

Langzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten¹

Werner Müller, Stefan Seeger, Martina Thies

1. Einleitung

Geokunststoffe sind oft aus mehreren Komponenten sandwich-artig aufgebaut. Man denke etwa an strukturierte Kunststoffdichtungsbahnen, bei denen in einem zweiten Fertigungsprozess nachträglich Strukturpartikel auf die Oberfläche aufgebracht werden [1], an Bentonitmatten, bei denen trockenes Bentonitpulver zwischen zwei Geotextilien eingepackt wird, die untereinander vernadelt oder vernäht werden [2], oder an Kunststoff-Dränmatten, die in der Regel aus einer Filterschicht, einem Dränkern und einer Schutzschicht bestehen, die mit unterschiedlichen Methoden untereinander verbunden werden [3]. Werden solche Produkte in großflächigen Abdichtungen auf mehr oder weniger steil geneigten und langen Böschungen eingebaut, so hängt die Standsicherheit des ganzen Abdichtungsbauwerks nicht nur von den Reibungskräften zwischen dem Geokunststoff und den benachbarten Komponenten der Abdichtung ab, sondern vor allem auch von der inneren Scherfestigkeit des Geokunststoffs. In welchem Ausmaß dabei Scherkräfte mobilisiert werden, wird durch den Einbauzustand bestimmt. In manchen Fällen mag der Geokunststoff zwischen einem Erdstoff-Auflager und einer darüber liegenden Erdstoff-Deckschicht so eingezwängt sein, dass Aggregate in Auflager und Deckschicht sozusagen formschlüssig übereinander lagern und Scher- und Reibungskräfte gegenüber Kompression und Beigebeanspruchungen nur eine geringe Rolle spielen. In der Regel sind jedoch, gerade bei Dichtungsaufbauten aus mehreren Geokunststoffen, ebene und glatte Gleitflächen vorhanden und die Hangabtriebskräfte müssen in vollem Umfang durch innere Scherkräfte in den Abdichtungskomponenten und Reibungskräfte in den Grenzflächen zwischen den Komponenten ausgeglichen werden.

Die innere Kurzzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen wird in einem Scherversuch mit einem Kastenschervergerät ermittelt [4]. Dazu wird bei sandwich-artigen Produkten deren Ober- und Unterseite auf dem jeweiligen Kasten fixiert und die Kästen mit konstanter Ge-

¹ Der Aufsatz ist die leicht überarbeitete deutsche Übersetzung des Beitrages zur Third International Geosynthetics Conference, die vom 01. - 03. März 2004 in München stattfand.

schwindigkeit gegeneinander geschert. Bei einer vorgegebenen Auflast wird die maximale Scherspannung aus der dabei aufgezeichneten Scherspannung-Verschiebeweg-Kurve ermittelt. Bei Bentonitmatten wird statt des Scherversuchs oft der einfacher durchzuführende Schälversuch (ASTM D 6496) verwendet, der in Anlehnung an den Zugversuch am breiten Streifen durchgeführt wird. Dabei wird die zum Aufschälen erforderliche Kraft bezogen auf die Breite der Probe (die sogenannte Verbundfestigkeit oder der sogenannte Schälwiderstand) als Kennwert für die Scherfestigkeit gemessen [5].

Gerade in der Geotechnik werden bei der Dimensionierung von Bauwerken gerne solche einfach zu messenden Kurzzeitwerte verwendet, die gegebenenfalls um einen bestimmten Faktor abgemindert werden. Bei allen Baustoffen muss man jedoch damit rechnen, dass die langfristig tatsächlich erreichbaren Festigkeiten sich wesentlich von den Kurzzeitwerten, d.h. den bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten ermittelten Werten, unterscheiden können. Dies gilt natürlich insbesondere bei Baustoffen mit ausgeprägt visko-elastischen Eigenschaften, wie den Kunststoffen [6]. Bei allen Baustoffen werden zudem auch Alterungsvorgänge (Korrosion, Spannungsrisskorrosion oder -bildung, morphologische Veränderung, Oxidation usw.) über lange Zeiträume zu inneren Veränderungen des Werkstoffs führen, die dann auch Auswirkungen auf die Festigkeit haben. Die Festigkeiten können sich dabei sogar abrupt sehr stark verändern. Neben dem „Pfusch am Bau“ ist daher die mangelnde Unterscheidung zwischen den Kurz- und Langzeiteigenschaften von Baustoffen die wesentliche Ursache für Schadensfälle im Bauwesen mit manchmal dramatischen Auswirkungen.

Alterungsbedingte Materialveränderungen lassen sich in der Regel nicht durch Abminderungsfaktoren erfassen. Der Definition eines Abminderungsfaktors liegt die Annahme zugrunde, dass während der Funktionsdauer des ganzen Bauwerkes eine bestimmte konstruktive Eigenschaft des Baustoffes – z.B. seine Scherfestigkeit – nicht kleiner wird als ein vorgegebener Bruchteil des ursprünglichen Kurzzeitwerts. Nun besteht das Wesen von Alterungsvorgängen darin, dass die Baustoffeigenschaften sich allmählich oder auch plötzlich mit der Zeit verändern und dabei früher oder später auch solche vorgegebenen Grenzwerte unterschritten werden. Einen Abminderungsfaktor zu definieren bedeutet also, dass man implizit annimmt, die Zeitdauer bis zum Unterschreiten dieses Bruchteils durch Alterung sei wesentlich länger als die Funktionsdauer des Bauwerks. Die Dimensionierung mit Abminderungsfaktoren bei Geokunststoffen beruht so gesehen auf der (oft unausge-

2. Prüfverfahren

Die Festigkeit von Kunststoffbauteilen wird in sogenannten Zeitstandversuchen geprüft, bei denen das Bauteil der mechanischen Beanspruchung unter erhöhter Temperatur und unter dem Einfluss von flüssigen oder gasförmigen Prüfmedien ausgesetzt wird. In Abhängigkeit von den Prüfbedingungen wird dann die Zeit bis zum Versagen, die Standzeit, ermittelt. Durch Variation der Prüfbedingungen erhält man einen funktionalen Zusammenhang zwischen Standzeiten und diesen Bedingungen, der dann zur Extrapolation der Funktionsdauer unter Anwendungsbedingungen oder umgekehrt zur Extrapolation einer noch zulässigen Beanspruchung bei einer vorgegebenen Funktionsdauer verwendet werden kann. Die Ermittlung des langfristig zulässigen Rohrinnendrucks bei Kunststoffrohren in Zeitstand-Rohrinnendruckversuchen ist das vielleicht technisch ausgereifteste Beispiel für die Anwendung von Zeitstandversuchen im Kunststoffbereich. In Anlehnung an solche Zeitstandversuche haben wir Prüfstände konzipiert, mit denen das Langzeitverhalten von Geokunststoffen unter Scherbeanspruchung untersucht werden kann (Bild 1 und Bild 2).



Bild 2: Probenhalter mit Kunststoffdichtungsbahn und Vliesstoff (links unten) und Gesamtansicht der Prüfeinrichtung.

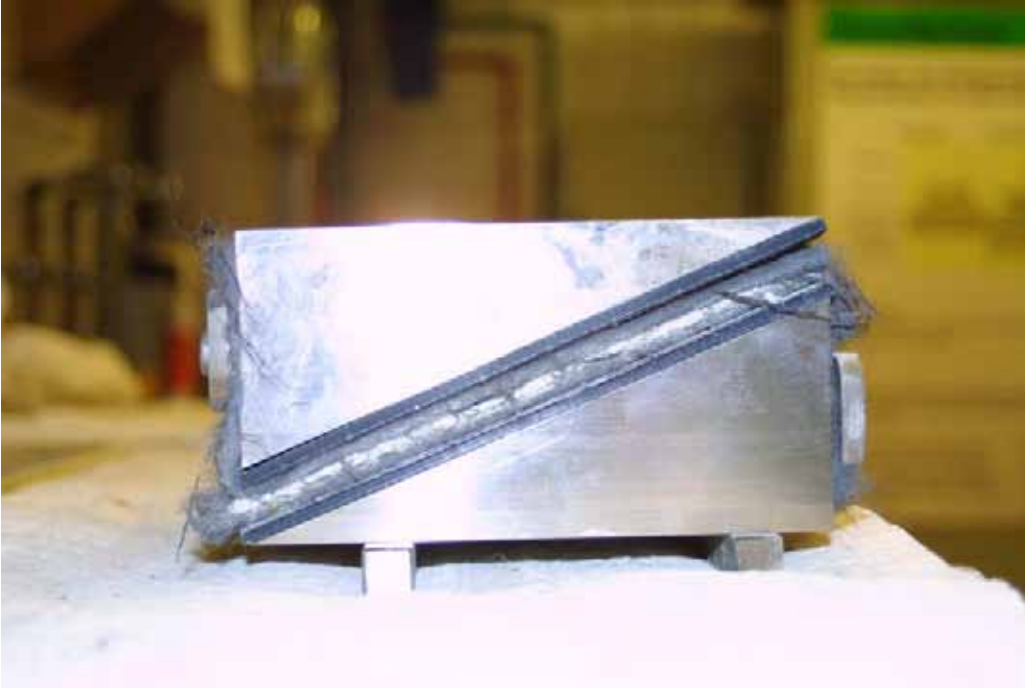


Bild 3: Beispiel eines Probehalters mit eingebauter Bentonitmatte. Als Reibungspartner waren hier zwei strukturierte Dichtungsbahnen auf den Keilen fest montiert worden.

Ein Ausschnitt aus dem zu untersuchenden Produkt (ca. 12 x 13 cm²) wird zwischen zwei Stahlkeile (Steigungswinkel der Stahlkeile in der Regel 21,8°; entsprechend einer Böschungsneigung von 1:2,5) montiert, siehe Bild 3. Über einen Hebelmechanismus wird eine für Oberflächenabdichtungen repräsentative Auflast auf den oberen Keil ausgeübt. Der hangparallele Anteil der Auflast wird als Scherspannung zwischen Ober- und Unterlage in den geotextilen Verbund eingetragen. Der Aufbau befindet sich in einem heizbaren Wasserbad ($T_{max} \sim 80^\circ$). Durch erhöhte Temperatur wird, analog zu den Rohrinnendruck-Zeitständen, das Kriechen, die Spannungsrisssbildung und der oxidative Abbau beschleunigt ablaufen. Versuchsparameter sind Auflast (bzw. Auflast/Scherkraft-Verhältnis) und Temperatur. Es kann jedoch nicht nur Wasser, sondern auch ein anderes flüssiges Prüfmedium verwendet werden. Über zwei Wegaufnehmer kann die vertikale Verschiebung des oberen Keils und die Verschiebung in der Scherebene über lange Zeit mit hoher Präzision ($\Delta s \leq 0,1$ mm) automatisch erfasst werden. Daraus können die Kompression und Scherverformung des Geokunststoffes in der Hangebene ermittelt werden. Ein Versagen des Probekörpers, d. h. zum Beispiel Abgleiten der Geotextillagen nach Bruch der Verbindungsfasern, kann hierdurch dokumentiert werden, unabhängig davon, ob sich dieser Prozess eher schlagartig oder sehr langsam vollzieht.



Bild 4: Strukturierte Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und Reibblech, die auf den Keilen fest montiert werden und dann als Reibungspartner für eine vollflächiger Haftung der Keile auf der Ober- bzw. Unterseite der Bentonitmatten dienen.

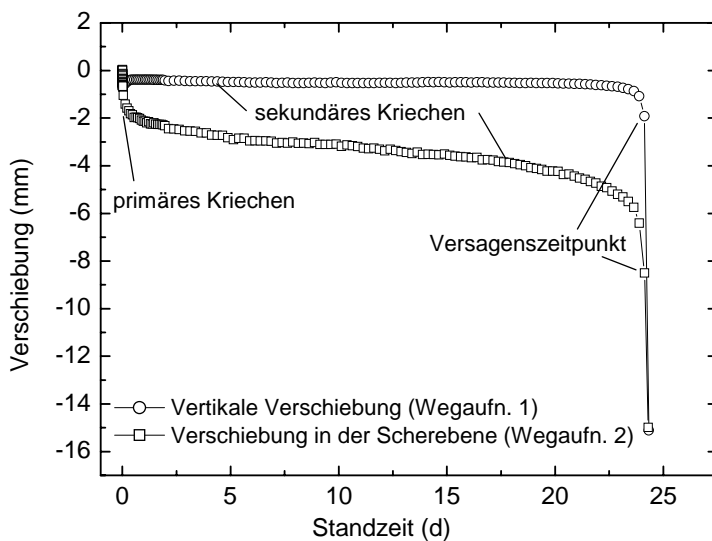


Bild 5: Beispiele von Verschiebungsweg-Standzeit-Kurven, wie sie mit den Wegaufnehmern gemessen werden.

Bei der Untersuchung der strukturierten Kunststoffdichtungsbahnen wurden diese mit Schrauben auf dem unteren Keil und ein dicker Vliesstoff mit Klemmen auf dem oberen Keil montiert. Die Keile wurden daher durch die Reibung zwischen Strukturpartikeln auf der Oberfläche der Dichtungsbahn und Vliesstoff zusammengehalten. Bei den Bentonitmatten oder Kunststoff-Dränmatten wurde die Verbindung von Ober- bzw. Unterseite zu dem jewei-

ligen Keil durch flächiges Verhaken mit einem auf dem oberen und unteren Keil fest montierten Reibungspartner hergestellt. Als Reibungspartner wurden dabei strukturierte Kunststoffdichtungsbahnen, Reibebleche oder Nagelplatten verwendet (Bild 3).

Bild 5 zeigt den typischen zeitlichen Verlauf der mit den Wegaufnehmern gemessenen Verschiebungen: Nach einer anfänglichen raschen Verformung durch die Auflast (primäres Kriechen) tritt eine stabile Phase mit einer nur allmählichen, stetigen Verformung (sekundäres Kriechen) ein. Erst kurz vor dem Versagen erhöht sich die Verformungsgeschwindigkeit sehr stark (tertiäres Kriechen) und es kommt schließlich zum Bruch der Probe.

Aus den in Zeitstandversuchen ermittelten Standzeiten können Funktionsdauern abgeschätzt werden. Dazu verwendet man die starke Temperaturabhängigkeit der Standzeiten, die im folgenden kurz diskutiert wird. Alterungserscheinungen können einen allmählichen und stetigen zeitlichen Verlauf zeigen. Sie können jedoch auch sehr abrupt auftreten. Im ersten Fall wirken sich die hinter den Alterungserscheinungen stehenden chemischen und physikalischen Vorgänge unmittelbar auf die betrachtete Funktion des Werkstoffs aus. Im zweiten Fall laufen sie zunächst versteckt ab und schlagen erst nach einer gewissen Schadensakkumulation auf die Funktion durch. Man denke z.B. an den allmählichen Verlust von Antioxidantien, die polyolefine Werkstoffe vor der Oxidation schützten. Eine solche mit einem offen oder versteckt ablaufenden Vorgang verbundene Veränderung einer Eigenschaft P kann dabei zumeist durch einen exponentiellen zeitlichen Verlauf angenähert werden:

$$(1) \quad P(t) = P_0 e^{-kt}.$$

Wird ein bestimmter Schwellenwert P_S unterschritten, so kommt es zum Versagen unter der Einwirkung der Beanspruchungen. Die Standzeit t_S ist also gegeben durch:

$$(2) \quad t_S = \frac{1}{k} \ln \frac{P_0}{P_S}.$$

Sofern sich die Eigenart des Vorgangs über das betrachtete Temperaturintervall nicht ändert, wird die Temperaturabhängigkeit der Standzeit durch die der Geschwindigkeit k bestimmt. Diese Abhängigkeit hat in der Regel eine einfache Form (ARRHENIUS-Gleichung):

$$(3) \quad k = k_0 e^{-E/RT}.$$

Solche einfachen Zusammenhänge können die makroskopischen Eigenschaftsveränderungen auch dann beschreiben, wenn die auf mikroskopischer Ebene zugrunde liegenden molekularen Vorgänge im Einzelnen äußerst kompliziert sind und keineswegs einer einfachen Kinetik gehorchen. Durch einen einfachen Gedankengang soll dies (mehr illustriert als) erklärt werden: Man stelle sich vor, dass der Vorgang, der hinter einer Alterungserscheinung steht, sich aus vielen in immer noch makroskopischen Teilsystemen ablaufenden Abbauvorgängen zusammensetzt. Diese bestehen im Prinzip darin, dass ein metastabiler geordneter Nichtgleichgewichtszustand des jeweiligen Teilsystems mit einer bestimmten Abbaurate r in einen stabilen Gleichgewichtszustand übergeht. Der Einzelvorgang wird dabei im zugehörigen Teilsystem im wesentlichen nur dann in Gang gesetzt, wenn dieses Teilsystem eine bestimmte innere Energie E hat, eine „scheinbare“ Aktivierungsenergie. Es sei $N(E)$ die Anzahl der in diesem Sinne aktivierten Teilsysteme. Dann werden im Zeitintervall Δt sich ΔN Teilsysteme verändert haben:

$$(4) \quad \Delta N = r \cdot N(E) \cdot \Delta t.$$

Im thermischen Gleichgewicht des Teilsystems mit seiner Umgebung bei der Temperatur T ist die Wahrscheinlichkeit w , dass es die innere Energie E hat, gegeben durch:

$$(5) \quad w = \frac{e^{-E/RT}}{Z(T)}.$$

R ist die allgemeine Gaskonstante (8,314 J/(mol·K)) und $Z(T)$ ein (von der Temperatur abhängiger) Normierungsfaktor. Dies ist eine universell gültige thermostatische Beziehung. $N(E)$ ist dann gegeben durch:

$$(6) \quad N(E) = \frac{e^{-E/RT}}{Z(T)} N,$$

wobei N die Gesamtzahl der sich im Ausgangszustand befindlichen Teilsysteme ist. Setzt man Gl. (6) in Gl. (4) ein, so erhält man für die zeitliche Änderung von N :

$$(7) \quad \frac{dN}{dt} = \frac{r \cdot e^{-E/RT}}{Z(T)} N.$$

P ist proportional zu N . Aus Gl. (7) ergibt sich daher der in Gl. (1) angegebene exponentielle zeitliche Verlauf von P mit der in Gl. (3) angegebenen Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit k . Für die Temperaturabhängigkeit der Standzeit erhält man aus Gl. (2) mit der ARRHENIUS-Gleichung (3):

$$(8) \quad t_s(T) = \left(\frac{1}{k_0} \ln \frac{P_0}{P_s} \right) e^{E/RT}.$$

Trägt man daher den Logarithmus der bei unterschiedlichen Temperaturen gemessenen Standzeiten über den Kehrwerten der (absoluten) Messtemperaturen auf (ARRHENIUS-Diagramm), so ergibt sich nach Gl.(8) eine Gerade, die man auf Anwendungstemperaturen extrapolieren kann².

Die Voraussetzung, dass im betrachteten Temperaturbereich, die Eigenart der Vorgänge sich nicht verändern darf, ist dabei sehr wesentlich. Bei vielen Kunststoffen ist dies oberhalb von 100 °C nicht mehr der Fall. Bei Polyethylen nimmt z.B. der Kristallinitätsgrad, der viele Vorgänge wesentlich beeinflusst, oberhalb von 100 °C stark ab; bei manchen Polypropylen-Formmassen kann sich bei etwa 100 °C die Wirksamkeit der Stabilisatoren stark ändern; weitere Beispiele ließen sich anführen. Eine ARRHENIUS-Extrapolation auf geotechnische Anwendungstemperaturen allein aufgrund von Daten, die bei Prüftemperaturen über 100 °C gemessen wurden, ist daher in der Regel nicht zuverlässig möglich. Man muss daher auch bei tieferen Prüftemperaturen messen, was aber zu sehr langen Prüfzeiten führt.

Die scheinbare Aktivierungsenergie vieler chemischer und physikalischer Vorgänge liegt im Bereich von etwa 50 kJ/mol (bzw. 6000 K). Aus Gl. (8) die schon Ende des vorletzten Jahr-

² Nach Gl. (7) sollte in Gl. (3) auch k_0 noch von der Temperatur abhängen. Für $RT < E$, was in der Regel immer der Fall ist, ist diese Temperaturabhängigkeit aber nur sehr schwach und kann gegenüber dem Faktor $\exp(-E/RT)$ zumeist vernachlässigt werden. Bei geringen Abweichungen von der ARRHENIUS-Geraden kann jedoch eine bessere Anpassung an die Daten mit dem Ansatz $k \sim T^n \exp(-E/RT)$ erreicht werden, wobei n eine kleine positive oder negative Zahl ist.

hunderts von VAN'T HOFF für chemische Reaktionen aufgestellte Regel, dass eine Erhöhung der Temperatur um 10 °C die Reaktionsgeschwindigkeit um den Faktor 2 bis 3 vervielfacht, sofern man dabei im Bereich der Größenordnung der Ausgangstemperatur bleibt. Diese Regel gilt erstaunlich gut für viele hinter Alterungserscheinungen bei Kunststoffen stehende Prozesse. Empirisch liegt der Faktor eher bei 2,5 als bei 2. Dies bedeutet, dass für den Nachweis von Funktionsdauern von mindestens 100 Jahren bei typischen geotechnischen Anwendungstemperaturen von 15-20 °C im Zeitstandversuch bei 80 °C mindestens Standzeiten von einem Jahr erreicht werden müssen.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Untersuchte Geokunststoffe

Um einige wesentliche allgemeine Schlussfolgerungen aus unseren Untersuchungen zu diskutieren, präsentieren wir im folgenden Resultate, die an nachträglich strukturierten Dichtungsbahnen und an vernadelten Bentonitmatten gewonnen wurden.

So wurden z.B. strukturierte Dichtungsbahnen untersucht, bei denen die glatten Kunststoffdichtungsbahnen nachträglich in einem eigenen Fertigungsprozess mit zwei unterschiedlichen Formmassen A und B besprüht worden waren. Bei den Formmassen handelte es sich um zwei Polyethylene niedriger Dichte (LDPE) mit vergleichbaren Werten des Schmelzindex, der Dichte und der Oxidations-Induktionszeit (OIT). Die Formmassen wurden mit dem gleichen Verfahren auf die gleichen glatten Dichtungsbahnen aufgebracht: Erhitzt auf eine sehr hohe Temperatur wurden sie mit hohem Luftdruck durch eine Spritzpistole gepresst und die dabei entstehenden fadenartigen Partikel auf eine glatte Dichtungsbahn gesprüht, die bei Raumtemperatur unter der quer dazu hin- und herlaufenden Spritzpistole entlang gezogen wurde.

Weiterhin wurden vernadelte Bentonitmatten untersucht, die z.T. speziell für diese Untersuchungen gefertigt worden waren. Der Deckvliesstoff und der Vliesstoff im Trägergeotextil (ein Vliesstoff-Gewebe-Verbund) waren dazu einmal aus PE-Fasern (im folgenden als GCL 1 bezeichnet) und zum anderen aus PP-Fasern (im folgenden als GCL 2 bezeichnet) gefertigt worden. Beide Produkte wurden in zwei verschiedenen Fertigungsverfahren hergestellt. Als Variante A wird die einfache Vernadelung des Deckvliesstoffes mit dem Trägergeotextil bezeichnet. Bei der Variante B wurde anschließend die durchgenadelten Faserbündel auf der Rückseite des Trägergeotextils zusätzlich thermisch verankert. Dem

gemäß wurden also vier Arten von Bentonitmatten, nämlich GCL 1A, GCL1B sowie GCL 2A und GCL 2B in die Scherzeitstände eingebaut.

3.1 Einfluss von Materialauswahl und Modifikationen im Produktionsverfahren auf die Langzeit-Scherfestigkeit

In unseren Untersuchungen wurde zunächst deutlich, dass sich ganz erhebliche Unterschiede im Zeitstandverhalten ergeben können, je nachdem welche Werkstoffe verwendet werden und in welcher Weise ein Produkt gestaltet wird.

Bild 6 zeigt die Summenhäufigkeit der bei 80 °C gemessenen Standzeiten der Dichtungsbahn, die mit der Formmasse A strukturiert wurde. Die Prüflast betrug 50 kN/m², als Reibungspartner wurde ein PP-Vliesstoff verwendet. Die Standzeiten sind logarithmisch normalverteilt, wie man das für Zeitstandversuche erwartet. Der Mittelwert der Standzeit liegt jedoch nur bei 2 Tagen.

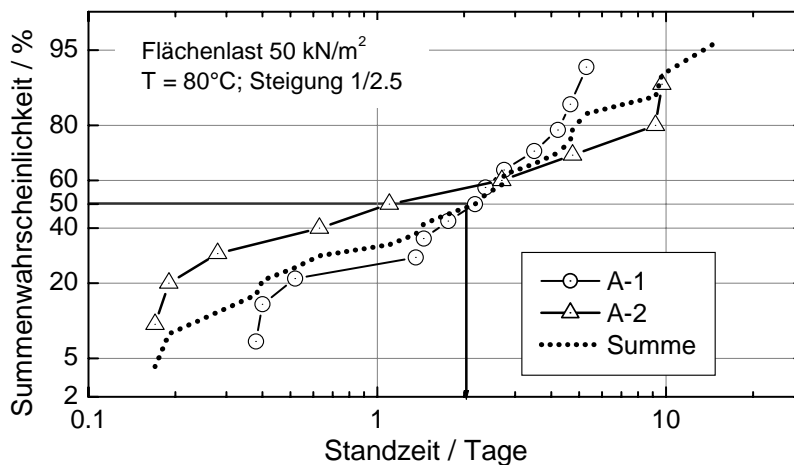


Bild 6: Kumulative Verteilung sämtlicher gemessener Standzeiten der Dichtungsbahn A.

Tabelle 1 zeigt dagegen die Standzeiten der mit der Formmasse B strukturierten Dichtungsbahnen. Unter den gleichen Versuchsbedingungen zeigt dieses Produkt ein völlig anderes Verhalten. Die meisten Versuche wurden hier nach über 1,5 Jahren ergebnislos abgebrochen. Wenn es überhaupt nach sehr langen Standzeiten zum Abrutschen kam, so lag dies an der Versprödung des Vliesstoffes, der dadurch aus seiner Halterung am Keil riss, und nicht an der Struktur der Dichtungsbahn. Selbst eine vorausgehende künstliche Bewitterung von 1500 Stunden, was in etwa einer Freibewitterung von 2 Jahren entspricht,

ergab keine messbare Reduzierung der Standzeit im anschließenden Zeitstand-Scherversuch.

Tabelle 1: Standzeiten der Proben aus der Dichtungsbahn B.

Probe	B-3	B-4	B-259*
Standzeit (d)	> 395	> 698	> 396
	> 395	> 620	> 524
	399 [§]	350 [§]	> 524
	404 [§]		

§) Vliesstoff aus der Verankerung gerissen

*) Nach 1500 Stunden künstlicher Bewitterung gemäß DIN EN 12224

Während des Aufsprühprozesses wird das versprühte polymere Material in beiden Fällen durch die sehr hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen sehr stark abgebaut: Der Schmelzindex erhöht sich um fast eine Größenordnung und es ist kein OIT-Wert mehr messbar. Dennoch zeigen sich solch große Unterschiede in den Standzeiten. Es ist bis jetzt nicht genau geklärt, welche geringfügigen Unterschiede in den Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe (z.B. Kopolymer) und den Fertigungsparametern dafür die Ursache sind.

Es gibt ein weiteres bemerkenswertes Beispiel dafür, dass allein die Auswahl der Werkstoffe zu ganz unterschiedlichen Standzeiten führen kann. Die Bilder 7 und 8 zeigen jeweils ein ARRHENIUS-Diagramm der Ergebnisse der Langzeit-Scherversuch an Bentonitmatten, deren Vliesstoff einmal aus PE-Fasern (GCL 1, Bild 7) und zum anderen aus PP-Fasern (GCL 2, Bild 8)) gefertigt wurden. Aufgetragen wurde der Logarithmus der mittleren Standzeiten über dem Kehrwert der absoluten Temperatur. Unabhängig von den Details des Zeitstandverhaltens sieht man sofort, dass bei identischen Prüfbedingungen die Standzeiten der PP-Bentonitmatten um wenigstens eine Größenordnung länger sind als die der PE-Bentonitmatten.

Aber auch unterschiedliche Fertigungsmethoden können sich drastisch auf das Versagensverhalten im Zeitstandversuch auswirken. Die nach dem Vernadeln noch zusätzlich thermisch verfestigten Bentonitmatten (Proben A) zeigen ein Versagensbild, bei dem die durchgenadelten Faserbündel im Bereich der Verankerung im Trägergeotextil

reißen. Die nur vernadelten Bentonitmatten (Proben B) versagen dagegen durch ein allmähliches Entschlaufen der intakten Faserbündel aus dem Trägergeotextil. Zu den unterschiedlichen Versagensbildern gehört auch ein deutlich unterschiedliches Zeitstandverhalten. Die Proben GCL 1A versagen unter allen gewählten Prüfbedingungen wesentlich rascher als die Proben GCL 1B, die Proben GCL 2A wesentlich rascher, wenn sie in entionisiertem Wasser geprüft werden. Extrem lange Standzeiten erreichen die Proben GCL 2B sowohl im Leitungswasser wie im entionisierten Wasser und ebenso die Proben GCL 2A, wenn sie im Leitungswasser geprüft werden. Die Temperaturabhängigkeit der Versagenszeiten der thermisch verfestigten Bentonitmatten bei der Prüfung im entionisiertem Wasser lässt sich dabei durch eine ARRHENIUS-Gerade charakterisieren und diesem Versagensmechanismus ein scheinbare Aktivierungsenergie von 60 kJ/mol für GCL 1A bzw. 70 kJ/mol für GCL 2A aus der Steigung der ARRHENIUS-Geraden zuordnen. Im Falle des allmählichen Entschlaufens scheint dagegen der Logarithmus der Standzeit überproportional stark mit zunehmendem Kehrwert der Temperatur (also mit abnehmender Temperatur) anzuwachsen.

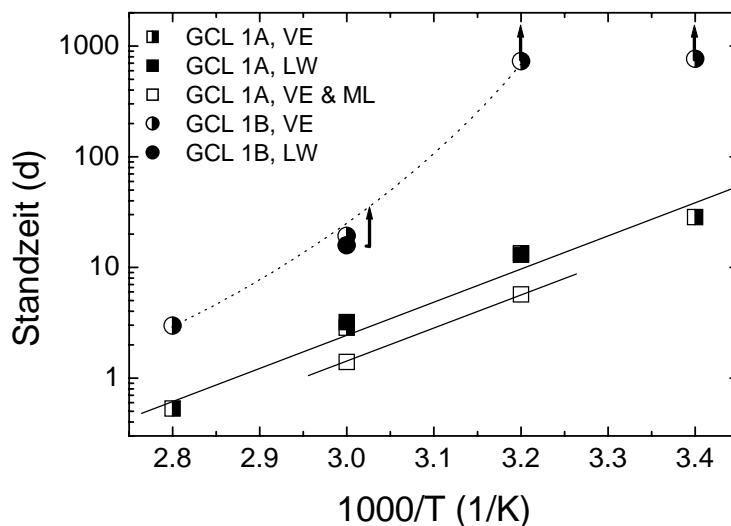


Bild 7: ARRHENIUS-Diagramm der Resultate aus den Zeitstand-Scherversuchen an den Bentonitmatten GCL 1A und 1B in entionisiertem Wasser (VE) und Leitungswasser (LW). Die Temperaturabhängigkeit der Standzeiten der Proben 1A, bei denen die Faserbündel im Bereich der thermischen Verankerung reißen, folgt einem ARRHENIUS-Gesetz. Die Beimischung von Netzmitteln (ML) ins Prüfwasser verringert in diesem Falle die Standzeiten. Im Unterschied dazu zeigen die Proben 1B wesentlich längere Standzeiten und deren Temperaturabhängigkeit weicht stark vom ARRHENIUS-Gesetz ab. Die Proben 1B versagen durch das allmähliche Entschlaufen der Faserbündel aus dem Vliesstoff-Gewebe-

Verbund, der als Trägergeotextil dient. Datenpunkte mit Pfeilen geben die mittlere Laufzeit von noch laufenden Versuchen.

Zu beachten ist, dass bei den Versuchsbedingungen und Proben, wo es zum Versagen kommt, die zugehörigen Standzeiten so kurz sind, dass die oxidative Versprödung der Fasern für den Versagensmechanismus keine Rolle spielen kann. Der Versagensmechanismus des Bruches von Fasern im Bereich der Verankerung scheint sich dagegen durch die Beimischung von die Oberflächenspannung herabsetzenden Netzmittel in das Prüfwasser weiter verringern zu lassen.

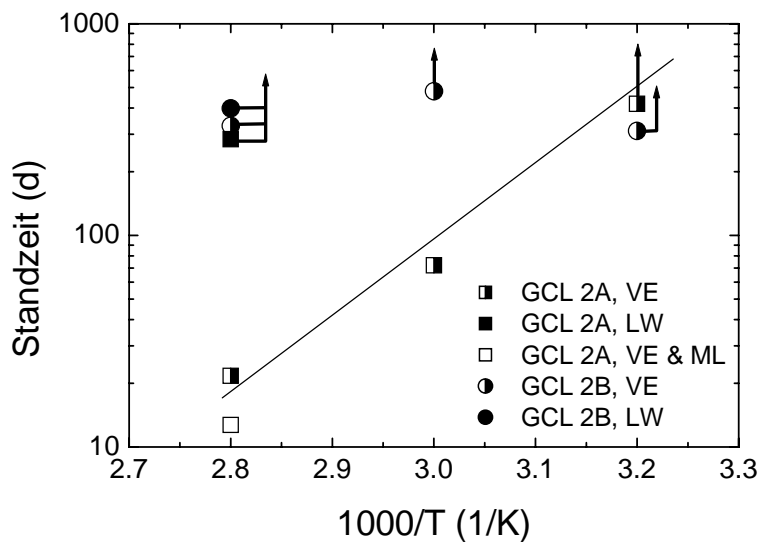


Bild 8: ARRHENIUS-Diagramm der Resultate aus den Zeitstand-Scherversuchen an den Bentonitmatten GCL 2A und 2B. Wie bei den Bentonitmatten GCL 1A, folgt auch die Temperaturabhängigkeit der Standzeiten der Proben GCL 2A einem ARRHENIUS-Gesetz und das Reißen von Fasern im Bereich der Verankerung ist auch hier der relevante Versagensmechanismus, wenn die Proben im entionisierten Wasser (VE) getestet werden. Die Beimischung von Netzmitteln (ML) ins Prüfwasser verringert die Standzeiten wie im Falle GCL 1A. Auch nach weit über einem Jahr Laufzeit wurde für die Proben GCL 2A noch kein Versagen beobachtet, wenn sie im Leitungswasser (LW) getestet werden. Die Proben GCL 2B zeigen solch lange Laufzeiten sowohl im entionisierten, wie auch im Leitungswasser. Datenpunkte mit Pfeilen geben die mittlere Laufzeit von noch laufenden Versuchen.

3.3. Langzeit-Scherfestigkeit im Gegensatz zur Kurzzeit-Scherfestigkeit

Unsere Untersuchungen haben weiterhin belegt, dass, wie erwartet, drastische Unterschiede zwischen der Kurzzeit-Scherfestigkeit und der Langzeit-Scherfestigkeit bestehen. So konnte der allein durch die Wahl der Werkstoffkombination bewirkte Unterschied zwischen

Dichtungsbahn A und B in Kurzzeit-Reibungsversuchen nicht festgestellt werden. Auch bei Bentonitmatten zeigt sich dieser Unterschied zwischen Kurzzeit- und Langzeitverhalten. Die Kurzzeit-Scherfestigkeit bei Bentonitmatten wird durch die maximale Scherkraft (Scherfestigkeit) oder die maximale Schälkraft (Schälwiderstand) ausgedrückt, die im Kurzzeit-Scher- oder Schälversuch ermittelt wird. Die Langzeit-Scherfestigkeit kann charakterisiert werden durch die Scherspannung, die bei einer vorgegebenen Standzeit und Temperatur von 95 % der Proben erreicht wird. Man kann sie jedoch auch beschreiben durch das geometrische Mittel der Standzeiten, die bei vorgegebener Scherspannung und Temperatur im Zeitstandscherversuch erreicht werden. In Tabelle 2 sind für unterschiedlich hergestellte Bentonitmatten, die mittleren relativen Schälwiderstände den mittleren relativen Standzeiten gegenübergestellt. Als Bezugsgröße wurde der kleinste Schälwiderstand bzw. die kleinste Standzeit willkürlich gleich Eins gesetzt.

Tabelle 2: Vergleich der Schälwiderstände im Kurzzeitversuch mit den Standzeiten im Langzeitversuch. Der jeweils kleinste Wert wurde als Bezugsgröße Eins gesetzt.

Produkt	rel. Schälwiderstand	rel. Standzeit
GCL 1A	3,6	1
GCL 1B	3,3	4,4
GCL 2A	2	24
GCL 2B	1	>270

Offensichtlich kann aus einer hohen Kurzzeit-Scherfestigkeit nicht auf eine bei einer vorgegebenen Beanspruchung erreichbare hohe Standzeit geschlossen werden. Langzeit-Scherversuche sind daher ein unverzichtbares Element der Beurteilung der Eigenschaften von Geokunststoffen aus mehreren strukturellen oder werkstofflichen Komponenten.

3.4 Empfindlichkeit der Langzeit-Scherfestigkeit gegenüber den gewählten Prüfbedingungen

Das Verhalten von Geokunststoffen in Langzeitversuchen lässt sich, dies eine dritte allgemeine Schlussfolgerung aus den Untersuchungen, nicht leicht vorhersagen. So können die Prüfbedingungen großen Einfluss auf die Prüfergebnisse haben. Bei Bentonitmatten wurde z.B. beobachtet, dass entionisiertes Wasser oder Leitungswasser als Prüfmedium zu jeweils ganz unterschiedlichen Standzeiten führt. Die thermisch verfestigten Proben GCL 2A versa-

gen im entionisierten Wasser nach Standzeiten, die der Beobachtung noch zugänglich sind. Dagegen erreichen sie im Leitungswasser extrem lange Standzeiten. Bislang (Stand: 15.12.2003) wurde noch gar kein Versagen beobachtet und die mittlere Laufzeit, die nur als untere Grenze für die Standzeit dienen kann, beträgt 427 Tage oder 10.259 Stunden.

Über den Ionenaustausch beeinflusst das Prüfmedium den Bentonit, dessen Eigenschaften offenbar erhebliche Rückwirkungen auf das Scherverhalten haben. Bei der Übertragung von Laborergebnissen auf die Anwendung muss in diesem Zusammenhang bedacht werden, dass die „klinischen“ Bedingungen der Zeitstandscherversuche bei hoher Temperatur im Wasserbad maximale Anforderungen an die Produkte stellen. Eine mit solchen Labordaten extrapolierte Funktionsdauer unter Anwendungsbedingungen enthält daher noch erhebliche, aber nicht quantifizierbare Sicherheitsreserven.

4. Zusammenfassung

Das wichtigste Ergebnis unserer Untersuchungen ist jedoch sicherlich, dass ausgewählte Geokunststoffprodukte, die aus hochwertigen Materialien gefertigt und optimal gestaltet worden sind, auch unter kritischsten Prüfbedingungen extrem lange Standzeiten erreichen können. Das Beispiel der nachträglich strukturierten Dichtungsbahn B wurde oben schon diskutiert. Bild 8 zeigt ein weiteres Beispiel aus der Prüfung der Bentonitmatten. Fast alle Probekörper aus nur vernadelten PP-Bentonitmatten zeigen auch nach weit über einem Jahr ein stabiles stationäres Kriechen. Dies gilt auch für die zusätzlich thermisch verfestigten PP-Bentonitmatten, aber nur dann, wenn sie im Leitungswasser geprüft werden.

Oberflächenabdichtungen von Deponien und zur Sicherung von Altlasten sind Bauwerke die sehr lange Funktionsdauern haben müssen und die in der Regel nicht kontrolliert und repariert werden sollen. Geokunststoffe sollten daher nur eingesetzt werden, wenn deren Eignung vor allem im Hinblick auf das Langzeitverhalten nachgewiesen worden ist. Dies ergibt sich auch aus den gesetzlichen Vorschriften (TA Siedlungsabfall in Verbindung mit der Ablagerungsverordnung), die für Abdichtungen einen Gleichwertigkeitsnachweis zur Regelabdichtung fordern. Mit der Deponieverordnung wird die Möglichkeit eröffnet, Kunststoff-Dränmatten in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien einzusetzen. Im Anhang 1, Fußnote 4 zu den dortigen Tabellen über die Abdichtungssysteme wird jedoch auch gefordert: „Die zuständige Behörde kann auf Antrag des Deponiebetreibers Abweichungen von Schichtstärke und Durchlässigkeitsbeiwert der Entwässerungsschicht zulassen, wenn

nachgewiesen wird, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht und die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht langfristig gewährleistet ist.“

Kunststoffdichtungsbahnen müssen von der BAM zugelassen werden. Die Eignung von Bentonitmatten kann bei Anpassung an den Stand der Technik in Anlehnung an die ehemaligen Zulassungsanforderungen des DIBt geführt werden. Wobei die Bentonitmatten seinerzeit nur unter der Voraussetzung zugelassen wurden, dass ergänzend ein Nachweis der Langzeit-Scherfestigkeit geführt wird. Dies ist mit dem hier vorgestellten Prüfverfahren möglich. Dem Eignungsnachweis bei Kunststoff-Dränmatten kann zunächst die Norm DIN EN 13252:2001-04, *Geotextilien und verwandte Produkte, geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Dränanlagen*, zugrunde gelegt werden. Die in der Norm aufgeführten Anforderungen an die Beständigkeit gewährleisten jedoch ausdrücklich nur eine Mindestfunktionsdauer von 25 Jahren. Zugleich fehlt in der Norm ganz die Prüfung des Langzeitverhaltens unter Druck-Scherbeanspruchung und deren Rückwirkung auf das Wasserableitvermögen. Nach dieser Norm gekennzeichnete Produkte sind daher ohne weiteres nur für einfache geotechnische Anwendungen geeignet, bei denen die Kunststoff-Dränmatten mit vertretbarem Aufwand repariert oder ersetzt werden können. Für Kunststoff-Dränmatten, die im Deponiebau oder der Altlastensicherung eingesetzt werden, müssen als zusätzliche wesentliche Eigenschaften die Langzeit-Scherfestigkeit und das Langzeit-Wasserableitvermögen unter Berücksichtigung der Alterungsvorgänge der verwendeten Werkstoffe untersucht und beurteilt werden. Auch dies ist mit den Scherzeitständen möglich. Inzwischen liegt eine Prüfrichtlinie vor, auf deren Grundlage die BAM die erforderlichen Eignungsgutachten für Kunststoff-Dränmatten erstellt [10].

Für die von der BAM zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen aus speziellen PEHD-Formmassen ist der Nachweis erbracht, das bei einwandfreiem Einbau die Funktionsdauer nach Jahrhunderten zählt [11]. Für Bentonitmatten-Produkte können inzwischen aus den Untersuchungen abgeleitete gutachtliche Nachweise der Langzeit-Scherfestigkeit vorgelegt werden. Bei Kunststoff-Dränmatten hat die Begutachtung durch die BAM begonnen. Wir hoffen, dass sich viele Geokunststoffhersteller in Zukunft aktiv an diesen Untersuchungen beteiligen. Nur so kann ein vollständiger Überblick über die Leistungsfähigkeit von Geokunststoff auch bei extremen Funktionsdauern erarbeitet werden.

Danksagung

Die hier gezeigten Ergebnisse stammen aus abgeschlossenen und laufenden Forschungsvorhaben der BAM, die finanziell und fachlich von den Firmen GSE Lining Technology GmbH und Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG unterstützt wurden.

Literatur

1. Müller, W. W.: Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik. Basel: Birkhäuser Verlag 2001.
2. Thies, M., Gerloff, C., Seeger, S. und Müller, W. W.: Long-term shear testing of geosynthetic clay liners. In: Clay Geosynthetic Barriers. Zanzinger, H., Koerner, R. M., und Gartung, E. (Hrsg.). Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers 2002, S. 97-104.
3. Müller, W. W.: Kunststoff-Dränmatten im Deponiebau Teil 1: Eigenschaften und Beurteilung. Bautechnik, 79(2002), H. 3, S. 178-192.
4. Blümel, W. und Brummermann, K.: Reibung zwischen Geokunststoffen und Erdstoffen in Deponiedichtungen. Müll und Abfall, 26(1994), H. 5, S. 242-259.
5. von Maubeuge, K. P. und Luca, S. N.: Peel and shear test comparison and geosynthetic clay liner shear strength correlation. In: Clay Geosynthetic Barriers. Zanzinger, H., Koerner, R. M., und Gartung, E. (Hrsg.). Lisse, Netherlands: A.A. Balkema Publishers 2002, S. 105-110.
6. Müller, W. W.: Kunststoff-Dränmatten im Deponiebau Teil 2: Zur Bemessung. Bautechnik, 79(2002), H. 4, S. 232-242.
7. Seeger, S., Böhm, H., Söhring, G. und Müller, W.: Long term testing of geomembranes and geotextiles under shear stress. In: Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference. Cancelli, A., Cazzuffi, D., und Soccodato, C. (Hrsg.). Bologna: Pàtron Editore 2000, S. 607-610.
8. Seeger, S. und Müller, W. W.: Langzeitbeständigkeit strukturierter Dichtungsbahnen, BAM-Forschungsbericht 256. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH 2001.
9. Müller, W. W., Seeger, S., Thies, M. und Gerloff, C.: Long-term shear strength of multilayer geosynthetics. In: Proceedings of EuroGeo3, München, 01-04.03.2004. wird veröffentlicht 2004.

10. *Müller, W. W.* (Hrsg.): BAM-Richtlinie: Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten. Berlin: BAM (www.bam.de/deponietechnik.htm) 2003.
11. *Mueller, W. W. und Jakob, I.*: Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes. *Polymer Degradation and Stability*, 79(2003), H. 1, S. 161-172.