

Überprüfung der Geotextilrobustheits- klassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 187

bast

Überprüfung der Geotextilrobustheits- klassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

von

Helmut Zanzinger

SKZ – Testing GmbH
Würzburg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 187

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 05.0199
Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen
hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

Fachbetreuung

Michael Bürger

Referat

Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und
Erdbaustoffe im Straßenbau

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-741-9

Bergisch Gladbach, August 2023

Kurzfassung – Abstract

Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

Im Rahmen eines großmaßstäblichen Feldversuchs wurden 12 mechanisch verfestigte Geovliesstoffe aus PP-Stapelfasern drei verschiedener Hersteller hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Einbaubeanspruchung in ihrer Funktion als Trennlage zwischen lockerem Untergrund und grobkörnigem Tragschichtmaterial überprüft. Auf vier Testfeldern wurden jeweils vier unterschiedliche Einbausituationen simuliert. Dazu wurden Tragschichtmaterialien aus rundkörnigem, sandigem Kies bis zu scharfkantigem, sandig, steinigem Kies eingesetzt. Die Beanspruchungen durch den Bauverkehr wurden anhand der sich einstellenden Spurrinnen aus Lkw-Überfahrten gesteuert. Zur schonenden Freilegung der Geovliesstoffe kam ein Saugbagger zum Einsatz.

Alle Geovliesstoff-Proben wurden visuell auf Beschädigungen beurteilt und danach klassifiziert. Für die Bewertung der mechanischen Veränderungen wurde das Arbeitsvermögen und die daraus abgeleitete Schädigungsarbeit herangezogen. Einen Schädigungsgrad von weniger als 20 % konnte nur die Hälfte der getesteten Proben erreichen. Einem Schädigungsgrad von bis zu 50 % konnten nahezu alle Proben einhalten. Das derzeitige Klassifizierungssystem sollte die Anforderungen an geotextile Trennlagen verschärfen. Die alleinige Forderung einer Festigkeit ist nicht ausreichend. Die Geovliesstoffe sollten nach dem Ausweichprinzip Beschädigungen vermeiden. Dazu ist es notwendig, dass auch die Verformbarkeit Berücksichtigung findet. Das Arbeitsvermögen gibt hierfür zusammen mit der Mindestdehnfähigkeit eine gute Grundlage. Vor diesem Hintergrund wurde ein Vorschlag für ein zeitgemäßes Klassifizierungssystem unterbreitet.

Review of the geotextile robustness classes with regard to new product developments

As part of a large-scale field test, 12 mechanically bonded nonwoven geotextiles made of PP staple fibres from three different manufacturers were tested about their robustness against installation loading in their function as a separation layer between soft subsoil and coarse-grained base course material. Four different installation situations were simulated on each of four test fields. Base course materials ranging from round-grained, sandy gravel to sharp-edged, sandy, stony gravel were used for this purpose. The stresses caused by construction traffic were controlled based on the ruts resulting from truck crossings. A suction excavator was used to gently expose the geotextiles.

All samples were visually assessed for damage and then classified. The energy absorption and the derived damaging work were used to evaluate the mechanical changes. Only half of the tested samples achieved a degree of damage of less than 20%. A degree of damage of up to 50% could be achieved by almost all of them. The current classification system should raise the requirements for geotextile separation layers. The sole requirement of strength is not enough. The geotextiles should avoid damage according to the evasion principle. For this purpose, it is necessary that the deformability is also considered. The energy absorption together with the minimum elongation ability provides a good basis for this. Against this background, a proposal for a up-to-date classification system was made.

Summary

Review of the geotextile robustness classes with regard to new product developments

On 17 December 2019, SKZ – Testing GmbH was awarded a contract by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, represented by the Federal Highway Research Institute (BASt), to carry out the research and development project “Verification of geotextile robustness classes with regard to new product developments” FE-No. 05.0199/2017/AGB.

Empirical classification systems are used for the function of separating soils of different grain sizes with geotextiles. In the present project, the classification system of the “Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (M Geok E)” is to be reviewed, international experience is to be included and a basis for a possible European harmonised classification system is to be laid.

The report describes the selection of the test materials, the testing of the geotextiles in the as-delivered condition, the planning and execution of the field tests and the testing of the removed geotextiles as well as the test evaluation.

In the current classification system, a distinction is made between five application cases that consider the influence of the fill material. These are in turn combined with five stress cases resulting from the installation of the geosynthetic and the associated construction operation. This results in 25 possible application combinations, which are nowadays concentrated on three geotextile robustness classes (GRK 3 to GRK 5) and thus describe the loading of the separation layer. The most common are geotextiles (GTX-N) with staple fibres made of polypropylene (PP). In general road construction, the use of GTX-N of GRK 3 has become established, GTX-N of GRK 4 are used sporadically and those of GRK 5 mostly only in exceptional cases.

The boundary conditions of the field tests of this research project consider the construction site-specific needs in Germany. The products investigated were selected in consultation with the Industrieverband Geobaustoffe e. V. (IVG), and was limited to GTX-N, which represent the materials

primarily used in earthworks for road construction in Germany.

Roads are often built on soft subsoil. Due to the traffic load on the subsoil, repetitive, cyclic loads affect the subsoil. The action of such loads on soft soils can quickly degrade the quality of the traffic roads. Passing over the road causes dynamic impacts. This causes fine material to be pumped out of the subsoil into the subbase layers above. This reduces the load-bearing capacity of the aggregate layer. For geotextiles to function properly, however, it is fundamentally important that they not only survive installation without damage, but that their functionality is maintained over the long term. There must be no holes or damage that would locally disable the filter and separation functions.

For the investigations of this project, mechanically bonded GTX-N as well as mechanically bonded GTX-N with one-sided thermal treatment were selected. For each product, the as-delivered characteristic values (ALZ) for mass per unit area, thickness, tensile strength and static puncture force were determined. In addition to these standard values, the energy absorption was also determined in the tensile test as well as in the static puncture test. These are to be used to assess the behaviour under mechanical stress and as a possible indicator of robustness to the mechanical effects during installation.

In the tensile test, an axial deformation is generated, whereas in the static puncture test, a multi-axial deformation is generated in approximation to the outer surface of a truncated cone. The integral of the force-strain line described as “energy absorption, linear” is determined until the tensile strength is reached. The “energy absorption capacity, planar” based on the multi-axial deformation of the geotextile in the static puncture test is calculated from the integral of the force-strain line – however, this is to be understood as the planar strain.

In order to vary the installation situation of four different geotextile robustness classes, three different fill materials were selected, and these were combined with two different levels of loading due to construction operations. In the matrix, the stresses from construction operations were selected in such a way that GRK 3 to GRK 5 could be covered in the test fields by using three different fill materials. The installation and compaction of the fill material was carried out mechanically. The expected rut depths

in the geotextile layer were between 5 cm and 15 cm. Round-grained fill material (sandy gravel) and angular fill material with and without stones (sandy, stony gravel and sand-gravel mixture) were used.

A renaturation area of a construction company in Mecklenburg-Vorpommern, Germany was available for the large-scale field tests. In order to ensure an even load on the geotextiles over the entire length of the respective test fields, troughs with a depth of 0.5 m and a width of 6 m were excavated for each test field in corresponding lengths of up to 31 m and filled with a quartz sand 0/2 mm up to the upper edge of the overlying terrain. This sand was not compacted beyond the bulk density and was also not driven on before installation of the geotextiles and placement of the base course material. The geosynthetics to be investigated were made up according to the dimensions of the test fields (VF) of approx. 3 m in machine direction and a width of approx. 4 m or 5 m in cross-machine direction.

The bulk material of the sub-base layers was poured onto the test fields with a wheel loader and distributed and levelled with a mobile excavator with a clearing bucket. The sub-base layer was compacted with a single-drum compactor in such a way that the test setup could be driven over with a three-axle truck. After the passes and the measurement of the ruts on the top of the sub-base layers, the top 10 cm to 15 cm of the sub-base layer material was carefully removed with a backhoe. A mobile suction excavator was then used to pick up most of the remaining fill material. The rest was removed manually.

All samples taken were subjected to a uniform visual sample approach. Damage was recorded as indentations or holes and cracks. Six damage classes were introduced, which were assigned to a defined visual damage factor. To assess all samples taken, the holes were counted, their hole diameter measured, and each sample taken was assigned to the corresponding damage class for each test field. Optical damage was found almost exclusively in the area of the ruts. Hardly any optical damage was found in the middle.

All excavated specimens were tested in the same way as for the mechanical properties in the ALZ. All tensile tests and static puncture tests of the specimens in the ALZ were shown in a common diagram. The tensile force was plotted on the linear strain in the tensile test and the static puncture force

was plotted on the plane strain in the static puncture test. It was thus shown that the curves are largely congruent for both multi-axial static puncture tests and uni-axial tensile tests.

The comparison of the mechanical properties of the specimens in the ALZ as a function of the mass per unit area generally showed a good linear correlation for the static puncture forces, for the energy absorption in the static puncture test, for the tensile strength and for the energy absorption in the tensile test. This was especially true when the evaluation was related to the product family from one manufacturer. Thus, a good correlation between tensile strength and static puncture force was also to be expected.

Furthermore, all geotextiles of one manufacturer showed that the hole diameters in the cone drop test correlated very well via the mass per unit area and showed smaller and smaller holes with increasing mass per unit area. A thermal surface treatment had a negative influence on the perforation resistance of the GTX-N.

The tested GTX-N showed very different deformabilities in tensile and static puncture tests. In the closer considerations, the focus was placed on the energy absorption, because both the strength and the elongation were included. For all samples, there was a more or less linear increase in the energy absorption with the increase in the mass per unit area. This increase was identical for all samples in the ALZ as well as the removed samples. Under the ruts, the samples showed greater damage here in the form of lower energy absorption than the samples between the wheels. There, the GTX-N could also be tensioned as a result of the ruts forming on both sides, but the direct compressive load of the coarse grain of the sub-base layer on the geotextile was not present there. The preliminary compaction of the sub-base layer by the single-drum compactor was able to cause the first damage. It was not possible to completely separate these successive influences in retrospect.

The total damaging work resulted from the difference between the energy absorption in the ALZ and the remaining energy absorption including the reduction due to the visual damage factor. The degree of damage was defined as the ratio of the damaging work and the energy absorption. The degree of damage decreased with increasing mass per unit area.

VF GRK3 showed that the degree of damage was below 20% in 3 out of 5 samples. The other two samples were thermally surface treated and showed degrees of damage between 40 and 50%. The samples from VF GRK4a only showed degrees of damage between 0 and 20%, because only minimal construction work had been carried out there as a result of trucks passing over. In contrast, the samples in VF GRK4b were very severely damaged. Degrees of damage between 40% and 80% were found. In VF GRK5, the 5 lighter GTX-N with masses per unit area below 300 g/m² all showed relatively large damage, while the two heavier GTX-N only showed damage levels below 20%. All samples from the VF GRK6 showed degrees of damage between 30% and 90%.

The evaluation for robustness was carried out for all products. Six of the 12 products met their assigned requirements for a permissible degree of damage of e.g. 20% in the respective test fields used. Five out of 12 products were installed exclusively in test fields that did not meet their classification. They did not meet the requirements for an allowable degree of damage of e.g. 20%. One out of 12 products was adequately installed in corresponding test fields according to its classification and did not fulfil the mentioned requirement. In a second observation, a permissible degree of damage of e.g. 50% was assessed. This criterion, in turn, was met by 11 of 12 products. In principle, it would be desirable that no damage whatsoever occurred to the geotextile separation layers in order to be able to ensure their complete and permanent functionality.

The damage caused by ruts and trucks passing over the surface exceeded the damage caused by backfilling and subsequent compaction with a compactor. The GTX-N of manufacturer C experienced the greatest damaging work on all test fields. The products of manufacturers A and B tended to show higher damage as a result of truck passes compared to damage as a result of compaction with the compactor.

The total damaging work increased in the test fields VF GRK3 and VF GRK4b from approx. 10 to approx. 24 kJ/m, whereby the grain size distribution of the sandy gravel in VF GRK3 and the sand-gravel mixture in VF GRK4 did not show any serious difference. But the grain shapes of the gravel were different. This showed that the grain form of the fill

material played an important role in the damage of the geotextiles.

Another increase in damaging work from about 40 to about 45 kJ/m was observed when comparing VF GRK5 and VF GRK6. Here, the identical grain size was used in both test fields. The distinction between these test fields lay in the ruts produced. This again showed that both the construction operation in the form of backfilling and subsequent compaction and the truck passes damaged the geotextiles.

A closer look at the stresses caused by the loaded truck passes showed that the effects on the geotextile – expressed as damaging work – due to the grain shape of the angular sand-gravel mixture compared to a round-grained sandy gravel of the filling material was more decisive than the effects of the construction operation. Round or squat grain shapes were obviously less damaging than angular or pointed shapes of the gravel or stones.

The energy introduced by the truck passes correlated with the damaging work observed for the sharp-edged fill material. The primary selection of geotextile separation layers should therefore preferably be based on the existing fill material. The duration and intensity of subsequent construction operations are less predictable. Consequently, the focus should be on sharp-edged fill materials. As a simplified approach, it would be sufficient to distinguish only between "normal construction operations" and "demanding construction operations".

The comparison of international classification systems applied to the conditions of the test fields showed that other countries generally have lower requirements for the geotextiles than Germany, for example in terms of the required static puncture forces. However, the study showed that these were not sufficient. Consequently, these would have to be raised for the individual classes.

The GTX-N with thermal surface treatment in VF GRK3 resulted in greater damaging work than the more stretchable products without thermal post-treatment. They were not as good at evading the forces caused by the indentations of the coarse grains. They rather followed the resistance principle. Unlike more stretchy geotextile filters, which have to safely span the cavities of the core layer in the case of drainage geocomposites, in the case of separation layers between fine-grained subsoil and the coarse fill layer on top of it, it is irrelevant if the

GTX-N deforms into the coarse structure of the fill material. The essential thing is that this happens without damaging the filter. In cases where the separation function is of primary importance, this evasion principle appears to be more appropriate than the resistance principle.

Based on the experience of the research project, a classification system should also take into account the deformability of the GTX-N. The mass per unit area is only used for identification and is not a technical parameter that can describe the robustness of the GTX-N. The strength and deformability of the GTX-N must be taken into account. Therefore, the energy absorption and damaging work should be used to evaluate the robustness. A sufficient deformability for all GTX-N in the static puncture test could be a penetration displacement of at least 55 mm. This would be equivalent with an elongation at tensile strength in a wide-width tensile test of around 50%. Furthermore, one could counteract the stress caused by filling by limiting the permissible hole diameter of the GTX-N in the cone drop test to approx. 15 mm.

The requirements for the energy absorption result from the fact that the required energy absorption can compensate for the damaging work determined in the research project without the GTX-N being damaged. For Class 3, this would require an energy absorption of 60 kJ/m, for Class 4 100 kJ/m, for Class 5 140 kJ/m and for the new Class 6 180 kJ/m.

In addition to the numerous new findings obtained in the research project for mechanically bonded GTX-N made of PP staple fibres, new questions arose that would have to be discussed in future research projects:

- How can a requirement for the robustness of the individual component – in this case the filter and separation layer – be specified for geocomposites with a reinforcing, filtering and separating function, consisting of a grid-type geosynthetic and a GTX-N?
- How can a requirement for the robustness of the individual components – in this case the filter and separation layers – be specified for drainage geocomposites with drainage, filter and separation functions consisting of a geosynthetic drainage core and one or two GTX-N?
- What is an acceptable degree of damage for geotextile separation layers and what are tolerable degrees of damage for geotextiles with a separation and filter function?
- Can the new requirements for the robustness of geotextiles in the form of a required energy absorption for mechanically bonded GTX-N made of PP staple fibres also be directly transferred to thermally bonded GTX-N or to mechanically bonded GTX-N made of continuous filaments or to GTX-N made of PET?
- Is the energy absorption for the classification of the robustness of geotextiles against installation damage also applicable to woven geotextiles made of PP tapes, where the resistance principle certainly prevails?

Inhalt

1	Einleitung und Forschungsziel	11	5	Versuchsdurchführung	
				Feldversuche	25
2	Stand des Wissens	11	5.1	Örtlichkeit und Vorbereitung der Proben	25
2.1	Klassifizierung von geotextilen Trennlagen	11	5.2	Einbau Geotextilien	26
2.2	Wirkungsweise geotextiler Trennlagen	13	5.3	Aufbau und Verdichtung der Tragschichten	27
3	Grundlagen der Geokunststoffe	15	5.4	Beanspruchung der Tragschicht durch Lkw-Überfahrten	27
3.1	Geokunststoff-Produkte	15	5.5	Ausbau	30
3.2	Geotextilien	16	5.6	Bodenmechanische Feld- und Laboruntersuchungen	32
3.2.1	Geovliesstoffe GTX-N	16	5.7	Laborprüfungen an den Geotextilien	36
3.2.2	Geogewebe GTX-W	17	6	Auswertung der Versuche	37
3.2.3	Geomaschenware GTX-K	18	6.1	Aufteilung der Proben nach der Freilegung	37
3.3	Geotextilverwandte Produkte GTP	18	6.2	Visuelle Beurteilung der Proben nach der Freilegung	37
3.3.1	Geogitter GGR	18	6.3	Einfluss von Prüfgeschwindigkeit und Dehnungsrate auf Zugversuch	38
3.3.2	Geonetz GNT	18	6.4	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Proben nach der Freilegung	40
3.3.3	Geomatte GMA	18	6.5	Kombinierte Darstellung der Zugversuche und der Stempel- durchdrückversuche	42
3.3.4	Geozelle GCE	19	6.6	Auswertung der Untersuchungs- ergebnisse an den Geotextilien	44
3.3.5	Geoband GST	19	6.7	Auswertung des Arbeitsvermögens der Geotextilien	47
3.3.6	Geospacer GSP	19	6.8	Vergleich verschiedener Klassifi- zierungssysteme zum Trennen mit Geotextilien	58
3.4	Geosynthetische Dichtungsbahnen GBR	19	6.9	Vorschlag für ein zeitgemäßes Klassifizierungssystem	59
3.4.1	Kunststoffdichtungsbahn GBR-P	19			
3.4.2	Tondichtungsbahn GBR-C	19			
3.4.3	Bitumendichtungsbahn GBR-B	19			
3.5	Geoverbundstoffe GCO	19			
3.6	Funktionen der Geokunststoffe	20			
4	Auswahl der Materialien	21			
4.1	Geokunststoffe	21			
4.2	Bodenmaterialien	23			
4.2.1	Bodenmaterial für den Unterbau	24			
4.2.2	Tragschichtmaterialien	24			

7	Fazit	60
8	Weiterer Forschungsbedarf	62
	Literatur	63

Die Anhänge A – J zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung und Forschungsziel

Die SKZ – Testing GmbH erhielt vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen am 17. Dezember 2019 den Auftrag zur Durchführung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen“ FE-Nr. 05. 0199/2017/AGB.

Geokunststoffe werden in sehr vielen Bereichen des Erdbaus eingesetzt. Eine Vielzahl an Bauweisen und Bauverfahren sind im Vergleich zu den konventionellen Erdbaumaterialien durch den Einsatz von Geokunststoffen effizienter und kostengünstiger geworden. Zu ihren wichtigsten Aufgaben gehören die Funktionen Filtern, Trennen und Bewehren, wobei in dieser Forschungsarbeit das Trennen im Fokus steht. Diese Anwendungsfälle können in Labor- und Feldversuchen gut nachgebildet werden und werden durch materialspezifische Parameter beschrieben.

Der Endzustand, für den ein Produkt eine spezifische Aufgabe (z. B. Bewehren) zu erfüllen hat, gilt als maßgebender Bemessungsfall. Dabei werden auch das Einbauen und das Verdichten der Überschüttung, die einen wesentlichen Teil des Baubetriebs ausmachen, betrachtet.

Für die Funktionen Filtern oder Bewehren von Geokunststoffen gibt es anerkannte Bemessungsverfahren. Dies gilt jedoch nicht für die Funktion des Trennens. Hierbei ist es notwendig, Klassifizierungssysteme zu verwenden. Diese sind bislang international noch nicht harmonisiert. In Deutschland basiert das Klassifizierungssystem je nach Produktgruppe auf unterschiedlichen Prüfverfahren zur Bewertung der Robustheit. Während für Geovliesstoffe die Stempeldurchdrückkraft und das Flächengewicht zugrunde gelegt werden, ist es beispielsweise bei Geogeweben die Zugfestigkeit im Zugversuch am breiten Streifen und das Flächengewicht. Im internationalen Vergleich stützen sich die Klassifizierungssysteme hingegen gänzlich auf die Zugfestigkeit der Geotextilien und eventuell zusätzlich auf das Arbeitsvermögen – oftmals vereinfacht als Produkt aus $0,5 \times \text{Zugfestigkeit} \times \text{Höchstzugkraftdehnung}$ dargestellt.

Seitdem die Klassifizierungssysteme im vergangenen Jahrhundert aufgestellt wurden, wurden die Produkte stetig weiterentwickelt. Die eingesetzten

Fasern zeigen eine höhere Festigkeit als damals. Wurden in den 1970er und 1980er Jahren für Geovliesstoffe vielfach Polyesterfasern (PET) verwendet, so kommen heute in Europa überwiegend Polypropylenfasern (PP) zum Einsatz. Die Produktionsverfahren wurden weiterentwickelt. Hat man in der Vergangenheit vielfach Produkte aus Endlosfasern eingesetzt, so sind es heute mehrheitlich Produkte aus Stapelfasern. Moderne Produktionsanlagen sind in der Lage die Fasern sehr exakt abzulegen, sodass das Flächengewicht nur geringe Streuungen aufweist und auch die Verteilung über die Fläche einen hohen Standard garantiert.

Ein wichtiger Effekt, der sich aus den Einbaubearbeitungen ergibt und der in diesem Projekt verstärkt beleuchtet wird, ist die Anforderungen an moderne Geotextilien hinsichtlich der Funktion des Trennens zu überprüfen, sie zu verifizieren und zu validieren. Es soll das Klassifizierungssystem des „Merkblatts über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (M Geok E)“ [FGSV-2016] überprüft, die internationalen Erfahrungen mit einbezogen und die Grundlage für ein mögliches europäisch harmonisiertes Klassifizierungssystem gelegt werden.

Dieser Bericht vermittelt einen Überblick über den aktuellen Wissensstand, beschreibt die Auswahl der Versuchsmaterialien, die Prüfung der Geotextilien im Anlieferungszustand, die Planung der Feldversuche, die Durchführung der Feldversuche und die Prüfung der ausgebauten Geotextilien sowie die Versuchsauswertung. Weiterhin wird aufgezeigt, inwiefern die Einbaubedingungen auch mittels Laborsimulation nachzubilden sind ob der bei Geovliesstoffen übliche Stempeldurchdrückversuch durch den verbreiteten Zugversuch ersetzt werden kann. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Vorschlag für ein zukünftiges Klassifizierungssystem unterbreitet.

2 Stand des Wissens

2.1 Klassifizierung von geotextilen Trennlagen

Das aktuell gültige System in Deutschland zur „Robustheit von Geokunststoffen gegen die Beanspruchung beim Einbau und durch den Baubetrieb“, basiert bereits auf den Erfahrungen und Erkenntnissen aus den 1980er und 1990er Jahren [BRÄU-

1984], [BRÄU-1986], [BRÄU-1992], [BRÄU-1995], [WATN-1997], [FLOSS-1996], [FLOSS-2001] und [BRÄU-2004]. Daraufhin ist ein Klassifizierungssystem im M Geok E [FGSV-2016] der FGSV festgelegt worden. Dabei werden fünf Anwendungsfälle (AS1 bis AS5) unterschieden, die den Einfluss des Schüttmaterials (rundkörnig und/oder scharfkantig) berücksichtigen. Diese werden wiederum mit weiteren fünf Beanspruchungsfällen (AB1 bis AB5), welche sich aus dem Einbau des Geokunststoffs und dem damit verbundenen Baubetrieb ergeben, kombiniert. Zusammengefasst resultieren 25 mögliche Anwendungskombinationen, die ursprünglich in fünf Geotextilrobustheitsklassen (GRK 1 bis GRK 5) zusammengefasst wurden und somit die Beanspruchung der Trennlage beschreiben. Inzwischen sind für den Erdbau im Straßenbau die Ansprüche und auch die Verkehrsbelastung gestiegen, weshalb aus heutiger Sicht für den Straßenbau lediglich die Klassen GRK 3, GRK 4 und GRK 5 relevant sind. In der Praxis bzw. im allgemeinen Straßenbau hat sich der Einsatz von Geotextilien der GRK 3 etabliert, Geotextilien der GRK 4 kommen vereinzelt zum Einsatz und die der GRK 5 meist nur in Ausnahmefällen.

Die Geotextilrobustheitsklassen GRK 1 und GRK 2 spielen im qualifizierten Erdbau in Deutschland als Trennlage keine Rolle und sind in der aktuellen Ausgabe des M Geok E [FGSV-2016] nicht mehr enthalten. Sie sind aber für einfache Anwendungen im Gartenbau oder im privaten Sektor für Geotextilien, die z. B. im Baumarkt verkauft werden, nützlich.

Seit der Einführung der Geotextilrobustheitsklassen hat sich neben den mechanischen Beanspruchungen technologisch zudem einiges getan:

- Neue und weiterentwickelte Geogewebe und Geovliesstoffe sind auf dem Markt verfügbar, bei welchen die Robustheit gegen Einbaubeschädigungen noch nicht umfassend untersucht wurde.
- Einige Laborprüfungen von Geokunststoffen wurden angepasst und revidiert.

Die Festlegungen der Geotextilrobustheitsklassen im M Geok E [FGSV-2016] basieren somit möglicherweise nicht mehr auf dem aktuellen Stand der Technik.

Nicht nur auf nationaler Ebene, durch das M Geok E [FGSV-2016], sondern auch auf internationaler Ebene gibt es weitere Systeme, die eine Untertei-

lung von Geotextilien für die Funktionen Trennen und Filtern in unterschiedliche Klassen erlauben.

Das skandinavische System NorGeoSpec [NORGEOSPEC-2002] wurde speziell für die nordischen Länder wie Finnland, Schweden, Norwegen und das Baltikum zur Trennung und Filterung mit Geotextilien im Straßenbau entwickelt. Hierbei werden fünf geotextile Anforderungsprofile, welche bestimmte charakteristische Eigenschaften erfüllen müssen, unterschieden. Die Zuordnung der Anforderungsprofile ist abhängig von den Untergrundverhältnissen, den Konstruktions- und Einbaubedingungen sowie der Verkehrsbelastung. Die Untergrundverhältnisse werden in Abhängigkeit der undränierten Scherfestigkeit c_u in „weich – $c_u \leq 25$ kPa“ und „fest – $c_u > 25$ kPa“ unterteilt. Ferner werden entsprechend der Materialbeschaffenheit und Verdichtbarkeit die Konstruktions- bzw. Einbaubedingungen in normale und günstige Verhältnisse unterschieden. Die Intensität der Beanspruchung einer Straßenbefestigung wird durch die Fahrzeugüberfahren (hoch > 500 Fahrzeuge und niedrig < 500 Fahrzeuge) berücksichtigt. Anhand dieser Parameter und dem Größtkorn (d_{max}) wird die relevante Spezifikationsklasse definiert [NORGEOSPEC-2002]. Es sind sowohl für die Zugfestigkeit, die Höchstzugkraft-Dehnung und das Arbeitsvermögen Mindestanforderungen vorgegeben.

Eine ähnliche Herangehensweise wurde auch von der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr für die Technischen Vertragsbedingungen für Geotextilien im Unterbau [RVS-2020] gewählt. Neben der Einteilung des Untergrundes nach seiner Tragfähigkeit und der weitergehenden Unterscheidung nach der Beanspruchung der Straßen durch Verkehr, werden Produkteigenschaften an Geotextilien definiert. Geeignete Geotextilien werden über Grenzwerte ihrer Höchstzugkraft, ihrer Höchstzugkraftdehnung, ihrer Stempel-Durchdrückkraft und dem Lochdurchmesser definiert.

Die amerikanische Methode nach AASHTO M288 [AASHTO-2008], die ebenfalls die Trennfunktion berücksichtigt, unterscheidet je nach Untergrund und Einbaumethode in die drei Geotextilklassen Class 3, Class 2 und Class 1. Die Anforderungen sind hierbei für die niedrigen Klassen höher als für die hohen Klassen: Class 3 $<$ Class 2 $<$ Class 1. Darüber hinaus gibt es eine Class 1+ für welche es jedoch keine definierten Anforderungswerte gibt. Die Einbaubeanspruchungen sind in Low (Bodenpres-

sung: ≤ 25 kPa), Medium (≤ 50 kPa) und High (> 50 kPa) unterteilt. Die Untergrundverhältnisse sind eingeteilt in:

- Der Untergrund wurde von allen Hindernissen außer Gras, Laub und feinen Holzresten befreit. Die Oberfläche ist glatt und eben, sodass flache Vertiefungen und Buckel eine Tiefe von 450 mm nicht überschreiten. Alle größeren Vertiefungen sind aufgefüllt.
- Der Untergrund wurde von allen Hindernissen befreit, die größer sind als kleine bis mittelgroße Baumstämme und Felsen. Baumstämme und Stümpfe sollten entfernt werden. Vertiefungen und Buckel sollten eine Tiefe von 450 mm nicht überschreiten. Größere Vertiefungen sollten aufgefüllt werden.
- Es ist nur eine minimale Baustellenvorbereitung erforderlich. Bäume können gefällt, entastet und an Ort und Stelle belassen werden. Die Stümpfe sollten so geschnitten werden, dass sie nicht mehr als ± 150 mm über dem Untergrund herausragen. Das Geotextil kann direkt über die Baumstämme, Stümpfe, große Vertiefungen und Buckel, Löcher, Bachläufe und große Felsbrocken ausgelegt werden. Die Gegenstände sollten nur dann entfernt werden, wenn das Verlegen des Geotextils und des Abdeckmaterials darüber die fertige Straßenoberfläche verzerren würde.

Insgesamt sind die drei Klassen mit unterschiedlichen mechanischen (Stempeldurchdrückkraft) und hydraulischen Eigenschaften zu unterscheiden, was bei der Verwendung einen erfahrenen Anwender mit detaillierten Projektkenntnissen voraussetzt.

Die australische Road and Maritime Services – Methode, RMS-QA R63 [RMS-2017] kennt fünf Geotextilklassen (A, B, C, D und E). Diesen werden sowohl hydraulische als auch mechanische Eigenschaften (Stempeldurchdrückkraft) zugeordnet. Des Weiteren wird der Untergrund in zwei Klassen ($\text{CBR} \leq 3$ und $\text{CBR} > 3$) unterteilt. Eine gewisse Ähnlichkeit mit der Methode des Schweizerischer Verband für Geokunststoffe (SVG) liegt vor [LIFA-2019], da sie ebenso Mindestanforderungen für Geotextilien an hydraulische und mechanische (Zugfestigkeit und Arbeitsvermögen) Eigenschaften stellt. Auch hier sind Erfahrungen und Projektkenntnisse erforderlich wie bei [RMS-2017].

Die britische Norm [BS 8661] unterscheidet drei Geotextilklassen (specification profiles). Die Auswahl der Geotextilien erfolgt nach Baugrundfestigkeit (extrem bis sehr niedrig, niedrig bis mittel oder hoch bis sehr hoch), Baubedingungen (normal oder günstig) und der Körnung des Auffüllmaterials (Größtkorn ≤ 40 mm, ≤ 63 mm, < 200 mm oder ≥ 200 mm). Für die Einteilung der Baubedingungen werden äquivalente Standard-Achslasten (Equivalent Standard Axle Load, ESAL) herangezogen. Die Mindestanforderungen sind für Zugfestigkeit, Höchstzugkraft-Dehnung und für Stempel-Durchdrückkraft definiert.

Seit Jahren sind keine neuen Forschungsarbeiten mehr dokumentiert, die aktuelle Geotextilprodukte und Einbaubelastungen berücksichtigen. Aktuell gültige Klassifizierungssysteme, die teilweise indirekte Größen wie das Flächengewicht angeben, müssen dem Stand der Technik angepasst werden.

Die Randbedingungen der Freifeldversuche dieses Forschungsvorhabens berücksichtigen insbesondere die baustellenspezifischen Bedürfnisse in Deutschland sowie die Erfahrungen aus nationalen und internationalen projektorientierten Großversuchen und labormäßigen Simulationen ([BRÄU-1992], [BRÄU-1995], [WATN-1997], [BRÄU-2004]). Die Auswahl der untersuchten Produkte beschränkt sich auf Geovliesstoffe, deren Herstellungstechnologien nach Abstimmung mit dem Industrieverband Geobaustoffe e. V. (IVG) die im Erdbau des Straßenbaus vornehmlich eingesetzten Materialien repräsentieren.

2.2 Wirkungsweise geotextiler Trennlagen

Straßen werden oft auf weichem Untergrund gebaut. Durch die Verkehrsbeanspruchung des Untergrunds wirken sich wiederholende, zyklische Belastungen auf den Untergrund aus. Die Einwirkung solcher Lasten auf weiche Böden bewirken bleibende und unterschiedliche Setzungen, die die Qualität der Verkehrswege schnell verschlechtern können. Geokunststoffe können zur Stabilisierung des Unterbaus verwendet werden, um die Setzungen zu vergleichmäßigen und die Gebrauchsdauer der Straße zu erhöhen. Überfahrten verursachen dynamische Einwirkungen. Dadurch wird Feinmaterial aus dem Untergrund in die darüberliegenden Schichten gepumpt. Dies reduziert die Tragfähigkeit und Dränkapazität der Schüttschicht. Die Verzah-

nung der körnigen Tragschicht wird durch die Einlagerung von feinen und feinsten Bodenteilchen und somit die Korn-zu-Korn-Reibung reduziert. Das hat zur Folge, dass auch die Lastverteilung der Tragschicht selbst vermindert wird. Durch die vertikale Wanderung von Feinteilen in die Tragschicht werden zusätzliche Verformungen begünstigt. Durch die seitliche Wanderung der Feinteile infolge von Lastkonzentrationen insbesondere unter Fahrspuren, kommt es zu lokalen Verformungen. Einerseits können Körner der Tragschicht in aufgeweichte Bereiche des Untergrunds gedrückt werden und andererseits können Feinteile des Untergrunds in die Poren oder Hohlräume der Tragschicht wandern. Wird die Schüttung direkt auf tonigem oder schluffigem Untergrund aufgebracht, kann sich dazwischen eine Schmierschicht bilden. Besonders, wenn auf der Schütteebene Eindrückungen oder Vertiefungen bestehen. Wenn die Tragschicht sich infolge Verkehrsbelastung ausdehnt, bewegen sich aufgeweichte Bodenteilchen (Schlämme) in die Hohlräume. Der Schlamm wird dann nach oben gepumpt, wenn sich die Tragschicht bei Entlastung wieder zusammenzieht. Somit wandern nach und nach mobile Ton-/Schluffpartikel in die Tragschicht.

Wasserdurchlässige Geokunststoffe sind eine sichere Alternative zu traditionellen Lösungen, wie abgestufte Kies- oder Sandschichten als Trenn-Filter-schicht auf dem Untergrund, um den Auswirkungen von Pumpeffekten vorzubeugen. Im Gegensatz zu Sand sind Geokunststoffe einfach zu transportieren und zu verlegen, damit die Tragschicht schnell eingebracht werden kann. Geokunststoffe als industriell gefertigte Produkte mit definierten technischen Vorgaben müssen im Vergleich zu einer Sandschüttung nicht konsequent in einer vorgegebenen Schüttstärke entlang der Verkehrsstrasse eingebracht werden. Der Einsatz von Geokunststoffen anstelle von Sand reduziert das Aushub- wie auch das Schüttvolumen. Geotextilien können gezielt für individuelle Projekte eingesetzt werden, um verschiedene Schüttschichten mit unterschiedlichen Körnungen und Eigenschaften zu trennen.

Außerdem können Geokunststoffe das Eindringen von Feinpartikeln in einen Unterbau reduzieren, damit die Schichtstärke und Zusammensetzung der körnigen Schichten erhalten bleiben und dadurch die Lebensdauer der Verkehrswege erhöhen. Um diese Funktionen erfüllen zu können, ist es wichtig, dass das Produkt widerstandsfähig gegen konzentrierte Beanspruchungen (Reißen, Durchstanzen

und Aufplatzen) ist und die Öffnungsweiten auf die zurückzuhaltenden Bodenteilchen abgestimmt sind.

Der Wasserfluss aus dem Untergrund kann Feinpartikel aus dem Untergrund in die darüberliegende Tragschicht ausspülen. In diesem Fall kann ein Geotextil als Filter wirken, welcher dem Wasser erlaubt, frei durchzufließen, während die Feinpartikel aus dem Untergrund zurückgehalten werden. Um die Filterfunktion erfüllen zu können, muss ein Geotextil die entsprechenden Wasserdurchlässigkeits- und Rückhalteeigenschaften aufweisen und darf nicht kolmatieren.

Zur Funktionsfähigkeit von Geotextilien ist es aber grundsätzlich von entscheidender Bedeutung, dass diese nicht nur den Einbau schadlos überstehen, sondern auch dauerhaft die Funktionstüchtigkeit erhalten bleibt. Es dürfen keine Löcher oder Beschädigungen auftreten, die die Filter- wie auch die Trennfunktion lokal außer Kraft setzen würden. Leider werden derartige Beschädigungen nicht aktiv wahrgenommen, weil es in der Natur der Sache liegt, dass Geokunststoffe mit Boden überschüttet werden und somit eine Beschädigung i. d. R. nicht unmittelbar erkannt wird. Den Schaden am Bauwerk stellt man erst später fest. Geokunststoffe haben im Vergleich mit den Kosten für die im Erdbau eingesetzten Erdstoffe einen verschwindend kleinen Anteil an den Gesamtkosten. Dennoch wird hier oftmals um den letzten Cent gerungen. Das führt dazu, dass im gegenseitigen Wettbewerb die Materialien ausgereizt werden. Sinnvoller wäre es, für die anspruchsvollen Verkehrsbauwerke Geotextilien einzusetzen, deren Robustheit von vornherein über alle Beanspruchungen durch den rauen Baubetrieb hinweg erhaben wären. Vergleicht man die Klassifizierungssysteme für Geotextilien zum Trennen und Filtern weltweit, so zeigt sich, dass diese häufig auch „auf Kante genäht“ sind. Sie sind nicht einheitlich und auch nicht auf den Einsatz in unterschiedlichen klimatischen Regionen abgestimmt. Trotzdem sind die Tragschichtaufbauten nicht grundsätzlich unterschiedlich. Einzelne Straßenbauverwaltungen bauen aufgrund langjähriger, eigener Erfahrungen auch weitaus robustere Geotextilien ein als nach den nationalen Regelwerken gefordert, weil sie erkannt haben, dass sie dadurch die Nutzungsdauer ihrer Verkehrswege entscheidend verlängern können und die geringen Zusatzkosten in einem guten Verhältnis zum zusätzlichen Nutzen durch intakte, funktionstüchtige Geotextilien stehen.

3 Grundlagen der Geokunststoffe

Unter Geokunststoffen werden all jene Produkte beschrieben, die in der Regel aus synthetisch oder natürlich hergestellten Polymeren bestehen. In der Praxis werden die meist flächigen Produkte bei geotechnischen und bautechnischen Anwendungen im Kontakt mit Bodenmaterial und/oder anderen Materialien eingesetzt [KOERNER-2012]. Dieses Kapitel liefert einerseits eine generelle Einführung in die Grundthematik der Geokunststoffe und ihre Funktionen, andererseits gibt es ausführlich den Stand der Technik und speziell die zu dem Projektthema untersuchten Teilbereiche wieder.

3.1 Geokunststoff-Produkte

Die modernen Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung zahlreicher Produkte mit unterschiedlichen Strukturen. Oft wird fälschlicherweise der Be-

griff Geotextil als Synonym für Geokunststoffe verwendet. Zur richtigen Anwendung der Begrifflichkeiten werden im Folgenden die Produkte systematisch nach [DIN EN ISO 10318-1] eingeteilt und beschrieben.

Bei Geokunststoffen wird generell zwischen zwei Kategorien, den durchlässigen und praktisch undurchlässigen Produkten differenziert (Bild 3-1). Innerhalb der Hauptgruppe können je nach anwendungsspezifischer Anforderung weitere Geokunststoffe unterteilt werden, sodass für jeden Anwendungsfall eine passende Produktart/-Kombination zur Verfügung steht bzw. generiert werden kann.

Im Hinblick auf die für das Forschungsvorhaben relevanten Produkte (Geovliesstoffe und Geogewebe), die im Wesentlichen als Trenn- und Filterlagen zum Einsatz kommen, werden diese im Folgenden detaillierter beschrieben. Der Vollständigkeit halber werden die verbleibenden Geokunststoff-Produkte in Form kurzer Zusammenfassungen erläutert.

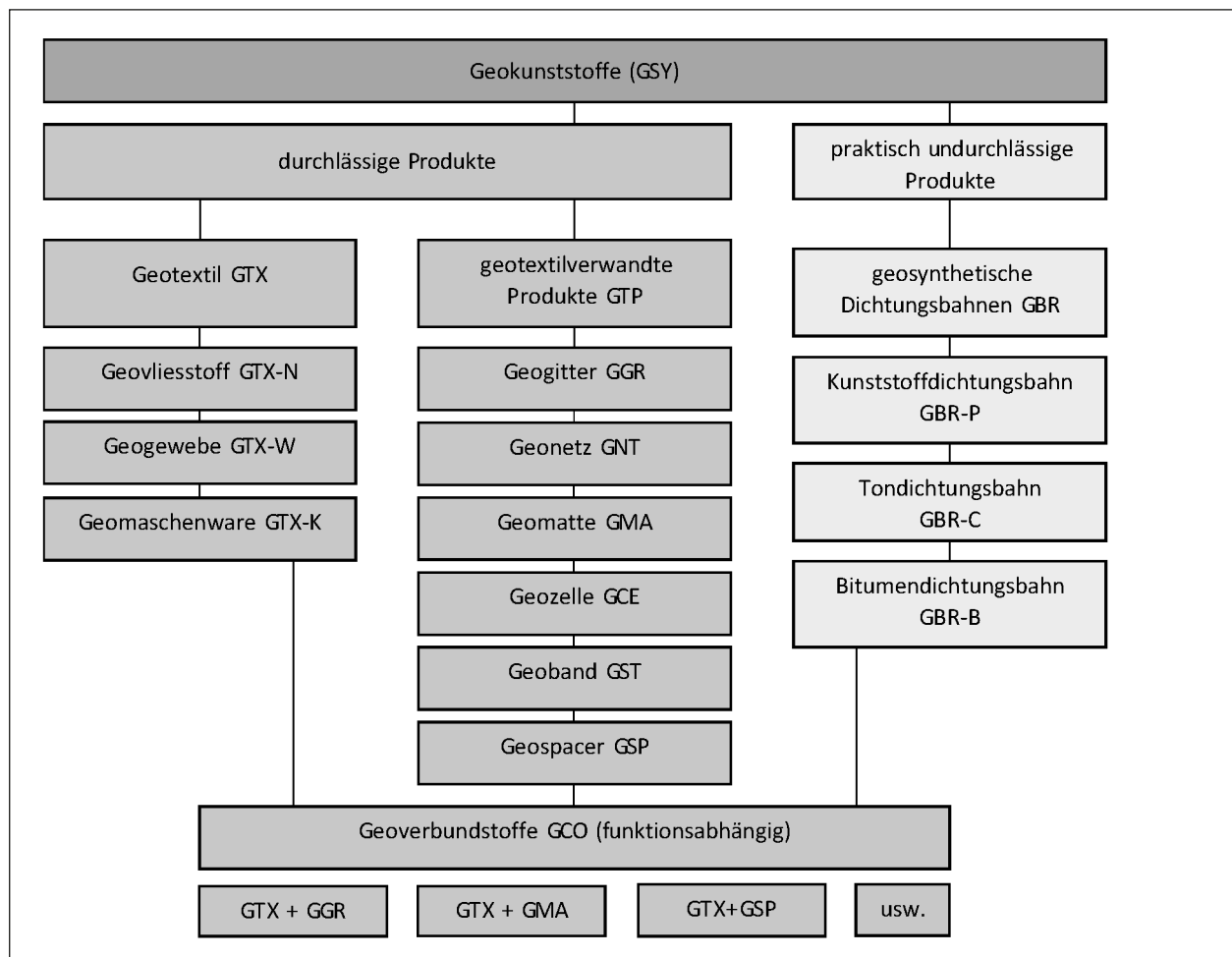


Bild 3-1: Einteilung der Geokunststoffe nach [DIN EN ISO 10318-1]

3.2 Geotextilien

Geotextilien entstehen durch mechanische Verarbeitung vornehmlich synthetischer Fasern. 90 % der eingesetzten und verarbeiteten Geotextilfasern werden aus Polypropylen (PP) hergestellt, weitere polymere Rohstoffe sind in absteigender Reihenfolge entsprechend ihrer Herstellungshäufigkeit: Polyester/Polyethylenterephthalat (PET), Polyethylen (PE) und Polyamid (PA) [LIFA-2019].

Zur Herstellung eines Geotextils werden unterschiedliche Faserarten verwendet. Im Folgenden sind die wichtigsten Fasern und Garne zu nennen:

- Spinnfasern/Stapelfasern sind gestreckte Fasern. Die Darreichungsformen sind als 3 cm bis 15 cm gekürzte, lose Fasern in Säcken oder als gesponnenes Garn (Spinnfasergarn) verfügbar.
- Multifilamentgarne entsprechen einem linienförmigen, aus mehreren gestreckten Fasern zusammengesetzten Gebilde.
- Folienbändchen sind aus Folien gewonnene, gestreckte Bändchen.
- Spleißgarne sind mit Druckluftstrahl oder Messern aufgespleißte Folienbändchen.
- Monofilamente (Filamente \triangleq Endlofasern)

Hieraus können folgende als Textil definierte Produkte hergestellt werden:

- Geovliesstoffe,
- Geogewebe und
- Geomaschenware/Geogewirke.

Es soll zunächst aufgeführt werden, welche Produktionsarten möglich sind und welche Faserarten schließlich zur Herstellung des jeweiligen Geotextils eingesetzt werden. Zur besseren Übersichtlichkeit dient die in Tabelle 3-1 dargestellte Matrix.

3.2.1 Geovliesstoffe GTX-N

Geovliesstoffe bestehen aus einer oder mehreren Schichten von lose aufeinander, wirt gelegten Fasern oder Filamenten, die mechanisch oder thermisch verfestigt sind.

Mechanisch verfestigte Vliesstoffe werden durch Vernadelung und oder Wasserstrahlverfestigung hergestellt. Im Vernadelungsprozess kommen spezielle Nadeln mit nach unten gerichteten Haken zum Einsatz. Durch ein wechselndes Einstechen und Herausziehen der Nadeln in die losen abgelegten Fasern werden diese umorientiert und ineinander verhakt (Bild 3-2). Die Prozessparameter wie Geometrie und Anordnung der Nadeln, Nadeldichte pro Nadelbrett, Einstechtiefe und Einstechfrequenz bestimmen erheblich die Produktqualität.

Bei der Wasserstrahlverfestigung werden die Fasern anstelle von Nadelstichen durch Hochdruckwasserstrahlen umorientiert und miteinander verschlungen. Dabei verbleibt das Prozesswasser im Kreislauf. Die Energie- und Investitionskosten sind für dieses Verfahren sehr hoch, da einerseits die Anschaffungskosten für Hochdruckpumpen, Wasserfilter etc. und andererseits die Nachbehandlung der Vliesstoffe durch Trocknung sehr aufwendig ist.

Mechanisch verfestigte Vliesstoffe besitzen einen hohen Porenanteil und eine hohe Dehnfähigkeit.

Neben der mechanischen Verbindung können die Fasern auch eine (kohäsive) thermische Verbindung eingehen. Der Vliesstoff wird durch zwei gegenläufige Heißkalanderswalzen gepresst. Dabei wird die Faseroberfläche angeschmolzen und die Materialien thermisch miteinander verbunden (Bild 3-2). Das Produkt ist ein vergleichsweise dünner Vliesstoff, welcher durch das Anschmelzen und Pressen eine verhältnismäßig glatte Oberfläche erhält. Thermisch gebundene Vliesstoffe zeigen bei Beanspruchung ein wesentlich steiferes Verhalten.

Bezeichnung der Produkte	Fasern und Garne					
	Monofilament	Multifilament	Stapelfaser	Spinnfasergarn	Folienbändchen	Spleißgarne
Geovliesstoff			x	x		
Geogewebe	x	x			x	x
Geomaschenware		x				

Tab. 3-1: Matrix der Faserarten und den daraus entstehenden Produkten

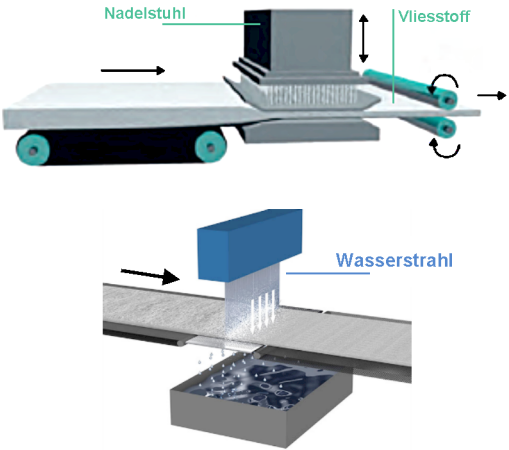
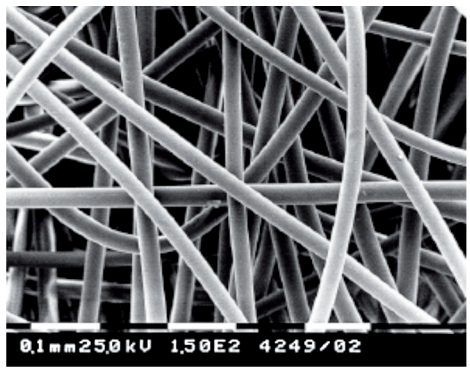
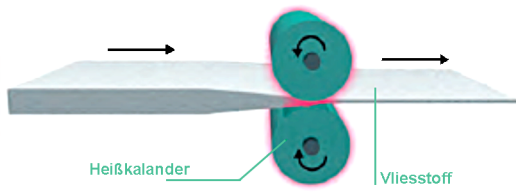
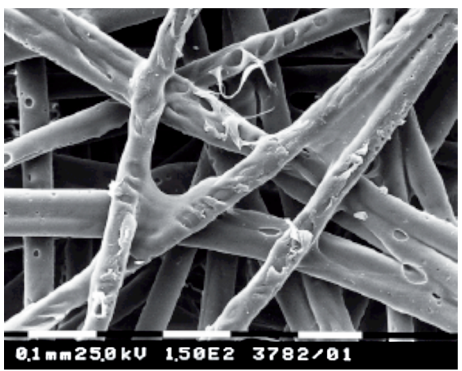
	Schematische Herstellung	Mikroskopische Darstellung der Verkitung
Mechanische Verfestigung	 <p>Vermadelung</p> <p>Wasserstrahl</p>	
Thermische Verfestigung	 <p>Heißkalandrier</p> <p>Vliesstoff</p>	

Bild 3-2: Übersicht der Verfestigungsverfahren einschließlich mikroskopischer Darstellung [NAUE-2019]

Inzwischen werden auch Kombinationen, wie mechanisch verfestigter Vliesstoff mit einer nachträglichen einseitigen Heißkalandrierung angeboten. Vor allem aus logistischen Gründen, um möglichst viel Produkt pro Rolle zu erhalten aber auch um hydraulische Eigenschaften der Träger- und Deckvliesstoffe von Dränmatten zu verbessern, hat sich die thermische Nachbehandlung etabliert.

Der Vollständigkeit halber sei zu erwähnen, dass es neben den genannten Verfestigungsprozessen auch die chemische Verfestigung mittels Bindemittel gibt, diese findet kaum Anwendung für Geokunststoffe.

3.2.2 Geogewebe GTX-W

Geogewebe zeichnen sich durch sich rechtwinklig kreuzende Fadensysteme aus. Darin unterscheidet man zwischen Kett- und Schussrichtung. Die Längsrichtung wird als Kettrichtung (Kette) und die Querrichtung als Schussrichtung (Schuss) bezeichnet [SAATHOFF-2009]. Zur Herstellung der Gewebeprodukte werden die in Tabelle 3-1 aufgezählten Faserarten (Mono- und Multifilamente, Bändchen und Spleißgarne) verwendet. Ein Gewebe muss nicht zwangsläufig aus einer einzigen Faserart bestehen. Wie bereits im Handbuch für den Geokunststoff-Anwender [LIFA-2019] beschrieben ist, können auch Kombinationen aus z. B. Geogewebe mit Monofilament-Kette und Multifilament-Schuss hergestellt werden (Bild 3-3). Um formschlüssig Kräfte übertragen zu können ist ein Verkreuzen/Verweben, was allgemein als Bindung bezeichnet wird, notwendig.

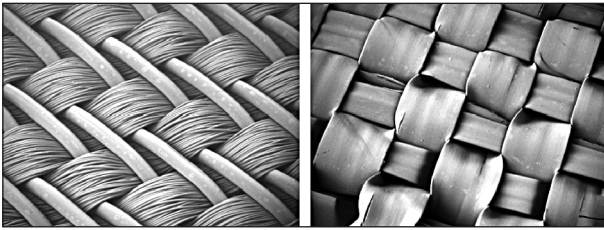


Bild 3-3: Gewebestrukturen: links Monofilament-Kette und Multifilament-Schuss, rechts Bändchengewebe [LIFA-2019]

Je nach Bindungsart können die mechanischen Eigenschaften des Gewebes beeinflusst werden. Im Merkblatt M Geok E [FGSV-2016] wird zwischen Leinwand-, Körper- und Panamabindung unterschieden.

3.2.3 Geomaschenware GTX-K

Als Geomaschenware werden in SAATHOFF et. al. [SAATHOFF-2009] Flächengebilde, die aus unterschiedlichen verschlingten oder vermaschten Fadensystemen bestehen, beschrieben. Die Produkte dieser schleifenförmigen Verbindungen werden als Fadenlagennähgewirke, Kettenwirkware und Raschelware bezeichnet.

3.3 Geotextilverwandte Produkte GTP

SAATHOFF und BRÄU [SAATHOFF-2009] beschreiben geotextilverwandte Produkte als flächige, durchlässige polymere Produkte, die nicht in die Kategorie der Geotextilien einzuordnen sind und auch nicht aus verschiedenen Geokunststofftypen zusammengesetzt sind. Nachfolgend wird ein kurzer Einblick über die am Markt verfügbaren Produkte gegeben.

3.3.1 Geogitter GGR

[DIN EN ISO 10318-1] definiert Geogitter als: „flächenhafte, polymere Struktur aus einem regelmäßigen offenen Netzwerk, dessen Zuelemente durch Extrudieren, Verbinden oder Verflechten miteinander verbunden sind und dessen Öffnungen größer als die Bestandteile sind“.

[KOERNER-2012] beschreibt Geogitter als besonders geeignet für den Einsatz als Bewehrungen in Böden. Die Kraftübertragung zwischen angrenzendem Schüttmaterial und dem Geogitter ist abhängig

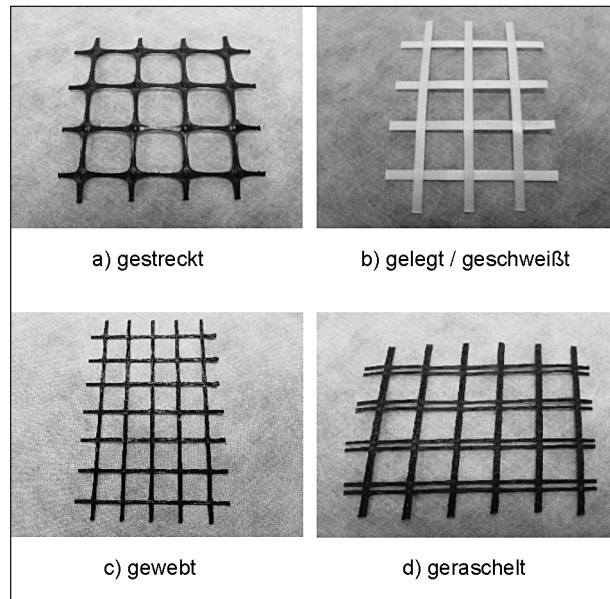


Bild 3-4: Verschiedene GGR-Arten

von der Verzahnung des Schüttmaterials in dem Geogitter und der Reibung auf dem Geogitter, der Maschenweite des Geogitters, der Korngröße- und Form der Bodenpartikel sowie möglichen Auflasten. Nach dem FGSV Merkblatt M Geok E [FGSV-2016] werden Geogitter als Gebilde mit Öffnungsweiten von >10 mm charakterisiert und nochmals in folgende Untergruppen unterteilt (Bild 3-4):

- gestreckte Geogitter
- gelegte Geogitter mit verschweißten Kreuzungspunkten
- gewebte Geogitter mit Polymerbeschichtung
- kettengewirkte (geraschelte) Geogitter mit Polymerbeschichtung

3.3.2 Geonetz GNT

Unter Geonetzen werden netzwerkartige Flächengebilde aus parallel angeordneten und übereinanderliegenden Elementen, die fest miteinander verbunden und dessen Öffnungen wesentlich größer als die Abmessungen der Verbindungselemente sind, verstanden [DIN EN ISO 10318-1].

3.3.3 Geomatte GMA

Geomatten sind dreidimensionale, durchlässige, flächige Gebilde, die meist aus ungeordnet abge-

legten polymeren Monofilamenten, auch als Wirrgelege bezeichnet, bestehen. Diese Produkte kommen bei Oberflächenproblemen im Hangbereich, z. B. verursacht durch Erosion, zum Einsatz [DIN EN ISO 10318-1].

3.3.4 Geozelle GCE

Geozellen bestehen ebenfalls aus dreidimensionalen, durchlässigen, flächigen Gebilden, die allerdings in Form von Waben- oder Zellstrukturen hergestellt werden. Das zusammenhängende Netz wird durch Schweißen, Kleben oder ähnliche Verfahren hergestellt [DIN EN ISO 10318-1]. Durch die Kombination aus Zellwand und umgebendem Boden wird ein räumliches Tragsystem generiert, welches so tragfähigkeitssteigernde und verformungsreduzierende Effekte begünstigt.

3.3.5 Geoband GST

Gemäß [DIN EN ISO 10318-1] werden Geobänder als polymere Materialien „...in Form eines Streifens mit einer Breite von höchstens 200 mm, die bei geotechnischen Anwendungen im Bauwesen in Kontakt mit Boden und/oder andere Materialien...“ kommen, bezeichnet. Das Band besteht überwiegend aus einem Polyester-Multifilament-Kern, der mit einer PE-Beschichtung versiegelt wird.

3.3.6 Geospacer GSP

Geospacer sind dreidimensionale polymere Strukturen, die einen Hohlraum zwischen zwei Medien schaffen [DIN EN ISO 10318-1].

3.4 Geosynthetische Dichtungsbahnen GBR

Dichtungssysteme werden in der Regel nach wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten ausgewählt. Die industriell hergestellten Produkte für ein abdichtendes System bestehen aus praktisch undurchlässigen ein- oder mehrlagigen synthetischen, polymeren oder bituminösen Bahnen, die in geotechnischen und bautechnischen Bereichen zum Einsatz kommen [SAATHOFF-2009]. Primäres Ziel der Dichtungsbahn ist ein Absperren bzw. Verringern des Durchströmens von Flüssigkeiten oder

Gasen durch einen definierten Bereich. Sie werden in drei Untergruppen differenziert.

3.4.1 Kunststoffdichtungsbahn GBR-P

Geosynthetische Kunststoffdichtungsbahnen sind homogene extrudierte oder kalandrierte Bahnen, deren Hauptfunktion das Abdichten ist. Sie können glatte oder individuelle Oberflächenstrukturen aufweisen. Hiervon hängt in erheblichem Maße die Kontakt-Scherfestigkeit zwischen angrenzendem Material und Kunststoffdichtungsbahn ab.

3.4.2 Tondichtungsbahn GBR-C

Geosynthetische Tondichtungsbahnen sind mechanisch erzeugte Verbundsysteme aus einer Schicht mit granuliertem oder pulverförmigem Bentonit, die sich zwischen zwei oder mehreren miteinander vernadelten oder vernähten Geotextillagen befindet. Es können unterschiedliche Bahneigenschaften in Abhängigkeit der Bentonitart und des Bentonitgewichts etc. erzielt werden [BOLEY-2012].

3.4.3 Bitumendichtungsbahn GBR-B

Geosynthetische Bitumendichtungsbahnen werden fabrikfertig als Bahnen gefertigt. Die mechanischen Eigenschaften werden vornehmlich durch den vollständig mit Bitumen getränkten Vliesstoff bestimmt. Die Dichtfunktion wird über das enthaltene Bitumen erreicht [DIN EN ISO 10318-1].

3.5 Geoverbundstoffe GCO

Geoverbundstoffe sind aus mehreren Produktkomponenten aufgebaute flächige Gebilde, die im Bauwesen eingesetzt werden, wobei mindestens ein Bestandteil ein Geokunststoff sein muss. Hierdurch können die Vorteile aus zwei oder mehreren Produkten kombiniert werden. So besteht die Möglichkeit, beispielsweise die filternde oder trennende Funktion eines Vliesstoffes mit der bewehrenden Funktion eines Geogitters zu kombinieren. Den Kombinationsmöglichkeiten ist durch die baukastenartige Zusammenstellung der Materialien kein Ende gesetzt. So können für unterschiedliche Baustellenanforderungen maßgeschneiderte Lösungen konstruiert werden. Tabelle 3-2 entsprechend [DIN EN ISO 10318-1] zeigt einige Beispiele für Geoverbundstoffe, eingeteilt nach Ihren Hauptfunktionen.

Trennen	Filtern	Dränen	Bewehren	Schützen	Dichten	Schützen gg. Erosion
GTX + Garne	GTX + GTX	GSP + GTX (+GBR-P)	GTX + GTX	GTX + GTX	GTX + Boden (Bentonit)	GTX + GCE
GTX + GTX	GTX + GMA	GNT + GTX (+GBR-P)	GTX + GGR	GTX + Boden	GBR-P + Boden (Bentonit)	GGR + GMA
				GMA + Boden		GTX + Samenkörner
				GTX + GMA		
				GTX + GGR		

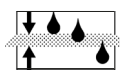
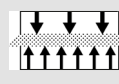
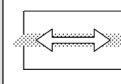
Tab. 3-2: Beispiele für Geoverbundstoff-Komponenten [DIN EN ISO 10318-1]

3.6 Funktionen der Geokunststoffe

Egal ob beim Einsatz im klassifizierten Straßenbau, bei temporären Baumaßnahmen, wie z. B. Baustraßen und Zufahrtswegen, Forstwegen oder im Gleisbau sowie bei Gründungssystemen, Böschungssicherungen etc. werden Geokunststoffe zum Filtern, Trennen, Schützen, Stabilisieren, Bewehren, Dränen, Erosionsschutz, Abdichten und vieles mehr verwendet. Wenn ein Geokunststoff auf der Baustelle zum Einsatz kommt, muss das Produkt oftmals verschiedene Aufgaben gleichzeitig übernehmen.

Die wesentlichen im Merkblatt M Geok E [FGSV-2016] beschriebenen Funktionen für die Anwendung von Geovliesstoffen sind das Trennen, Filtern und Schützen. Im Vordergrund der hier durchgeführten Untersuchungen steht zunächst die Trennfunktion. Nach wie vor ist das Trennen von unterschiedlichen Schichtsystemen (Untergrund vs. Tragschicht oder Tragschicht vs. Tragschicht) mittels Geotextilien die häufigste Anwendung im Erdbau des Straßenbaus. Dabei wird das Durchmischen zweier Bodenschichten mit unterschiedlichen bodenphysikalischen Eigenschaften, wie Porenanteil, Lagerungsdichte, Korngrößenverteilung etc. verhindert.

Die Aufgabe geotextiler Filter besteht darin, Bodenbestandteile oder Partikel zurückzuhalten und trotzdem einen definierten Wasserdurchfluss normal zur Ebene zu ermöglichen. Ein Geotextil kann zwar primär als Filterelement verwendet werden, ist jedoch bei Anwendung immer in Kombination mit einer Trennfunktion verbunden. Die Grundanforderungen an einen Filter sind also die mechanische Filterstabilität (Bodenrückhaltevermögen) und die hydraulische Filterwirksamkeit. Das bedeutet, dass der Geovliesstoff bei gerichteter Porenwasserströ-

	 Filtern	 Trennen	 Bewehren
Geovliesstoffe (GTX-N)	X	X	
Geogewebe (GTX-W)	X	X	X
Geogitter (GGR)			X
Geobänder (GST)			X
Geoverbundstoffe (GCO)	X	X	X
	Bemessung	Klassifizierung	Bemessung

Tab. 3-3: Matrix für die Anwendung der Klassifizierung der Robustheit von Geotextilien im Erdbau des Straßenbaus

mung in der Lage sein muss, die Feinanteile zurückzuhalten und dennoch einen freien drucklosen Wasserfluss durch die Ebene zu erlauben [LIFA-2019].

Andere Funktionen wie beispielsweise das Bewehren mit Geotextilien ist nicht Gegenstand dieser Studie. Grundsätzlich existieren allgemein anerkannte Regeln für die Bemessung von Geokunststoffen [EBGEO-2010] als Bewehrungselemente und auch für das Filtern mit Geokunststoffen [DVA-M-511]. Lediglich beim Trennen existiert kein Bemessungsmodell und man ist daher auf Klassifizierungen angewiesen, welche auf empirischen Erfahrungen basieren (Tabelle 3-3).

Weitere Produktvarianten wie Geoverbundstoffe (Tabelle 3-2) enthalten i. d. R. auch geotextile Komponenten, welche selbstverständlich neben weiteren Funktionen auch die Trennfunktion abdecken.

4 Auswahl der Materialien

4.1 Geokunststoffe

Für die Untersuchungen dieses Vorhabens wurden Geovliesstoffe verwendet, die im praktischen Einsatz bei der Trennung von weichen, feinkörnigen, kaum bis nicht befahrbaren Untergründen gegenüber grobkörnigen Tragschichten bei üblichen Baustraßen, Dämmen oder Straßen mit ungebundenen Deckschichten Anwendung finden. Untersuchungsgegenstand waren mechanisch verfestigte Geovliesstoffe als auch mechanisch verfestigte Geovliesstoffe mit einseitig thermischer Nachbehandlung.

Es ist anzumerken, dass die zu untersuchenden Produkte mit dem Betreuungsausschuss dieses Forschungsvorhabens besprochen und auf eine limitierte Auswahl, entsprechend der baustellenspezifischen Bedürfnisse in Deutschland ausgerichtet wurden.

Für jedes Produkt wurden die Kennwerte im Anlieferungszustand (ALZ) für Masse pro Flächeneinheit, Dicke, Zugfestigkeit und Stempeldurchdrückkraft nach den entsprechenden Normen ermittelt (Anhang A). Die Bestimmung der Dicke wurde nach [DIN EN ISO 9863-1] und die flächenbezogene Masse nach [DIN EN ISO 9864] durchgeführt. Die Kenngrößen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften (Stempeldurchdrückkraft und Zugfestigkeit inklusive der Bruchdehnungen) sind im Stempeldurchdrückversuch gemäß [DIN EN ISO 12236] und im Zugversuch am breiten Streifen nach [DIN EN ISO 10319] ermittelt worden.

Zusätzlich zu diesen standardmäßig ermittelten Werten wurden auch Arbeitsvermögen im Zug- als auch im Stempeldurchdrückversuch bestimmt. Dieses Kriterium soll zur Beurteilung des Verhaltens unter mechanischer Beanspruchung und als möglicher Indikator der Robustheit gegenüber den Beanspruchungen beim Einbau dienen.

Das Arbeitsvermögen W kann sehr anschaulich geometrisch interpretiert werden. In einem Kraft-Dehnungs-Diagramm eines Zugversuchs entspricht die verrichtete Arbeit der Fläche unter der Kraft-Dehnungs-Linie.

$$W = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_{\max}} F \cdot d\varepsilon$$

mit:

W Arbeitsvermögen allgemein in J/m

F Zugkraft allgemein in N

ε Dehnung allgemein

ε_{\max} maximale Dehnung im Zugversuch

$$W_{ZV,\max} = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_{ZV,\max}} T \cdot d\varepsilon$$

mit:

$W_{ZV,\max}$ Arbeitsvermögen im Zugversuch bei maximaler linearer Dehnung in kJ/m²

T Zugkraft pro Meter Breite in kN/m

$\varepsilon_{ZV,\max}$ maximale lineare Dehnung im Zugversuch

Das Integral der Kraft-Dehnungs-Linie, beschrieben als „Arbeitsvermögen, linear“ $W_{ZV,\max}$, besitzt die Einheit kJ/m² und wird bis zum Erreichen der Zugfestigkeit ermittelt. Die Berechnung erfolgt nach [DIN EN ISO 10318].

Zudem wird das entsprechende Arbeitsvermögen im Stempeldurchdrückversuch $W_{CBR,\max}$ ermittelt. Im Gegensatz zum Zugversuch ist bei der Berechnung hierbei jedoch keine lineare Dehnung, sondern die flächige Dehnung zugrunde zu legen. Im Stempeldurchdrückversuch wird über eine Näherung an die Mantelfläche eines Kegelstumpfs eine mehraxiale Verformung erzeugt (Bild 4-1). Als freie Einspannfläche A_{ges} wird hier in dieser Studie auch die Messprobenfläche unter dem Stempel A_1 mit

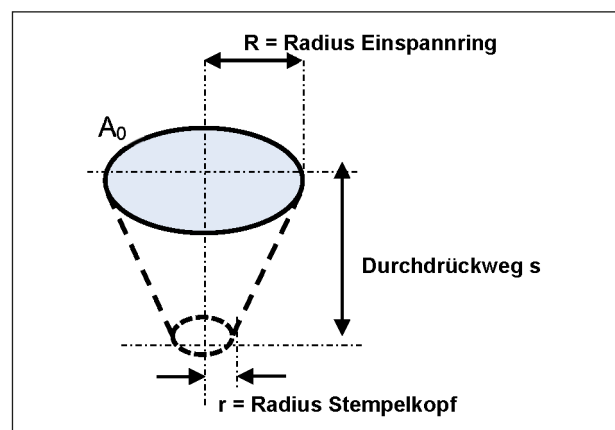


Bild 4-1: Darstellung der gedehnten Messprobenfläche im Stempeldurchdrückversuch

hinzugerechnet obwohl diese einseitig einer Reibung an der Stahloberfläche des Stempels ausgesetzt ist. Man könnte diese Fläche A_1 auch der Einspannung zuordnen. Dies ergäbe dann eine relative Erhöhung der flächigen Dehnungen um 12,5 %.

$$A_{\text{ges}} = \pi \cdot r^2 + \left[(R + r) \cdot \pi \cdot \sqrt{(R - r)^2 + s^2} \right]$$

mit:

A_{ges} Gesamtfläche aus der Fläche unter dem Stempel und der Mantelfläche in m^2

R Radius des Einspannrings beim Stempeldurchdrückversuch in m, $R = 75 \text{ mm}$

r Radius des Stempels beim Stempeldurchdrückversuch in m, $r = 25 \text{ mm}$

s Durchdrückweg des Stempels in m

$$A_0 = \pi \cdot R^2$$

mit:

A_0 freie Einspannfläche in m^2

$$A_1 = \pi \cdot r^2$$

mit:

A_1 Messprobenfläche unter dem Stempel in m^2

$$\varepsilon_{\text{CBR,max}} = \left(\frac{A_{\text{ges}} - A_0}{A_0} \right) \cdot 100\%$$

mit:

$\varepsilon_{\text{CBR,max}}$ maximale flächige Dehnung im Stempeldurchdrückversuch

Das „Arbeitsvermögen, flächig“ $W_{\text{CBR,max}}$, basierend auf der mehraxialen Verformung des Geotextils im Stempeldurchdrückversuch wird ebenfalls aus dem Integral der Fläche unter der Kurve berechnet – allerdings ist hierbei die Kraft-Dehnungs-Linie mit der flächigen Dehnung zu verstehen. Die Einheit des „Arbeitsvermögen, flächig“ $W_{\text{CBR,max}}$, wird als kJ/m angegeben.

$$W_{\text{CBR,max}} = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_{\text{CBR,max}}} F_P \cdot d\varepsilon$$

mit:

$W_{\text{CBR,max}}$ Arbeitsvermögen im Stempeldurchdrückversuch bei maximaler flächiger Dehnung in kJ/m

F_P Stempeldurchdrückkraft in kN

$\varepsilon_{\text{CBR,max}}$ maximale flächige Dehnung im Stempeldurchdrückversuch

Die Ausgangskennwerte für die Produkte im Anlieferungszustand (ALZ) sind in Tabelle 4-1 katalogisiert. Damit die von den Herstellern zur Verfügung gestellten Produkte über ein gewisses Maß an Datenschutz, Anonymität und Sicherheit verfügen, wurden die Produkte mit einem Code gekennzeichnet, der sich wie folgt zusammensetzt:

- Herstellungsart/Produktgruppe
 - ME – mechanisch verfestigt, PP-Stapelfaser
 - MET – mechanisch verfestigt und thermisch nachbehandelt, PP-Stapelfaser
- nominelle flächenbezogene Masse [g/m^2]

Beispiel: ME-120 entspricht einem mechanisch verfestigten Geovliesstoff aus PP-Stapelfasern mit einer flächenbezogenen Masse von ca. 120 g/m^2 .

Während der Feldversuche waren weitere Kodierungen notwendig, um die Produkte den Versuchsfeldern und Entnahmebereichen der Fahrspur z. B. Links (-L), Mitte (-M), Rechts (-R) zuzuordnen.

Beispiel für die Probenentnahmen der Feldversuche: ME-380-GRK6-L steht für einen mechanisch verfestigten Geovliesstoff mit einem Flächengewicht von 380 g/m^2 aus dem Versuchsfeld VF GRK6 und der linken Fahrspur (Bild 4-2).

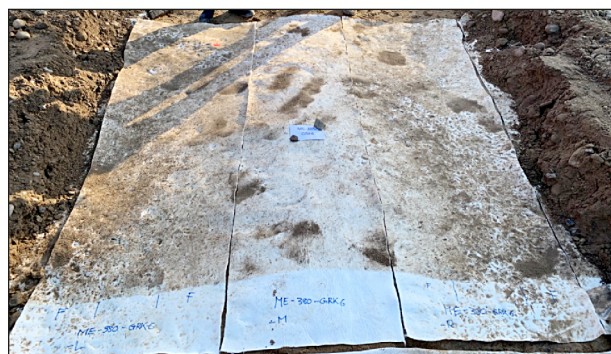


Bild 4-2: Beispiel für Probenbezeichnungen im Versuchsfeld VF GRK6

Produkt- bezeichnung	Flächen- bezogene Masse $m_{A,MD}$ [g/m ²]	Dicke @ 2 kPa d_{MD} [mm]	Zugfestigkeit, MD $T_{max,MD}$ [kN/m]	Arbeits- vermögen, MD $W_{ZV,max,MD}$ [kJ/m ²]	Stempel- Durchdrück- kraft F_P [kN]	Arbeits- vermögen $W_{CBR,max}$ [kJ/m]
ME-120	120	0,73	8,6	280,1	1,34	32,4
ME-200	200	1,17	16,0	439,5	2,36	50,1
ME-275	244	1,36	19,3	654,7	2,91	63,4
ME-330	288	1,40	23,4	772,7	3,82	96,7
MET-120	137	1,27	11,7	296,5	2,19	39,7
MET-200	205	1,86	22,7	534,5	3,22	56,7
MET-315	331	2,42	34,9	940,8	5,24	102,4
ME-160	163	2,49	9,6	250,6	1,98	45,4
ME-260	259	3,37	18,2	508,8	3,72	81,7
ME-300	291	2,88	25,0	756,9	4,08	93,1
ME-380	376	2,00	32,4	837,0	5,79	123,8
ME-470	482	4,25	36,4	1.142,4	7,93	185,8

Tab. 4-1: Mittelwerte der Kenngrößen der Proben aus PP im Anlieferzustand (Anhang A)

4.2 Bodenmaterialien

Für die Auswahl der einzusetzenden Bodenmaterialien wurde die mit Tabelle 10 des M Geok E [FGSV-2016] zur Verfügung gestellte Matrix herangezogen (Tabelle 4-2). Die Einbaubeanspruchung ist von mehreren Einflüssen abhängig. Diese sind das aufgebraute Schüttmaterial selbst, der Einbau des Schüttmaterials, das Verdichten des Schüttmaterials sowie die anschließende Einwirkung durch den Bauverkehr.

In der Matrix wurden die Beanspruchungen aus dem Baubetrieb so gewählt, dass durch den Einsatz von drei verschiedenen Schüttmaterialien (AS 2 bis AS 4) die GRK 3 bis GRK 5 durch den Anwendungsfall Baubetrieb AB 3 abgedeckt werden konnten. Bei AS 2 (sandiger Kies), AS 3 (Sand-Kies-Gemisch) und AS 4 (sandig, steiniger Kies) erfolgte der Einbau und das Verdichten des Schüttmaterials maschinell. Die zu erwartenden Spurrinntiefen in der Ebene der Geotextillage liegen bei AB 3 zwischen 5 und 15 cm. Für die fiktive GRK 6 (neu) wurde wiederum das Schüttmaterial AS 4 gewählt, um Spurrinntiefen in der Ebene der Geotextillage zwischen 15 und 30 cm gemäß AB 4 zu erzeugen. Beim sandigen, steinigen Kies handelt es sich nicht um Brechkorn, sondern um schlecht gerundeten Schotter.

Anwendungsfall Schüttmaterial	Anwendungsfall Baubetrieb				
	AB 1	AB 2	AB 3	AB 4	AB 5
AS 1	GRK 3				
AS 2	GRK 3	GRK 3	GRK 3	GRK 4	GRK 5
AS 3	GRK 3	GRK 3	GRK 4	GRK 5	
AS 4	GRK 4	GRK 4	GRK 5	GRK 6 (neu)	
AS 5	GRK 5	GRK 5			

Tab. 4-2: Geotextilrobustheitsklassen (GRK) aus Beanspruchung durch Schüttmaterial und Baubetrieb nach Tabelle 10 [FGSV-2016]

Die GRK 6 (neu) wurde deshalb hier eingeführt, um auch für gröbere Schüttmaterialien bzw. für anspruchsvolleren Baubetrieb eine weitere Klassifizierung zu definieren.

Die grau hinterlegten Tabellenfelder in Tabelle 4-3 wurden auf den Versuchsfeldern im Rahmen der Feldversuche simuliert. Das mit den Beanspruchungsfällen korrespondierende Schüttmaterial für die einzelnen Geotextilrobustheitsklassen wurden nach Tabelle 8 [FGSV-2016] ausgewählt (Tabelle 4-4).

Anwendungsfall Baubetrieb	Einbau des Schüttmaterials	Verdichten des Schüttmaterials	Beanspruchung durch Bauverkehr
AB 1	von Hand	kein Einfluss	kein Bauverkehr
AB 2	maschinell	maschinell	$h_{s,erwartet}^*) < 5 \text{ cm}$
AB 3	maschinell	maschinell	$h_{s,erwartet}^*) = 5 \text{ cm bis } 15 \text{ cm}$
AB 4	maschinell	maschinell	$h_{s,erwartet}^*) = 15 \text{ cm bis } 30 \text{ cm}$
AB 5	maschinell	maschinell	$h_{s,erwartet}^*) > 30 \text{ cm}$

*) $h_{s,erwartet}$ erwartete Spurrinnentiefe in der Ebene der Geotextillage

Tab. 4-3: Beanspruchung von geotextilen Trennlagen durch Einbau und Baubetrieb nach Tabelle 9 [FGSV-2016]

Anwendungsfall Schüttmaterial	rundkörniges Schüttmaterial	scharfkantiges Schüttmaterial
AS 1	Schüttmaterial hat keinen Einfluss.	
AS 2	grob- und gemischtkörnig (SW, SE, SI, GW, GE, GI, SU, SU*, GU, GU*) nach DIN 18196	
AS 3	grob- und gemischtkörnig, mit bis zu 40 % Steinen und Blöcken	grob- und gemischtkörnig (SW, SE, SI, GW, GE, GI, SU, SU*, GU, GU*) nach DIN 18196
AS 4	grob- und gemischtkörnig, mit über 40 % Steinen und Blöcken	grob- und gemischtkörnige, mit bis zu 40 % Steinen und Blöcken
AS 5		grob- und gemischtkörnige Böden mit über 40 % Steinen und Blöcken

Tab. 4-4: Beanspruchung von Geotextilien durch die als Schüttmaterial eingesetzten Böden nach Tabelle 8 [FGSV-2016]

4.2.1 Bodenmaterial für den Unterbau

Für die großmaßstäblichen Feldversuche stand die Renaturierungsfläche eines Bauunternehmens im südwestlichen Mecklenburg-Vorpommern zur Verfügung. Die Fläche wurde in den letzten Jahren mit organogenen Böden abgedeckt. Nach dem Abschieben dieser Bodenlagen wurde der anstehende schluffige Sand vorgefunden. Dieser war im oberen Bereich teilweise von anthropogenen Auffüllungen durchsetzt. Um eine gleichmäßige Beanspruchung der Geotextilien über die gesamte Länge der jeweiligen Versuchsfelder sicher zu stellen, wurden für jedes Versuchsfeld Mulden mit einer Tiefe von 0,5 m und einer Breite von 6 m in entsprechender Länge von 31 m bzw. 24 m ausgehoben und mit einem Quarzsand 0/2 mm bis zur Oberkante des anstehenden Geländes aufgefüllt. Über die Schüttdichte hinaus wurde dieser Sand 0/2 nicht verdichtet und vor dem Einbau der Geotextilien und dem Einbau des Tragschichtmaterials auch nicht befahren. Aus logistischen Gründen wurde das Versuchsfeld für die Beanspruchungskombination der GRK 3 am 30.10.2020 mit Sand 0/2 verfüllt und war deshalb bis zum Einbau der Geotextilien am 03.11.2020

einem Niederschlag durch Regen von 17 mm ausgesetzt. Die Gruben der Versuchsfelder VF GRK4, VF GRK5 und VF GRK6 wurden am 02.11.2020 verfüllt und mit dem Räumlöffel eines Mobilbaggers eingeebnet. Diese drei Felder waren bis zum Einbau und Überdecken der Geotextilien am 03.11.2020 einem Niederschlag von 3 mm ausgesetzt.

Die Lagerungsdichte des Sandes 0/2 wurde mit einem mittig in jedem Versuchsfeld angeordneten Densitometerversuch nach [DIN 18125-2] und drei gleichmäßig in den jeweiligen Längsachsen eines jeden Versuchsfeldes verteilten Zylinderentnahmen bestimmt.

4.2.2 Tragschichtmaterialien

Als Tragschichtmaterial wurden Schüttmaterialien verwendet, welche den einzelnen Anwendungsfällen zugeordnet wurden (Tabelle 4-5).

Die eingesetzten Baustoffe entstammen einer örtlichen Kiesgrube im glazial geprägten südwestlichen Mecklenburg. Die Körnungsbänder zwischen 0 mm und 45 mm wurden nach den Technischen Liefer-

Anwendungsfall Schüttmaterial	Anforderungen an das Schüttmaterial	gewählte Lieferkörnung (Bodengruppen nach DIN 18196)	Einsatz in Versuchsfeld (VF)
AS 2	rundkörnige grob- und gemischt- körnige Böden nach DIN 18196	0/45 mm Klassifizierung: sandiger Kies (saGr)	VF GRK3
AS 3	scharfkantige grob- und gemischt- körnige Böden nach DIN 18196	0/45 mm Klassifizierung: Sand-Kies- Gemisch (Sa/Gr)	VF GRK4
AS 4	scharfkantige grob- und gemischt- körnige Böden mit bis zu 40 % Steinen und Blöcken	0/45 mm plus 30 % Steine Klassifizierung: sandig, steiniger Kies (saco Gr)	VF GRK5 VF GRK6

Tab. 4-5: Eingesetzte Schüttmaterialien

bedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 04) [FGSV-2004] bestellt und Proben zur Überprüfung der Korngrößenverteilung entnommen (Anhang C).

Die im Durchmesser darüber hinaus notwendigen Steine wurden als Siebrückstand im gleichen Kieswerk zugekauft und vor Ort im Volumenverhältnis 3:1 dem Haufwerk zugegeben. Zur Überprüfung der Massenanteile der Korngrößenverteilung wurde Material entnommen.

5 Versuchsdurchführung Feldversuche

5.1 Örtlichkeit und Vorbereitung der Proben

Die zu untersuchenden Geokunststoffe wurden direkt von den Herstellern bezogen und zu GEOscope GmbH nach Weimar geliefert. Es wurde Material mit der vorgegebenen Länge in voller Rollenbreite zur Verfügung gestellt. Zunächst wurde jeweils ein zirka ein Meter langer Abschnitt eines jeden Materials über die gesamte Rollenbreite an die SKZ – Testing GmbH zur Ermittlung der Produkteigenschaften im Anlieferungszustand (ALZ) gesendet.

Danach wurde das verbleibende Material im Labor der GEOscope GmbH nach den Abmessungen der in Bild 5-1 dargestellten Versuchsfelder (VF) konfektioniert und auf Kerne gerollt. Die Rollen wurden trocken und vor Sonnenlicht geschützt bis zum Transport auf die Baustelle gelagert. Jede Geovliesstoff-Probe hatte eine Länge von ca. 3 m in Produktionsrichtung (MD) der Rolle und eine Breite von ca. 4 m bzw. 5 m quer zur Produktionsrichtung (CMD).

Das Ausheben der vier Versuchsfelder erfolgte am 30. Oktober 2020. Drei Tage später am 2. November 2020 wurden die Gruben mit Sand verfüllt (Bild 5-2). Am selben Tag wurden auf dem VF GRK6 die Geotextilien verlegt und mit Boden überdeckt während Verlegung und Überdeckung der Geotextilien auf den restlichen Versuchsfeldern am darauffolgenden Tag vorgenommen wurde. Am 3. November wurden sämtliche Versuchsfelder verdichtet und anschließend durch Überfahren mit einem beladenen Lkw beansprucht. Der Rückbau des Bodens über den Geotextilien erfolgte mit einem Löffelbagger und einem Saugbagger am 3./4. November. Die Entnahmen der Geotextilproben fanden am 4. und 5. November statt. Alle Schritte der Baustellenversuche sind in chronologischer Weise im Anhang B als Fotodokumentation zusammengestellt.

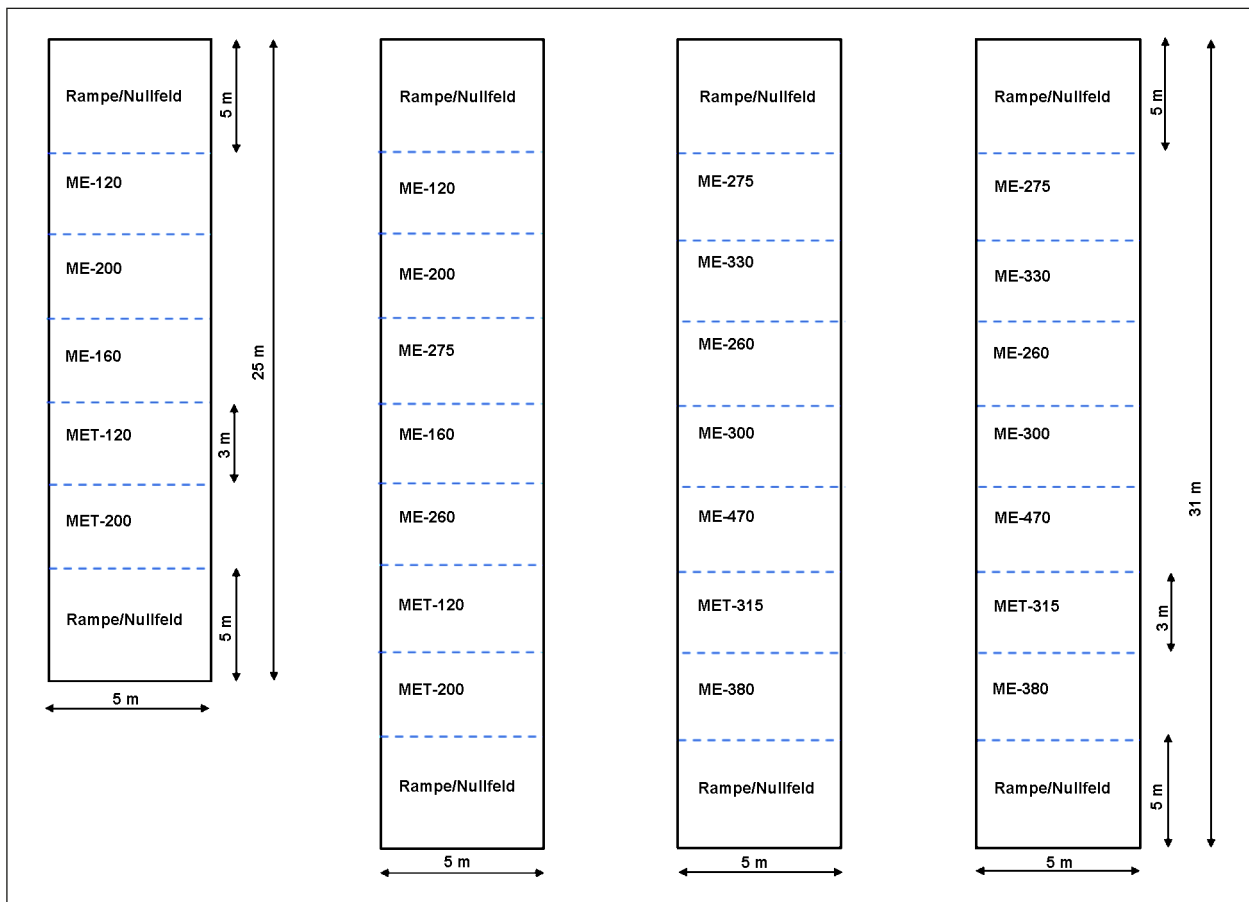


Bild 5-1: Übersichtsplan der VF GRK3, VF GRK4, VF GRK5 und VF GRK6 (von links)

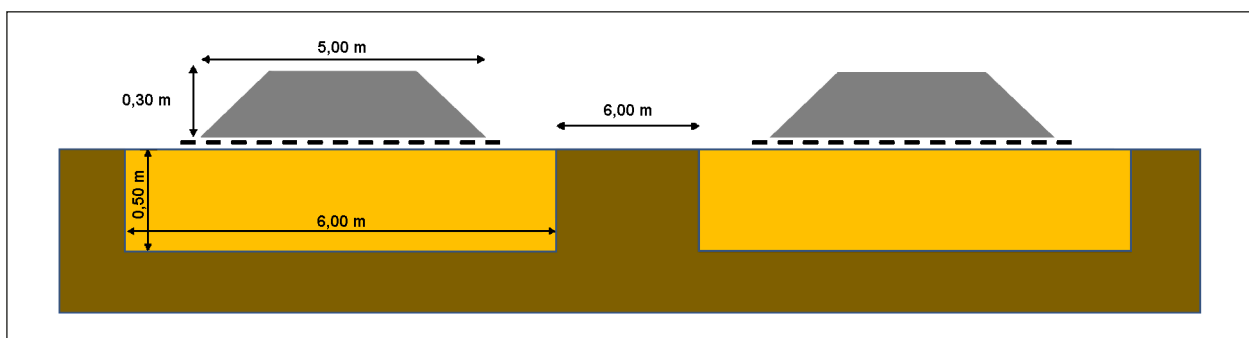


Bild 5-2: Schematische Skizze eines Schnitts durch zwei Versuchsfelder (ohne Maßstab)

5.2 Einbau Geotextilien

Die Geotextilien wurden auf dem vorbereiteten Planum der Versuchsfelder manuell verlegt. Dabei wurde auf dem Versuchsfeld VF GRK6 am oberen Rand auf Bild 5-3 mit dem Verlegen begonnen. Die Geovliesstoffe wurden mit 0,25 m bis 0,30 m dachschindelartig überlappend verlegt und mit Steinen

gegen Windsog gesichert. Diese Steine wurden unmittelbar vor dem Einbau des Schüttmaterials der Tragschichten von den Versuchsfeldern VF GRK3 und VF GRK4 wieder entfernt.



Bild 5-3: Anordnung der Versuchsfelder für die Baustellenversuche als Momentaufnahme

5.3 Aufbau und Verdichtung der Tragschichten

Das Schüttmaterial der Tragschichten nach Tabelle 4-5 wurde auf den einzelnen Versuchsfeldern mit einem [RADLADER-CAT_938M] mit Ladevolumen von 2,7 m³ auf die Versuchsfelder geschüttet und mit einem Mobilbagger [BAGGER-CAT_M318D] mit einem Betriebsgewicht von ca. 18 t mit Räumlöffel verteilt und eingeebnet.

Die Versuchsfelder wurden über die dazwischenliegenden Arbeitsbereiche mit Schüttmaterial beschickt. Die Versuchsfelder wurden weder beim Einbau des Tragschichtmaterials noch bei dessen Rückbau von Radlader oder Mobilbagger befahren.

Zur Verdichtung stand ein Walzenzug [WALZE-BW177D5] mit einem Betriebsgewicht von ca. 7,8 t zu Verfügung. Wegen des wenig tragfähigen Untergrundes wurde zunächst ein statischer Übergang ausgeführt. Danach wurde mit hoher Amplitude solange verdichtet, bis sich ein Einsinken der Tragschicht in den Unterbau abzeichnete. Daraus ergaben sich möglicherweise Ungenauigkeiten bei der tachymetrischen Aufnahme der Tragschichtmächtigkeiten im verdichteten Zustand. Ziel war es, eine 0,30 m mächtige Tragschicht aufzubauen. Das beginnende Einsinken der Tragschicht in den Unterbau war das Grenzkriterium für die Verdichtung. Es

wurde auf ein darüberhinausgehendes, quantifizierbares Verdichtungskriterium verzichtet.

Nach dem Aufbau der Tragschichten wurde auf jedem Versuchsfeld ein statischer Lastplattendruckversuch nach [DIN 18134] im Bereich der Nullfelder, an der unmittelbaren Grenze zu den Messfeldern, durchgeführt. Die Gleichmäßigkeit des Aufbaus wurde mit drei Plattendruckversuchen mit dem leichten Fallgewicht nach TP BF-StB B 8.3 [FGSV-2012] überprüft.

Die Tragschicht wurde mit der Glattmantelwalze so verdichtet, dass der Versuchsaufbau anschließend mit einem dreiachsigen Lastkraftwagen (Lkw) befahren werden konnte.

Da der Unterbau eine sehr geringe Tragfähigkeit aufwies und sich beim Überfahren mit dem Walzenzug [WALZE-BW177D5] an der Oberfläche das Profil der Räder deutlich abzeichnete, wurde nach einem statischen Übergang auf Vibration mit einer Amplitude von 1,9 mm umgeschaltet, um laterale Verdrängung des Tragschichtmaterials und die Anzahl der Überfahrten für die Verdichtung zu reduzieren. Die Verformungen in der Geotextilebene sollten allein durch kontrollierte Lkw-Überfahrten erreicht werden.

5.4 Beanspruchung der Tragschicht durch Lkw-Überfahrten

Der Lkw mit offener Mulde [Lkw-MB_AROCS_3345] wurde beladen und gewogen. Mit den Überfahrten auf den Versuchsfeldern VF GRK6 und VF GRK5 wurde begonnen nachdem der Lkw so beladen war, dass er ein Gesamtgewicht von 40,2 t hatte. Nach dem technischen Datenblatt betragen die zulässigen Gesamtgewichte des Lkw auf der ersten Achse 7,5 t und auf der zweiten und dritten Achse jeweils 13 t. Das erlaubte Lkw-Gesamtgewicht beträgt 44 t. Die Vorderachse hat 2 Räder und die beiden Hinterachsen haben jeweils 4 Räder.

Nach dem statischen Plattendruckversuch im Nullfeldbereich des Versuchsfeldes VF GRK4 gab es Probleme beim Anfahren des Lkw, sodass er teilweise entladen wurde und die Überfahrversuche mit einem Gesamtgewicht des Lkw von 26,8 t durchgeführt wurden.

Daher waren die Proben in VF GRK4b nur einer Lkw-Überfahrt mit einem Gesamtgewicht von 40,2 t ausgesetzt und anschließend wurden beide Ver-

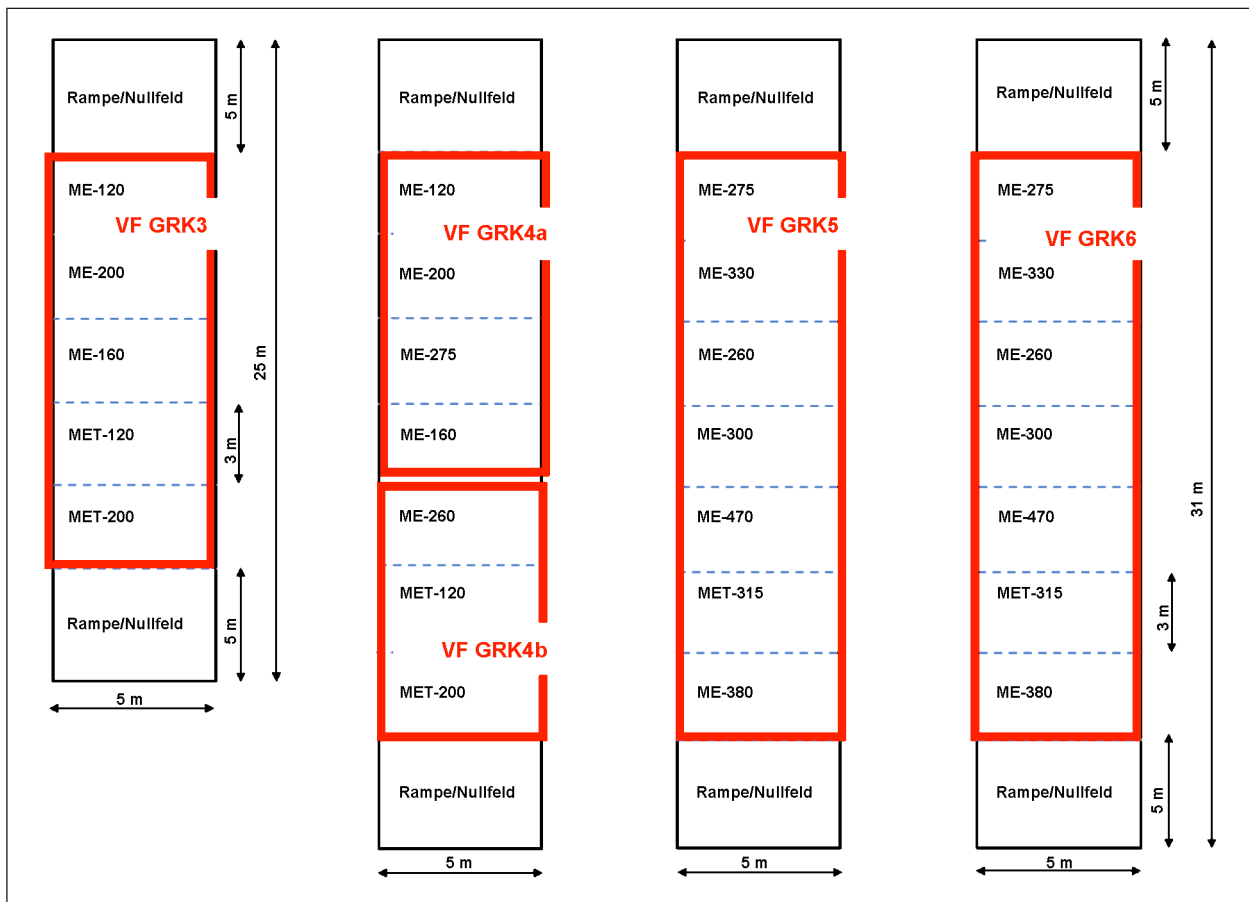


Bild 5-4: Aufteilung der Versuchsfelder

suchsfelder VF GRK4b und VF GRK4a noch mit zwei Überfahrten mit einem Gesamtgewicht von lediglich 26,8 t beansprucht.

Mit dem gleichen Gewicht wurden auch die Überfahrversuche auf dem Versuchsfeld VF GRK3 begonnen. Als sich dort aber kaum Spurrillen an der Oberfläche abzeichneten, wurde der Lkw wieder beladen und die Überfahrversuche mit einem Gesamtgewicht von 39,3 t fortgesetzt. Sodass die erforderliche Spurrillentiefe in der Geotextilebene mit einer geringen Anzahl an Überfahrten erzeugt werden konnte. Die detaillierte Zuordnung der Versuchsfelder insbesondere in VF GRK4 sind in Bild 5-4 dargestellt.

Die Spurrillentiefern wurden sowohl in der linken als auch in der rechten Fahrspur an jeder Probe in den Versuchsfeldern gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-1 (Tabelle D-2) aufgelistet.

Tabelle 5-2 fasst die sich daraus ergebenden Beanspruchungen in den einzelnen Versuchsfeldern zusammen. Bild 5-5 (Bild D-5) zeigt die Spurrillentiefern in Abhängigkeit der Belastung aus Lkw-Überfahrten. Es sei hierbei noch angemerkt, dass das VF GRK3, anders als bei den übrigen Versuchsfeldern, zudem noch eine gewisse Vorverdichtung infolge Regen erfahren hatte.

Das VF GRK4 zeigte die angestrebten Spurrillen von 10 bis 15 cm schon mit wenigen Lkw-Überfahrten und damit nach geringer Belastung mit lediglich 2 bzw. 3 Überfahrten (Bild 5-5). Nur VF GRK4b hatte eine Überfahrt mit voll beladenem Lkw und zwei Überfahrten mit teilbeladenem Lkw erfahren. VF GRK4a erfuhr dagegen nur eine Belastung mit dem teilbeladenen Lkw mit einem Gesamtgewicht von 26,8 t.

	Spurrinnentiefe Fahrspur links [cm]				Spurrinnentiefe Fahrspur rechts [cm]			
	VF GRK				VF GRK			
	3	4	5	6	3	4	5	6
ME-120	6,1				5,1			
		6,9				5,6		
ME-200	4,9				5,7			
		4,5				6,1		
		5,8				4,2		
ME-275			14,0				13,1	
				21,0				19,0
ME-330			15,7				12,3	
				22,9				21,1
ME-160	5,8				4,0			
		4,9				4,6		
		5,7				6,5		
ME-260			14,7				8,6	
				24,3				17,3
ME-300			13,3				11,2	
				21,5				13,4
ME-380			14,2				12,8	
				22,6				17,8
ME-470			10,2				12,2	
				23,9				18,1
MET-120	4,8				5,0			
		4,8				4,5		
MET-200	5,3				6,0			
		5,8				6,3		
MET-315			13,7				9,0	
				24,6				22,4

Tab. 5-1: Darstellung der ermittelten Spurrinnentiefe der einzelnen Produkte in den jeweiligen Versuchsfeldern (aus tachymetrischer Vermessung)

Versuchsfeld VF GRK	Übergänge zur Verdichtung mit Walzenzug	Lkw-Überfahrten		Spurrillentiefe auf der Trag- schicht [cm]	Spurrinnentiefe in der Geotextilebene	
		Gewicht [t]	Anzahl		Solltiefe [cm]	gemessene durchschnittli- che Tiefe [cm]
6	1x statisch 1x dynamisch*	40,2	64	25,7	15 bis 30	23,0
5	1x statisch 3x dynamisch*		34	20,3	5 bis 15	13,7
4b			1	15**	5 bis 15	5,8**
4a		2	11,5	5,5		
		2	10,6	5,5		
3		14	11,2	5 bis 15	5,4	
	39,3	10				

* dynamische Verdichtung mit kleiner Amplitude von 1,9 mm
** Spurrillen durch Lkw nach dem Plattendruckversuch – jedoch vor den Überfahrversuchen wieder aufgefüllt

Tab. 5-2: Beanspruchung der Geotextilien durch Verdichtung und Lkw-Überfahrten

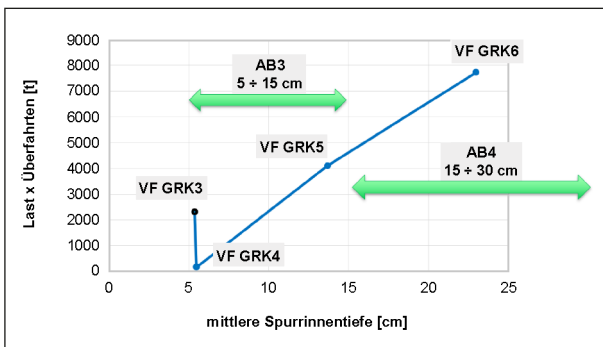


Bild 5-5: Darstellung der Last x Anzahl der Rad-Überfahrten vs. mittlere Spurrinnentiefe der einzelnen Versuchsfelder



(von links):
 VF GRK3 zeigt die Tragschicht mit Spurrillen,
 VF GRK4 zeigt den Rückbau mit konventionellem Bagger,
 VF GRK5 zeigt den Rückbau mit Saugbagger,
 VF GRK6 ist komplett zurückgebaut und Proben sind entnommen.

freigelegter Geovliesstoff auf Versuchsfeld VF GRK6

Bild 5-6: Rückbau der Versuchsfelder

5.5 Ausbau

Nach den Überfahrten und dem Einmessen der Spurrillen auf der Oberkante der Tragschichten wurden die obersten 10 cm bis 15 cm des Tragschichtmaterials vorsichtig mit dem Bagger zurückgebaut (Bild 5-6). Danach kam ein mobiler Saugbagger [SAUGBAGGER-RSP_ESE8] zum Einsatz, mit dem der Großteil des restlichen Schüttmaterials aufgenommen wurde (Bild 5-6 und Bild 5-8, links). Der Rest, der zur Lagesicherung auf den Geovliesstoffen verbleiben musste, wurde manuell entfernt. Durch den Einsatz des Saugbaggers konnten die Geovliesstoffe bis zum vollständigen Entfernen des Schüttmaterials an Ort und Stelle liegen bleiben, sodass die Verformungen der Geovliesstoffe den Verformungen im Untergrund zugeordnet werden konnten (Bild 5-7).

An wenigen Stellen wurden die für weitere Untersuchungen vorgesehenen Geovliesstoffe vom Bagger angesaugt und dadurch beansprucht. Diese Bereiche wurden an Ort und Stelle mit rotem Farbspray markiert (Bild 5-8, rechts). Alle anderen Markierungen, wie z. B. die Einteilung der Probestücke wurden, wenn nötig, mit grünem Farbspray vorgenommen (Bild 5-9, links).

Die exponierten Geovliesstoffe wurden auf der Baustelle beschriftet und über die Breite des Versuchsfeldes in „Fahrspur links“, „Fahrspur rechts“ und „Mitte“ aufgeteilt und vor Ort für die weiteren Laborversuche grob vorkonfektioniert und lose aufgerollt transportiert (Bild 5-9, rechts).



Bild 5-7: Korrespondierende Verformungen in Geovliesstoff und Untergrund



Bild 5-8: Saugbaggerarbeiten und rot markierte Stellen



Bild 5-9: Einteilung der Probestücke und Transport der aufgerollten Probestücke

5.6 Bodenmechanische Feld- und Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen des Bodens und die Auswertung der geodätischen Messdaten wurden von Mitarbeitern der GEOscope GmbH in Weimar durchgeführt. Alle Ergebnisse der Feldmessungen wie statische und dynamische Plattendruckversuche sowie die Laboruntersuchungen zur Dichtebestimmung und die Sieblinien der verwendeten Böden nach Ausbau sind in Anhang C zusammengestellt.

Die eingesetzten Sand 0/2 für den Unterbau wurde anhand der Körnungslinien als Grobsand beschrieben (Bild 5-10 (Bild C-6)). Die Tragschichtmaterialien 0/45 rund, 0/45 gebrochen und 0/45 gebrochen + 63/100 Steine wurden als sandiger Kies (Bild 5-11 (Bild C-15)), als Sand-Kies-Gemisch (Bild 5-12 (Bild C-16)) und als sandig, steiniger Kies (Bild 5-13 (Bild C-17)) eingeordnet.

Vor der Aufbringung des Schüttmaterials der Tragschicht wurde an jedem Versuchsfeld die Dichte des Unterbaus nach DIN 18125-2 untersucht (Tabelle 5-3). Die Proctordichte des Sand 0/2 wurde nach DIN 18127 mit $1,819 \text{ g/cm}^3$ bestimmt. Die Trockendichten lagen in allen vier Versuchsfeldern bei ca. $1,6 \text{ g/cm}^3$. Dies entsprach Verdichtungsgraden von unter 90 %.

Die Dichtemessungen wurden ausschließlich am Sand durchgeführt. Dazu wurden mithilfe von Ausstechzylindern ungestörte Proben entnommen. Am grobkörnigen Tragschichtmaterial konnten keine ungestörten Proben zur Bestimmung der Dichte entnommen werden. Es wurden auch keine Lagerungsdichten bestimmt. Stattdessen wurden statische und dynamische Plattendruckversuche nach DIN 18134 und TP BF-StB B 8.3 [FGSV-2012] vorgenommen (Tabelle 5-4 und Tabelle 5-5).

Die Verformungsmodule E_{V1} lagen zwischen 10,0 MPa und 16,1 MPa bei vergleichsweise hohen E_{V2} -Werten von 50 MPa bis 80 MPa. Daraus resultierten Verhältnisse E_{V2}/E_{V1} zwischen 4,4 und 5,5. Das lässt auf eine geringe Lagerungsdichte des Untergrunds schließen, während die über den Geovliesstoffen befindliche Tragschichten durch die gewählte Einbautechnologie gut verdichtet werden konnten. Hier haben Geovliesstoffe neben ihrer trennenden sicherlich auch eine bewehrende Funktion gehabt. Diese These wird durch die Unterschiede zwischen Spurrillentiefe auf der Tragschicht und

der Spurrillentiefe in der Geotextilebene sowie die zusätzlichen dynamischen Plattendruckversuche gestützt. Diese dynamischen Plattendruckversuche haben eine deutliche geringere Tiefenwirkung als die statischen Plattendruckversuche. Die Messwerte zwischen 12,0 MPa bis 34,8 MPa für die dynamischen Verformungsmodule E_{Vd} sind kennzeichnend für die Tragschicht mit ca. 30 cm Mächtigkeit. Mit der üblichen Korrelation zwischen E_{Vd} zu E_{V2} von ca. 1 zu 2 ist der verdichteten Tragschicht mit ca. 24 MPa bis 70 MPa ein Großteil der erzielten Systemtragfähigkeit zuzuordnen.

Die einzelnen Lagen des Versuchsaufbaus wurden in jedem Stadium des Einbaus der Materialien, deren anschließender Verdichtung oder Befahrung und nach dem Rückbau der Tragschicht mit einem Tachymeter eingemessen. Daraus ergeben sich folgende Messketten für jedes Versuchsfeld und jeden eingebauten Geovliesstoff:

- | | |
|-----------|---|
| Stadium 1 | Oberkante (OK) Sand und verlegter Geovliesstoff |
| Stadium 2 | OK Tragschicht unverdichtet als Kontrolle |
| Stadium 3 | OK Tragschicht verdichtet |
| Stadium 4 | Spurrille OK Tragschicht (Links-Mitte-Rechts) |
| Stadium 5 | Spurrillentiefe nach dem Rückbau der Tragschicht auf dem Geovliesstoff (Links-Mitte-Rechts) |

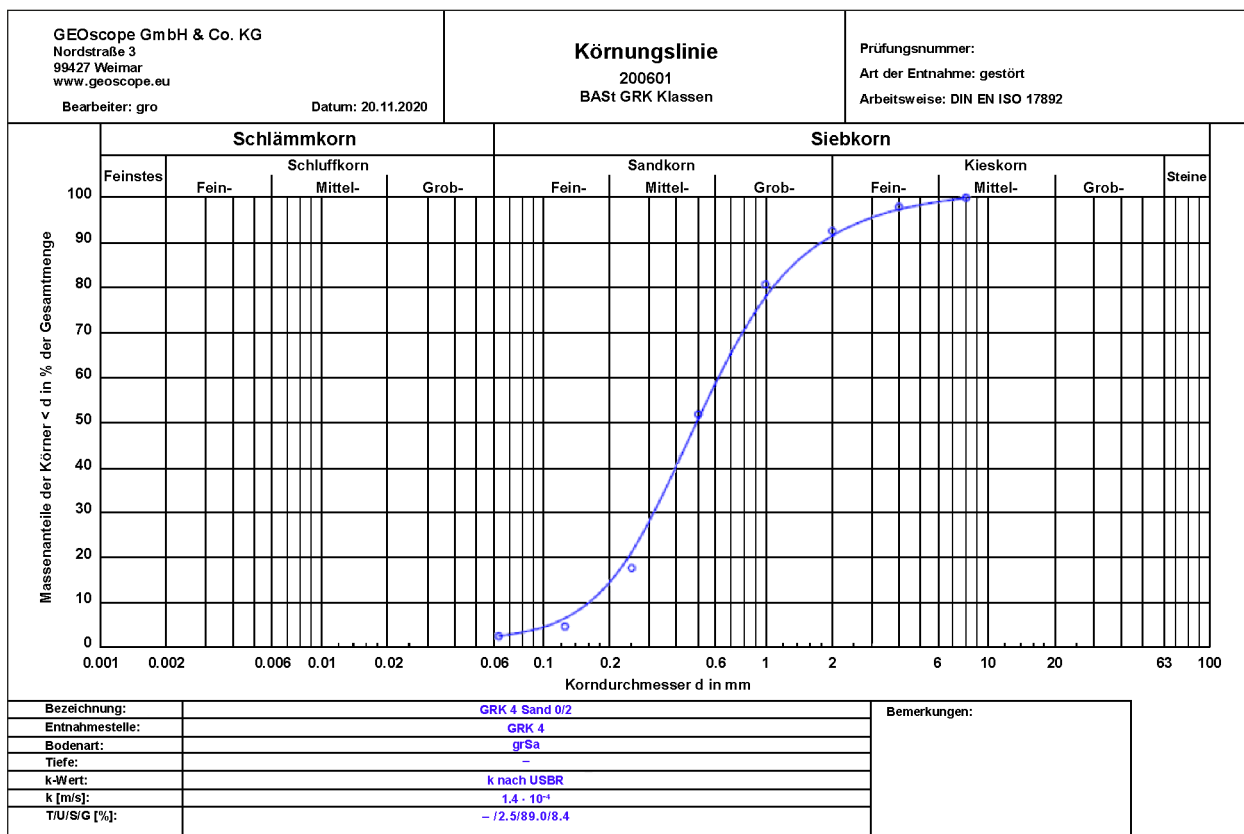


Bild 5-10: Körnungslinie Sand 0/2 aus VF GRK4

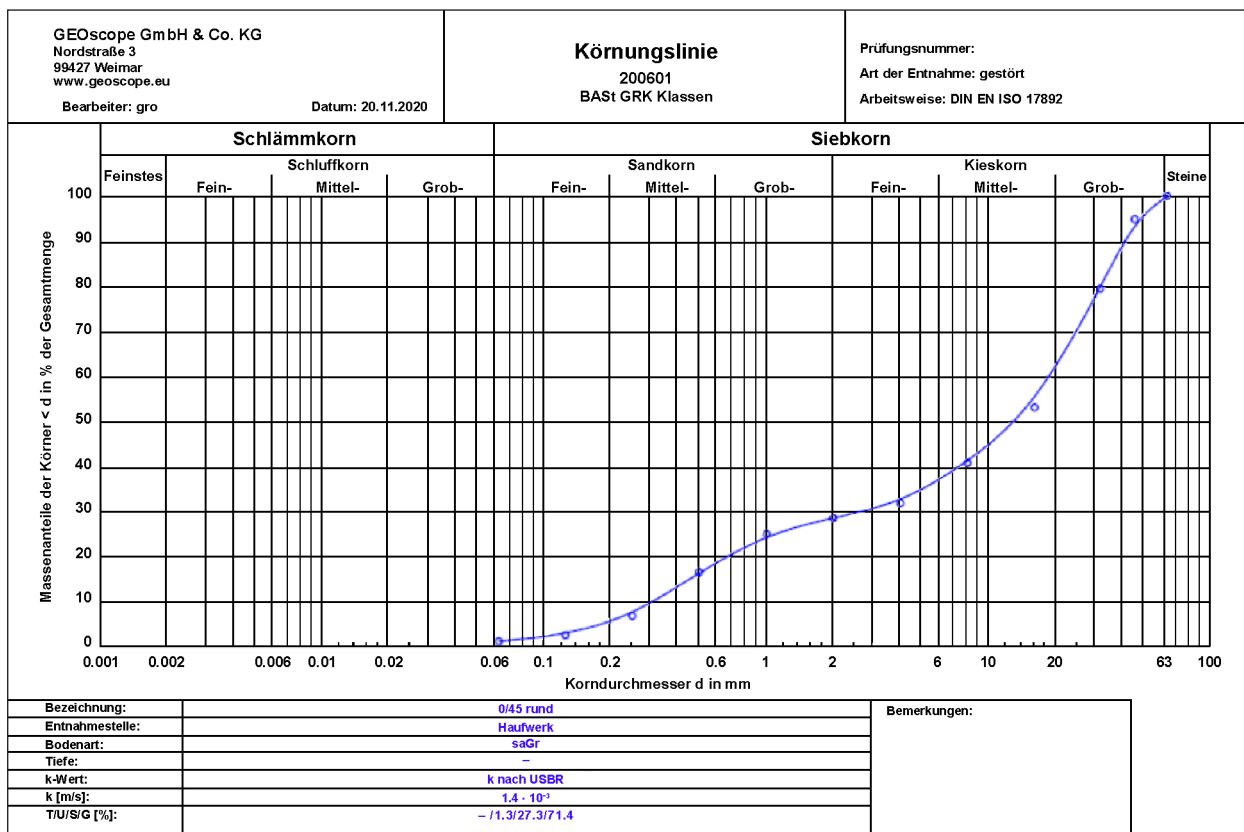


Bild 5-11: Körnungslinie sandiger Kies (0/45) in VF GRK3

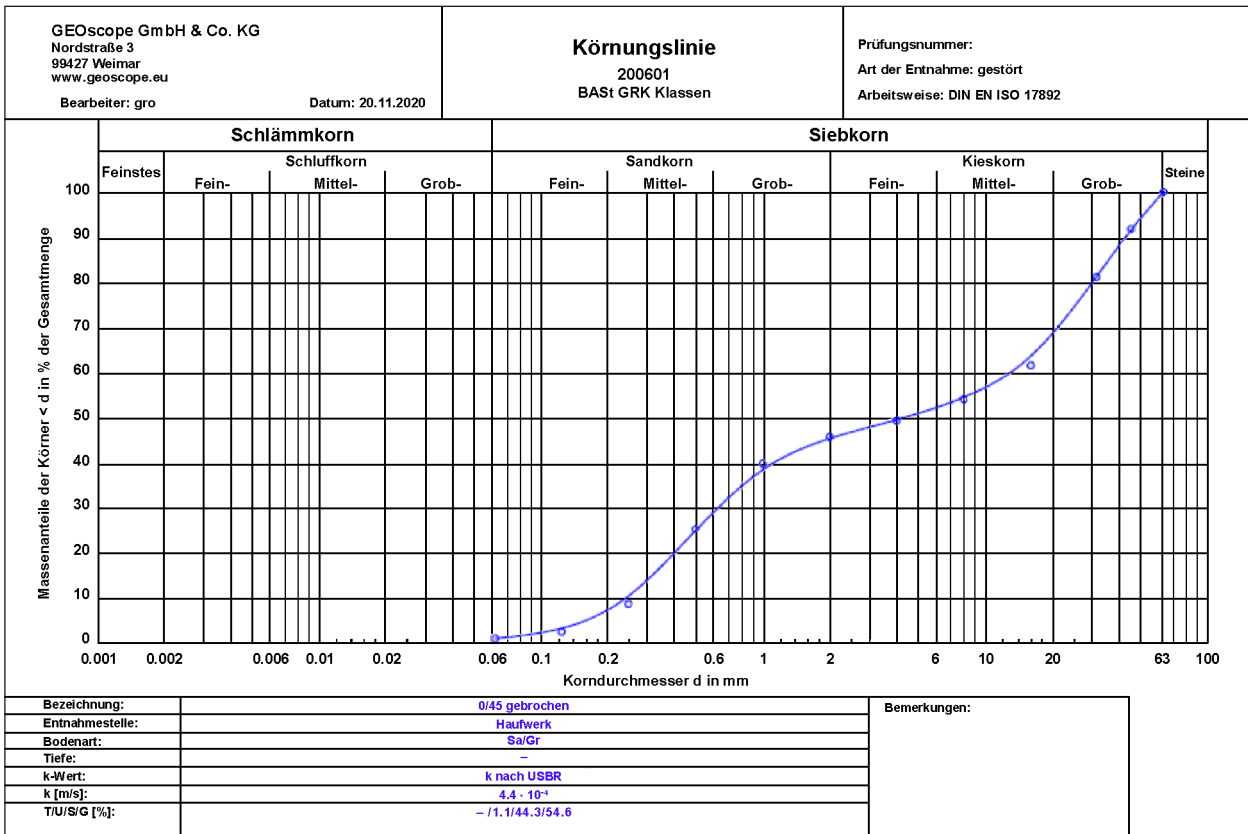


Bild 5-12: Körnungslinie Sand-Kies-Gemisch (0/45) in VF GRK4

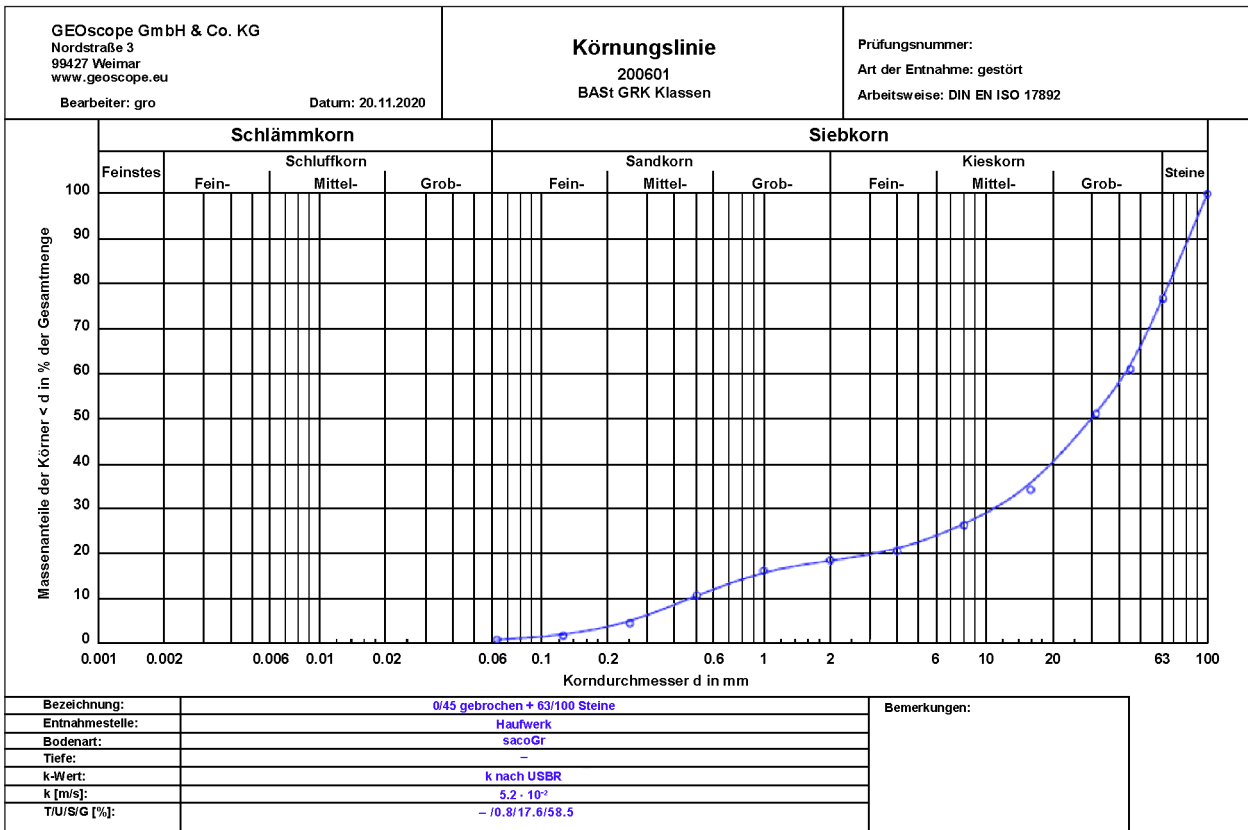


Bild 5-13: Körnungslinie sandig, steiniger Kies (0/45 + 30 % Steine) in VF GRK5/6

	Entnahmestellen	Trockendichte ρ_d	Verdichtungsgrad D_{Pr}
VF GRK3	MET-200 und ME-120	1,593 g/cm ³	87,6 %
VF GRK4	MET-200 und ME-120	1,622 g/cm ³	89,2 %
VF GRK5	ME-380 und ME-275	1,618 g/cm ³	89,0 %
VF GRK6	ME-380 und ME-275	1,638 g/cm ³	90,1 %
Proctordichte ρ_{Pr} : 1,819 g/cm ³			

Tab. 5-3: Bodenmechanische Laborversuche an Sand 0/2 (Dichte und Verdichtungsgrad des Unterbaus in den Versuchsfeldern)

	Messpunkte	E_{V1} [MPa]	E_{V2} [MPa]	E_{V2}/E_{V1}
VF GRK3	MET-200	10,0	53,5	5,3
VF GRK4	MET-120	10,8	59,3	5,5
VF GRK5	ME-380	18,5	80,6	4,4
VF GRK6	ME-380	16,1	70,4	4,4

Tab. 5-4: Feldmessungen auf dem westlichen Nullfeld (Statischer Plattendruckversuch nach DIN 18134 auf OK Tragschicht)

	Messpunkte	E_{Vd} [MPa]		
		Ost, in Feldachse	Zentrum, südlich Feldachse	West, in Feldachse
VF GRK3	MET-200	22,2		
	ME-160		18,7	
	ME-120			25,3
VF GRK4	MET-200	23,5		
	ME-160		16,3	
	ME-120			20,5
VF GRK5	ME-380	21,4		
	ME-300		12,0	
	ME-275			33,7
VF GRK6	ME-380	34,8		
	ME-300		14,9	
	ME-275			22,7

Tab. 5-5: Feldmessungen (Dynamischer Plattendruckversuch nach TP BF-StB B 8.3 auf OK Tragschicht)

5.7 Laborprüfungen an den Geotextilien

Die mechanischen Kennwerte der Geovliesstoffe wurden im Geokunststofflabor der SKZ – Testing GmbH ermittelt. Alle Prüfergebnisse des ALZ sind in Anhang A zusammengestellt.

An jeder Zugversuchs-Messprobe wurden vor den Zugversuchen auch die flächenbezogenen Massen nach [DIN EN ISO 9864] bestimmt. Um die Streuung der Ergebnisse besser abdecken zu können, wurden anders als in der Zugprüfnorm nach [DIN EN ISO 10319] verlangt, jeweils 8 statt nur 5 Messproben getestet. Neben der Ermittlung der Zugfestigkeit T_{\max} wurde auch das Arbeitsvermögen $W_{ZV,\max}$ in kJ/m^2 im Zugversuch nach [DIN EN ISO 10318] bestimmt. Die Dehnung bei Zugfestigkeit (hier nachfolgend als Reißdehnung bezeichnet) wurde mit einem optischen Extensometer bestimmt (Bild 5-14). Zusätzlich wurde jeweils auch die nomi-



Bild 5-14: Zugversuch am Beispiel von ME-275
(Zwei rote Punkte auf der Messprobe zeigen die Messmarken zur optischen Dehnungsmessung)

nelle Reißdehnung als Dehnung der Messproben zwischen den Klammern (aus der Traversenverschiebung errechnet) bestimmt.

Alle Ergebnisse sind als Mittelwert und Standardabweichung angegeben und zusätzlich als Mittelwert minus Standardabweichung, als Mittelwert minus doppelter Standardabweichung, als 95 %-Vertrauensbereich und als 5 %-Quantilwert berechnet in Anhang A in Tabellenform aufgeführt. Für die Auswertung wurden die 5 %-Quantilwerte herangezogen. Als Zusatzinformation sind der Isotropiefaktor $T_{\max,MD}/T_{\max,CMD}$, die in MD und CMD gemittelte Zugfestigkeit sowie der mittlere Prüfzeit eines Zugversuchs und die Dicke bei 2 kPa Auflast nach [DIN EN ISO 9863-1] angegeben.

Stempeldurchdrückversuche (Bild 5-15) nach [DIN EN ISO 12236] wurden ebenfalls an allen Proben durchgeführt. Dabei wurden neben der Stempeldurchdrückkraft $F_{P,\max}$ auch der Verformungsweg – allerdings schon ab der Berührung der Messprobe (hier definiert bei einer Kraft von 1 N) – gemessen und ausgewertet. Aus diesen Parametern wurden zusätzlich ein Arbeitsvermögen $W_{CBR,\max}$ in kJ/m und eine maximale flächige Dehnung $\epsilon_{CBR,\max}$ (ab dem Berühren der Messprobe) bestimmt.

Alle Ergebnisse sind als Mittelwert und Standardabweichung angegeben und zusätzlich als Mittelwert minus Standardabweichung, als Mittelwert minus doppelter Standardabweichung, als 95 %-Vertrauensbereich und als 5 %-Quantilwert berechnet in Anhang A in Tabellenform aufgeführt. Für die Auswertung wurden die 5 %-Quantilwerte herangezogen.

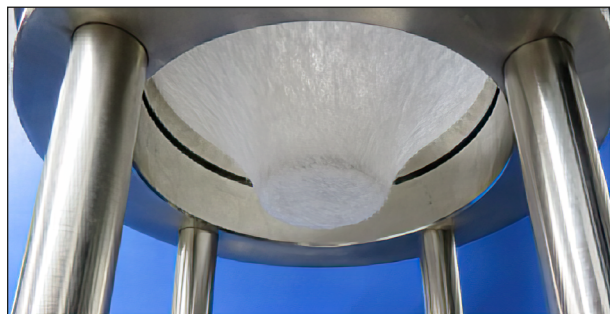


Bild 5-15: Stempeldurchdrückversuch am Beispiel von ME-260
(von der Unterseite fotografiert)

6 Auswertung der Versuche

6.1 Aufteilung der Proben nach der Freilegung

Nach der Freilegung der Geotextilproben wurden diese vor Ort in drei Teile zerschnitten. Hierbei wurde jede Probe aufgeteilt in „Linke Fahrspur“, „Mitte“ und „Rechte Fahrspur“. Auf Bild 6-1 ist beispielhaft gezeigt, dass an der „Linken Fahrspur“ (1) die Messproben für die Zugversuche am linken Flankenbereich (1.1) und die Messproben für die Stempeldurchdrückversuche (CBR-Versuche) am rechten Flankenbereich (1.2) verwendet wurden.

In der Zone „Mitte“ (2) zwischen den Fahrspuren entstammen die Messproben für Zugversuche aus dem Bereich 2.1 und die Messproben für Stempeldurchdrückversuche aus dem Bereich 2.2 daneben. Aus dem Stück der rechten Fahrspur wurden keine Messproben entnommen.

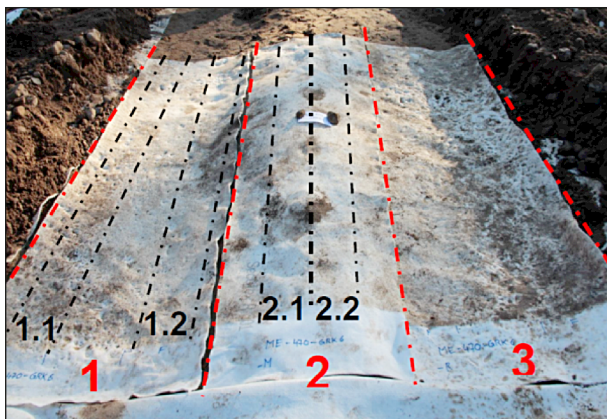


Bild 6-1: Entnahme und Aufteilung der Probestücke in „Linke Fahrspur“ (1), „Mitte“ (2) und „Rechte Fahrspur“ (3)

6.2 Visuelle Beurteilung der Proben nach der Freilegung

Alle entnommenen Proben wurden einer einheitlichen visuellen Probenansprache unterzogen. Die Darstellung der Beschädigungen wie Eindruckstellen oder Löcher und Risse ist in Anhang E an Beispielen aufgeführt.

Des Weiteren wurden hierfür Beschädigungsklassen 1 bis 6 eingeführt (Tabelle 6-1 (Tabelle E-3)), die einem definierten visuellen Beschädigungsfaktor k_{vis} zugeordnet wurden. Zur Beurteilung aller Proben wurden die Löcher auf einer Fläche von 3 m^2 gezählt, deren Lochdurchmesser gemessen und in Tabelle 6-2 (Tabelle E-4) jeder entnommenen Probe je Versuchsfeld der entsprechenden Beschädigungsklasse bzw. den k_{vis} -Faktor für die rechnerische Bewertung zugeordnet. Die in Tabelle 6-1 (Tabelle E-1) definierten Beschädigungen beziehen sich daher auf eine Bezugsfläche von 3 m^2 .

Optische Beschädigungen wurden fast ausschließlich im Bereich der Fahrspuren bzw. im Bereich der Flanken „Linke Fahrspur“ (1) und „Rechte Fahrspur“ (3) festgestellt. In der „Mitte“ (2) wurden kaum optische Beschädigungen festgestellt. Lediglich ein einziges Produkt (MET-120-VFGRK3) aus der „Mitte“ (2) weist optische Schädigungen mit einem Loch mit einem Durchmesser von 1 cm auf.

Beschädigungs-kategorie	Signalwort	Definition	visueller Beschädigungsfaktor k_{vis}
1	unbeschädigt	keine visuelle Beschädigung	1
2	minimale Beschädigung	max. 2 Löcher mit $\varnothing \leq 0,5 \text{ cm}$	0,9
3	leichte Beschädigung	max. 4 Löcher mit $\varnothing \leq 0,5 \text{ cm}$	0,8
4	mittlere Beschädigung	max. 7 Löcher mit $\varnothing \leq 1,0 \text{ cm}$	0,7
5	starke Beschädigung	> 7 Löcher mit $\varnothing \geq 1,0 \text{ cm}$	0,5
6	zerstört	mehrere großflächige Löcher	0,1

Tab. 6-1: Definition der Beschädigungsklassen

	VF GRK	Anzahl der Löcher	Durchmesser des größten Lochs [cm]	Beschädigungs-klasse	visueller Beschädigungsfaktor k_{vis}
ME-120	3	0	0	1	1,0
	4a	0	0	1	1,0
ME-200	3	0	0	1	1,0
	4a	0	0	1	1,0
ME-275	4a	0	0	1	1,0
	5	7	0,5	4	0,7
	6	25	großflächig	6	0,1
ME-330	5	3	0,5	3	0,8
	6	0	0	1	1,0
ME-160	3	0	0	1	1,0
	4a	1	0,5	2	0,9
ME-260	4b	0	0	1	1,0
	5	7	0,5	4	0,7
	6	1	0,5	2	0,9
ME-300	5	1	0,5	2	0,9
	6	1	0,5	2	0,9
ME-380	5	0	0	1	1,0
	6	1	0,5	2	0,9
ME-470	5	0	0	1	1,0
	6	1	0,1	2	0,9
MET-120	3	5	1,0	4	0,7
	4b	17	> 1,0	5	0,5
MET-200	3	2	0,5	2	0,9
	4b	2	0,5	2	0,9
MET-315	5	5	1,0	4	0,7
	6	4	0,5	3	0,8

Tab. 6-2: Beurteilung der Beschädigung der einzelnen Produkte

6.3 Einfluss von Prüfgeschwindigkeit und Dehnungsrate auf Zugversuch

Zur Durchführung eines Zugversuchs an einem Geovliesstoff sind verschiedene Variationen möglich:

- Variante A mit konstanter Prüfgeschwindigkeit (nach DIN EN ISO 10319):
 - Dehnungsrate: $\epsilon_{max/t} = 15$ bis 25 %/min
 - Prüfgeschwindigkeit: $v =$ konstant, hier: 25 mm/min
- Variante B mit konstanter Dehnungsrate (in Anlehnung an DIN EN ISO 10319):
 - Dehnungsrate: $\epsilon_{max/t} = 20$ %/min
 - Prüfgeschwindigkeit: $v =$ variabel
- Variante C mit erhöhter Prüfgeschwindigkeit (in Anlehnung an DIN EN ISO 10319):
 - Dehnungsrate: $\epsilon_{max/t} =$ variabel
 - Prüfgeschwindigkeit: $v =$ konstant, hier: 65 mm/min
 - Prüfdauer: $t \leq 1$ min

	T_{\max} [kN/m]	ϵ_{\max} [%]	$\epsilon_{\max, \text{nom}}$ [%]	$W_{ZV, \max}$ [kJ/m ²]
Variante A	13,3	56,0	65,6	403,7
Variante B	13,1	55,2	64,3	390,9
Differenz	-1,5 %	-1,4 %	-2,0 %	-3,2 %

Tab. 6-3: Vergleich Variante B mit Variante A

	T_{\max} [kN/m]	ϵ_{\max} [%]	$\epsilon_{\max, \text{nom}}$ [%]	$W_{ZV, \max}$ [kJ/m ²]
Variante A	13,3	56,0	65,6	403,7
Variante C	12,9	51,2	60,7	353,4
Differenz	-3,0 %	-8,6 %	-7,5 %	-12,5 %

Tab. 6-4: Vergleich Variante C mit Variante A

Am Beispiel eines Geovliesstoffs wurde exemplarisch der Einfluss der unterschiedlichen Prüfbedingungen jeweils auf die Zugfestigkeit T_{\max} , die Dehnung ϵ_{\max} bzw. $\epsilon_{\max, \text{nom}}$ und das Arbeitsvermögen $W_{ZV, \max}$ mit der Normvorgabe (Variante A) verglichen. Variiert wurden die Prüfgeschwindigkeit v und die Dehnungsrate ϵ_{\max}/t .

Der Vergleich der Variante B mit konstanter Dehnungsrate zu Variante A mit konstanter Prüfgeschwindigkeit ergab nur sehr geringe Unterschiede. Diese lagen innerhalb der Streubreite des Einflusses des Probenmaterials (Tabelle 6-3 (Tabelle F-5)).

Der Vergleich der Variante C mit erhöhter konstanter Prüfgeschwindigkeit zu Variante A mit konstanter Prüfgeschwindigkeit ergab Differenzen zwischen 3 % bis 9 % bei der Zugfestigkeit bzw. bei der Dehnung (Tabelle 6-4 (Tabelle F-6)). Die Dehnungen lagen demnach über der Streubreite des Einflusses des Probenmaterials. Allerdings würde die Variante B mit konstanter Dehnungsrate die genaueste Prüfbedingung vorgeben und sollte deshalb als eigentliche Bezugsgröße gelten. Die nominellen Dehnungen, die ohne Extensometer, sondern über den Traversenweg ermittelt wurden, zeigten ca. 10 % höhere Dehnungswerte (Bild 6-3 (Bild F-2)). Für einen Geovliesstoff könnte man sich prinzipiell auch auf die vereinfachte Variante einer Dehnungsmessung – ohne die Verwendungen eines Extensometers – begnügen. Dies wäre aus unserer Sicht für die Anwendung von Geovliesstoffen genau genug, da sie nicht zu Bewehrungszwecken eingesetzt werden.

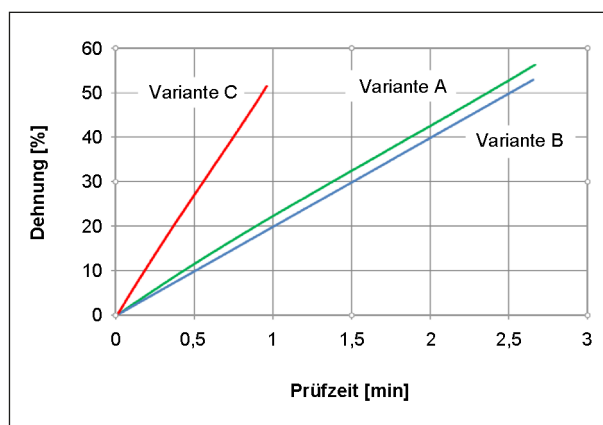


Bild 6-2: Darstellung der Dehnung vs. Prüfzeit

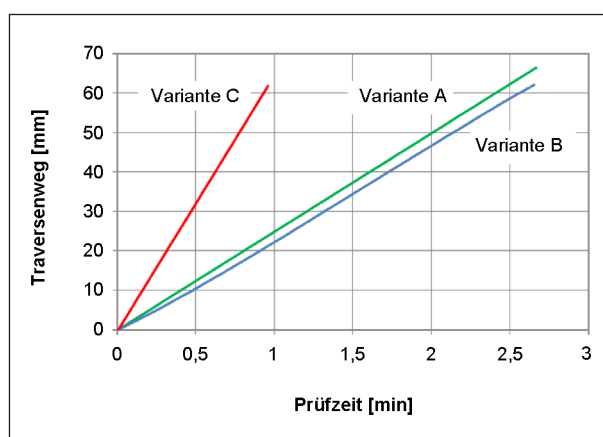


Bild 6-3: Darstellung des Traversenwegs vs. Prüfzeit

Die Variante C mit erhöhter Prüfgeschwindigkeit wäre aus unserer Sicht ebenfalls eine überlegenswerte Verbesserung der Prüfpraxis, weil dadurch die Prüfzeiten erheblich verkürzt werden können. Bislang dauert jeder einzelne Zugversuch mehrere Minuten (Bild 6-2 (Bild F-1)) – ohne die Vorbereitung und das Einspannen der Probekörper. Bei Variante C wurde stattdessen eine Prüfzeit von unter einer Minute als Zielgröße angestrebt. Man kann sagen, dass sowohl die gemessene Zugfestigkeit als auch die gemessene Dehnung bei Variante C sich nur unwesentlich von der derzeitigen Praxis der Zugprüfung nach DIN EN ISO 10319 unterscheidet. Die Vorteile sind jedoch offensichtlich. Der Zugversuch am breiten Streifen sollte u. E. für Geokunststoffe mit großen Dehnungen (>> 20 % Dehnung) – also für Geovliesstoffe – zukünftig normativ angepasst werden. Unabhängig davon sind jedoch in dieser Studie alle Zugversuche streng nach DIN EN ISO 10319 – also Variante A – durchgeführt worden.

6.4 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Proben nach der Freilegung

Alle Proben wurden entsprechend der Vorgehensweise zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften im ALZ auch wieder nach der gleichen Art und Weise geprüft. Die Proben wurden nicht gewaschen. Sie wurden nach der Entnahme in Raumklima einige Tage getrocknet und dann vorsichtig händisch mit einem Handbesen abgekehrt und ausgeschüttelt. Bei den Zugversuchen wurde die Zugfestigkeit, die Reißdehnung und das Arbeitsvermögen bestimmt. Alle Ergebnisse inklusive der Einzelwerte

der Zugversuche und der Stempeldurchdrückversuche sind in Anhang G zusammengestellt. Bild 6-4a bis 6-4d zeigen für alle Proben aus den Versuchsfeldern repräsentative Kraft-Dehnungskurven aus den Zugversuchen in CMD als auch repräsentative Kraft-Weg-Kurven aus den Stempel-Durchdrückversuchen.

Die Darstellungen der Kraft-Dehnungs- bzw. der Kraft-Weg-Kurven an ausgebauten Messproben zeigt beispielhaft das unterschiedliche Rest-Arbeitsvermögen der Proben (Bilder 6-4a bis 6-4d). Dieses hängt nicht allein von der Höhe der Zugfestigkeit bzw. der maximalen Stempeldurchdrückkraft

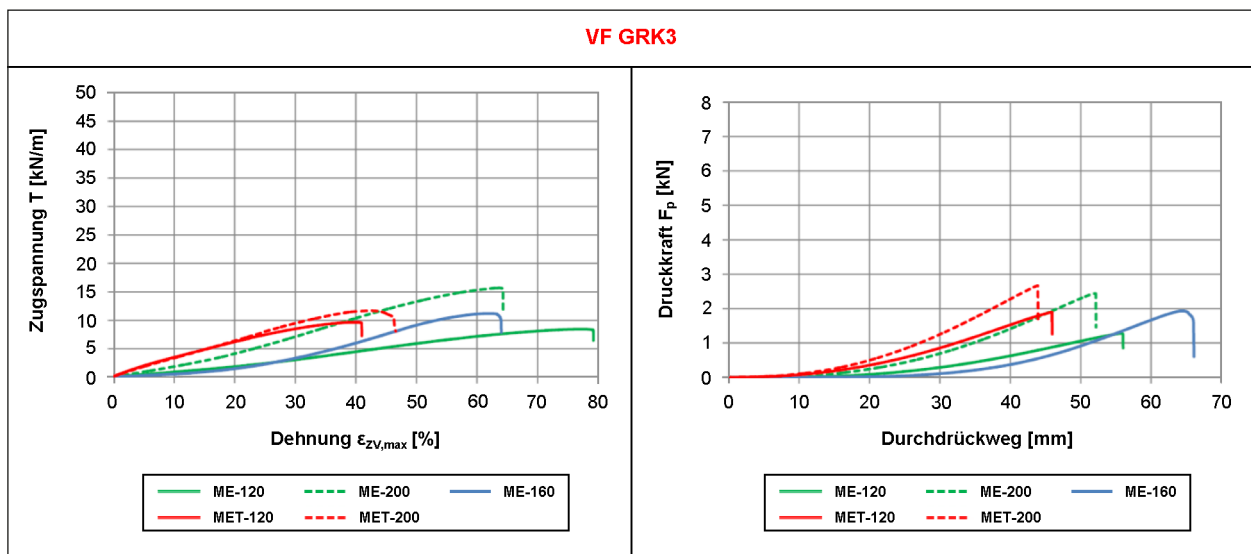


Bild 6-4a: Beispiele repräsentativer Zugkraft-Dehnungs-Kurven (links) und repräsentativer Druckkraft-Weg-Kurven (rechts) aus VF GRK3 im ALZ

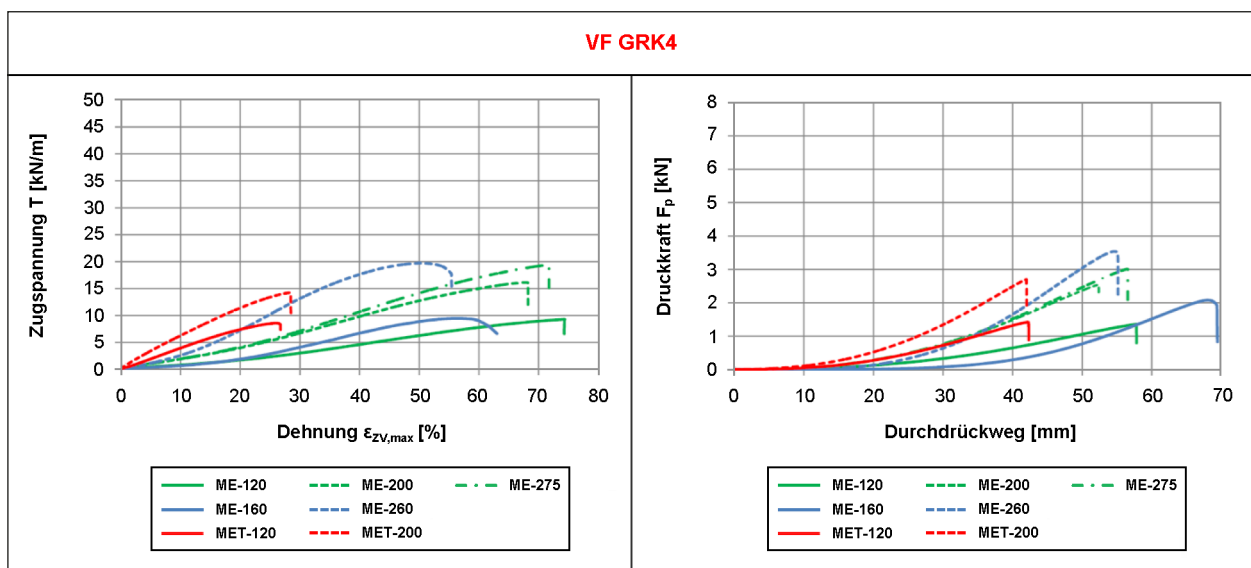


Bild 6-4b: Beispiele repräsentativer Zugkraft-Dehnungs-Kurven (links) und repräsentativer Druckkraft-Weg-Kurven (rechts) aus VF GRK4 im ALZ

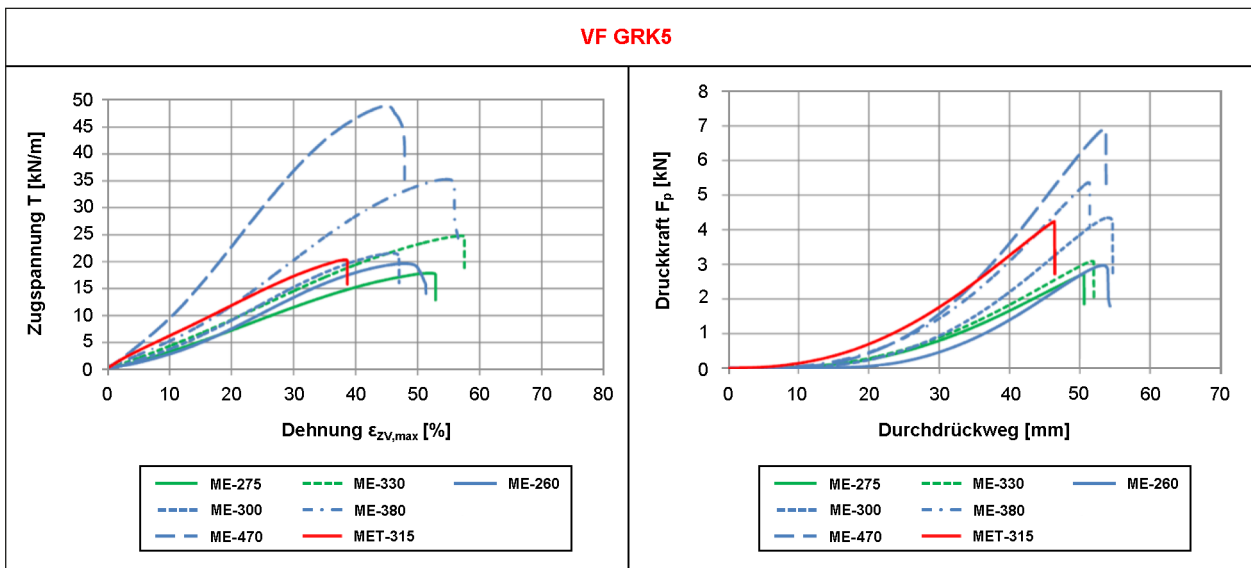


Bild 6-4c: Beispiele repräsentativer Zugkraft-Dehnungs-Kurven (links) und repräsentativer Druckkraft-Weg-Kurven (rechts) aus VF GRK5 im ALZ

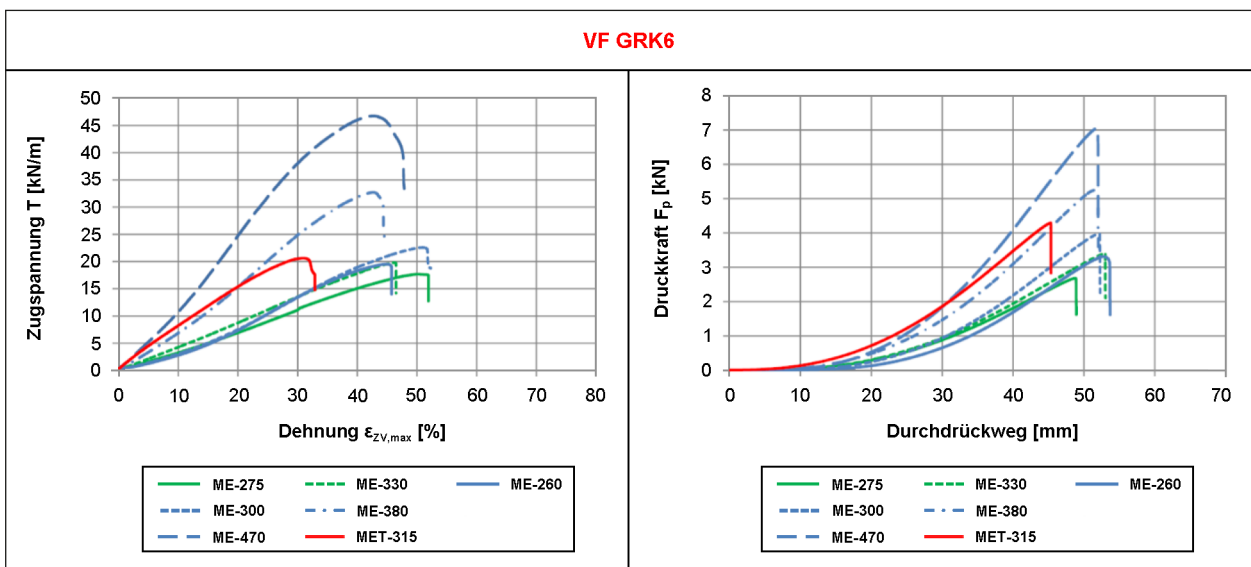


Bild 6-4d: Beispiele repräsentativer Zugkraft-Dehnungs-Kurven (links) und repräsentativer Druckkraft-Weg-Kurven (rechts) aus VF GRK6 im ALZ

oder der Höchstzugkraft bzw. dem maximalen Durchdrückweg ab. Das Arbeitsvermögen berücksichtigt auch einen steilen oder einen flachen Kraftanstieg.

Die thermisch nachbehandelten Proben zeigen alle eine geringere Dehnfähigkeit als die thermisch unbehandelten Geovliesstoffe. Eine alleinige Beurteilung der Robustheit gegenüber einer Einbaubeanspruchung aufgrund der Dehnfähigkeit allein wäre genausowenig ausreichend wie eine Beurteilung anhand der Festigkeit. Das Arbeitsvermögen ist deshalb ein guter Kompromiss, um beides die Wider-

standskraft und die Dehnfähigkeit des Geovliesstoffs zu kombinieren.

Beispielhaft sind die Abnahmen oder auch Zunahmen der mechanischen Eigenschaften an der Probe ME-470 aus dem VF GRK6 in den Tabellen 6-5 und 6-6 zusammengestellt. In der Regel nehmen die Festigkeit und auch die Dehnung nach der Einbaubeanspruchung ab. In dem Fall der Probe ME-470-GRK6 nimmt jedoch die Zugfestigkeit in Querrichtung sogar zu. Das kann dadurch erklärt werden, dass eingelagerte Bodenpartikel eine Entschlafung der Fasern behindern. Dies hat eine

	Zugfestigkeit $T_{\max, \text{CMD}}$ [kN/m]	Arbeits- vermögen $W_{\text{ZV}, \max, \text{CMD}}$ [kJ/m ²]	Reißdehnung $\epsilon_{\text{ZV}, \max, \text{CMD}}$ [%]
ALZ	35,85	932,68	56,8
nach Ausbau	43,71	919,35	39,1
Änderung	+22 %	-1 %	-31 %

Tab. 6-5: Eigenschaften von ME-470-GRK6 im Zugversuch vor und nach dem Ausbau

	Stempel- durchdrück- kraft $F_{\text{P}, \max}$ [kN]	Arbeits- vermögen $W_{\text{CBR}, \max}$ [kJ/m]	maximale flächige Dehnung $\epsilon_{\text{CBR}, \max}$ [%]
ALZ	7,43	166,06	49,4
nach Ausbau	6,61	102,87	36,1
Änderung	-11 %	-38 %	-27 %

Tab. 6-6: Eigenschaften von ME-470-GRK6 im Stempeldurchdrückversuch vor und nach dem Ausbau

Versteifung zur Folge, was sich an geringeren Reißdehnungen zeigt, und kann aber auch eine Festigkeitszunahme bewirken – zumindest ist dies hier in CMD der Fall. Auf der anderen Seite zeigen die Stempeldurchdrückversuche sowohl eine Abnahme der Festigkeit als auch eine Abnahme der Dehnung. Diese Beobachtung stärkt eine Verwendung von Stempeldurchdrückversuchen anstatt von Zugversuchen, weil bei Stempeldurchdrückversuchen die Fasern in allen Richtungen gleichzeitig beansprucht werden und nicht wie im Zugversuch nur in einer Richtung.

6.5 Kombinierte Darstellung der Zugversuche und der Stempeldurchdrückversuche

Im Anhang H wurden für sämtliche Proben im ALZ Zugversuche und Stempeldurchdrückversuche an ausgewählten Einzelversuchen jeweils in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt (Bild 6-5, Bild H-7: ME-380_CMD). Darin sind die Zugkraft F_Z in kN (in CMD und in MD) über die lineare Dehnung im Zugversuch $\epsilon_{\text{ZV}, \text{CMD}}$ bzw. $\epsilon_{\text{ZV}, \text{MD}}$ und die Durchdrückkraft F_P in kN im Stempel-Durchdrückversuch über

die flächige Dehnung ϵ_{CBR} gemeinsam aufgetragen. Es wurde damit gezeigt, dass die Kurven für die Zugversuche in CMD und die Kurvenverläufe der Stempeldurchdrückversuche kongruent verlaufen Bild 6-5 (Bild H-8). Die Kurven der Zugversuche in MD weisen dagegen gegenüber den Stempeldurchdrück-Kurven minimale Abweichungen zu Beginn und am Ende des Zugversuchs auf Bild 6-6 (Bild H-9). Dies scheint dem Herstellungsprozess der Stapelfaser-Vliesstoffe geschuldet zu sein. Das zeigen auch die Unterschiede in MD und in CMD sowohl bei der Zugfestigkeit als auch bei der Höchstzugkraftdehnung.

Zu bemerken ist, dass die Aufzeichnungen beim Zugversuch nach [DIN EN ISO 10319] ab einer Zugkraft von 1 % der Zugfestigkeit starten. Im Fall dieser Untersuchung wurden die Durchdrückwege im Stempeldurchdrückversuch nach [DIN EN ISO 12236] schon ab einer Kraft von 1 N aufgezeichnet. Die [DIN EN ISO 12336] verlangt erst ab einer Kraft von 20 N Werte aufzuzeichnen und außerdem ist der Durchdrückweg gar nicht im Ergebnis anzugeben, geschweige denn, dass daraus eine Dehnung errechnet werden würde. In diesem Projekt wurde aber in erster Annäherung an die Form eines Kegelstumpfes über den Stempeldurchmesser, den Durchmesser des Klemmrings und den Durchdrückweg eine flächige Dehnung berechnet.

Bei genauer Betrachtung erkennt man, dass bei einzelnen Proben, die im Zugversuch in MD geprüft wurden, beim Stempeldurchdrückversuch im Anfangsbereich sogar eine negative Druckkraft angegeben ist. Dies ist damit zu erklären, dass beim Zugversuch der Kraftfluss unmittelbar durch die Messprobe hindurch erfolgt. Beim Stempeldurchdrückversuch hingegen wird die externe Stempelfkraft gemessen, die normal auf die gespannte Fläche der Messprobe drückt. In der Ebene der Messprobe müssen radial wirkende Zugspannungen den Einwirkungen durch den Stempel entgegenwirken. Durch das Einspannen der Messprobe beim Stempeldurchdrückversuch erfolgt infolge der Verzahnung im Einspannring bei einigen Produkten schon eine gewisse kleine Vorspannung. Die gemessene Druckkraft durch den Stempel ist daher eine zusätzliche, wenn auch sehr viel größere Kraft, die große Zugspannungen in der Messprobe hervorruft. Die Vorspannkraft kann bei einzelnen Produkten in der Größe von bis zu 0,5 kN liegen Bild 6-6 (Bild H-10).

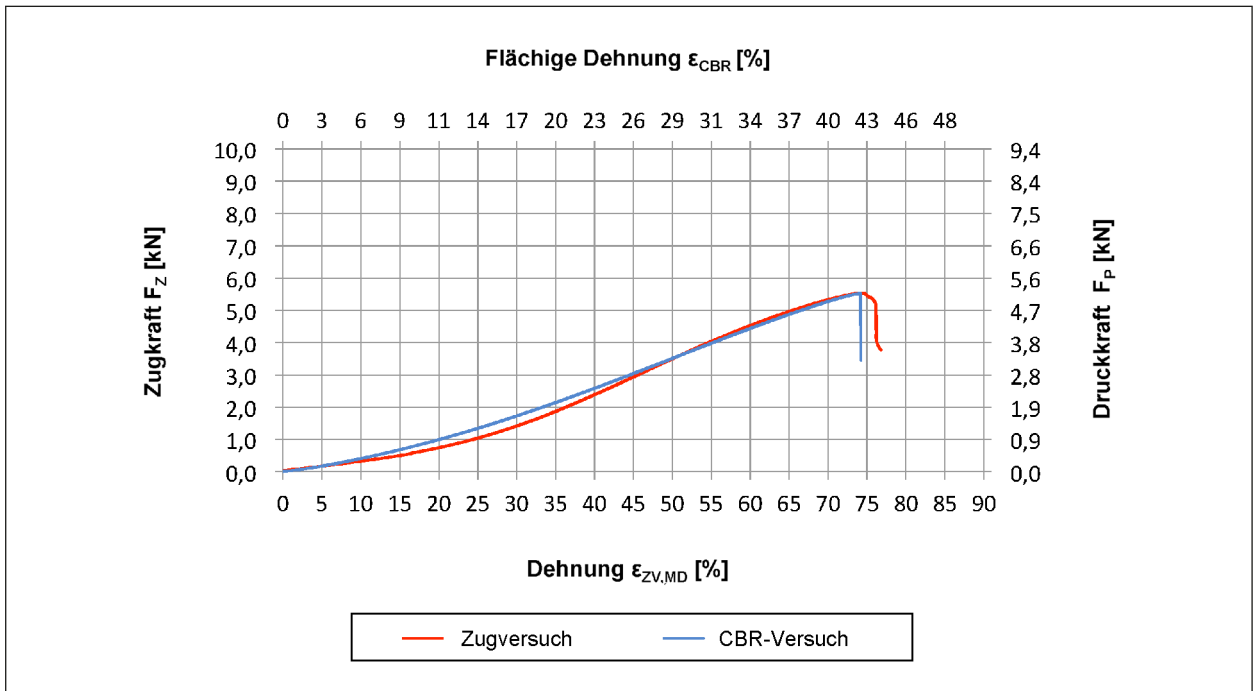


Bild 6-5: Kombination der Kraft-Dehnungs-Linien aus Zugversuch in CMD und aus Stempeldurchdrückversuch am Beispiel von ME-380

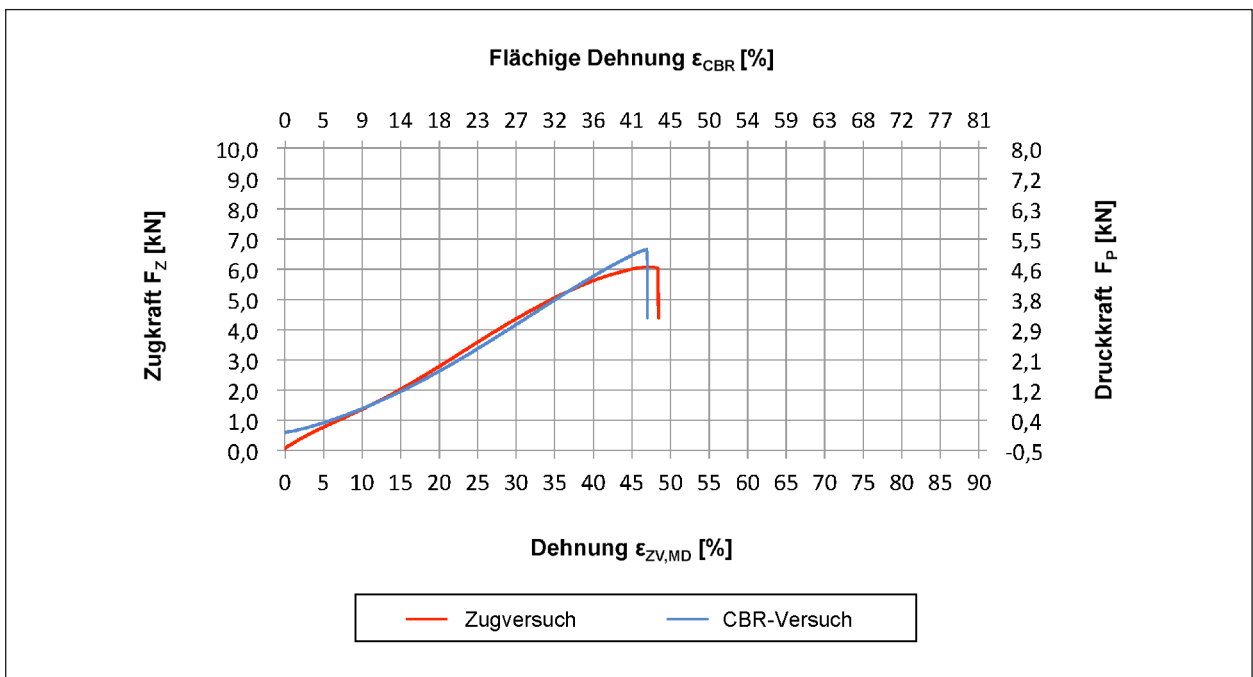


Bild 6-6: Kombination der Kraft-Dehnungs-Linien aus Zugversuch in MD und aus Stempeldurchdrückversuch am Beispiel von ME-380

6.6 Auswertung der Untersuchungsergebnisse an den Geotextilien

Im Anhang I sind die grafischen Auswertungen aller Geotextilprüfungen sowohl für den ALZ als auch für die beanspruchten Proben dargestellt.

Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Proben im ALZ in Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse zeigt sowohl für die Stempeldurchdrückkräfte (Bild 6-7 (Bild I-11)), für das Arbeitsvermögen beim Stempeldurchdrückversuch (Bild 6-8 (Bild I-2)), für die Zugfestigkeit (Bild 6-9 (Bild I-12)) und für das Arbeitsvermögen beim Zugversuch (Bild 6-10 (Bild I-13)) für die hier verwendeten Geotextilien eine gute lineare Abhängigkeit generell und insbesondere für die Produkte bezogen auf die drei Hersteller.

Das wirft die Frage auf, warum nach der Klassifizierung der Geotextilrobustheitsklassen nach Straßenbau-Merkblatt [FGSV-2016] beides verlangt wird. Aus der Historie heraus sollte damit der Einsatz von thermisch verfestigten Vliesstoffen eingeschränkt

werden. Der Einsatz sollte hochdehnfähigen Vliesstoffen vorbehalten sein, um die Trenn- und Filterfunktion in den Vordergrund zu stellen und gegen die Bewehrungsfunktion abzugrenzen.

Anhand der vorliegenden Messungen an den im Forschungsprojekt verwendeten Geotextilien ist eine Forderung eines Mindestflächengewichts nicht notwendig. Das könnte allein schon durch die Vorgabe der Festigkeit mittels Stempeldurchdrückversuch erreicht werden, denn die Festigkeit steht in einem linearen Zusammenhang mit dem Flächengewicht der Geotextilien.

Die Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Stempeldurchdrückkraft konnte praktisch schon dadurch bestätigt werden, dass in Anhang H kongruente Kraft-Dehnungsverläufe gezeigt wurden. Auf Bild 6-11 (Bild I-14) wurden direkt die Zugfestigkeit $T_{max,5\%}$ (Mittelwert aus MD und CMD) über die Stempeldurchdrückkraft $F_{P,5\%}$ aufgetragen. Die Werte korrelieren für die Geotextilien eines jeden Herstellers gut.

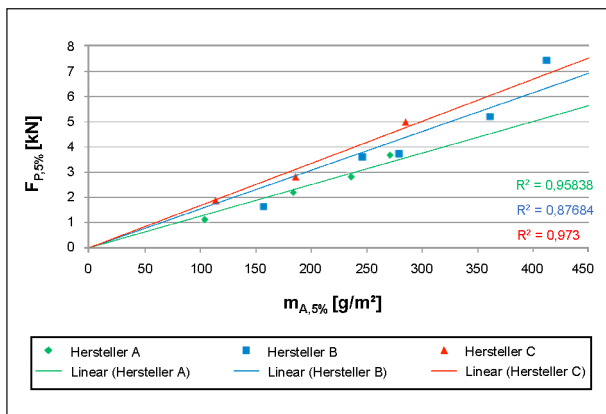


Bild 6-7: Abhängigkeit der Stempeldurchdrückkraft F_P vom Flächengewicht m_A (im ALZ)

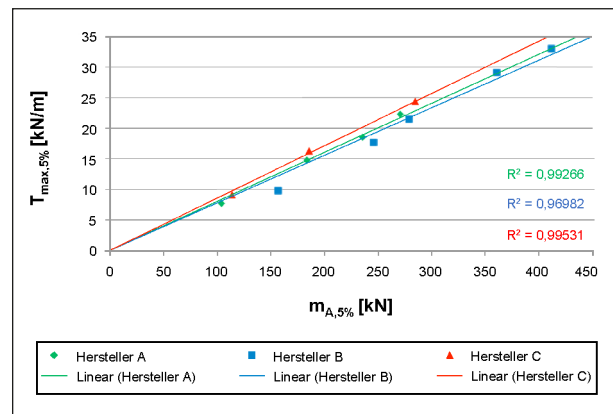


Bild 6-9: Abhängigkeit der Zugfestigkeit T_{max} (MD und CMD) vom Flächengewicht m_A (im ALZ)

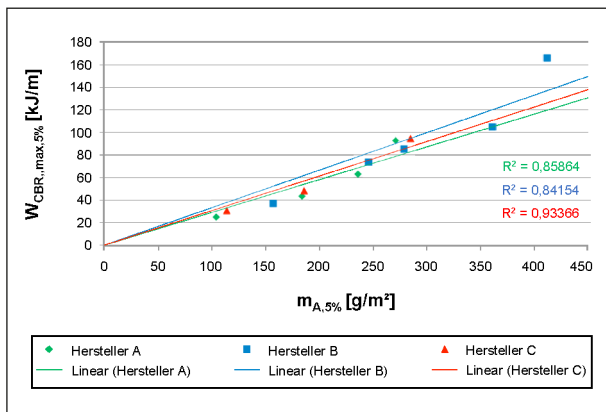


Bild 6-8: Abhängigkeit des Arbeitsvermögens $W_{CBR,max}$ vom Flächengewicht m_A (im ALZ)

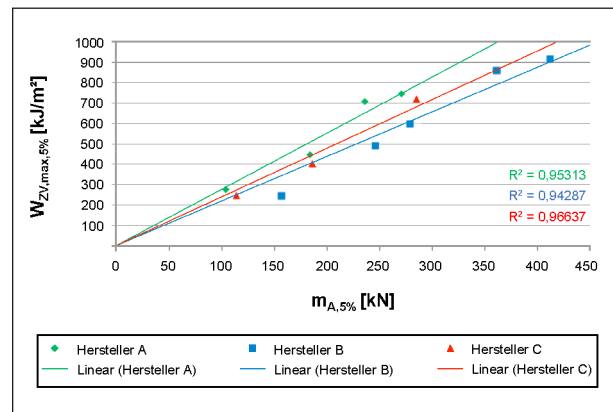


Bild 6-10: Abhängigkeit des Arbeitsvermögens $W_{ZV,max}$ (MD und CMD) vom Flächengewicht m_A (im ALZ)

Neben den Stempeldurchdrück- und den Zugversuchen wurden außerdem der Lochdurchmesser im Kegelfallversuch nach [DIN EN ISO 13433] im Ausgangszustand ermittelt. Wiederum haben alle Geotextilien eines Herstellers sehr gut über das Flächengewicht korreliert. Auffallend war, dass sich der Einfluss der Herstellung des Geotextils nur bis zu einem Flächengewicht von ca. 330 g/m² bemerkbar gemacht hat. Darüber ist der Einfluss – beispielsweise durch eine etwaige thermische Oberflächenbehandlung – nicht mehr zu erwarten. Mit zunehmendem Flächengewicht wurden immer kleinere Löcher gemessen. Alle Ergebnisse sind auf Bild 6-12 (Bild I-15) dargestellt. Auffallend war, dass bei niedrigen Flächengewichten die Lochdurchmesser der Produkte von Hersteller A doppelt so groß waren wie bei Hersteller B. Dies lässt den Schluss zu, dass bei geeignetem Herstellungsverfahren eine geringere Beschädigung insbesondere infolge der Beschüttung durch spitzes Schüttmaterial möglich ist.

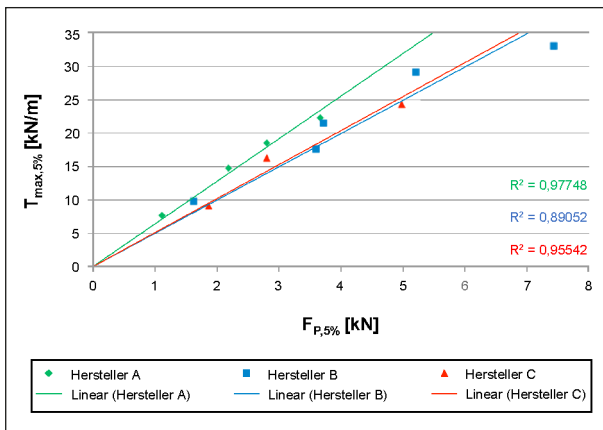


Bild 6-11: Korrelation von Stempeldurchdrückkraft F_P und Zugfestigkeit T_{max} (MD und CMD) (im ALZ)

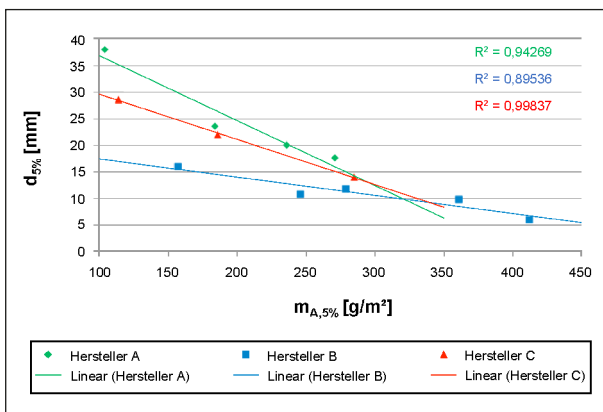


Bild 6-12: Abhängigkeit des Lochdurchmessers D_C beim Kegelfallversuch vom Flächengewicht m_A (im ALZ)

Zur Verminderung der Beschädigungen durch die Beschüttung mit spitzem Steinmaterial könnte daher eine Begrenzung des Lochdurchmesser beim Kegelfallversuch nach DIN EN ISO 13433 auf ca. 15 mm hilfreich sein. Die Messungen zeigen, dass dieses Maß eingehalten werden kann.

Auf Bild 6-13 (Bild I-16) sind „gemittelte Dehnungen“ sowohl der Messproben aus den Zugversuchen als auch der Messproben aus den Stempeldurchdrückversuchen gegen die flächenbezogene Masse aufgetragen. Um die Datenbasis zu erhöhen, wurden hier die linearen Dehnungen aus dem Zugversuch mit den flächigen Dehnungen des Stempeldurchdrückversuchs gemischt. Dies zeigte, dass bei einem Hersteller die Dehnungen mit zunehmendem Flächengewicht zurückgingen, beim nächsten Hersteller gleichblieben und beim dritten Hersteller anstiegen. Dies zeigt, dass manche Herstellungstechniken auf die Erhöhung der Festigkeit ausgerichtet sind während andere darauf abzielen, eine möglichst hohe Verformbarkeit zu erreichen.

Die höchst unterschiedliche Verformbarkeit verschiedener Geotextilien ist am Beispiel von drei ausgewählten Proben in Bild 6-14 (Bild I-17) wiedergegeben. Die Proben ME-120 und MET-120 weisen unmittelbar nach Lastaufbringung durch den Druckstempel ohne große Verformung einen Widerstand auf. Hingegen verformt sich ME-160 sehr stark bis es einen merklichen Widerstand aufbringt. Bei Prüfung nach Norm würden diese Verformungen unter den Tisch fallen, weil erst ab 20 N eine Kraftaufzeichnung erfolgt. ME-160 weicht der Belastung bei Versuchsbeginn weitgehend aus, ohne stark beansprucht zu werden bzw. ohne dabei Kraftreserven in Anspruch nehmen zu müssen. Das

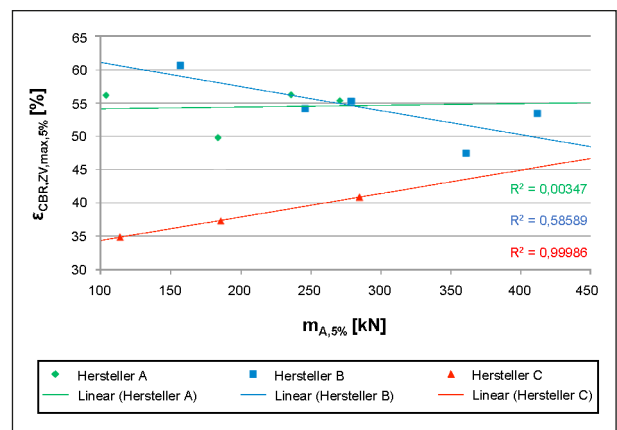


Bild 6-13: Abhängigkeit der „mittleren Dehnung“ aus Zug- und CBR-Versuch $\epsilon_{CBR,ZV,max}$ vom Flächengewicht m_A (im ALZ)

kann dadurch erreicht werden, dass hierbei nur eine gemäßigte mechanische Verfestigung der Stapelfasern im Herstellungsprozess der Geovliesstoffe erfolgt. Bei der Beanspruchung im Stempeldurchdrückversuch tritt dann erst eine Entschlaufung/Orientierung der in sich verschlungenen Fasern ein, bevor sich die Fasern selbst zu dehnen beginnen.

Auf den Bildern 6-15 bis 6-17 (Bilder I-9 bis I-18) wird gezeigt, wie sich die Druckkraft-Durchdrückweg-Linie durch die Beanspruchung in den Feldversuchen verändert. Stellvertretend für jeden Hersteller wurden drei Produkte ausgewählt anhand derer gezeigt wurde, dass bei Hersteller A die Festigkeit für die Probe ME-275 kaum abnimmt hingegen aber mit zunehmender Beanspruchung eine Versteifung eintritt und dass das Arbeitsvermögen abnimmt (Bild 6-15 (Bild I-19)). Bei Hersteller B ist für die Probe ME-260 ein ähnliches Verhalten festzustellen. Dagegen verläuft die Kraft-Weg-Linie bei Hersteller

C (Bild 6-17 (Bild I-20)) gänzlich anders. Hier nehmen bei der Probe MET-315 die Festigkeit und der Verformungsweg ab. Gleichzeitig geht dadurch auch das Arbeitsvermögen zurück. Die Versteifung bei den Proben der Hersteller A und B kann dadurch erklärt werden, dass infolge der Einbauversuche noch Bodenpartikel in den Luftporen der voluminösen Geovliesstoffe eingelagert waren, die eine Ausrichtung der Fasern (hier im Stempeldurchdrückversuch) behindert haben könnten. Bei dem Geovliesstoff von Hersteller C handelt es sich um ein Produkt mit einer zusätzlichen oberflächigen thermischen Verfestigung. Dadurch ist dieses Geotextil dünner und es kommt auch zu weniger Einlagerungen von Bodenpartikeln, die hier im Stempeldurchdrückversuch die Verformbarkeit behindern könnten.

Ein Vergleich der Zugversuche ausgewählter Produkte nach unterschiedlichen Einbaubeanspru-

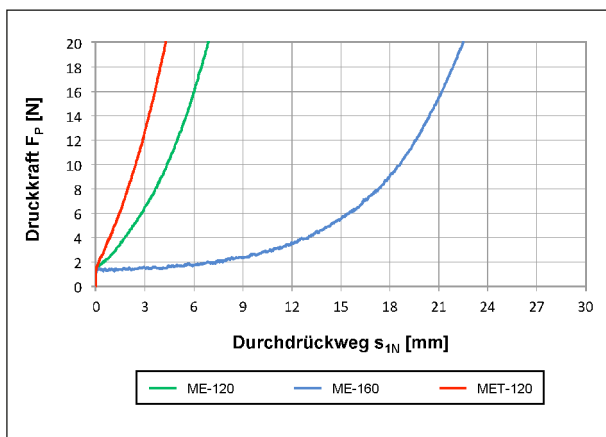


Bild 6-14: Darstellung des Durchdrückwegs s_{1N} für Druckkräfte F_P unter 20 N am Beispiel von drei ausgewählten Produkten

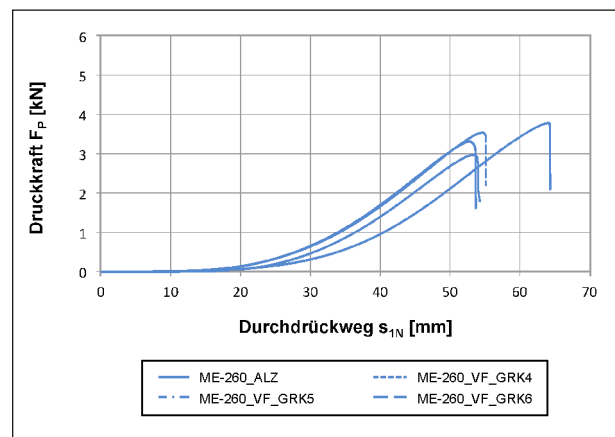


Bild 6-16: Repräsentative Druckkraft-Weg-Linien aus dem CBR-Versuch (im ALZ und aus dem Versuchsfeld), Hersteller B

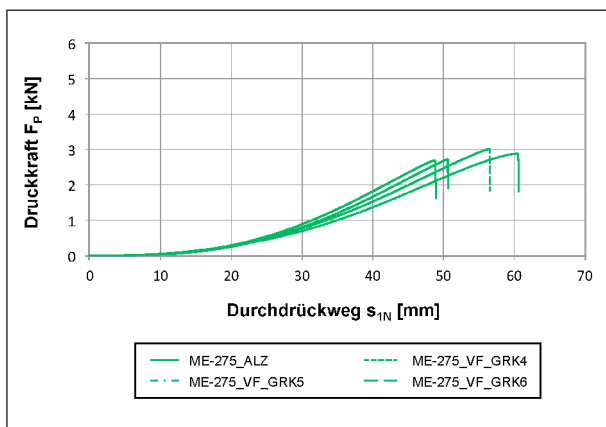


Bild 6-15: Repräsentative Druckkraft-Weg-Linien aus dem CBR-Versuch (im ALZ und aus dem Versuchsfeld), Hersteller A

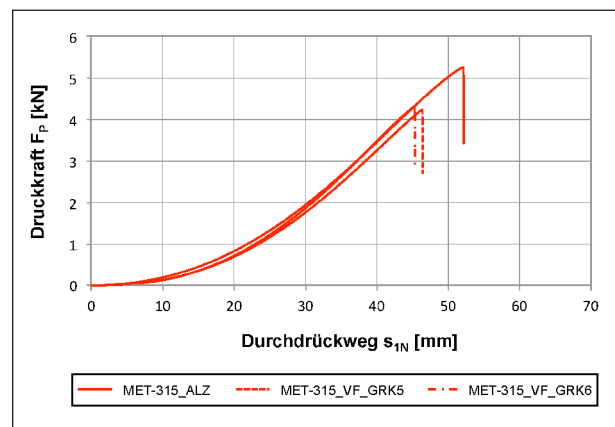


Bild 6-17: Repräsentative Druckkraft-Weg-Linien aus dem CBR-Versuch für ausgewählte Produkte (im ALZ und aus dem Versuchsfeld), Hersteller C

chungen ergibt ein ähnliches Bild. Die Geotextilien der Hersteller A (ME-275) und Hersteller B (ME-260) zeigen, aufgrund von Bodenpartikeleinlagerungen in den ausgebauten Proben, wieder ein stei-

feres Verhalten als im Anlieferungszustand (ALZ) – sowohl die Dehnungen als auch die Festigkeiten gehen zurück (Bild 6-18 (Bild I-21) und Bild 6-19 (Bild I-22)) und damit auch das Arbeitsvermögen. Hingegen zeigt das Geotextil MET-315 des Herstellers C wiederum ein anderes Verhalten. Sowohl die Festigkeiten als auch die Dehnungen nehmen infolge der Beanspruchung stark ab (Bild 6-20 (Bild I-23)) und auch der E-Modul geht runter. Das Arbeitsvermögen nimmt deutlich ab.

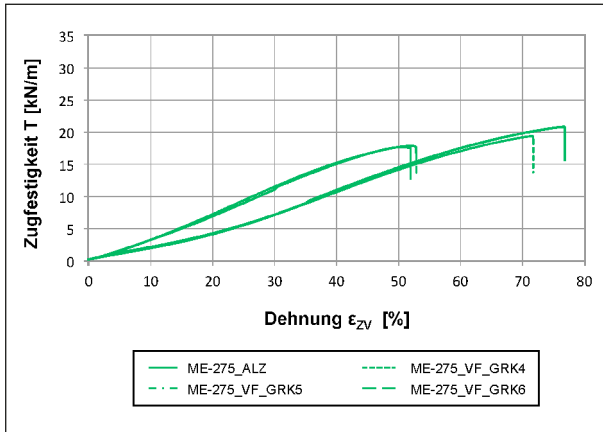


Bild 6-18: Repräsentative Zugkraft-Dehnungs-Linien aus dem Zugversuch (im ALZ und aus dem Versuchsfeld), Hersteller A

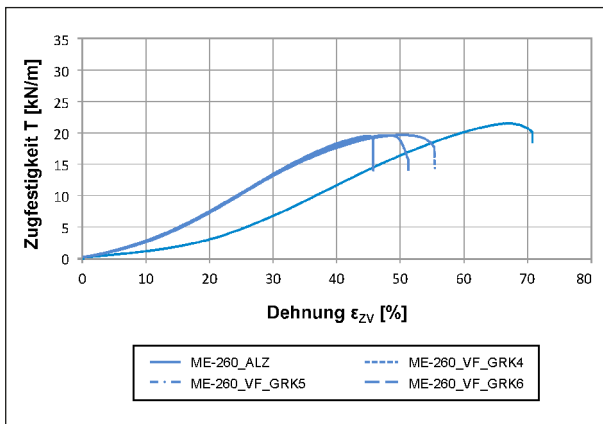


Bild 6-19: Repräsentative Zugkraft-Dehnungs-Linien aus dem Zugversuch (im ALZ und aus dem Versuchsfeld), Hersteller B

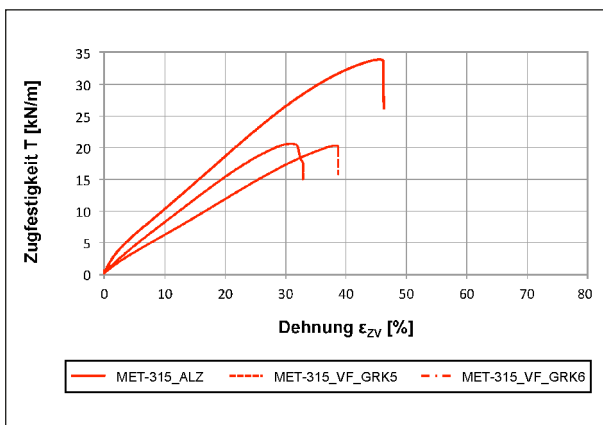


Bild 6-20: Repräsentative Zugkraft-Dehnungs-Linien aus dem Zugversuch (im ALZ und aus dem Versuchsfeld), Hersteller C

6.7 Auswertung des Arbeitsvermögens der Geotextilien

In den weiteren Betrachtungen wird der Fokus auf das Arbeitsvermögen gelegt, weil hierbei sowohl die Festigkeit als auch die Dehnung miteingehen. Auf den Bildern 6-21 (Bild I-24) bis 6-24 (Bild I-25) wurde für jedes Versuchsfeld separat das aus dem

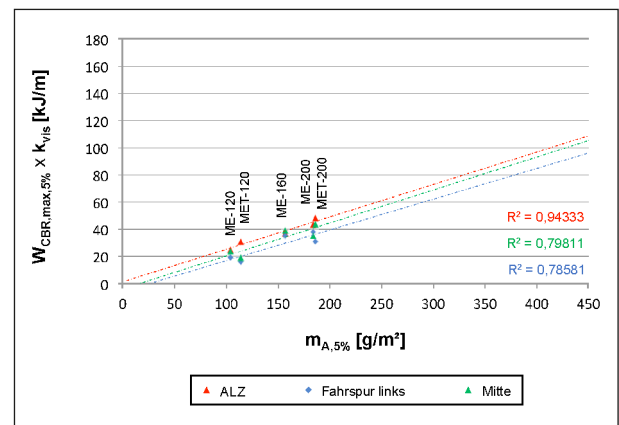


Bild 6-21: Arbeitsvermögens $W_{CBR,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK3

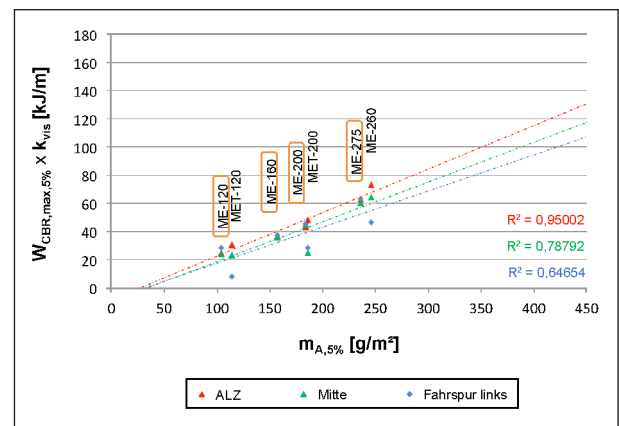


Bild 6-22: Arbeitsvermögens $W_{CBR,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK4

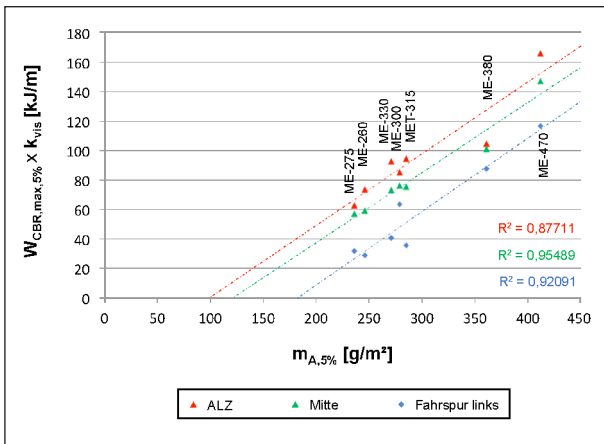


Bild 6-23: Arbeitsvermögens $W_{CBR,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK5

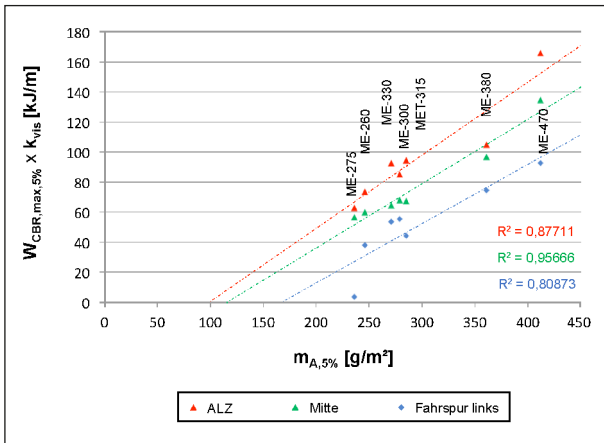


Bild 6-24: Arbeitsvermögens $W_{CBR,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK6

Stempeldurchdruckversuch abgeleitete Arbeitsvermögen $W_{CBR,max,5\%}$ gegenüber dem Flächengewicht $m_{A,5\%}$ aufgetragen. Zusätzlich wurde die visuelle Inaugenscheinnahme berücksichtigt und das Arbeitsvermögen mit dem Faktor k_{vis} abgemindert.

Im VF GRK4 ist festzustellen, dass die Proben (ME-120, ME-160, ME-200 und ME 275) aus VF GRK4a infolge der wenigen Lkw-Überfahrten kaum geschädigt wurden.

Es zeigte sich für alle Proben ein mehr oder minder linearer Anstieg des Arbeitsvermögens mit der Zunahme des Flächengewichts. Diese Zunahme war identisch sowohl für die Proben im ALZ als auch für die Proben aus der Mitte zwischen den Fahrspuren als auch für die Proben aus dem Bereich der linken Fahrspur. Aus der Fahrspur rechts wurden keine Messproben entnommen. Die Proben Fahrspur

rechts dienten als Ersatzproben. Sie wurden visuell beurteilt, aber es wurden keine mechanischen Prüfungen daran vorgenommen.

Unter den Fahrspuren zeigten die Proben größere Schädigungen, hier in Form des niedrigeren Arbeitsvermögens, als die Proben aus der Mitte also zwischen den Rädern. Dies entspricht auch der Erwartungshaltung, dass unmittelbar unter den Rädern das Geotextil stärker beansprucht wird als zwischen zwei Fahrspuren. Dort kann das Geotextil infolge der sich beidseitig einstellenden Spurrinnen zwar auch gespannt werden aber die unmittelbare Druckbelastung der groben Körnung der Tragschicht auf das Geotextil ist dort nicht vorhanden. Die vorweggeschickte Verdichtung der Tragschicht durch den Walzenzug kann die erste Schädigung bewirken. Komplette separieren ließen sich diese aufeinanderfolgenden Einflüsse im Nachhinein nicht.

Die gesamte Schädigungsarbeit $W_{Sges,CBR}$ und $W_{Sges,ZV}$ aus Stempeldurchdruck- bzw. Zugversuch in Kombination mit einer optischen Ansprache wird folgendermaßen definiert:

$$W_{Sges,CBR} = W_{ALZ,CBR} - (W_{Ausbau,CBR} \cdot k_{vis})$$

$W_{Sges,CBR}$ Schädigungsarbeit Stempeldurchdruckversuch in kJ/m

$W_{ALZ,CBR}$ Arbeitsvermögen $W_{CBR,max,5\%}$ beim Stempeldurchdruckversuch im Anlieferungszustand (ALZ) in kJ/m

$W_{Ausbau,CBR}$ Rest-Arbeitsvermögen $W_{CBR,max,5\%}$ beim Stempeldurchdruckversuch nach Beanspruchung im jeweiligen Versuchsfeld in kJ/m

k_{vis} visueller Beschädigungsfaktor aus optischer Ansprache (Anhang E)

$$W_{Sges,ZV} = W_{ALZ,ZV} - (W_{Ausbau,ZV} \cdot k_{vis})$$

$W_{Sges,ZV}$ Schädigungsarbeit Zugversuch in kJ/m²

$W_{ALZ,ZV}$ Arbeitsvermögen $W_{ZV,max,CMD,5\%}$ beim Zugversuch im ALZ in kJ/m²

$W_{Ausbau,ZV}$ Rest-Arbeitsvermögen $W_{ZV,max,CMD,5\%}$ beim Zugversuch nach Beanspruchung im jeweiligen Versuchsfeld in kJ/m²

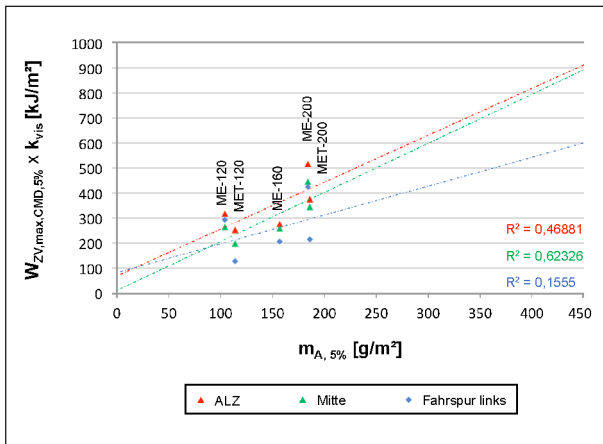


Bild 6-25: Arbeitsvermögens $W_{ZV,CMD,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK3

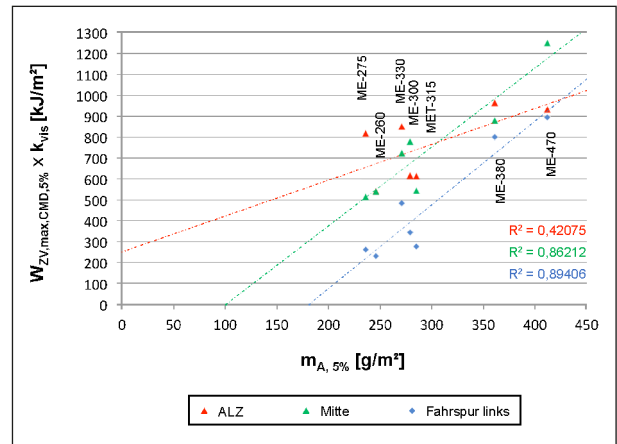


Bild 6-27: Arbeitsvermögens $W_{ZV,CMD,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK5

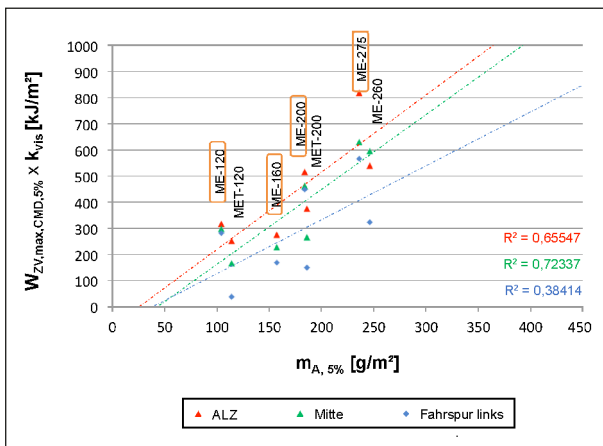


Bild 6-26: Arbeitsvermögens $W_{ZV,CMD,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK4

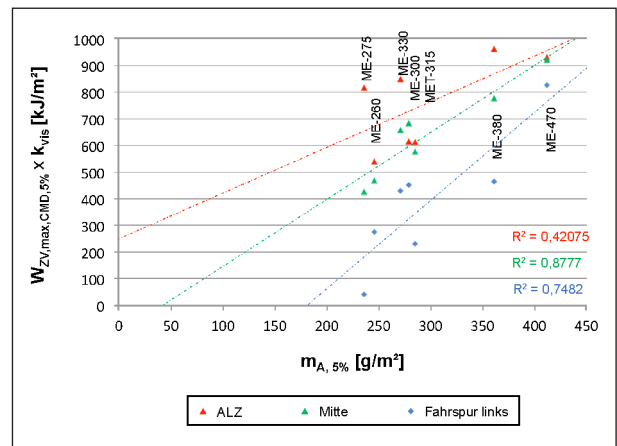


Bild 6-28: Arbeitsvermögens $W_{ZV,CMD,max}$ (abgemindert mit k_{vis}) vs. Flächengewicht m_A (im ALZ, aus Fahrspur links und Mitte), VF GRK6

Auf den Bildern 6-25 (Bild I-26) bis 6-28 (Bild I-27) wurde für jedes Versuchsfeld separat das aus dem Zugversuch abgeleitete Arbeitsvermögen $W_{ZV,max,CMD,5\%}$ gegenüber dem Flächengewicht $m_{A,5\%}$ aufgetragen. Die visuelle Inaugenscheinahme ist dabei wiederum mit dem Faktor k_{vis} als $W_{Ausbau,ZV} \cdot k_{vis}$ eingegangen. Anders als beim Stempeldurchdruckversuch sind die Abhängigkeiten des Arbeitsvermögens vom Flächengewicht für den Zugversuch hier nicht so gleichmäßig. Der Grund kann darin liegen, dass beim Zugversuch nur die Querrichtung der Geotextilien untersucht wurde und beim Stempeldurchdruckversuch die Geotextilien richtungsunabhängig (radial gleichmäßig) in Anspruch genommen werden. Aber im Ergebnis erhält man auch hier das größte Arbeitsvermögen im ALZ und das geringste in der Fahrspur bezogen auf das Flächengewicht.

Bilder 6-29 (Bild I-28) bis 6-33 (Bild I-29) betrachten einen Schädigungsgrad, den die einzelnen Proben im jeweiligen Versuchsfeld erlitten haben. Am Beispiel des Stempeldurchdruckversuchs ergibt sich der „Schädigungsgrad CBR“ aus dem Verhältnis der Schädigungsarbeit und dem Arbeitsvermögen im ALZ:

Schädigungsgrad CBR:

$$\frac{W_{Sges,CBR}}{W_{ALZ,CBR}} = \frac{W_{ALZ,CBR} - (W_{Ausbau,CBR} \cdot k_{vis})}{W_{ALZ,CBR}}$$

$$= 1 - \frac{W_{Ausbau,CBR} \cdot k_{vis}}{W_{ALZ,CBR}}$$

bzw.

Schädigungsgrad CBR in Prozent:

$$\frac{W_{Sges,CBR}}{W_{ALZ,CBR}} = 100\% - \frac{W_{Ausbau,CBR} \cdot k_{vis} \cdot 100\%}{W_{ALZ,CBR}}$$

Der Schädigungsgrad $\frac{W_{Sges}}{W_{ALZ}}$ wurde in der weiteren Auswertung als eine Kombination der Schädigung aus Zug- und Stempeldurchdruckversuch verwendet:

Schädigungsgrad in Prozent:

$$\frac{W_{Sges}}{W_{ALZ}} = 100 \% - 0,5 \cdot \left(\frac{W_{Ausbau,ZV}}{W_{ALZ,ZV}} + \frac{W_{Ausbau,CBR}}{W_{ALZ,CBR}} \right) \cdot k_{vis} \cdot 100 \%$$

Mit zunehmendem Flächengewicht nimmt der Schädigungsgrad ab. Bild 6-29 (Bild I-30) zeigt für VF GRK3, dass bei 3 von 5 Proben der Schädigungsgrad unter 20 % lag. Die beiden anderen Proben waren thermisch oberflächenbehandelt und zeigten Schädigungsgrade zwischen 40 und 50 %. Zur besseren Visualisierung sind die Bereiche der Schädigungsgrade über 20 % in den Bildern 6-29 (Bild I-31) bis 6-33 (Bild I-32) grau schraffiert.

In den Bildern 6-29 (Bild I-23) bis 6-32 (Bild I-25) ist jeweils eine vertikale blau gestrichelte Linie eingezeichnet. Diese kennzeichnet die Anforderungen des „Merkblatts über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (M Geok E)“ [FGSV-2016] mit einem Mindest-Flächengewicht von 150 g/m² für GRK 3, 250 g/m² für GRK 4 und 300 g/m² für GRK 5. Für das Versuchsfeld GRK 3 wurde die 5 Proben so ausgewählt, dass 2 darunter und 3 darüber lagen. Bei VF GRK4 wurden hingegen alle Proben so ausgewählt, dass sie knapp oder deutlich unter der Vorgabe von M Geok E [FGSV-2016]. Es lag die Erwartungshaltung vor, dass sich die modernen Geovliesstoffe trotz geringerem Flächengewicht heutzutage als ausreichend robust erweisen würden, um den Beanspruchungen gemäß GRK 3, GRK 4 und GRK 5 als nach M Geok E [FGSV-2016] genügen zu können. Dies hatte sich aber am Beispiel von VF GRK4 nicht bewahrheitet.

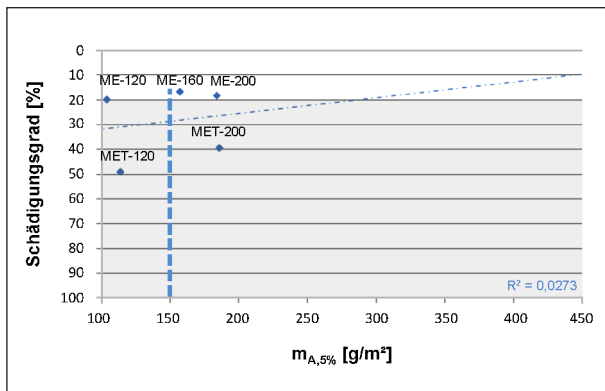


Bild 6-29: Schädigungsgrad $\frac{W_{Sges}}{W_{ALZ}}$ vs. Flächengewicht m_A , VF GRK3

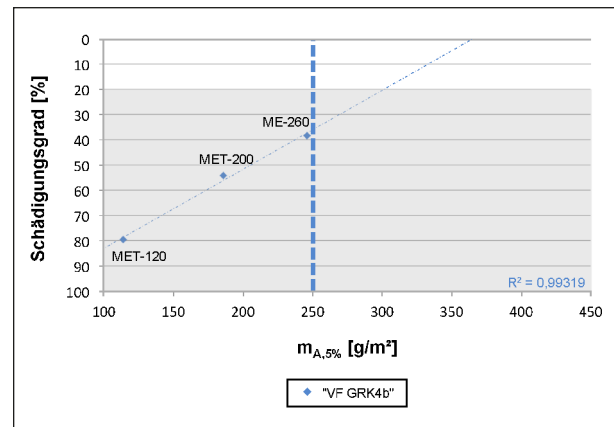


Bild 6-31: Schädigungsgrad $\frac{W_{Sges}}{W_{ALZ}}$ vs. Flächengewicht m_A , VF GRK4b

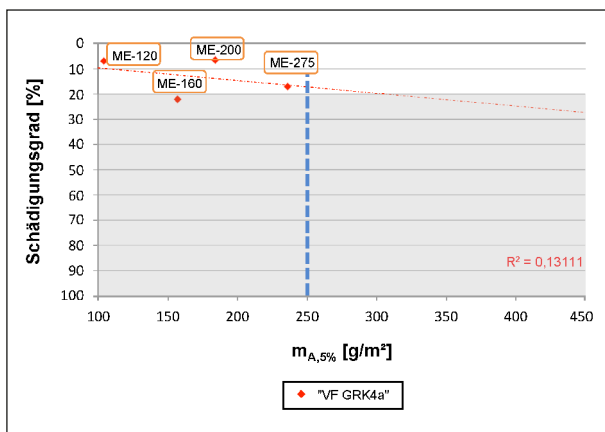


Bild 6-30: Schädigungsgrad $\frac{W_{Sges}}{W_{ALZ}}$ vs. Flächengewicht m_A , VF GRK4a

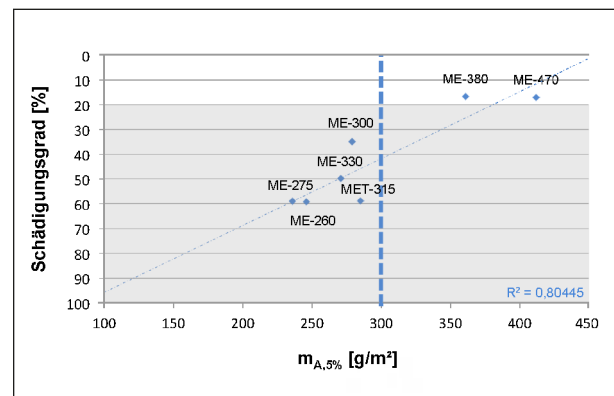


Bild 6-32: Schädigungsgrad $\frac{W_{Sges}}{W_{ALZ}}$ vs. Flächengewicht m_A , VF GRK5

Die Proben aus dem VF GRK4a (Bild 6-30 (Bild I-33a)) wiesen nur Schädigungsgrade unter 20 % auf. Hier ist die Beanspruchung äußerst niedrig ausgefallen, weil dort nur zwei Lkw-Überfahrten ausgereicht hatten, um die anvisierte Spurrinnentiefe zu erreichen. Grundlage für die mechanische Beanspruchung der eingebauten GTX-N war die Verformung der Fahrbahnoberfläche. Aber offensichtlich haben diese minimalen Überfahrten kaum zu einer Schädigung der Proben beigetragen.

Hingegen wurden die 3 Proben im VF GRK4b sehr stark geschädigt (Bild 6-31 (Bild I-34b)). Hier wurden Schädigungsgrade zwischen 40 % und 80 % festgestellt.

Im VF GRK5 zeigten die 5 leichteren Geotextilien mit Flächengewichten unter 300 g/m² allesamt relativ große Schädigungen während die beiden schwereren Geotextilien nur Schädigungsgrade unter 20 % aufwiesen (Bild 6-32 (Bild I-35)). Die Proben aus dem VF GRK6 zeigten alle Schädigungsgrade zwischen 30 % und 90 % (Bild 6-33 (Bild I-36)).

Um die Schädigungsgrade für jede Geotextil-Robustheitsklasse beispielsweise auf weniger als 20 % zu begrenzen, wäre grob gesagt für jede Geotextil-Robustheitsklasse nach dem derzeitigen Klassifizierungssystem ein um ca. 100 g/m² höheres Flächengewicht nötig. Dies lässt sich aus den Schnittpunkten der linearen Regressionskurven und dem Schädigungsgrad bei 20 % aus den Bildern 6-29 (Bild I-37) bis 6-33 (Bild I-38) ableiten.

Dieser Schädigungsgrad von 20 % wurde ebenso wie ein Schädigungsgrad von 50 % willkürlich gewählt. Beide Abnahmekriterium wurden im Folgenden für die Bewertung der „Robustheit“ betrachtet. Zur Illustration der visuellen Schädigung zeigen die

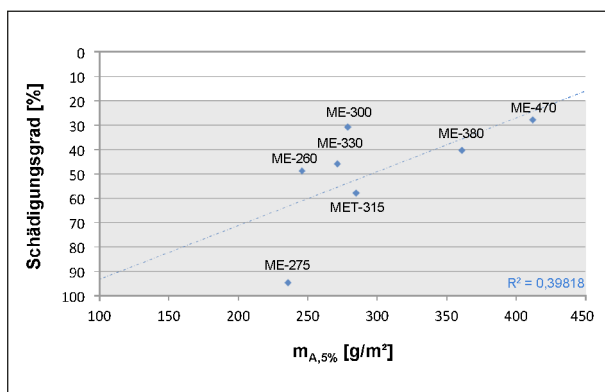


Bild 6-33: Schädigungsgrad $\frac{W_{Sges}}{W_{ALZ}}$ vs. Flächengewicht $m_{A,5\%}$, VF GRK6

Bilder 6-34 und 6-35 jeweils Beispiele von Proben, die mit Schädigungsgraden von 20 % bzw. 50 % eingestuft worden sind.

In Tabelle 6-7 (Tabelle I-1) wurden alle Proben für jedes Versuchsfeld, auf dem sie eingesetzt wurden, bewertet, ob sie den Anforderungen des Merkblatts [FGSV-2016] entsprochen hatten oder nicht. Das Merkblatt „M Geok E“ [FGSV-2016] unterteilt die Geotextilien in mehrere Geotextil-Robustheitsklassen (GRK). Im vorliegenden Fall wurden die Proben den Klassen GRK 2 bis GRK 5 zugeordnet. Die Zuordnung GRK 2 stammt noch aus der vorherigen Version des Merkblatts „M Geok E“ [FGSV-2016]. Sie ist in der gültigen Ausgabe nicht mehr enthalten.

Die Bewertung wurde für jedes der 12 Produkte vorgenommen. 6 der 12 Produkte (ME-120 ME-200,



Bild 6-34: Beispiel einer Probe (ME-160-GRK4) mit einem Schädigungsgrad von 20 %



Bild 6-35: Beispiel einer Probe (ME-330-GRK5) mit einem Schädigungsgrad von 50 %

Produkt	F _{P,5%} [kN]	m _{A,5%} [g/m ²]	M Geok E	„VF GRK2“ fiktiv	„VF GRK3“	„VF GRK4“	„VF GRK5“	„VF GRK6“	Anforderung erfüllt?
ME-120	1,12	104	GRK 2		≤ 20 %	≤ 20 %			ja
ME-200	2,19	184	GRK 3		≤ 20 %	≤ 20 %			ja
ME-275	2,81	236	GRK 3			≤ 20 %	> 20 %	> 20 %	ja
ME-330	3,37	271	GRK 4				> 20 %	> 20 %	?
ME-160	1,63	157	GRK 3		≤ 20 %	> 20 %			ja
ME-260	3,60	246	GRK 3			> 20 %	> 20 %	> 20 %	?
ME-300	3,72	279	GRK 4				> 20 %	> 20 %	?
ME-380	5,21	361	GRK 5				≤ 20 %	> 20 %	ja
ME-470	7,43	412	GRK 5				≤ 20 %	> 20 %	ja
MET-120	1,87	114	GRK 2		> 20 %	> 20 %			?
MET-200	2,81	186	GRK 3		> 20 %	> 20 %			nein
MET-315	4,89	283	GRK 4				> 20 %	> 20 %	?
„?“ nicht entsprechend der Anforderung geprüft									

Tab. 6-7: Überprüfung der GRK für einen zulässigen Schädigungsgrad von 20 %

ME-275, ME-160, ME-380, ME-470) entsprachen demnach in den jeweils eingesetzten Versuchsfeldern den ihnen zugewiesenen Anforderungen für einen Schädigungsgrad von 20 %. Wie schon erwähnt wurden 5 von 12 Produkten (ME-330, ME-260, ME-300, MET-120, MET-315) ausschließlich in Versuchsfeldern eingebaut, die nicht ihrer Klassifizierung entsprachen. Stattdessen wurden sie in anspruchsvolleren Versuchsfeldern getestet und dort genügten sie nicht den Anforderungen eines Schädigungsgrads von 20 %. Dennoch könnten aber diese Produkte einer Beanspruchung entsprechend ihrer Klassifizierung genügen. Das konnte in dem Versuchsprogramm nicht überprüft werden. 1 der 12 Produkte (MET-200) wurde adäquat seiner Klassifizierung in entsprechenden Versuchsfeldern eingebaut und hat dabei nicht die o. g. Anforderung erfüllt.

In einer zweiten Betrachtung wurde ein Schädigungsgrad von 50 % bewertet. Dieses Kriterium wiederum wurde durch 11 von 12 Produkten eingehalten (Tabelle 6-8 (Tabelle I-2)). Lediglich für MET-315 konnte der Nachweis der Eignung als GRK 4 Geotextil nicht erbracht werden, weil es in VF GRK4 nicht zur Anwendung kam und in VF GRK5 hingegen die Anforderung eines zul. Schädigungsgrads von 50 % nicht erfüllt hat.

Dies eröffnet die Diskussion, ob die Anforderungen an die Geotextilrobustheitsklassen ausreichend sind. Grundsätzlich muss die Frage gestellt werden, ob die Forderung einer Mindest-Stempeldruckkraft und eines Mindest-Flächengewichts hier Sinn macht oder ob nicht besser die Festigkeit und die Verformbarkeit als Kriterien dienen müssten, um die Robustheit zu quantifizieren.

Die Verformbarkeit der Geovliesstoffe spielt für Trennlagen eine große Rolle. Die thermisch nachbehandelten Geotextilien zeigten Höchstzugkraftdehnungen bis zu 43 % bzw. Stempeldruckdrücke bis zu 50 mm. Die thermisch nicht nachbehandelten Geovliesstoffe lagen deutlich darüber. Deshalb folgen die thermisch oberflächenbehandelten Geovliesstoffe vornehmlich dem Widerstandsprinzip und die nicht behandelten Geovliesstoffe dem Ausweichprinzip. Nach der Freilegung der Proben war deutlich zu erkennen, dass die dehnfähigeren Geovliesstoffe ohne thermische Oberflächenbehandlung, die ihnen durch die grobkörnige Tragschicht aufgezwungenen Verformungen mitmachten, ohne dafür Widerstandskräfte zu mobilisieren. Sie folgten der plastischen Verformung des Untergrunds (Bild 6-37) und passten sich der Form des grobkörnigen Tragschichtmaterials an ohne dass dabei Beschädigungen auftraten (Bild 6-36). Sie

Produkt	$F_{P,5\%}$ [kN]	$m_{A,5\%}$ [g/m ²]	<i>M Geok E</i>	„VF GRK2“ fiktiv	„VF GRK3“	„VF GRK4“	„VF GRK5“	„VF GRK6“	Anforderung erfüllt?
ME-120	1,12	104	GRK 2		≤ 50 %	≤ 50 %			ja
ME-200	2,19	184	GRK 3		≤ 50 %	≤ 50 %			ja
ME-275	2,81	236	GRK 3			≤ 50 %	–	–	ja
ME-330	3,37	271	GRK 4				≤ 50 %	≤ 50 %	ja
ME-160	1,63	157	GRK 3		≤ 50 %	≤ 50 %			ja
ME-260	3,60	246	GRK 3			≤ 50 %	> 50 %	≤ 50 %	ja
ME-300	3,72	279	GRK 4				≤ 50 %	≤ 50 %	ja
ME-380	5,21	361	GRK 5				≤ 50 %	≤ 50 %	ja
ME-470	7,43	412	GRK 5				≤ 50 %	≤ 50 %	ja
MET-120	1,87	114	GRK 2		≤ 50 %	> 50 %			ja
MET-200	2,81	186	GRK 3		≤ 50 %	> 50 %			ja
MET-315	4,89	283	GRK 4				> 50 %	> 50 %	?

„?“ nicht entsprechend der Anforderung geprüft

Tab. 6-8: Überprüfung der GRK für einen zulässigen Schädigungsgrad von 50 %



Bild 6-36: Steineindruck in einem hoch dehnfähigen Geovliesstoff auf weichem Untergrund

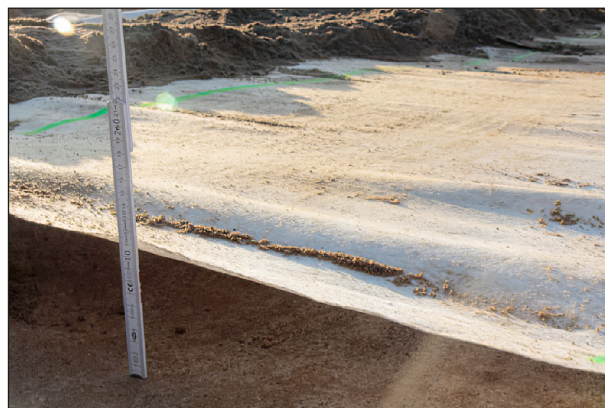


Bild 6-38: Gespanntes GTX-N mit thermischer Oberflächenbehandlung nach der Freilegung



Bild 6-37: Abdruck des Steins im weichen Untergrund

standen nach der Entfernung der Tragschicht nicht unter Spannung. Hingegen zeigten die Geovliesstoffe mit thermischer Oberflächenbehandlung, dass sie sich zwar unter Belastung elastisch verformen aber die durch die Verdichtung der Tragschicht eingetragenen Verformungen erzeugten große Zugspannungen in diesen Proben, dass sie auch nach der Freilegung noch wie ein Trampolin gespannt waren (Bild 6-38).

Um dem Ausweichprinzip hinreichend Rechnung zu tragen, sollten u. E. im Straßenbau hoch dehnfähige Geovliesstoffe als Trennlagen unter der Trag-

schicht zum Einsatz kommen. Deshalb sollte man für alle Geovliesstoffe einen Durchdrückweg beim Stempeldurchdrückversuch von mindestens 50 mm fordern.

Es stellt sich ferner die Frage, ob es akzeptabel ist, dass ein Geotextil durch den Einbau einen Schädigungsgrad von beispielsweise 50 % erleiden darf oder wäre nicht sogar schon 20 % zu viel? Aus unserer Sicht wäre grundsätzlich anzustreben, dass keinerlei Schädigungen der geotextilen Trennlagen in der Praxis auftreten, um deren Funktionsfähigkeit vollflächig und dauerhaft sicherstellen zu können. Insbesondere wenn das Geotextil zusätzlich noch eine Filterfunktion zu erfüllen hat, dann muss ein schadloser Einbau sichergestellt werden. Löcher und Risse in einem geotextilen Filter würden eine Filterbemessung ad absurdum führen.

Bild 6-39 zeigt am Beispiel von ME-275 wie sich das Arbeitsvermögen im ALZ und nach dem Ausbau aus dem Versuchsfeld verändert. Die rot und grün schraffierten Flächen zusammen stellen den Ausgangszustand dar ($W_{ALZ} = W_0 + W_1 + W_2 + W_3'$). Die Prüfung im Stempel-Durchdrückversuch nach dem Ausbau ergab die blau schraffierte Fläche W_3 . W_3' stellt das flächenäquivalente Arbeitsvermögen

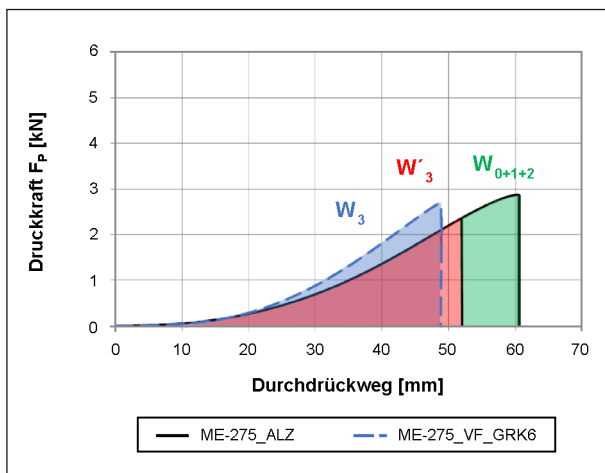


Bild 6-39: Darstellung der Schädigungsarbeiten W_0 , W_{1+2} und dem Rest-Arbeitsvermögen W_3 am Beispiel von ME-275 im ALZ

- W_0 Schädigungsarbeit aus der Beschüttung und dem anschließenden Verdichten
- W_1 Schädigungsarbeit aus den eingebrachten Spurrinnen
- W_2 Schädigungsarbeit aus den Lkw-Überfahrten
- W_3 restliches Arbeitsvermögen nach Schädigung im Versuchsfeld
- W_3' flächenäquivalentes Arbeitsvermögen nach Schädigung im Versuchsfeld

von W_3 dar. Nach der Einbaubeschädigung steht dem Geotextil praktisch weniger Arbeitsvermögen, also weniger Festigkeit und geringere Dehnfähigkeit, zur Verfügung als im ALZ.

Für das bessere Verständnis der ermittelten Schädigungsarbeiten wurden diese in diesem Beispiel anhand der Stempeldurchdrückversuche ausgewertet. Die gesamte Schädigungsarbeit $W_{S,ges,CBR}$ setzt sich dabei aus einer Schädigungsarbeit W_0 und der Schädigungsarbeit W_{1+2} zusammen. W_0 wird definiert als Schädigungsarbeit infolge Beschüttung und anschließender Verdichtung mit Walzenzug. Diese Schädigung mussten weitestgehend die Proben aus dem Bereich zwischen den Fahrspuren erfahren. W_{1+2} ist die Schädigungsarbeit infolge eingebrachter Spurrinnen und den Lkw-Überfahrten.

Tabelle 6-9 (Tabelle I-5) zeigt, dass die Schädigungsarbeit W_{1+2} gegenüber der Schädigungsarbeit W_0 überwiegt. Es ist aber uneinheitlich. Betrachtet man die Schädigungsarbeit für die einzelnen Versuchsfelder und dann noch speziell für die Produkte der drei Hersteller (Tabelle 6-10 (Tabelle I-6)) so zeigt sich, dass zumeist die Produkte des Herstellers C auf allen Versuchsfeldern die größten Schädigungsarbeiten $W_{S,ges,CBR}$ erfahren haben. Die Produkte der Hersteller A und B zeigen tendenziell höhere Schädigungsarbeiten W_{1+2} infolge der Lkw-Überfahrten gegenüber der Schädigungsarbeit W_0 infolge der Verdichtung mit dem Walzenzug. Bei Hersteller C ist es umgekehrt.

Die gesamten Schädigungsarbeiten $W_{S,ges,CBR}$ nehmen im Vergleich der Versuchsfeldern VF GRK3 und VF GRK4b von ca. 10 kJ/m auf ca. 24 kJ/m zu (Tabelle 6-10 (Tabelle I-4)). Bei Betrachtung der Körnungslinien des sandigen Kieses in VF GRK3 und des Sand-Kies-Gemisches in VF GRK4 ist für die beiden Böden kein gravierender Unterschied auszumachen. Aber die Kornform des Kieses ist unterschiedlich. Dies zeigt, dass die Kornform des Schüttmaterials einen wichtigen Anteil an der Schädigung der Geotextilien hat. Es ist eine klare Zunahme der Schädigungsarbeit von VF GRK3 zu VF GRK4b feststellbar.

Ein Anstieg der Schädigungsarbeiten $W_{S,ges,CBR}$ von ca. 39 kJ/m auf ca. 46 kJ/m wurde auch beim Vergleich von VF GRK5 und VF GRK6 festgestellt (Tabelle 6-10 (Tabelle I-4)). Hier wurde in beiden Versuchsfeldern die identische Körnung verwendet.

Produkte	VF GRK	gesamte Schädigungsarbeit $W_{S,ges,CBR}$ [kJ/m]	Schädigungsarbeit W_0 aus Beschüttung und anschließendem Verdichten mit Walzenzug [kJ/m]	Schädigungsarbeit W_{1+2} aus eingebrachten Spurrinnen und Lkw-Überfahrten [kJ/m]
ME-120	3	5,71	1,18	4,53
	4a	0,70	0,70	0,00*
ME-200	3	8,11	8,11	0,00*
	4a	0,00	0,00*	0,00*
ME-275	4a	2,05	2,05	0,00*
	5	31,21	5,72	25,48
	6	59,33	6,31	53,02
ME-330	5	51,96	19,49	32,47
	6	39,10	28,09	11,01
ME-160	3	3,06	0,00*	3,06
	4a	2,13	2,13	0,00*
ME-260	4b	26,94	8,82	18,12
	5	44,80	14,28	30,52
	6	35,75	13,81	21,94
ME-300	5	21,71	8,87	12,84
	6	29,82	17,24	12,59
ME-380	5	17,13	3,65	13,48
	6	30,36	8,01	22,35
ME-470	5	49,49	18,71	30,78
	6	73,48	31,32	42,15
MET-120	3	14,77	11,61	3,15
	4b	22,73	7,14	15,59
MET-200	3	17,44	4,58	12,87
	4b	23,33	23,33	0,00*
MET-315	5	58,97	18,98	40,00
	6	50,50	27,30	23,20

Merke: Gelb hinterlegte Werte stellen den höheren Schädigungsanteil dar.
* negative Schädigungsarbeit wurde zu Null gesetzt

Tab. 6-9: Schädigungsarbeit aus Beschüttung + Verdichtung und Schädigungsarbeit aus Lkw-Überfahrten für jedes einzelne Produkt

Die Unterscheidung zwischen diesen Versuchsfeldern lag in den erzeugten Spurrinnen. Betrachtet man VF GRK5 und VF GRK6, so steigt in VF GRK6 die Schädigungsarbeit W_{1+2} ebenfalls an (Bild 6-40a und 6-40b). VF GRK4a wird bei dieser Betrachtung außer Acht gelassen, weil in diesem Versuchsfeld

nur eine minimale Beanspruchung durch Lkw-Überfahrten auf die Proben ausgeübt wurde. Sowohl W_0 als auch W_{1+2} steigen stetig an. Das zeigt, dass sowohl der Baubetrieb in Form der Beschüttung und anschließender Verdichtung also auch die Lkw-Überfahrten die Geotextilien schädigen.

VF GRK		gesamte Schädigungsarbeit $W_{S,ges,CBR}$ [kJ/m]	Schädigungsarbeit W_0 aus Beschüttung und anschließendem Verdichten mit Walzenzug [kJ/m]	Schädigungsarbeit W_{1+2} aus eingebrachten Spurrinnen und Lkw-Überfahrten [kJ/m]
3	alle Hersteller	9,8	5,1	4,7
	Hersteller A	6,91	4,64	2,27
	Hersteller B	3,06	0,00	3,06
	Hersteller C	16,10	8,09	8,01
4	alle Hersteller	10,9	6,1	4,8
	Hersteller A	0,92	0,92	0,00
	Hersteller B	14,54	5,48	9,06
	Hersteller C	23,03	15,23	7,79
	VF GRK4a	1,22	1,22	0,00
	VF GRK4b	24,33	13,10	11,23
5	alle Hersteller	39,3	12,8	26,5
	Hersteller A	41,58	12,61	28,98
	Hersteller B	33,28	11,38	21,90
	Hersteller C	58,97	18,98	40,00
6	alle Hersteller	45,5	18,9	26,6
	Hersteller A	49,22	17,20	32,01
	Hersteller B	42,35	17,60	24,76
	Hersteller C	50,50	27,30	23,20

Tab. 6-10: Schädigungsarbeit aus Beschüttung + Verdichtung und Schädigungsarbeit aus Lkw-Überfahrten für die Hersteller A, B und C

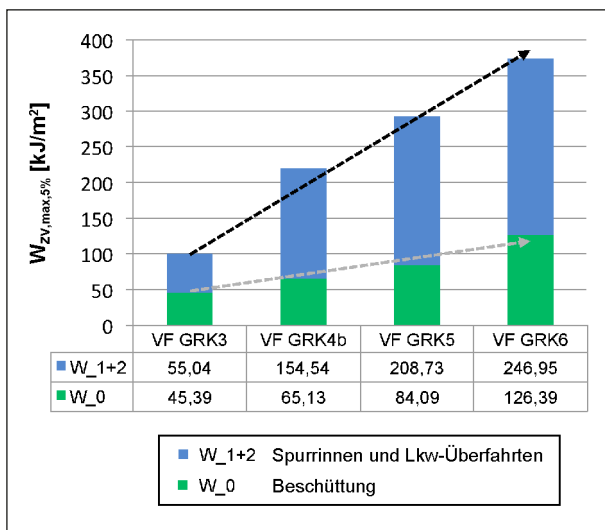


Bild 6-40a: Darstellung der Schädigungsarbeit W_0 infolge Beschüttung und Schädigungsarbeit W_{1+2} infolge eingebrachter Spurrinnen und den Lkw-Überfahrten anhand der Werte des Zugversuchs in Abhängigkeit des Baubetriebs auf den Versuchsfeldern

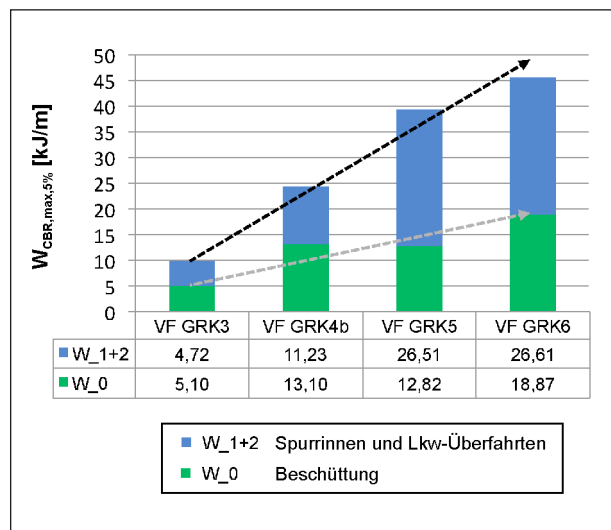


Bild 6-40b: Darstellung der Schädigungsarbeit W_0 infolge Beschüttung und Schädigungsarbeit W_{1+2} infolge eingebrachter Spurrinnen und den Lkw-Überfahrten anhand der Werte des Stempeldurchdruckversuchs in Abhängigkeit des Baubetriebs auf den Versuchsfeldern

Bei genauerer Betrachtung der Belastungen durch die Überfahrten mit dem beladenen Lkw zeigt sich, dass das Versuchsfeld VF GRK3 aus dem Rahmen fällt (Tabelle 6-11). Dort wurden nur unterproportionale Schädigungsarbeiten festgestellt (Bild 6-41a und 6-41b).

Im Gegensatz zum Boden im VF GRK4, einem scharfkantigen Sand-Kies-Gemisch, besteht der Boden in VF GRK3 aus einem rundkörnigen sandigen Kies. Hier sind die Auswirkungen auf das Geotextil infolge der Kornform des Schüttmaterials entscheidender als die Einwirkungen des Baubetriebs. Runde oder gedrungene Kornformen sind offenkundig weniger schädigend als kantige oder spitze Formen des Schotters oder der Steine. Jedes Schüttmaterial hat ein latentes Schädigungspotenzial. Diesem muss das GTX-N schadlos widerstehen können.

Die durch die Lkw-Überfahrten eingetragene Energie (dargestellt als Lkw-Gesamtgewicht x Lkw-Überfahrten) korreliert für das scharfkantige Schüttmaterial mit den festgestellten Schädigungsarbeiten. Fazit: Die primäre Auswahl geotextiler Trennlagen sollte vorzugsweise anhand des Schüttmaterials erfolgen. Das Schüttmaterial ist bekannt, denn es wird vorab nach örtlicher Verfügbarkeit und in Abstimmung mit den örtlichen Gegebenheiten des Untergrunds ausgewählt. Die Dauer und die Intensität des darauffolgenden Baubetriebs kann man weniger vorhersehen.

Als vereinfachte Vorgehensweise würde es reichen, nur in normalen Baubetrieb und in anspruchsvoller Baubetrieb zu unterscheiden. Eine Klassifizierung sollte prinzipiell so simpel wie möglich aufgebaut sein – sonst wird sie von den Anwendern in der Praxis nicht umgesetzt.

Versuchsfeld	Lkw-Überfahrten			Schädigungsarbeit	
	Masse m [t]	Anzahl n [-]	gesamte Belastung $m \cdot n$ [t]	$W_{S,ges,CBR,max,5\%}$ [kJ/m]	$W_{S,ges,ZV,max,5\%}$ [kJ/m ²]
VF GRK6	40,2	64	2.573	45,5	373,3
VF GRK5	40,2	34	1.367	39,3	292,8
VF GRK4b	40,2	1	94	24,3	219,7
	26,8	2			
VF GRK3	26,8	14	768	9,8	100,4
	39,3	10			

Tab. 6-11: Beanspruchung der Geotextilien durch Lkw-Überfahrten

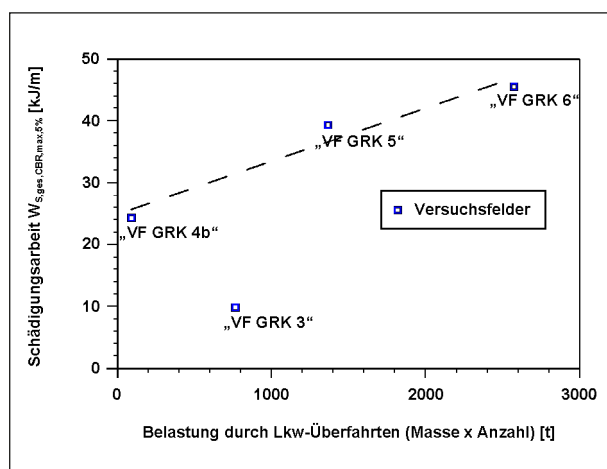


Bild 6-41a: Darstellung der Schädigungsarbeiten (aus Stempeldurchdruckversuch) in Abhängigkeit der Lkw-Überfahrten

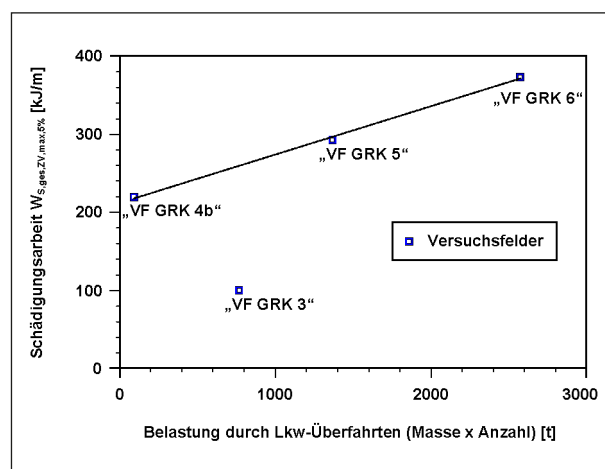


Bild 6-41b: Darstellung der Schädigungsarbeiten (aus Zugversuch) in Abhängigkeit der Lkw-Überfahrten

Produkte	VF GRK	Berechnete lineare Dehnung ϵ_{linear} [%]
ME-120	3	1,7
	4a	1,8
ME-200	3	1,4
	4a	1,2
ME-275	4a	1,5
	5	5,0
	6	11,4
ME-330	5	5,6
	6	12,4
ME-160	3	1,6
	4a	1,3
ME-260	4b	1,5
	5	5,3
	6	13,1
ME-300	5	4,8
	6	11,6
ME-380	5	5,1
	6	12,2
ME-470	5	3,6
	6	12,9
MET-120	3	1,3
	4b	1,3
MET-200	3	1,5
	4b	1,5
MET-315	5	4,9
	6	13,3

Tab. 6-12: Berechnete lineare Dehnungen aus eingebrachten Spurrinnen

In Konsequenz sollte man sich u. E. auf die scharfkantigen Schüttmaterialien fokussieren. Wenn vor Ort dennoch rundkörniges Material zum Einsatz käme, so wäre dies als unkritisch im Hinblick auf die Beschädigung des Geotextils zu behandeln.

Die Tabellen 6-12 (Tabelle I-5) und 6-13 (Tabelle I-6) zeigen die berechneten linearen Dehnungen aller eingebauten Produkte. Es lässt sich daraus erkennen, dass diese in den Versuchsfeldern VF GRK3 und VF GRK4 im Bereich von 1,5 %, im VF GRK5 bei ca. 5 % und im VF GRK6 bei ca. 12,5 % lagen. Diese Beobachtungen decken sich gut mit den gemessenen Spurrinnen der jeweiligen Versuchsfelder.

VF GRK	Berechnete lineare Dehnung ϵ_{linear} [%]
3	1,5
4	1,5
4a	1,5
4b	1,4
5	4,9
6	12,4

Tab. 6-13: Aus eingebrachten Spurrinnen berechnete lineare Dehnungen für die einzelnen Versuchsfelder

Zur Abschätzung der lokalen flächigen Dehnungen, hervorgerufen durch das Eindringen von geometrischen Körpern, wurden Simulationen mit Kugeln und mit Kegeln, deren Spitze auf das darunter liegende Geotextil gerichtet sind, betrachtet (Anhang I.9). Die Kugel soll dabei ein „rundkörniges Kieskorn“ darstellen und der Kegel soll einem „gebrochenen Korn“ entsprechen, das Spitzen aufweist. Um eine flächige Dehnung von beispielsweise 50 % zu erzeugen, wäre eine Eindringtiefe der Kugel von 30 % des Kugeldurchmessers nötig. Für die flächige Dehnung, hervorgerufen durch eine eingedrückte Kegelspitze, ist der Öffnungswinkel des Kegels entscheidend. Bei Öffnungswinkeln von 90° erzeugt die Eindringtiefe der Kegelspitze von nur 5 mm eine flächige Dehnung von ca. 40 % während ein Öffnungswinkel von 60° bei derselben Eindringtiefe schon 100 % flächiger Dehnung im Geotextil erzeugen würde. Dies gibt ein Gefühl dafür, wie kritisch sich die Beanspruchung durch spitze Steine im Gegensatz zu gedrunenen Körnern auf das darunter liegende Geotextil auswirken können. Dies deckt sich mit den oben gemachten Bemerkungen zur Kornform des Schüttmaterials.

6.8 Vergleich verschiedener Klassifizierungssysteme zum Trennen mit Geotextilien

In Anhang J wurden die Klassifizierungssysteme aus verschiedenen Ländern auf die Bedingungen der Versuchsfelder übertragen. Da im Merkblatt [FGSV-2016] die Klasseneinteilung auf Stempeldurchdrückkräften beruht, wurden für den direkten Vergleich die internationalen Klassifizierungssysteme ebenfalls Stempeldurchdrückkräfte verwendet. Da wo diese Klassifizierungssysteme Zugfestigkei-

Klassifizierung nach	Länder/Regionen	VF GRK3	VF GRK4	VF GRK5	VF GRK6
NorGeo Spec	Skandinavien	2.300 bis 3.000 N		3.200 bis 4.000 N	
M Geok E	Deutschland	1.500 N	2.500 N	3.500 N	---
AASTHO M288	USA	>>1.925 N			
RMS QA R63	Australien	900 N		1.350 N	
BS 8661	Großbritannien	2.250 N		-	-
SN 670241	Schweiz	1.200 N	1.500 N	2.000 N	

Tab. 6-14: Geforderte Stempeldurchdrückkräfte unterschiedlicher Klassifizierungssysteme

ten statt Stempeldurchdrückversuche fordern, wurden diese aus Korrelationen abgeleitet.

Gemäß der Zusammenstellung verschiedener internationaler Klassifizierungssysteme (Tabelle 6-14) zeigt sich, dass in anderen Ländern am Beispiel der geforderten Stempeldurchdrückkräfte teilweise geringere Anforderungen an die Geotextilien (z. B. Schweiz und Australien) bestehen als in Deutschland. Obwohl es sich in der Studie gezeigt hat, dass die derzeitigen Anforderungen des Merkblatts [FGSV-2016] einen Schädigungsgrad von bis zu 50 % (Tabelle 6-8 (Tabelle I-7)) tolerieren aber einen Schädigungsgrad von unter 20 % nicht erreichen (Bilder 6-29 (Bild I-39) bis 6-32 (Bild I-40)), gibt man sich in anderen Ländern sogar mit weniger zufrieden.

6.9 Vorschlag für ein zeitgemäßes Klassifizierungssystem

Aus den Erfahrungen des Forschungsprojekts sollte man ein Klassifizierungssystem anstreben, das auch der Verformbarkeit der Geovliesstoffe Rechnung trägt. Das Flächengewicht dient allein zur Identifikation, es ist aber kein technischer Parameter, der die Robustheit der Geotextilien beschreiben kann. Vielmehr müssen die Festigkeit und die Verformbarkeit als Parameter einfließen. Deshalb sollten das Arbeitsvermögen und die Schädigungsarbeit in die Bewertung der Robustheit Einzug halten. Zudem wird vorgeschlagen, auch noch den Durchdrückweg beim Stempeldurchdrückversuch und den Lochdurchmesser beim Kegelfallversuch in die Klassifizierung hinzuzunehmen. Die Vorschläge für eine neue Klassifizierung sind in Tabelle 6-15 zusammengestellt. Die Klasse 3 würde demnach der bisherigen GRK 3 entsprechen und Klasse 4 und Klasse 5 entsprechend GRK 4 und GRK 5.

Klasse 6 wäre eine neue noch höhere Klasse, die es im bisherigen System nicht gibt.

Aufgrund der einfacheren Durchführung von Stempeldurchdrückversuchen gegenüber der aufwendigeren Ausführung der Zugversuche an Geovliesstoffen wird der Stempeldurchdrückversuch für Geovliesstoffe als der geeignetere Versuch angesehen. Nicht nur, dass die Messproben im Stempeldurchdrückversuch einem mehraxialen Spannungszustand ausgesetzt sind, sondern auch dass, diese Beanspruchung der durch das Schüttmaterial am ehesten nachempfunden wird, spricht bei geotextilen Trennlagen alles für die Verwendung von Stempeldurchdrückversuchen. Selbst die flächige Dehnung lässt sich einfach aus dem Stempeldurchdrückweg ermitteln.

Die Anforderungen an das Arbeitsvermögen $W_{CBR,max}$ nach Tabelle 6-15 ergeben sich daraus, dass durch das erforderliche Arbeitsvermögen für Klasse 3 von 60 kJ/m die im Forschungsprojekt festgestellte gesamte Schädigungsarbeit für den Lastfall GRK 3 in Höhe von ca. 10 kJ/m (Tabelle 6-10) kompensiert würde. Diese Anforderung entspricht in etwa einem Geovliesstoff mit einem Flächengewicht von ca. 250 g/m². Bislang wird für GRK 3 ein Mindestflächengewicht von 150 g/m² gefordert.

Für Klasse 4 würde das Arbeitsvermögen von 100 kJ/m die ermittelte gesamte Schädigungsarbeit für den Lastfall GRK 4 in Höhe von ca. 25 kJ/m (Tabelle 6-10) kompensieren. Das könnte in etwa einem Geovliesstoff mit einem Flächengewicht von ca. 350 g/m² entsprechen. Bislang wird für GRK 4 ein Mindestflächengewicht von 250 g/m² gefordert.

Für Klasse 5 wäre ein Arbeitsvermögen von 140 kJ/m nötig, um die gesamte Schädigungsarbeit für den Lastfall GRK 5 in Höhe von ca. 40 kJ/m (Tabel-

Eigenschaft	Norm	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5	Klasse 6
Arbeitsvermögen $W_{\text{CBR,max}}$ * [kJ/m]	DIN EN ISO 12236	≥ 60	≥ 100	≥ 140	≥ 180
Durchdrückweg s_{1N} [mm]		≥ 55			
Dehnung ϵ [%]	DIN EN ISO 10319	≥ 50			
Lochdurchmesser DC [mm]	DIN EN ISO 13433	≤ 15			
* Das Arbeitsvermögen wird aus der flächigen Dehnung ermittelt, die über die Mantelfläche eines Kegelstumpfes errechnet wird.					

Tab. 6-15: Vorschlag für ein modernes Klassifizierungssystem für geotextile Trennlagen im Erdbau des Straßenbaus

le 6-10) zu kompensieren. Das könnte in etwa einem Geovliesstoff mit einem Flächengewicht von ca. 400 g/m² entsprechen. Bislang wird für GRK 3 ein Mindestflächengewicht von 300 g/m² gefordert.

Für die neue Klasse 6 wäre ein Arbeitsvermögen von 180 kJ/m nötig, um die ermittelte gesamte Schädigungsarbeit von ca. 50 kJ/m (Tabelle 6-10) ausgleichen zu können. Das würde in etwa einem Geovliesstoff mit einem Flächengewicht von ca. 450 g/m² entsprechen.

Das Mindestflächengewicht sollte aus technischer Sicht in einem Klassifizierungssystem keine Anforderung darstellen, sondern nur der Identifikation dienen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse des Forschungsvorhabens liegen nun aktuelle Daten vor, die als Grundlage für eine Neuausrichtung des bestehenden Klassifizierungssystems genutzt werden können.

7 Fazit

- Die Simulation der Einbaubeschädigung auf vier Versuchsfeldern konnte erfolgreich vorgenommen werden. Um Abhängigkeiten hinsichtlich der Robustheit herauszufinden hat sich als richtig erwiesen, sich auf 12 Geovliesstoffe aus PP-Stapelfasern zu beschränken, welche in Deutschland die am weitesten verbreiteten Produkte repräsentieren.
- Die Einrichtung von 0,5 m tiefen mit unverdichtetem Sand aufgefüllten Mulden unter den Versuchsfeldern stellten einen gleichmäßigen wenig tragfähigen Untergrund sicher.
- Die Auswahl der Schüttmaterialien erlaubte eine gute Abstufung entsprechend den Anwendungsfällen des Merkblatts [FGSV-2016]. Sowohl der Einbau der Tragschichten, deren Verdichtung

und die anschließende umsichtige und schonende, händische Freilegung der Geotextilproben hatten einwandfrei funktioniert. Insbesondere bei der Abräumung des Tragschichtmaterials mit Unterstützung durch einen Saugbagger konnten zusätzliche Beschädigungen infolge der Freilegung weitestgehend vermieden werden.

- Das Kriterium, für jedes Versuchsfeld definierte Spurrinnen in der Ebene der Geotextillage zu erzeugen, hat sich als brauchbar erwiesen, um die Beanspruchung durch den Bauverkehr für die verschiedenen Anwendungsfälle quantifizierbar zu machen – obwohl diese erst nach der Freilegung der Geovliesstoffe gemessen werden konnten. Die gemessenen Spurrillen an der Tragschichtoberfläche waren ein sehr guter Indikator für die in der Geotextilebene erzeugten Spurrinnen.
- Zugversuche und Stempeldurchdruckversuche beschreiben jeweils das mechanische Verhalten von Geotextilien. Das Kraft-Dehnungsverhalten lässt sich über die lineare Dehnung im Zugversuch und über die flächige Dehnung im Stempeldurchdruckversuch als kongruente Kurvenverläufe darstellen. Eine der beiden Prüfungen ist ausreichend, um das mechanische Verhalten von Geovliesstoffen zu beschreiben.
Beim Vergleich von Zugversuchen am breiten Streifen und Stempeldurchdruckversuchen hat der Stempeldurchdruckversuch an Geovliesstoffen eindeutige Vorteile. Die Prüfung ist schneller durchführbar. Die Einspannung ist einfacher vorzunehmen. Die Beanspruchung erfolgt radial und entspricht damit ziemlich gut der Situation eines Geotextils als Trennlage, das durch ein senkrecht auf die Geotextilebene eindrückendes grobes Korn auf Druck belastet wird.
Der Zugversuch an Geotextilien ist für Produkte, welche zur Bewehrung eingesetzt werden, sinnvoll. Es müssen dabei auch stets mindestens

zwei Zugrichtungen (MD und CMD) getestet werden. Bei Geotextilien, die zum Filtern und Trennen verwendet werden, ist der Zugversuch überflüssig. Ein Stempeldurchdruckversuch liefert ebenfalls die Informationen zum Kraft-Dehnungsverhalten und diese gelten sogar für alle Beanspruchungsrichtungen.

Beide Versuche sowohl der Zugversuch am breiten Streifen als auch der Stempeldurchdruckversuch sollten im Hinblick auf das Prüfen von Geovliesstoffen angepasst werden. Bei sehr dehnfähigen Produkten wie Geovliesstoffen ist es nicht angebracht, mit einer sehr niedrigen Dehnungsrate von 20 %/min zu prüfen. Das macht den Versuch langwierig, kostspielig und somit unattraktiv. Es ist auch nicht notwendig, hierbei die Dehnung mithilfe eines Extensometers zu ermitteln. Für diese sehr dehnfähigen Produkte wären nominelle Dehnungen vollkommen ausreichend.

Weiterhin sollte beim Stempeldurchdruckversuch die Verformung – hier gemessen über den Weg des Druckstempels – in die Auswertung des Versuchs einfließen. Der Weg des Druckstempels sollte schon beim Berühren der Messprobe erfasst werden.

- Für beide Versuche ist es möglich das Arbeitsvermögen zu ermitteln. Es ist das Integral des Kraft-Dehnungsverlaufs sowohl im Zugversuch als auch beim Stempeldurchdruckversuch. Beim Zugversuch ist es die lineare Dehnung, während es beim Stempel-Durchdruckversuch die flächige Dehnung ist, die sich über die Form der Mantelfläche eines Kegelstumpfes einfach berechnen lässt. Dies ist in erster Annäherung die Form, die die Messprobe beim Stempeldurchdruckversuch einnimmt.
- Die Gegenüberstellung der Festigkeiten der hier geprüften Geovliesstoffe zeigt, dass eine direkte Korrelation sowohl zwischen Zugfestigkeit und Flächengewicht als auch zwischen Stempeldurchdruckkraft und Flächengewicht besteht.

Das bedeutet, dass keine Notwendigkeit gesehen wird, in einer Klassifizierung für technisch hochwertige Geovliesstoffe beides, Mindestfestigkeit als auch Mindest-Flächengewicht, zu fordern. Es ist eine Dopplung der Anforderung, da die Festigkeit hierfür ohnehin mit dem Flächengewicht korreliert. Das Mindestflächengewicht ist daher nicht nötig für die Klassifizierung.

Die Festigkeit (Stempeldurchdruckkraft) würde hier schon ausreichen. Darüber hinaus ist unwillkürlich auch eine Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Stempeldurchdruckkraft vorhanden.

- Sowohl die Stempeldurchdruckkräfte, die Zugfestigkeit als auch das Arbeitsvermögen zeigen eine gute lineare Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse der Geotextilien.
- Der Einfluss der Herstellungstechnik wird nicht nur beim Zugversuch und beim Stempeldurchdruckversuch sichtbar, sondern auch beim Kegelfallversuch.

Der Kegelfallversuch kann als Indextest Indizien hinsichtlich der Empfindlichkeit des Geovliesstoffs durch die Beschüttung mit scharfkantigem Schüttmaterial geben.

- Als Schädigungsarbeit wurde die Differenz des Arbeitsvermögens im ALZ und dem Rest-Arbeitsvermögen nach Ausbau, das zudem durch den visuellen Beschädigungsfaktor abgemindert wurde, definiert.
- Als Schädigungsgrad wurde das Verhältnis der Schädigungsarbeit und dem Arbeitsvermögen im ALZ definiert.
- Für einen Schädigungsgrad von bis zu 20 % würden nur 6 der 12 getesteten Produkte die Anforderung gemäß ihrer Geotextil-Robustheitsklasse erfüllen. Würde man hingegen beispielsweise einen Schädigungsgrad von 50 % für den Einsatz einer geotextilen Trennlage akzeptieren, so hätten bis auf ein Produkt alle getesteten Produkte eine ausreichende Robustheit in den Feldversuchen unter Beweis gestellt. Ein Schädigungsgrad von 50 % ist aus unserer Sicht aber fragwürdig, wenn man eine langfristige Funktionsfähigkeit des Systems Untergrund-Geotextil-Tragschicht sicherstellen will.
- Die Geovliesstoffe mit thermischer Oberflächenbehandlung in VF GRK3 ergaben größere Schädigungsarbeiten als die dehnfähigeren Produkte ohne thermische Nachbehandlung. Sie sind nicht so gut in der Lage den Kräften durch die Eindrückungen der groben Körner auszuweichen. Sie folgen vornehmlich dem Widerstandsprinzip. Dieses ist wichtig und richtig, wenn der Geovliesstoff beispielsweise als Filter auf einer Dränmatte eingesetzt wird. In dem Fall darf sich das Geotextil nicht übermäßig in die Struktur des

Sickerkörpers hineinverformen, weil es sonst das Wasserableitvermögen der Dränmatte maßgeblich reduzieren würde. Der Filter muss die Abstände zwischen den Stützpunkten des Sickerkörpers mit möglichst geringem Durchhang überspannen können.

Anders als bei dehnsteifen geotextilen Filtern in Dränmatten, ist es dagegen bei Trennlagen zwischen feinkörnigem Untergrund und der darauf liegenden groben Schüttlage unerheblich wenn sich die Geovliesstoffe in die grobe Struktur des Schüttmaterials hineinverformen. Wesentlich ist, dass dies ohne Beschädigung des Filters erfolgt. Dieses Ausweichprinzip ist daher bei geotextilen Trennlagen im Straßenbau das zweckmäßige Prinzip.

- Um dem Ausweichprinzip auch hinreichend Rechnung zu tragen, sollte man für alle Geovliesstoffe beim Stempeldurchdruckversuch zudem einen Durchdruckweg von mindestens 55 mm fordern.
- Weiterhin könnte man die Beschädigung durch das Beschütten mit spitzem Steinmaterial eingrenzen, indem man den zulässigen Lochdurchmesser im Geovliesstoff beim Kegelfallversuch auf ein Maß von maximal 15 mm begrenzen würde.
- Von Versuchsfeld VF GRK3 bis VF GRK6 nehmen die Schädigungsarbeiten stetig zu. Dies gilt für die Schädigung durch Beschüttung und darauffolgender Verdichtung mit einem Walzenzug als auch für die Schädigung durch die Lkw-Überfahrten.
- Die Betrachtung der Lkw-Überfahrten zeigt, dass die Belastung durch Lkw-Überfahrten allein nicht zwangsläufig eine Zunahme der Schädigungsarbeit zur Folge hat. Wenn die Tragschicht aus rundkörnigem Schüttmaterial besteht, ist der schädigende Einfluss weitaus geringer. Der Körnung, insbesondere der Kornform, ist hier große Bedeutung zu schenken.
- Der Vergleich der Klassifizierungssysteme verschiedener Länder, angewandt auf die Versuchsfelder VF GRK3 bis VF GRK6, zeigte, dass die Anforderungen des Merkblatts [FGSV-2016] im oberen Bereich lagen und einzelne Länder sogar geringere Anforderungen an geotextile Trennlagen stellen. Aus den Erfahrungen des Forschungsprojekts ist jedoch zu folgern, dass

das Klassifizierungssystem des Merkblatts [FGSV-2016] dennoch nicht als konservativ einzustufen ist. Im Gegenteil, tendenziell müssten die Anforderungen für die einzelnen Klassen sogar angehoben werden – insbesondere dann, wenn das Geotextil auch noch dauerhaft als Filterlage funktionieren soll.

8 Weiterer Forschungsbedarf

Neben den vielen Erkenntnissen, die in dem Forschungsprojekt für mechanisch verfestigte Geovliesstoffe aus PP-Stapelfasern gewonnen werden konnten, ergaben sich neue Fragestellungen, die in zukünftigen Forschungsprojekten erörtert werden müssten:

- Können die neuen Anforderungen an die Robustheit von Geotextilien in Form eines erforderlichen Arbeitsvermögens für mechanisch verfestigte Geovliesstoffe aus PP-Stapelfasern direkt auch auf thermisch verfestigte Geovliesstoffe oder auf mechanisch verfestigte Geovliesstoffe aus Endlofasern oder auf Geovliesstoffe aus PET übertragen werden?
- Ist das Arbeitsvermögen zur Einordnung der Robustheit der Geotextilien gegenüber Einbaubeschädigungen auch auf Geogewebe aus PP-Bändchengewebe, bei denen sicherlich das Widerstandsprinzip vorherrscht, anwendbar?
- Wie kann für Geoverbundstoffe mit Bewehrungs-, Filter- und Trennfunktion, bestehend aus einem gitterförmigen Geokunststoff und einem Geovliesstoff, eine Anforderung für die Robustheit der Einzelkomponente – hier der Filter- und Trennlage – festgelegt werden?
- Wie kann für Dränmatten mit Drän-, Filter- und Trennfunktion, bestehend aus einem geosynthetischen Sickerkörper und einem oder zwei Geovliesstoffe, eine Anforderung für die Robustheit der Einzelkomponenten – hier der Filter- und Trennlagen – festgelegt werden?
- Was ist ein akzeptabler Schädigungsgrad für geotextile Trennlagen und was sind tolerierbare Schädigungsgrade für Geotextilien mit Trenn- und Filterfunktion?

Literatur

Veröffentlichungen

- [BRÄU-1984] BRÄU, G.; LAIER, H.: Wirkungsweise von Geotextilien als Trennlage unter Tragschichten bei intensiver Verkehrsbeanspruchung. Forschungsprojekt des BMV/FGSV FE: 05.078.G 84
- [BRÄU-1986] BRÄU, G.; LAIER, H.: Entwicklung von Laborprüfmethode zur Bestimmung der Wirkungsweise von Geotextilien im Boden unter dynamischen Beanspruchungen. Forschungsprojekt des BMV/FGSV FE: 05.086.G 86
- [BRÄU-1992] BRÄU, G.; FLOSS, R.; LAIER, H.: Beschädigungsanfälligkeit von Geotextilien. In: SVG Schweizerischer Verband der Geotextilfachleute, 2. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik K-GEO 92 in Luzern, Schweiz, 263-273, 1992
- [BRÄU-1995] BRÄU, G.: Untersuchungen zur Einbaubeanspruchung von geotextilen Trennlagen. In: 4. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München, 93-102, 1995
- [WATN-1997] WATN, A.; ZENITI, M.: Verformung und Einbaubeschädigung von Vliesen bei gering tragfähigem Untergrund. In: 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München, 53-60, 1997
- [FLOSS-1996] FLOSS, R.; VOGT, N.; BRÄU, G.: Aufstellen eines Systems für die Anforderung an Geotextilien hinsichtlich ihrer Beanspruchung beim Einbau. Forschungsprojekt des BMV/FGSV FE: 05.110.G 96
- [FLOSS-2001] FLOSS, R.; BRÄU, G.: Untersuchung der Empfindlichkeit von Geotextilien und Geokunststoffen im Boden gegenüber dynamischer Beanspruchung. Forschungsprojekt des BMV/FGSV FE: 05.106.1995, Schlussbericht Köln 2001
- [BRÄU-2004] BRÄU, G.; BAUER, A.; VOGT, N.: Aufstellen eines Systems für die Anforderungen an Geotextilien hinsichtlich ihrer Beanspruchung beim Einbau. In: Heft 893, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2004
- [BOLEY-2012] BOLEY, C.: Handbuch Geotechnik, Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen; 1. Auflage: Vieweg + Teubner, 2012
- [LIFA-2019] LIDA, I.: Bauen mit Geokunststoffen, Ein Handbuch für den Geokunststoff-Anwender; Chur, Schweiz, 2019
- [KOERNER-2012] KOERNER, R.: Designing with Geosynthetics; 6. Auflage; Pearson Education Inc.; USA, 2012
- [NAUE-2019] Naue GmbH & Co. KG: Secutex, Vliesstoffe – Grundlagen; Flyer Nr. 00235; Espelkamp-Fiestel: 16.12.2019
- [SAATHOFF-2009] SAATHOFF, F.; BRÄU, G.: Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau. In: Witt, K.-J. (Hrsg.), Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren; 7. Auflage; Ernst & Sohn, 2009

Technische Unterlagen

- [BAGGER-CAT_M318D] Zeppelin Rental GmbH (2020): Technische Daten Mobilbagger CAT M318D. https://www.zeppelin-rental.de/miete/artikel/BAMO-M318_PLUS
- [RADLADER-CAT_938M] Zeppelin Rental GmbH (2020): Technische Daten Radlader CAT 938M. <https://www.zeppelin-rental.de/miete/artikel/RL-CAT938M>
- [WALZE-BW177D5] BOMAG (2020): Technische Daten Walzenzüge BW 177 D-5. https://www.bomag.com/dam/BOMAG/Other/Data_Sheets/Data_Sheets_D/Datasheet_BW177D-5_BW177DH-5_BW177PDH-5_4f_PRD58603010_SA05.pdf.
- [Lkw-MB_AROCS_3345] Mercedes-Benz: Lastkraftwagen Arocs 3345 L 6x4 BM 96402612
- [SAUGBAGGER-RSP_ESE8] RSP GmbH (2020): Technische Daten ESE8 RD800.

Normen

- [BS 8661] BS 8661:2019: Geotextiles – Guidance for specification for basic separation and filtration functions
- [DIN EN ISO 10318-1] DIN EN ISO 10318-1:2018: Geokunststoffe – Teil 1: Begriffe. Beuth
- [DIN EN ISO 10318] DIN EN ISO 10318:2005: Geokunststoffe: Begriffe. Beuth
- [DIN 18134] DIN 18134:2012: Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch. Beuth
- [DIN EN ISO 10319] DIN EN ISO 10319:2015: Zugversuch am breiten Streifen. Beuth
- [DIN EN ISO 9864] DIN EN ISO 9864:2005: Geokunststoffe – Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten, Beuth
- [DIN EN ISO 9863-1] DIN EN ISO 9863-1:2020: Geokunststoffe – Dicke unter festgelegten Drücken – Teil 1: Einzellagen, Beuth
- [DIN EN ISO 12236] DIN EN ISO 12236:2006: Geokunststoffe – Stempeldurchdruckversuch (CBR-Versuch), Beuth
- [DIN EN ISO 13433] DIN EN ISO 13433:2006: Geokunststoffe – Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch), Beuth
- [DIN 18125-2] DIN 18125-2:2011: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche, Beuth
- [RMS-2017] Roads and Maritime Services – RMS. (2017): QA Specification R63, Geotextiles (Separation and Filtration), Australien
- [FGSV-2004] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), (2004): Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau TL SoB-StB 04, FSGV 697, FGSV-Verlag
- [RVS-2020] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (2020): Technische Vertragsbedingungen – Geotextilien im Unterbau. RVS 08.97.03., Österreich/Wien
- [FGSV-2012] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) (2012): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit leichtem Fallgewichtsgesetz (TP BF-StB B 8.3)
- [EBGEO-2010] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (Hrsg.) (2010): Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO)
- [DVA-M-511] Merkblatt DWA-M 511, August 2017. Filtern mit Geokunststoffen, DWA-Regelwerk, Band M 511

Richtlinien, Empfehlungen

- [AASHTO-2008] AASHTO (2008): Geotextile Specification for Highway Applications, M 288-06
- [FGSV-2016] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV), (2016): Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus – M Geok E, FSGV 535, FGSV-Verlag
- [NORGEOSPEC-2002] NorGeoSpec (2002): A Nordic system for specification and control of geotextiles in roads and other trafficked areas, SINTEF Report, 2004-06-30

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze Klein, Gehlen, Kränkel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wüstuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß, Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Demon, Reiche, Haas, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauphosphat

Gehrke, Stephan, Weigel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Villaret, Beckenbauer, Riwe, Tschernack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Breitenbücher, Buckenhüskes, Radenberg, Twer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Weise, Hüsken, Niedack-Nad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkuhl, Pfeifer € 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Hülsbömer, Weißelborg, Gogolin, Mörchen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

Neumann, Liu, Blasl, Reinhardt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalteinlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

Berthold, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärmärmer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

Freudenstein, Bollin, Eger, Klein, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

Oeser, Schulze, Benninghoff, Renken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

Zanzinger
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.