



Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden

**Données de base pour des exigences relatives aux géo-
synthétiques de protection sur la base des normes
d'essai EN**

**Basic requirements for protection geosynthetics on the
base of new EN test methods**

Berner Fachhochschule - Architektur, Holz und Bau
Institut für Siedlungsentwicklung und Infrastruktur
Kompetenzbereich Geotechnik und Naturereignisse, 3400 Burgdorf
Daniel Büttner, Dipl.-Ing. (FH)
Martin Stolz, Prof. für Geotechnik

Tecnotest AG, 8803 Rüschlikon
Norbert Tholl, Dipl.-Ing. (FH) phys. Technik
Hans-Peter Sommer, Dipl.-Ing. HTL

**Forschungsprojekt VSS 2010/404 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden

**Données de base pour des exigences relatives aux géo-
synthétiques de protection sur la base des normes
d'essai EN**

**Basic requirements for protection geosynthetics on the
base of new EN test methods**

Berner Fachhochschule - Architektur, Holz und Bau
Institut für Siedlungsentwicklung und Infrastruktur
Kompetenzbereich Geotechnik und Naturereignisse, 3400 Burgdorf
Daniel Büttner, Dipl.-Ing. (FH)
Martin Stolz, Prof. für Geotechnik

Tecnotest AG, 8803 Rüschlikon
Norbert Tholl, Dipl.-Ing. (FH) phys. Technik
Hans-Peter Sommer, Dipl.-Ing. HTL

**Forschungsprojekt VSS 2010/404 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. Martin Stolz, Berner Fachhochschule, 3400 Burgdorf

Mitglieder

Franziska Nyffenegger, Berner Fachhochschule, 3400 Burgdorf

Daniel Büttner, Berner Fachhochschule, 3400 Burgdorf

Norbert Tholl, ehem. Tecnotest AG, 8803 Rüschlikon

Hans Peter Sommer, ehem. Tecnotest AG, 8803 Rüschlikon

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Normen-/Forschungskommission NFK 3.7 Geokunststoffe

Begleitkommission

Präsident

Balazs Fonyo, Präsident NFK 3.7, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen

Mitglieder

Martin Hugener Dr., Präsident FK3, Empa Dübendorf

Oliver Jacobi, Tiefbauamt Kt. Basel-Landschaft, Liestal

Lorenz Kunz, Sytec Bausysteme AG, Neuenegg

Stefan Matsch Dr., Präsident NK SIA 272, Ernst Basler + Partner AG, Zürich

Ivo Sterba, ehem. Institut für Geotechnik, ETH Zürich

Hans-Jörg Stich, Sika Services AG, Sarnen

Edwin Wehrli, Schoellkopf AG, Rümlang

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute (VSS)

Sihlquai 255, 8005 Zürich

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Summary	11
1	Auftrag und Zielsetzungen	13
1.1	Ausgangslage / Projektbegründung	13
1.2	Erwartete Resultate	14
2	Grundlagen	15
2.1	Normen	15
2.2	Stand der Technik	16
3	Methodik	21
4	Prüfverfahren	22
4.1	Mechanische Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 Anhang D.3.1 (Referenzverfahren) ..	22
4.2	Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffes bei Stossbelastung nach EN ISO 13428	24
4.3	Pyramidendurchdrückwiderstand nach EN ISO 14574	25
4.4	Langfristige Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen nach EN 13719	26
4.5	Stempeldurchdrückkraft (CBR-Versuch) nach EN ISO 12236	29
4.6	Durchschlagwiderstand (Kegelfall) nach EN ISO 13433	30
5	Untersuchungen	31
5.1	Produktwahl	31
5.2	Prüfprogramm	35
5.3	Messergebnisse	36
6	Datenanalyse	41
6.1	Anforderungen an Schutzgeokunststoffe	41
6.2	Regressionsmodelle	43
6.3	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	59
6.4	Grenzen der Aussagen	62
7	Empfehlungen	63
8	Forschungsbedarf	69
	Publikationen	71
	Abkürzungen	75
	Literaturverzeichnis	77
	Projektabschluss	79
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	83

Zusammenfassung

Die Dauerhaftigkeit der Abdichtung wirkt sich unmittelbar auf die Nutzungsdauer eines Tunnels bzw. eines erdverlegten Bauwerks aus. Zum Abdichtungssystem gehören die eigentliche Abdichtung, zum Beispiel eine Kunststoffdichtungsbahn, eine Schutzschicht und der Untergrund, zum Beispiel gebrochener Fels als Schüttmaterial. Dabei sind diese drei Komponenten aufeinander abzustimmen. Die Schutzschicht hat die Aufgabe, die Abdichtung vor mechanischer Beschädigung zu schützen und ist in vielen Fällen ein Geokunststoff. Dazu gehören unter anderem Geovliesstoffe, Geoverbundstoffe, Schutzbahnen und Gummischrotbahnen.

Die bisherigen anwendungsbezogenen Anforderungswerte an das Leistungsvermögen von Geokunststoffen als Schutz von Abdichtungen werden in der Schweiz in den Normen SN 670 243 *Geokunststoffe - Anforderungen für die Funktion Schützen* und SIA 272 *Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau* definiert. Im Zuge der Harmonisierung mit den Europäischen Standards ergab sich der Bedarf, neue Anforderungswerte an Schutzgeokunststoffe festzulegen, da in der aktuellen Norm SIA 272 gemäss Anhang D.3.1 die wichtigsten Anforderungen an die bewährte Prüfmethode *Mechanische Durchschlagfestigkeit* gestellt werden, welche europäisch und international nicht genormt ist. Die mechanische Durchschlagfestigkeit ist eine modifizierte Variante der EN 12691 „Bestimmung des Widerstandes gegen stossartige Belastung“, welche allerdings für Dachabdichtungen gilt.

Gleichzeitig fehlen Anforderungen an diese Eigenschaften: EN ISO 13428 „Geokunststoffe - Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffes bei Stoßbelastung“, EN 14574 „Geokunststoffe - Bestimmung des Pyramidendurchdrückwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage“ und EN 13719 „Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen“.

Das vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, geeignete EN-Prüfmethoden als Ersatz zur mechanischen Durchschlagfestigkeit gemäss SIA 272 Anhang D.3.1 auszuwählen und Anforderungswerte zu diesen Prüfmethoden vorzuschlagen. Aufgrund der Erkenntnisse der Forschungsarbeit sollen die Normen SN 670 243 und SIA 272 revidiert werden. Alle nationalen Anforderungen an die Funktion Schützen, auch diejenigen der SIA 272 Anhang D.3.1, sollen auf europäische Prüfmethoden abgestellt werden. Somit wird dieses noch bestehende technische Handelshemmnis beseitigt. Ein weiteres Ziel des Projektes ist, die Gültigkeit der SN 670 243 auf weitere Anwendungsfälle und weitere Geokunststoffe auszuweiten.

Im Projekt wurden 35 Geokunststoffe aus 5 Geokunststoffarten (14 Geovliese, 7 Geoverbundstoffe, 5 Schutzbahnen, 6 Gummischrotbahnen und 3 Noppenbahnen) mit folgenden Prüfverfahren untersucht:

- SIA 272: 2009 Anhang D.3.1: „Mechanische Durchschlagfestigkeit für Schutzmatten“ (Referenzverfahren)
- EN ISO 13428: „Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffes bei Stoßbelastung“
- EN 14574: „Bestimmung des Pyramidendurchdrückwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage“
- EN 13719: „Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen“
- EN ISO 12236: „Geokunststoffe - Stempeldurchdrückversuch (CBR-Versuch)“
- EN ISO 13433: „Geokunststoffe - Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch)“

Mittels statistischer Datenanalyse wurde ein linearer Zusammenhang je Geokunststoffart zwischen den EN-Prüfverfahren und dem Referenzprüfverfahren der Norm SIA 272 Anhang D.3.1 gesucht.

Für den Ersatz der mechanischen Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 Anhang D.3.1 empfiehlt der Forschungsbericht die EN ISO 13428 „Bestimmung der Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung“. Dieses dynamische Prüfverfahren weist sehr gute statistische Korrelationen zum Referenzprüfverfahren auf ($r \geq 0.9$). Es eignet sich ohne Einschränkung für jeden Geokunststoff und weist sehr kleine Streuungen innerhalb und zwischen den Geokunststoffarten auf. Der Prüfaufwand ist gering. Die Versuchsergebnisse der prozentualen Restdicken liegen im Bereich von 30 % bis 90 %. Je grösser die Restdicke der Bleiplatte ist, desto grösser ist die Schutzwirksamkeit des Geokunststoffs.

Für die Empfehlung von Anforderungswerten zu dem Ersatzprüfverfahren eignet sich die Regressionslinie am besten.

Zwischen dem Pyramidendurchdrückwiderstand nach EN 14574 und dem Referenzverfahren lassen sich ebenfalls sehr gute Korrelationen ermitteln ($r \geq 0.9$). Die Produktstrukturen bei Geoverbundstoffen und Noppenbahnen in Kombination einer punktuellen Einwirkung führen jedoch zu streuenden Versuchsergebnissen. Insbesondere für Noppenbahnen eignet sich dieses Prüfverfahren deshalb nicht. Die pyramidenförmige Prüfspitze stumpft bei Stossbelastung ab. Das führt zu falschen Versuchsergebnissen. Die Versuchsergebnisse zwischen den Geokunststoffarten liegen bis zu einem Faktor 10 auseinander. Deshalb wird dieser Versuch nicht an erster Stelle als Ersatzverfahren empfohlen.

Mit der EN 13719 „Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit“ lässt sich zwar jeder Geokunststoff prüfen, das Ausmessen von ungleichmässigen Eindellungen bei den Geoverbundstoffen und Noppenbahnen lässt jedoch einen gewissen Interpretationsspielraum zu. Bei Geovliesen und Gummischrotbahnen wurden sehr gute Korrelationen gefunden, bei Geoverbundstoffen, Schutzbahnen und Noppenbahnen hingegen schlechte. Bei letzteren Produkten könnten vermutlich bessere Korrelationen mit mehr Versuchen erreicht werden, was jedoch aufgrund der Versuchsdauer von mindestens 12 Tagen (!) für ein Versuchsergebnis nicht möglich war. Aufgrund des hohen Prüfaufwandes lässt sich diese Prüfung nicht als Ersatzverfahren empfehlen.

Der Stempeldurchdruckversuch nach EN ISO 12236 eignet sich besonders für zugfeste Geokunststoffe. Gut prüfen lassen sich Geovliese, Schutzbahnen und Noppenbahnen. Gummischrotbahnen weisen jedoch sehr tiefe Messwerte auf, sodass eine Empfehlung schwierig ist. Geoverbundstoffe bestehen aus unterschiedlichen Teilprodukten und versagen bei der Stempelbelastung unterschiedlich schnell. Diese Prüfung ist daher als Ersatzverfahren nicht für alle Geokunststoffe empfehlenswert.

Dicke und inhomogene Geokunststoffe lassen sich mit dem „Durchschlagwiderstand“ nach EN ISO 13433 schlecht bzw. nicht prüfen. Alle Geokunststoffarten weisen Einzelmesswerte auf, bei denen der Fallkegel das Muster mindestens einmal nicht durchdringt. Die Streuung der Resultate ist entsprechend gross. Dieser Test eignet sich deshalb nicht als Ersatzprüfverfahren.

Résumé

La durabilité de l'étanchéité influence directement la durée d'utilisation d'un tunnel ou d'un ouvrage enterré. Le système d'étanchéité se compose de l'étanchéité, par exemple une barrière géosynthétique polymérique, d'une couche de protection et enfin du sol, resp. de la roche de contact, comme par exemple la grave concassée utilisée comme matériau de remblai. Ces trois composants doivent être adaptés les uns aux autres. La couche de protection doit protéger l'étanchéité contre les dégâts mécaniques. Il s'agit souvent d'un géosynthétique. A cette catégorie appartiennent entre autres, les géonon-tissés, les géocomposites, les lés de protection synthétique et les nattes à base de granulés de caoutchouc recyclé.

En Suisse, les exigences de performance des géosynthétiques utilisés comme protection de l'étanchéité sont définies dans les normes *SN 670 243 Géosynthétiques - Exigences pour les fonctions de protection* et *SIA 272 Etanchéité et drainage d'ouvrages enterrés et souterrains*. Dans le cadre de l'adaptation aux standards européens (EN), il s'est avéré nécessaire de déterminer des nouvelles exigences, dont l'une des plus importantes, à savoir *la résistance mécanique au choc*, décrite dans la norme SIA 272, annexe D.3.1. Or, cette méthode d'essai n'est pas normée par le CEN ou l'ISO. En effet, la résistance mécanique au choc est une variante modifiée de l'*EN 12691 Détermination de la résistance en cas de charge avec choc*, qui s'applique aux étanchéités pour les toitures.

Il manque également des exigences par rapport aux propriétés suivantes: EN ISO 13428 Géosynthétiques - Détermination de l'efficacité de protection d'un géosynthétique contre l'effet d'un impact, EN 14574: Géosynthétiques - Détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal de géosynthétiques sur support et EN 13719: Géotextiles et produits apparentés - Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles en contact avec les barrières géosynthétiques.

Le présent projet de recherche a pour but de choisir des méthodes d'essai européennes appropriées pour remplacer l'essai de la résistance mécanique au choc selon la norme SIA 272 annexe D.3.1 et de proposer des valeurs d'exigence compatibles avec ces nouvelles méthodes européennes. Les résultats de ce travail de recherche serviront à la révision des normes SN 670 243 et SIA 272. Toutes les exigences nationales concernant la fonction de protection, y compris la norme SIA 272 annexe D.3.1, doivent être adaptées aux méthodes d'essai européennes. De cette manière, la dernière entrave technique aux échanges sera supprimée. Un autre objectif de ce travail est d'élargir la validité de la norme SN 670 243 à d'autres utilisations et à d'autres géosynthétiques.

Au total 35 produits appartenants à 5 différents genres de géosynthétiques (14 géonon-tissés, 7 géocomposites, 5 lés de protection, 6 nattes de caoutchouc et 3 membranes alvéolaires) ont été analysés au moyen des essais suivants:

- SIA 272: 2009 annexe D.3.1: Résistance mécanique au choc pour les nattes de protection (essai de référence)
- EN ISO 13428: Géosynthétiques - Détermination de l'efficacité de protection d'un géosynthétique contre l'effet d'un impact
- EN 14574: Géosynthétiques - Détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal de géosynthétiques sur support
- EN 13719: Géotextiles et produits apparentés - Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles en contact avec les barrières géosynthétiques
- EN ISO 12236: Géosynthétiques - Essai de poinçonnement statique (essai CBR)
- EN ISO 13433: Géosynthétiques - Essai de perforation dynamique (essai par chute d'un cône)

Au moyen d'une analyse statistique, une relation linéaire a été cherchée pour chaque genre de géosynthétique entre la méthode d'essai EN et l'essai de référence de la norme SIA 272, annexe D.3.1.

Pour remplacer l'essai de résistance mécanique au choc selon la norme SIA 272, annexe D.3.1, le rapport de recherche recommande la norme *EN ISO 13428 Détermination de l'efficacité de protection d'un géosynthétique contre l'effet d'un impact*. Cette méthode d'essai dynamique présente des très bonnes corrélations statistiques avec la méthode d'essai de référence ($r \geq 0.9$). Elle convient sans restriction pour tous les géosynthétiques et présente de très faibles dispersions soit à l'intérieur d'un même genre de géosynthétiques, soit entre différents genres. Le travail requis pour le test est faible. Les résultats des essais pour une épaisseur résiduelle de la plaque de plombe varient de 30 % à 90 %. Plus l'épaisseur résiduelle est élevée, plus la protection est efficace.

La ligne de régression est recommandée pour déterminer des valeurs exigées lors des nouvelles méthodes de remplacement.

On peut également relever de très bonnes corrélations ($r \geq 0.9$) entre la résistance au poinçonnement pyramidal, selon la norme *EN 14574 Détermination de la résistance au poinçonnement pyramidal de géosynthétiques sur support*, et l'essai de référence. Toutefois, les structures des géosynthétiques et des membranes alvéolaires en combinaison avec une action ponctuelle conduisent à des résultats d'essais très dispersés. Cette méthode d'essai est donc particulièrement inadaptée pour les membranes alvéolaires. La pointe d'essai en forme de pyramide s'émousse sous l'impact. Cela donne lieu à des résultats d'essais erronés. Les résultats d'essais entre les géosynthétiques présentent un écart pouvant aller jusqu'à un facteur de 10. C'est la raison pour laquelle cet essai n'est pas recommandé en premier lieu comme méthode de remplacement.

Même si l'on peut tester chaque géosynthétique selon la méthode *EN 13719 Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles en contact avec les barrières géosynthétiques*, il existe toutefois une certaine marge d'interprétation pour les géocomposites et les membranes alvéolaires à cause des irrégularités constatées. Tandis que pour les géonontissés et les nattes de caoutchouc de bonnes corrélations ont été trouvées, celles-ci étaient moins bonnes avec les géocomposites, les lés de protection synthétique et les membranes alvéolaires. Pour ces derniers produits, de meilleures corrélations pourraient probablement être atteintes avec un plus grand nombre d'essais, ce qui n'a pas été possible à cause de la durée excessive de l'essai (minimum 12 jours). Pour cette raison celui-ci ne peut pas être recommandé comme méthode de remplacement.

L'essai d'après la norme *EN ISO 12236 Essai de poinçonnement statique (essai CBR)* est particulièrement approprié pour des géosynthétiques résistants à la traction. Les membranes alvéolaires, les lés de protection et les géonontissés peuvent être testés relativement bien. Par contre, les nattes de protection de caoutchouc présentent des valeurs mesurées très basses. Les géocomposites se composant de différents éléments, ceux-ci s'écrasent plus ou moins vite au test du poinçonnement statique. Cet essai n'est donc pas recommandé pour tous les géosynthétiques comme méthode de remplacement.

D'après la norme *EN ISO 13433 Essai de perforation dynamique (essai par chute d'un cône)* les géosynthétiques épais et non homogènes ne se prêtent pas au test. Chaque genre de géosynthétique présente des valeurs mesurées, où le cône de pénétration ne parvient pas à perforer au moins une fois l'échantillon testé. La variation des résultats est également élevée. En conséquence, ce test n'est pas recommandé comme méthode de remplacement.

Summary

The service life expectancy of a tunnel or an underground construction is highly affected by the durability of the waterproofing used. A waterproofing system is made up of the actual waterproofing, for example a synthetic liner, a protective layer and the contact soil or rock, for example crushed stone as fill material. These three components should be adjusted to each other. The protective layer, in many cases a so-called geosynthetic, must protect the liner from mechanical damages in order to guarantee the waterproofing function. Typical types of geosynthetics are nonwoven geotextiles, geocomposites, synthetic protection sheets or rubber granulate mattings.

The current application-specific requirements governing the performance of geosynthetics, used as waterproofing protection, are defined in the Swiss Standards SN 670 243¹ *Geosynthetics – Requirements for the function protection* and SIA 272² *Waterproofing and drainage of underground buildings and tunnel constructions*. During the development of the new Swiss standard SIA 272 about waterproofing it became clear that there is a need to define new requirement values for protective layers, since the mechanical puncture resistance currently used and defined in the SIA 272, appendix D.3.1 is not a harmonized CEN or ISO method. This test is in fact a modified version of the EN 12691 defining the resistance of roof sealing membranes.

Additionally, requirements for the following properties are missing: EN ISO 13428 *Geosynthetics - Determination of the protection efficiency of a geosynthetic against impact damage*; EN 14574 *Geosynthetics - Determination of the pyramid puncture resistance of supported geosynthetics*; and EN 13719 *Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the long-term protection efficiency of geotextiles in contact with geosynthetic barriers*.

This research project aims to select suitable EN test methods in order to replace the mechanical puncture resistance described in the SIA 272 (appendix D.3.1) and to propose requirement values according to these EN test methods. Based on the findings of the research, both standards SN 670 243 and SIA 272 will be revised. All Swiss requirements for geosynthetics concerning the function of protection, including those of the SIA 272 appendix D.3.1, will be adjusted to European testing methods. This will eliminate the only remaining technical barrier in Switzerland in this field. A further project goal is to extend the validity of the SN 670 243 to more applications and other geosynthetic materials.

Thirty-six geosynthetic products belonging to five different production types (fourteen nonwoven geotextiles, seven geocomposites, five flat protection sheets, six rubber granulate mats and three dimpled sheets) were examined by the following test procedures:

- SIA 272: 2009 Appendix D.3.1: *Mechanical puncture resistance* (as reference test)
- EN ISO 13428 *Geosynthetics - Determination of the protection efficiency of a geosynthetic against impact damage*
- EN 14574 *Geosynthetics - Determination of the pyramid puncture resistance of supported geosynthetics*
- EN 13719: *Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the long-term protection efficiency of geotextiles in contact with geosynthetic barriers*
- EN ISO 12236: *Geosynthetics - Static puncture test (CBR test)*
- EN ISO 13433: *Geosynthetics - Dynamic perforation test (cone drop test)*

Using statistical data analysis, a linear regression was searched between the reference test in SIA 272 appendix D.3.1 and the EN test procedures, for each geosynthetic type.

In order to replace the mechanical puncture resistance described in the SIA 272 appendix D.3.1, the research report recommends the test procedure EN ISO 13428 *Determination*

¹ *Geokunststoffe - Anforderungen für die Funktion Schützen*

² *SIA 272 Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau*

of the protection efficiency of a geosynthetic against impact damage. It is suitable for all types of geosynthetics. An excellent statistical correlation ($r \geq 0.9$) was found between the reference test and this test procedure. The statistical spread of results within a geosynthetic type and between the types is very small. This test requires little material, it can be performed quickly and the results are easy to evaluate. The test results show a residual thickness of the lead plate between 30 % and 90 %. The higher the residual thickness, the better the protection efficiency of the geosynthetic.

The regression line is recommended as best suited to calculate the requirement values for the new replacement tests.

Strong statistical correlation ($r \geq 0.9$) could also be found between the EN 14574 *Geosynthetics - Determination of the pyramid puncture resistance of supported geosynthetics* and the reference. The punctual load of some inhomogenous geocomposites and dimpled-sheets leads to high statistical spreads; this method is therefore not suitable, especially for dimpled sheets. The pyramid-shaped pin tends to dull under impact, leading to erroneous results. The test results between the different geosynthetics differ by up to a factor of ten. Thus, the pyramid puncture test is not recommended primarily as a substitute.

Even if all geosynthetics could be tested using EN 13719 *Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the long-term protection efficiency of geotextiles in contact with geosynthetic barriers*, there is certain room for judgement owing to irregular denting of the lead plate. In the cases of nonwovens and rubber granulate mattings reasonably strong correlation was found, whereas geocomposites, flat and dimpled sheets generated weak correlations. With regard to geocomposites and both types of sheets, stronger correlations could be obtained probably with a higher number of trials. However, this was not possible in this study because one test process took at least twelve days. As a consequence of the laborious nature of this test procedure, it cannot be recommended as a substitute.

The *static puncture test (CBR)* according to EN ISO 12236 is readily applicable to high tensile geosynthetics. On the one hand, nonwoven geotextiles, flat and dimpled sheets can be tested easily. On the other hand, each of the rubber granulate mats showed quite poor results, therefore a recommendation cannot be given. Geocomposites, made of different components, failed at different load rates. Thus, the static puncture test cannot be recommended for all geosynthetic types.

Thick and inhomogenous geosynthetics cannot be tested by the EN ISO 13433 *Dynamic perforation test or cone drop test*. All geosynthetics recorded measurements in which the dropped cone at least once did not penetrate the sample, leading to widely spread results. Cone drop is therefore not suitable as a substitute for the reference test.

1 Auftrag und Zielsetzungen

1.1 Ausgangslage / Projektbegründung

In der Schweiz sind die Anforderungen an Geokunststoffe mit Schutzfunktion in den Normen SN 670 243: 2005 und SIA 272: 2009 geregelt.

In der Anforderungsnorm SN 670 243: 2005 sind für die Prüfung von Geokunststoffen die europäischen Prüfverfahren EN ISO 10319, EN ISO 13433 und EN ISO 12236 integriert und Anforderungen definiert (Tab. 1). Keine Anforderungen existieren hingegen für die in Tab. 2 aufgeführten EN-Prüfmetho-

Tab. 1: In der SN 670 243: 2005 integrierte EN-Prüfnormen	
EN ISO 13433	Geokunststoffe - Dynamischer Durchschlagversuch
EN ISO 12236	Geokunststoffe - Stempeldurchdruckversuch
EN ISO 10319	Geokunststoffe - Zugversuch am breiten Streifen (Geovlies, Geogewebe)

Tab. 2: In die SN 670 243 zu integrierende EN-Prüfnormen	
EN ISO 13428	Geokunststoffe - Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffes bei Stossbelastung
EN 13719	Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen
EN 14574	Geokunststoffe - Bestimmung des Pyramidendurchdruckwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage

Die Anwendungs- und Ausführungsnorm SIA 272: 2009 „Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau“ behandelt alle im Tief- und Tunnelbau einsetzbaren Abdichtungen. Sie berücksichtigt ebenfalls die zum Schutz der Abdichtung eingesetzten Schutzgeokunststoffe, Schutzbahnen und Schutzplatten.

Für weitere spezifische Anforderungen an die Funktion Schützen verweist die SIA 272 auf die SN 670 243. Die SIA 272 stellt im Anhang D.3.1 relevante Anforderungen, unter anderem an ein modifiziertes Verfahren der SN EN 12691: 2006 „Bestimmung des Widerstandes gegen stossartige Belastung“, welches allerdings für Dachabdichtungen gilt.

Das Ziel der Forschungsarbeit ist, geeignete EN-Prüfverfahren anstelle des europäisch nicht normierten Prüfverfahrens nach SIA 272 Anhang D.3.1 vorzuschlagen und die Eignung und Leistungsfähigkeit von EN-Prüfverfahren aufzuzeigen, damit neue Anforderungen an Geokunststoffe mit der Funktion Schützen festgelegt werden können. Ein weiteres Ziel des Projektes ist, die nötigen Grundlagen zu erarbeiten, um die Gültigkeit der SN 670 243 auf weitere Anwendungsfälle wie Bauten unter Terrain, Tagbautunnel, Untertagebau sowie auf weitere Geokunststoffe wie Schutzbahnen, Gummischrotbahnen und Noppenbahnen auszuweiten.

Das Bundesamt für Strassen beauftragte am 27. März 2013 die Forschungsgemeinschaft mit der Durchführung der vorliegenden Forschungsarbeit. Das Forschungsteam setzt sich wie folgt zusammen:

- Berner Fachhochschule (BFH), Architektur Holz und Bau, Kompetenzzentrum Naturereignisse und Geotechnik, Burgdorf (Federführung)
- Tecnotest AG (TT), Rüschlikon

1.2 Erwartete Resultate

Die Forschungsarbeit liefert Erkenntnisse und Grundlagen für die Festlegung von neuen Anforderungen an Geokunststoffe für die Revision der Norm SN 670 243. Die Erkenntnisse sollen ebenfalls in die Überarbeitung der SIA 272 einfließen.

Prüfverfahren

- Empfehlung eines oder mehrerer EN-Prüfverfahren als Ersatz für die mechanische Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) mit den dazugehörigen Anforderungswerten.
- Aufzeigen von Korrelationen zwischen der mechanischen Durchschlagfestigkeit und den Eigenschaften:
 - Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung
 - Pyramidendurchdruckwiderstand
 - Langfristige Schutzwirksamkeit
 - Stempeldurchdruckkraft
 - Dynamischer Durchschlagswiderstand

Anforderungswerte

- Ableitung realistischer Anforderungswerte aus den Korrelationen unterschieden nach Geokunststoffart: Geovliese, Geoverbundstoffe, Schutzbahnen, Gummischrotbahnen und Noppenbahnen.

Die Autoren des Forschungsberichts publizierten bereits 2014 in [12] über die erwarteten Resultate und die Vorgehensweise in diesem Forschungsprojekt.

2 Grundlagen

2.1 Normen

Als Grundlage für dieses Projekt dienten folgende Normen und Richtlinien:

- SIA 270 (2014) / SN 583 270: Abdichtungen und Entwässerungen - Allgemeine Grundlagen und Abgrenzungen
- SIA 272 (2009) / SN 564 272: Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau
- SIA V 280 (1996): Kunststoff-Dichtungsbahnen (Polymer-Dichtungsbahnen) - Anforderungswerte und Materialprüfungen (ungültig)
- SIA 281 (2013): Dichtungsbahnen - Kunststoff-Dichtungsbahnen, bitumenhaltige Dichtungsbahnen und Ton-Dichtungsbahnen - Produkte- und Baustoffprüfungen, Werkstoffbezeichnungen
- SN 670 090 (2012): Geokunststoffe - Grundnorm
- SN 670 241 (2006): Geotextilien - Anforderungen für die Funktionen Trennen, Filtern, Drainieren (ungültig)
- SN 670 241 (2014): Geotextilien - Anforderungen für die Funktionen Trennen und Filtern
- SN 670 243 (2005): Geokunststoffe - Anforderungen für die Funktion Schützen
- SN EN 13254 (2014): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung beim Bau von Rückhaltebecken und Staudämmen
- SN EN 13255 (2014): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung beim Kanalbau
- SN EN 13256 (2014) / SN 670 256-NA: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung im Tunnelbau und in Tiefbauwerken
- SN EN 13257 (2014): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Deponien für feste Abfallstoffe
- SN EN 13265 (2014): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Projekten zum Einschluss flüssiger Abfallstoffe
- SN EN ISO 527-3 (1999) Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln
- SN EN ISO 1798 (2008): Weich-elastische polymere Schaumstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung (ISO 1798:2008)
- SN EN 1849-2 (2009): Abdichtungsbahnen - Bestimmung der Dicke und flächenbezogenen Masse - Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen
- SN EN ISO 9863-1 (2005): Geokunststoffe - Bestimmung der Dicke unter festgelegten Drücken - Teil 1: Einzellagen
- SN EN ISO 9864 (2005) / SN 670 704: Geokunststoffe - Prüfverfahren zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten
- SN EN ISO 10318 (2005) / SN 670 092: Geokunststoffe - Begriffe
- SN EN ISO 10319 (2015) / SN 670 734: Geokunststoffe - Zugversuch am breiten Streifen
- SN EN ISO 10722 (2007) / SN 670 736: Geokunststoffe - Indexprüfverfahren zur Bewertung von mechanischen Schäden bei wiederholter Belastung - Beschädigung durch körnige Materialien
- SN EN 12311-2 (2010): Abdichtungsbahnen - Bestimmung des Zug- Dehnungsverhaltens - Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen
- SN EN ISO 12236 (2006) / SN 670 711a: Geokunststoffe - Stempeldurchdruckversuch (CBR)
- SN EN 12431 (2013): Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Dicke von Dämmstoffen unter schwimmendem Estrich
- SN EN 12691 (2006): Abdichtungsbahnen - Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen - Bestimmung des Widerstandes gegen stossartige Belastung

- SN EN ISO 13427 (1998) / SN 670 744a: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Simulation von Scheuerbeschädigungen
- SN EN ISO 13428 (2005) / SN 670 745: Geokunststoffe - Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffs bei Stossbelastung
- SN EN ISO 13431 (1999) / 670 746: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens
- SN EN ISO 13433 (2006) / SN 670 712a: Geokunststoffe - Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch)
- SN EN 13719 (2005) / SN 670 750: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen
- SN EN 13719 (2014): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen (Entwurf)
- SN EN 14574 (2004) / SN 670 714: Geokunststoffe - Bestimmung des Pyramiden-durchdrückwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage
- ÖNORM S 2076-1 (2009): Deponien - Dichtungsbahnen mit Abdichtungsbahnen aus Kunststoff Teil 1: Verlegung
- Österreichische Bautechnische Vereinigung öbv (2012): Richtlinie Tunnelabdichtung
- Bundesanstalt für Strassenwesen Bast (2007): Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Ingenieurbauten (TL/TP-ING) Teil 5 Abschnitt 5 Technischen Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Schutz- und Drän-schichten aus Geokunststoffen (TL/TP SD)

2.2 Stand der Technik

Ab den 70er Jahren wurden Vliesstoffe im Strassenbau bei schlechter Tragfähigkeit des Bodens und hohem Wassergehalt eingesetzt, um die Stabilität des Untergrundes zu verbessern [3]. Mit dem Trennvlies konnte die Tragfähigkeit der Foundationsschicht langfristig gewährleistet werden. Zudem konnte durch geringere Schichthöhen der Verbrauch von traditionellen Baustoffen wie Sand, Kies etc. mit Geokunststoffen reduziert werden [8].

Die Eigenschaften der Geokunststoffe werden massgebend über Rohstoffe, Herstellungsart und Struktur definiert [6]. Gemäss der SN 670 243: 2005 schützen Geokunststoffe mit der Funktion „Schützen“ Abdichtungen oder Bauteile vor mechanischen Beschädigungen, die durch das Kontaktmaterial während des Einbaus oder durch Dauerbelastungen entstehen können. Die Beschädigungen entstehen insbesondere durch das statische sowie dynamische Eindrücken von Grobkorn aus Locker- oder Felsgestein, sowie durch Scheuerbewegungen zwischen dem zu schützenden Bauteil und der Umgebung [4]. Das Eindrücken von Körnern, Kanten oder Spitzen im Kontaktmaterial wird mit dem Begriff Perforation umschrieben und entspricht im Wesentlichen dem Widerstand gegen mechanische Durchdringung. Diese mechanische Durchdringung beschreiben der dynamische Durchdringungswiderstand (EN ISO 13433), die Stempeldurchdrückkraft (EN ISO 12236), die Pyramidendurchdrückkraft (EN 14574) und die dynamische Durchschlagfestigkeit (EN ISO 13428) [10]. In [4] wird als weitere mechanische Einwirkungen noch das Scheren oder Quetschen erwähnt. Die SN 670 243: 2005 führt als mechanische Beschädigungen an Geokunststoffen mit der Funktion Schützen die Perforation und das Scheuern auf.

Damit die Schutzfunktion gewährleistet ist, müssen die Geokunststoffe nach [4] einen hohen Widerstand gegen Perforation sowie eine gewisse Dicke aufweisen. Durch diese Eigenschaften kann der Schutzgeokunststoff die Unterlage vor mechanischer Beschädigung durch Einbaubelastung einerseits und statische Dauerbelastung andererseits schützen [10]. Bei der Verwendung im Erd- und Tiefbau müssen Schutzgeokunststoffe massgebende charakteristische Eigenschaften erfüllen (Tab. 3), um eine Schutzfunktion zu gewährleisten [10]. Je nach Anwendungsfall ist auch die Funktion Drainieren sinnvoll oder für gewisse abzudichtende Bauwerke unerlässlich. Weiter Funktionen werden selten mit der Funktion Schützen kombiniert [10]. Die Funktion des Drainierens ist neben Schützen und Drainieren in der SN 670 241 geregelt.

Tab. 3: Funktion Schützen, charakteristische Eigenschaften, modifiziert nach [10]		
Funktion Geokunststoff	Aufgabe Geokunststoff	charakterisiert durch die Eigenschaft
Funktion Schützen	Widerstand gegen Beschädigung	Durchschlagwiderstand, Stempeldurchdrückkraft, Pyramidendurchdrückkraft, Scheuerwiderstand
	Allgemeine Einbaubeanspruchungen	Zugfestigkeit, Dehnung unter Höchstzugkraft Produkt aus (Zugfestigkeit * Dehnung unter Höchstzugkraft)
	Reibung zur Unterlage	Reibungskoeffizient Geokunststoff-Abdichtung
	Widerstand gegen Umwelteinflüsse	Beständigkeit gegen Bewitterung (Tagbautunnel), chemische und biologische Einflüsse, Langzeitbeständigkeit (100 Jahre, Untertagebau) gegen aggressive Bergwässer und erhöhte Temperatur
Funktion Drainieren	Wasserdurchfluss in der Ebene	Transmissivität (Durchlässigkeit in der Ebene)
	Begrenzen der Feinmaterialeinspülung in den Geokunststoff	Charakteristische Öffnungsweite Durchlässigkeit senkrecht zur Ebene
	Langzeitfunktion (100 Jahre)	Stauchung in Abhängigkeit der Druckbeanspruchung und Dauer und dadurch verursachte Abminderung der Transmissivität

Geokunststoffe mit Schutzfunktion müssen entsprechend der SN 670 243: 2005 Mindest- und Zusatzanforderungen an mechanischen Eigenschaften erfüllen, damit sie beim Einbau keine wesentlichen Beschädigungen erfahren und dadurch eine verminderte Schutzfunktion aufweisen. Zusätzlich führt die SN 670 243 auch Anforderungen an die hydraulischen Eigenschaften und an die Beständigkeit auf. Schutzgeokunststoffe müssen materialverträglich mit der Abdichtung sein und sie müssen eine übermässige mechanische Verformung der Abdichtung bei Druckbelastung verhindern.

Geokunststoffe als Schutzschicht sind bei Abdichtungssystemen immer zusammen mit der Abdichtung zu betrachten [10]. Für eine robuste Abdichtung genügt eine geringe Wirkung des eingesetzten Schutzgeokunststoffs. Für eine empfindliche Abdichtung sind Schutzgeokunststoffe mit quantifizierter und erhöhter Schutzwirkung erforderlich [10]. Nach [4] sollten dementsprechend sogenannte Systemprüfungen oder Leistungsprüfungen vorgesehen werden, die das gesamte Abdichtungssystem (Abdichtung und Schutzlage) umfassen. Dies soll besonders bei Schutzgeokunststoffen im Deponiebau, im allgemeinen Untertagebau sowie bei Tagbautunnels mit erheblicher Überdeckung und grösseren Wasserdrücken gelten.

Im Tunnelbau in der Schweiz beträgt die heute geforderte und geplante Nutzungsdauer von Abdichtungen allgemein 100 Jahre. Die genannten Eigenschaften müssen über die geplante Nutzungsdauer des abzudichtenden bzw. zu schützenden Bauwerks / Bauteils erhalten bleiben. Damit erfüllt in der Regel der Schutzgeokunststoff eine permanente Aufgabe [4]. Deswegen ist neben den mechanischen Eigenschaften auch das Zeitstandverhalten relevant [10] und damit die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse [4], da die Geokunststoffe nach dem Verlegen nicht immer sofort überdeckt oder angeschüttet werden können. Somit wird ein Widerstand gegen Bewitterung erforderlich [10]. Die Witte-rungsbeständigkeit ist nach SN EN 13256 Anhang A definiert. Nach der Bewitterung muss die Restfestigkeit 60 % betragen, wenn der Schutzgeokunststoff bis zu 4 Wochen unbedeckt bleibt.

Im Tunnelbau / Untertagebau ist die Langzeitbeständigkeit (100 Jahre) der Geokunststoffe von grossem Interesse, insbesondere dann, wenn es um die Funktionen Schützen und Drainieren geht. Diese Langzeitbeständigkeit ist besonders unter chemischen und biologischen Einwirkungen (aggressive Bergwässer) inklusive erhöhten Temperaturen durch das Wasser zu erreichen. Die Anforderungen entsprechen denen der Abdichtung und sind in den Beständigkeitsprüfungen an Kunststoffdichtungsbahnen in der SIA 272 geregelt.

Die Anforderungen an die Geokunststoffe mit der Funktion Schützen sind in der

SN 670 243 geregelt. Als erforderliche Produktdaten für die Funktion Schützen werden entsprechend SN 670 243: 2005 die Stempeldurchdrückkraft nach EN ISO 12236 „Geokunststoffe - Stempeldurchdrückversuch“, der Durchschlagwiderstand nach EN ISO 13433 „Geokunststoffe - Dynamischer Durchschlagversuch“ sowie die Zugfestigkeit und Dehnung bei Höchstzugkraft nach EN ISO 10319 „Geokunststoffe - Zugversuch am breiten Streifen“ verlangt. Im Forschungsauftrag VSS 2008/403 „Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen“ wurde der Zusammenhang zwischen Durchschlagwiderstand und Stempeldurchdrückkraft untersucht und eine Korrelation erstellt [5]. Aufgrund geringerer Varianzen wurde der Durchschlagwiderstand durch die Stempeldurchdrückkraft in der SN 670 241 ersetzt. Weitere charakteristische Parameter, wie Scheuerwiderstand, Pyramidendurchdrückkraft oder Reibungsbeiwerte (Scherkastenversuch, Schiefe-Ebene-Versuch) werden in der SN 670 243: 2005 als erwünschte Angaben oder je nach Anwendung und Projekt als erforderliche Angaben aufgeführt. Weitere Prüfverfahren waren zur Zeit der Erstellung der SN 670 243: 2005 nicht bekannt und wurden nicht aufgeführt.

Die SN 670 090: 2012 fordert im Anhang 1.1 für Schutzgeotextilien neben den hydraulischen Eigenschaften (Angabe fakultativ) die folgenden zwingenden Angaben der Eigenschaften:

- Rohstoff,
- Flächenbezogene Masse,
- Zugfestigkeit und Dehnung bei Höchstzugkraft (längs / quer),
- Durchschlagwiderstand und
- Witterungsbeständigkeit.

Die SN 670 243: 2005 verweist zudem auf zusätzliche Randbedingungen (z. B. Kontaktmaterial innen / aussen und weitere wichtige Einflüsse), welche projektspezifische mechanische Zusatzanforderungen an den Schutzgeokunststoff darstellen. Diese werden durch einen Gesamtfaktor der Beanspruchung ausgedrückt, der sich aus dem Produkt mehrerer Teilfaktoren berechnet. Dieser Gesamtfaktor erlaubt eine Einteilung in drei Bereiche mit entsprechenden mechanischen Mindestanforderungen an den Geokunststoff mit Schutzfunktion [4].

Nach [1] (Abb. 1) werden bei der zweischaligen Tunnelausbauvariante die Sicherungsschale und die Auskleidungsschale mittels einer dreischichtigen Abdichtung (Schutzvlies, Dichtungsbahn, Schutzfolie) voneinander getrennt. Dabei bilden Schutzvlies und Drainagematte normalerweise eine einzige Schicht: die Schutz- und Drainageschicht. Die Nennmassenfläche der verwendeten Schutzgeokunststoffe liegt nach SIA 272 je nach Anwendung bei 500 g/m^2 , 1000 g/m^2 und 1500 g/m^2 . Im Bereich einer bewehrten Sohle wird z. B. zum Schutz der Kunststoffdichtungsbahn zusätzlich noch eine luftseitige Schutzschicht eingebracht, die aus Kunststoffschutzbahnen oder Schutzbeton bestehen kann. Der verwendete Schutzkunststoff muss dabei unverrottbar und beständig gegen chemische Angriffe sein.

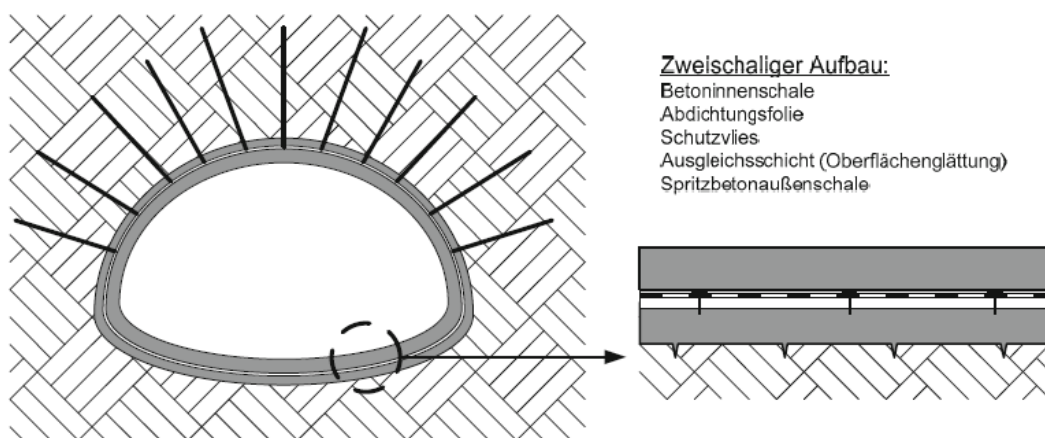


Abb. 1: Beispiel für einen zweischaligen Aufbau der Tunnelschale [1]

Auf der Baustelle garantiert die Abdichtungsfirma für die Dichtigkeit des Systems. Idealerweise kommt das ganze Abdichtungssystem vom selben Verleger.

Im Deponiebau in Österreich wird die Schutzfunktion von Geokunststoffen mit der Pyramidendurchdrückkraft nach EN 14574 / SN 670 724: bestimmt, wie in der ÖNORM S 2076 (1993) beschrieben. In Deutschland beschreibt die DGGT 2010 in „E 3-9 Eignungsprüfung für Geokunststoffe“ die Prüfung der mechanischen Schutzwirkung mittels eines modifizierten Zeitstand-Lastplattendruckversuchs. Dabei liegen innerhalb eines Zylinders nach einem vorgeschriebenen Aufbau Elastomer, Weichblech, Dichtungsbahn, Schutzschicht und Dränkieslage übereinander. Der gesamte Aufbau wird mit einem Druckstempel unter festgelegten Prüfbedingungen belastet. Nach Versuchsende wird aus den konservierten Verformungen im Bleiblech die Wölbbogendehnung ermittelt. Gemäss „Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen“ (2014) der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) erfüllen PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen ihre Eignung, wenn die konservierte Eindellung im Weichblech kleiner als 25 % Wölbbogendehnung ist. Die Geokunststoffschutzschichten werden dementsprechend nach ihrer Dehnungsbegrenzung in der Kunststoffdichtungsbahn ausgewählt [2]. Die EN 13719: 2002 beschreibt ein Indexprüfverfahren zur Bestimmung der Wirksamkeit, mit der ein Geotextil oder ein geotextilverwandtes Produkt einen Geokunststoff als Barriere oder andere Kontaktflächen gegen die mechanische Langzeiteinwirkung statischer Punktbelastungen schützen wird. Die Prüfung wird dabei nur am Geotextil oder geotextilverwandten Produkt ausgeführt. Bestimmt werden die Dehnungen, welche das Geotextil auf dem Bleiblech hinterlässt, das im Kontakt mit einer deformierbaren Unterlage besteht.

Im Strassenbau werden Geokunststoffe zum Schutz von Dichtungsbahnen gegen mechanische Beanspruchung durch den angrenzenden Boden oder zum Schutz der Dichtungsaufstriche an Bauwerken durch mechanische Beanspruchung durch die Hinterfüllung verwendet [9].

3 Methodik

Das Forschungsteam untersuchte 35 in der Schweiz erhältliche Geokunststoffe:

- 14 Geovliese (GTX-N, gemäss SN 670 090)
- 7 Geoverbundstoffe (GCO, gemäss SN 670 090)
- 5 Schutzbahnen (GTP-PROT, in Anlehnung an SN 670 090)
- 6 Gummischrotbahnen (GTP-RUB, in Anlehnung an SN 670 090)
- 3 Noppenbahnen (GBR-NOP, in Anlehnung an SN 670 090)

Schutzplatten wurden nicht untersucht. Schutzplatten sehen aus wie Schutzbahnen und unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Verpackungsform. Die Festlegung von Anforderungen an Schutzplatten entspricht denen der Schutzbahnen.

Jedes Produkt wurde aus Gründen der Vertraulichkeit anonymisiert (404_01 - 404_36). Die Geokunststoffe wurden mit den folgenden sechs Prüfverfahren untersucht:

- SIA 272 (2009) Anhang D.3.1: „Mechanische Durchschlagfestigkeit für Schutz-matten“
- SN EN ISO 13428 (2005): Geokunststoffe - Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffs bei Stossbelastung
- SN EN 14574 (2004) / SN 670 714: Geokunststoffe - Bestimmung des Pyramidendurchdruckwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage
- SN EN 13719 (2005): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen
Der Entwurf SN EN 13719 (2014) stand zu Beginn der Arbeiten nicht zur Verfügung. Die Unterschiede zwischen beiden Ausgaben sind in Kapitel 4.4 erklärt.
- SN EN ISO 12236 (2006) / SN 670 711a: Geokunststoffe - Stempeldurchdruckversuch (CBR)
- SN EN ISO 13433 (2006): Geokunststoffe - Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch)

Nach Durchführung der Versuche wurden mittels statistischer Datenanalyse und der Statistiksoftware R lineare Regressionsmodelle mit Vertrauens- und Prognoseintervallen berechnet. Gesucht wurde die statistisch gesicherte Korrelation zwischen dem Referenzprüfverfahren gemäss SIA 272 Anhang D.3.1 und dem jeweiligen EN-Prüfverfahren. Die ausführliche Vorgehensweise ist in Kapitel 6.2 beschrieben.

Die Laborprüfungen wurden nach Nützlichkeit priorisiert. Folgende für die Funktion Schützen wenig nutzbringende Prüfungen wurden aus dem ursprünglichen Versuchsplan entfernt, da das Forschungsbudget gekürzt werden musste:

- SN EN ISO 10722 (2007): Geokunststoffe - Indexprüfverfahren zur Bewertung von mechanischen Schäden bei wiederholter Belastung - Beschädigung durch körnige Materialien
- SN EN ISO 13427 (1998): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Simulation von Scheuerbeschädigungen
- SN EN ISO 13431 (1999): Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens

Hinzu kommt, dass diese Prüfungen in Europa nur sehr beschränkt angeboten werden.

4 Prüfverfahren

4.1 Mechanische Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 Anhang D.3.1 (Referenzverfahren)

Bei dieser Prüfung handelt es sich um ein modifiziertes Verfahren der SN EN 12691: 2006 „Bestimmung des Widerstandes gegen stossartige Belastung“ zur Bestimmung der mechanischen Durchschlagfestigkeit eines Geokunststoffs. Verwendet wird dieses Prüfverfahren normalerweise für Dachabdichtungen. Während der Durchführung fällt ein Fallkegel aus einer bestimmten Höhe auf das Prüfmuster. Anschliessend wird eine unter dem Prüfmuster liegende 1.5 mm dicke mehrschichtige synthetische Dachabdichtung auf Basis von Polyvinylchlorid (PVC) auf ihre Dichtheit geprüft.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung (Abb. 2) besteht aus einer stufenweise höhenverstellbaren Fallvorrichtung und einem Prüfgewicht von 500 g an einer Auslösevorrichtung. Anstelle des Stahlbolzens mit $l = 40$ mm und einer kugelförmigen Prüfspitze mit $d = 12.7$ mm (SN EN 12691) wird ein Stahlbolzen mit $l = 25$ mm und einer kugelförmigen Prüfspitze mit $d = 6$ mm verwendet.



Abb. 2: Versuchsstand nach SIA 272 Anhang D.3.1, Prüfkegel in Ausgangsposition vor dem Falltest. Der Durchstoss in der Kunststoffdichtungsbahn (KDB, Oberseite helle Signalschicht) wird mittels Unterdruck und Seifenlauge an der Rückseite auf Dichtheit untersucht. Die KDB ist undicht.

Durchführung

Beim Falltest liegt unter dem zu prüfendem Schutzgeokunststoff eine Kunststoffdichtungsbahn mit einem Prüfwert für die Fallhöhe nach SIA V 280 von 800 mm. Die Probe wird auf die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) gelegt. Der Fallkörper wird an der zu prüfenden Fallhöhe ausgelöst und fällt auf das Prüfmuster. Der Widerstand gegen Stossbelastung wird durch die Fallhöhe des Fallkörpers in Millimeter ausgedrückt, bei der die dazugehörige KDB dicht bleibt. Für jeden Versuch werden ein neues Prüfmuster und eine neue KDB verwendet. Die Auslösevorrichtung lässt sich von Fallhöhe $h = 200$ mm bis mindestens $h = 2000$ mm in folgenden Schritten arretieren:

- 50 mm zwischen 200 mm und 500 mm
- 100 mm zwischen 500 mm und 1000 mm
- 250 mm für Fallhöhen über 1000 mm

Bei einer Fallhöhe aus 1000 mm entspricht die Stossenergie des Aufpralls ca. 5 Joule.

Auswertung

Nach dem Falltest wird die KDB auf einen möglichen Durchstoss untersucht, indem die Oberfläche, auf der die Stossbelastung erfolgte, mit einer Seifenlösung innerhalb von 5 min nach der jeweiligen Prüfung bestrichen wird. Eine Druckdifferenz mit einem Überdruck von 15 kPa (0.15 bar) wird rückseitig auf die KDB aufgebracht. Falls nach 60 s keine Blasen in der Seifenlösung erkennbar sind, gilt der Prüfkörper als nicht durchstossen, das heisst er ist „dicht“. Die Prüfung ist bestanden, wenn 4 von 5 Einzelproben als dicht getestet wurden, d. h. keine Seifenblasen auf der Rückseite erkennbar sind.

4.2 Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffes bei Stossbelastung nach EN ISO 13428

Bei diesem Prüfverfahren wird der Widerstand von Geokunststoffen gegen Verformung durch einen halbkugelförmigen Prüfkopf festgelegt, der aus einer bestimmten Höhe fallen gelassen wird. Die Restenergie, welche nicht durch den Geokunststoff absorbiert oder umgewandelt wird, führt zu einer bleibenden Verformung einer Bleiplatte. Die Dickenänderung der Bleiplatte ist der Kennwert zur Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffs auf einer harten Oberfläche bei Stossbelastung durch einen halbkugelförmigen Gegenstand.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung besteht aus einer 1 m hohen Fallvorrichtung (entspricht Abb. 2) und einem Prüfungsgewicht von 1000 g an einer Auslösevorrichtung. Bei dieser Fallhöhe beträgt Aufprallenergie rund 10 Joule.

Der Prüfkopf ist ein Stahlzylinder mit einem halbkugelförmigen Kopf von 20 mm Durchmesser (Abb. 3). Auf einer Unterlage aus Stahl liegt eine ca. 1.8 mm dicke Bleiplatte und auf dieser der Prüfkörper.



Abb. 3: links: eingespannter Prüfkopf (EN ISO 13428) vor dem Falltest, rechts: die Stossenergie führt zu einer plastischen Verformung der Bleiplatte (roter Kreis)

Durchführung

Die Probe wird auf ein Bleiblech gelegt. Das Fallgewicht wird in 1000 ± 10 mm Höhe ausgelöst, so dass es mittig auf die Oberfläche der Messprobe fällt. Danach wird das Prüfungsgewicht entfernt und ein neues Prüfmuster und Bleiblech installiert.

Auswertung

Vor dem Falltest wird die Dicke der Bleiplatte gemessen. Nach dem Falltest wird die verbleibende Restdicke bestimmt. Der Mittelwert wird aus fünf Prüfungen am selben Prüfmuster berechnet. Das Ergebnis ist die Restdicke gegenüber der Ursprungsdicke in Prozent. Die prozentuale Restdicke (s_r) wird gemäss Norm in Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse im Vergleich zum Mittelwert des Geokunststoffs korrigiert.

4.3 Pyramidendurchdruckwiderstand nach EN ISO 14574

Die Prüfmethode simuliert die Wirksamkeit eines Geokunststoffs in seiner Funktion als Schutz einer Abdichtung gegen scharfe, feste Gegenstände unter kurzzeitiger Belastung.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung (Abb. 4) besteht aus einer Druckprüfmaschine und einem pyramidenförmigen Druckstempel. Die Vorschubgeschwindigkeit des Druckstempels liegt konstant bei $v = 1.0 \pm 0.1$ mm/min.

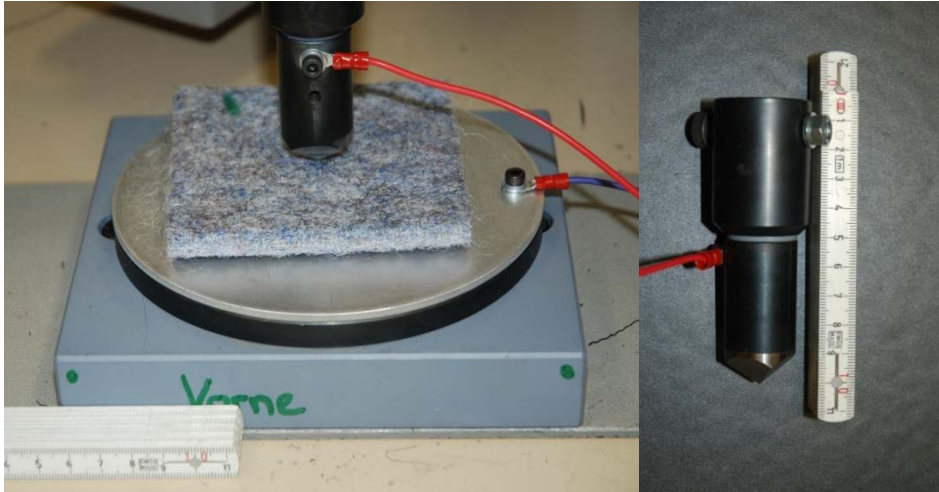


Abb. 4 links: Der pyramidenförmige Stempel durchdrückt ein Geotextil bis die Prüfspitze (Detail rechts) beim Durchdringen des Geokunststoffs den Stromkreis mit der Aluplatte schliesst (Kurzschluss) und den Versuch beendet.

Durchführung

Eine Messprobe wird auf einem Aluminiumblech gelegt. Unter dem Aluminiumblech liegt eine starre Stahlplatte. Der pyramidenförmige Stempel aus Stahl drückt mit konstantem Vorschub in das Geotextil bis sie durchstossen wird. Zwischen Druckstempel und Unterlagemedium wird ein elektrischer Stromkreis geschaltet und bei Kurzschluss die maximale Durchdruckkraft bestimmt.

Auswertung

Der Pyramidendurchdruckwiderstand F_{max} [N] wird als arithmetischer Mittelwert von zehn einzelnen Prüfungen angegeben.

4.4 Langfristige Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen nach EN 13719

Dieses Indexprüfverfahren dient zur Bestimmung der Wirksamkeit, mit der ein Geotextil oder ein geotextilverwandtes Produkt einen Geokunststoff als Barriere oder andere Kontaktflächen gegen die mechanische Langzeiteinwirkung statischer Punktbelastungen schützt. Es handelt sich dabei um einen vereinfachten Druckversuch. Es werden mindestens drei Versuche bei unterschiedlichen Belastungen durchgeführt. Die dabei auftretenden Eindellungen werden durch ein Bleiblech aufgenommen. Aus den Eindellungen wird die Dehnung bestimmt. Aufgetragen im Spannung-Dehnungs-Diagramm ergibt der Kehrwert der Steigung der Regressionsgeraden die langfristige Schutzwirksamkeit.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung (Abb. 5 und Abb. 6) besteht aus einem Schichtaufbau in einem Stahlzylinder ($d_i = 30$ cm). Die Kraft wird über eine hydraulische Presse und einen Druckzylinder gleichmässig auf eine Stahlplatte aufgebracht. Das Widerlager besteht aus einer Traverse, die mit der Bodenplatte der Prüfeinrichtung fest verbunden ist. Die Last wird auf einer Stahlplatte aufgebracht und in Abständen von mindestens 12 h aufgezeichnet.



Abb. 5: Prüfzylinder zur Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit nach EN 13719. Das weisse Kabel verbindet Kraftmessdose und Messeinrichtung (PC)

Durchführung

Innerhalb eines Stahlzylinders liegt auf einer ersten unteren Stahlplatte ($d = 298$ mm, $h = 20$ mm) eine 25 mm starke Unterlage aus Vollgummi der Härte 50 ± 5 Shore A. Darauf liegt ein ca. 1.3 mm dickes Bleiblech. Auf dem Bleiblech liegt das Prüfmuster. In den

Zylinder werden Stahlkugeln ($d = 20 \text{ mm}$) bis zu einer Höhe von mindestens $h = 15 \text{ cm}$ eingefüllt (geschüttet), direkt auf das Prüfmuster. Die Stahlkugeln dürfen nicht ausgerichtet werden. Die Oberfläche der Stahlkugeln und die Wand des Zylinders bedeckt ein dünnes Geovlies, in welches Sand als Ausgleichsschicht eingefüllt wird. Zuoberst liegt eine zweite Stahlplatte. Bewährt hat sich das anschliessende Drehen des Zylinders um 180° , so dass die erste Stahlplatte oben liegt. Der Aufbau innerhalb des Zylinders darf sich dabei nicht verändern. So lässt sich die Kraft auf Höhe des Vollgummis messen. Danach wird für eine Zeitspanne von $100 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ eine Kraft auf die nun oben liegende Stahlplatte aufgebracht und konstant gehalten. Gemessen wird die Kraft zwischen Druckzylinder und der ersten Stahlplatte mittels Kraftmessdose. Die Prozedur wird bei den Spannungen 300 kN/m^2 , 600 kN/m^2 und 1200 kN/m^2 durchgeführt.

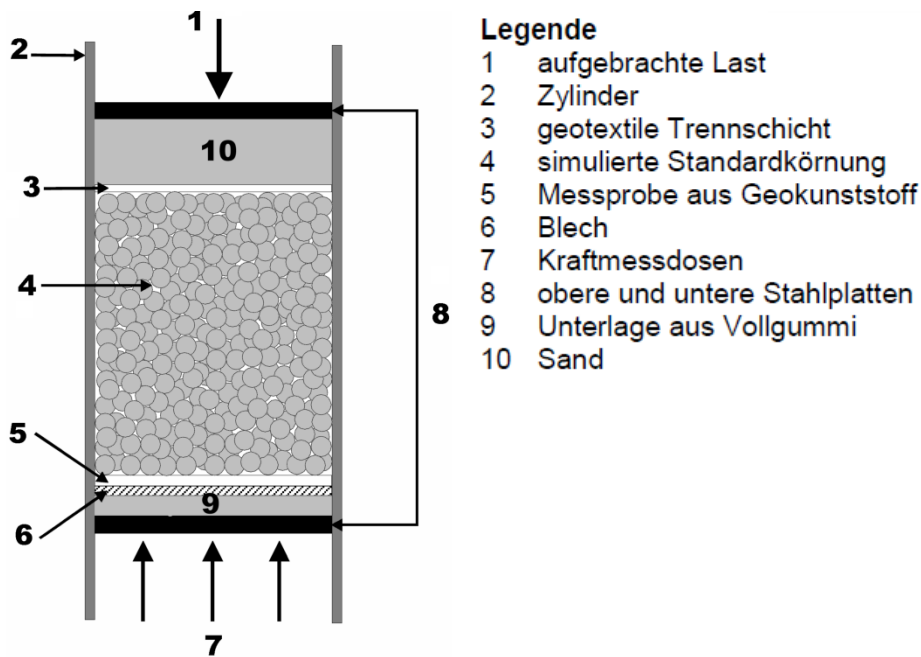


Abb. 6: Skizze Prüfeinrichtung nach EN 13719

Auswertung

Nach Versuchsende wird der Geokunststoff auf Beschädigungen (z. B. Löcher und Risse) untersucht. Anschliessend werden die grössten Eindellungen auf dem Bleiblech visuell bestimmt, manuell mit einer Messeinrichtung (Abb. 7) vermessen und die dimensionslose örtliche Dehnung berechnet. Gesucht sind drei Eindellungen mit den grössten Dehnungen. Die Berechnung der örtlichen Dehnung erfolgt nach der Gleichung $(l_d - l_u) / l_d$ für jede Eindellung an zwei rechtwinklig angeordneten Achsen. Die horizontale Schrittweite für l_u beträgt 3 mm , ausgehend vom tiefsten Punkt der Eindellung. Das Ende der Eindellung ist erreicht, wenn zwei aufeinander folgende Messungen eine Höhendifferenz von $l_d < 0.02 \text{ mm}$ ergeben.

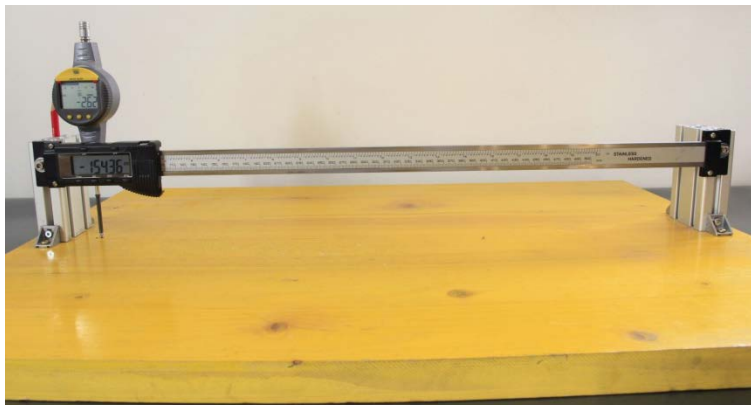


Abb. 7: Messeinrichtung zum Messen der örtlichen Dehnung

Anschliessend wird der arithmetische Mittelwert aus den drei grössten Dehnungen bestimmt und für jede Spannung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abb. 8) aufgetragen. Der Kehrwert der Steigung der Regressionsgeraden ist die langfristige Schutzwirksamkeit in Tsd. kN/m^2 .

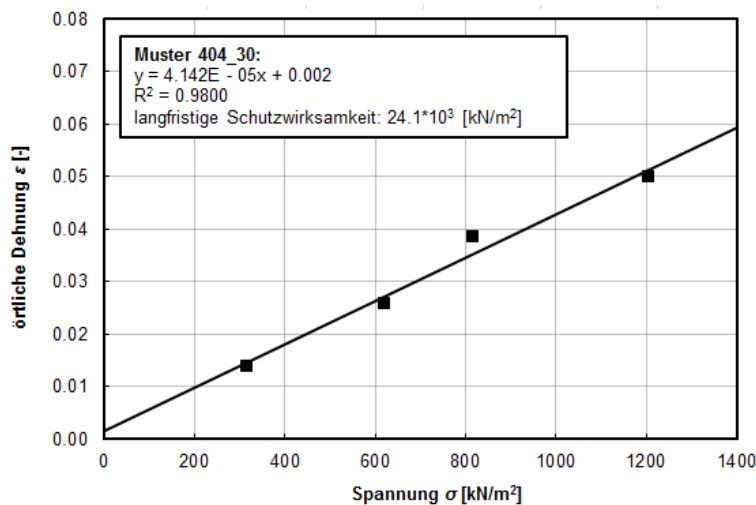


Abb. 8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Noppenbahn 404_30

Neue Norm

Es existiert mittlerweile ein neuer Entwurf dieser Prüfnorm. Die wichtigsten Änderungen im Normenentwurf der EN 13719 (2014) sind:

- Das Ablesen und Aufzeichnen der aufgetragenen Last erfolgt neu stündlich für die ersten sechs Stunden und danach alle 12 Stunden. Bisher war das Ablesen und Aufzeichnen alle 12 Stunden nach Aufbringen der Last ausreichend.
- Die Grenze der Eindellung wird neu bei einer Höhendifferenz von $l_d \leq 0,06$ mm definiert, statt bisher bei $l_d < 0,02$ mm.
- Der neue Kennwert für die langfristige Schutzwirksamkeit ist der Mittelwert der Dehnungen, gebildet aus den jeweils drei grössten Dehnungen bei 300 kN/m^2 , 600 kN/m^2 und 1200 kN/m^2 . Bisher wurden die Spannungen und Dehnungen in ein lineares Regressionsmodell aufgetragen und der Kehrwert der Regressionsgeraden als Kennwert der langfristigen Schutzwirksamkeit ausgewiesen.

Da dieser Entwurf erst nach Ausführung der Versuche zur Verfügung stand, bleiben die Modifikationen in der vorliegenden Forschungsarbeit unberücksichtigt. Die grundsätzlichen Forschungserkenntnisse ändern sich jedoch mit diesen Modifikationen nicht.

4.5 Stempeldurchdrückkraft (CBR-Versuch) nach EN ISO 12236

Bei diesem Prüfverfahren wird der Durchdrückwiderstand durch Messung der benötigten Kraft beim Durchdrücken eines stumpfen Stempels durch Geokunststoffe festgelegt.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung (Abb. 9) besteht aus einer Prüfmaschine, einer Klemmvorrichtung und eines Druckstempels ($d = 50 \text{ mm}$).

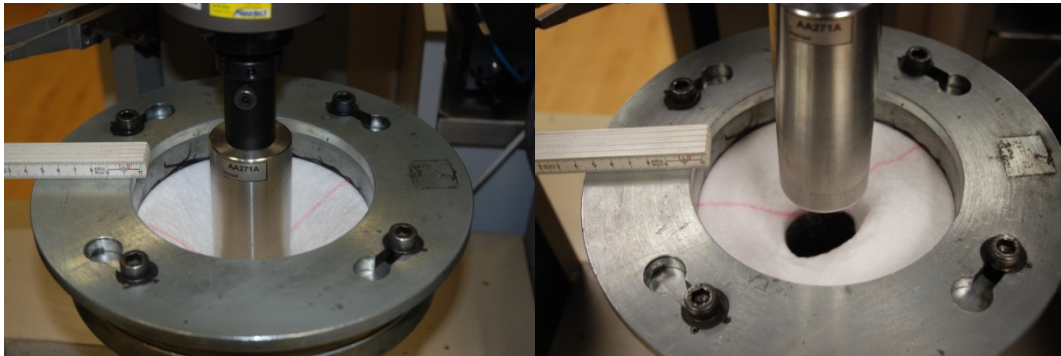


Abb. 9: Der stumpfe Stempel drückt in das Geotextil (links), das sich dabei dehnt. Bei maximaler Dehnung und Kraft wird das Geotextil durchstossen (rechts).

Durchführung

Die Probe ist ohne Durchhang in der Luft zwischen den Einspannrings zu befestigen und in die Prüfeinrichtung einzusetzen. Die Einspannvorrichtung muss ein Rutschen oder Reißen der Messprobe während der Prüfung verhindern (z. B. durch gezahnten Oberflächen). Der Druckstempel ist konstant mit einer Geschwindigkeit von $v = 50 \text{ mm/min}$ durch die Messprobe zu bewegen. Mit der Aufzeichnung des Vorschubs ist bei einer Vorbelastung von 20 N zu beginnen.

Auswertung

Der Mittelwert von fünf durchgeführten Prüfungen ist zu berechnen. Als Ergebnis wird die Stempeldurchdrückkraft F_p in kN angegeben und der graphische Verlauf mittels Kraft-Weg-Diagramm (Abb. 10).

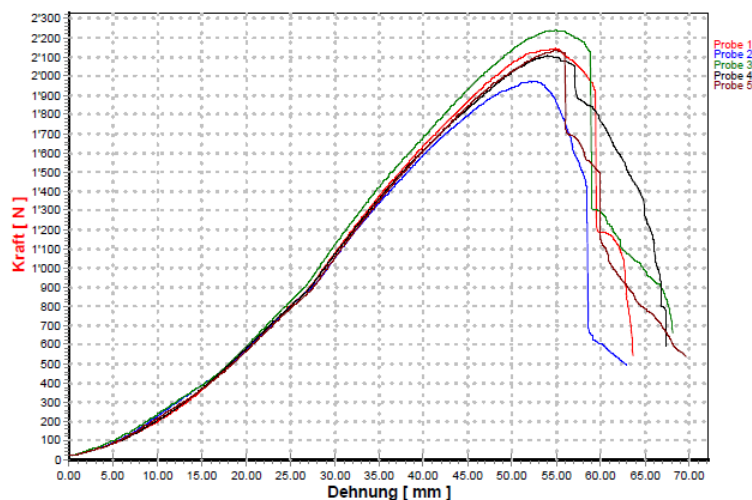


Abb. 10: Kraft-Weg-Diagramm für Noppenbahn 404_30 Versuch 2

4.6 Durchschlagwiderstand (Kegelfall) nach EN ISO 13433

Bei diesem Prüfverfahren wird der Widerstand eines Geokunststoffes gegen das Durchschlagen eines Stahlkegels festgelegt, der aus einer bestimmten Höhe fallen gelassen wird. Die Lochgrösse im Geotextil nach der Perforation ist ein Hinweis auf das Verhalten des Geokunststoffes, wenn scharfkantige Objekte auf seine Oberfläche fallen. Hergeleitet aus dem Englischen wird der Versuch oft mit CD (Cone Drop Test) abgekürzt.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung (Abb. 11) besteht aus einer Einspannvorrichtung, einem Rahmen und einem Kegel. Stellschrauben und Wasserwaage erlauben das horizontale und vertikale Ausrichten von Messprobe und Kegellachse.



Abb. 11: Kegelfalltest (EN ISO 13433), links: Fallkegel durchschlägt Messprobe, rechts: Ablesen der Lochgrösse am Messkonus an der Unterseite des eingespannten Musters

Durchführung

Die Probe ist ohne Durchhang in der Luft zwischen den Einspannrings zu befestigen und in die Prüfeinrichtung einzusetzen (analog Abschnitt 4.5). Der Kegel ($m = 1000 \text{ g}$) ist so auszulösen, dass er aus einer Höhe von $500 \pm 2 \text{ mm}$ erschütterungsfrei auf den Mittelpunkt der Oberfläche der Messprobe fällt. Danach ist der Kegel zu entfernen und der Messkonus ist sofort vorsichtig in das Loch einzusetzen. Nach einer Wartezeit von 10 s ist an der Unterseite des Geotextils der Durchmesser des Lochs auf den Millimeter genau zu messen. Wenn das Material in Längs- und Querrichtung unterschiedliche Eigenschaften hat, ist der grössere Lochdurchmesser zu bestimmen. Bei einer Fallhöhe von 500 mm entspricht die Energie des Aufpralls ca. 5 Joule.

Auswertung

Der Mittelwert von fünf durchgeführten Prüfungen desselben Prüfmusters ist zu berechnen. Als Ergebnis wird der Durchschlagwiderstand O_d in mm angegeben. Einzelproben, bei denen der Fallkegel das Prüfmuster nicht durchschlägt (entspricht 0 mm) fliessen in die Auswertung ein.

5 Untersuchungen

5.1 Produktwahl

Die Geokunststoffe wurden von Schweizer Fachhändlern bereitgestellt und bei ihnen abgeholt. Die Produkte lagern an der Berner Fachhochschule Zweigstelle Burgdorf und der Tecnotest AG in Rüschlikon trocken und lichtgeschützt in unbeheizten Räumen. Einige Produktdaten sind inkonsistent. Die angegebenen Eigenschaften variieren zwischen CE-Datenblättern, Produktprospekten oder den Geotextilrollen beigefügten Leistungsdaten. In Tab. 4 bis Tab. 8 sind ausgewählte Eigenschaften jedes untersuchten Produktes auf der Grundlage der CE-Datenblätter (Mittelwerte) aufgeführt. Muster der untersuchten Geotextilien sind in Abb. 12 bis Abb. 16 abgebildet.

Tab. 4: Produktdaten für Geovliese (GTX-N)

Muster	Rohstoff	Aufbau	Flächenbezogene Nennmasse (EN ISO 9864) [g/m ²]	Dicke (EN ISO 9863-1) [mm]	Stempeldurchdruckkraft (EN ISO 12236) [kN]	Zugfestigkeit (EN ISO 10319) längs / quer. [kN/m]	Höchstzugkraftdehnung (EN ISO 10319) längs / quer [%]	Durchschlagwiderstand (EN ISO 13433) [mm]
404_03	PP	vernadelt	500	5	2.5	10 / 18	120 / 110	8
404_04	PP	vernadelt	800	7	4.0	18 / 30	130 / 110	4
404_05	PP	vernadelt	1000	7.5	5.0	22 / 35	120 / 110	0
404_06	PP	vernadelt	500	3.7 – 4.5	2.5	15.5 / 14.6	75 - 125	10
404_07	PP	vernadelt	300	2.5 - 3.1	1.5	10.5	75 - 125	17
404_09	PP	vernadelt	800	5.5 – 6.7	4.4	24.1 / 25.8	75 - 125	5
404_11	PP	vernadelt	1000	6.7 – 8.2	4.9	28.4 / 30.1	75 - 125	1
404_15	PP	vernadelt	1500	9	10	30 / 30	130 / 90	0
404_16	PP	vernadelt, thermisch behandelt	800	5.5	7.5	35 / 50	50 - 80	4
404_22	PP	vernadelt	300	3	2.5	12 / 15	> 50	8
404_23	PP	vernadelt	500	4	4.0	18 / 30	> 50	5
404_24	PP	vernadelt	800	6	7.0	30 / 45	> 50	2
404_25	PP	vernadelt, thermisch behandelt	300	2.1	3.7	15 / 28	65 / 60	11
404_36	PP	vernadelt	2000	14.5	12	50 / 80	135 / 115	0

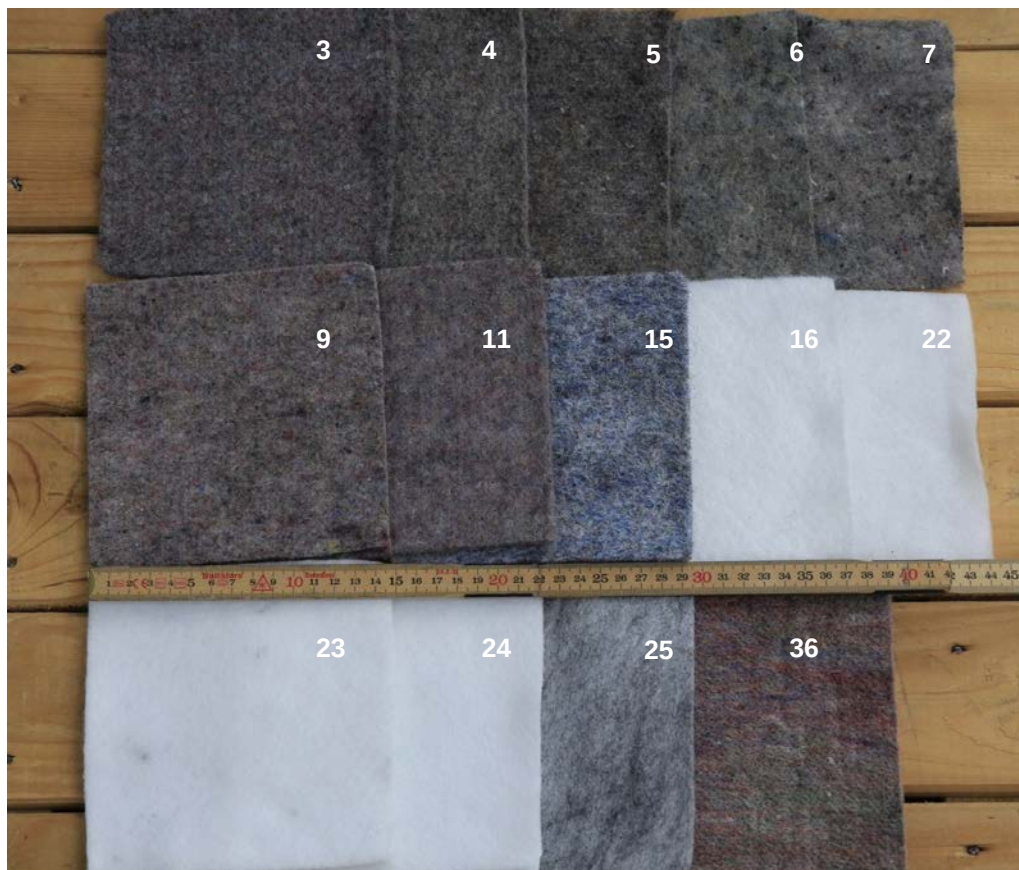


Abb. 12: untersuchte Geovliese

Tab. 5: Produktdaten für Geoverbundstoffe (GCO)								
Muster	Rohstoff	Aufbau	Flächenbezogene Nennmasse (EN ISO 9864) [g/m ²]	Dicke (EN ISO 9863-1) [mm]	Stempeldurchdrückkraft (EN ISO 12236) [kN]	Zugfestigkeit (EN ISO 10319), längs / quer. [kN/m]	Höchstzugkraftdehnung (EN ISO 10319), längs / quer [%]	Durchschlagwiderstand (EN ISO 13433) [mm]
404_01	PP / PEHD	Vlies verschweisst mit Drainagematte	1900	10	11	27 / 65	160 / 90	0
404_02	PP / PP	Drainkern mit beidseitigem Vlies	720	6	-	14	45	15
404_08	PP / PEHD	Membrane-Drainage-Vlies, vernadelt	1400	8.1 – 8.3	2.8	22 / 14	54 - 66 / 30 - 60	7
404_10	PP / PP	Vlies-Drainage-Vlies, vernadelt	1000	11.0 – 13.0	4.3	19.8 / 25.2	45 - 80 / 36 - 80	4
404_13	PP / PP	Vlies-Netz-Vlies	1600	11.3 – 13.8	2.1	25.2 / 23.4	45 / 45	25
404_26	PP / PP	Flächendrainage mit beidseitigem Vlies	840 (GCO)	14 (GCO)	1.4 (GTX)	15 (GCO)	-	33 (GTX)
404_27	PP / PP	Flächendrainage mit beidseitigem Vlies	990 (GCO)	20 (GCO)	1.4 (GTX)	15 (GCO)	-	33 (GTX)

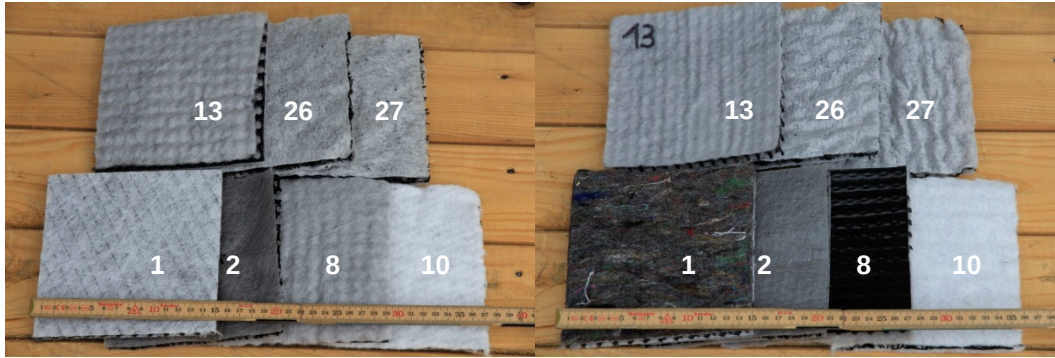


Abb. 13: untersuchte Geoverbundstoffe, links: Oberseite, rechts: Unterseite

Tab. 6: Produktdaten für Schutzbahnen (GTP-PROT)

Muster	Rohstoff	Aufbau	Flächenbezogene Nennmasse [g/m ²]	Dicke (EN 1849-2) [mm]	mechanische Durchschlagfestig- keit [mm]	Zugfestigkeit. [N/m ²]	Höchstzugkraft- dehnung [%]	Stempeldurch- druckkraft (EN 12236) [kN]
404_14	FPO	FPO mit Vlieseinlage	1300	1.3	700 (SIA V 280/15)	7.0 (SIA V 280/2)	400 (SIA V 280/2)	-
404_20	PVC	Membrane aus PVC	4120 (EN 1849-2)	3.1	1000 (EN 12691)	9.0 (EN 12311-2)	150 (EN 12311-2)	2.5
404_21	PVC	Membrane aus PVC	2700 (EN 1849-2)	2.1	1000 (EN 12691)	9.0 (EN 12311-2)	150 (EN 12311-2)	2.5
404_31	TPO	TPO mit Kompositträger	1260 (EN 1849-2)	1.2	500 (EN 12691)	7.0 (EN 527-3)	400 (EN 527-3)	-
404_32	PVC	PVC mit Glasvliesträger		1.3	-	-	-	-

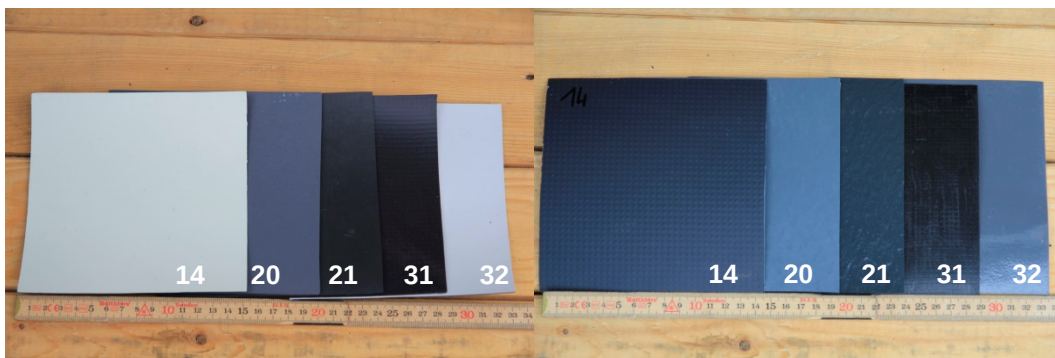
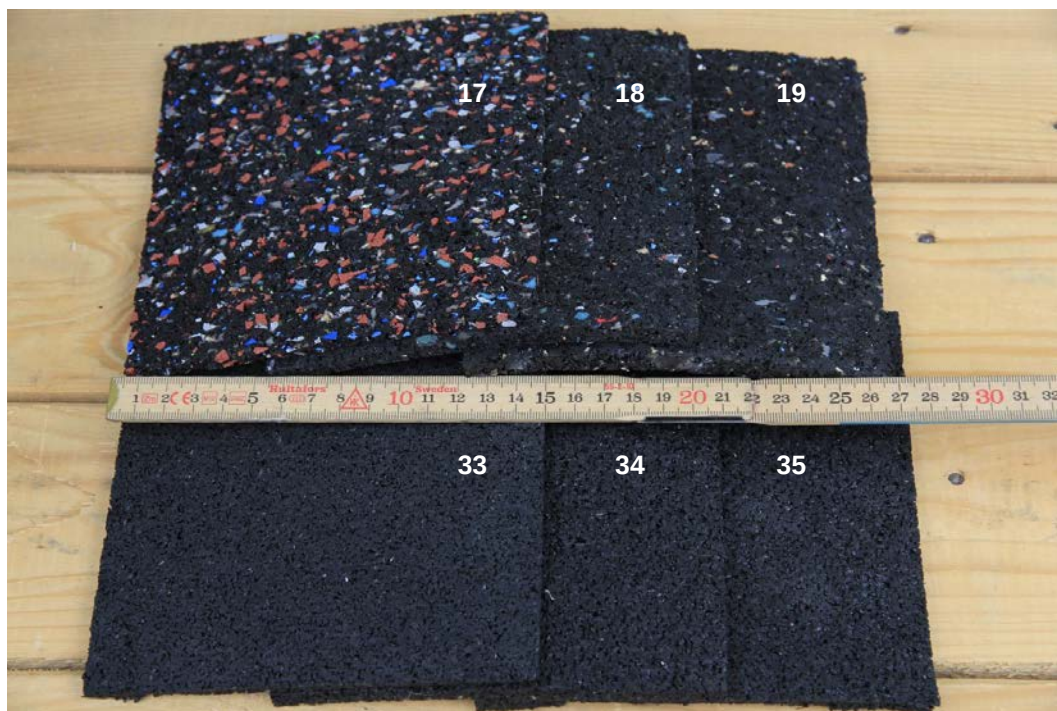


Abb. 14: untersuchte Schutzbahnen, links: Oberseite, rechts: Unterseite

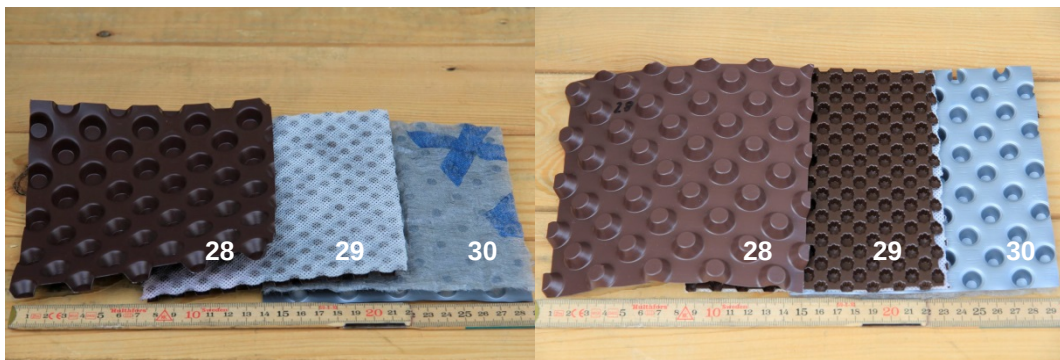
Tab. 7: Produktdaten für Gummischrotbahnen (GTP-RUB)

Muster	Rohstoff	Aufbau	Flächenbezogene Nennmasse [g/m ²]	Dicke (EN 12431) [mm]	Zugfestigkeit. (EN ISO 1798) [N/m ²]	Höchstzugkraft- dehnung (EN ISO 1798) [%]
404_17	-	PUR-gebundenes Gummigranulat, schwarz mit farbigen Einschlüssen	4450	6	0.55	50
404_18			5940	8	0.60	50
404_19			7420	10	0.60	55
404_33	-	PUR-gebundenes Gummigranulat SBR, schwarz	4400	6	0.42	-
404_34			5800	8	0.42	
404_35			7300	10	0.42	

**Abb. 15:** untersuchte Gummischrotbahnen

Tab. 8: Produktdaten für Noppenbahnen (GBR-NOP)

Muster	Rohstoff	Aufbau	Flächenbezogene Nennmasse [g/m^2]	Dicke (Noppenhöhe) [mm]	Luftvolumen zwischen den Noppen [l]	Druckfestigkeit [kN/m^2]	Zugfestigkeit	Durchschlagwiderstand (EN ISO 13433) [mm]
404_28	PEHD	Noppen- und Drainagebahn	580	8	ca. 5.3	ca. 250	400 N / 50 mm (EN 12311-2)	-
404_29	PEHD / PP	Noppenbahn mit aufkaschiertem Geotextil	420	4	ca. 2.6	ca. 300	5 kN/m (EN 10319)	25
404_30		Noppenbahn mit aufgeschweisstem Geotextil	705	9	ca. 7.9	ca. 400	6 kN/m (EN 10319)	40

**Abb. 16:** untersuchte Noppenbahnen, links: Oberseite, rechts: Unterseite

5.2 Prüfprogramm

Die Gesamtzahl der Versuche je Prüfverfahren (Tab. 9) beinhaltet Wiederholungen, Versuche zur Absicherung der Datenbasis und die Versuche zur Ermittlung der Versuchsgrenzen.

Tab. 9: Prüfverfahren und Anzahl der Versuche

Prüfverfahren	Kennwert und Einheit	Anzahl Versuche
SIA 272 Anhang D.3.1: Bestimmung des Widerstandes gegen stossartige Belastung	Mechanische Durchschlagfestigkeit h (Fallhöhe) [mm]	110
SN EN ISO 13428: Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffes bei Stossbelastung	Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung s_i [%]	75
SN EN 14574: Bestimmung des Pyramidendurchdrückwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage	Pyramidendurchdrückwiderstand (Kraft) F_{max} [N]	108
SN EN 13719: Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen	Langfristige Schutzwirksamkeit (Dehnung / Spannung) [kN/m^2]	35
SN EN ISO 12236: Geokunststoffe - Stempeldurchdrückversuch	Stempeldurchdrückkraft F_p (kN)	70
SN EN ISO 13433: Geokunststoffe - Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch)	Durchschlagwiderstand O_d (Lochdurchmesser) [mm]	76

Die produktspezifische Anzahl an Versuchen sind in den Tab. 10 bis Tab. 14 ersichtlich. Die „Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen“ nach EN 13719 findet im Labor der BFH statt. Aufgrund des grossen Zeitaufwandes für dieses Prüfverfahren wird jedes Muster nur einmal geprüft. Alle anderen Prüfverfahren führt die Tecnotest AG aus. Jedes Produkt wird dort mindestens zweimal mit dem gleichen Prüfverfahren untersucht.

5.3 Messergebnisse

Tab. 10 bis Tab. 14 fassen die Versuchsergebnisse der Prüfverfahren zusammen, sortiert nach Geokunststoffarten. Das angegebene Flächenmass ist dabei ein Teilergebnis nach EN ISO 13428. Für die Muster 404_01 und 404_15 (gekennzeichnet mit ⁶⁾) fliessen zusätzlich ältere Prüfergebnisse der Tecnotest AG in die Regressionsberechnung ein. Wenn in den Tabellen kein Wert angegeben ist, liegt kein Messwert vor.

Tab. 10: Versuchsergebnisse für Geovliese (GTX-N)

Ifd. Nr.	Muster	Versuch	Flächenmasse [g/m ²] (EN ISO 9864)	Durchschlagfestig- keit [mm] (SIA 272 Anhang D-3.1)	Pyramidendurch- druckwiderstand [N] (EN 14574)	Schutzwirksamkeit beu Stoss [%] (EN ISO 13428)	Durchschlagwider- stand [mm] (EN ISO 13433)	Stempeldurch- druckkraft [kN] (EN ISO 12236)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kNj/m ²] (EN 13719)
1	404_03 ⁶	1	547	400	473	32	8.2	2.6	30.4 * 10 ³
2		2	542	400	463	35	9.0	2.5	
3	404_04 ⁶	1	786	500	604	41	5.2	4	25.6 * 10 ³
4		2	771	500	721	39	5.8	3.8	
5	404_05 ⁶	1	1002	600	897	43	1	5.7	31.4 * 10 ³
6		2	1044	500	889	53	1.2	5.9	
7		3		500	794	51			
8		4		500	912	53			
9	404_06 ⁸	1	488	400	337	32	5.0	2.8	29.4 * 10 ³
10		2	478	400	377	33	6.6	2.8	
11	404_07 ⁸	1	278	400	186	30	9.2	1.7	21.7 * 10 ³
12		2	290	350	174	32	8.4	1.5	
13	404_09 ⁸	1	841	500	784	49	3.0	5	27.6 * 10 ³
14		2	837	500	721	47	1.4	5.5	
15	404_11 ⁸	1	747	500	695	41	2.2	3.7	33.0 * 10 ³
16		2	759	500	774	41	2.6	3.7	
17	404_15 ⁶	1	1726	1000	2832	72	0*	12.0	40.5 * 10 ^{3 (9)}
18		2	1775	1000	2454	74	0*	13.5	
19	404_15 ^{6*}	1		1200		68		11.6	41.7 * 10 ³
20	404_16 ⁶	1	775	600	957	49	0.8	9.4	31.5 * 10 ^{3 (9)}
21		2	778	600	754	48	0.4	9.3	
22	404_22 ⁷	1	309	400	27	31	7.6	3.1	29.8 * 10 ³
23		2	305	350	225	31	8	2.9	
24	404_23 ⁷	1	504	500	590	38	1.2	5.7	25.2 * 10 ³
25		2	511	500	486	39	1.6	5.1	
26	404_24 ⁷	1	856	700	985	53	0*	9.1	34.3 * 10 ^{3 (9)}
27		2	868	700	1120	51	0*	8.7	

lfd. Nr.	Muster	Versuch	Flächenmasse [g/m ²] (EN ISO 9864)	Durchschlagfestig- keit [mm] (SIA 272 Anhang D-3.1)	Pyramidendurch- druckwiderstand [N] (EN 14574)	Schutzwirksamkeit beu Stoss [%] (EN ISO 13428)	Durchschlagwider- stand [mm] (EN ISO 13433)	Stempeldurch- druckkraft [kN] (EN ISO 12236)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kN/m ²] (EN 13719)
28	404_25 ⁷	1	319	400	337	31	9.6	4.6	26.5 * 10 ³
29		2	314	400	385	33	9.6	4.6	
30	404_36 ⁶	1	2129	1500	3796	83	0*	15.3	69.3 * 10 ³⁽⁹⁾
31		2	2037	1250	4221	81	0*	14.7	

^{6, 7, 8} Produkte derselben Marke, ^{6*} ältere Prüfergebnisse des Produkts bei TT, * = nicht prüfbar (Fallkegel durchschlägt Muster nicht), ⁹ mehr als 3 Teilversuche für ein Versuchsergebnis

Tab. 11: Versuchsergebnisse für Geoverbundstoffe (GCO)

lfd. Nr.	Muster	Versuch	Flächenmasse [g/m ²] (EN ISO 9864)	Durchschlagfestig- keit [mm] (SIA 272 Anhang D-3.1)	Pyramidendurch- druckwiderstand [N] (EN 14574)	Schutzwirksamkeit beu Stoss [%] (EN ISO 13428)	Durchschlagwider- stand [mm] (EN ISO 13433)	Stempeldurch- druckkraft [kN] (EN ISO 12236)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kN/m ²] (EN 13719)
32	404_01 ⁶	1	2367	900	2181	94	0*	5.7	61.5 * 10 ³⁽⁹⁾
33		2	2329	900	2654	91	0*	5.8	
34		3		800	2327				
35		4		900	2764				
36	404_01 ^{6*}	1		1200		87			
37	404_02 ⁶	1	722	400	238	36	11.8	2.5	20.5 * 10 ³
38		2	718	400	298	36	12.2	2.5	
39	404_08 ⁸	1	1446	600	796	56	3.4	2.6	23.0 * 10 ³⁽⁹⁾
40		2	1461	600	766	57	4.4	2.9	
41		3		600	786				
42		4		600	772				
43	404_10 ⁸	1	940	600	556	52	2.2	5.9	13.1 * 10 ³⁽⁹⁾
44		2	938	500	517	49	0.8	5.8	
45		3		600	716				
46		4		700	683				
47	404_13 ⁸	1	1699	600	1148	76	3.4	4.8	39.3 * 10 ³⁽⁹⁾
48		2	1653	600	1259	75	0.8	4.7	
49		3		600	1159				
50		4		600	1335				
51	404_26 ⁷	1	814	450	402	38	9.8	2.8	24.9 * 10 ³
52		2	795	500	399	42	10.4	2.7	
53	404_27 ⁷	1	914	500	509	40	6.6	2.6	20.9 * 10 ³
54		2	983	450	374	44	6.4	2.6	

^{6, 7, 8} Produkte derselben Marke, ^{6*} älteres Prüfergebnis der Tecnotest AG, * = nicht prüfbar (Fallkegel durchschlägt Muster nicht), ⁹ mehr als 3 Teilversuche für ein Versuchsergebnis

Tab. 12: Versuchsergebnisse für Schutzbahnen (GTP-PROT)

Ifd. Nr.	Muster	Versuch	Flächenmasse [g/m ²] (EN ISO 9864)	Durchschlagfestig- keit [mm] (SIA 272 Anhang D-3.1)	Pyramidendurch- druckwiderstand [N] (EN 14574)	Schutzwirksamkeit beu Stoss [%] (EN ISO 13428)	Durchschlagwider- stand [mm] (EN ISO 13433)	Stempeldurch- druckkraft [kN] (EN ISO 12236)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kN/m ²] (EN 13719)
55	404_14 ⁴	1	1242	600	182	42	7	1.5	21.8 * 10 ³
56		2	1257	600	162	44	7.2	1.5	
57		3		600	169				
58		4		600	164				
59	404_20 ⁴	1	3974	1250	636	69	0*	4.3	32.4 * 10 ³
60		2	3984	1250	649	69	0*	4.2	
61		3		1500	620				
62		4		1500	615				
63	404_21 ⁴	1	2740	1000	399	57	2.4	3.3	24.9 * 10 ³
64		2	2750	1000	378	57	2.0	3.2	
65		3		1000	390				
66		4		1000	370				
67	404_31 ⁵	1	1208	600	173	44	6.6	1.6	31.9 * 10 ³
68		2	1223	600	186	43	6.4	1.6	
69		3		600	183				
70		4		600	186				
71	404_32 ⁵	1	1689	800	247	49	6.0	2	23.5 * 10 ³
72		2	1690	700	265	49	6.2	2	
73		3		800	257				
74		4		800	244				

^{4,5} Produkte derselben Marke, * = nicht prüfbar (Fallkegel durchschlägt Muster nicht)

Tab. 13: Versuchsergebnisse für Gummischrotbahnen (GTP-RUB)

Ifd. Nr.	Muster	Versuch	Flächenmasse [g/m ²] (EN ISO 9864)	Durchschlagfestig- keit [mm] (SIA 272 Anhang D-3.1)	Pyramidendurch- druckwiderstand [N] (EN 14574)	Schutzwirksamkeit beu Stoss [%] (EN ISO 13428)	Durchschlagwider- stand [mm] (EN ISO 13433)	Stempeldurch- druckkraft [kN] (EN ISO 12236)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kN/m ²] (EN 13719)
75	404_17 ¹	1	3995	600	233	55	22.0	0.2	38.3 * 10 ^{3 (9)}
76		2	3998	600	223	56	22.2	0.3	
77		3		700	240				
78		4		700	251				
79	404_18 ¹	1	5857	800	409	80	3.4	0.4	59.0 * 10 ^{3 (9)}
80		2	5841	800	416	76	3.8	0.5	
81		3		900	419				
82		4		800	423				
83	404_19 ¹	1	7431	900	648	93	0.4	0.6	81.2 * 10 ^{3 (9)}
84		2	7438	1000	664	93	0*	0.6	
85		3		900	687				
86		4		1000	647				

Ifd. Nr.	Muster	Versuch	Flächenmasse [g/m ²] (EN ISO 9864)	Durchschlagfestig- keit [mm] (SIA 272 Anhang D-3.1)	Pyramidendurch- druckwiderstand [N] (EN 14574)	Schutzwirksamkeit beu Stoss [%] (EN ISO 13428)	Durchschlagwi- derstand [mm] (EN ISO 13433)	Stempeldurch- druckkraft [kN] (EN ISO 12236)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kN/m ²] (EN 13719)
87	404_33 ²	1	4364	700	284	62	12.0	0.4	37.1 * 10 ³ (9)
88		2	4387	700	250	66	13.4	0.4	
89		3		700	273				
90		4		700	265				
91	404_34 ²	1	5999	900	475	85	3.6	0.5	58.1 * 10 ³ (9)
92		2	5966	900	441	81	3.6	0.5	
93		3		800	445		3.6		
94		4		800	442		5.0		
95	404_35 ²	1	7653	1000	633	97	0*	0.6	107.3 * 10 ³ (9)
96		2	7598	1000	653	96	0*	0.6	
97		3		1000	627		0*		
98		4		1000	609		0*		

^{1,2} Produkte derselben Marke, * = nicht prüfbar (Fallkegel durchschlägt Muster nicht), ⁹ mehr als 3 Teilversuche für ein Versuchsergebnis

Tab. 14: Versuchsergebnisse für Noppenbahnen (GBR-NOP)

Ifd. Nr.	Muster	Versuch	Flächenmasse [g/m ²] (EN ISO 9864)	Durchschlagfes- tigkeit [mm] (SIA 272 Anhang D-3.1)	Pyramidendurch- druckwiderstand [N] (EN 14574)	Schutzwirksamkeit beu Stoss [%] (EN ISO 13428)	Durchschlagwi- derstand [mm] (EN ISO 13433)	Stempeldurch- druckkraft [kN] (EN ISO 12236)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kN/m ²] (EN 13719)
99	404_28 ³⁾	1	527	400	159	30	24.4	1	11.3 * 10 ³ (9)
100		2	539	450	162	33	26.4	1	
101		3		400	139		28.6		
102		4		400	133		29.0		
103	404_29 ³⁾	1	421	350	126	27	26.8	0.7	21.3 * 10 ³ (9)
104		2	417	350	133	29	28.0	0.7	
105		3		350	124				
106		4		350	119				
107	404_30 ³⁾	1	698	500	292	38	11.6	2.1	24.1 * 10 ³ (9)
108		2	692	500	299	38	11.2	2.1	
109		3		450	288				
110		4		500	281				

³ Produkte derselben Marke, ⁹ mehr als 3 Teilversuche für ein Versuchsergebnis

Grenzen der Prüfverfahren

Eine durchschnittliche mechanische Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) von 300 mm (zwei Versuche) ergibt sich für die 1.5 mm dicke KDB, welche sonst zur Dichtheitsprüfung verwendet wird.

Versuche ohne Geokunststoff ergeben eine langfristige Schutzwirksamkeit (EN 13719) von ca. 20 * 10³ kN/m² (1 Versuch bestehend aus sechs Teilversuchen). Die Stahlkugeln liegen dabei direkt auf dem Bleiblech.

Die Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428) ergibt bei Versuchen ohne Geokunststoff eine Restdicke von ca. 28 % (Mittelwert aus drei Versuchen). Die Resultate lassen sich als methodische Untergrenze der Schutzwirksamkeit (keine Schutzwirksamkeit des Geotextils) interpretieren. Das Bleiblech simuliert die zu schützende Abdichtung.

6 Datenanalyse

6.1 Anforderungen an Schutzgeokunststoffe

Dieses Kapitel führt bestehende Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf.

Anforderungen nach SIA 272 Anhang C

Tab. 15 bis Tab. 17 fassen die für das Forschungsprojekt wesentlichen bestehende Anforderungen an die Schutzwirkung der SIA 272 Anhang C zusammen.

Tab. 15: Auszug aus Tabelle 32 der SIA 272 mit Anforderungswerten an die Stempeldurchdrückkraft und die Durchschlagfestigkeit für Schutzbahnen und Schutzplatten ohne Drainagefunktion nach Anwendungsgebiet.

Nr.	Gruppe ¹⁾				Eigenschaft	Prüfvorschrift	Einheit	Anforderung
	B1.1	B1.2	B3	B4				
5	x		x	x	Stempeldurchdrückkraft (CBR)	EN ISO 12236	kN	≥ 2.5
6.1	x		x	x	Durchschlagfestigkeit	SIA 272 Anhang D.3.1	mm	≥ 1000
6.2		x						≥ 1200

¹⁾ Anwendungsgebiet gemäss SIA 270 Tabelle 3: B1.1 = Unterterrain, Tagebau, Galerien / B1.2 = Untertagbau / B3 = Erdverlegte Becken / B4 = Kanäle

Tab. 16: Auszug aus Tabelle 33 der SIA 272 mit Anforderungswerten an die Stempeldurchdrückkraft, Durchschlagwiderstand und Durchschlagfestigkeit für Geotextilien ohne Drainagefunktion nach Anwendungsgebiet.

Nr.	Gruppe					Eigenschaft	Prüfvorschrift	Einheit	Anforderung
	B1.1	B1.2	B2	B3	B4				
5.1	x			x	x	Stempeldurchdrückkraft (CBR)	SN EN ISO 12236	kN	≥ 2.5
5.2		x	x						Kennwert (Hersteller)
6.1	x				x	Durchschlagwiderstand (Kegelfallverfahren)	SN EN ISO 13433	mm	≤ 10
6.2		x	x						Kennwert (Hersteller)
7.1	x			x	x	Durchschlagfestigkeit	Anhang D.3.1 SIA 272	mm	≥ 1000
7.2		x							≥ 1200

Tab. 17: Auszug aus Tabelle 34 der SIA 272 mit Anforderungswerten an die Stempeldurchdrückkraft, Durchschlagwiderstand und Durchschlagfestigkeit für Schutzbahnen mit Funktion Schützen und Drainieren nach Anwendungsgebiet

Nr.	Gruppe				Eigenschaft	Prüfvorschrift	Einheit	Anforderung
	B1.1	B1.2	B3	B4				
5.1	x			x	Stempeldurchdrückkraft (CBR)	SN EN ISO 12236	kN	≥ 2.5
5.2		x	x					Kennwert (Hersteller)
6.1	x			x	Durchschlagwiderstand (Kegelfallverfahren)	SN EN ISO 13433	mm	≤ 10
6.2		x	x					Kennwert (Hersteller)
7		x			Durchschlagfestigkeit	Anhang D.3.1 SIA 272	mm	≥ 1200

Anforderungen nach SN 670 243

In der SN 670 243 bestehen für Schutzgeokunststoffe keine Anforderungen an die Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 Anhang D.3.1. Die SN 670 243 unterscheidet jedoch nach projektspezifischen Mindestbeanspruchungen (Tab. 18). Für die Bestimmung der projektspezifischen Zusatzanforderungen müssen Randbedingungen (z. B. Kontaktmedien und Beanspruchungen) bekannt sein. Die Randbedingungen werden mit den Teilfaktoren F_{Ka} , F_{Fa} , F_{Ki} und F_E beschrieben, durch deren Multiplikation ein Gesamtfaktor F_{tot} berechnet wird. Tab. 19 zeigt drei Anwendungsbeispiele.

Tab. 18: Auszug aus den Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften von Geokunststoffen nach SN 670 243

Gesamtfaktor für die Beanspruchung	F_{tot}	Mindestwerte	1.00 - 2.50	2.51 - 4.00	4.01 - 6.00
Masse pro Flächeneinheit (EN ISO 9864)	g/m ²	≥ 300	≥ 300	≥ 500	≥ 800
Stempeldurchdrückkraft (EN ISO 12236)	kN	≥ 1.5	≥ 1.5	≥ 2.5	≥ 3.5
Durchschlagwiderstand (EN ISO 13433)	mm	≤ 15	≤ 20	≤ 10	≤ 7
Zugfestigkeit längs, quer (EN ISO 10319)	kN/m	≥ 10	≥ 10	≥ 15	≥ 20
Dehnung unter Höchstzugkraft längs, quer (EN ISO 10319)	%	≥ 15	≥ 20	≥ 20	≥ 20

Tab. 19: Beispiele für die Berechnung des Gesamtfaktors F_{tot}

Gesamtfaktor F_{tot}	Kontaktmaterial aussen, Untergrund (F_{Ka})	Kornform (F_{Fa})	Kontaktmaterial innen, unter Abdichtung (F_{Ki})	Druck (FD)	Einbau (F_E)
1.00 - 2.50	UG 0/22 ($D_{max} = 45$ mm) $F_{Ka} = 1.2$	Rund, $F_{Fa} = 1.0$	Ortsbeton ohne zusätzlichen Schutzgeokunststoff, $F_{Ki} = 1.0$	$20 < 50$ kN/m ² , FD = 1.2	leicht verdichtet bei loser Überschüttung, $F_E = 1.1$
2.51 - 4.00	UG 0/22 ($D_{max} = 45$ mm) $F_{Ka} = 1.2$	Kantig, $F_{Fa} = 2.0$	Ortsbeton ohne zusätzlichen Schutzgeokunststoff, $F_{Ki} = 1.0$	$20 < 50$ kN/m ² , FD = 1.2	leicht verdichtet bei loser Überschüttung, $F_E = 1.1$
4.01 - 6.00	UG 0/45 ($D_{max} = 90$ mm) $F_{Ka} = 1.4$	Kantig, $F_{Fa} = 2.0$	Ortsbeton ohne zusätzlichen Schutzgeokunststoff, $F_{Ki} = 1.0$	$50 < 250$ kN/m ² , FD = 1.4	hoch verdichtet bei loser Überschüttung, $F_E = 1.2$

Anforderungen der österreichischen Richtlinie Tunnelabdichtung (öbv 2012)

In Tab. 20 sind Eigenschaften der österreichischen Richtlinie Tunnelabdichtung für Schutzschichten aus Geotextilien definiert. Die Anforderungen unterscheiden in Tunnelgewölbe und Tunnelsohle (Flächenmasse ≥ 500 g/m², bzw. ≥ 900 g/m²). Aufgeführt sind im Forschungsprojekt untersuchte Eigenschaften.

Für Schutzbahnen definiert die Richtlinie Tunnelabdichtung eine Stempeldurchdrückkraft (ÖNORM EN ISO 12236) von 2.8 kN und eine Dicke von ≥ 3 mm.

Tab. 20: Auszug aus Tabelle 4-4 der österreichischen Richtlinie Tunnelabdichtung (öbv 2012) mit ausgewählten Anforderungswerten für Schutzschichten aus Geotextilien

Nr.	Eigenschaft	Prüfvorschrift	Anforderungen	
			$\geq 500 \text{ g/m}^2$ (Gewölbe)	$\geq 900 \text{ g/m}^2$ (Sohle)
7	Stempeldurchdrückkraft	ÖNORM EN ISO 12236	$\geq 3.0 \text{ kN}$	$\geq 7.0 \text{ kN}$
8	Durchschlagwiderstand	ÖNORM EN ISO 13433	$\leq 13 \text{ mm}$	$\leq 7 \text{ mm}$
13	Pyramidendurchdrückwiderstand	ÖNORM EN 14574	Unterschreitung des Wertes der Erstprüfung $\leq 0.1 \text{ mm}$	

Anforderungen nach Bast in der TL/TP-Ing Teil 5 Abschnitt 5 TL/TP SD

Die deutsche Bundesanstalt für Strassen (Bast) fordert in der TL/TP-Ing Teil 5 Abschnitt 5 TL/TP SD für geotextile Schutzschichten eine Flächenmasse $\geq 900 \text{ g/m}^2$ und eine Stempeldurchdrückkraft (DIN EN ISO 12236) von $\geq 7 \text{ kN}$ bis $\leq 20 \text{ kN}$ für Tunnel in geschlossener Bauweise.

6.2 Regressionsmodelle

Anhand des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson wird untersucht, ob zwischen den Versuchsergebnissen des jeweiligen EN-Prüfverfahrens und des Referenzverfahrens nach SIA 272 Anhang D.3.1 ein statistisch gesicherter Zusammenhang vorliegt und wie gross dieser ist. Dazu werden die Ergebnisse paarweise miteinander verglichen. Der quadrierte Korrelationskoeffizient r entspricht dem Bestimmtheitsmass r^2 (oder R^2). Bei $r = 1$ liegen theoretisch alle Messwerte auf einer perfekten Geraden. Im vorliegenden Forschungsbericht wird bei Werten von $r > 0.90$ bzw. $R^2 > 0.81$ von einer sehr guten Korrelation und bei $0.80 < r < 0.90$ von einer guten Korrelation gesprochen.

Abgrenzung

Praxiserfahrungen zeigen bei der Eigenschaft Durchschlagwiderstand (EN ISO 13433) grössere Schwankungen als bei den anderen Eigenschaften.

Vorgehen

Die statistische Datenauswertung und Regressionsrechnung erfolgte mit der Statistik-Software R für Windows (Version R 3.1.3).

Die Vorgehensweise wird am Beispiel der Geokunststoffart Geoverbundstoffe am Regressionsmodell der Ergebnisse für die Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428) und der mechanischen Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) beschrieben. Die erklärende Variable ist bei jeder Regression die mechanischen Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) und wird auf der x-Achse abgebildet. Die jeweiligen EN-Prüfverfahren sind unsere Zielvariablen und werden auf der y-Achse abgebildet.

Variablentransformation

Zuerst wird ein Regressionsmodell in den ursprünglichen, d. h. nicht transformierten Variablen aufgestellt. Anschliessend prüft die Residuenanalyse die Modellvoraussetzungen. Bei Verletzung der Modellvoraussetzungen helfen Transformationen (Tab. 21) diese zu verbessern. Die gewählten Abkürzungen in Tab. 21 erleichtern die Datenverarbeitung in R und haben keine weitere Bedeutung. Insgesamt ergeben sich 24 Variablen.

Tab. 21: Transformation der Variablen, Auflistung möglicher Variablen

Abkürzung	Variablen	Transformation
<i>DSF</i>	Durchschlagfestigkeit h [mm] (SIA 272 Anhang D.3.1)	$DSF = DSF$
<i>IDSF</i>	Logarithmierte Durchschlagfestigkeit h	$IDSF = \log_{10}(DSF)$
<i>wDSF</i>	Radizierte Durchschlagfestigkeit h	$wDSF = \sqrt{DSF}$
<i>DSF1</i>	Kehrwert Durchschlagfestigkeit h	$DSF1 = \frac{1}{DSF}$
<i>SBS</i>	Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung s_{rk} [%] (SN EN ISO 13428)	$SBS = SBS$
<i>ISBS</i>	Logarithmierte Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung s_r	$ISBS = \log_{10}(SBS)$
<i>wSBS</i>	Radizierte Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung s_r	$wSBS = \sqrt{SBS}$
<i>SBS1</i>	Kehrwert Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung s_r	$SBS1 = \frac{1}{SBS}$
<i>PYR</i>	Pyramidendurchdrückwiderstand F_{max} [N] (SN EN 14574)	$PYR = PYR$
<i>IPYR</i>	Logarithmierter Pyramidendurchdrückwiderstand F_{max}	$IPYR = \log_{10}(PYR)$
<i>wPYR</i>	Radizierter Pyramidendurchdrückwiderstand F_{max}	$wPYR = \sqrt{PYR}$
<i>PYR1</i>	Kehrwert Pyramidendurchdrückwiderstand F_{max}	$PYR1 = \frac{1}{PYR}$
<i>LSW</i>	langfristige Schutzwirksamkeit [kN/m ²] (SN EN 13719)	$LSW = LSW$
<i>ILSW</i>	Logarithmierte langfristige Schutzwirksamkeit	$ILSW = \log_{10}(LSW)$
<i>wLSW</i>	Radizierte langfristige Schutzwirksamkeit	$wLSW = \sqrt{LSW}$
<i>LSW1</i>	Kehrwert langfristige Schutzwirksamkeit	$LSW1 = \frac{1}{LSW}$
<i>CBR</i>	Stempeldurchdrückkraft F_p [kN] (SN EN ISO 12236)	
<i>ICBR</i>	Logarithmierte Stempeldurchdrückkraft F_p	$ICBR = \log_{10}(CBR)$
<i>wCBR</i>	Radizierte Stempeldurchdrückkraft F_p	$wCBR = \sqrt{CBR}$
<i>CBR1</i>	Kehrwert Stempeldurchdrückkraft F_p	$CBR1 = \frac{1}{CBR}$
<i>CD</i>	Durchschlagwiderstand O_d [mm] (SN EN ISO 13433)	$CD = CD$
<i>ICD</i>	Logarithmierter Durchschlagwiderstand O_d	$ICD = \log_{10}(CD)$
<i>wCD</i>	Radizierter Durchschlagwiderstand O_d	$wCD = \sqrt{CD}$
<i>CD1</i>	Kehrwert Durchschlagwiderstand O_d	$CD1 = \frac{1}{CD}$

Auf eine Transformation der Werte mit dem natürlichen Logarithmus wurde verzichtet. Die Unterschiede zwischen dem natürlichen Logarithmus und dem gewählten dekadischen Logarithmus sind für die Modellwahl und die Regressionsrechnung nicht signifikant.

Streudiagramm

Das Streudiagramm (Abb. 17) zeigt jede mögliche Variablenkombination nach Tab. 21 für die Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428) und der Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Geovliese in einem Plot auf. Der paarweise Vergleich erleichtert das Erkennen von Zusammenhängen zwischen den einzelnen Variablen. Lineare Zusammenhänge im III. Quadranten ermöglichen eine erste grafische Variablenselektion. Die Korrelationskoeffizienten r im I. Quadranten entsprechen gespiegelt den Zusammenhängen im III. Quadranten. Die horizontalen Achsenbeschriftungen der Diagramme befinden sich oberhalb und unterhalb der Spalten und gelten jeweils für die ganze Spalte.

Dasselbe gilt für die vertikalen Achsenbeschriftungen am linken und rechten Zeilenrand, welche jeweils die ganze Zeile betreffen.

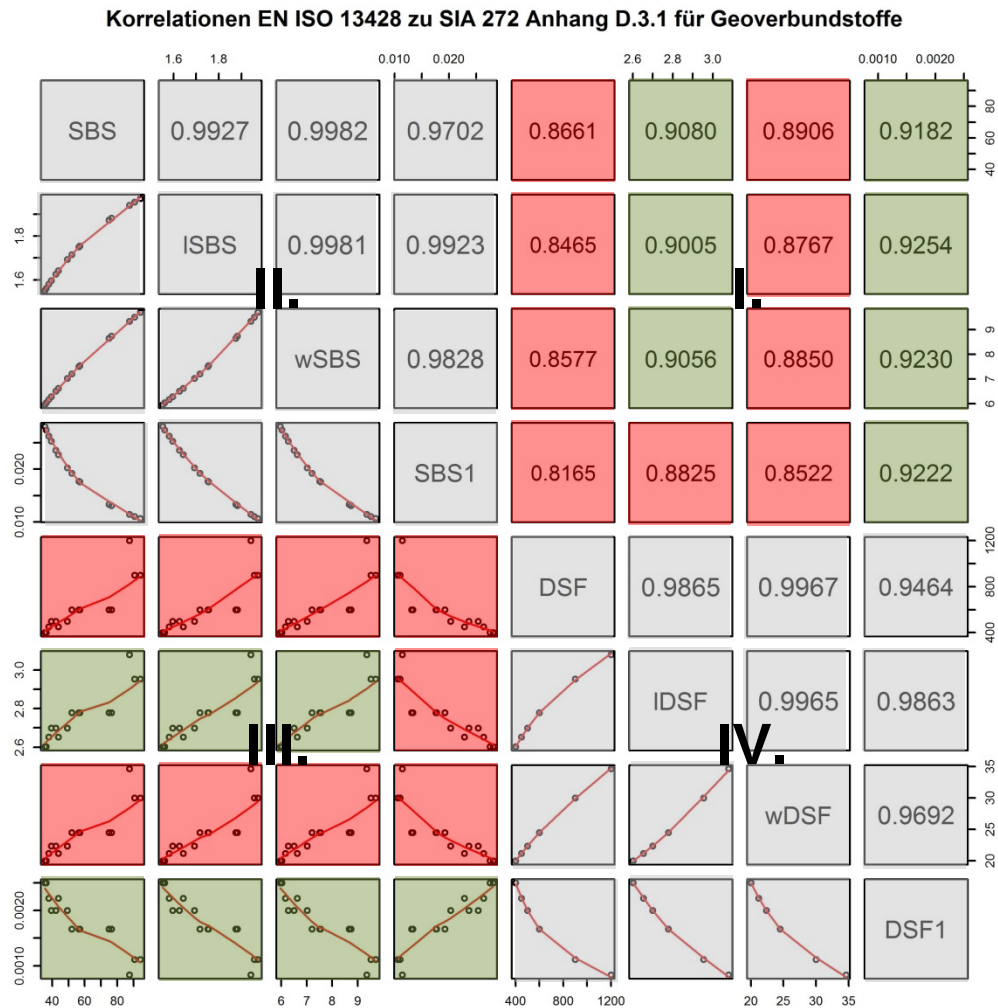


Abb. 17: Übersicht aller möglichen Variablenkombinationen für die Geokunststoffart Geoverbundstoffe und den Ergebnissen der Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428) und der Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1). Die grünen Streudiagramme (erfüllte Modellvoraussetzungen) im III. Quadranten zeigen Variablenkombinationen mit linearem Zusammenhang und gespiegelt im I. Quadranten den dazugehörigen grünen Korrelationskoeffizienten. Bei den roten Streudiagrammen sind in diesem Fall die Modellvoraussetzungen ebenfalls erfüllt, der Korrelationskoeffizient r liegt jedoch unter dem gewünschten sehr guten Zusammenhang von $r \geq 0.9$. Die grauen Felder im II. und IV. Quadranten zeigen Eigenzusammenhänge und sind vernachlässigbar.

Die Residuen-Analyse prüft die Modellvoraussetzungen der Variablenkombinationen. Erwünscht ist ein möglichst linearer Zusammenhang. Die Modellvoraussetzungen in den roten Streudiagrammen (Abb. 17) sind erfüllt, liegen jedoch unter dem gewünschten sehr guten Zusammenhang von $r \geq 0.9$. Die grünen Streudiagramme beinhalten Kombinationen von Variablen mit erfüllten Modellvoraussetzungen und ersichtlichem linearen Zusammenhang von $r \geq 0.9$.

Für die Geoverbundstoffe wählen wir das Modell $SBS \sim DSF1 = SBS \sim 1/DSF$ zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428) und der mechanischen Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1).

Residuen-Analyse

Als Residuum (Plural Residuen, lat. „das Zurückgebliebene“) wird der vertikale Abstand eines Messwertes zur Regressionslinie bezeichnet. Sämtliche Variablenkombinationen in Abb. 17 werden einer Residuen-Analyse zur Prüfung der Modellvoraussetzungen unterzogen. Für die Residuen wird angenommen:

- Erwartungswert streut um Null
- sie sind normalverteilt
- sie haben alle die gleiche Varianz
- sie sind unabhängig
- sie sind keine Hebelpunkte

Es geht um die Möglichkeit, aus allfälligen Abweichungen ein besseres Modell entwickeln zu können [11]. Die Ergebnisse der Residuen-Analyse des Modells $SBS \sim 1/DSF$ zeigt Abb. 18. Das Signifikanzniveau der Koeffizienten und das Bestimmtheitsmass fasst der R-Output zum Modell $SBS \sim 1/DSF$ zusammen (Tab. 22).

Residuals vs. Fitted: Erwartungswert

Der Erwartungswert streut um Null (Abb. 18 oben links). Punkte 67, 71 und 72 müssen auf eine mögliche Hebelwirkung untersucht werden. Es sind keine deutlichen Ausreisser vorhanden [11].

Normal Q-Q: Normalverteilung

Es sind keine groben Abweichungen einer Normalverteilung (Abb. 18 oben rechts) zu erkennen. Es sind keine Ausreisser ersichtlich [11].

Scale-Location: Varianz

Die Varianz verläuft auf einem konstanten Level (Abb. 18 unten links). Es ist kein auffälliger Trend erkennbar. Die grössten Residuen zeigen sich bei den Punkten 67, 71, und 72. Damit verbunden ist eine leichte Erhöhung, die auf diese Punkte zurückzuführen ist. Diese Punkte sollten auf eine mögliche Hebelwirkung untersucht werden. Es sind keine deutlichen Ausreisser vorhanden [11].

Residuals vs. Leverage: Hebelpunkte

Nach der Faustregel von Huber zur Hebelwirkung liegt der grösste Teil (12 von 15) der Residuen im Leverage-Bereich ≤ 0.2 und ist somit unbedenklich (Abb. 18 unten rechts). Drei Beobachtungen liegen zwischen 0.2 und 0.5 und könnten potentiell einflussreich sein. Beobachtungen grösser 0.5 sollten auf jeden Fall vermieden werden. Kein Wert überschreitet die Cook's Distance von 0.5, bzw. 1.0, (die als Faustformel gefährliche von ungefährlichen Beobachtungen unterscheidet). Die beim Erwartungswert und der Varianz auffälligen Punkte 67, 71 und 72 bewirken keine gefährliche Hebelwirkung. Insgesamt sind keine deutlichen Ausreisser vorhanden [11].

F-Test: Signifikanz der Variablen

Der F-Test überprüft die Nullhypothese. Ist der zugehörige p-Wert unter der Grenze von 0.05, weist mindestens einer der Koeffizienten auf dem 5 %-Niveau einen signifikanten Einfluss auf das angepasste Modell auf. Der p-Wert liegt in unserem Fall deutlich unter der 0.05-Marke (Tab. 23: p-value: 1.38e-06). Die erklärende Variable hat einen signifikanten Einfluss auf die Zielvariable [11].

Multiple R-Squared: Bestimmtheitsmass

Der Multiple R-Squared (R^2 oder r^2) ist das Quadrat der sogenannten multiplen Korrelation und wird auch Bestimmtheitsmass genannt. Der Wert entspricht der Korrelation zwischen den realen Beobachtungen und den durch das Modell angepassten Werten. Werte nahe bei 1 sind erstrebenswert. Gemäss Tab. 22 liegt das Bestimmtheitsmass in unserem Fall bei $R^2 = 0.843 = r = 0.92$ und entspricht einer sehr hohen Korrelation.

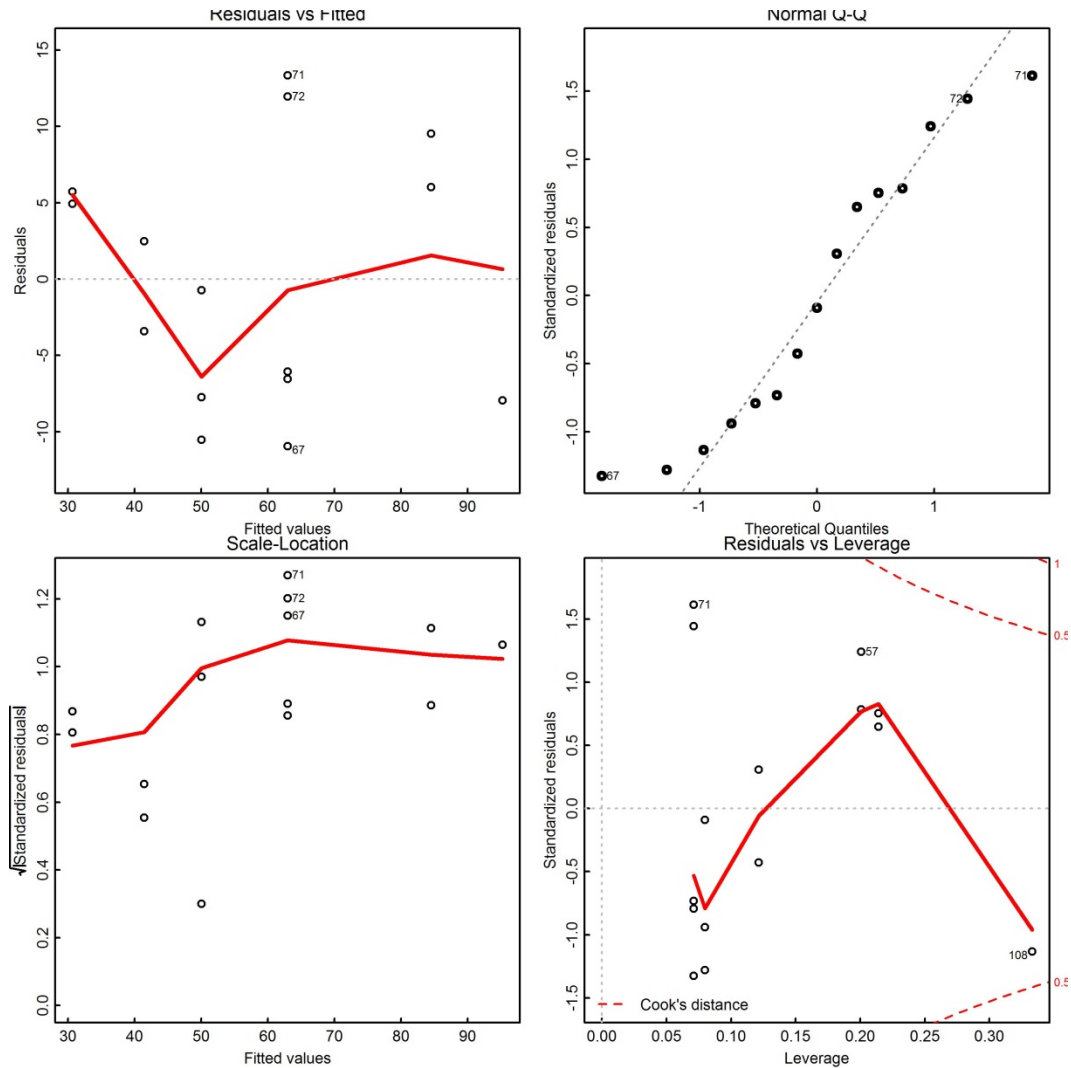


Abb. 18: R-Output zur graphischen Residuen-Analyse des Modells $SBS \sim 1/DSF$ für Geoverbundstoffe

Die Simulation aus Daten meines Modells $SBS \sim 1/DSF$ mit exakt erfüllten Modellvoraussetzungen (Abb. 19) ermöglicht eine bessere visuelle Beurteilung der Residuenanalyse. Sie ist der reinen Wahrscheinlichkeitsbewertung mittels p-Werten (Tab. 23) der Residuenanalyse vorzuziehen, da systematische Abweichungen innerhalb der Simulationen leichter zu erkennen sind. Den roten Glätter in Abb. 19 überdecken 19 graue Glätter aus simulierten Daten (für welche die Voraussetzungen exakt erfüllt sind). Beim Testen auf einem Signifikanzlevel von 5 % entsprechen 19 zusätzliche Glätter einem Signifikanzlevel von 5 % (1/20). Liegt der rote Glätter innerhalb des Bereichs aller grauen Glätter, so sind die Modellvoraussetzungen erfüllt.

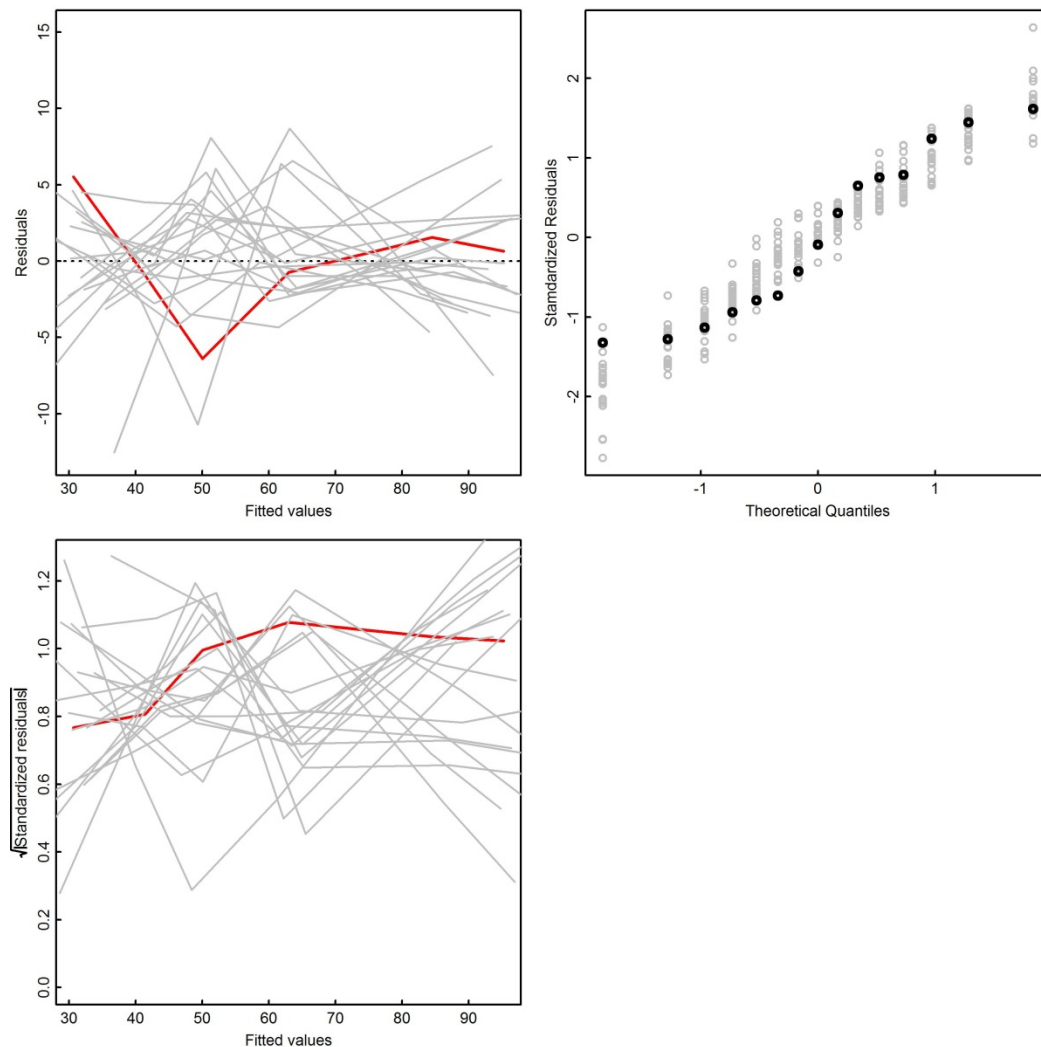


Abb. 19: Neunzehn graue Glätter aus unseren simulierten Daten mit erfüllten Modellvoraussetzungen überdecken im Modell $SBS \sim I(1/DSF)$ den roten Glätter. Die Modellvoraussetzungen sind somit zulässig erfüllt.

Tab. 22: R-summary zum Modell $SBS \sim I(1/DSF)$

```
Call:
lm(formula = SBS ~ I(1/DSF), data = geok, subset = c(57:79))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-10.96   -7.15   -0.74    5.88   13.34

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   127.53      8.58    14.86 1.5e-09 ***
I(1/DSF) -38745.39  4634.59   -8.36 1.4e-06 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.58 on 13 degrees of freedom
(8 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.843, Adjusted R-squared:  0.831
F-statistic: 69.9 on 1 and 13 DF, p-value: 1.38e-06
```

Tab. 23: R-Output zur Residuenanalyse für das Modell $SBS \sim 1/DSF$

```

Shapiro-Wilk normality test

data:  model$resid
W = 0.9265, p-value = 0.2422 → ≥ 0.05 = ok, alle Residuen sind normalverteilt

Test for unequal variances: Non-constant Variance Score Test
Variance formula: ~ fitted.values
Chisquare = 0.5623    Df = 1    p = 0.4533 → ≥ 0.05 = ok, alle Residuen haben
gleiche Varianzen

Test for outliers:

No Studentized residuals with Bonferonni p < 0.05
Largest |rstudent|:
      rstudent unadjusted p-value Bonferonni p
72      1.734      0.1086      NA → ≥ 0.05 = ok, keine Ausreisser,
visuell prüfen!

```

Regression, Vertrauensbereich und Prognosebereich

In einem letzten Schritt wird für das Modell $SBS \sim 1/DSF$ die Regression, das Vertrauensintervall und das Prognoseintervall berechnet (Abb. 20). Nach der Interpretation der Resultate wird eine Empfehlung zur Überarbeitung der Norm abgegeben.

Abb. 20 zeigt die Regression in transformierten Variablen ($SBS \sim 1/DSF$) und in den ursprünglichen Variablen ($SBS \sim DSF$). Vertrauensintervalle und Prognoseintervalle sind auf dem 95 %-Niveau eingetragen. Die Koeffizienten der Regressionsgeraden stammen aus Tab. 22 (rotes Viereck).

Die Regression wird mit folgender vereinfachter Formel beschrieben:

$$SBS = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{DSF} = 127.5 - 38745 \cdot \frac{1}{DSF}$$

In ursprünglichen Einheiten:

$$SBS = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{DSF} = 127.5 - 38745 \cdot \frac{1}{DSF}$$

Bei diesem Beispiel entfällt das Umrechnen in die ursprünglichen Einheiten, da die Zielvariable (SBS) nicht transformiert wurde.

Ein 95 % Vertrauensintervall ist ein zufälliges Intervall, welches den wahren Mittelwert der Grundgesamtheit (welcher fest ist) mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % enthält.

Ein Prognoseintervall soll einen (noch unbekannten) Messwert für SBS für ein gegebenes DSF enthalten (mit der vorgegebenen statistischen Wahrscheinlichkeit von 95%) [11]. Im Prognoseintervall liegen somit 95 % aller Werte, wobei die untere Linie den 2.5 % Quantilwert und die obere Linie den 97.5 % Quantilwert darstellt. Die untere Linie des Prognoseintervalls könnte sich zum Festlegen von Mindestanforderungen eignen.

Der 2.5 %-Quantilwert des Prognoseintervalls lässt sich vereinfacht mit folgender Formel in ursprünglichen Einheiten beschreiben:

$$SBS_{pre} = a_0 + a_1 \cdot DSF + a_2 \cdot DSF^2 + a_3 \cdot DSF^3$$

$$SBS_{pre} = 15.77 \cdot 10^{-8} \cdot DSF^3 - 4.86 \cdot 10^{-4} \cdot DSF^2 + 0.5285 \cdot DSF - 132.8$$

Die Koeffizienten für den 2.5 % Quantilwert des Prognosebands berechneten sich näherungsweise mit der Methode der kleinsten Quadrate. Dazu wurden 10 Stützstellen (Werte der Variablen DSF) und Stützwerte (Werte der Variablen SBS) des 2.5 % Quantilwerts des

Prognoseintervalls verwendet. Prognosen für die Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN 13428) sind zwischen 400 mm und 1200 mm Durchschlagfestigkeit mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % abgesichert (vorhandene Messwerte).

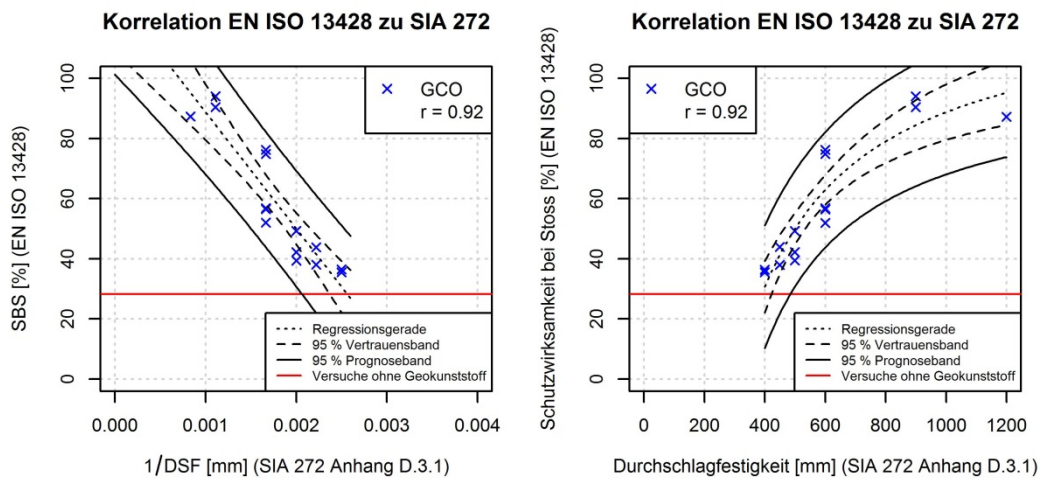


Abb. 20: Regression zwischen Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN 13428) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Geoverbundstoffe (GCO, $r = 0.92$) in transformierten Variablen (links), sowie in rücktransformierten Ausgangsvariablen (rechts). Die rote Linie bei ca. 28 % zeigt die untere Grenze (Versuche ohne Geokunststoff).

Jedes gültige und geeignete Regressionsmodell ermittelt sich nach der soeben beschriebenen Vorgehensweise. Tab. 24 bis Tab. 28 erfassen jedes Modell mit $r \geq 0.9$. Die angegebenen Formeln berechnen die jeweilige Zielvariable durch Einsetzen eines Durchschlagwiderstandes DSF (SIA 272 Anhang D.3.1). Visuelle Kontrollen der Berechnungen ermöglichen Abb. 20 bis Abb. 27.

Tab. 24: Korrelation Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) ¹⁾

Geokunststoffart	Modell	r	Regressionsformel (Regressionsgerade)
			Prognoseformel (95 % Intervall, 2.5 % Quantil)
GTX-N	$SBS \sim \log_{10}(DSF)$	0.95	$SBS = -193 + 87.3 \cdot \log DSF$ $SBS_{pre} = 255 \cdot 10^{-10} \cdot DSF^3 - 102 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2 + 0.1621 \cdot DSF - 26.8$
GCO	$SBS \sim \frac{1}{DSF}$	0.92	$SBS = 127.5 - 38745 \cdot 1/DSF$ $SBS_{pre} = 15.77 \cdot 10^{-8} \cdot DSF^3 - 4.86 \cdot 10^{-4} \cdot DSF^2 + 0.5285 \cdot DSF - 132.8$
GTP-PROT	$SBS \sim DSF$	0.99	$SBS = 19.9 + 0.0385 \cdot DSF$ $SBS_{pre} = 14.6 + 0.0425 \cdot DSF - 2.4 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2$
GTP-RUB	$SBS \sim DSF$	0.98	$SBS = -5.1 + 0.1009 \cdot DSF$ $SBS_{pre} = -23.2 + 0.1251 \cdot DSF - 1.48 \cdot 10^{-5} \cdot DSF^2$
GBR-NOP	$SBS \sim DSF$	0.98	$SBS = 3.86 + 0.0672 \cdot DSF$ $SBS_{pre} = -8.4 + 0.109 \cdot DSF - 4.95 \cdot 10^{-5} \cdot DSF^2$

¹⁾ EN = Europäische Norm / SIA = Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

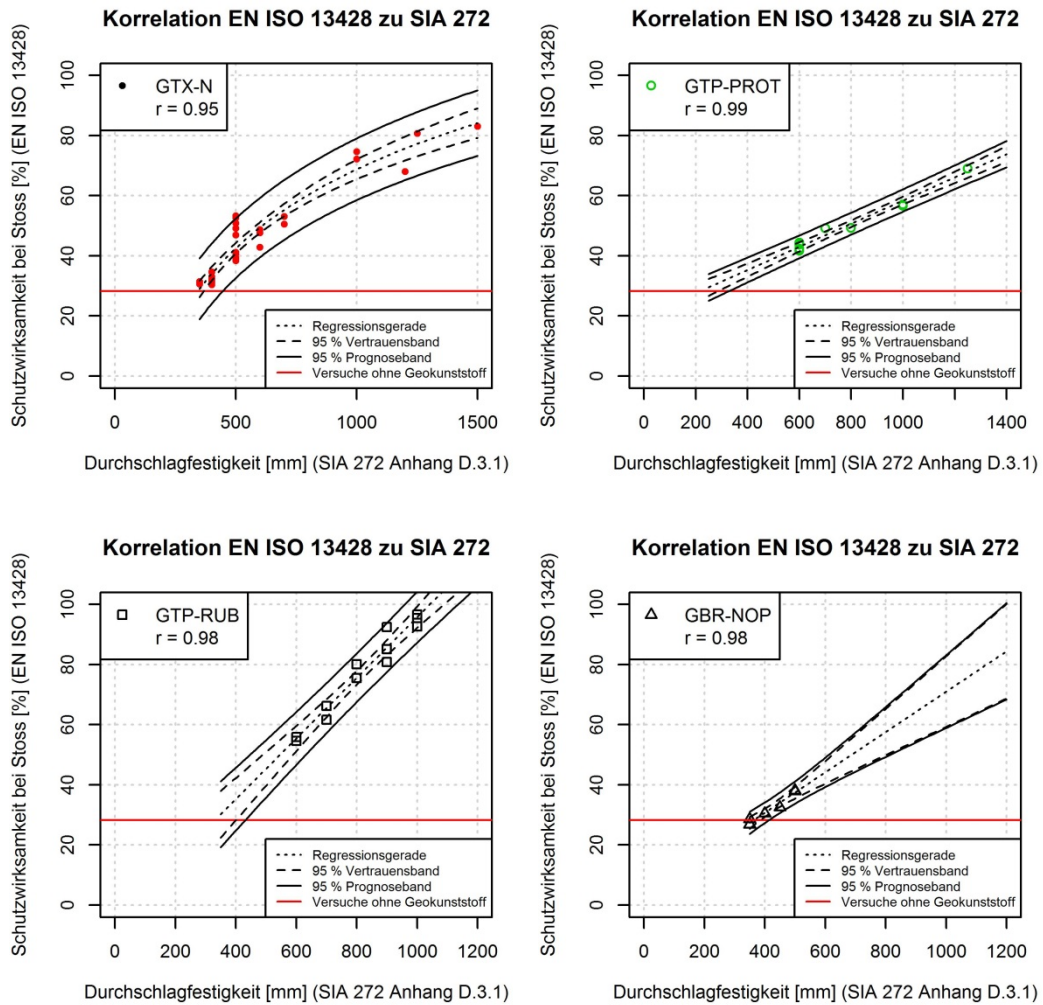


Abb. 21: Regression zwischen Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Geovliese (GTX-N, oben links), Schutzbahnen (GTP-PROT, oben rechts), Gummischrotbahnen (GTP-RUB, unten links) und Noppenbahnen (GBR-NOP, unten rechts) in rücktransformierten Ausgangsvariablen. Die rote Linie bei ca. 28 % zeigt die untere Grenze (Versuche ohne Geokunststoff).

Tab. 25: Korrelation Pyramidendurchdrückwiderstand (EN 14574) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1)			
Geokunststoffart	Modell	r	Regressionsformel (Regressionsgerade)
			Prognoseformel (95 % Intervall, 2,5 % Quantil)
GTX-N	$\log_{10}(PYR) \sim \frac{1}{DSF}$	0.96	$PYR = 10^{3.972} \cdot 10^{-575.9 \cdot \frac{1}{DSF}}$ $PYR_{pre} = -5 \cdot 10^{-7} \cdot DSF^3 + 0.00106 \cdot DSF^2 + 1.39 \cdot DSF - 455.5$
GCO	$\sqrt{PYR} \sim DSF$	0.93	$PYR = (-12.0 + 0.069 \cdot DSF)^2$ $PYR_{pre} = (-23.2 + 0.078 \cdot DSF - 7.6 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2)^2$
GTP-PROT	$\log_{10}(DSF) \sim \log_{10}(DSF)$	0.98	$PYR = 10^{-1.945} \cdot DSF^{1.509}$ $PYR_{pre} = -47.7 + 0.259 \cdot DSF + 1.06 \cdot 10^{-4} \cdot DSF^2$
GTP-RUB	$\log_{10}(PYR) \sim DSF$	0.95	$PYR = 10^{1.595} \cdot 10^{0.00123 \cdot DSF}$ $PYR_{pre} = 10^{1.385} \cdot 10^{0.00145 \cdot DSF} \cdot 10^{-1.34 \cdot 10^{-7} \cdot DSF^2}$
GBR-NOP	$\frac{1}{PYR} \sim DSF$	0.94	$PYR = \frac{1}{(0.019 - 3.1 \cdot 10^{-5} \cdot DSF)}$ $PYR_{pre} = 253.1 - 1.136 \cdot DSF + 0.002 \cdot DSF^2$

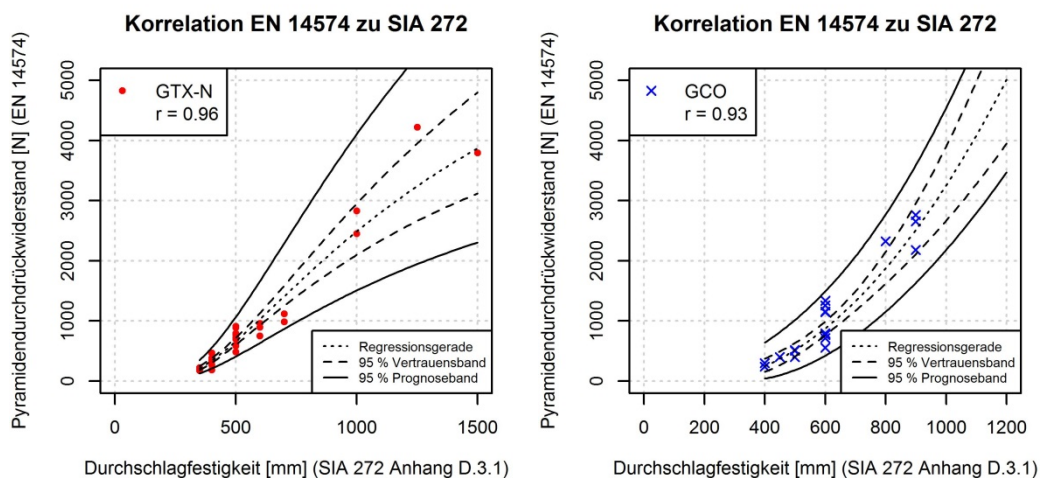


Abb. 22: Regression zwischen Pyramidendurchdrückwiderstand (EN 14574) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Geovliese (GTX-N, links) und Geoverbundstoffe (GCO, rechts) in rücktransformierten Ausgangsvariablen.

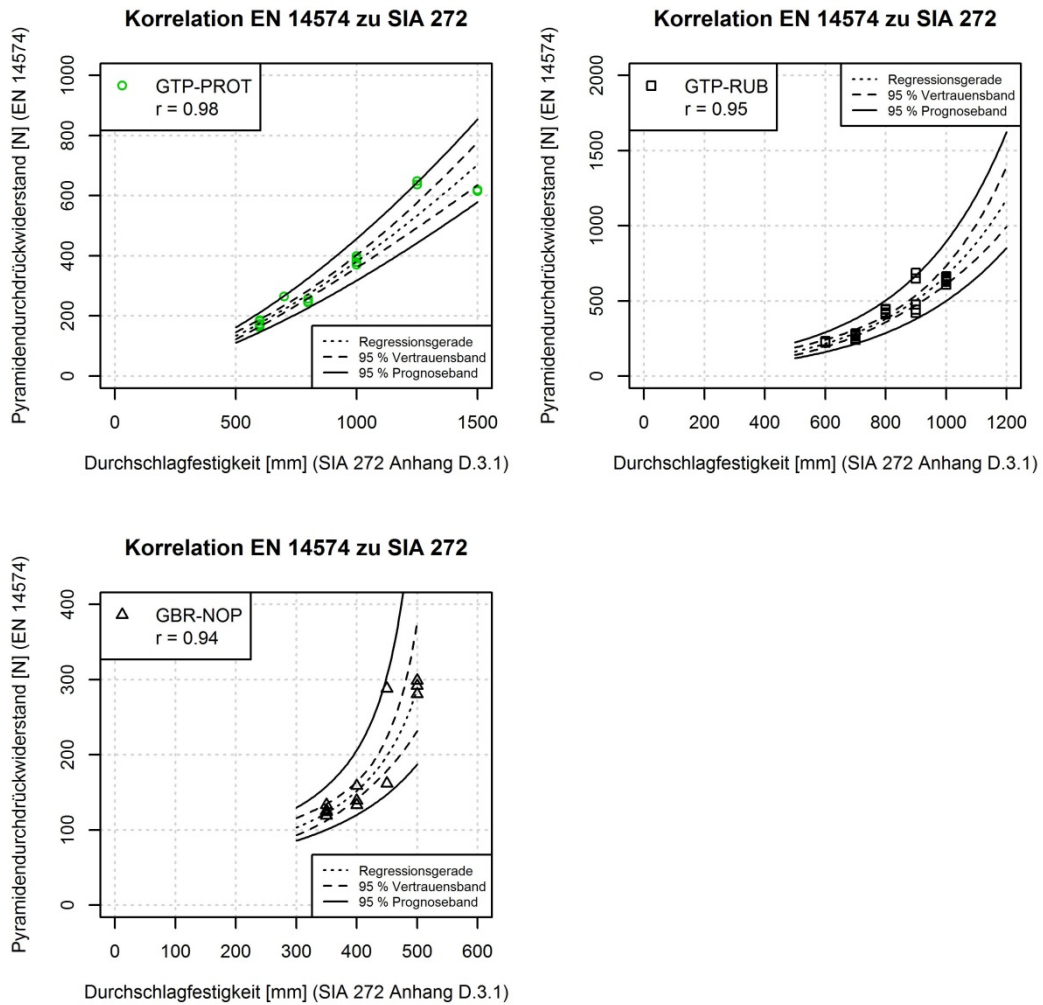


Abb. 23: Regression zwischen Pyramidendurchdruckwiderstand (EN 14574) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Schutzbahnen (GTP-PROT, oben links), Gummischrotbahnen (GTP-RUB, oben rechts) und Noppenbahnen (GBR-NOP, unten links) in rücktransformierten Ausgangsvariablen.

Tab. 26: Korrelation der langfristigen Schutzwirksamkeit (EN 13719) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1)			
Geokunststoffart	Modell	r	Regressionsformel (Regressionsgerade)
			Prognoseformel (95 % Intervall, 2.5 % Quantil)
GTX-N	$\log_{10}(LSW) \sim DSF$	0.91	$LSW = 10^{1.29} \cdot 10^{3.3 \cdot 10^{-4} \cdot DSF}$ $LSW_{pre} = 5.71 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2 + 0.0111 \cdot DSF + 15.1$
GCO	$LSW \sim DSF$	0.81	$LSW = 0.081 \cdot DSF - 17.75$ $LSW_{pre} = -5.45 \cdot 10^{-5} \cdot DSF^2 + 0.1416 \cdot DSF - 64.36$
GTP-PROT	-	≤ 0.41	-
GTP-RUB	$wLSW \sim DSF$	0.96	$LSW = (0.01094 \cdot DSF - 0.85)^2$ $LSW_{pre} = (-5.27 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2 + 0.01957 \cdot DSF - 6.02)^2$
GBR-NOP	-	≤ 0.39	-

Für die langfristige Schutzwirksamkeit ergeben Versuche ohne Geokunststoff ca. $19 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$. Produkte mit niedrigeren Werten schützen nicht.

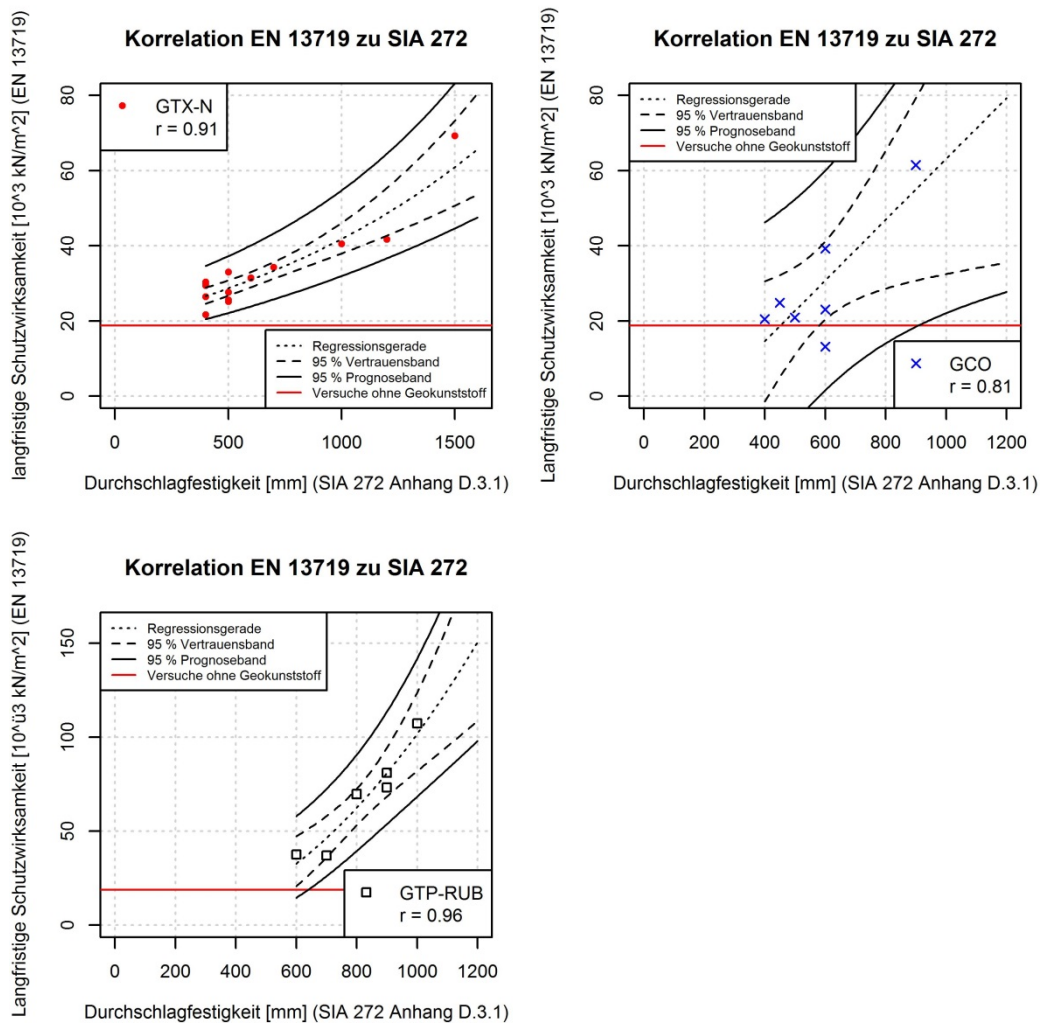
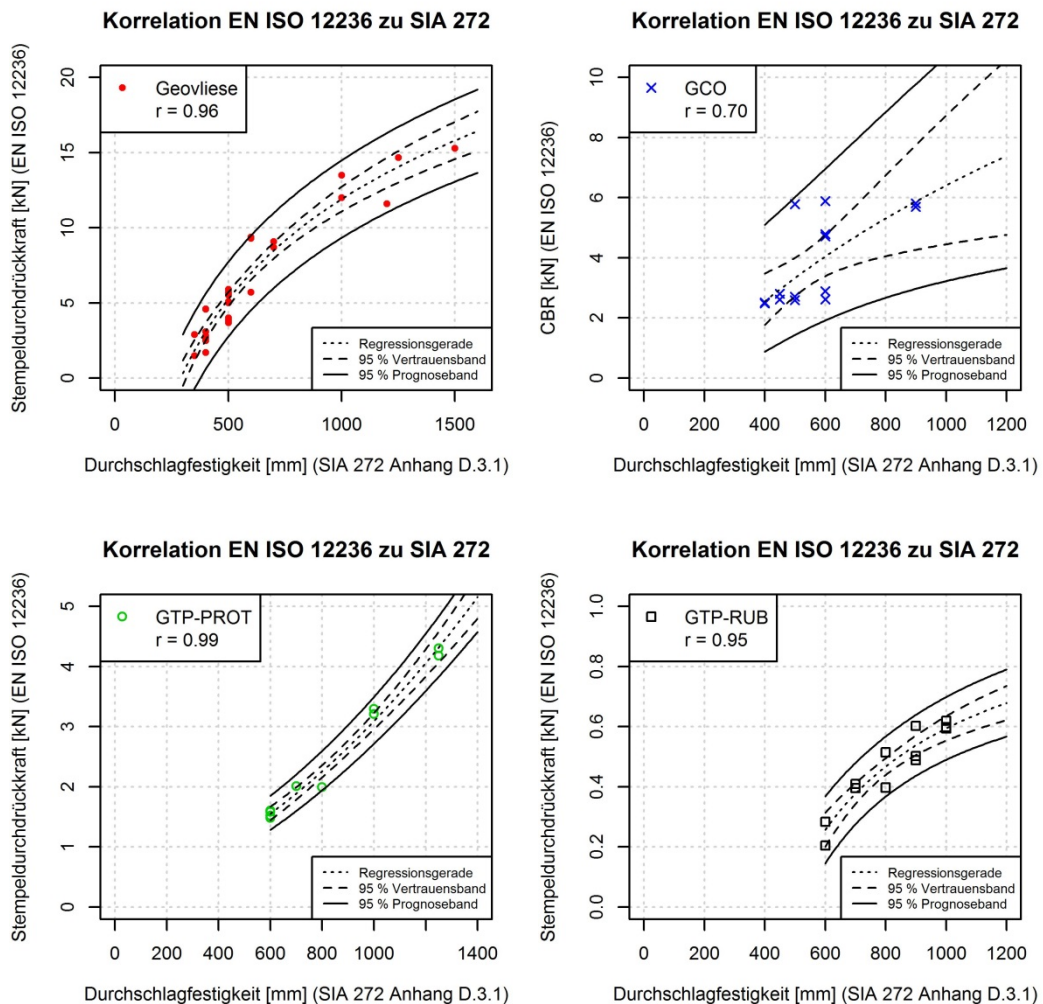


Abb. 24: Regression zwischen langfristiger Schutzwirksamkeit (EN 13719) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Geovliese (GTX-N, oben links), Geoverbundstoffe (GCO, oben rechts) und Gummischrotbahnen (GTP-RUB, unten links) in rücktransformierten Ausgangsvariablen. Die rote Linie bei ca. $19 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$ zeigt die untere Grenze (Versuche ohne Geokunststoff).

Tab. 27: Korrelation Stempeldurchdrückkraft (EN ISO 12236) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1)			
Geokunststoffart	Modell	r	Regressionsformel (Regressionsgerade)
			Prognoseformel (95 % Intervall, 2,5 % Quantil)
GTX-N	$CBR \sim \log_{10}(DSF)$	0.96	$CBR = -54.54 + 22.15 \cdot \log_{10}(DSF)$
			$CBR_{pre} = 6.48 \cdot 10^{-9} \cdot DSF^3 - 2.59 \cdot 10^{-5} \cdot DSF^2 + 0.0412 \cdot DSF - 12.3$
GCO	$\sqrt{CBR} \sim \log_{10}(DSF)$	0.70	$CBR = (2.349 \cdot \log_{10}(DSF) - 4.516)^2$
			$CBR_{pre} = -2.54 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2 + 0.00747 \cdot DSF - 1.67$

Tab. 27: Korrelation Stempeldurchdruckkraft (EN ISO 12236) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1)

Geokunststoffart	Modell	r	Regressionsformel (Regressionsgerade)
			Prognoseformel (95 % Intervall, 2.5 % Quantil)
GTP-PROT	$\sqrt{CBR} \sim DSF$	0.99	$CBR = (0.48 + 0.00128 \cdot DSF)^2$ $CBR_{pre} = (0.32 + (0.0014 - 7.0 \cdot 10^{-8} \cdot DSF) \cdot DSF)^2$
GTP-RUB	$CBR \sim \frac{1}{DSF}$	0.95	$CBR = -506.07 \cdot \frac{1}{DSF} + 1.1$ $CBR_{pre} = -0.893 + 2.28 \cdot 10^{-3} \cdot DSF - 8.95 \cdot 10^{-7} \cdot DSF^2$
GBR-NOP	$\frac{1}{CBR} \sim DSF$	0.97	$CBR = \frac{1}{3.52 - 0.006 \cdot DSF}$ $CBR_{pre} = \frac{1}{4.91 - 0.01095 \cdot DSF + 5.81 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2}$

**Abb. 25:** Regression zwischen Stempeldurchdruckkraft (EN ISO 12236) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Geovlies (GTX-N, oben links), Geoverbundstoffe (GCO, oben rechts), Schutzbahnen (GTP-PROT, unten links) und Gummischrotbahnen (GTP-RUB, unten rechts) in rücktransformierten Ausgangsvariablen.

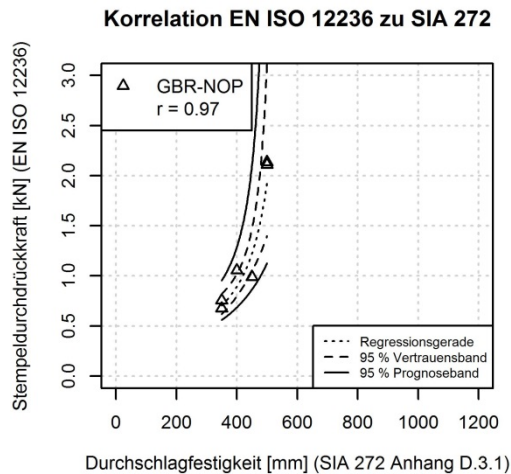


Abb. 26: Regression zwischen Stempeldurchdruckkraft (EN ISO 12236) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Noppenbahnen (GBR-NOP) in rücktransformierten Ausgangsvariablen.

Tab. 28: Korrelation Durchschlagwiderstand (EN ISO 13433) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1)			
Geokunststoffart	Modell	r	Regressionsformel (Regressionsgerade)
			Prognoseformel (95 % Intervall, 97.5 % Quantil)
GTX-N	$CD \sim DSF$	0.86	$CD = -0.03034 \cdot DSF + 19.15$
			$CD_{pre} = 7.93 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2 - 0.038 \cdot DSF + 24.94$
GCO	$CD \sim DSF$	0.77	$CD = -0.02147 \cdot DSF + 17.43$
			$CD_{pre} = 8.96 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2 - 0.0317 \cdot DSF + 27.0$
GTP-PROT	$CD \sim DSF$	0.98	$CD = -0.01085 \cdot DSF + 13.5$
			$CD_{pre} = 8.8 \cdot 10^{-7} \cdot DSF^2 - 0.01232 \cdot DSF + 15.47$
GTP-RUB	$CD \sim DSF$	0.95	$CD = -0.049 \cdot DSF + 47.21$
			$CD_{pre} = 9.34 \cdot 10^{-6} \cdot DSF^2 - 0.0647 \cdot DSF + 60.5$
GBR-NOP	$CD \sim DSF$	0.85	$CD = -0.1064 \cdot DSF + 67.82$
			$CD_{pre} = 1.894 \cdot 10^{-4} \cdot DSF^2 - 0.2651 \cdot DSF + 112.13$

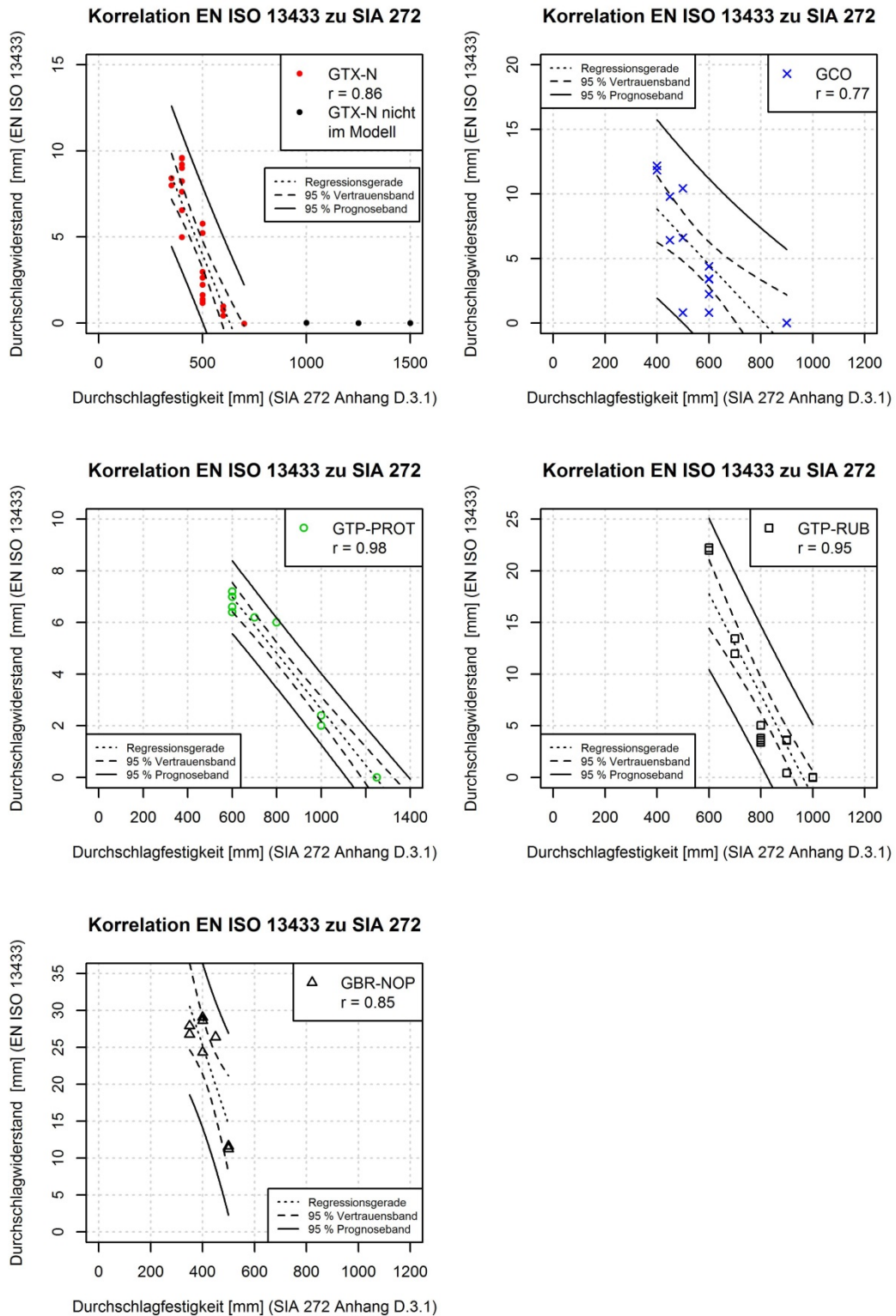


Abb. 27: Regression zwischen Durchschlagwiderstand (EN ISO 13433) und Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) für Geovlies (GTX-N, oben links), Geoverbundstoffe (GCO, oben rechts), Schutzbahnen (GTP-PROT, Mitte links), Gummischrotbahnen (GTP - RUB, Mitte rechts) und Noppenbahnen (GBR-NOP, unten links) in rücktransformierten Ausgangsvariablen.

Streumass Variationskoeffizient

Das Mass der relativen Streuung eines Versuchsergebnisses wird mit dem dimensionslosen Variationskoeffizient v ausgedrückt, Quotient aus Standardabweichung und arithmetischem Mittelwert eines Versuchs. Er eignet sich zum Vergleich der Streuung unterschiedlichen Messgrössen mit sehr unterschiedlichen Mittelwerten. Der Variationskoeffizient ist von der Anzahl der Stichprobenwerte abhängig, deshalb sind unterschiedlich grosse Datensätze (Einzelproben je Versuchsergebnis) nicht miteinander vergleichbar. Der normierte Variationskoeffizient v^* gleicht den Einfluss der Anzahl der Stichprobenwerte aus. Er bildet sich als Quotient von v und der Quadratwurzel aus der Anzahl der Einzelproben je Versuch und nimmt nur Werte zwischen Null und Eins an. Werte nahe bei Null zeigen eine kleine Streuung an.

Abgrenzung: Der normierte Variationskoeffizient lässt sich für das Prüfverfahren nach EN 13719 nicht angeben, da das Versuchsergebnis nicht aus einem arithmetischen Mittelwert von Einzelproben besteht und nur ein Versuchsergebnis pro Prüfmuster vorliegt.

6.3 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

In Tab. 29 fasst die Erfahrungen mit den Prüfverfahren und untersuchten Geokunststoffen zusammen. Der angegebene Korrelationskoeffizient r beschreibt den Zusammenhang zur Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1). Es sind die jeweils kleinsten (v^*_{min}), mittleren (v^*_{mittel}) und grössten (v^*_{max}) normierten Variationskoeffizienten v^* angegeben.

Tab. 29: Eignung der Prüfverfahren / Korrelation zu SIA 272 (Anhang D.3.1)					
Geokunststoffart	Schutzwirksamkeit bei Stoss [%] (EN ISO 13428)	Pyramidendurchdrückwiderstand [N] (EN 14574)	Langfristige Schutzwirksamkeit in [kN/m ²] (EN 13719)	Stempeldurchdrückkraft [kN] (EN ISO 12236)	Durchschlagwiderstand [mm] (EN ISO 13433)
GTX-N	$r = 0.95$ $v^*_{min} = 0.01$ $v^*_{mittel} = 0.05$ $v^*_{max} = 0.12$	$r = 0.96$ $v^*_{min} = 0.04$ $v^*_{mittel} = 0.06$ $v^*_{max} = 0.12$	$r = 0.91$	$r = 0.96$ $v^*_{min} = 0.01$ $v^*_{mittel} = 0.03$ $v^*_{max} = 0.07$	Durchschlägt bis ca. 5 mm Dicke jede Einzelprobe. $r = 0.86$ $v^*_{min} = 0.04$ $v^*_{mittel} = 0.23$ $v^*_{max} = 1.00$
GCO	$r = 0.92$ $v^*_{min} = 0.01$ $v^*_{mittel} = 0.06$ $v^*_{max} = 0.12$	Einfluss Produktstruktur $r = 0.93$ $v^*_{min} = 0.03$ $v^*_{mittel} = 0.08$ $v^*_{max} = 0.14$	Produktstrukturen verbleiben auf dem Bleiblech, ungleichmässige Eindrückungen $r \leq 0.81$	$r = 0.70$ $v^*_{min} = 0.00$ $v^*_{mittel} = 0.04$ $v^*_{max} = 0.06$	$r = 0.77$ $v^*_{min} = 0.04$ $v^*_{mittel} = 0.24$ $v^*_{max} = 0.61$
GTP-PROT	$r = 0.99$ $v^*_{min} = 0.00$ $v^*_{mittel} = 0.01$ $v^*_{max} = 0.03$	$r = 0.98$ $v^*_{min} = 0.01$ $v^*_{mittel} = 0.01$ $v^*_{max} = 0.02$	$r \leq 0.41$	$r = 0.99$ $v^*_{min} = 0.00$ $v^*_{mittel} = 0.01$ $v^*_{max} = 0.05$	Durchschlägt bis ca. 3 mm Dicke jede Einzelprobe. $r = 0.98$ $v^*_{min} = 0.00$ $v^*_{mittel} = 0.04$ $v^*_{max} = 0.10$
GTP-RUB	$r = 0.98$ $v^*_{min} = 0.01$ $v^*_{mittel} = 0.02$ $v^*_{max} = 0.04$ ab 10 mm Produktdicke $\geq 90\%$	$r = 0.95$ $v^*_{min} = 0.02$ $v^*_{mittel} = 0.03$ $v^*_{max} = 0.05$	$r = 0.96$	$F_{max} \leq 0.6$ kN nicht zugfest $r = 0.95$ $v^*_{min} = 0.01$ $v^*_{mittel} = 0.02$ $v^*_{max} = 0.05$	Durchschlägt bis ca. 8 mm Dicke jede Einzelprobe. $r = 0.95$ $v^*_{min} = 0.02$ $v^*_{mittel} = 0.17$ $v^*_{max} = 1.00$
GBR-NOP	$r = 0.98$ $v^*_{min} = 0.02$ $v^*_{mittel} = 0.04$ $v^*_{max} = 0.07$	Einfluss Produktstruktur $r = 0.94$ $v^*_{min} = 0.02$ $v^*_{mittel} = 0.08$ $v^*_{max} = 0.18$	Produktstrukturen verbleiben auf dem Bleiblech, ungleichmässige Eindrückungen $r \leq 0.39$	$r = 0.97$ $v^*_{min} = 0.01$ $v^*_{mittel} = 0.02$ $v^*_{max} = 0.03$	$r = 0.85$ $v^*_{min} = 0.02$ $v^*_{mittel} = 0.04$ $v^*_{max} = 0.09$
Materialbedarf	1 Bleiplatte	-	3 Bleiplatten	-	-
Zeitaufwand	ca. 1.5 h	ca. 1.0 h	mind. 12 Tage	ca. 1.0 h	ca. 1.0 h
Durchführung / Auswertung	Aufwendiges Ausmessen der Bleiplatte vor und nach dem Versuch	Dauer abhängig von Dicke des Produkts, stossempfindliche Prüfspitze	insgesamt aufwendig, erfahrener Prüfer erforderlich	einige Muster sind aufwendig in der Einspannvorrichtung zu arretieren	
Grenzen der Prüfung	max. 100 % messbar, sehr dicke Produkte schlecht prüfbar	Prüfspitze $l = 12.5$ mm = max. zusammenge-drückte Produktdicke	Einfluss der Anordnung der Messachsen bei GCO und GBR-NOP	Geeignet für Geokunststoffe mit Zugfestigkeit	Dicke Produkte mit hoher Schutzwirksamkeit sind nicht prüfbar
Grün: jeder Geokunststoff lässt sich ohne Einschränkungen gut prüfen, $r \geq 0.9$ und $v^*_{mittel} \leq 0.1$ Gelb: Geokunststoff lässt sich versuchsbedingt mit Einschränkungen prüfen und $r \geq 0.9$ und $v^*_{mittel} \leq 0.1$ oder $r \leq 0.9$ und $v^*_{mittel} \leq 0.1$ Rot: nicht jeder Geokunststoff ist prüfbar und $v^*_{mittel} \geq 0.1$					

Ob ein Prüfverfahren für einen Geokunststoff geeignet ist, wird farblich nach dem Ampelprinzip bewertet. Grün markierte Geokunststoffe lassen sich ohne Einschränkungen gut prüfen mit $r \geq 0.9$ und $v^*_{mittel} \leq 0.1$. Gelb markierte Geokunststoffe lassen sich mit versuchsbedingten Einschränkungen prüfen mit $r \geq 0.9$ und $v^*_{mittel} \leq 0.1$ oder $r \leq 0.9$ und $v^*_{mittel} \leq 0.1$. Rot markierte Geokunststoffe lassen sich schlecht oder nicht prüfen mit einem $v^*_{mittel} \geq 0.1$.

Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung nach EN ISO 13428

Das dynamische Prüfverfahren nach EN 13428 ähnelt sehr dem Referenzprüfverfahren. Die Versuchsergebnisse aller Geokunststoffe liegen zwischen ca. 30 % und 90 % Restdicke der Bleiplatte und sind eindeutig: Je grösser die Restdicke, desto höher die Schutzwirksamkeit. Ohne Schutzgeokunststoff werden die Bleiplatten auf ca. 28 % ihrer Ursprungsdicken zusammengedrückt (untere Grenze). Die Noppenbahn 404_29 zeigt mit Messwerten unter 28 % Restdicke keine Schutzwirkung. Restdicken ≥ 90 % erreichen 10 mm dicke Gummischrotbahnen und kommen nahe an die maximal messbare Restdicke von 100 % heran. Das Prüfverfahren eignet sich für jeden Geokunststoff, da keine technischen oder produktbedingten Einschränkungen vorliegen. Die Korrelation mit der Durchschlagfestigkeit der SIA 272 Anhang D.3.1 ist bei jeder Geokunststoffart sehr gut ($r \geq 0.9$). Die mittleren normierten Variationskoeffizienten v^*_{mittel} liegen für alle Geokunststoffe ≤ 6 %. Die Streuung der Versuchsergebnisse ist innerhalb und zwischen den Geokunststoffarten sehr klein. Mit dem halbkugelförmigen Prüfkopf ($d = 20$ mm) lässt sich eine grössere Fläche des Geokunststoffs prüfen, als dies bei den Prüfmethoden zur Ermittlung des Pyramidendurchdrückwiderstands und des Durchschlagwiderstands der Fall ist. Dadurch fliessen die Produktstrukturen (z. B. bei Noppenbahnen) besser in das Versuchsergebnis ein als dies bei punktuellen Prüfverfahren der Fall ist (z. B. Pyramidendurchdrückwiderstand nach SN EN 14574 oder Durchschlagwiderstand nach SN EN 13433).

Fazit: Dieses Prüfverfahren eignet sich sehr gut als Ersatzverfahren zur Bestimmung der Schutzwirksamkeit und sollte in die Spezifikationsnormen EN 13254 - EN 13257 und EN 13265 (aufgeführt in Kapitel 2.1) aufgenommen werden.

Pyramidendurchdrückwiderstand nach EN 14574

Die Länge der Prüfspitze beim Prüfverfahren nach EN 14574 beträgt 12.5 mm und begrenzt damit die zu untersuchenden Produkte im zusammengedrückten Zustand auf eine Dicke von maximal 12.5 mm. Die korrekte Geometrie der pyramidenförmigen Prüfspitze garantiert korrekte Messwerte (laborinterne Kontrolle notwendig). Bei Stossbelastung stumpft die Spitze ab. Die Folge sind falsche Messergebnisse. Die Produktstruktur in Kombination einer punktuellen Einwirkung führte bei Noppenbahnen und (Geoverbundstoffen) zu stärker streuenden Versuchsergebnissen (v^*_{max}) als bei Geovliesen, Schutzbahnen und Gummischrotbahnen. Entscheidend für das Versuchsergebnis bei den Noppenbahnen ist die Prüfstelle auf dem Muster (insbesondere Muster 404_28). Die Versuchsergebnisse zwischen den Geokunststoffarten liegen bis zu einem Faktor 10 auseinander. Die statistische Korrelation mit der mechanischen Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 Anhang D.3.1 ist für jeden Geokunststoff sehr gut ($r \geq 0.9$). Der grösste mittlere normierte Variationskoeffizient v^*_{mittel} liegt bei ca. 8 %.

Fazit: Dieses Prüfverfahren eignet sich unter Vorbehalt als Ersatzprüfverfahren zur Bestimmung der Schutzwirksamkeit. Es ist bereits in den Spezifikationsnormen SN EN 13254 - SN EN 13257 und SN EN 13265 gelistet.

Langfristige Schutzwirksamkeit nach EN 13719

Keine langfristige Schutzwirksamkeit besteht bei ca. $\leq 19 \cdot 10^3$ kN/m² (Versuch ohne Geokunststoff). Geoverbundstoffe ($r = 0.81$) und Noppenbahnen (drei Produkte, $r = 0.39$) drücken Produktstrukturen in die Bleiplatte und zeigen damit eine Beschädigung der Abdichtung an. Die untersuchten Schutzbahnen passen sich der Form der Stahlkugeln an und hinterlassen ähnliche Abdrücke auf der Bleiplatte wie sie auch Versuche ohne Geokunststoff zeigen. Obwohl Schutzbahnen sehr gut zu prüfen sind, ergibt sich nur ein Korrelationskoeffizient von $r = 0.41$. Die fünf untersuchten Schutzbahnen bestehen aus drei verschiedenen Rohstoffen: Polyvinylchlorid (PVC), flexible Polyolefine (FPO) und thermoplastische Polyolefine (TPO). Möglicherweise würde eine Unterscheidung der Schutz-

bahnen je nach Rohstoff zu besseren Korrelationskoeffizienten führen, was jedoch mehr Versuche mit mehr Produkten erfordert hätte.

Grossen Einfluss auf das Versuchsergebnis hat die individuelle Anordnung der zwei Achsen zur Messung der Eindellungen, besonders bei Geoverbundstoffen und Noppenbahnen. Mit der in diesem Forschungsvorhaben gewählten Anordnung lassen sich jeweils die grösstmöglichen Dehnungen berechnen. Die Verteilung der Stahlkugeln beeinflusst das Versuchsergebnis ebenfalls. Bei normgerechtem zufälligem Einfüllen der Stahlkugeln (entspricht Schütten) in den Stahlzylinder verbleiben häufig Leerstellen zwischen den Stahlkugeln direkt über dem Geokunststoff, die nicht durch Kugeln eingedellt werden. Diese Leerstellen grenzen an Eindellungen an und resultieren beim Ausmessen in grösseren Dehnungen. Die Versuchsergebnisse streuen dadurch mehr, als dies bei ausgerichteten Stahlkugeln in der ersten Kugellage über dem Geokunststoff der Fall ist. Positiv hervorzuheben ist die grosse untersuchte Fläche der Probe (ca. $A = 700 \text{ cm}^2$) im Gegensatz zu den punktuell untersuchten Flächen der Prüfverfahren nach EN 14574 und EN ISO 13433. Das Versuchsergebnis ist damit nicht abhängig von der Prüfstelle auf dem Geokunststoff, im Gegensatz zum Prüfverfahren nach EN 14574 bei den Noppenbahnen. Technisch gut prüfbar ist jeder Geokunststoff (siehe Versuchsergebnisse der einzelnen Produkte im Anhang mit $R^2 \geq 0.9$). Die Auswertung von ungleichmässigen Eindellungen, wie sie bei Noppenbahnen und Geoverbundstoffen auftreten, ist in der Norm nicht klar definiert und lässt Spielraum für Interpretationen zu. Sehr gute Korrelationen erreichen Geovliese ($r \geq 0.91$) und Gummischrotbahnen ($r \geq 0.96$). Ein Variationskoeffizient zur Korrelation kann nicht angegeben werden, da jedes Muster nur einmal geprüft wurde. Bei Geoverbundstoffen, Schutzbahnen und Noppenbahnen könnten vermutlich bessere Korrelationen mit mehr Versuchen erreicht werden, was jedoch aufgrund der Versuchsdauer von mindestens 12 Tagen (!) für ein Versuchsergebnis nicht möglich war.

Fazit: Aufgrund des hohen Prüfaufwandes lässt sich diese Prüfung nicht als Referenzverfahren empfehlen.

Stempeldurchdruckkraft nach EN ISO 12236

Der Stempeldurchdruckversuch (EN ISO 12236) eignet sich besonders für zugfeste Geokunststoffe. Einige Geoverbundstoffe und Noppenbahnen sind schwierig in der Einspannvorrichtung zu arretieren. Gummischrotbahnen ($r \geq 0.95$) weisen sehr kleine Festigkeiten ($0.2 \text{ kN} \leq F_{\max} \leq 0.6 \text{ kN}$) und Dehnungen auf. Die Messwerte liegen relativ dicht beieinander, sodass die Empfehlung für eine Anforderung schwierig ist. Das Prüfverfahren eignet sich deshalb mässig für Gummischrotbahnen trotz einer Korrelation von $r = 0.95$ und einem Variationskoeffizienten $v^*_{\text{mittel}} = 0.02$. Die Schichten der Geoverbundstoffe ($r = 0.70$, $v^*_{\text{mittel}} = 0.04$) bestehen aus unterschiedlichen Rohstoffen und versagen bei Belastung unterschiedlich schnell, erkennbar an den Peaks vor der Maximalkraft in den Kraft-Dehnungs-Diagrammen auf den Versuchsprotokollen (z. B. 404_08). Sehr gut prüfen lassen sich die Noppenbahnen ($r = 0.97$, $v^*_{\text{mittel}} = 0.02$), Schutzbahnen ($r = 0.99$, $v^*_{\text{mittel}} = 0.01$) und Geovliese ($r = 0.96$, $v^*_{\text{mittel}} = 0.03$).

Fazit: Der Stempeldurchdruckversuch ist als Ersatzverfahren nur teilweise zu empfehlen.

Durchschlagwiderstand nach EN ISO 13433

Dicke und inhomogene Geokunststoffe lassen sich nach Prüfverfahren EN ISO 13433 schlecht bzw. gar nicht prüfen, weil der Fallkegel den Geokunststoff nicht durchdringt. Nicht prüfbar waren zwei Gummischrotbahnen (Dicke ca. 10 mm), drei Geovliese (Dicke ca. 11 mm, 6 mm und 14.5 mm), eine Schutzbahn (Dicke ca. 3 mm) sowie ein Geoverbundstoff (Dicke ca. 14 mm). Diese Geokunststoffe durchschlägt der Fallkegel in zwei Versuchen bei keinem der zu einem Versuchsergebnis gehörenden 5 Teilversuche (Ausnahme: 404_19 einmal durchschlagen). Die Versuchsergebnisse in den Regressionen beinhalten Teilversuche, bei denen das Muster mindestens einmal nicht durchschlagen wird. Der Variationskoeffizient ist entsprechend hoch ($v^*_{\max}$ bis zu 1.0 und v^*_{mittel} bis zu 0.61). Die Prüfung lässt sich verwenden für Gummischrotbahnen ($r = 0.95$), Schutzbahnen ($r = 0.98$) und Geovliese ($r = 0.86$). Noppenbahnen ($r = 0.85$) sind gut prüfbar mit grossen Durchschlagwiderständen ($11 \text{ mm} \leq O_d \leq 30 \text{ mm}$). Jede Einzelprobe wird durchgeschlagen bis zu einer Dicke von ca. 5 mm (GTX-N), ca. 3 mm (GTP-PROT) und ca. 8 mm (GTP-RUB).

Fazit: Dicke Produkte und Produkte mit guter Schutzwirksamkeit sind nicht prüfbar. Dieses Prüfverfahren eignet sich nicht zur Bestimmung der Schutzwirksamkeit und sollte aus den Spezifikationsnormen EN 13254 - EN 13257 und EN 13265 entfernt werden.

6.4 Grenzen der Aussagen

Mit einer grösseren Anzahl durchgeführter Prüfungen würde man eine statistisch sicherere Datenbasis erhalten. Durch die Inhomogenität der Geokunststoffe und durch die geringe Anzahl der Versuche im vorliegenden Forschungsprojekt sind die gewonnenen Erkenntnisse als Trend zu verstehen.

Fehler 2. Art

Die Teststärke oder Power eines Modells beschreibt den Fehler 2. Art und bedeutet, dass das vorhandene Modell nicht fälschlicherweise abgelehnt wird, obwohl es richtig ist. Die Teststärke wird stark durch den Stichprobenumfang (Anzahl der Produkte) und die Effektstärke (Bestimmtheitsmass R^2) beeinflusst. Der Wert $1 - \beta$ (Fehler 2. Art) beschreibt dabei die Teststärke eines Tests. Bei einem Signifikanzniveau von $\beta = 0.20$ (entspricht dem 4-fachen Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) sollte die Teststärke bei mindestens 0.80 liegen.

In R lässt sich die Teststärke mit der Poweranalyse berechnen. Für die Berechnung notwendige Eingabewerte wie Effektgrösse und Freiheitsgrade entstammen dem summary-R-Output des jeweiligen Modells. Bei der Annahme von einer Zielvariablen, einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ und einer Effektgrösse (Bestimmtheitsmass R^2) ≥ 0.81 (entspricht Korrelationskoeffizient $r = 0.9$) müssten für eine Teststärke von 0.8 mindestens 12 Produkte je Geokunststoffart und Prüfverfahren getestet werden. Das bedeutet, dass die Teststärke nur bei den Geovliesen ausreichend hoch ist (14 Produkte), um einen Fehler 2. Art auszuschliessen.

7 Empfehlungen

Die statistische Datenanalyse der Laborversuche zeigt in zwei Fällen sehr gute Zusammenhänge auf zwischen EN Prüfverfahren und der mechanischen Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 „Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau“ Anhang D 3.1. Die hier gefundenen Korrelationen bilden eine verlässliche Grundlage für die Festlegung neuer Anforderungen an neuen EN Prüfverfahren bei der Überarbeitung der Norm SN 670 243 „Geokunststoffe - Anforderungen für die Funktion Schützen“ und der SIA 272.

Empfehlungen Ersatzprüfverfahren

Nach der Bewertung der Prüfverfahren in Kapitel 6.3 eignen sich die Prüfverfahren SN EN ISO 13428 „Geokunststoffe - Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffs bei Stossbelastung“ und unter Vorbehalt die SN EN 14574 „Geokunststoffe - Bestimmung des Pyramidendurchdrückwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage“ als Ersatzprüfverfahren für das Referenzprüfverfahren (SIA 272 Anhang D.3.1). Beide Prüfverfahren simulieren verschiedene Einwirkungen:

- EN 14574: scharfer starrer Gegenstand bei kurzzeitiger statischer Belastung
- EN 13428: Stossbelastung durch einen halbkugelförmigen Gegenstand

Aus wissenschaftlicher Sicht empfiehlt das Forschungsteam die SN EN ISO 13428. Die anderen EN-Prüfmethoden können aus den in Kapitel 6.3 beschriebenen Gründen als Ersatzverfahren nicht vorbehaltlos empfohlen werden.

Empfehlung Anforderungswerte

Die Versuchsergebnisse spiegeln den Schutz vor den verschiedenen Einwirkungen auch unterschiedlich wider (Abb. 28). So schützen z. B. Gummischrotbahnen nach EN 13428 deutlich besser als nach EN 14574. Der hohen Durchschlagfestigkeit einiger Schutzbahnen nach SIA 272 Anhang D.3.1 stehen vergleichsweise geringe Pyramidendurchdrückwiderstände nach EN 14574 entgegen.

Bei ähnlichen Messergebnissen liessen sich unterschiedliche Geokunststoffe für gleiche Empfehlungen zusammenfassen.

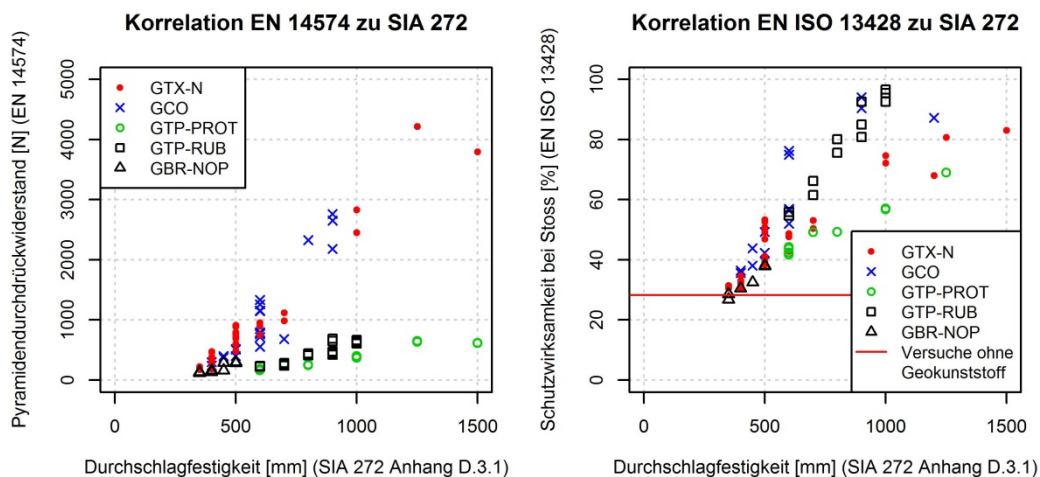


Abb. 28: alle Messwerte in einem Plot für den Pyramidendurchdrückwiderstand (EN 14574, links) und die Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO 13428, rechts). Bei ähnlichen Messergebnissen liessen sich unterschiedlicher Geokunststoffe für gleiche Empfehlungen zusammenfassen.

Die in Tab. 30 aufgeführten Werte (gerundet auf eine Nachkommastelle) für jeden Referenzwert berechnen sich aus den in Kapiteln 6.2 angegebenen Regressionsformeln für den Erwartungswert (Tab. 30 obere Zeile und fettgedruckte Werte) und den Prognosewert (untere Zeile und Werte in kursiver Schrift) der unteren 2.5 % Quantile (obere 97.5 % Quantile für EN 13433). Die Referenzwerte der mechanischen Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) existieren für Schutzbahnen, Geoverbundstoffe und Geovliese bei 1000 mm und / oder 1200 mm. Noppenbahnen weisen über alle Prüfverfahren hinweg, verglichen mit den anderen Geokunststoffen, die geringsten Schutzwirksamkeiten auf. Die geforderten Durchschlagfestigkeiten bei 1000 mm und 1200 mm erreichen sie mit Abstand nicht. Die angegebenen Rechenwerte (gewählt bei 400 mm und 500 mm) sind deshalb nur beispielhaft.

Die Prognosen für die jeweilige Zielvariable bei 1000 mm und 1200 mm Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) sind interpoliert und abgesichert, wenn Durchschlagfestigkeiten kleiner 1000 mm und grösser 1000 mm, bzw. 1200 mm vorliegen. Dunkelgrau hinterlegt sind aus dem Regressionsverlauf heraus extrapolierte Werte. Hier liegen keine mechanische Durchschlagfestigkeiten (SIA 272 Anhang D.3.1) bei 1200 mm als Messwerte vor, welche die Prognosen absichern.

Tab. 30: Berechnungsergebnisse als Grundlagen für Mindestanforderungen

Geokunststoffart	Referenz	Erwartungswert (Regressionsgerade)				
		berechneter Prognosewert (Prognoseband)				
	Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) [mm]	Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung [%] (EN ISO13428)	Pyramidendurchdrückwiderstand [N] (EN 14574)	Langfristige Schutzwirksamkeit [MN/m ²] (EN 13719)	Stempeldurchdrückkraft [kN] (EN ISO 12236)	Durchschlagwiderstand max. [mm] (EN ISO 13433)
GTX-N	≥ 1000	68.9	2489.4	41.7	11.9	< 0 (nicht prüfbar DSF ≥ 700 mm)
		58.8	1494.5	31.9	9.5	
	≥ 1200	75.8	3105.2	48.5	13.7	
		64.9	1874.9	36.6	11.0	
GCO	≥ 1000	88.8	3249.0	63.3	6.4	< 0 (nicht prüfbar DSF ≥ 900 mm)
		67.4	2227.8	22.7	3.3	4.3
	≥ 1200	95.2	5012.6	79.5	7.4	< 0 (nicht prüfbar DSF ≥ 900 mm)
		74.1	3535.0	27.1	3.6	
GTP-PROT	≥ 1000	58.4	381.9	$r \leq 0.9$ (0.41)	3.1	2.7
		54.7	317.3		2.7	4.0
	≥ 1200	66.1	502.9		4.1	0.5
		62.1	415.7		3.6	2.0
GTP-RUB	≥ 1000	95.8	668.3	101.8	0.59	< 0 (nicht prüfbar DSF ≥ 1000 mm)
		87.1	502.3	68.6	0.49	5.1
	≥ 1200	116.0 (≥ 100)	1177.6	150.7	0.68	< 0 (nicht prüfbar DSF ≥ 900 mm)
		105.6 (≥ 100)	855.1	97.5	0.55	
GBR-NOP	≥ 400	30.7	151.5	$r \leq 0.9$ (0.39)	0.9	25.3
		27.3	118.7		0.7	36.4
	≥ 500	37.5	285.7		1.9	14.6
		33.7	185.1		1.1	26.9

Fettgedruckt sind die Berechnungsergebnisse für die Regressionsgerade, in den Feldern mit kursiver Schrift die des 95 %Prognosebandes (2.5 % Quantil, bzw. 97.5 % Quantil bei EN ISO 13433). Dunkelgrau hinterlegt sind aus dem Regressionsverlauf heraus extrapolierte Werte. Hier liegen keine mechanische Durchschlagfestigkeiten (SIA 272 Anhang D.3.1) bei 1000 mm oder 1200 mm als Messwerte vor, die die Prognosen absichern.

Diskussion Anforderungswerte

Der Vergleich des Mittelwerts (Erwartungswert oder Regressionslinie) mit den bestehenden Anforderungen (Kapitel 6.1) zeigt Unterschiede auf.

SIA 272 Durchschlagfestigkeit (Anhang D.3.1) ≥ 1000 mm:

- Schutzbahnen: Die berechnete Stempeldurchdrückkraft (3.1 kN) liegt im Bereich der bestehenden Stempeldurchdrückkraft (2.5 kN)
- Geovliese: Die berechnete Stempeldurchdrückkraft (11.9 kN) liegt deutlich über der bestehenden Stempeldurchdrückkraft (2.5 kN).
- Geovliese: Der berechnete Durchschlagwiderstand (0 mm) liegt unter dem bestehenden Durchschlagwiderstand (10 mm).

Für eine Empfehlung stellt sich die Frage: Mit welcher Wahrscheinlichkeit dürfen die bestehenden Anforderungen an die Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 (Anhang D.3.1) bei 1000 mm und 1200 mm in Zukunft nicht unterschritten werden? Bei Wahl des Erwartungswerts (Regressionslinie) wird die Anforderung mit 50 %er Wahrscheinlichkeit unterschritten. Ein schmaleres Prognoseband verringert die Streuung um die Regressionslinie. In Abb. 29 sind neben den 95 % Prognosebändern die 90 % und 80 % Prognosebänder eingezeichnet, beispielhaft für die Korrelationen der Prüfverfahren nach EN ISO 13428 und EN 14574 zur SIA 272 Anhang D.3.1. In Tab. 31 sind dazu die berechneten Empfehlungen für die 5 % und 10 % Quantile der 80 % und 90 % Prognosebänder zusammengestellt. Bei Wahl des unteren Quantils eines Prognosebands könnten bestehende Produktanforderungen zukünftig abgeschwächt werden. Das gilt es zu vermeiden. Gleichwertige Anforderungen ergeben sich nur bei sehr enger Streuung um die Regressionslinie, der besten Schätzung für den Mittelwert. Die Autoren des Forschungsberichts empfehlen die Regressionslinie als Grundlage für die Festlegung der Anforderungen zu verwenden.

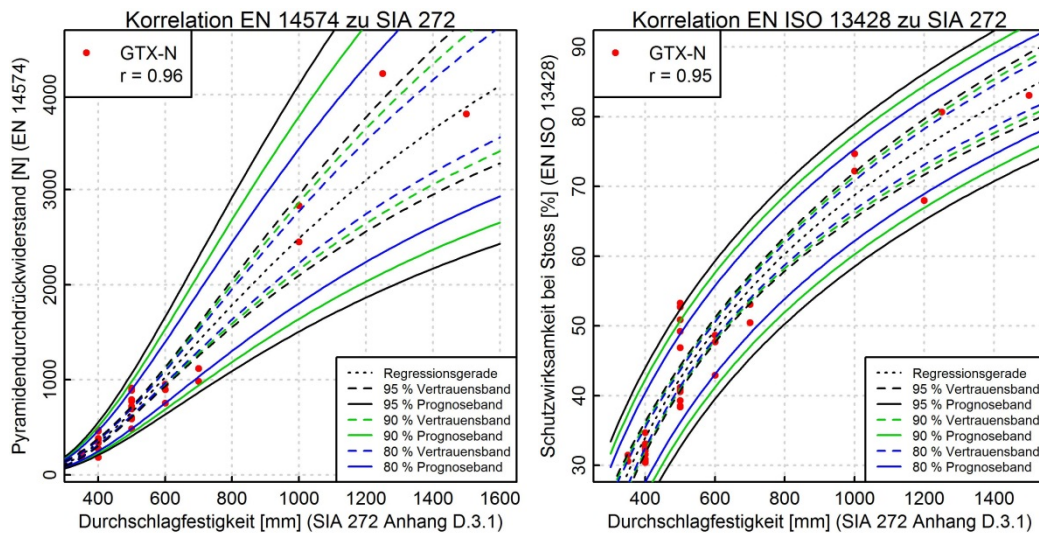


Abb. 29: Korrelationen der Prüfverfahren nach EN ISO 14574 und EN 13428 zur SIA 272 Anhang D.3.1, Verlauf der 80 %, 90 % und 95 % Prognosebänder für Geovliese.

Tab. 31: Berechnungsergebnisse für Korrelationen von EN ISO 14574 und EN 13428 zur SIA 272 (Anhang D.3.1) für Geovliese

Prognoseband	Quantil	Durchschlagfestigkeit [mm] (SIA 272 Anhang D.3.1)	Pyramidendurchdruckwiderstand [N] (EN 14574)		Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung [%] (EN ISO13428)	
			Regression	Prognose	Regression	Prognose
90 %	5 %	≥ 1000	2489.4	1626.1	68.9	60.6
		≥ 1200	3105.2	2040.6	75.8	66.7
80 %	10 %	≥ 1000	2489.4	1781.5	68.9	62.5
		≥ 1200	3105.2	2238.0	75.8	68.8

Empfehlungen für die Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung nach SN EN ISO 13428 sind in Tab. 32 zusammengefasst. Noppenbahnen (GBR-NOP) weisen keine ausreichend hohe Schutzwirksamkeit auf. Die geforderten Durchschlagfestigkeiten von 1000 mm und 1200 mm erreichen sie nicht. Der Erwartungswert errechnet sich aus den Regressionsformeln in Tab. 24 und ist in Abb. 20 Abb. 21 visuell ersichtlich.

Tab. 32: konkrete Empfehlungen für das Prüfverfahren nach SN EN ISO 13428			
Geokunststoff	Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) [mm]	Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung (EN ISO13428) [%]	
	Alter Referenzwert	Erwartungswert	Empfehlung
GTX-N	≥ 1000	68.9	≥ 65
	≥ 1200	75.8	≥ 70
GCO	≥ 1000	88.8	≥ 85
	≥ 1200	95.2	≥ 90
GTP-PROT	≥ 1000	58.4	≥ 55
	≥ 1200	66.1	≥ 65
GTP-RUB	≥ 1000	95.8	≥ 90
	≥ 1200	116.0 (≥ 100 %)	≥ 95
GBR-NOP	≥ 1000	Noppenbahnen drainieren hauptsächlich, deshalb ist keine Empfehlung möglich. Die maximale Durchschlagfestigkeit der untersuchten Produkte liegt bei 500 mm.	
	≥ 1200		
Fettgedruckt ist das über 100 % liegende Berechnungsergebnis für die Regressionsgerade. Es sind maximal 100 % Restdicke nach SN EN ISO 13428 bestimmbar.			

8 Forschungsbedarf

Eine Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 Anhang D.3.1 ≥ 1000 mm erreichten im Forschungsvorhaben nur sechs Produkte. Davon erreichte nur ein Geokunststoff eine Durchschlagfestigkeit ≥ 1200 mm. Versuchsergebnisse von zwei zusätzlichen Produkten aus älteren Prüfberichten mit einer Durchschlagfestigkeit ≥ 1200 mm sichern viele Regressionen ab. Insgesamt bietet der Markt kaum Produkte, welche die hohen SIA Anforderungen an die Durchschlagfestigkeit erfüllen. Es besteht Entwicklungsbedarf für neue Produkte mit hoher Schutzwirkung. Mit neuen Produkten lassen sich die gefundenen Korrelationen im Bereich ≥ 1000 mm Durchschlagfestigkeit statistisch besser absichern.

Die Anforderungen an Geokunststoffe mit den Hauptfunktionen Trennen und Filtern regelt die SN 670 241 „Geokunststoffe - Anforderungen an die Funktion Trennen und Filtern“. Geokunststoffe mit den Funktionen Trennen und Filtern sind den höchsten Beanspruchungen oder mögliche Beschädigungen während der Phase des Einbaus auf der Baustelle ausgesetzt. Erst nach dem Einbau erfüllen sie die an sie gestellten Anforderungen. Diese Einbaubeanspruchung ist zurzeit in den Anforderungen nicht berücksichtigt. Bauwerksschäden sind jedoch trotz Nichtberücksichtigung der Einbaubeanspruchung nicht bekannt. Die aktuellen Anforderungen sind aus dem Jahr 1997 und stammen von Geotextilien im Neuzustand, das heisst im nicht eingebauten Zustand. Optimieren liessen sich die Anforderungen durch Berücksichtigung der Einbaubeanspruchung, das heisst, es finden Untersuchungen an nach dem Einbau wieder ausgebauten Geokunststoffen mit relevanten Prüfverfahren statt. Damit liessen sich praxisbezogene Anforderungen aufstellen, die neuen Gesteinskörnungen und neue Geokunststoffe berücksichtigen. Die Praxisrelevanz des Prüfverfahrens nach SN EN ISO 10722 „Geokunststoffe - Indexprüfverfahren zur Bewertung von mechanischen Schäden bei wiederholter Belastung - Beschädigung durch körnige Materialien“ liesse sich überprüfen.

Folgende weitere EN-Prüfverfahren wurden im Rahmen der Forschungsbudgetkürzung im Jahr 2014 aus dem Prüfprogramm herausgenommen:

- SN EN ISO 10722 „Geokunststoffe - Indexprüfverfahren zur Bewertung von mechanischen Schäden bei wiederholter Belastung - Beschädigung durch körnige Materialien“
- SN EN ISO 13427 Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Simulation von Scheuerbeschädigungen
- SN EN ISO 13431 Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens

Diese bisher nicht untersuchten Prüfverfahren können Anlass für ein neues Forschungsprojekt geben.

Die langfristige Schutzwirksamkeit nach SN EN 13719 beurteilt die Schutzwirkung eines Geokunststoffs in Verbindung mit einer zu schützenden Abdichtung sehr gut. Allein die lange Versuchsdauer und das aufwendige Ausmessen der Verformungen machen dieses Prüfverfahren unattraktiv in der Anwendung. Aufgrund der gemachten Erfahrungen sieht das Forschungsteam Optimierungsbedarf hinsichtlich Versuchsdauer und Schichthöhe der Stahlkugeln.

Publikationen

-
- [12] Fonyo, Büttner, Stolz: Forschungsprojekt über Geokunststoffe als Schutz der Abdichtung geotechnischer Bauwerke, Strasse und Verkehr, Nr. 9 / 2014 (nachfolgende Seiten)
-

Forschungsprojekt über Geokunststoffe als Schutz der Abdichtung geotechnischer Bauwerke

Zurzeit läuft ein vom ASTRA in Auftrag gegebenes Forschungsprojekt mit dem Ziel, die Anforderungen an Geokunststoffe als Schutz der Abdichtung zu erweitern und die relevanten Schweizer Normen mit den Europäischen Standards zu harmonisieren. Dies wird eine Anpassung der Schweizer Normen SN 670 243 und SIA 272 erforderlich machen. Aus den Projektergebnissen ergeben sich für den Planer zahlreiche Vorteile – etwa eine verlängerte Nutzungsdauer, eine höhere Markttransparenz, mehr Planungssicherheit und eine Reduktion der Erstellungs- und Erhaltungskosten geotechnischer Bauwerke.

Die Dauerhaftigkeit der Abdichtung eines Tunnels bzw. eines erdverlegten Tiefbauwerks wirkt sich unmittelbar auf dessen Nutzungsdauer aus. Zum Abdichtungssystem gehören die eigentliche Abdichtung, zum Beispiel eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB, siehe Abb. 1), eine Schutzlage und das Kontaktmaterial, zum Beispiel gebrochener Fels als Schüttmaterial. Dabei sind diese drei Komponenten aufeinander abzustimmen. Die Schutzlage hat die Aufgabe, die Abdichtung vor mechanischer Beschädigung zu schützen und ist in vielen Fällen ein Geokunststoff. Dazu gehören beispielsweise Geovliesstoffe, Geoverbundstoffe und Gummischrotbahnen.



VON
BALAZS FONYO
Dipl. Bau-Ing. ETH/SIA,
Fachspezialist Tunnel/
Geotechnik beim ASTRA



VON
DANIEL BÜTTNER
Dipl. Ing. FH, Assistent für
Forschung und Entwick-
lung, Berner Fachhoch-
schule (BFH) in Burgdorf



VON
MARTIN STOLZ
Dipl. Bau-Ing. ETH,
Professor für Geotechnik
und Naturgefahren,
Berner Fachhochschule
(BFH) in Burgdorf

Schutzbahnen in den späten 1980er-Jahren in der Schweiz konzipiert. Sie konnte sich trotz ihrer guten Eignung bei der EN-Normung nicht durchsetzen. Aus diesem Grund

besteht die Notwendigkeit, dieses Schweizer Prüfverfahren durch ein äquivalentes europäisches Prüfverfahren zu ersetzen.

Auf Veranlassung der VSS-Kommission FNK 4.08 Geokunststoffe beauftragte das Bundesamt für Strassen ASTRA 2013 das Kompetenzzentrum Geotechnik und Naturereignisse der Berner Fachhochschule in Burgdorf (BFH) und die Tecnotest AG Rüschlikon, im Rahmen des Forschungsprojekts VSS 2010/404 «Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden» zu erarbeiten. Diese Projektpartner schlossen bereits 2012 die beiden Forschungsprojekte VSS 2008/402 «Hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen» und VSS 2008/403 «Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen» erfolgreich ab.

Forschungsbedarf und -auftrag

Die anwendungsbezogenen Anforderungswerte an das Leistungsvermögen von Geokunststoffen als Schutz von Abdichtungen werden national in den Normen SN 670 243 «Geokunststoffe – Anforderungen für die Funktion Schützen» und SIA 272 «Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau» definiert. Im Zuge der Harmonisierung mit den Europäischen Standards ergab sich der Bedarf, neue Anforderungswerte an Schutzgeokunststoffe festzulegen, da diese in der aktuellen SIA 272 unter anderem für die Prüfnormen SN EN ISO 13428, SN EN 13719 und SN EN 14574 nicht definiert sind. Für entsprechende Vorschläge fragte die Kommission SIA 272 die VSS-Kommission FNK 4.08 Geokunststoffe erstmals im Jahre 2008 an. Bis heute ist in der Schweiz für die Beurteilung der Schutzwirksamkeit von Geokunststoffen die sogenannte «Durchschlagfestigkeit» gemäss Anhang D.3.1 der Norm SIA 272 (eine modifizierte Variante der EN 12691) das entscheidende Kriterium, nicht jedoch in den übrigen europäischen Ländern. Diese Prüfmethode wurde für starke

Forschungsziele

Das Forschungsprojekt VSS 2010/404 soll zur erhöhten Sicherheit einer technischen Abdichtung, zur Verlängerung der Nutzungsdauer eines abgedichteten Tiefbauwerks oder Tunnels, zu mehr Planungs- und Ausführungssicherheit sowie zur Vereinheitlichung der Schlüsselkriterien bei den Anforderungen und damit zu mehr Markttransparenz führen. Zudem soll es zur Effizienzsteigerung durch Reduktion der Erstellungs- und Erhaltungskosten von Tunneln beitragen.

Das vorliegende Forschungsprojekt soll die Grundlagen für die Anpassung der SN 670 243 und der SIA 272 liefern, welche in Empfehlungen für neue, begründbare Anforderungswerte für Schutzgeokunststoffe bestehen. Dabei soll das Spektrum von Geokunststoffen auf weitere Produktgruppen wie Gummischrotbahnen erweitert werden, mit welchen sich



1 | Anwendung einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) bei einer Staumauer. Die unbedeckte Fläche ist ohne Schutzschicht (Foto: Sika AG).

eine Schutzwirkung von Abdichtungen erzielen lässt. Zudem soll festgestellt werden, welches der im Projekt betrachteten EN-Prüfverfahren für welche Anwendungsfälle geeignet und empfehlenswert ist.

Für die Anpassung der Normen fließen letztendlich neben den Grundlagen aus diesem Forschungsprojekt weitere entscheidende Einflussfaktoren, wie Baumethoden/-zustände, Schüttmaterialien, Kontaktflächen, Belastungsarten, Witterungsbeständigkeit und angestrebte Nutzungsdauer mit ein.

Methodik

Für das Forschungsprojekt wurden 34 auf dem Schweizer Markt erhältliche Produkte folgender Geokunststofftypen ausgewählt, die Schutzfunktionen bei geotechnischen Anwendungen erfüllen können:

- Geovliese
- Geogewebe
- Gummischrotbahnen
- Noppenbahnen
- Geoverbundstoffe

Für die Prüfungen werden von jedem Produktmuster insgesamt 40 m² verwendet. In der Übersicht (Abb. 2) auf der folgenden Seite sind die Normen der sechs im Projekt eingesetzten Prüfverfahren aufgeführt. Jede Prüfung eines Produkts besteht aus zwei Serien. Eine Serie beinhaltet je nach Prüfnorm 3–10 Teilversuche. Die zweite Serie dient der Überprüfung der Ergebnisse. Insgesamt ergibt dies über 2000 Teilversuche, die in 2,5 Jahren durchzuführen sind. Das zeitaufwändigste Prüfverfahren ist die SN EN 13719 mit 100 Stunden Versuchsdauer pro Teilversuch. Im Ideal-

FR

Projet de recherche: Géosynthétiques comme protection de l'étanchéité des ouvrages géotechniques

Un projet de recherche mandaté par l'OFROU est actuellement en cours. Celui-ci a comme objectifs d'élargir et d'harmoniser les exigences des géosynthétiques comme protection de l'étanchéité. Les résultats pourraient profiter aux deux normes suivantes

dans lesquelles les exigences techniques des géosynthétiques sont réglées: SN 670 243 Géosynthétiques – Exigences pour la fonction de protection et SIA 272 Etanchéités et drainages d'ouvrages enterrés et souterrains.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
CE	Conformité Européenne (Europäische Konformitätskennzeichnung)
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäische Komitee für Normung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
FPO	flexible Polyolefine
GBR-NOP	Noppenbahnen (in Anlehnung an SN 670 090)
GCO	Geoverbundstoffe (SN 670 090)
GTP-PROT	Schutzbahnen aus Kunststoffolie (in Anlehnung an SN 670 090)
GTP-RUB	Gummischrotbahnen (in Anlehnung an SN 670 090)
GTX-N	Geovliesstoffe (SN 670 090)
ISO	International Organization for Standardization
ÖNORM	österreichische Norm des Austrian Standards Institute
PE	Polyethylen
PEHD	Polyethylen hoher Dichte (Polyethylen - High Density)
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
SVG	Schweizer Verband für Geokunststoffe
TPO	thermoplastische Polyolefine
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

-
- | | |
|------|---|
| [1] | Boley, Conrad (Hrsg.), Handbuch Geotechnik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2012 |
| [2] | Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (2015): Richtlinien für die Zulassung von Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponieabdichtungen, 5. überarbeitete Auflage |
| [3] | Fonyo, B.: Geokunststoffe: Grundnorm des VSS sorgt für Durchblick im Normendschungel, Strasse und Verkehr, Nr. 7 - 8 / 2014 |
| [4] | Hufenus, R., Rüegger, R., Flum, D., Felix, P., Jaeklin, P., Brinkmann, A., Zeiter, P., Sterba, I. (2002): Anforderungen an Geokunststoffe mit den Aufgaben Bewehren und Schützen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen |
| [5] | Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation -UVEK-, Bundesamt für Strassen - ASTRA-, Bern (Herausgeber): Forschungsauftrag VSS 2008/403 „Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen“ |
| [6] | Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) (2010): Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrung aus Geokunststoffen - EBGeo, 2. Auflage, Ernst & Sohn, A Wiley Company |
| [7] | Markus Jahn, Tunnel 3 / 2012, Sika Services AG, Zürich/CH |
| [8] | von Maubeuge, Kent P. (2007): Geokunststoffe im Bauwesen, Bedeutung der Geokunststoffe als neue Baustoffe, www.geo-site.com , Stand 14.07.2015 |
| [9] | Müller-Rochholz (2008): Geokunststoffe im Erd- und Verkehrswege, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, Werner Verlag |
| [10] | Rüegger, Rudolf, Hufenus, Rudolf (2003): Bauen mit Geokunststoffen, ein Handbuch für den Geokunststoff-Anwender, Schweizerischer Verband für Geokunststoffe SVG, ISBN 3-9522774-01 |
| [11] | Stahel, W. A.: Statistische Datenanalyse: Eine Einführung für Naturwissenschaftler, 5. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2008 |
-

Die Normen und Richtlinien sind in Kapitel 2.1 aufgelistet.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Strassen, Brücken, Tunnel

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 25.08.2015 / 06.10.2015 / 20.11.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2010/404
Projekttitel: Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden
Enddatum: 31.12.2015

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Anforderungen an das Leistungsvermögen von Geokunststoffen als Schutz von Abdichtungen sind in der Schweiz in zwei Normen definiert: SN 670 243: Geokunststoffe - Anforderungen für die Funktion Schützen und SIA 272: Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau. Die wichtigsten Anforderungen werden in der aktuellen Norm SIA 272 gemäss Anhang D.3.1 an die Prüfmethode "Mechanische Durchschlagfestigkeit" gestellt, welche allerdings europäisch und international nicht normiert ist.

Das vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, geeignete EN-Prüfmethoden als Ersatz zur mechanischen Durchschlagfestigkeit gemäss SIA 272 Anhang D.3.1 auszuwählen und Anforderungswerte zu diesen Prüfmethoden vorzuschlagen. Aufgrund der Erkenntnisse der Forschungsarbeit sollen die Normen SN 670 243 und SIA 272 revidiert werden. Alle nationalen Anforderungen an die Funktion Schützen, auch diejenigen der SIA 272 Anhang D.3.1, sollen auf europäische Prüfmethoden abgestellt werden. Somit wird dieses noch bestehende technische Handelshemmnis beseitigt. Ein weiteres Ziel des Projektes ist, die nötigen Grundlagen zu erarbeiten, um die Gültigkeit der SN 670 243 auf weitere Anwendungsfälle wie Bauten unter Terrain, Tagbautunnel, Untertagebau sowie auf weitere Geokunststoffe wie Schutzbahnen, Gummischrotbahnen und Noppenbahnen auszuweiten.

Im Projekt wurden 35 Geokunststoffe aus 5 Geokunststoffarten (14 Geovliese, 7 Geoverbundstoffe, 5 Schutzbahnen, 6 Gummischrotbahnen und 3 Noppenbahnen) mit dem Referenzverfahren nach SIA 272 (2009) Anhang D.3.1: Mechanische Durchschlagfestigkeit für Schutzmaten und mit fünf EN-Prüfverfahren untersucht:

- EN ISO 13428: Bestimmung der Schutzwirksamkeit eines Geokunststoffes bei Stossbelastung
- EN 14574: Bestimmung des Pyramidendurchdruckwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage
- EN 13719: Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen
- EN ISO 12236: Geokunststoffe - Stempeldurchdruckversuch (CBR-Versuch)
- EN ISO 13433: Geokunststoffe - Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch)

Mittels statistischer Datenanalyse wurde ein linearer Zusammenhang je Geokunststoffart zwischen den EN-Prüfverfahren und dem Referenzprüfverfahren der Norm SIA 272 Anhang D.3.1 gesucht. Bei allen 5 EN-Prüfverfahren wurden Regressionsmodelle zum Referenzverfahren errechnet. Für den Ersatz der mechanischen Durchschlagfestigkeit nach SIA 272 Anhang D.3.1 empfehlen sich folgende zwei Prüfverfahren: EN ISO 13428 Bestimmung der Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung und EN 14574 Bestimmung des Pyramidendurchdruckwiderstandes von Geokunststoffen auf harter Unterlage. Die anderen drei untersuchten Verfahren können nicht als Ersatzprüfverfahren empfohlen werden.

Für die Empfehlung von Anforderungswerten zu den Ersatzprüfverfahren eignet sich die Regressionslinie am besten.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Alle Projektziele konnten erfüllt werden.

Das Forschungsteam empfiehlt die EN ISO 13428 „Bestimmung der Schutzwirksamkeit bei Stossbelastung“ als Ersatzprüfverfahren. Dieses dynamische Prüfverfahren weist sehr gute statistische Korrelationen zum Referenzprüfverfahren (SIA 272 Anhang D.3.1) auf ($r \geq 0.9$) und ähnelt diesem in der Durchführung. Es eignet sich ohne Einschränkung für jeden Geokunststoff, weist die geringsten Streuungen innerhalb und zwischen den Geokunststoffarten auf. Der Prüfaufwand ist gering. Die gemessenen Schutzwirksamkeiten bei Stossbelastung liegen zwischen ca. 30 % und 95 % und sind eindeutig: Je grösser die prozentuale Restdicke, desto grösser die Schutzwirksamkeit.

Für die Berechnung neuer Anforderungen an die Geokunststoffe wird die Regressionslinie empfohlen. In Tabelle 30 des Berichts sind die berechneten Anforderungswerte für die Regressionslinie und das 2.5 % Quantil des 95 %-Prognosebands aufgelistet.

Auch das weitere Ziel, die Grundlagen zu erarbeiten, um die Gültigkeit der SN 670 243 auf Schutzbahnen, Gummischrotbahnen und Noppenbahnen sowie auf weitere Anwendungsfälle wie Bauten unter Terrain, Tagbautunnel und Untertagebau auszuweiten, konnte erreicht werden. Die wichtigsten auf dem Schweizer Markt erhältlichen Schutzgeokunststoffe wurden im Projekt untersucht und die neuen Geokunststoffe wurden mitberücksichtigt. Die Anforderungen für neue Anwendungsfälle können in Anlehnung an die SIA 272 und an die ausländischen Vorschriften (D, A) in der SN 670 243 festgelegt werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Empfehlungen aus dem Forschungsprojekt wurden in den obenstehenden Feldern bereits ausgefüllt. Weitergehende Folgerungen:

Eine Durchschlagfestigkeit (SIA 272 Anhang D.3.1) von > 1000 mm, bzw. > 1200 mm erfüllen nur sehr wenige Produkte. Die gefundenen Korrelationen zwischen dem Referenzprüfverfahren und der EN 13428 sind durch neu entwickelte Produkte, die diese hohen Anforderungen erfüllen, erneut abzusichern.

Geokunststoff-Prüfungen entwickeln sich ständig weiter. So wurde bereits während der Forschungsarbeit ein neuer Entwurf der EN 13719 (2014) Bestimmung der langfristigen Schutzwirksamkeit von Geotextilien im Kontakt mit geosynthetischen Dichtungsbahnen vorgelegt. Folgende weitere EN-Prüfverfahren wurden zudem im Rahmen der Forschungsbudgetkürzung im Jahr 2014 aus dem Prüfprogramm herausgenommen:

- SN EN ISO 10722 Geokunststoffe - Indexprüfverfahren zur Bewertung von mechanischen Schäden bei wiederholter Belastung - Beschädigung durch körnige Materialien
- SN EN ISO 13427 Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Simulation von Scheuerbeschädigungen
- SN EN ISO 13431 Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens

Diese bisher nicht untersuchten Prüfverfahren können Anlass für ein neues Forschungsprojekt geben. Der Aufwand für die Versuchsdurchführung und für das Verfassen des Forschungsberichtes wurde leicht unterschätzt.

Publikationen:

D. Büttnner, B. Fonyo, M. Stolz: Forschungsprojekt über Geokunststoffe als Schutz der Abdichtung geotechnischer Bauwerke
Strasse + Verkehr Nr. 9 / 2014

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Stolz

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Berner Fachhochschule, Architektur, Bau und Holz, 3400 Burgdorf

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Strassen, Brücken, Tunnel

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Projektziele konnten vorbehaltlos erfüllt werden. Damit wird eine erhöhte Qualitätssicherung, eine längere Nutzungsdauer der Bauwerke, mehr Markttransparenz und eine grössere Planungssicherheit ermöglicht. Das bestehende technische Handelshemmnis kann beseitigt werden. Die vorliegende Forschungsarbeit bietet grossen Nutzen insbesondere für Bauherren und Planer von geotechnischen Bauwerken, wie Untertagebauten und Tagbautunnel sowie für Lieferanten und Hersteller, die anhand harmonisierter EN-Prüfmethoden klare Vorgaben für die Qualitätsanforderungen an Geokunststoffen erhalten.

Der Forschungsbericht bietet eine gute Grundlage für die Festlegung der neuen Anforderungswerte für Schutzgeokunststoffe. Die Gültigkeit der SN 670 243 wird auf weitere Anwendungsfälle und weitere Geokunststoffe ausgeweitet.

Die Begleitkommission konnte sich gut in die Forschung einbringen und dementsprechend sind die gewonnenen Erkenntnisse zufriedenstellend. Das Projekt konnte zur Zufriedenheit der Begleitkommission abgeschlossen werden.

Der nach dem Projektbeginn angepasste Terminplan wurde eingehalten.

Umsetzung:

Die Empfehlungen aus dem Forschungsbericht werden umgesetzt. Die Norm SN 670 243 Geokunststoffe - Anforderungen für die Funktion Schützen wird technisch und redaktionell überarbeitet (Voraussichtliche Publikation 2016). Neue Anwendungsfälle wie Tagbautunnel und Untertagebau und neue Geokunststoffe wie Schutzbahnen, Gummischrotbahnen und Noppenbahnen werden in die SN 670 243 aufgenommen.

Auf der Grundlage vorliegender Arbeit können die Anforderungswerte von Schutzmaten in der SIA 272 Abdichtungen und Entwässerungen von Bauten unter Terrain und im Untertagebau anhand der empfohlenen EN-Prüfmethoden in Zukunft neu festgelegt werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Den Empfehlungen des Forschungsteams betreffend weiteren Forschungsbedarf kann sich die Begleitkommission grundsätzlich anschliessen.

Die noch nicht untersuchten Prüfverfahren können bei Bedarf untersucht werden. Wenn neue Erkenntnisse oder noch nicht identifizierte Wissenslücken sich zeigen würden, kann ein neues Forschungsprojekt ausgelöst werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Wie unter Umsetzung erwähnt, erfolgt die Revision der SN 670 243 und der SIA 272 in naher Zukunft.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Fonyo

Vorname: Balazs

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen ASTRA, 3003 Bern

Ort, Datum: Ittigen, 10.11.2015

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Balazs Fonyo
FK 3

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 3 / 3

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 01.10.2015

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fliesskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbauphosphat in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbauasphalt	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflasterungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffbarkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Fundamentalschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbauphosphat mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauphosphat in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1431	ASTRA 2011/015	TeVNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prü- fung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungs- gebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in aus- serordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnit- tbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Natio- nalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn- Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdruckverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologietransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkierungsanlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkierungsanlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Trag-schichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfornormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassen-netzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
667	AGB 2008/004	Résistance au déversement des poutres métalliques de pont	2015
666	AGB 2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges	2015
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des ponts dalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risiko-beurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009