

# **Stand der Zulassungen für Geokunststoffe nach der novellierten Deponieverordnung**

Werner Müller

Andreas Wöhlecke

## **Zusammenfassung**

Auf den vergangenen beiden Tagungen 2010 und 2011 wurden bereits Vorträge über das Thema Zulassung von Geokunststoffen nach der Deponieverordnung (DepV) gehalten. Im Anschluss an diese Beiträge wird hier über den aktuellen Stand berichtet. Die Novellierung der Deponieverordnung berührt die Vorschriften über die Zulassung nicht, wohl aber die Regelung, wie ein Eignungsnachweis der zuständigen Behörde gegenüber „gleichwertig“ zur Zulassung geführt werden könnte. Es geht um die CE-Kennzeichnung und um bestimmte ausländische Produkte aus dem Europäischen Wirtschaftsraum. Darauf wird kurz eingegangen. Weiterhin werden die Anforderungen an die geotextilen Filter in den Kunststoff-Dränelementen diskutiert. Das Thema „innere Scherfestigkeit“ dieser Elemente wird etwas ausführlicher behandelt, da hier offenbar „Klärungsbedarf“ im Hinblick auf die Vorgaben in den Zulassungsscheinen besteht.

## **Einleitung**

Am 1. Dezember 2011 trat die umfangreiche „Erste Verordnung zur Änderung der Deponieverordnung in Kraft“ [1,2]. Herr Dr. Engelmann wird auf dieser Tagung über die Vielzahl von Änderungen berichten. Unverändert bleibt die Anforderung, dass Geokunststoffe in Deponieabdichtungen nur dann eingesetzt werden dürfen, wenn deren Eignung der zuständigen Behörde durch eine Zulassung der BAM nachgewiesen wurde. Ebenso unverändert bleiben die Regelungen zu den Anforderungen an die Geokunststoffe und an das Zulassungsverfahren. Neu gefasst wurden dagegen zwei Regelungen, nach denen ein Eignungsnachweis auch ohne Zulassung geführt werden kann, wenn bestimmte Gleichwertigkeitsvoraussetzungen erfüllt sind. Darauf wird im ersten Abschnitt eingegangen.

Über die Arbeit des Fachbeirats und seiner Arbeitsgruppen war in den letzten beiden Jahren auf der Tagung berichtet worden. Der Fachbeirat hat inzwischen auch eine vorläufige Richt-

linie für Bewehrungsgitter verabschiedet. Vorläufigen Charakter hat diese Richtlinie deshalb, weil bestimmte technische Fragen noch nicht abschließend geklärt werden konnten. Daran wird weiter gearbeitet. Hinsichtlich eines der technischen Probleme sei auf den Vortrag von Herrn Vollmert, Frau Werth und Herrn Dr. Emersleben auf dieser Tagung verwiesen. Der Beschluss über die Richtlinie für Dichtungskontrollsysteme steht bevor. Daneben wurden einige Modifikationen an bereits verabschiedeten Richtlinien vorgenommen. Auf den aktuellen Stand des „Zulassungsgeschäfts“ wird im zweiten Abschnitt eingegangen.

Eine etwas ausführlichere Erörterung verdient die jetzt getroffene Regelung für die geotextilen Filter von Kunststoff-Dränelementen. Dieses Thema wird im dritten Abschnitt angerissen. Man beachte dazu auch den Vortrag von Herrn Professor Saathoff auf dieser Tagung. Schließlich soll das Problem der Bestimmung der inneren Scherfestigkeit von Kunststoff-Dränelementen im vierten Abschnitt diskutiert werden. Die Zulassungsscheine dieser Produkte enthalten Angaben zur inneren Scherfestigkeit, die offenbar einer Erläuterung bedürfen.

## **1. Die Nummer 2.1 im Anhang 1 der novellierten Deponieverordnung (DepV)**

Für das Abdichtungssystem dürfen Materialien, Komponenten oder Systeme nur eingesetzt werden, wenn sie dem Stand der Technik nach Nummer 2.1.1 der DepV entsprechen und wenn dies der zuständigen Behörde nachgewiesen wurde. Als Nachweis ist für Geokunststoffe, Polymere und serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme die Zulassung dieser Materialien, Komponenten oder Systeme durch die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung nach Nummer 2.4 erforderlich. Soweit blieb alles beim Alten. Inhaltlich neu gefasst wurde jetzt jedoch die folgende ergänzende Regelung. Abweichend von der Zulassungsforderung können für Deponieabdichtungssysteme Geokunststoffe, Polymere und Dichtungskontrollsysteme eingesetzt werden, die

1. nach einer CEN-Anwendungsnorm mit einer CE-Kennzeichnung deklariert worden sind, wenn die durch die Norm festgelegten Material-, Komponenten- und Systemeigenschaften im Wesentlichen denen gleichwertig sind, die sich aus den Anforderungen der DepV ergeben, oder

2. keine CE-Kennzeichnung tragen und entweder in einem anderen Mitgliedstaat der Europäischen Union, in der Republik Türkei oder die in einem anderen Vertragsstaat des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum gemäß den dort geltenden Regelungen oder Anforderungen rechtmäßig hergestellt oder in Verkehr gebracht wurden, wenn die mit den Prüfungen und Überwachungen im Herstellerstaat nachgewiesenen Material-, Komponenten- und Systemeigenschaften das nach der DepV geforderte Schutzniveau gleichermaßen dauerhaft gewährleisten. Beim Nachweis der Eignung stehen Nachweise und Unterlagen aus diesen Ländern inländischen Nachweisen und Unterlagen für den Eignungsnachweis gleich, wenn aus ihnen hervorgeht, dass die betreffenden Anforderungen der DepV oder die aufgrund ihrer Zielsetzung im Wesentlichen vergleichbaren Anforderungen des Ausstellungsstaats erfüllt sind. Eine Beglaubigung von Kopien sowie beglaubigte Übersetzungen ins Deutsche können verlangt werden.

Was hat es mit den Nachweisverfahren nach Punkt (1) und (2) auf sich? Zuständige Behörden werden vermutlich in gewissem Umfang mit Anfragen zum Nachweis nach (1) konfrontiert: Ein bestimmtes Geokunststoffprodukt trage ein CE-Zeichen nach einer CEN-Anwendungsnorm für die Ablagerung fester Abfälle. Es dürfte dann doch wohl verwendet werden? Eine CE-Kennzeichnung kann jedoch derzeit eine Zulassung noch nicht vollständig ersetzen. Die harmonisierten technischen Spezifikationen (sprich die CEN-Anwendungsnormen für Geokunststoffe für den Einsatz bei der Ablagerung fester Abfälle) entsprechen derzeit sicherlich nicht den Anforderungen der DepV. Darauf wurde bereits im letzten Jahr ausführlich eingegangen.

Die BAM erteilt Zulassungen völlig unabhängig vom Herkunftsland der Produkte. Dennoch wurde das unter Punkt 2 genannte Nachweisverfahren für ausländische Produkte vorgesehen, die sich nicht um eine Zulassung der BAM bemüht haben. Zum Ausland gehören in diesem Zusammenhang die anderen Länder der Europäischen Union, die Republik Türkei, Island, Norwegen und Lichtenstein. Allerdings ist ein rechtmäßiges Herstellen und in Verkehr bringen in fast allen Ländern ohne CE-Zeichnung ohnehin gar nicht möglich. Insofern greift diese Regelung nur für einzelne Länder. Hätte ein solches Land X im Wesentlichen mit der DepV vergleichbare Anforderungen an den Bau von Deponieabdichtungen (wovon die zuständige Behörde sich überzeugen müsste) und würde eine Firma aus dem Land X die Erfüllung der Anforderungen des Landes X für ihre Produkte durch technische Unterlagen nachgewiesen haben, so könnten diese Unterlagen auch bei der zuständigen deutschen Behörde (planfeststellende oder plangenehmigende Behörde) eingereicht werden. Nur dann wären inländische und ausländische Nachweise gleichgestellt. Anhand dieser Unterlagen müsste

die zuständige Behörde dann bezogen auf den Einzelfall im Rahmen ihres planerischen Ermessens beurteilen, ob das von der DepV geforderte Schutzniveau beim Einsatz des Produkts gleichermaßen dauerhaft gewährleistet ist. Praktisch wird diese Regelung wohl keine Rolle spielen.

In vielen Fällen werden die zuständigen Behörden nicht die Voraussetzungen und Möglichkeiten für eine fachliche Prüfung der umfangreichen Unterlagen und Nachweise haben. Schon vernünftige Übersetzungen zu bekommen, wird schwierig sein, da es kaum entsprechend qualifizierte Fachübersetzer gibt. Die zuständige Behörde kann daher für eine Beurteilung der Unterlagen für den speziellen Nachweis von ausländischen Produkten um Amtshilfe bei den Fachbehörden und bei der Zulassungsstelle nachsuchen, die bei der Beurteilung der Unterlagen die Zulassungsrichtlinien zu Rat ziehen werden. Die Kosten für dieses Verfahren muss der Antragsteller nach den jeweiligen Kostenregelungen der Länder übernehmen.

In einem Aufsatz für das Januarheft der Zeitschrift Müll und Abfall wird die Thematik dieses Abschnitts etwas ausführlicher behandelt.

## **2. Stand bei den Zulassungen**

Die inzwischen verabschiedeten Zulassungsrichtlinien wurden auf der Internetseite

[http://www.bam.de/de/service/amtl\\_mitteilungen/abfallrecht/index.htm](http://www.bam.de/de/service/amtl_mitteilungen/abfallrecht/index.htm)

zugänglich gemacht. Dort steht auch eine Liste mit allen erteilten Zulassungen. In der letzten Spalte dieser Liste ist jeweils angegeben, in welchem Heft und auf welcher Seite des Amts- und Mitteilungsblatts der BAM man das vollständige Zulassungsdokument findet. Diese Zeitschrift ist dann über die Internetseite

[http://www.bam.de/de/service/amtl\\_mitteilungen/amts\\_u\\_mitteilungsblatt.htm](http://www.bam.de/de/service/amtl_mitteilungen/amts_u_mitteilungsblatt.htm)

zugänglich. Man kann sich so alle Zulassungsdokumente beschaffen.

Neu ist die vorläufige Zulassungsrichtlinie für Bewehrungsgitter aus Kunststoff. Im Vorwort der Richtlinie heißt es:

*Die Richtlinie wird aus zwei Gründen als vorläufig bezeichnet: Zum einen werden Bewehrungsgitter aus Kunststoff aus den unterschiedlichsten Werkstoffen in sehr verschiedenen Konstruktionen produziert. Das Wissen über die Eigenschaften der einzelnen Bewehrungsgit-*

*tertypen ist unterschiedlich groß. Die Zulassungsanforderungen haben bisher vor allem die gewebten und gelegten Bewehrungsgitter aus Polyester (PET) oder Polypropylen und die extrudierten Bewehrungsgitter aus Polyethylen hoher Dichte im Blick. Zum anderen müssen im Zusammenhang mit dem Zulassungsverfahren noch Erfahrungen mit neuen Prüfungen, insbesondere zum Langzeitverhalten der Verbindungsstellen zwischen Längs- und Querelementen des Bewehrungsgitters, gesammelt werden, auf deren Grundlage erst eine vollständige und genaue Beurteilung möglich ist. Die bestehenden Unsicherheiten finden daher vorläufig noch ihren Ausdruck in der „konservativen“ Festlegung von Abminderungsfaktoren und zusätzlichen einschränkenden Anforderungen an die Bemessung. Die Vorläufigkeit der Richtlinie kann aufgehoben werden, sobald der Kenntnisstand über das Langzeitverhalten von Bewehrungsgittern dies erlaubt.*

Die Diskussion der Zulassungsrichtlinie über die Dichtungskontrollsysteme für Oberflächenabdichtungen steht vor dem Abschluss. Der Fachbeirat wird die Richtlinie voraussichtlich im März beraten und beschließen. Es sind damit alle Voraussetzungen geschaffen, um im Laufe des Jahres die befristeten Zulassungen zu überprüfen, zu ergänzen und gegebenenfalls zu verlängern.

In einem Aufsatz für das Februarheft der Zeitschrift Müll und Abfall wird ein die Tagungsbeiträge zusammenfassender Überblick über die BAM-Zulassung für Geokunststoffe, Polymere und Dichtungskontrollsysteme gegeben.

### **3. Nachweis der Wirksamkeit des Filters bei Kunststoff-Dränelementen**

Der Fachbeirat hatte beschlossen, dass zum Filtern Vliesstoffe eingesetzt werden müssen, die eine Masse je Flächeneinheit von mindestens 300 g/m<sup>2</sup>, eine Dicke von mindestens 3 mm, eine Stempeldurchdrückkraft von mindestens 2,5 kN und einen Durchdrückvorschub bei dieser Stempeldurchdrückkraft von mindestens 50 mm haben müssen. Weiterhin muss die Dicke des Vliesstoffs mindestens dem 30-fachen der charakteristischen Öffnungsweite  $O_{90}$  entsprechen. Die Zulassungsbehörde ist diesem Beschluss gefolgt. Damit werden konsequent Regeln des DVWK Merkblatts 221 [3] und einschlägiger GDA-Empfehlungen (s. [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de)) „zur sicheren Seite hin“ umgesetzt, die dort nur empfehlenden Charakter haben, oder als „Anhaltspunkte“ dienen. Auch wenn in jedem Einzelfall eine Überprüfung erforderlich ist, ob beim gewählten Rekultivierungsboden der Vliesstoff filtertechnisch nach dem DVWK-Merkblatt und hinsichtlich der Robustheit nach dem FGSV-Merkblatt [4] tatsäch-

lich zum Boden „passt“, so wird dieser Nachweis praktisch in den allermeisten Fällen keine Probleme bereiten [5,6].

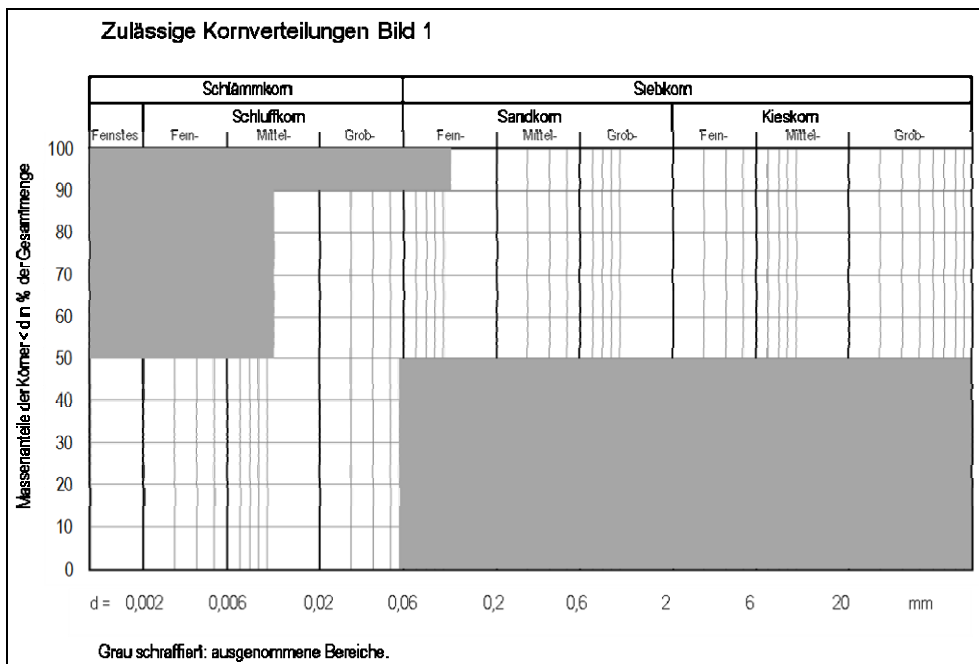
Bei den derzeit zugelassenen Kunststoff-Dränelementen erfüllen die gewählten Filtervliesstoffe die oben genannten Kriterien nicht. Deshalb kommt es schon sehr darauf an, dass der Rekultivierungsboden genau charakterisiert wird, dass ein Abwägen im Hinblick auf die Empfehlungen und Anhaltspunkte des DVWK-Merkblatts 221 erfolgt und dass eine quantitative Bemessung nach den Regeln des DVWK- und FGSV-Merkblatts durchgeführt wird, bevor ein solches Produkt zum Einsatz kommt. Es werden sich dabei gewisse Einschränkungen im Hinblick auf die zulässigen Böden ergeben. Die zugelassenen Kunststoff-Dränelemente können im Deponiebau zwar weiter verwendet werden. Die Zulassung gibt jetzt jedoch einen gewissen Rahmen vor, dem sich der filtertechnische Nachweis bei diesen Produkten fügen muss. Die Grundlage dafür sind Gutachten für die Produkte, die von Herrn Professor Saathoff von der Universität Rostock erstellt wurden. Dadurch wird den Überlegungen des Fachbeirats Rechnung getragen.

Der Rahmen hat - stichwortartig aufgelistet - folgende Bestandteile, siehe dazu das oben genannte Gutachten und die dort gegebenen Erläuterungen. Im Vortrag von Herrn Professor Saathoff auf dieser Tagung wird genauer auf die hydraulische Bemessung von Kunststoff-Dränelementen eingegangen.

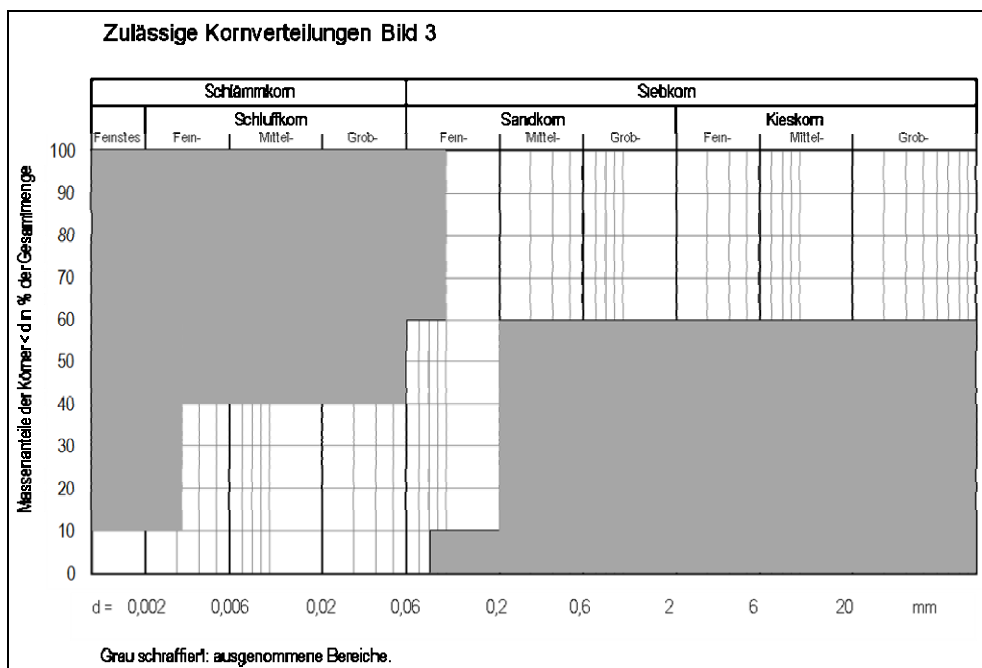
1. Die Kornverteilungskurve des Materials der Rekultivierungsschicht muss relativ häufig gemessen werden. Folgender Vorschlag wird diskutiert: Die Häufigkeit der Prüfungen der Korngrößenverteilung beim Einbau wird gegenüber den Anforderungen der Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards 7-1 „Rekultivierungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen“, 7-2 „Wasserhaushaltsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen“ oder 7-3 „Methanoxidationsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen“ der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ von 1 je 5.000 m<sup>2</sup> auf mindestens 1 je 2.000 m<sup>2</sup> erhöht. Böden aus unterschiedlicher Herkunft sind darüber hinaus bei jedem Herkunftswechsel zu untersuchen. Dabei ist auch der Durchlässigkeitsbeiwert aus der Kornverteilung zu ermitteln und seine Schwankung anhand der Kurven abzuschätzen. Weiterhin muss die Suffosionssicherheit des abzufilternden Bodens überprüft werden. Nachweise zur Suffosionssicherheit müssen jedoch immer erbracht werden, unabhängig davon, ob geotextiler Filter oder Kornfilter verwendet werden.

2. Nach den Vorgaben des FGSV-Merkblatts ist der Anwendungsfall einzuschätzen und zu prüfen, ob der Filtervliesstoff aufgrund seiner Robustheitsklasse dafür infrage kommt.
3. Zur Prüfung der hydraulischen Filterwirksamkeit ist der Durchlässigkeitsbeiwert des Vliesstoffs gemäß Bild 2.3 im DVWK-Merkblatt 221 mit dem Durchlässigkeitskoeffizienten des Bodens zu vergleichen. Für diese Betrachtung wird der Durchlässigkeitsbeiwert verwendet werden, der nach DIN 60500, Teil 4 bei 2 kPa Auflast bestimmt wird. Der entsprechende Wert ist im Zulassungsschein aufgeführt.
4. Die mechanische Filterwirksamkeit wird durch den Vergleich der Körnungslinien des Bodens mit zulässigen Bereichen in Kornverteilungsdiagrammen ermittelt, die in der Anlage 11 des Zulassungsscheins für jedes zugelassene Produkt zusammengestellt werden. Das DVWK-Merkblatt kennt bereits drei Kornverteilungsbereiche A, B und C, die produktbezogen weiter verfeinert wurden. Liegt eine vorhandene Körnungslinie des Rekultivierungsbodens vollständig auf der weißen (zulässigen) Fläche eines der 14 Bilder ist das Kunststoff-Dränelement für die zu prüfende Körnungslinie im Hinblick auf die mechanische Filterwirksamkeit geeignet. Schneidet eine relevante Körnungslinie auf jedem Bild eine grau eingefärbte Fläche, so ist das zugelassene Produkt filtertechnisch nicht geeignet. Es soll hier keinen Ermessensspielraum mehr geben. Die drei folgenden Abbildungen zeigen Beispiele der Kornverteilungsdiagramme. Dabei wurde bei drei Produkten je ein Bild aus der Anlage genommen. Ein vollständiger Überblick für ein bestimmtes Produkt entsteht natürlich erst, wenn alle 14 Bilder betrachtet werden.

Mit den hier kurz dargelegten bemessungstechnischen Auflagen für den geotextilen Filter können die bisher zugelassenen Kunststoff-Dränelemente im Deponiebau auch weiterhin verwendet werden. Klar ist, dass grundsätzlich natürlich immer eine Bemessung hinsichtlich des langfristigen Wasserableitvermögens und der Standsicherheit des Dichtungsaufbaus und der Rekultivierungsschicht erfolgen muss. Die DepV weist ausdrücklich darauf hin, dass die hydraulische Wirksamkeit (Filterwirksamkeit und Wasserableitvermögen) und die Standsicherheit (Reibung in den Grenzflächen und innere Scherfestigkeit) dauerhaft (sprich über mindestens 100 Jahre) gewährleistet sein müssen. Nur dann dürfen Kunststoff-Dränelemente eingesetzt werden. Man wird sehen, ob zukünftig zugelassene Produkte mit schwereren geotextilen Filtern, die die eingangs genannten Anforderungen erfüllen, die bisher zugelassenen Produkte ersetzen. Die Umstellung ist in herstellungstechnischer, prüftechnischer und zulassungstechnischer Hinsicht nicht ganz so einfach wie ursprünglich gedacht. Bei Neuanträgen wird die Zulassungsstelle darauf dringen, dass entsprechend dimensionierte Filter verwendet werden.

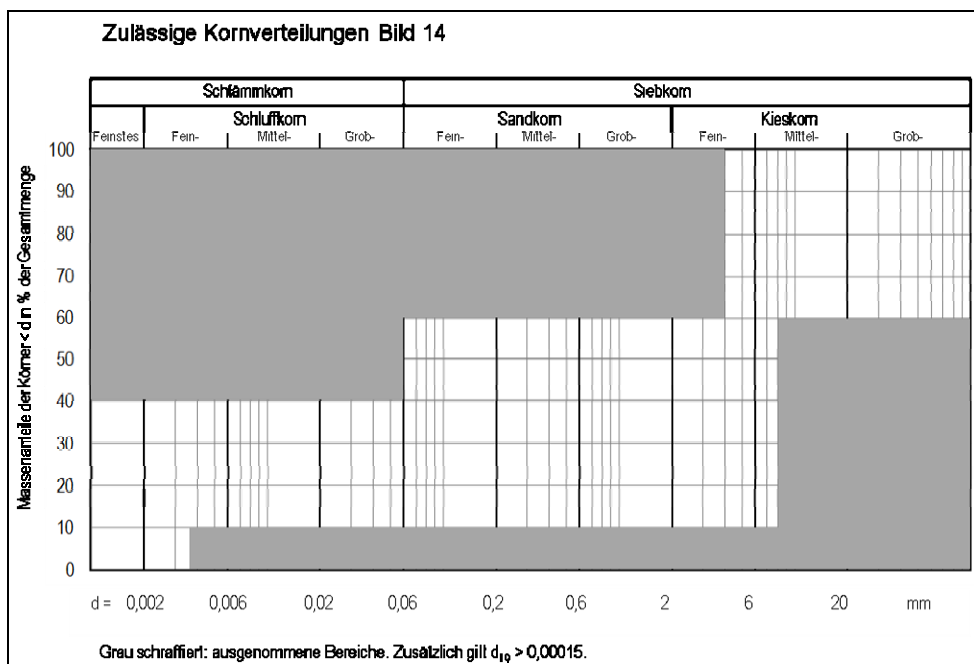


**Abb. 1.:** Beispiel zulässiger Flächen (weiß) für Körnungslinien des Körnungsbereichs A ( $d_{40} \leq 0,06$  mm), Produkt X.



**Abb. 2.:** Beispiel zulässiger Flächen für Körnungslinien der Körnungsbereiche B und C und  $0,1 \text{ mm} < d_{60} \leq 0,2 \text{ mm}$ , Produkt Y.





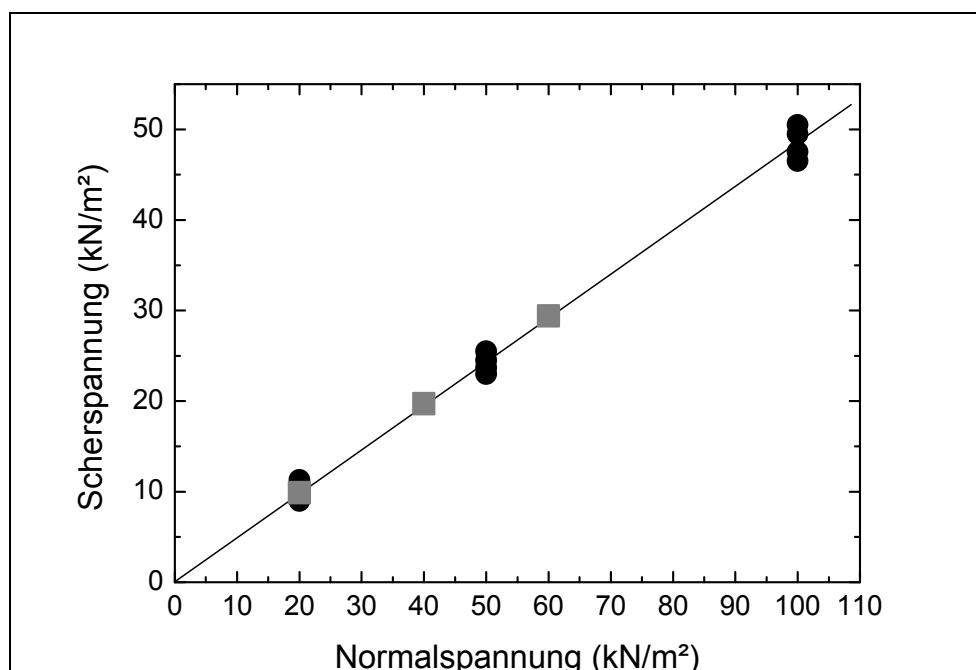
**Abb. 3.:** Beispiel zulässige Flächen (weiß) für Körnungslinien der Körnungsbereiche B und C und  $4,0 \text{ mm} < d_{60} \le 8,0 \text{ mm}$ , Produkt Z.

#### 4. Zur Bestimmung der inneren Scherfestigkeit von Kunststoff-Dränelementen

Ein Kunststoff-Dränelement ist in der Regel aus drei Komponenten aufgebaut: Dem unteren Schutzgeotextil, dem Dränkern in der Mitte und dem oberen Filtervliesstoff. Für die Standsicherheit eines Dichtungsaufbaus ist dann nicht nur die Reibung zwischen der Oberseite und Unterseite des Kunststoff-Dränelements und den benachbarten Schichten (z. B. Kunststoffdichtungsbahn oder Rekultivierungsschicht) wichtig, sondern auch die „innere Reibung“ oder die „innere Scherfestigkeit“ des Elements. Zwei Fälle muss man unterscheiden. Es gibt Produkte, wo diese Komponenten nur aufeinandergelegt und „hilfsweise“ vernäht oder durch andere Verfahren mehr oder weniger „provisorisch“ verbunden werden. Die Verbindungen dienen nur dazu, dass man das Produkt gut handhaben, transportieren und einbauen kann. Die innere Scherfestigkeit dieser Produkte entspricht dann der reinen Haftreibungskraft in den Kontaktflächen der Komponenten. Die Reibung wird deshalb im Rahmenschergerät<sup>1</sup> an Proben untersucht, wo die hilfsweise angebrachten Verbindungen entfernt wurden. Dies ist in der Regel leicht möglich. Im Normalspannung-Schubspannung-Diagramm ergibt sich eine

<sup>1</sup> Die Terminologie folgt der GDA E3-8. In der Norm DIN EN ISO 12957-1 werden andere Begriffe verwendet: Scherkasten statt Rahmenschergerät, Scherkastenversuch statt Reibungsprüfung im Rahmenschergerät, Scherweg statt Verschiebungsweg, Scherspannung statt Schubspannung und - etwas unglücklich - Kohäsion statt Adhäsion.

Schergerade, mit nur kleinem oder gar keinem Achsenabschnitt (Abb. 4). Diesen Abschnitt nennt man Adhäsionsspannung. Eine Adhäsionsspannung ist also gar nicht oder nur im geringen Umfang vorhanden. Aus der Steigung der Geraden kann mit den nach der GDA-Empfehlung E3-8 erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerten die noch zulässige Böschungsneigung für einen standsicheren Aufbau berechnet werden (s. [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de)).



**Abb. 4.:** Beispiel für die Schergerade der Haftreibung der Komponenten eines Kunststoff-Dränelements. Graue Rechtecke: unter Wasser, schwarze Kreise: im trockenen Zustand (s. Amts- und Mitteilungsblatt der BAM, Bd. 2, S. 407, 2010).

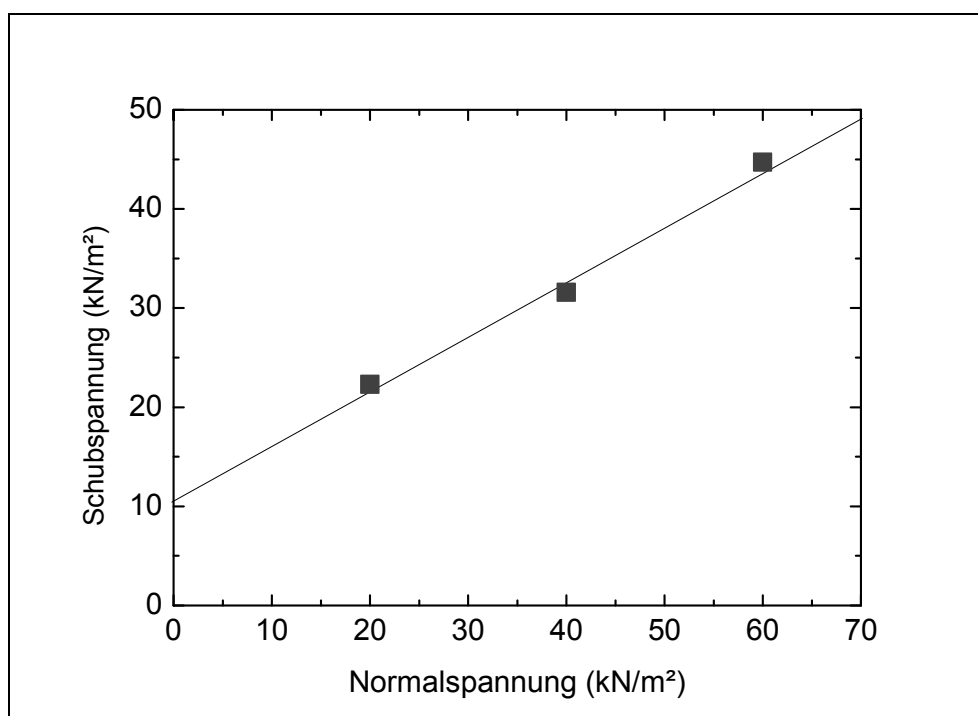
Es gibt jedoch auch Produkte, wo die Komponenten langzeitbeständig durch ein bestimmtes technisches Verfahren im Produktionsprozess verbunden werden. Dies geschieht z. B. dadurch, dass die Komponenten in einem engen Raster punktweise verschweißt oder die Vliesstoffe auf den Dränkern thermisch „aufkaschiert“ werden. Man kann diese Produkte praktisch nicht mehr auseinander nehmen. Den Herstellern gilt diese Verbindung als wesentliche, integrale Eigenschaft ihres Produkts. Es ist nicht immer offensichtlich, welche Art von Produkt man vorliegen hat, ob also eine Verbindung als dauerhafter Bestandteil infrage kommt oder nur als Einbauhilfe betrachtet werden muss. Dies gilt z. B. bei Produkten mit geklebten Verbindungen.

Bei der Prüfung der Produkte mit integraler Verbindung im Rahmenschergerät zeigt sich im Normalspannung-Schubspannung-Diagramm ein zumeist recht großer Adhäsionsanteil, der durch die feste Verbindung bestimmt wird. Die Schergerade hat einen u. U. sehr großen

Achsenabschnitt (Abb. 5). Im Hinblick auf die innere Scherfestigkeit wären somit Böschungsneigungen zulässig, die noch steiler sind als die eigentliche Steigung der Scherge-raden. Die GDA E3-8 lässt jedoch offen, ob und gegebenenfalls wie, in diesem speziellen Fall die Adhäsionsspannung berücksichtigt werden darf.

Vor diesem Hintergrund stellen sich drei Fragen, die offensichtlich einer vertiefenden fachli-chen Diskussion bedürfen: (1) Wie sind die Versuche zur inneren Reibung im Rahmenscher-gerät durchzuführen? Genauer: Wie sind Ober- und Unterseite des Kunststoff-Dränelements auf den Rahmen bzw. auf einer dort eingebauten starren Unterlage zu befestigen, damit „realistische“ Scherbeanspruchungen im Element erzeugt werden? (2) Wann darf der Adhäsionsanteil berücksichtigt werden? (3) Wie ist der Adhäsionsanteil zu berücksichtigen? Wie also bestimmt man die zulässigen Böschungsneigungen?

Die Fragestellung ist eher selten von praktischer Relevanz. Druck- und Scherkräfte in der Böschung drücken den Dränkern im Laufe der Zeit zusammen. Dadurch nimmt auch das Wasserleitvermögen mit zunehmender Böschungsneigung ab. Und zwar stärker als der hydraulische Gradient, der ja der Böschungsneigung entspricht, zunimmt. Die zulässige Böschungsneigung wird daher zumeist durch die hydraulische Leistungsfähigkeit des Kunst-stoff-Dränelements begrenzt und nicht durch dessen innere Scherfestigkeit. Werden aller-dings beim Bemessen die entsprechenden Angaben zum „Langzeit-Wasserleitvermögen“ im Zulassungsschein nicht berücksichtigt und wird dann steiler gebaut als hydraulisch gese-hen zulässig, so könnte dieser Fehler Folgen haben, die das Standsicherheitsproblem noch verschärfen. Man könnte nämlich tatsächlich in den Bereich geraten, wo die mechanische Festigkeit des Kunststoff-Dränelements nicht mehr dauerhaft gewährleistet ist. Es lohnt sich daher im Hinblick auf die Anwendungsgrenzen der Produkte, die fachlichen Hintergründe zu diesen Fragen zu beleuchten.



**Abb. 5.:** Beispiel für die Schergerade eines Kunststoff-Dränelements mit fester Verbindung der Komponenten (siehe Gutachten der BAM IV.32-1390-08.) Als Befestigungshilfe im Reibungsversuch war eine Nagelplatte verwendet worden.

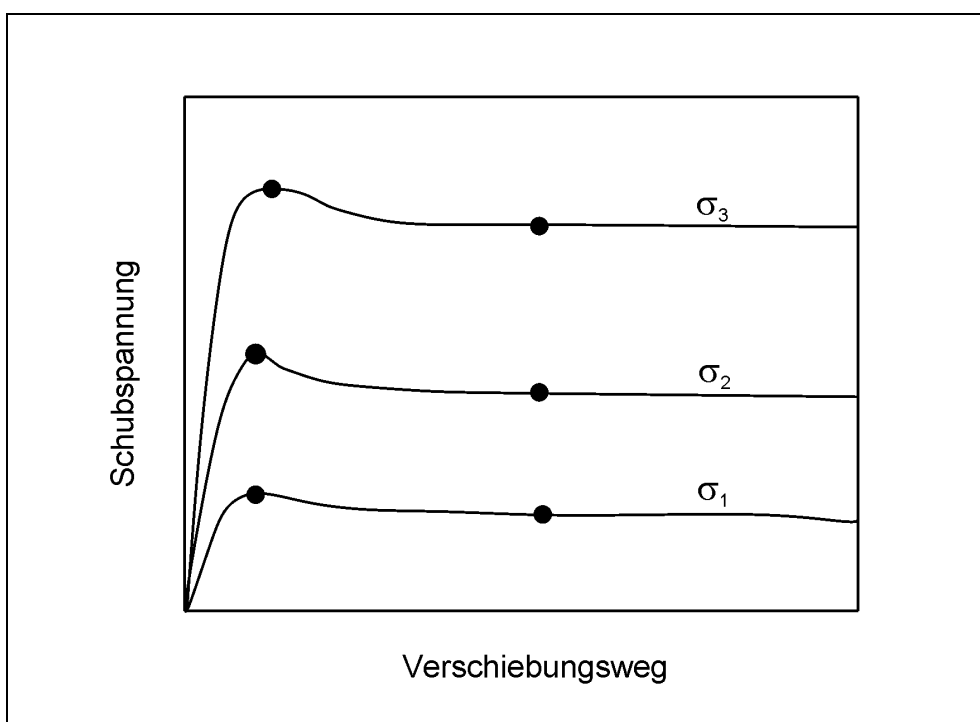
Die innere Scherfestigkeit ist eine zulassungsrelevante Produkteigenschaft des jeweiligen Kunststoff-Dränelements. Im Rahmen der Begutachtung und befristeten Zulassung der Kunststoff-Dränelemente für den Deponiebau durch die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung mussten daher Antworten auf diese Fragen gefunden werden. Die Ergebnisse finden sich in den Zulassungsscheinen der Produkte. Sie müssen bei der Verwendung im Deponiebau beachtet werden. Die dabei angestellten Überlegungen sollen hier zur Diskussion gestellt werden.

#### 4.1 Kunststoff-Dränelemente im Reibungsversuch

Die innere Scherfestigkeit wird im Reibungsversuch im Rahmenschergerät bestimmt. Dazu wird die Ober- und Unterseite des Elements auf dem jeweiligen Rahmen befestigt. Maß aller Dinge ist für den Reibungsversuch die GDA-Empfehlung E3-8. Dort heißt es: „Die Art der Befestigung richtet sich nach dem jeweiligen Geokunststoff und dem Prüfgerät. Als Befestigungsmittel für Geokunststoffe auf der (starr)en Unterlage sind beispielsweise doppelseitige Klebefolien, Klebstoffe, Nagelplatten und raue Unterlagen aus Sandpapier geeignet. Bei dünnen Geotextilien ist darauf zu achten, dass die Oberflächenstrukturen der Unterlage (z. B. Nägel einer Nagelplatte) nicht die Eigenschaften der Prüfseite des Geotextils beeinflus-

sen. Der Klebstoff darf nicht in die zu prüfenden Materialien eindringen und deren Eigenschaften verändern. Bei Versagen der Befestigung des Geokunststoffs auf der Unterlage ist die Versuchsreihe mit einer verbesserten Befestigungstechnik zu wiederholen.“ Diese Vorgaben müssen sorgfältig beachtet werden.

Inzwischen haben die Prüfinstitute je ihre eigenen Befestigungsmittel „ausgetüfelt“, auf die sie „schwören“. Die Ergebnisse verschiedener Prüfinstitute sind aber nur bei ähnlichen Befestigungsmitteln vergleichbar. Zudem stellt sich die Frage, ob die im Labor mit dem jeweiligen Befestigungsmittel gemessenen Schergeraden und Verschiebungsweg-Schubspannung-Kurven mit Ergebnissen in einem Systemversuch mit einem realitätsnahen Aufbau und Scherversagen im Kunststoff-Dränelement übereinstimmen. Es wäre wünschenswert, wenn es hier mehr vergleichende Untersuchungen gäbe. Für den Deponiebau versucht die Zulassungsstelle im Zulassungsschein, zuverlässige Angaben zur inneren Scherfestigkeit mit den Herstellern zu erarbeiten. Es empfiehlt sich dabei, der GDA-Empfehlung zu folgen, also mindestens Scherversuche bei zwei Prüfstellen durchführen zu lassen und auch verschiedene Befestigungsmittel auszuprobieren.

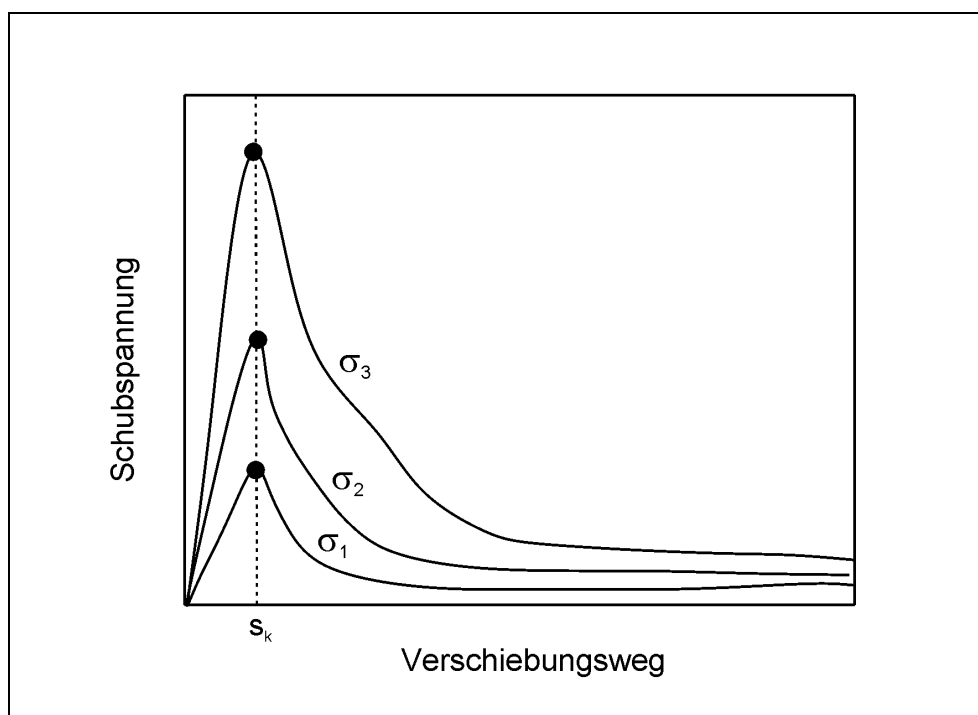


**Abb. 6.:** Schematischer Verlauf der Verschiebungsweg-Schubspannung-Kurve bei verschiedenen Normalspannungen  $\sigma$  eines Kunststoff-Dränelements ohne Verbindung der Komponenten. Die Punkte markieren die Werte von Haftreibung und Gleitreibung.

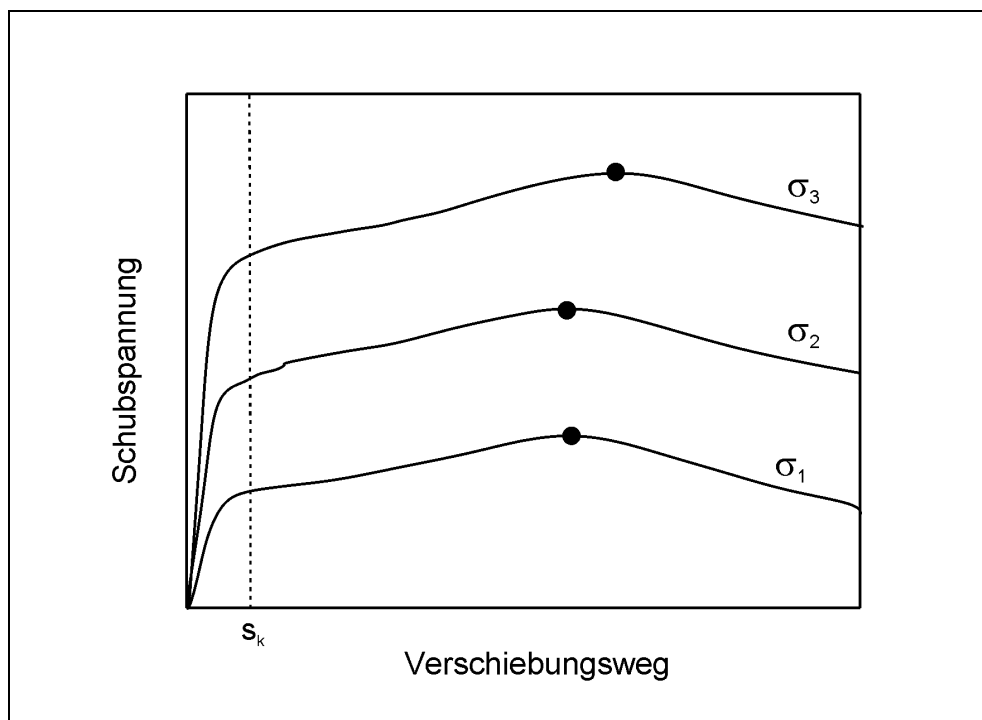
Die verschiedenen Produkte haben ein je eigenes Verhalten bei einer Schubbeanspruchung. Trotz der eben angesprochenen versuchstechnischen Probleme können diese Unterschiede aber durch die Reibungsversuche im Rahmenschergerät gut charakterisiert werden. Abbildung 6 zeigt schematisch ein Beispiel für ein Verschiebungsweg-Schubspannungs-Diagramm von nur übereinandergelegten Komponenten nach Entfernen der nur hilfweise angebrachten Verbindung. Man beobachtet bei solchen Produkten ein „klassisches“ Reibungsverhalten. Aufgrund der Haftreibung steigt die Kurve zunächst steil an. Nach einem gewissen Verschiebungsweg ist die Haftreibung überwunden. Es beginnt das Gleiten mit einer geringeren, aber konstanten Gleitreibung. Haftreibung und Gleitreibung sind proportional zur Normalspannung. Wie die Bemessungsparameter der inneren Scherfestigkeit für diesen Fall bestimmt werden, wird in der GDA E3-8 detailliert erläutert. In sinngemäßer Anwendung der Empfehlung dürfte dabei ein Adhäsionsanteil mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 2 berücksichtigt werden.

Ein gänzlich anderes Verhalten wird bei großflächig kaschierten Kunststoff-Dränelementen beobachtet. In der Regel muss ein Versuch zur inneren Scherfestigkeit am „ganzen“ Kunststoff-Dränelement durchgeführt werden. Ist der Dränkern relativ steif und sind die Verbindungsflächen an der Ober- und Unterseite deutlich getrennt, so kann man den Versuch auf das „Abscheren“ des aufkaschierten Vliesstoffs vom Dränkern beschränken. Abbildung 7 zeigt schematisch ein Beispiel für die Verschiebungsweg-Schubspannung-Kurve. Es gibt gar keinen Reibungseffekt mehr. Schon bei einer kleinen Verschiebung baut sich eine große Kraft auf, die schließlich dazu führt, dass der Vliesstoff von der Unterlage großflächig abgerissen wird. Es ergibt sich dabei ein sehr großer Adhäsionsanteil. Die Gleitreibungskraft spielt danach dann kaum noch eine Rolle.

Schließlich gibt es sozusagen eine „Mischform“. Die kann z. B. bei punktwise hergestellten Schweißverbindungen zwischen den Schichten beobachtet werden. Abbildung 8 zeigt ein entsprechendes Diagramm. Der Vliesstoff kann sich zwar auf dem Dränern verschieben. Er wird dabei jedoch zunächst in den Schweißpunkten festgehalten. Die Kurve steigt steil an. Erst wenn er dort in gewissem Umfang „herausgezogen“ wurde, beginnt das Gleiten, das jedoch noch durch die Verankerung behindert wird. Auch in diesem Fall wird ein deutlicher Adhäsionsanteil der Schergeraden im Normalspannung-Schubspannung-Diagramm beobachtet. Deren Steigung ist weniger durch eine Veränderung der Gleitreibung, als vielmehr durch die Veränderung der Festigkeit der Verbindungsstellen mit der Normalspannung bestimmt. Die Verbindungsstelle wird mit wachsender Normalspannung immer stärker „zusammengedrückt“ und dadurch in gewissem Umfang fester. Die Steigung kann dabei unter Umständen eher flach ausfallen.



**Abb. 7.:** Schematischer Verlauf der Verschiebungsweg-Schubspannung-Kurve bei verschiedenen Normalspannungen  $\sigma$  eines Kunststoff-Dränelements mit flächiger Verbindung der Komponenten. Die gestrichelte Linie markiert den kritischen Wert des Verschiebungswegs  $s_k$ , bei dem die Verbindung abreißt. Die schwarzen Punkte kennzeichnen die maximale Schubspannung.



**Abb. 8.:** Schematischer Verlauf der Verschiebungsweg-Schubspannung-Kurve bei verschiedenen Normalspannungen  $\sigma$  eines Kunststoff-Dränelements mit „punktförmiger“ Verbindung der Komponenten. Die gestrichelte Linie markiert den kritischen Wert des Verschiebungswegs  $s_k$ , bei dem der Vliesstoff im Randbereich der Schweißpunkte „verstreckt“. Die schwarzen Punkte kennzeichnen die maximale Schubspannung.

Das Verfahren zur Bestimmung von Reibungsparameter der GDA E3-8 kann nicht ohne Weiteres auf solche Versuchsergebnisse (Abb. 7 und 8), die gar nicht aus reibungsartigem Verhalten herrühren, angewendet werden. Gelegentlich wird vorgeschlagen, es dennoch zu versuchen, indem man den Adhäsionsanteil einfach weglässt, die Schergerade in den Nullpunkt verschiebt und nur noch deren Steigung bewertet. Ein so gewonnener Reibungswinkel hat aber nur formalen Charakter. Er entspricht ja nicht der „wirklichen“ Reibung zwischen Vliesstoff und Dränkern ohne Verbindung. Er spiegelt also keine Produkteigenschaft wieder, auch nicht auf lange Sicht betrachtet. Wesentliche Eigenschaften der Produkte werden einfach ignoriert. Wann aber darf bei einem solchen Produkt der Adhäsionsanteil, also die Wirkung von dessen Verbindungsstellen, veranschlagt werden? Die E3-8 trifft dazu keine Festlegungen, da nur „freie“ Grenzflächen, nicht jedoch Grenzflächen mit vorgegebenen festen Verbindungen in dieser Empfehlung behandelt werden.

Im Bereich der europäischen Normung gibt es nur die DIN EN ISO 12957-1, die einen Scherkastenversuch als Indexversuch zur Bestimmung der Reibung zwischen einem Geo-



kunststoff und einem Normsand beschreibt<sup>2</sup>. Der Versuch wird inzwischen für die Untersuchung aller Arten von Reibung an den Grenzflächen mit Geokunststoffen und insbesondere auch zur Bestimmung der inneren Reibung verwendet. Was die Auswertung anbelangt, gibt es dann zwei Meinungen: Pro Adhäsionsanteil und Contra Adhäsionsanteil. In der Terminologie der Norm würde man die Fragstellung so ausdrücken: Wann handelt es sich um eine „scheinbare“ Adhäsion und wann um eine „echte“ Adhäsion?

## 4.2 Alterungsverhalten der Verbindungsstellen

Unserer Auffassung nach ist Berücksichtigung der Verbindungswirkung unter drei Voraussetzungen möglich. Erstens müssen die Verbindungen in einem wohldefinierten Verarbeitungsprozess mit reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden, der in gewissem Umfang einer Qualitätskontrolle unterliegt. Zweitens muss die voraussichtliche Lebensdauer der Verbindungsstellen der voraussichtlichen Lebensdauer der Komponenten entsprechen. Das Langzeitverhalten dieser Verbindungsstellen muss also geprüft werden. Dabei muss sich zeigen, dass Alterung (z. B. Versprödung durch Oxidation) oder spezielle, sich im Lauf der Zeit entfaltende Mechanismen (z. B. Spannungsrissbildung) zu keinem Versagen der Verbindungsstellen führen. Drittens muss berücksichtigt werden, dass aufgrund von Kriechvorgängen die Festigkeit der Verbindungsstelle u. U. erheblich kleiner sein kann, wenn Kräfte über einen langen Zeitraum einwirken, als sie im Reibungsversuch bei relativ großer Verformungsgeschwindigkeit erscheint.

Für die Alterungsversuche steht inzwischen ein spezielles Instrumentarium zur Verfügung. Da die Komponenten zumeist aus Polypropylen oder Polyethylen bestehen, kann vor allem die Oxidation über sehr lange Zeiträume zu nachteiligen Materialveränderungen führen. Möglich sind dann herkömmliche, die oxidative Alterung forcierende Immersionsversuche. Dabei wird untersucht, wie sich die Kurzzeit-Festigkeit einer Verbindungsstelle, die in entsprechend angepassten Zug-Schäl- oder Zug-Scherversuchen gemessen wird, sich im Verlauf der Lagerung verändert. Diese Versuche können auch in einer aufwendigeren Variante als Autoklavenversuche realisiert werden. Von der BAM wurden Versuchseinrichtungen aufgebaut, mit denen Zeitstand-Reibungsversuche sowohl in Luft wie in Wasser bei erhöhter Temperatur durchgeführt werden können. Inzwischen stehen solche erweiterten Versuchseinrichtungen z. B. auch beim SKZ zur Verfügung. Hierbei wird die kombinierte Einwirkung von oxidativer Alterung und mechanischer Beanspruchung simuliert. Analoge Versuche

---

<sup>2</sup> Die DIN EN ISO 12957-2 beschreibt einen „Schiefe-Ebene-Versuch“ der vor allem als Gebrauchsprüfung gedacht ist, bei der die spezifischen Böden der Baustelle eingesetzt werden.

können im Hinblick auf die Hydrolyse bei Materialien aus Polyester durchgeführt werden. Diese Prüfungen werden ergänzt durch Materialuntersuchungen, etwa zur Veränderung von Gehalt und Beschaffenheit von Antioxidantien. Solche Prüfungen Zeitstand-Reibungs- bzw. Kriechversuche werden in Anlehnung an die DIN EN ISO 25619-1 durchgeführt.

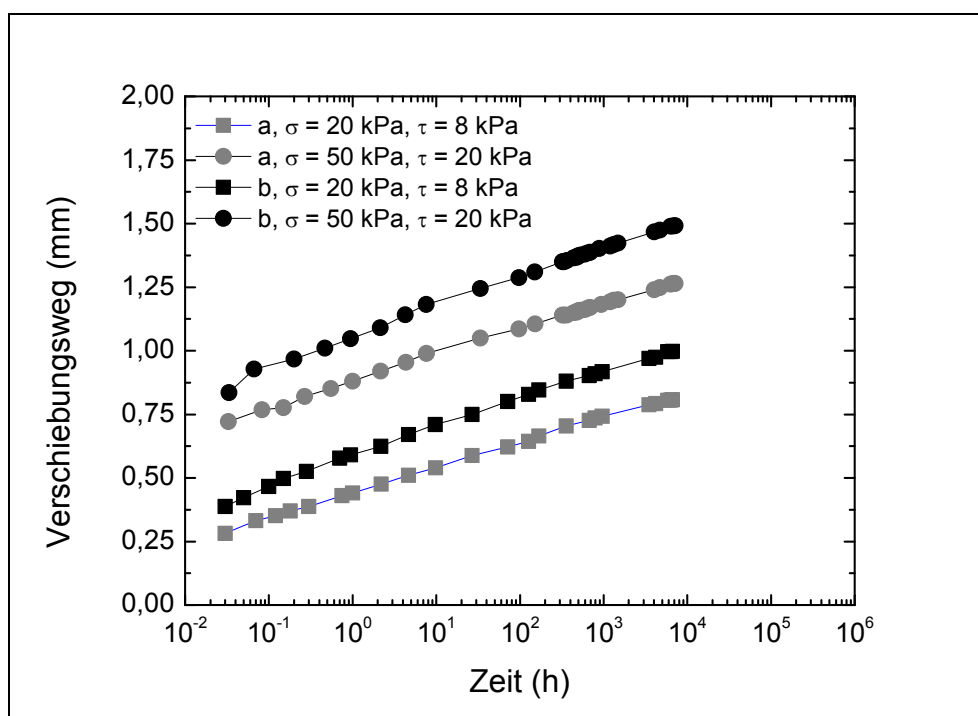
Die Frage der Haltbarkeit von Verbindungen wird, wie andere spezielle Fragestellungen auch, in den zuständigen „Working groups“ der europäischen Normungsorganisation noch eher zögerlich diskutiert. Die Fachdiskussion sollte daher für dieses Problem stärker „sensibilisieren“. Das darf jedoch nicht so missverstanden werden, dass man Unsicherheit hinsichtlich der Anwendbarkeit von Kunststoff-Dränelementen säen möchte. Unserer Auffassung nach darf bei einer Grenzfläche mit festen Verbindungsstellen, die mit reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden können und deren Haltbarkeit nachgewiesen wurde, von echter Adhäsion gesprochen werden.

#### **4.3 Kriechverhalten und innere Scherfestigkeit**

Wenn ein Produkt die Prüfungen der Haltbarkeit der Verbindungsstellen bestanden hat, wie wird dann also die innere Scherfestigkeit bestimmt? Darf man jetzt den Adhäsionsanteil der Schergeraden gelten lassen und mit dem Achsenabschnitt sowie der Steigung der Schergeraden in die Berechnung der Reibungsparameter nach der GDA E3-8 hineingehen? Oben wurde als dritte Bedingung genannt, dass das Kriechverhalten in irgendeiner Weise noch berücksichtigt werden muss. Unter der Einwirkung von Schub- und Druckkräften wird sich ein Geokunststoffprodukt stetig fortschreitend verformen. Dies hängt mit der Eigenschaft der polymeren Werkstoffe, aber auch mit der Struktur der Komponente (z. B. Haufwerk aus Fasern oder Strängen) zusammen. Dieses Kriechen kann mehr oder weniger schnell vorstattegehen, die Verformungen mehr oder weniger ausgeprägt sein. Dabei kann jedoch der Effekt auftreten, dass es nach einer hinreichend langen Zeit durch eine kontinuierlich wirkende Scherspannung zum Gleiten kommen kann, die wesentlich kleiner ist als die maximale Schubspannung, die in Reibungsversuchen mit hoher Verformungsgeschwindigkeit beobachtet wurde. Dieses Kriechverhalten müsste streng genommen in Zeitstand-Kriechversuchen geprüft werden. Dabei wird eine Druck- und Schubspannung auf das Kunststoff-Dränelement aufgebracht und beobachtet, wie sich im Laufe der Zeit dessen Dicke verändert, welcher Verschiebungsweg sich in der Scherebene ergibt und nach welchen Zeiten gegebenenfalls ein Versagen einstellt. Ein entsprechendes Prüfprogramm wäre jedoch sehr aufwendig. Allerdings müssen solche Kriechversuche ohnehin ausgeführt und analysiert werden, will man die Eigenschaften eines Kunststoff-Dränelements bewerten. In

gewissem Umfang werden sie durchgeführt, um aus der Dickenänderung bei verschiedenen Scher- und Normalspannungen auf das unter diesen Bedingungen tatsächlich nach langen Zeiten nur noch vorhandene Wasserableitvermögen des Elements schließen zu können. Zumindest diese Versuche können auch verwendet werden, um sich ein Bild von der Langzeit-Scherfestigkeit zu machen. Dazu werden sie im Hinblick auf den nach langer Zeit sich einstellenden „Langzeit-Verschiebungsweg“ analysiert.

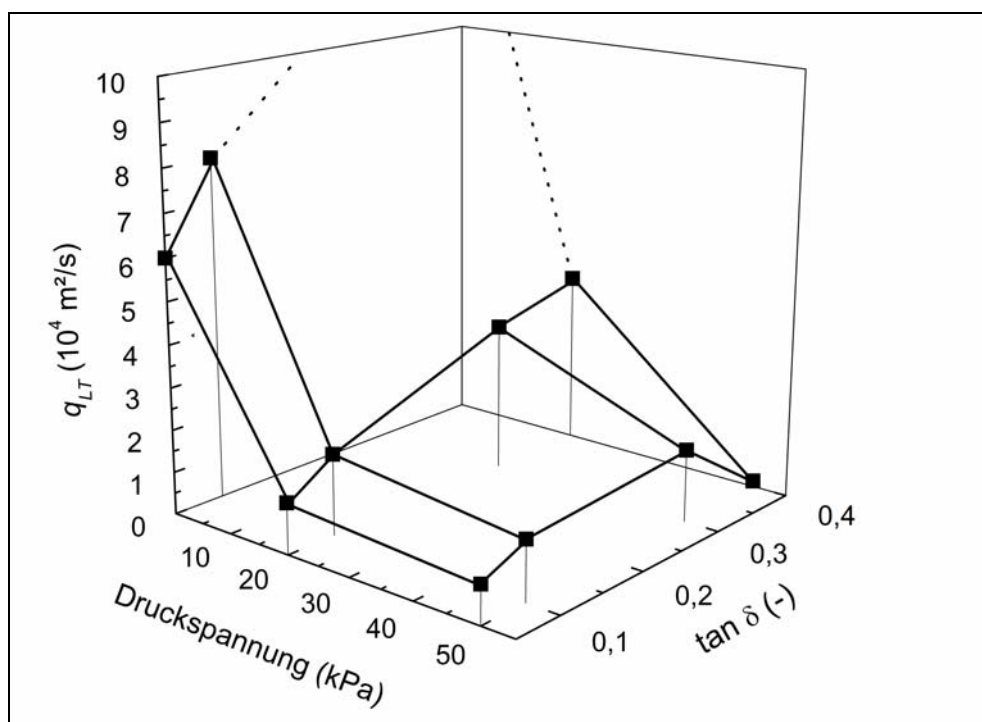
Man betrachte noch einmal die Schubspannung-Verschiebungsweg-Diagramme (Abb. 7 und Abb. 8). Das Abreißen des aufkaschierten Vliesstoffs oder das sich merkliche Abschwächen der Verbindungswirkung der Schweißpunkte tritt unabhängig von der Normalspannung dann auf, wenn ein gewisser „kritischer“ Verschiebungsweg  $s_k$  erreicht wird. Für die Bestimmung der inneren Scherfestigkeit haben wir nun folgendes Kriterium verwendet. Zulässig ist jeweils nur eine solche Kombination aus Normal- und Scherspannung bei denen der Langzeit-Verschiebungsweg kleiner ist als dieser kritische Verschiebungsweg. Die Produkte werden also aufgrund ihres tatsächlichen Kriechverhaltens im Zeitstand-Reibungsversuch beurteilt, wobei als Kriterium für die Beurteilung ein Kennwert aus dem Kurzzeit-Reibungsversuch verwendet wird. Abbildung 9 zeigt als Beispiel solche Kriechkurven für den Verschiebungsweg. In diesem Fall ist die bei den beiden mechanischen Belastungen auf 100 Jahre extrapolierte Verschiebung wesentlich kleiner als der im Reibungsversuch ermittelte kritische Verschiebungsweg, der ca. 15 mm beträgt. Das Produkt kann also bis zu 50 kPa Normalspannung und Böschungsneigung 1:2,5 eingesetzt werden. Nach Maßgabe der Schergeraden aus dem Reibungsversuch wären natürlich noch wesentlich steilere Böschungen zulässig. In welchem Maße der nach dem Kurzzeit-Reibungsversuch zulässige Bereich ausgenutzt werden kann, müsste in weiteren Zeitstand-Reibungsversuchen geklärt werden.



**Abb. 9.:** Verschiebungswegen im Zeitstand-Reibungsversuch bei unterschiedlichen mechanischen Beanspruchungen. Es wurden je zwei Proben a (grau) und b (schwarz) untersucht.

Das hier vorgestellte Verfahren ist sicherlich immer noch sehr konservativ. Es gibt auch hier gewisse methodische Probleme: wieder die Frage der Befestigung, dazu die unter Umständen große Streuung bei den zu extrapolierenden Kriechkurven. Immerhin: diese Kriechversuche bzw. Zeitstand-Reibungsversuche werden bei realitätsnahen nicht allzu großen Kräften ausgeführt. Die Ermittlung der Schergeraden im Kurzzeit-Reibungsversuch erfordert dagegen die Einleitung auch sehr großer Scherkräfte. Es können daher im Kriechversuch einfachere Befestigungsmittel, z. B. das erwähnte raue Sandpapier, verwendet werden. Das Problem der Befestigung wird daher in gewissem Umfang „entschärft“. Da das Datenmaterial ohnehin vorhanden sein muss, stellt der Ansatz jedenfalls eine kunststofftechnisch begründete Ergänzung zu den anderen Verfahren dar, die die Schergerade des Kurzzeit-Reibungsversuchs auf die eine oder andere Art analysieren. Die Wirkung der Verbindungsstellen einfach zu ignorieren, hieße, den Anwendungsbereich offensichtlich viel zu stark einzuschränken. Für die innere Scherfestigkeit im vollen Umfang den Adhäsionsanteil aus dem Kurzzeit-Reibungsversuch zu berücksichtigen, würde andererseits zu einer möglicherweise viel zu optimistischen Bemessung führen. Das übliche Verfahren besteht darin, rein formal die Festlegungen aus der E3-8 auf Grenzflächen mit festen Verbindungen zu übertragen und den Adhäsionsanteil mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 2 zu berücksichtigen. Es ist jedoch nicht klar, ob über diese Teilsicherheitsbeiwerte das Langzeitverhalten hinreichend zuverlässig

sig eingegrenzt wird. Es ist daher sinnvoll, dieses Vorgehen durch die hier vorgeschlagene Betrachtungsweise zu ergänzen.



**Abb. 10.:** Beispiel des Langzeit-Wasserableitvermögens eines Kunststoff-Dränelements als Funktion der Druckspannung  $\sigma$  und des Böschungswinkels  $\delta$  für die Bettung hart/weich (siehe Amts- und Mitteilungsblatt der BAM, Bd. 1, S. 56, 2011. Dabei wurde angenommen, dass der hydraulischen Gradienten gerade  $\tan\delta$  ist. Die Werte bei  $i = 0,4$  wurden aus den Messungen bei 0,3 und 1 linear interpoliert.)

Unsere bisherigen Analysen zeigen, dass der Bereich von Normalspannungen und Böschungsneigungen, in dem die Kunststoff-Dränelemente mit festen und haltbaren Verbindungsstellen aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften verwendet werden können, größer zu sein scheint, als der Bereich, in dem nach den bisher vorliegenden Daten die Elemente aufgrund ihres Langzeit-Wasserableitvermögens noch verwendet werden können. Abbildung 10 zeigt als Beispiel das Langzeit-Wasserableitvermögen als Funktion von Normalspannung und hydraulischem Gradienten (bzw. Böschungsneigung). Solche Diagramme veranschaulichen die in den Zulassungsscheinen angegebenen Werte.

#### 4.4 Schlussbemerkung zu diesem Thema

Seit über 30 Jahren werden Geokunststoffe in stetig wachsendem Ausmaß und mit großem Erfolg in der Geotechnik eingesetzt. Bei der Bemessung wird dabei auf Regeln und Verfahrensweisen zugegriffen, die von anderen Baustoffen her vertraut sind und sich dort bewährt haben. Geokunststoffe werden inzwischen auch als integraler Bestandteil von Bauwerken verwendet, nehmen Kräfte auf und bestimmen dessen Funktion und Sicherheit maßgeblich mit. In dem Maße, wie die Lebensdauer des Bauwerks anwächst, wird sich jedoch das spezifische Alterungsverhalten und mechanische Verhalten von polymeren Werkstoffen Geltung verschaffen. Es sind daher bei der Bemessung im Zusammenhang mit Bauwerken von sehr langer Lebensdauer eine sozusagen „kunststofftechnische“ Überprüfungen und gegebenenfalls Modifikationen der Bemessungsregeln erforderlich, die der Eigenart dieser Produkte Rechnung tragen. Die Behandlung der Frage nach der inneren Scherfestigkeit von Kunststoff-Dränelementen liefert dafür ein Beispiel.

#### Literatur

- [1] N.N.: Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts. Bundesgesetzblatt, Teil I, (2009), S. 900-950.
- [2] N.N.: Erste Verordnung zur Änderung der Deponieverordnung. Bundesgesetzblatt, Teil I, (2011), S. 2065-2068.
- [3] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg.): DVWK Merkblatt 221, Anwendung von Geotextilien im Wasserbau. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, 1992, 31 Seiten (vergriffen).
- [4] M Geok E - Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues mit den Checklisten für die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (C Geok E), FGSV-Verlag, Köln, 2005.
- [5] Saathoff, F. , 2009: Vergleich von geotextilen und mineralischen Filterschichten im Wasserbau. Sonderheft Geotechnik zur 11. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, DGGT, S. 111-123 (13 Seiten), VGE Verlag Essen, ISBN 978-3-940476-21-0.
- [6] Krug, M. und Heyer, D., Geotextile Filter im Erd-, Straßen- und Deponiebau, Geotechnik, 21(1998), Nr. 4, S. 314-326.