiefgaragen und anderen erdüberdeckten Bauwerken.

An Schutzgeokunststoffe im allgemeinen Untertagebau sowie bei Tagbautunnels mit erheblicher Überdeckung und grösseren Wasserdrücken sind jedoch Anforderungen an das gesamte Abdichtungssystem zu stellen. Das Gleiche gilt für Schutzgeokunststoffe im Deponiebau, wobei hier je nach Kontaktmaterial noch spezielle Anforderungen an die Beständigkeit zu stellen sind, welche sich auch auf die Abdichtung selbst erstrecken.

Üben Schutzgeokunststoffe noch eine Nebenfunktion (meist Drainieren) aus, so sind die entsprechenden hydraulischen Mindestanforderungen generell nach den Angaben in SN 640 552 (1997) zu ermitteln und zusätzlich zu erfüllen. Bei sehr hohen Drücken und Gradienten sind gegebenenfalls gesonderte Prüfungen unter realen Bedingungen durchzuführen.

5.2.1 Funktion Schützen

5.2.1.1 Randbedingungen

Bei der Schutzfunktion muss der Geokunststoff die Unterlage (im Allgemeinen eine Geomembrane) vor mechanischer Beschädigung durch die Einbaubelastung einerseits und die statische Dauerbelastung andererseits schützen.

Für die Bestimmung der mechanischen Mindestanforderungen an den Schutzgeokunststoff sind folgende Randbedingungen relevant:

- Kontaktmaterial aussen (Untergrund)
- Kontaktmaterial innen (unter Membrane)
- Auflageverhältnisse (eben, unregelmässig, glatt, rauh)
- Druck (durch Kontaktmaterial/Wasser)
- Scheuerbewegung, wenn ja: klein/gross; einseitig/alternierend
- Einbaubeanspruchungen (durch Betonieren, Schütten, Verdichten)

für die hydraulischen Anforderungen bei zusätzlicher Drainagefunktion:

- Wasserdruck (maximaler ohne Absenkung)
- Maximal tolerierbarer Wasserdruck
- Wassermenge
- Gradient i
- Wassermenge bei einem bestimmten Gradienten
- Gebrauchsdauer (temporär/permanent)

Zusätzliche Anforderung für den Einsatz im Untertagebau:

- Brandkennziffer

5.2.1.2 Beschreibung und Bewertung der Randbedingungen

Die nachstehenden Randbedingungen sind zu beschreiben bzw. durch Parameter zu quantifizieren:

- das Kontaktmaterial aussen und innen
- die auf den Schutzgeokunststoff und die Abdichtung wirkenden Drücke
- Die Einbauverhältnisse durch Anschütten, Verdichten

- die Hydraulik bei zusätzlicher Drainagefunktion
- die möglichen oder erwarteten Verschiebungen
- im Untertagebau das Brandverhalten
- chemische, biologische Belastungen aus dem Kontaktmaterial

Diese Angaben sind für die Ermittlung der Mindestanforderungen an die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowie die Beständigkeit des Schutzgeokunststoffes erforderlich.

5.2.1.3 Quantifizierung der Einflüsse

Im Folgenden wird ein Vorschlag aufgezeigt, welcher versucht, die für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften relevanten Einflüsse zu quantifizieren und mit Faktoren zu bewerten. Dafür werden Teilfaktoren FKa, FF, FO, FKl, FD und FE eingeführt, mit denen durch Multiplikation ein Gesamtfaktor F_{tot} berechnet wird (Tab. 103). Dieser Gesamtfaktor F_{tot} , wird dann als entscheidend für die Bestimmung der Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften betrachtet. Tab. 104 bis Tab. 109 enthalten Vorschläge für die Werte der Teilfaktoren zur Quantifizierung der für die mechanischen Eigenschaften relevanten Einflüsse.

Teilfaktor	Beschreibung
FKa	Faktor für das Kontaktmaterial aussen (Lockergestein, Fels, künstliches Material)
FF	Faktor für die Kornform (rund, kantig, spitzig)
FO	Faktor für die Beschaffenheit der Oberfläche (glatt, rau, unregelmässig)
FKi	Faktor für das Kontaktmaterial Innen (Art, zusätzlicher Schutzgeokunststoff, inhomogenes Deponiematerial)
FD	Faktor für die Druckbeanspruchung der Abdichtung
FE	Faktor für die Einbaubeanspruchung
F_{tot}	Totalfaktor ($F_{\text{tot}} = \text{FKa} \cdot \text{FF} \cdot \text{FO} \cdot \text{FKi} \cdot \text{FD} \cdot \text{FE}$)

Tab. 103 Teilfaktoren zur Quantifizierung der für die mechanischen Eigenschaften relevanten Einflüsse (Vorschlag).

Kontaktmaterial	Beschaffenheit	FKa
Lockergestein	feinkörnig (Ton/Silt/Sand bis D = 4 mm)	1.0
	gemischtkörnig (Ton - Kies), D = 0 ... 32 mm)	1.2
	grobkörnig (Ton - Steine), D = 0 ... 64 mm)	1.4
	extrem grobkörnig (Ton - Blöcke) bis D = 300 mm)	1.6
Fels	feinkörnig (Ton/Siltstein)	1.0
	mittelkörnig (Sandstein, Gneise)	1.2
	grobkörnig (Granite)	1.4
	extrem grobkörnig (Nagelfluh)	1.4
künstlich (Spritzbeton, Injektionsmörtel)	mittelkörnig (Körnung 0 ... 4mm)	1.0
	grobkörnig (Körnung 0 ... 8 mm)	1.2
	glatte Oberfläche (z.B. geschalte Betonoberfläche)	0.8

Tab. 104 Faktoren FKa für das Kontaktmaterial aussen.

Kornform (Lockergestein)	FF
rund	1.0
kantig/spitzig	2.0

Tab. 105 Faktoren FF für die Kornform (Kontaktmaterial aussen = Lockergestein).

Oberfläche (Fels)	FO
glatt	1.0
rau	1.2
unregelmässig	1.4

Tab. 106 Faktoren FO für die Beschaffenheit der Oberfläche (Kontaktmaterial aussen = Fels).

Anwendung	Parameter	FKi
massive Bauwerke	eventuell zusätzlicher Schutzgeokunststoff	0.8
	Beton, Injektionsmörtel	1.0
Deponiebau	Lockergestein natürlich/künstlich, inert/kontaminiert	1.5

Tab. 107 Faktoren FKi für das Kontaktmaterial innen (unter Dichtungsmembran).

Druckbereich	FD
20 ... 50 kPa	1.0
50 ... 250 kPa	1.2
250 ... 500 kPa	1.5
500 ... 1000 kPa	2.0

Tab. 108 Faktoren FD für die Druckbeanspruchung der Abdichtung (Normaldruck auf den Geokunststoff: Überlagerungsdruck, Erddruck, Gebirgsdruck).

Einbau	Parameter	FE
Ortsbeton	Betonierdruck	1.0
Überschüttung auf mehr oder weniger horizontale Flächen	lose Vorschüttung, leichte Verdichtung	1.1
	lose Vorschüttung, hohe Verdichtung	1.2
Anschüttungen (Wände, geneigte Flächen)	lose Vorschüttung, leichte Verdichtung	1.2
	lose Vorschüttung, hohe Verdichtung	1.4

Tab. 109 Faktoren FE für die Einbaubeanspruchung.

Weitere wichtige Einflüsse:

- Hydraulik:
 - Wasserdruck (maximal möglicher Druck in kPa, maximal zulässiger Druck in kPa)
 - Eingangsdaten für die Ermittlung der hydraulischen Mindestanforderungen (pro m Bauwerk abzuführende Wassermenge q bei einem Gradienten i)
- Verschiebungen:
 - klein (wenige mm): bei Überschüttung auf horizontale Flächen / im Untertagebau (im Allgemeinen)
 - gross (mehrere mm bis mehrere cm): seitliche Anschüttungen mit setzungsempfindlichem Material / Schüttungen auf schiefe Abdichtungen (Deponiebau)
- Funktionsdauer:
 - nur während dem Einbau
 - temporär bis 2 Jahre
 - permanent über 2 Jahre (im Allgemeinen bis zur vollen Gebrauchsdauer des Bauwerkes)

Eine unterschiedliche Funktionsdauer für die Hauptfunktion Schützen und die Nebenfunktion Drainieren ist möglich.

- Umwelteinflüsse (Kontaktmaterial):
 - natürlicher Boden, natürliches Grundwasser mit pH 4 ... 9
 - Beton, Mörtel, hydraulische Bindemittel allgemein mit pH > 9
 - Abdichtung mit Weichmacher (z.B. PVC)
 - Deponiematerial: inert / belastet (bei Belastung: Art der Belastung)
 - Bewitterung: normal während dem Verlegen bis max. 2 Wochen / verlängert (z.B. Deponiebau, Tunnelbau im Tagbau); wenn verlängert: maximale Zeitdauer in Wochen
 - Brandverhalten: keine speziellen Anforderungen / Anforderungen (z.B. beim Einsatz im Untertagebau)

5.2.2 Mindestanforderungen an Geokunststoffe mit Schutzfunktion**5.2.2.1 Allgemeine Mindestanforderungen**

Damit Geokunststoffe mit Schutzfunktion den Einbau möglichst ohne wesentliche grössere Beschädigungen überstehen und eine minimale Schutzfunktion erfüllen, müssen diese mindestens die Grundanforderungen gemäss Tab. 110 erfüllen. Für Schutz-Geokunststoffe ohne zusätzliche Drainagefunktion genügen die hydraulischen Anforderungen in Tab. 111. Zudem sollen die Produkte grundsätzlich den Minimalanforderungen an die Dauerhaftigkeit (Beständigkeit) gemäss Tab. 112 genügen. In Kontakt mit kontaminierten Materialien, Wässern und Gasen (z.B. Deponiebau) sind gesonderte Nachweise zu erbringen.

Prüfkriterium (SN 640 550, 1996)	Anforderung
Masse pro Flächeneinheit	min. 300 g/m ²
Dicke bei einer Auflast von 20 kPa	min. 2.5 mm
Zugfestigkeit längs, quer	min. 10 kN/m
Dehnung unter Höchstzugkraft längs, quer	min. 30 %
Stempeldurchdrückkraft	min. 2000 N
Durchschlagwiderstand	max. 20 mm

Tab. 110 Mechanische Mindestanforderungen an Schutz-Geokunststoffe.

Prüfkriterium (SN 640 550, 1996)	Anforderung
Durchlässigkeit senkrecht zur Ebene bei 20 kPa	min. 10 ⁻⁴ ms ⁻¹
Durchlässigkeit in der Ebene bei 20 kPa	min. 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹
Charakteristische Öffnungsweite	min. 0.05 mm
	max. 0.20 mm

Tab. 111 Hydraulische Mindestanforderungen an Schutz-Geokunststoffe.

Prüfkriterium (SN 640 550, 1996)	Anforderung
Witterungsbeständigkeit	max. 5 %
Biologische Beständigkeit	max. 5 %
Chemische Beständigkeit für pH 4 ... 9 (insbesondere Kalkmilch)	max. 5 %

Tab. 112 Maximal zulässiger Abfall der Höchstzugkraft für eine temporäre und permanente Funktionsdauer.

Mit diesen Anforderungen kann sichergestellt werden, dass in Anlehnung an den Entwurf zur europäischen Norm prEN 13251 (Anhang B) ein Geokunststoff ausreichend langzeitbeständig ist, wenn er in natürlichem Boden und Wasser mit einem pH-Wert zwischen 4 und 9 eingesetzt wird und die mittlere Bodentemperatur unter 25° liegt. Da Geokunststoffe mit Schutzfunktion meist in direktem Kontakt mit Beton sind, müssen diese einwandfrei alkalibeständig sein. Schutzgeokunststoffe aus PET (Polyester) sind daher nicht geeignet. In Kombination mit Kunststoffdichtungsbahnen aus PVC, welche Weichmacher enthalten, ist die Beständigkeit gegen diffundierende Weichmacher nachzuweisen. Für Schutzgeokunststoffe im Deponiebau können noch zusätzliche Anforderungen relevant sein.

Mit dem Nachweis der Witterungsbeständigkeit ist gewährleistet, dass in europäischem Klima eine Freiliegedauer von maximal 1 Woche keine relevante Abminderung der mechanischen Festigkeit verursacht. Dies kann zum Beispiel bei über- oder angeschütteten Bauwerken eintreten, bei welchen nach dem Aufbringen der Abdichtung und der Schutzschicht keine unmittelbare Bedeckung erfolgt. Muss jedoch eine längere Freiliegedauer bis zu einem Monat gewährleistet werden, ist der strengere Versuch nach ENV 12224 anzuwenden. Eine noch längere Freiliegedauer über ein Monat sollte unbedingt vermieden werden.

Schutzgeokunststoffe welche im Untertagebau eingesetzt werden, müssen mindestens die Brandkennziffer **BKZ 4.1** aufweisen.

5.2.2.2 Anwendungsspezifische Anforderungen

Die Kombination von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt den erforderlichen Widerstand des Geokunststoffes mit Schutzfunktion. Der Gesamtfaktor der Beanspruchung entspricht einer Multiplikation der einzelnen Einflussfaktoren

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{Ka}} \cdot F_{\text{FF}} \cdot F_{\text{FO}} \cdot F_{\text{FKi}} \cdot F_{\text{FD}} \cdot F_{\text{FE}}$$

und erlaubt nach Tab. 113 eine Einteilung in drei Bereiche mit entsprechenden mechanischen Mindestanforderungen an den Geokunststoff mit Schutzfunktion. Bei diesen Angaben handelt es sich um einen Vorschlag, welcher mit gezielten Untersuchungen noch verifiziert werden sollte (vgl. Abschnitt 6.2, Forschungsbedarf für Geokunststoffe mit Schutzaufgabe).

Gesamtfaktor F_{tot}			1.00 ... 2.00	2.01 ... 3.00	3.01 ... 5.00	> 5.00
Masse pro Flächeneinheit	min.	g/m ²	300	500	800	Es sind gesonderte Versuche zusammen mit der Geomembran resp. der Kunststoffdichtungsbahn erforderlich
Dicke bei einer Auflast von 2 kPa	min.	mm	2.5	3.5	5.0	
Zugfestigkeit längs, quer	min.	kN/m	10	15	20	
Dehnung unter Höchstzugkraft längs, quer	min.	%	30	30	30	
Stempeldurchdrückkraft	min.	N	2000	2500	3500	
Durchschlagwiderstand	max.	mm	20	12	8	
Pyramidendurchdrückkraft	min.	N	800	1500	2500	

Tab. 113 Mindestanforderungen an Schutzgeokunststoffe

6. Zukünftiger Forschungsbedarf

6.1 Forschungsbedarf für Geokunststoffe mit Bewehrungsaufgabe

Es liegt im Interesse der Planer, der Hersteller von Bewehrungsprodukten, der Anbieter von ganzen Systemen sowie letztlich der Auftraggeber, dass die Bemessung geokunststoffbewehrter Bauwerke nach einheitlichen Richtlinien und Sicherheitsstandards erfolgt. Ferner sollten die Qualitätsstandards von der Planung bis zur Ausführung und Abnahme des Bauwerkes inklusive Nachfolgekontrollen geregelt sein.

Ein zukünftiger Forschungsbedarf besteht darin, Bemessungsgrundsätze und -richtlinien zu erarbeiten, nach denen die für solche Bauwerke erforderlichen Nachweise der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit zu führen sind. Zudem sollte der Projektablauf von der Erarbeitung und Erfassung der Randbedingungen über die eigentliche Bemessung, die konstruktive Ausbildung, die Wahl der Baustoffe mit den zugehörigen Anforderungen bis zur Qualitätssicherung festgelegt werden.

Dazu gehören:

- Grundinformationen über Belastungen sowie Boden und Wasser
- Kenntnis der massgebenden Versagensmechanismen
- Berechnung, Bemessung und Nachweise
- Konstruktive Ausbildung, Baustoffe
- Sicherheitskonzepte
- Qualitätssicherung mit Prüfungen / Kontrollen

Bei den Lösungskonzepten ist zwischen Geokunststoffen, welche im klassischen Sinn als Bewehrungselemente = Zugelemente eingesetzt werden (in bewehrten Stützkonstruktionen und bei Dämmen mit vorwiegend statischer, einaxialer Belastung), und solchen mit einer Verstärkung von eher dünnen Schichten zu unterscheiden, welche meist unter dynamischer Belastung stehen, die zu einer vorwiegend biaxialen Belastung führt (Fundationsschichten von Verkehrswegen), zu unterscheiden.

Während die äusseren und inneren Standsicherheitsnachweise bei bewehrten Stützkonstruktionen und Dämmen meist mit bekannten Methoden der Bodenmechanik, welche auf Gleichgewichtsbetrachtungen treibender und rückhaltender Kräfte beruhen, durchgeführt werden können, ist dies bei verstärkten Fundationsschichten im Verkehrswegebau nur bedingt möglich. Der Einfluss der Geokunststoffe unter meist dynamischer Belastung (Verdichtung in der Bauphase und Verkehrsbelastung während der Gebrauchsphase) ist komplexer. Eine Beurteilung ist oft nur mittels experimenteller Untersuchungen möglich.

In allen Anwendungsfällen spielen für die Gebrauchstauglichkeit die Deformationen eine Rolle. Die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerkes ist gewährleistet, wenn die Deformationen die vorgesehene Nutzung des Bauwerkes nicht in Frage stellen. Ergänzend können auch rein ästhetische Anforderungen eine Rolle spielen (Aussehen einer Konstruktion).

6.1.1 Stützbauwerke, Bewehrte Dämme

Folgende Fragen sind zu beantworten:

- Massgebende Randbedingungen (Geometrie, Boden, Wasser, äussere Belastungen)
- Massgebende Parameter (Scherparameter Boden, Boden - Geokunststoff)
- Zusätzliche Parameter (z.B. Erdbeben, Wasser, Ausnahmelasten)
- Gefährdungsbilder (mögliche Versagensmechanismen)
- Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes (z.B. zulässige Deformationen, Aussehen)
- Anforderungen an die Geokunststoffe zur Gewährleistung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit
- Spezielle Anforderungen an die Geokunststoffe / Verbindungen in Abhängigkeit der Konstruktionsart (z.B. geokunststoffbewehrte Konstruktionen mit weicher / flexibler, starrer Front)
- Anforderungen an die Schüttmaterialien (Scherfestigkeit, Verdichtung etc.) und an die Fundation der Bauwerke
- Qualitätskontrollen beim Aufbau
- Überwachung während der Nutzungsdauer

6.1.2 Verstärkung von Foundationsschichten

Bei der Verstärkung von Foundationsschichten sind zwei Aufgaben zu unterscheiden, welche jedoch beide gleichzeitig verlangt oder erwünscht sein können:

- Erleichterung der Verdichtung bei Foundationsschichten auf weichem Untergrund mit dem Ziel, die auf der Foundationsschicht verlangten Mindestwerte mit einer möglichst geringen Schichtstärke oder mit möglichst geringem Verdichtungsaufwand zu erreichen. Dabei handelt es sich um einen temporären Effekt während dem Bau.
- Verbesserung der Tragfähigkeit der Foundationsschicht und damit Reduktion der erforderlichen Schichtstärke oder Verlängerung der Nutzungsdauer durch Verzögerung von Deformationen, welche die Nutzung beeinträchtigen.

Beide Aufgaben können einzeln oder in Kombination eine wesentliche Einsparung an Fundationsmaterial (im Allgemeinen Kiessand) bringen. Diese Einsparung hat sowohl einen ökonomischen (Kosten) als auch ökologischen Aspekt (weniger Verbrauch an wertvollem Rohstoff Kies und weniger Transporte).

Folgende Fragen sind zu beantworten:

- Massgebende Randbedingungen (Geometrie, Boden, Wasser, äussere Belastungen)
- Massgebende Parameter (Scherparameter Boden, Boden - Geokunststoff)
- Zusätzliche Parameter (z.B. Verdichtung, Ausnahmelasten)
- Gefährdungsbilder (mögliche Versagensmechanismen)
- Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes (z.B. zulässige Deformationen / Spurrinntiefen etc.)
- Einfluss verschiedener Geokunststoffe auf die Verdichtung
- Einfluss verschiedener Geokunststoffe auf die Erhöhung der Tragfähigkeit bzw. Verlängerung der Nutzungsdauer
- Anforderungen an die Geokunststoffe unter Berücksichtigung des Kontaktbodens (im Allgemeinen geeignetes Material für Foundationsschichten = Kiessand / Schotter) für die Aufgaben "Verbessern der Verdichtung" / "Erhöhung der Tragfähigkeit"
- Anforderungen an die Foundationsschicht (z.B. Korngrößenverteilung, Maximalkorn)
- Einbauanforderungen
- Einbaukontrollen

6.2 Forschungsbedarf für Geokunststoffe mit Schutzaufgabe

Infolge der zum Teil sehr unterschiedlichen Betrachtungsweise mit verschiedenen Anforderungen an den mechanischen Widerstand von Schutz-Geokunststoffen und der zur Ermittlung vorgesehenen Prüfverfahren existieren für viele nur national verbreitete Produkte nur lückenhafte Datenblätter. Es wäre somit interessant festzustellen, welche Zusammenhänge für verschiedene Produkte zwischen folgenden Eigenschaften vorhanden sind:

- Flächengewicht
- Dicke
- Stempeldurchdrückkraft
- Durchschlagwiderstand
- Pyramidendruckversuch

Sind Korrelationen möglich, wären Rückschlüsse von der einen auf die anderen Eigenschaft zulässig und die entsprechenden Mindestanforderungen könnten zuverlässiger aufgestellt werden. Eventuell könnte dann auch auf Anforderungen an weniger relevante Eigenschaften verzichtet werden. Wichtig wären dabei auch Tests in Kombination mit verschiedenen Qualitäten von Abdichtungen, um die Systemwirksamkeit zu ermitteln. Dies würde eine Beurteilung ermöglichen, wie weit Anforderungen an Schutz-Geokunststoffe allein Aussagen über die mechanische Widerstandsfähigkeit des Systems erlauben.

7. Literaturverzeichnis

7.1 Fachliteratur

- Allan, T.M., Bathurst, R.J. (1994): Characterization of geosynthetic load-strain behaviour after installation damage, *Geosynthetics International*, Vol. 1 No. 2.
- Allen, T.M., Bathurst, R.J. (1996): Combined allowable strength reduction factor for geosynthetic creep and installation damage. - *Geosynthetics International* Vol. 3, No. 3, 407-439.
- Athanasopoulos, G.A. (1996): Results of Direct Shear Tests on Geotextile Reinforced Cohesive Soil. - *Geotextiles and Geomembranes* Nr. 14, 619-644.
- Balleger, J.P., Wu, J.T.H. (1993): Intrinsic confined and unconfined load-deformation properties of geotextiles. - *Geosynthetic soil reinforcement testing procedures STP 1190, ASTM*.
- Bauer, A. (1997): Der Einfluss der Verbundwirkung zwischen Boden und Geotextil auf das Verformungsverhalten von bewehrten Steilböschungen. - Dissertation, Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, Heft 26.
- Bergado, D.T., Werner, G., Tien, M.H., Zou, X.H. (1995): Interaction Between Geotextiles and Silty Sand by Large Direct Shear and Triaxial Tests. - Conference proceedings of Geosynthetics '95, Industrial Fabrics Association International, 1097-1109.
- Billing, J.W., Greenwood, J.H., Small, G.D. (1990): Chemical and Mechanical Durability of Geotextiles. - 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 621 - 626.
- Blivet, J.-C., Heun, T., Levlave, E. (1992): Langzeitverhalten von mit Polyester-Endlosfasern bewehrtem Sandboden. - 2. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik, SVG, Luzern, 275-283.
- Bräu, G. (1996): Damage of Geosynthetics during installation - Experience from real sites and research works. - *Geosynthetics - applications, design and construction (EuroGeo 1, Maastricht)*, de Groot, den Hoedt & Termaat, Balkema, 145-150.
- Bräu, G. (1999): Einbaubeanspruchung von Geokunststoffen - Stand der Erkenntnis. - *Geokunststoff-Kolloquium 1999 Espelkamp, Naue Fasertechnik, Lübbecke*.
- Bräu, G. (2001): Mechanical installation stresses of geosynthetics used at earthworks. - *Proceedings of the eleventh international Techtexil-symposium, Frankfurt*.
- Bräu, G., Bauer, A. (2001): Versuche im Boden mit gering dehnbaren Geogittern. - 7. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, *Geotechnik*, 139-146.
- Bräu, G., Floss, R., Laier, H. (1992): Beschädigungsanfälligkeit von Geotextilien. - 2. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik K-Geo 92, Luzern, SVG, 263-273.
- Brummermann, K., Blümel, W., Beyer, S. (1999): Geotextile Schutzschichten für Kunststoffdichtungen im Tunnelbau. - 6. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, *Geotechnik*, 37-43.
- Brummermann, K., Schlütter, A., Beyer, S. (2001): Aktuelle Entwicklungen zur Verbesserung geotextiler Schutzschichten für Kunststoffdichtungen im Tunnelbau. - *Techttextil-Symposium 2001, Frankfurt*.
- Bush, D.I. (1988): Evaluation of the effects of construction activities on the physical properties of polymeric soil reinforcing elements. - *Int. Geotechnical Symposium on Theorie and Practice of Soil Reinforcement, Fukuoko Japan, Balkema Rotterdam*, 63-68.
- Cai, Z., Ehrler, P., Schmeer-Lioe, G. (1989): Beeinflussung mechanischer Geotextileigenschaften durch Partikeleinlagerung. - *Chemiefasern/Textilindustrie*, 39/ 91, März, T26 - T30.
- Cancelli, A., Cazuffi, D., Rimoldi, P. (1987): Geocomposite Drainage Systems - Mechanical Properties and Discharge Capacity Evaluation. - Conference proceedings of Geosynthetics '87, Industrial Fabrics Association International, 393-404.
- Cancelli, P., Montanelli, F. (2000): Geogrid compaction damage resistance - preliminary test results. - *Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna*, 883-887.
- Carrubba, P., Moraci, N., Montanelli, F. (2000): Long-term behaviour of an instrumented wall reinforced with geogrids. - *Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna*, 125-129.
- Cazuffi, D., Sacchetti, M. (1999): Temperature effects on tensile-creep behaviour of high-strength geosynthetics. - *Conference proceedings of Geosynthetics '99, Industrial Fabrics Association International*, 723-733.
- Colin, G., Mitton, M.T., Carlsson, D.J., Wiles, D.M. (1986): The Effect of Soil Exposure on some Geotechnical Fabrics. - *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 4, No 1, Elsevier Applied Science, London/New York, 1 - 8.
- den Hoedt, G. (1986): Creep and Relaxation of Geotextile Fabrics. - *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 4, No 2, Elsevier Applied Science, London/New York, 83-92.

- Diederich, R. (2001): Beurteilung der Einbauschädigung von Geotextilien - Korrelation mit Indexversuchen. - 7. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 199-203.
- Ehrler, P. (1999): Wirkung eingelagerter Teilchen auf das Kraft-Dehnungsverhalten von Geotextilien. - 6. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 207-216.
- Ensinger, K. (1995): Werkstoffauswahl für ein Drainagesystem nach werkstoffwissenschaftlichen und ökonomischen Gesichtspunkten. - Diplomarbeit, Institut für Polymere, ETH Zürich.
- Farrag, K. (1995): Evaluation of the Effect of Moisture Content on the Interface Properties of Geosynthetics. - Conference proceedings of Geosynthetics '95, Industrial Fabrics Association International, 1031-1041.
- Floss, R., Stiegeler, R. (2000): Design and measurements of a reinforced steep slope under motorway Nuernberg - Berlin. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 131-135.
- Flüeler, P., Löwe, Ch., Farshad, M., Zwicky, P., Böhni, H. (2001): Abdichtung von tief liegenden Eisenbahntunnels durch die Alpen - Neues Evaluationsverfahren für Abdichtungssysteme. - EMPA.
- Greenwood, J.H. (1998): The nature of mechanical damage. - Seminar on Installation Damage in Geosynthetics, ERA Technology, Leatherhead, Surrey, UK.
- Greenwood, J.H., Kempton, G.T., Watts, G.R.A., Bush, D.I. (2000): Twelve year creep test on geosynthetic reinforcements. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 333-336.
- Greenwood, J.H., Trubiroha, P., Schröder, H.F., Franke, P., Hufenus, R. (1996): Durability standards for geosynthetics - the tests for weathering and biological resistance. - Geosynthetics - applications, design and construction (EuroGeo 1, Maastricht), de Groot, den Hoedt & Termaat, Balkema, 145-150.
- Greenwood, J.H., Voskamp, W. (2000): Predicting the long-term strength of a geogrid using the stepped isothermal method. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 329-331.
- Hausmann, M.R., Ring, G.J., Pitsis, S.E. (1990): Abrasion of Geotextiles in Railway Track Applications. - 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 193 - 196.
- Hillig, J., Lieberenz, K. (1986): Geotextile Reinforcement of a Railroad Structure. - 3rd International Conference on Geotextiles, Wien, 1986, 973 - 978.
- Horrocks, A.R., d'Souza, J.A. (1990): Physicochemical Changes in Laboratory-Aged Orientated Polypropylene Tapes - The Effects of Stress and Humidity. - 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 709 - 714.
- Hsieh, C., Wu, J.H., Lin, C.K., Hsieh, M. (2000): The study of the installation damage of flexible geogrids. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 889-893.
- Hsieh, C., Wu, J.H., Lin, C.K., Hsieh, M. (2001): The installation damage of woven rib geogrids under various backfills. - Conference proceedings of Geosynthetics '01, Industrial Fabrics Association International, 553-565.
- Hufenus, R., Rügger, R., Reifler, F., Raschle, P. (1997): Langzeitverhalten von Geotextilien. - Kapitel 12 des Geotextilhandbuches (1985/1997), .Schweizerischer Verband der Geotextilfachleute SVG, St. Gallen.
- Hufenus, R., Trubiroha, P., Schröder, H. (2001): Prediction of the weathering resistance of geotextiles. - Proceedings of the eleventh international Tectextil-symposium, Frankfurt.
- Jewell, R.A. (1980): Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils. - Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- Jones, D.R.V., Shercliff, D.A., Dixon, N. (2000): Difficulties associated with the specification of protection geotextiles using only unit weight. Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference, Bologna, 551-556.
- Khay, M. (1998): Geotextile damage at installation - French experience and laboratory test results with the experimental European standard. - Seminar on Installation Damage in Geosynthetics, ERA Technology, Leatherhead, Surrey, UK.
- Koerner, G.R., Koerner, R.M. (1990): The installation survivability of geotextiles and geogrids. - Proceedings of the fourth international conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague, 597-602.
- Koutsourais, M., Sandri, D., Swan, R. (1998): Soil Interaction Characteristics of Geotextiles and Geogrids. - Proceedings of the sixth international conference on geosynthetics, Atlanta, 739-744.
- Laier, H. Bräu, G., Floss, R. (1990): Wirkungsweise von Geotextilien unter intensiver dynamischer Beanspruchung. - Forschung Strassenbau und Verkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, Heft 595.
- Leqlercq, B., Schaeffner, M., Delmas, Ph., Blivet, J.C., Matichard, Y. (1990): Durability of geotextiles - pragmatic approach used in France. - Proceedings of the fourth international conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague, 679-684.
- LGA (2000): Bestimmung des Herausziehwerstandes von Geokunststoffen aus Kies, Sand und Ton. - Prüfbericht LW0030083/A, Landesgewerbeanstalt (LGA), Nürnberg.

- LGA (2001): Bestimmung des Herauszieh Widerstandes von Geokunststoffen aus Kies. - Prüfbericht LW0130004/A, Landesgewerbeanstalt (LGA), Nürnberg.
- Lopes, M.P., Recker, C., Müller-Rochholz, J., Lopes, M.L. (2000): Installation damage and creep of geosynthetics and their combined effect - experimental analysis. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 895-897.
- Lothspeich, S.E., Thornton, J.S. (2000): Comparison of different long term reduction factors for geosynthetic reinforcing materials. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 341-346.
- Nancy, A., Mannsbart, G., Oberreiter, K., Murray, H. (2001): Das Energie-Konzept - ein Auswahlkriterium für Trenngeotextilien. - 7. Informations- und Vortragsstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 213-217.
- Nataraj, M.S., Maganti, R.S., McManis, K.L., (1995): Interface Frictional Characteristics of Geosynthetics. - Conference proceedings of Geosynthetics '95, Industrial Fabrics Association International, 1057-1069.
- Navarette, F., Reddy, D.V., Lai, P. (2000): Creep of backfill geogrid reinforcement for retaining walls. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 347-350.
- Paulson, J. (1999): Properties of coated fiberglass geogrid. - Conference proceedings of Geosynthetics '99, Industrial Fabrics Association International, 1133-1143.
- Rainey, T., Barksdale, R. (1993): Construction induced reduction in tensile strength of polymer geogrids. - Conference proceedings of Geosynthetics '93, Industrial Fabrics Association International, 729-742.
- Raschle, P. (1983): A Contribution to the Examination of the Rot Resistance of Textiles. - International Biodeterioration Bulletin ISSN 0020-6164 19(1), 13-17.
- Reda M. Bakeer, R.M., Sayed, S.M., Cates, P., Subranmanian, R. (1998): Pullout and Shear Tests on Geogrid Reinforced Lightweight Aggregate. - Geotextiles and Geomembranes Nr. 16, 119-133.
- Richardson, G.N. (1998): Field evaluation of geosynthetic survivability in aggregate road base. - Geotechnical Fabrics Report, Industrial Fabrics Association International, Minnesota, September 98.
- Risseeuw, P., Alexiew, D. (2001): Erfahrungen mit einer der ältesten geotextilbewehrten Stützwände in Europa: Bauweise, Statik, Verhalten, Langzeitbeständigkeit. - 7. Informations- und Vortragsstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 177-180.
- Sandri, D., Martin, J.S., Vann, C.W., Ferrer, M., Zeppenfeldt, I. (1993): Installation damage testing of four polyester geogrids in three soil types. - Conference proceedings of Geosynthetics '93, Industrial Fabrics Association International, 743-755.
- Schröder, H., Kneip, G., Roose, M. (1992): Grundsätzliches zur Untersuchung der chemischen Beständigkeit von Geotextilien. - 2. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik, SVG, Luzern, 229-241.
- Schröder, H.F. et al. (2001a): Untersuchung des antioxidativen Stabilisierungszustandes von Geokunststoffen auf der Basis von Polyolefinen. - 7. Informations- und Vortragsstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 169.
- Schröder, H.F., Bahr, H., Kneip, G., Lorenz, E., Schmücking, I., Seifert, I. (2001b): Untersuchungen an PET-Geotextilien zum Langzeit-Verhalten in alkalischer, neutraler und saurer Umgebung. - 7. Informations- und Vortragsstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 171.
- Seeger, S., Müller, W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R., August, H. (1995): Anforderungen an die Schutzschicht für die Dichtungsbahnen in der Kombinationsabdichtung - Teil 1: Wirksamkeit (lastverteilende Wirkung und Beständigkeit), Materialien und Prüfverfahren bei Schutzschichten. - Müll und Abfall, Heft 8.
- Sprague, C.J. (1998): Geosynthetic Reinforcement - Are Geotextiles and Geogrids interchangeable?. - Proceedings of the sixth international conference on geosynthetics, Atlanta, 539-544.
- Sprague, C.J., Allan, S., Thornton, S. (1999): Installation damage testing, sensitivity assessment and derivation of RFID. - Conference proceedings of Geosynthetics '99, Industrial Fabrics Association International, 1123-1132.
- Stoewahse, C., Blümel, W. (2001): Geräteeinflüsse bei der Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und Erdstoffen im Rahmenschergerät. - 7. Informations- und Vortragsstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 181-187.
- Tabor, B.J., Wagenmakers, J.C. (1992): Umwelteinflüsse auf das Langzeitverhalten technischer Garne. - Melliand Textilberichte 1/1992, 9-14.
- Tan, S.A., Chew, S.H., Wong, W.K. (1998): Sand-Geotextile Interface Shear Strength by Torsional Ring Shear Tests. - Geotextiles and Geomembranes Nr. 16, 161-174.
- Thornton, J.S., Allen, S.R., Thomas, R.W., Sandri, D. (1998): The stepped isothermal method for time-temperature-superposition and its application to creep data on polyester yarn. - Proceedings of the sixth international conference on geosynthetics, Atlanta, 691-706.
- TRI (1999): Large scale interface friction pull-out tests. - Prüfbericht Nr. E2128-01-06, TRI Environmental Inc.

- Troost, G.H., Ploeg, N.A. (1990): Influence of weaving structure and coating on the degree of mechanical damage of reinforcing mats and woven geogrids, caused by different fills, during installation. - Proceedings of the fourth international conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague, 609-614.
- Trubiroha, P. (1994): UV Irradiation and Weathering - Interpretation of Results From Accelerated Weathering. - Seminar on Durability of Geosynthetics, ERA Technology, Leatherhead, Surrey, UK.
- Trubiroha, P., Schröder, H. (1997): Klassifizierung von Geotextilien hinsichtlich der Wetterbeständigkeit. - 5. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik.
- Viezee, D.J., Voskamp, W., den Hoedt, G., Troost, G.H., Schmidt, H.M. (1990): Designing Soil Reinforcement with Woven Geotextiles - The Effect of Mechanical Damage and Chemical Ageing on the Long-Term Performance of Polyester Fibres and Fabrics. - 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 651-656.
- Watn, A., Eiksund, G. (2000): Specification profile for geotextiles for separation and filtration in roads - norwegian standard. - Proceedings of the second European geosynthetics conference, I-Bologna, 407-412.
- Watn, A., Eiksund, G., Knutson, A. (1998): Deformations and damage of nonwoven geotextiles in road construction. - Proceedings of the sixth international conference on geosynthetics, Atlanta, 933-938.
- Watn, A., Zeniti, M. (1997): Verformung und Einbauschädigung von Vliesen bei gering tragfähigem Untergrund. - 5. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", München, Geotechnik, 53-60.
- Watts, G.R.A., Brady, K.C. (1990): Site damage trials on geotextiles. - Proceedings of the fourth international conference on geotextiles, geomembranes and related products, The Hague, 603-607.
- Watts, G.R.A., Brady, K.C. (1994): Geosynthetics - Installation damage and the measurement of tensile strength. - Proceedings of the fifth international conference on geotextiles, geomembranes and related products, Singapore, 1159-1164.
- Werner, G., Pühringer, G. (1990): Erfahrungen und Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Geotextilien. - Technische Textilien 33, 5/6, 132-137.
- Wilson-Fahmy, R.F., Koerner, R.M., Fleck, J.A. (1993): Unconfined and confined wide width tension testing of geosynthetics. - Geosynthetic soil reinforcement testing procedures STP 1190, ASTM.
- Wisse, J.D.M., Birkenfeld, S. (1982): The Long-Term Thermo-Oxidative Stability of Polypropylene Geotextiles in the Oosterschelde Project. - 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, 283-288.
- Wrigley, N.E., Austin, R.A., Harrison, P.E. (1999): The long-term strength of geogrid reinforcement. - Conference proceedings of Geosynthetics '99, Industrial Fabrics Association International, 711-721.
- Wulfhorst, B., Becker, G. (1992): Einfluss mechanischer Schädigungen auf das Kriechverhalten von PES-Garnen für Geotextilien. - Technische Textilien, 35, T17-T18.

7.2 Normen und Richtlinien

- AASHTO M288-96 (1996): Standard specifications for geotextiles. - American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM D5321 (1992): Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method. - American society for testing and materials.
- BAM (1995): Anforderungen an die Schutzschicht für die Dichtungsbahnen in der Kombinationsdichtung - Zulassungsrichtlinie für Schutzschichten. - Labor Deponietechnik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Dr. W. Müller, Berlin.
- BS 8006 (1995): Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. - British standards institution (BSI).
- CEN/TC288/WG9/N69E (2000): Execution of special geotechnical works - Reinforced fill. - Draft European Standard, CEN Technical Committee 288, Working Group 9 "Reinforced Soil".
- CIRIA (1996): Soil Reinforcement with Geotextiles. - Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Special Publication 123.
- CR ISO 13434 (1998): Guidelines on durability of geotextiles and geotextile-related products.
- DB AG-TL 918039 (1997): Technische Lieferbedingungen "Geokunststoffe". - Deutsche Bahn, DB Netz AG.
- DIN 18200 (2000): Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte - Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung von Produkten.
- DIN 53386 (1982): Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren - Bewitterung im Freien.
- EBGEO (1997): Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen. - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Verlag Ernst & Sohn.
- EN 13249 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung beim Bau von Strassen und sonstigen Verkehrsflächen (mit Ausnahme von Eisenbahnbau und Asphaltoberbau).

- EN 13250 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung beim Eisenbahnbau.
- EN 13251 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Erd- und Grundbau sowie in Stützbauwerken.
- EN 13252 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Dränanlagen.
- EN 13253 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Erosionsschutzanlagen (Küstenschutz und Deckwerksbau).
- EN 13254 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung beim Bau von Rückhaltebecken und Staudämmen.
- EN 13255 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung beim Kanalbau.
- EN 13256 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung im Tunnelbau und in Tiefbauwerken.
- EN 13257 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung bei der Entsorgung fester Abfallstoffe.
- EN 13265 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Projekten zum Einschluss flüssiger Abfallstoffe.
- EN 14030 (2001): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Säure und alkalische Flüssigkeiten.
- EN 12224 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der Witterungsbeständigkeit.
- EN 12225 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Erdeingravingsversuch.
- EN 12226 (2000): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Allgemeine Prüfverfahren für die Bewertung nach Beständigkeitsprüfungen.
- EN 12447 (2001): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Hydrolysebeständigkeit in Wasser.
- EN 1897 (2001): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung des Kriechverhaltens unter Druckbeanspruchung.
- EN 918 (1996): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch).
- EN 964-1 (1995): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der Dicke unter festgelegten Drücken - Teil 1: Einzellagen.
- EN 965 (1995): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der flächenbezogenen Masse.
- EN ISO 10319 (1996): Geotextilien; Zugversuch am breiten Streifen.
- EN ISO 12236 (1996): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Stempeldurchdruckversuch (CBR-Versuch).
- EN ISO 12956 (1999): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite.
- EN ISO 12958 (1999): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in der Ebene.
- EN ISO 13427 (1998): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Simulation von Scheuerbeschädigungen (Gleitblockprüfung).
- EN ISO 13431 (1999): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens.
- EN ISO 4892-2 (1999): Kunststoffe - Künstliches Bewittern oder Bestrahlen in Geräten - Teil 2: Gefilterte Xenonbogenstrahlung.
- ENV ISO 10722-1 (1998): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Verfahren zur Nachahmung von beim Einbau auftretenden Beschädigungen - Teil 1: Einbau in körnige Materialien.
- ENV ISO 13438 (1999): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit.
- FGSV (1985): Merkblatt für den Entwurf und die Herstellung von Raumgitterwänden und -wällen. - Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau.
- FGSV (1994): Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Strassenbaus. - Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau.

- FGSV (2001): Merkblatt für den Entwurf und die Bemessung von Stützkonstruktionen aus Betonelementen, Blockschichtungen oder Gabionen. - Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau.
- FHWA (2000): Corrosion/degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes. - US Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), Washington DC.
- FHWA (2001): Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes - Design and Construction Guidelines. - US Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), Washington DC.
- GDA (1997): Geotechnik der Deponien und Altlasten. - GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, Ernst und Sohn, Berlin.
- GRI GS10 (2000): Accelerated tensile creep and creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using the stepped isothermal method. - Geosynthetics Research Institute GRI, USA.
- Ministère des Transports (1979): Les ouvrages en Terre Armée - Recommandations et règles de l'art - Ministère des Transports, Direction des Routes et de la Circulation routière - Document réalisé et diffusé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, F-Paris Cedex et le Service des Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, F-Bagneux.
- NF P 94-220-0 (1998): Renforcements des sols: ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu extensibles et souples. - Association française de normalisation (AFNOR).
- ÖNORM S 2073 (1998): Deponien - Dichtungsbahnen aus Kunststoff - Anforderungen und Prüfungen. - Österreichisches Normungsinstitut (ON), Wien.
- ÖNORM S 2076 (1993): Deponien - Dichtungsbahnen aus Kunststoff. - Österreichisches Normungsinstitut (ON), Wien.
- prEN 13719 (1999): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien, die an Geomembranen anliegen.
- prEN 13738 (1999): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung des Widerstandes gegen Auszug aus dem Boden.
- prEN ISO 12957-1 (1997): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der Reibungseigenschaften - Teil 1: Scherkasten-Versuch.
- prEN ISO 12957-2 (1997): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte; Bestimmung der Reibungseigenschaften - Teil 2: Schiefe-Ebene-Versuch.
- RIL 836 (1999): Erdbauwerke planen, bauen und instand halten. - Richtlinie der Deutschen Bahn, DB Netz AG.
- SIA 183 (1996): Brandschutz im Hochbau (SN 520 183). - Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA 203 (1997): Deponiebau (SN 531 203). - Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA 280 (1996): Kunststoff-Dichtungsbahnen (Polymer-Dichtungsbahnen) - Anforderungswerte und Materialprüfung (SN 564 280). - Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SN 640 550a (1996): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Begriffe und Produktebeschreibung. - VSS, Zürich.
- SN 640 552a (1997): Geotextilien - Anforderungen für die Funktionen Trennen, Filtern, Drainieren. - VSS, Zürich.
- SN 670 312b (1998): VSS-Gerät für den Plattendruckversuch E_V und M_E . - VSS, Zürich.
- SN 670 317b (1998): Böden - Plattendruckversuch E_V und M_E . - VSS, Zürich.
- SN 670 330b (1989): Versuche - Verdichtung nach AASHTO. - VSS, Zürich.
- SN 670 335a (1989): Versuche - Dichte des Bodens. - VSS, Zürich.
- SN 670 340b (1989): Versuche - Wassergehalt. - VSS, Zürich.
- SN 670 810c (1985): Mineralische Baustoffe und Lockergesteine - Siebanalyse. - VSS, Zürich.
- SN 670 816a (1989): Mineralische Baustoffe, Schlämmanalyse nach der Aräometermethode. - VSS, Zürich.
- SN 670 835b (1991): Mineralische Baustoffe, Los-Angeles-Versuch. - VSS, Zürich.
- ZTV-Tunnel (1995): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Strassentunneln - Teil 1: Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise). - Bundesministerium für Verkehr, Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 5330.