

Dränmatten in Oberflächenabdichtungen: Eignungsbeurteilung; Langzeitverhalten

Dipl.-Ing. Helmut Zanzinger
SKZ-TeConA GmbH, Würzburg

Einleitung

Im Deponiebau werden Dränmatten seit 20 Jahren in Oberflächenabdichtungssystemen eingesetzt [Hoekstra/Berkhout 1986]. Sie kombinieren verschiedene Funktionen in einem Produkt. Diese sind das Trennen von verschiedenen Schichten, das Filtern (Zurückhalten von Bodenteilchen bei Wasserzuströmung) und das Ableiten des Wassers in der Ebene der Dränmatte. Zudem kann eine Dränmatte eine Schutzfunktion ausüben z.B. für eine Kunststoffdichtungsbahn. Diese Funktionen übernehmen einzelne Elemente der Dränmatte oder auch die Kombination mehrerer Elemente. Alle Elemente und auch der Verbund der Dränmatte müssen langfristig wirksam bleiben. Deshalb wird der Nachweis des Langzeitverhaltens dieser Geokunststoffe auch für sehr lange Zeiträume eingefordert [Bräcker 1999]. Neben der chemischen und physikalischen Beständigkeit und dem Nachweis der Standsicherheit des Dichtungsaufbaus ist die zentrale Anforderung einer Dränmatte, dass das erforderliche Wasserableitvermögen langfristig gewährleistet bleibt.

Die Eignungsbeurteilung einer Dränmatte für ein Oberflächenabdichtungssystem einer Deponie ist deshalb geprägt von der Frage der Lebensdauer. Der Einfluss der Alterung infolge von Oxidations- und Migrationsvorgängen ist für jede Komponente zu berücksichtigen. Innerhalb der Funktionsdauer darf kein Stabilitätsversagen auftreten und die Alterungsvorgänge dürfen auch keine relevanten Materialveränderungen in der Dränmatte hervorrufen.

Das Langzeit-Wasserableitvermögen wird maßgeblich durch das Kriechen des Sickerkörpers unter Auflast bestimmt. Um das Druck-Kriechverhalten über lange Zeiträume hinweg abschätzen zu können, sind konventionelle und zeitraffende Untersuchungsmethoden notwendig, die eine Extrapolation der Versuchsergebnisse möglich machen.

1 Typische Produktvarianten

Als Sickerkörper für Dränmatten werden Geomatten (GMA), Geonetze (GNT) und auch

Noppenbahnen verwendet. Geomatten gibt es als Wirrgelege ohne Struktur (Bild 1), als Strukturmatten mit pyramidaler Form und als Strukturmatten mit „Zick-Zack- oder Wellenstruktur“ (Bild 2). Die letzteren zeichnen sich als kriechunempfindlicher und auch druckstabiler aus als z.B. Wirrgelege. Sie neigen aber zu einem Stabilitätsversagen unter entsprechender Druckbeanspruchung in Abhängigkeit der Höhe der Belastung und in Abhängigkeit der Belastungsdauer. Meist kommt als Rohstoff Polypropylen (PP) zum Einsatz. Geonetze werden aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) hergestellt (Bild 4). Kennzeichnend ist eine hohe Druckfestigkeit und eine noch geringere Kriechneigung. Sie neigen weniger zu einem Stabilitätsversagen. Noppenbahnen werden i.d.R. auch aus PEHD hergestellt (Bild 3). Sie sind wenig kriechempfindlich, neigen aber stärker zum Stabilitätsversagen.



Bild 1: Geomatte mit Wirrgelege ohne Struktur (Beispiel)

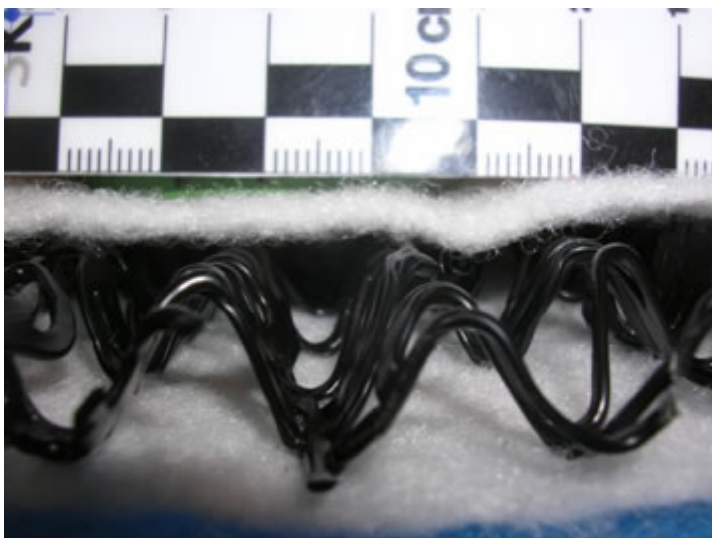


Bild 2: Geomatte als Wellen-Struktur (Beispiel)



Bild 3: Noppenbahn (Beispiel)



Bild 4: Geonetz (Beispiel)

In den USA kommen fast ausschließlich Geonetze als Sickerkörper für Dränmatten im Deponiebau zum Einsatz. In englischen Deponien hingegen dominieren Noppenbahnen und in Deutschland haben sich Geomatten für diesen Einsatzzweck durchgesetzt. Früher waren diese Geomatten meist Wirrgelege. In jüngster Zeit beherrschen die strukturierten Geomatten mit Zick-Zack- und Wellenstruktur die deutschen Deponien.

2 Anforderungen an eine Dränmatte

2.1 Hydraulische und mechanische Eigenschaften

In Tabelle 1 sind die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften aufgeführt, die als

Mindestangaben für die Beurteilung einer Dränmatte in jedem Datenblatt für die CE-Kennzeichnung nach DIN EN 13252 genannt sein müssen. Darüber hinaus sind in Tabelle 2 für die Dimensionierung einer Dränmatte zusätzliche nach der „Richtlinie für den Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Deponie-Oberflächenabdichtungen“ [BAM 2003] als notwendig erachtete Kennwerte aufgeführt.

Tabelle 1: Relevante Mindestangaben für eine Dränmatte

Eigenschaft	relevant für	Prüfmethode
Zugfestigkeit T_{max} des Filtervliesstoffs	Funktion „Trennen“	DIN EN ISO 10319
Zugfestigkeit T_{max} des Geoverbundstoffs	--	
Stempeldurchdrückkraft F_P des Filtervliesstoffs	Funktion „Trennen“	DIN EN ISO 12236
Lochdurchmesser D_C des Filtervliesstoffs beim Kegelfallversuch	Funktion „Trennen“	DIN EN ISO 13433
Charakteristische Öffnungsweite O_{90} des Filtervliesstoffs	Funktion „Filtern“	DIN EN ISO 12956
Wasserdurchflussrate q_N des Filtervliesstoffs	Funktion „Filtern“	DIN EN ISO 11058
Wasserleitvermögen q_P des Geoverbundstoffs (20 kPa, $i=1$, weich/weich, MD)	Funktion „Dränen“	DIN EN ISO 12958

Tabelle 2: Zusätzliche wichtige Eigenschaften einer Dränmatte

Eigenschaft	relevant für	Prüfmethode
Dicke d des Filtervliesstoffs bei 2 kPa	Identifikation	DIN EN ISO 9863-1
Flächenbezogene Masse ρ_A des Filtervliesstoffs	Identifikation	DIN EN ISO 9864
Innere Kurzzeit-Scherfestigkeit (δ_p und a_p) des Geoverbundstoffs	Standsicherheit	in Anl. an DIN EN ISO 12957-1
Kurzzeit-Druckfestigkeit σ_m des Geoverbundstoffs	Identifikation	E DIN EN ISO 25619-2
Druck-Kriechverhalten des Geoverbundstoffs	Funktion „Dränen“	E DIN EN ISO 25619-1
Schutzwirksamkeit des Geoverbundstoffs	Funktion „Schützen“	in Anl. an GDA E 3-9 ^{*)}
Wasserleitvermögen q_P des Geoverbundstoffs in Abh. von Auflast, Bettung, hydraulischem Gradienten und in Abh. der Dicke bei Bettung hart/hart und des hydraulischen Gradienten	Funktion „Dränen“	DIN EN ISO 12958

^{*)} die Prüfbedingungen für die Schutzwirksamkeitsprüfung auf Oberflächenabdichtungssystemen sind bislang noch nicht festgelegt

2.2 Mindestdauerhaftigkeit

In Tabelle 3 sind Beständigkeitsprüfungen zusammengestellt, die im Rahmen der CE-Kennzeichnung als Orientierungsprüfung zur Beständigkeit durchzuführen sind. Für eine Dränmatte ist bei Einhaltung der im Leitfaden zur Beständigkeit von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten [DIN Fachbericht 86, 2000] genannten Bewertungskriterien anhand des in Tabelle 3 aufgeführten Oxidations-Prüfverfahrens eine Mindestfunktionsdauer von 25 Jahren gewährleistet.

Tabelle 3: Beständigkeit einer Dränmatte für eine Mindestfunktionsdauer von 25 Jahren

Eigenschaft	relevant für	Prüfmethode
Oxidationsbeständigkeit des Filtervliesstoffs (28 d, 110°C)*	Mindest-Beständigkeit für 25 Jahre	DIN EN ISO 13438
Oxidationsbeständigkeit des Sickerkörpers (28 d, 110°C)*		
Witterungsbeständigkeit des Filtervliesstoffs (430 h, 50 MJ/m ²)	Klassifizierung der zulässigen Freibewitterung	DIN EN 12224
Witterungsbeständigkeit des Sickerkörpers (430 h, 50 MJ/m ²)		
Mikrobiologische Best. des Filtervliesstoffs (16 Wochen, aktive Erde)	Mindest-Beständigkeit	DIN EN 12225
Mikrobiologische Best. des Sickerkörpers (16 Wochen, aktive Erde)		

* Geotextil und Sickerkörper aus PP

Über die chemische und mikrobiologische Beständigkeit hinaus ist eine Dränmatte in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen auch den Angriffen durch Pflanzenwurzeln ausgesetzt, welche die Filterfunktion des Geotextils und die Dränfunktion des Sickerkörpers beeinflussen können.

Bei der Prüfung der Witterungsbeständigkeit muss die Dränmatte eine Mindest-Restfestigkeit erreichen, damit gemäß dem Leitfaden zur Beständigkeit [DIN Fachbericht 86, 2000] eine entsprechende Freibewitterungsdauer von 2 bis 4 Wochen bis zur Überschüttung mit Rekultivierungsboden zulässig ist.

2.3 Scherverhalten

Die Scherfestigkeit innerhalb der Dränmatte (Geoverbundstoff) und die Scherfestigkeit in den

Kontaktflächen der angrenzenden Schichten muss für die Nutzungsdauer hinreichend und dauerhaft gewährleistet sein. Für den Standsicherheitsnachweis ist es ausreichend, dass im Kurzzeit-Scherversuch sowohl die „Äußere Scherfestigkeit“ in jeder Kontaktfuge d.h. zwischen Filter- bzw. Trägergeotextil und den Schichtflächen der angrenzenden Böden oder anderer Geokunststoffe als auch die „Innere Scherfestigkeit“ der Dränmatte zwischen Geotextil und Sickerkörper nachgewiesen wird. Voraussetzung hierfür ist, dass beim „Inneren Scherversuch“ die Reibpartner der Dränmatte im Versuch ohne mechanische oder thermische Verbindung oder Verklebung ausgestattet sind. Dies bedeutet, dass auch keine Nahtverbindung wirksam ist. Was die Reibung zwischen zwei Flächen aus Kunststoff – hier Geovliesstoff und Sickerkörper – anbetrifft so gibt es hierbei keine zeitlichen Alterungseffekte, die die Reibung zwischen diesen beiden Flächen negativ beeinflussen würden. Als worst case kann man, um das Langzeit-Scherverhalten abzuklären, zusätzlich Scherversuche an durch künstliche Alterung versprödeten Dränmatten durchführen. Diese werden vor dem Abscheren bis zum Stabilitätsversagen zusammengedrückt und anschließend abgeschert.

Für die Beurteilung solcher Scherversuche ist es entscheidend, dass die Dränmatte realistisch fixiert wird. Es macht keinen Sinn, die Scherkräfte z.B. mit Hilfe von Nagelplatten in die Dränmatte einzuleiten. Richtig ist es, z.B. geeignete Schmirgelleinwand zu verwenden. Auf der sicheren Seite liegen Untersuchungsergebnisse bei denen die Geotextilien der Dränmatte mit doppelseitigem Klebeband flächig befestigt wurden.

„Langzeit-Reibungsversuche“ für Dränmatten sind jedoch dann notwendig, wenn die „Innere Scherfestigkeit“ der Dränmatte im Kurzzeit-Versuch nicht mit lose aufeinandergelegten Lagen (Geotextil - Sickerkörper - Geotextil) geprüft wurde. Wenn also die Festigkeit der Verbindung zwischen GTX und Sickerkörper – z.B. bei Schweißpunkten – die Scherfestigkeit maßgeblich beeinflusst, sind entsprechende „Langzeit-Reibungsversuche“ an diesen Verbindungsstellen durchzuführen, die die Alterung der Verbindung zwischen Geotextil und Sickerkörper in zeitraffenden Versuchen berücksichtigt.

3 Alterungsverhalten

Das Alterungsverhalten der geotextilen Komponenten ist von allen Nachweisen das komplexeste Thema. Baustoffe mit ausgeprägt visko-elastischen Eigenschaften wie Kunststoffe kriechen und sind zudem Alterungsvorgängen (Spannungsrissskorrosion, morphologischen Veränderungen, Oxidation, usw.) unterworfen, die Auswirkungen auf die Festigkeit haben. Bei Dränmatten aus Polyolefinen ist der maßgebliche chemische Alterungsprozess die thermische Oxidation. Hinsichtlich der chemischen Beständigkeit zeigen

reine Polyolefin-Werkstoffe nur bei stark oxidierenden Medien Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften. Das Voranschreiten der Oxidation ist stark von der Morphologie/Kristallinität/Orientierung und den Permeationseigenschaften des oxidierenden Mediums abhängig. Ansonsten ist die chemische Beständigkeit hervorragend. Die Verwendung für Langzeitanwendungen in oxidativ wirkenden Medien ist daher eng gekoppelt an die Entwicklung von Stabilisatoren.

Für die zeitliche Einteilung der Lebensdauer von polyolefinen Geokunststoffen gibt es Modellvorstellungen. Der erste Lebensabschnitt kann als die Dauer des Verlusts an Antioxidantien betrachtet werden.

Zur allgemeinen Beschreibung der Lebensdauer t_L von polyolefinen Geotextilien verwendet Müller et al. [2003] folgende Gleichung:

$$t_L = t_{AO} + t_{Ox} (r_{O_2}, \lambda) + t_{1/2} (r_{O_2}, \lambda) \quad (1)$$

<i>mit:</i>	t_{AO}	Zeit zum Verbrauch der Antioxidantien
	t_{Ox}	Induktionszeit
	r_{O_2}	Sauerstoffkonzentration
	λ	Verstreckungsgrad
	$t_{1/2}$	Halbwertszeit

Bei Geotextilien (GTX) hängt die Lebensdauer vor allem von der Induktionszeit t_{Ox} und von der Halbwertszeit $t_{1/2}$ während des Abbaus der mechanischen Eigenschaften ab.

Der erste Lebensdauerabschnitt für den Verbrauch an Antioxidantien t_{AO} beschreibt die Zeit, die benötigt wird, um alle Antioxidantien zu verbrauchen. Die mechanischen Eigenschaften des Geokunststoffs bleiben innerhalb dieses Zeitraums unverändert. Kombinationen aus Phenolen und Phosphiten werden hauptsächlich als Oxidationsstabilisatoren eingesetzt. Deren Verlust wird bestimmt durch Migration, Auflösung, Verdampfung und Extraktion. Als Abbauzeit für diese Migrationsprozesse wurde t_{AO} definiert. Geotextilien sind wesentlich weniger (5fach) stabilisiert als z.B. Kunststoffdichtungsbahnen (KDB). Sie haben ein großes Oberflächen-Volumen-Verhältnis jedoch im Vergleich mit KDB eine erheblich stärker orientierte Morphologie.

Der zweite Lebensabschnitt (Induktionsphase) beschreibt sozusagen die Dauer des Verlusts dieser „strukturellen Stabilisierung“. Müller und Jakob [2000] benützen den Begriff der „strukturellen Stabilisierung“. Sie haben u.a. an Polypropylen-Vliesstoffen festgestellt, dass nach dem Verlust an Antioxidantien die mechanischen Eigenschaften nicht sofort dramatisch

abfallen. An Geotextilien wurden einjährige Einlagerungen im Ofen bei 80 °C durchgeführt. Hierbei handelte es sich um zwei gleiche Vliesstoffe, allerdings waren die Fasern des zweiten mit einem doppelt so hohen Stabilisatoranteil ausgestattet. Dennoch lag die Restfestigkeit nach 1 Jahr nur unwesentlich höher. Dies zeigt, dass die Stabilisierungsmenge - insbesondere bei Vliesstoffen - einen anderen Einfluss auf die Lebensdauer haben kann als z.B. bei Kunststoffdichtungsbahnen. Unter einer „guten strukturellen Stabilisierung“ ist eine ausgeprägte und homogene Orientierung der Fasern zu verstehen.

Als dritter und letzter Lebensabschnitt kann die anschließend einsetzende Oxidationsphase bis zum Abfall der Zugfestigkeit auf eine Restfestigkeit von 50% angesehen werden.

Der Verlust der Antioxidantien verläuft bei GTX verhältnismäßig rasch (einige Jahrzehnte) ab. Sie ist abhängig von der Art der Stabilisatoren und der Morphologie. Zur Verkürzung der Standzeiten bei Wasserlagerung als auch bei Ofenlagerung prüft man bei hohen Temperaturen oberhalb von 100 °C. Da sich einerseits die Wirksamkeit vieler Stabilisatoren oberhalb von 100 °C stark ändert, ist eine Arrhenius-Extrapolation allein aufgrund von Ergebnissen, die bei hohen Prüftemperaturen gemessen wurden, auf Anwendungstemperaturen nicht zulässig. Man muss folglich bei niedrigeren Temperaturen als 100 °C messen und benötigt längere Prüfzeiten. Eine Prüftemperatur von 80 °C wird als die höchste Temperatur angesehen, die eine Arrhenius-Extrapolation auf Anwendungstemperaturen möglich macht ohne dass damit morphologische Änderungen in den Materialien auftreten.

Müller et al. [2003] nennt als untere Grenze für diesen Abbauprozess eine Aktivierungsenergie von 60 kJ/mol. Unter Ansatz dieser Aktivierungsenergie von 60 kJ/mol, einer Prüftemperatur im Ofen von 80 °C und einer Anwendungstemperatur von 15 °C ergibt sich eine Mindestprüfdauer von ca. 1 Jahr, um auf eine Funktionsdauer von 100 Jahren extrapolieren zu können. Für diese Anforderung ist der Einsatz geeigneter Stabilisatorsysteme erforderlich. Die Lebensdauer auf Basis des Verbrauchs an Antioxidantien ist wesentlich kürzer. Es hat sich aber gezeigt, dass GTX – selbst nachdem die OIT-Werte (Oxidations-Induktions-Zeit) gegen Null gehen, d.h., dass keine Stabilisatoren mehr da sind – eine verhältnismäßig lange Induktionszeit aufweisen ohne dass die mechanischen Eigenschaften sich signifikant ändern. Salman et al. [1998] gibt bei einer Sauerstoffkonzentration von 21% für PP-Geotextilien eine Induktionszeit (hier $t_{AO} + t_{OX}$) von 51 Jahren an. Bei einer Sauerstoffkonzentration von 8%, wie sie von Yanful [1993] bei bodenüberdeckten Anwendungen festgestellt wurde, betrug der Wert für ($t_{AO} + t_{OX}$) 240 Jahre. Dies zeigt den Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Induktionszeit von Polyolefinen. Als Halbwertszeit $t_{1/2}$ für den Abbau der mechanischen

Eigenschaften auf 50% Restfestigkeit nennt er eine Zeit von $t_{1/2} = 38$ Jahren. Die Aktivierungsenergie gibt er mit 61 kJ/mol an. Thomas [2002] ermittelte für einen PP-Vliesstoff eine Aktivierungsenergie von 49 kJ/mol bei der Ofenalterung. Er stellte keine Induktionszeit fest.

Die Reaktionsbeschleunigung von 8% Sauerstoff auf 21% wird von Salman et al. [1998] mit einem Faktor von 5 angegeben. Bei eine zusätzliche Erhöhung des Sauerstoffdrucks auf 50 bar gibt er für die Beschleunigung der Reaktion bezogen auf eine Prüfung unter atmosphärischen Bedingungen einen Faktor von 250 an. Unter atmosphärischen Bedingungen beträgt die Sauerstoffkonzentration in der Luft ungefähr 10 mmol/l. Die Löslichkeit in Polyolefinen kann mit einigen Zehntel mmol/l angegeben werden. In 80 °C heißem Wasser ist die Sauerstoffkonzentration 0,16 mmol/l. Oxidationsprozesse in heißem Wasser laufen nur sehr verlangsamt ab. Die Induktionszeiten sind länger als im Ofen. Aber die Extraktionsverluste können erheblich sein! Es erhebt sich generell die Frage welcher Sauerstoffkonzentration Geokunststoffe im eingegrabenen Zustand dauerhaft ausgesetzt sind. Ein Sauerstoffgehalt von 8% erscheint hier realistisch.

Für lange Funktionsdauern sind Geotextilien mit „guter Stabilisierung“ nötig, bestehend aus geeigneten Antioxidantien in Kombination mit Ruß oder chemischen UV-Stabilisatoren und sie müssen mit Fasern homogener Morphologie hergestellt sein.

Zur Beschreibung der Lebensdauererwartung t_L von polyolefinen Geomatten, Noppenbahnen oder Geonetzen kann man in Anlehnung an die von Müller et al. [2003] für PEHD-Dichtungsbahnen verwendete vereinfachte Gleichung heranziehen:

$$t_L = t_{AO} + t_{Ox} \quad (2)$$

Die Lebensdauer von Geomatten (GMA) oder Geonetzen (GNT) wird aufgrund des hohen Anteils an Stabilisatoren und wegen der geometrischen Gegebenheiten (Dicke Fasern oder Stränge gegenüber gezogenen dünnen Fasern) im wesentlichen durch die Zeitanteil t_{AO} für den Verbrauch an Antioxidantien bestimmt. Geokunststoffe, die keiner Verstreckung nach dem Extrusionsprozess unterzogen wurden und dadurch keine orientierte Struktur aufweisen, sind z.B. Kunststoffdichtungsbahnen und auch Geomatten und Geonetze. Aufgrund der fehlenden Verstreckung weisen diese Produkte keine „strukturelle Stabilisierung“ auf. Dafür sind sie in hohem Maße mit Langzeitstabilisatoren (Antioxidantien, Ruß und zusätzlichen UV-Stabilisatoren) ausgerüstet. Eine Festlegung dieses Zeitraums kann über die chemische Analyse der Stabilisatoranteile erfolgen. Die Veränderung der OIT-Werte ist für eine

Bestimmung der Stabilisatoranteile nicht prinzipiell geeignet. Je nach Zusammensetzung und Art der Stabilisierung kann es über die OIT-Werte zu einer falschen Bewertung der Stabilisatoranteile kommen. Stabilisatoren haben in verschiedenen Temperaturbereichen unterschiedliche Wirkung, da die stabilisierenden chemischen Reaktionen temperaturabhängig sind.

Nach Abbau aller Antioxidantien beginnt für diese Produkte die Oxidationsphase des Polymers. Diese Phase ist nur schwer sicher zu ermitteln, da z.B. der OIT-Wert u.U. die Situation nicht richtig erfasst. Andere Nachweise die über den Nachweis der extrahierten Stabilisatoren arbeiten, können ebenfalls versagen, weil die Stabilisatoren durch Reaktion mit dem Polymer nicht mehr extrahierbar sind. Ferner reagieren die primären Stabilisatoren zu einer Vielzahl noch aktiver Produkte, die beim chemischen Nachweis Probleme bereiten. Hier können auch Modellreaktionen wie der ICOT-Test der BAM helfen.

Das technische Ende im Sinne von Lebensdauer ist bei Erreichen einer 50%igen Veränderung der mechanischen Eigenschaft festgelegt. Diese Phase dauert auf die Anwendungstemperaturen von Geokunststoffen bezogen zusätzlich beträchtliche Zeiträume [Hsuan/Koerner, 1998].

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Abschätzung der Lebensdauer ist die langfristig wirkende Anwendungstemperatur. Mit zunehmender Temperatur geht die Lebensdauer beträchtlich zurück (Tabelle 4).

Tabelle 4: Funktionsdauern in Abhängigkeit der Aktivierungsenergie

Aktivierungsenergie E_A [kJ/mol]	Prüfdauer t_p [Jahre]	Anwendungstemperatur ϑ [°C]	Abgeleitete Funktionsdauer t_f [Jahre]
60	1	15	100
		20	65
		25	43
50	1	15	46
	1	20	32
	4,3	25	100

Prüftemperatur $\vartheta_p = 80$ °C

Im Rahmen der europäischen Normung wird vorgeschlagen, die Untersuchung der Oxidationsbeständigkeit insbesondere für Geotextilien und geotextilverwandte Produkte bei Wasserlagerung unter erhöhter Sauerstoffkonzentration im Hochdruck-Autoklaven

durchzuführen. Bei diesem Verfahren kann die limitierende Sauerstoffdiffusion weitgehend vermieden und gleichzeitig der Einfluss der Eluierbarkeit von Stabilisatoren und der Einfluss der Sauerstoffdiffusion studiert werden. Als Kriterium gilt eine Restfestigkeit von 50% nach der Inkubation. Im Rahmen der CE-Kennzeichnung müssen die geosynthetischen Komponenten der Dränmatte die Anforderungen der DIN EN 13252 nach den Prüfbedingungen der DIN EN ISO 13438 erfüllen. Die darin beschriebenen Bedingungen erlauben eine Aussage über eine Nutzungsdauer von 25 Jahren. Für längere Lebensdauerprognosen sind die entsprechenden Prüfbedingungen noch zu entwickeln. Das Prüfverfahren bietet die Möglichkeit sowohl über die Variation der Prüftemperatur als auch über den Sauerstoffdruck ein zeitraffendes Oxidationsverhalten zu simulieren.

Die Versuche in Hochdruck-Autoklaven bei erhöhtem Sauerstoffdruck zeigen im Gegensatz zu Prüfungen in Wärmeöfen keinen Einfluss der Faseroberfläche auf das Oxidationsverhalten. Die Oxidations-Stabilisatoren werden rascher verbraucht, d.h. der oxidative Abbau wird beschleunigt. Die Migration von Antioxidantien im Material bleibt im Vergleich zu atmosphärischen Inkubationen nahezu unverändert. Die Extraktion wird jedoch beschleunigt. Die Prüfung im Hochdruck-Autoklaven ist gerade zum Vergleich sehr unterschiedlicher Materialien, d.h. sehr unterschiedlicher Oberflächen-Volumen-Verhältnisse, gut geeignet!

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die für den Nachweis der Dauerhaftigkeit notwendigen Prüfungen an jeder Einzelkomponente einer Dränmatte zusammengestellt. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich Lebensdauern von z.B. 100 Jahren abschätzen.

Tabelle 5: Untersuchungsprogramm zur Eignungsbeurteilung der Alterung von Dränmatten

Eigenschaft	Prüfmethode
Alterungsverhalten in Wasser bei $\vartheta = 80^{\circ}\text{C}$ (Simulation einer Auslaugung von Antioxidantien) <u>Prüfdauer:</u> bis zu $t = 1$ Jahr	in Anl. an DIN EN 14415 ^{*)}
Alterungsverhalten im Umluftwärmeofen bei $\vartheta = 80^{\circ}\text{C}$ (Simulation einer thermischen Oxidation) <u>Prüfdauer:</u> bis zu $t = 1$ Jahr	in Anl. an DIN EN ISO 13438 ^{*)} (Methode A oder B)
Alterungsverhalten im Hochdruck-Autoklav (Simulation von Auslaugung und Oxidation) bei $\vartheta = 80^{\circ}\text{C}$; $p = 50$ bar, $p = 20$ bar, $p = 10$ bar bei $\vartheta = 70^{\circ}\text{C}$; $p = 50$ bar und bei $\vartheta = 60^{\circ}\text{C}$; $p = 50$ bar, <u>Prüfdauer:</u> bis zum Unterschreiten der Restfestigkeit von 50%	in Anl. an DIN EN ISO 13438 ^{*)} (Methode C)

^{*)} OIT-Werte, Stabilisatorgehalte und mechanische Kennwerte nach unterschiedlichen Einlagerungszeiten bestimmen

4 Langzeit-Wasserableitvermögen

Gartung und Zanzinger [1999] fassen alle Einflussfaktoren für das Wasserableitvermögen von Dränmatten in Form von Abminderungsfaktoren zusammen. Diese Einflussfaktoren sind:

- Bettung der Dränmatte (inklusive Kriechverformungen des Geotextils),
- Kriechverformungen des Sickerkörpers,
- Einbaubeanspruchungen der Dränmatte,
- Anschlüsse, chemische Einflüsse und biologische Einflüsse.

Das Wasserableitvermögen einer Dränmatte wird durch die Dicke des dränwirksamen Querschnitts bestimmt. Dieser ist Einwirkungen durch Druck- und Schubspannungen und durch Bodenbettung [Alexiew 1993a, 1993b] ausgesetzt. Das Langzeitverhalten wird maßgeblich durch das Kriechen des Sickerkörpers unter Druckbelastung bestimmt.

Anhand von extrapolierten Dicken aus Druck-Kriechversuchen mit oder ohne Schubbelastung lässt sich mit Hilfe des Zusammenhangs zwischen Wasserableitvermögen und Dicke das entsprechende „Langzeit-Wasserableitvermögen“ für eine Dränmatte mit beidseitig starrer Bettung für beispielsweise 100 Jahre abschätzen [Zanzinger 2000].

Zusätzlich ist das „Langzeit-Wasserableitvermögen“ an Dränmatten bei weicher Bettung zu ermitteln. Böttcher [2006] stellt Langzeit-Versuche vor, bei denen das „Langzeit-Wasserableitvermögen“ direkt - nachdem die Messproben über lange Zeiträume Druck-Kriechbeanspruchungen mit weicher Bettung ausgesetzt waren - ermittelt wird. Dabei wird nicht allein das Druck-Kriechverhalten des Sickerkörpers geprüft sondern auch das Kriechverhalten des Filtergeotextils. Zur Prüfung des Wasserableitvermögens werden dieselben Messproben in regelmäßigen Zeitabständen aus der Belastungseinrichtung genommen werden und anschließend wieder weiterbelastet. Derartige Versuche lassen sich ideal für Dimensionierungszwecke verwenden. Das „Langzeit-Wasserableitvermögen“ kann anhand solcher Untersuchungen für jede Nutzungsdauer bestimmt werden. Allerdings sind die Versuche sehr zeitintensiv.

Müller [2005] schlägt für die Bestimmung des „Langzeit-Wasserableitvermögens“ für die Bettungsbedingung hart/weich oder weich/weich einen anderen Ansatz vor: Auf Basis von Druck-Kriechversuchen zwischen starren Platten wird aus einjährigen Druck-Kriechversuchen die Dicke für eine Dauer von beispielsweise 100 Jahren abgeleitet. Daraufhin wird in einem Kurzzeit-Druckversuch zwischen starren Platten die Druckspannung ermittelt, unter der die Dränmatte kurzfristig auf diese „Langzeit-Dicke“ zusammengedrückt werden kann. Mit dieser

Druckspannung soll anschließend bei Bettung weich/weich oder hart/weich das Wasserableitvermögen an anderen jungfräulichen Messproben bestimmt werden. Weder dem Geotextil noch dem Sickerkörper wird dabei Zeit gegeben, sich behutsam auf die Belastung einzurichten. Ob diese Vorgehensweise dem Langzeit-Bettungseinfluss gerecht wird, muss erst die Erfahrung mit diesem Ansatz zeigen. Dies sollte in einem Forschungsprojekt systematisch geklärt werden.

In anderen Fällen wurden unter mäßig erhöhten Druckspannungen parallel Druck-Kriechversuche zwischen starren Platten (Messprobe A) und zwischen Platten mit Schaumgummizwischenlagen (Messprobe B) über 1 bis 2 Wochen durchgeführt. Zum Zeitpunkt des sich Einstellens der vorher festgelegten „Langzeit-Dicke“ bei der Messprobe A wurde das Wasserableitvermögen an der Messprobe B mit weicher Bettung bestimmt.

Unter Zugrundelegung mehrerer Versuchsvarianten (Versuchsvariante „Böttcher“ mit Druck-Kriechversuchen bei weicher Bettung, Vorgehensweise „Müller“ mit kurzzeitiger Aufbringung hoher Belastung unter weicher Bettung oder einer Zwischenlösung) lässt sich am besten eine fundierte Beurteilung des „Langzeit-Wasserableitvermögens“ einer Dränmatte unter Bettungseinfluss vornehmen. In Tabelle 6 ist ein Prüfprogramm vorgeschlagen.

Tabelle 6: Prüfprogramm zur Eignungsbeurteilung des „Langzeit-Wasserableitvermögens“ von Dränmatten

Eigenschaft	Prüfmethode
Wasserableitvermögen (direkte Methode) an Messproben, die unter weicher Bettung vorbelastet wurden <u>Belastung:</u> $\sigma = 20 \text{ kPa}$ und 50 kPa <u>Bettung:</u> weich/weich und hart/weich <u>Prüfdauer für die Vorbelastung:</u> bis zu $t = 1 \text{ Jahr}$	in Anl. an DIN EN ISO 12958
Wasserableitvermögen (indirekte Methode) an Messproben, die nicht vorbelastet wurden <u>Belastung:</u> Normalspannung, die zwischen starren Platten kurzzeitig eine prognostizierte Restdicke nach 100-jähriger Belastung unter $\sigma = 20 \text{ kPa}$ und 50 kPa erzeugt <u>Bettung:</u> weich/weich und hart/weich <u>Prüfdauer:</u> 6 min	in Anl. an DIN EN ISO 12958

Grundvoraussetzung für jede Prüfung des „Langzeit-Wasserableitvermögens“ ist jedoch eine genaue Kenntnis des Druck-Kriechverhaltens der Dränmatte - auch unter dem Einfluss von Schubbeanspruchungen und Alterungseinflüssen. Darauf und auf die Grenzen der Extrapolierbarkeit von Messergebnissen wird im nächsten Kapitel detailliert eingegangen.

5 Druck-Kriechverhalten mit und ohne Schubbelastung

Das Verhalten des Sickerkörpers unter Druckbelastung hat zentrale Bedeutung für das Wasserableitvermögen von Dränmatten. Der Sickerkörper in einem Deponie-Oberflächenabdichtungssystem ist einem Kriechen unter Druck- und Schubbeanspruchung unterworfen. Dieses hat unmittelbar Rückwirkungen auf das Wasserableitvermögen, weil durch die Druckeinwirkung der dränwirksame Querschnitt last- und zeitabhängig verringert wird. Zur Abklärung des Langzeit-Druckkriechverhaltens ist eine Reihe von unterschiedlichen Untersuchungen nötig. Tabelle 7 stellt ein umfassendes Versuchsprogramm für Dränmatten zusammen, das die Aspekte des Kriechens allein und des Kriechens unter Alterungseinfluss abdeckt.

Tabelle 7: Prüfprogramm zur Eignungsbeurteilung des „Langzeit-Druckkriechverhaltens“ von Dränmatten

Eigenschaft	Prüfmethode
Zeitstand-Druckkriechverhalten <u>Belastung:</u> σ variabel, $\tau = 0$ kPa <u>Prüfdauer:</u> bis zum Versagen (maximal bis 10.000 h)	in Anl. an DIN EN ISO 25619-1 (konventionelle Methode)
Druck-Kriechverhalten mit Schubbeanspruchung <u>Belastung:</u> $\sigma = 20$ kPa und 50 kPa, $\tau = 0,4 \times \sigma$ <u>Prüfdauer:</u> $t = 10.000$ h	DIN EN ISO 25619-1 (konventionelle Methode)
Druck-Kriechverhalten mit SIM-Verfahren ($\vartheta = 23^\circ\text{C}$ bis 80°C) <u>Belastung:</u> $\sigma = 20$ kPa und 50 kPa, $\tau = 0$ kPa <u>Prüfdauer:</u> $t = 1$ d	in Anl. an ASTM D6992 (Stepped Isothermal Method)
Druck-Kriechverhalten mit SIM-Verfahren ($\vartheta = 23^\circ\text{C}$ bis 80°C) mit Schubbeanspruchung <u>Belastung:</u> $\sigma = 20$ kPa und 50 kPa, $\tau = 0,4 \times \sigma$ <u>Prüfdauer:</u> $t = 1$ d	in Anl. an ASTM D6992 (Stepped Isothermal Method)
Druck-Kriechverhalten mit Schubbeanspruchung bei erhöhter Temperatur in Luft <u>Belastung:</u> $\sigma = 50$ kPa, $\tau = 20$ kPa, <u>Prüfdauer:</u> $t = 1$ Jahr	in Anl. an DIN EN ISO 25619-1 ¹⁾ unter oxidativer Alterung (in Luft)
Druck-Kriechverhalten mit Schubbeanspruchung bei erhöhter Temperatur unter Wasser <u>Belastung:</u> $\sigma = 50$ kPa, $\tau = 20$ kPa, <u>Prüfdauer:</u> $t = 1$ Jahr	in Anl. an DIN EN ISO 25619-1 ¹⁾ unter Alterungseinfluss (Auslaugung von Stabilisatoren in Wasser)

¹⁾ OIT-Werte und Stabilisatorgehalte bestimmen

Auf Basis derartiger Untersuchungsergebnisse und dem Zusammenwirken mit angepassten hydraulischen Untersuchungen lassen sich abgesicherte Prognosen für das „Langzeit-

Wasserableitvermögen“ abgeben.

5.1 konventionelle Druck-Kriechversuche

Bei klassischen Druck-Kriechversuchen [DIN EN ISO 25619-1] werden die Probekörper standardmäßig bis zu 1.000 Stunden bei einer Raumtemperatur von 20°C geprüft, um das zeitabhängige Stauchungsverhalten des Sickerkörpers beschreiben zu können. Eine zeitliche Extrapolation des Stauchungsverhaltens ist über eine bis maximal zwei Zeitdekaden hinweg zulässig (Bild 5) – vorausgesetzt der Sickerkörper weist ein kontinuierliches zeitabhängiges Druck-Kriechverhalten auf [Berkhout 1994, Zanzinger/Berkhout 1995]. Die Ergebnisse eines 10.000 Stunden-Versuchs ließen sich somit auf maximal 114 Jahre extrapolieren.

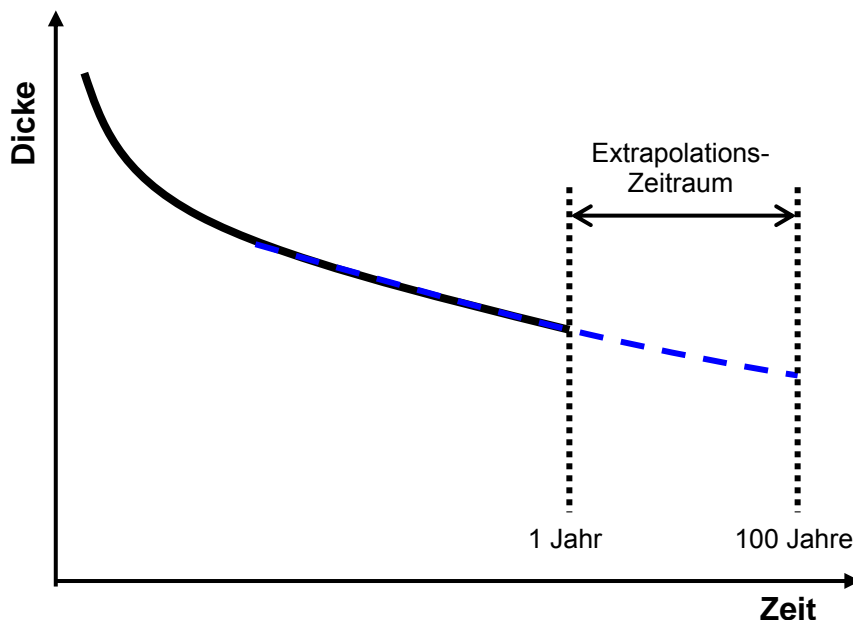


Bild 5: Extrapolation des Kompressionsverhaltens einer kompressiblen Dränmatte (Extrapolation ist gerechtfertigt!)

Die Schwierigkeit in der Beurteilung des Druck-Kriechverhaltens unterschiedlicher Dränmatten mit verschiedenartigen Sickerkörpern liegt aber darin, dass allein anhand des Verlaufs der Druck-Kriechkurve – auch nach 10.000 Stunden – nicht darauf geschlossen werden darf, dass innerhalb des extrapolierbaren Zeitraums kein Zeitstandsversagen des Sickerkörpers eintritt.

Bei den in der Vergangenheit häufig eingesetzten Dränmatten aus Wirrgelegen konnte noch davon ausgegangen werden, dass ein kontinuierliches Druck-Kriechverhalten vorliegt (Bild 5). Diese Dränmatten zeigen auch beim Druckversuch ein kontinuierliches Zusammendrücken (Bild 6). Auch Geonetze haben meist ein kontinuierliches Druckstauchungsverhalten. Daher ist

auch bei Geonetzen ein kontinuierliches Druck-Kriechverhalten zu erwarten. In diesen Fällen wäre ein Extrapolieren der Druck-Kriechkurve zulässig.

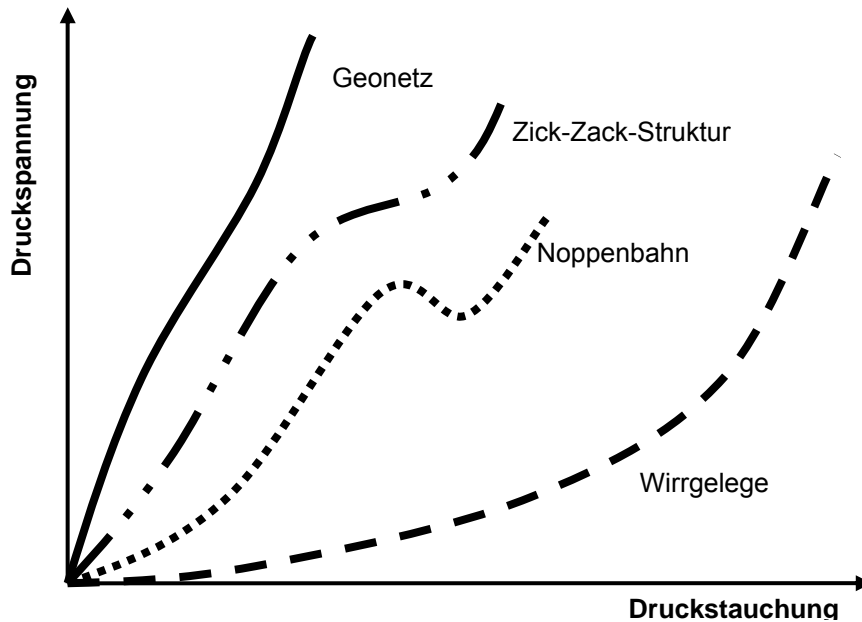


Bild 6: typisches Druck-Stauchungs-Verhalten von vier unterschiedlichen Sickerkörpern [DIN EN ISO 25619-2]

Ganz anders sieht es aber bei Dränmatten aus, die mit Sickerkörpern ausgestattet sind, welche zum Stabilitätsversagen neigen. Diese zeigen bereits beim Druckversuch, dass beim Erreichen der Druckfestigkeit die Struktur einknickt. Dieses spannungsabhängige Versagen zeigt sich auch bei niedrigeren konstanten Druckspannungen nach entsprechend langen Zeiträumen. Man spricht in dem Fall vom Zeitstandversagen unter Druckbeanspruchung (Bild 7).

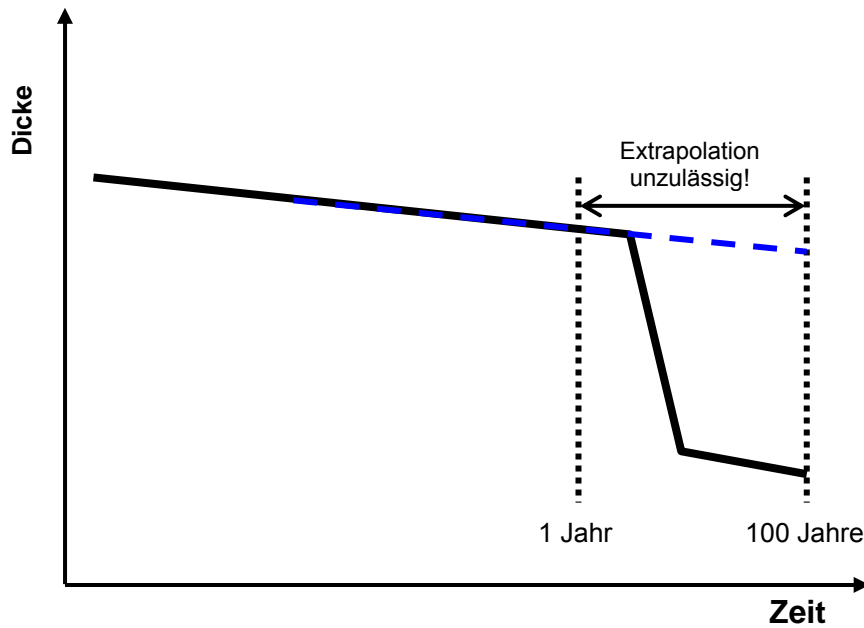


Bild 7: Kompressionsverhalten einer Dränmatte mit Zeitstandversagen (Dränmatte zeigt ein Stabilitätsversagen innerhalb des Extrapolationszeitraums. Extrapolation ist in diesem Fall unzulässig!)

Typische Vertreter dieses Verhaltens sind Noppenbahnen aber auch die druckstabileren Geomatten mit Wellen- oder Zick-Zack-Struktur knicken nach entsprechenden Belastungsdauern ein (Bild 8). Dies tritt umso früher ein je höher die Belastung ist und je größer die Knicklänge des auf Druck beanspruchten Kunststoffelements ist.

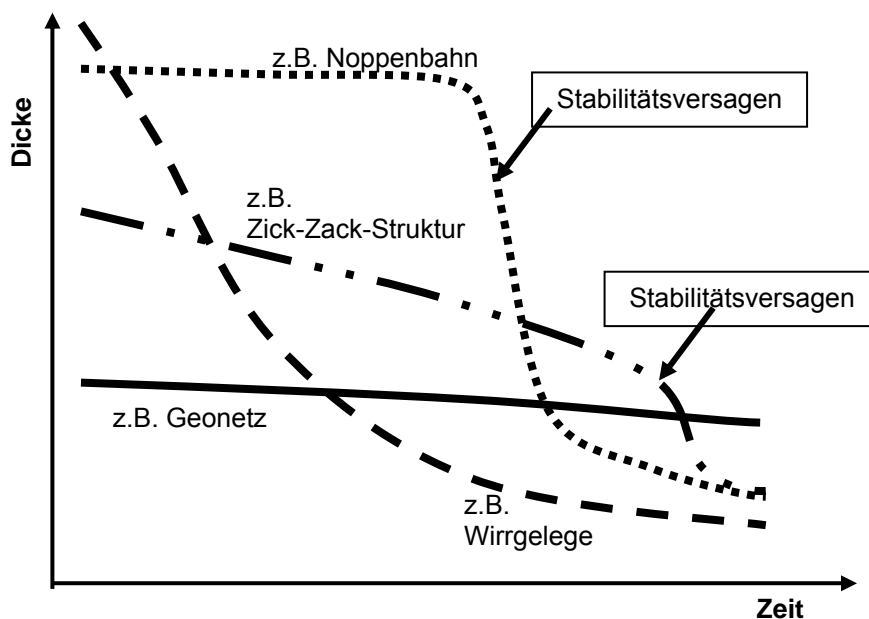


Bild 8: typisches Druck-Kriechverhalten von 4 unterschiedlichen Sickerkörpern

Selbst bei den weitaus druckstabileren Geonetzen kann bei entsprechender Belastung ein Umknicken der oberen Stränge oder Rippen eintreten [Yeo/Hsuan 2007]. Dies tritt vornehmlich dann auf wenn die oberen Stränge bereits produktionsbedingt eine leichte Neigung aufweisen (Bild 9). Kommt noch eine schräg wirkende Kraft in Richtung dieser Neigung hinzu, wird dieses Umknicken noch beschleunigt.

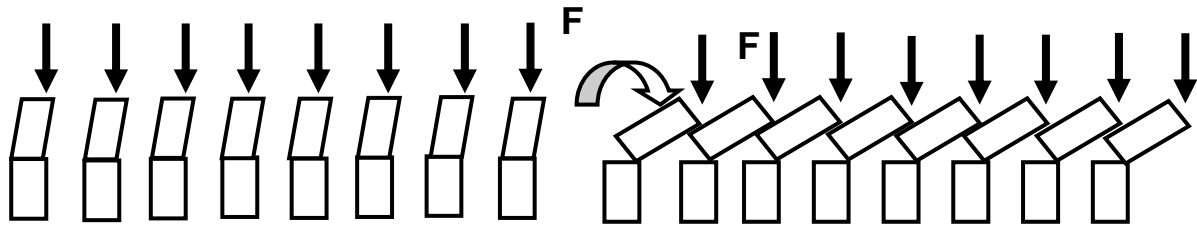


Bild 9: Querschnitt eines Geonetzes: Umknicken der oberen Stränge (oder Rippen) infolge Druckbeanspruchung

Bei Dränmatten mit einem Zeitstandsversagen ist somit die Extrapolation der Druck-Kriechkurven durch den jeweiligen Versagenszeitpunkt begrenzt. Somit ist die Kenntnis des Zeitstandsversagens Voraussetzung für die Extrapolation von Druck-Kriechkurven von zum Stabilitätsversagen neigenden Dränmatten. Bei der Erarbeitung der „Richtlinie für den Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Deponie-Oberflächenabdichtungen“ [BAM 2003] im Jahr 2003 standen für die dort festgelegten Beurteilungskriterien zum Kriechverhalten noch kompressible Dränmatten Pate, da bis dahin auf deutschen Deponien auch hauptsächlich die kompressiblen Dränmatten zum Einsatz kamen. Beurteilt wurden von der BAM auf Basis der BAM-Prüfrichtlinie aber anschließend druckstabile Dränmatten, die ein Zeitstandsversagen aufweisen. Ohne die Kenntnis des jeweiligen Stabilitätsversagens (Kollabierens) einer Dränmatte unter Druckbeanspruchung darf aber keine Beurteilung der Langzeit-Dicke auf Basis reiner Druck-Kriechversuche erfolgen.

Neben den Druck-Kriechversuchen mit reiner Normalspannungsbelastung sind insbesondere bei Verlegung der Dränmatten auf geneigten Flächen Druck-Kriechversuche mit Schubbeanspruchung notwendig. Auch hierbei ist die zusätzliche Kenntnis des Zeitstandsverhaltens notwendig, um die Extrapolation der Druckstauchung und der Schubverformung wie z.B. in Bild 10 auf 100 Jahre verantworten zu können.

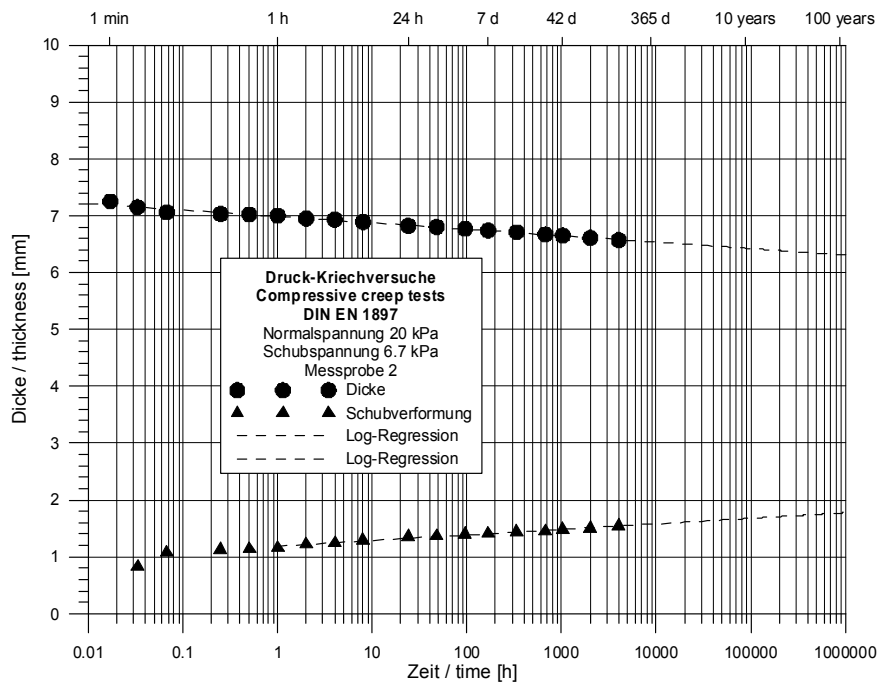


Bild 10: Druck-Kriechverhalten einer Dränmatte unter Druck- und Schubbelastung [DIN EN ISO 25619-1] bei Raumtemperatur (konventionelle Methode)

5.2 Zeitstand-Druckkriechversuche

Sickerkörper mit einem diskontinuierliches Druck-Stauchungsverhalten weisen unter hohen Druckspannungen ein Stabilitätsversagen auf. Typische Druck-Stauchungs-Kurven haben entweder ein Maximum oder es stellt sich die Kurzzeit-Druckfestigkeit am „Knickpunkt“ einer ausgeprägten Steifigkeitsänderung dar (Bild 11). Dies tritt auch unter niedrigeren Lasten nach entsprechend langen Zeiträumen ein. Der Versagenszeitpunkt wird wiederum an einem „Knickpunkt“ der progressiven Dickenabnahme bestimmt (Bild 12).

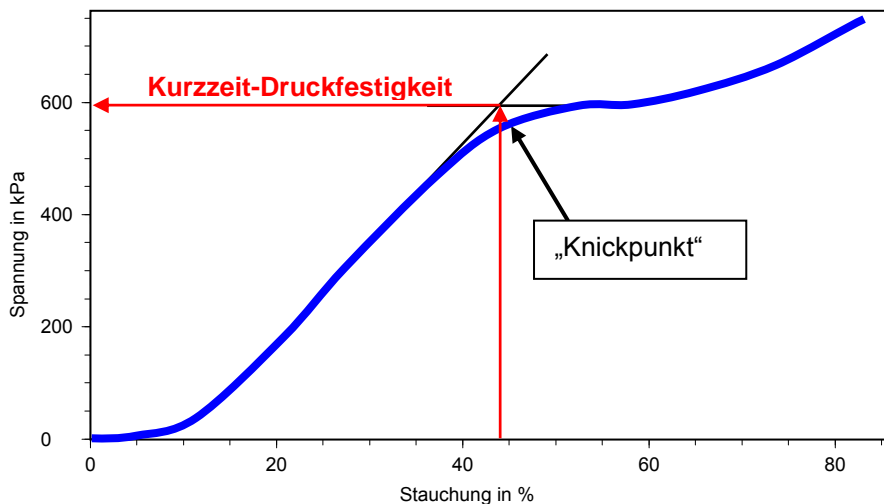


Bild 11: Stauchungsverhalten einer Dränmatte mit ausgeprägter Steifigkeitsänderung

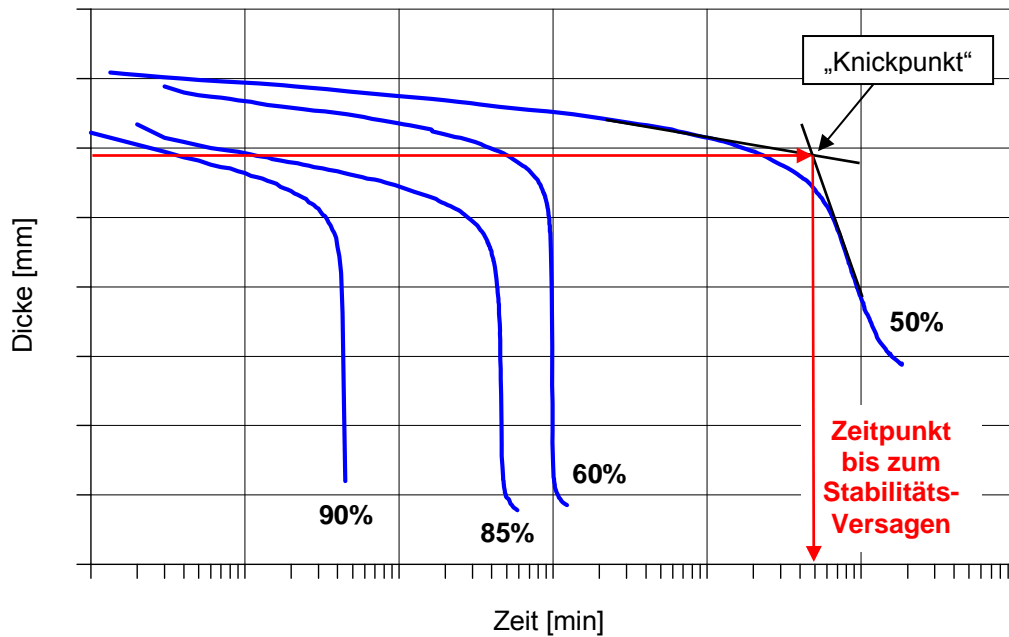


Bild 12: Zeitstand-Versagen einer Dränmatte bei verschiedenen Auslastungsgraden (90%, 85%, 60% und 50% der Kurzzeit-Druckfestigkeit), Beispiel

Mit Zeitstand-Druckkriechversuchen unter Raumtemperatur und erhöhter Druckbelastung kann daher nachgewiesen werden, dass der Sickerkörper bei entsprechenden Druckspannung (z.B. 50 kPa) innerhalb des jeweiligen Extrapolationszeitraums (z.B. 114 Jahre) kein Stabilitätsversagen zeigt (Bild 13).

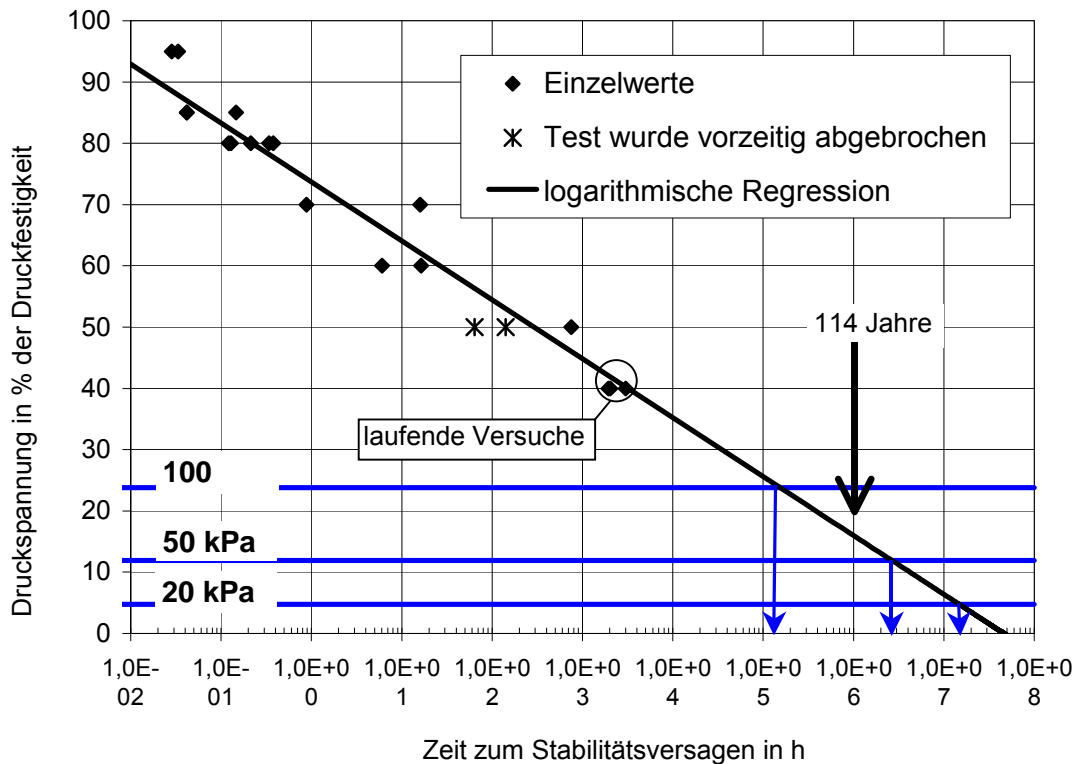


Bild 13: Zeitstand-Druckkriech-Diagramm einer Dränmatte, Beispiel

Zeitstandversuche werden unter hohen Normalspannungen durchgeführt. Diese variieren zwischen Auslastungsgraden von 50% bis 95% der Kurzzeit-Druckfestigkeit. Die Einzelversuche laufen bis zum Versagen der Messproben. Es wird jeweils der Versagenszeitpunkt bestimmt (Bild 12). In einem Zeitstand-Diagramm werden alle Wertepaare aus Bruchzeitpunkt und zugehöriger Druckspannung aufgetragen (Bild 13). Mit Hilfe einer Regressionsanalyse lassen sich daraus die Bruchzeitpunkte für jede erforderliche Druckspannung ableiten. Aus dem Zeitstand-Druckkriech-Diagramm kann abgelesen werden nach welcher Belastungsdauer der Sickerkörper unter einer vorgegebenen Druckbelastung kollabiert [SKZ 2006].

5.3 Druck-Kriechversuche mit zeitraffenden Verfahren

Kriechversuche bei Raumtemperatur dauern sehr lange. Um die Untersuchung des Kriechverhaltens zu beschleunigen, bedient man sich der Methodik, die Kriechversuche bei höheren Temperaturen durchzuführen. Es werden mehrere Messproben derselben Belastung ausgesetzt und bei verschiedenen Temperaturen geprüft.

Die Prüftemperaturen sind zum einen begrenzt durch die Glasübergangstemperatur des Polymers (75°C bei Polyester, -15°C bis -10°C bei Polypropylen und -100°C bei Polyethylen) und zum andern durch die Schmelztemperatur.

Beim früheren Verfahren der Zeit-Temperatur-Verschiebung (time-temperature-superposition, TTS) werden die bei unterschiedlichen Temperaturen gemessenen Dehnungen direkt auf der logarithmisch aufgetragenen Zeitachse verschoben und für gleiche Dehnungswerte aneinander gefügt. Dadurch erhält man eine Zeitraffung für die niedrigste Referenztemperatur. Alternativ kann der Kriechmodul auf der Zeitachse verschoben werden nachdem dieser vorher aus der Dehnung berechnet wurde. Dieser Modul wird dann anschließend wieder in Dehnung umgewandelt.

Mit der „TTS-Methode“ lässt sich folglich durch die Erhöhung der Temperatur an verschiedenen Messproben die Prüfdauer verringern, die bei reiner Prüfung unter Raumtemperatur notwendig wäre, um lange Kriechkurven zu bekommen. Durch die Verschiebung der einzelnen Kriechmodul-Kurvenabschnitte auf der logarithmischen Zeitachse kann man die Masterkurve des Kriechmoduls direkt auf lange Zeitdauern hin extrapolieren. Ein Nachteil ist dabei, dass mehrere Messproben benötigt werden, um die Kriechkurven für verschiedene Temperaturen zu erhalten. Dabei treten natürlich Messwert-Streuungen der

einzelnen Messproben auf, die die Auswertung erschwert. Als Weiterentwicklung der „TTS-Methode“ wird deshalb in den letzten Jahren verstärkt das neue „SIM-Verfahren“ (stepped isothermal method) bei Kriechversuchen an Geokunststoffen angewendet. Das „SIM-Verfahren“ ist ein spezieller Fall der klassischen „TTS-Methode“ bei dem an ein und derselben Messprobe alle notwendigen Temperaturstufen durchfahren werden. Sowohl mit der „TTS-Methode“ als auch mit dem „SIM-Verfahren“ können neben dem Kriechverhalten der Geokunststoffe auch das Zeitstandverhalten bestimmt werden.

Die Bestimmung des Kriechverhaltens sollte sich jedoch nicht ausschließlich auf „SIM- oder TTS-Versuche“ stützen. Parallel sollten gewisse konventionelle bei Raumtemperatur durchgeführte Kriechversuche die Daten aus den zeitraffenden Versuchen unterstützen.

In der von Thornton et al. [2000] neu entwickelten „Stepped-Isothermal-Method“ werden die einzelnen Kriechversuche mit derselben Messprobe in mehreren einheitlichen Temperaturstufen bei Raumtemperatur beginnend bis auf ca. 80°C erhöht. Die Temperaturstufen und die maximalen Prüftemperaturen sind für die einzelnen Kunststoffe unterschiedlich festgelegt. Bei Zugkriechversuchen hat sich die „SIM-Methode“ schon weitgehend durchgesetzt [ASTM D6992]. In manchen Ländern stützt man sich schon ausschließlich auf „SIM-Kriechversuche“ während die ISO-Richtlinie ISO/TR 20432 empfiehlt, dass man bei Zeitstandversuchen mindestens 5 Bruchwerte aus konventionellen Zugkriechversuchen und mindestens 6 Bruchwerte aus „SIM-Versuchen“ bestimmen soll.

Narejo et al. [2004], Thornton und Sandri [2005] und Allen [2005] führten Druck-Kriechversuche mittels dem „SIM-Verfahren“ an Geonetzen durch. Sama [2006] untersuchte druckstabile Geomatten in Zick-Zack-Struktur aus PP mit dem „SIM-Verfahren“. Durch die Verwendung derselben Messprobe bei unterschiedlichen Temperaturen wird die Materialstreuung unter den Messproben eliminiert. Aus den Druckverformungen werden zuerst Druckstauchungen (Bild 22) und anschließend Kriechmodule (Bild 23) errechnet.

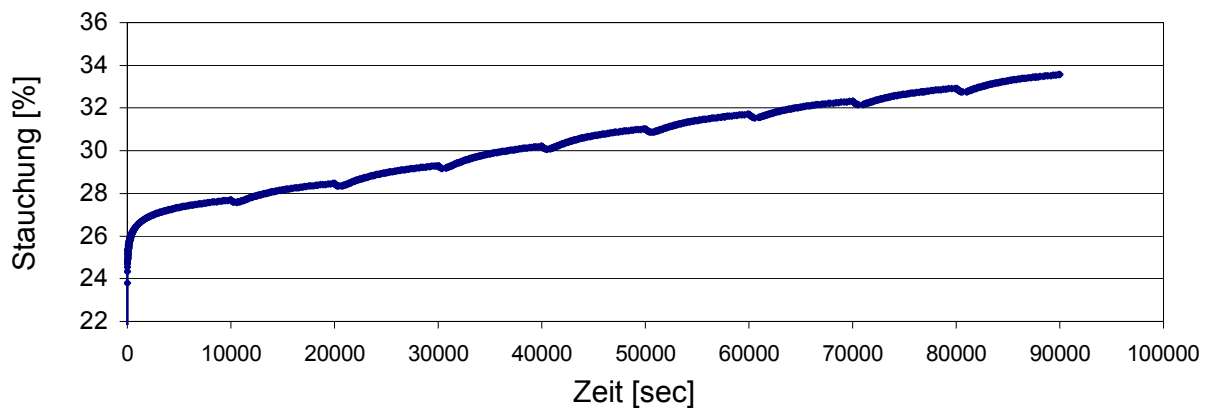


Bild 22: gemessene Druckstauchungen einer Dränmatte mit dem „SIM-Verfahren“

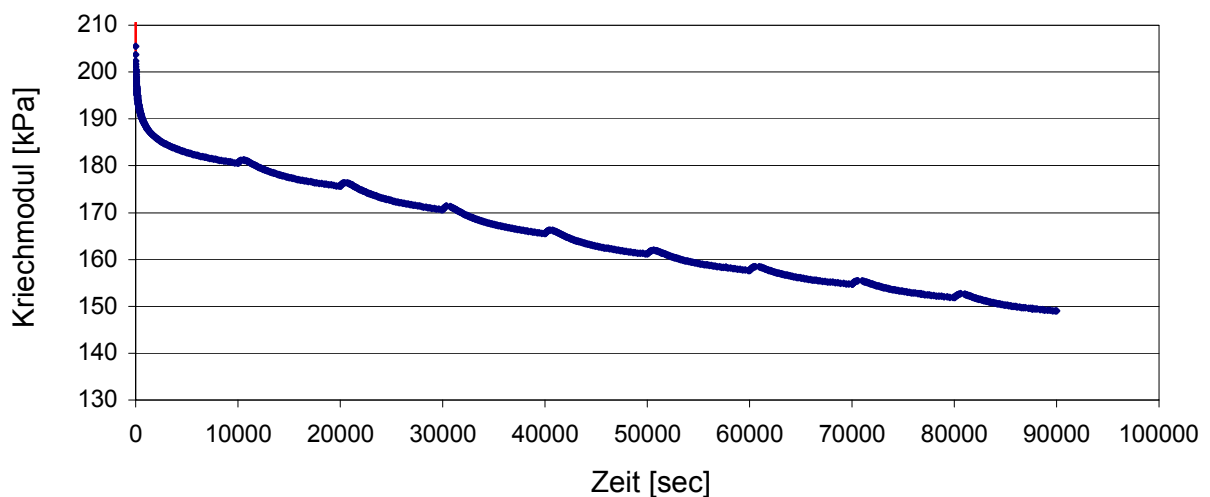


Bild 23: „SIM-Verfahren“: Kriechmodul (aus gemessenen Druckstauchungen errechnet)

Diese werden auf der logarithmischen Zeitachse so verschoben (Bild 24), dass eine fortlaufende Kurve für den Kriechmodul entsteht (Bild 25). Diese so gewonnene Masterkurve lässt sich über die Druckstauchung (Bild 26) auf die Dicke der Dränmatte zurückwandeln (Bild 27). Auf diese Weise erhält man langzeitige Kriechverläufe, die einer Zeitraffung - auf die Referenztemperatur bezogen - von 5 bis 6 Zehnerpotenzen entspricht.

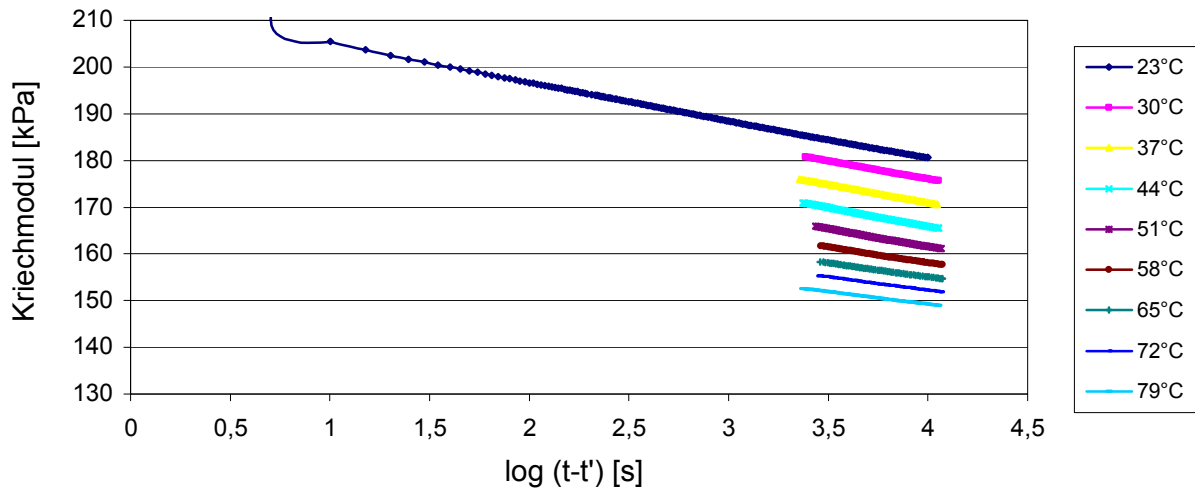


Bild 24: „SIM-Verfahren“: Kriechmodul auf logarithmischer Zeitachse aufgetragen

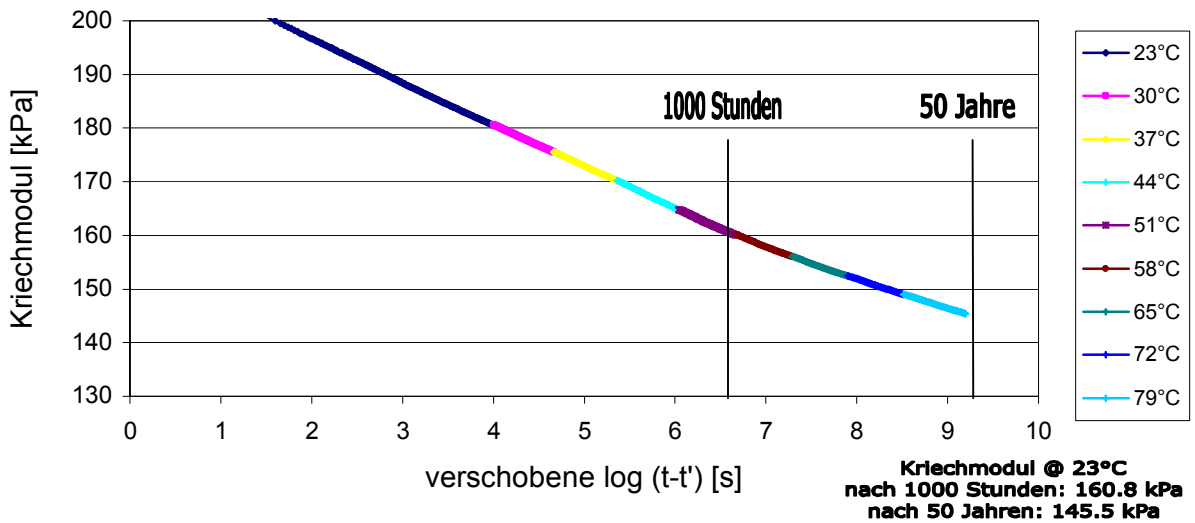


Bild 25: „SIM-Verfahren“: Kriechmodul als Masterkurve nach der Verschiebung auf der Zeitachse (Anfang jedes Abschnitts an das Ende des letzten Abschnitts angesetzt)

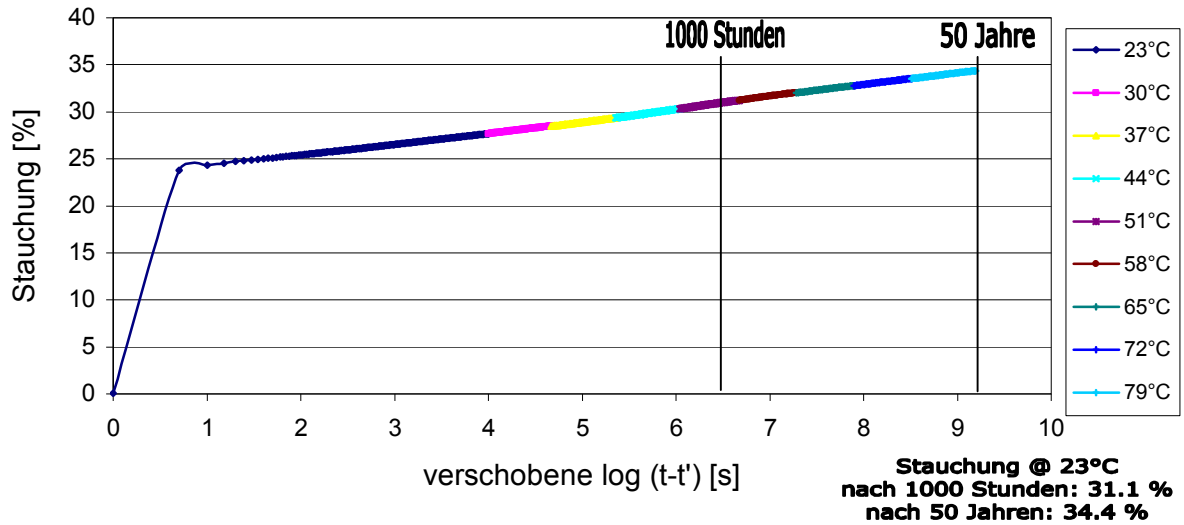


Bild 26: „SIM-Verfahren“: Druckstauchung nach Rückumwandlung

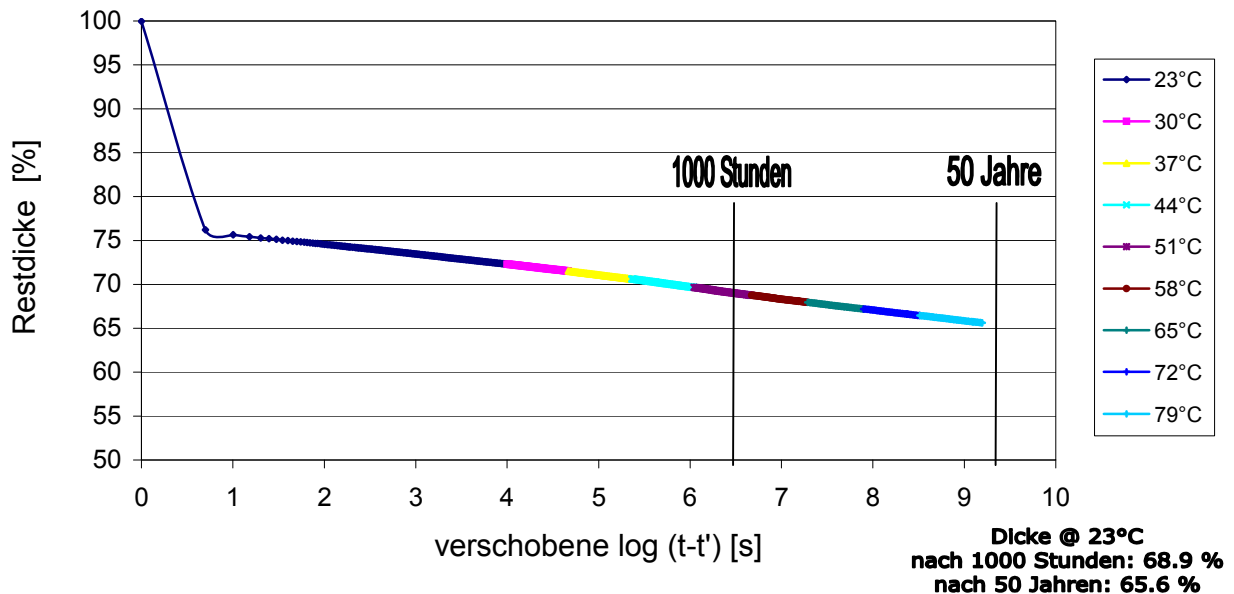


Bild 27: „SIM-Verfahren“: Restdicke nach „Zeitverschiebung“ und Überlagerung

Ein Versuch dauert 1 bis 2 Tage. Die daraus abgeleiteten Dicken entsprechen Zeiträumen von 50 bis 100 Jahren. Die Methode ist sehr schnell und erlaubt zusammen mit konventionellen Druck-Kriechversuchen eine sichere Prognose des Kriechverhaltens von Dränmatten. Sama [2006] zeigte außerdem, dass auch Zeitstand-Druckkriechversuche möglich sind. Die Prüfungen zeigten gut reproduzierbare Ergebnisse. Vergleiche mit konventionellen Druck-

Kriechversuchen zeigten eine gute Übereinstimmung. Produktentwicklungen lassen sich anhand des „SIM-Verfahrens“ schneller realisieren.

Neben den Druck-Kriechversuchen mit dem „SIM-Verfahren“ bei reiner Druckbelastung haben Yeo und Hsuan [2007] auch schon „SIM-Versuche“ mit Druck- und Schubbelastung durchgeführt. Mit einer Zunahme der Schubeinwirkung verstärkt sich das Druck-Kriechverhalten von Dränmatten und vor allem das Zeitstandverhalten wird stark beeinflusst. Sie fanden heraus, dass selbst Geonetze, die als äußerst druckstabil bekannt sind, unter der kombinierten Druck-Schubbeanspruchung im „SIM-Test“ bei entsprechender Schubbelastung weitaus früher versagen als bei reiner Normalspannungsbelastung. Als Versagensmechanismus zeigte sich, dass die oberen Stränge (oder Rippen) – produktionstechnisch mit einer leichten Neigung ausgestattet – bei Scherbeanspruchung zum Umkippen („roll-over“) neigen.

5.4 Druck-Kriechverhalten unter Alterungseinfluss

Neben der Forderung, dass innerhalb des für das Kriechverhalten zu extrapolierbaren Zeitraums kein Stabilitätsversagen auftritt gilt noch die zweite Forderung, dass durch Alterungsvorgänge keine relevanten Materialveränderungen in der Dränmatte hervorgerufen werden.

Unter Raumtemperatur laufen Alterungsprozesse am Polymer sehr langsam ab. Um Alterungsprozesse und Kriechprozesse während eines Druck-Kriechversuchs zu beschleunigen, werden zur Zeitraffung die Prüftemperaturen erhöht. Die Temperaturen werden auf Bereiche begrenzt, die keine Änderung des Kristallinitätsgrads der eingesetzten Polyolefine zulassen. Bei den Untersuchungen mit verschiedenen Prüftemperaturen zeigte sich, dass die Standzeiten der Proben meist einer Temperaturabhängigkeit nach Arrhenius folgten.

Durch die parallel zum Kriechen ablaufenden Alterungsprozesse wie z.B. die thermische Oxidation versprödet das Polymer und dadurch verändern sich die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes. Zu überprüfen ist einerseits wie sich die Alterungseinflüsse auf ein mögliches Stabilitätsversagen oder auf das Scherverhalten des Sickerkörpers auswirken. Um die Alterungseinflüsse verifizieren zu können, ist es notwendig, dass sie während eines Druck-Kriechversuchs auf die Dränmatte einwirken können. Überschlägig kann man sagen, dass bei Polyolefinen eine Temperaturerhöhung auf 80°C über einen Zeitraum von 1 Jahr etwa einer Belastung bei 15°C über etwa 100 Jahre [Müller 2004] entspricht.

Bei diesem Ansatz liegt dem Versagensmechanismus eine Aktivierungsenergie von 60 kJ/mol zu Grunde. Hält demzufolge eine Dränmatte einer Druckbeanspruchung von beispielweise 50 kPa und einer Schubbeanspruchung von 20 kPa bei einer Prüftemperatur von 80°C über einem Zeitraum von 1 Jahr ohne Stabilitätsversagen stand, so kann bei diesem Ansatz daraus gefolgert werden, dass trotz Alterung die Dränmatte unter normalen Umgebungstemperaturen von 15 °C bei einer Normalspannung von 50 kPa auf einer bis 1:2,5 geneigten Böschung die Druckstabilität auf lange Sicht erhalten bliebe (Bilder 28 und 29). Nebenbei wird dabei auch die Langzeit-Scherfestigkeit der Dränmatte überprüft.

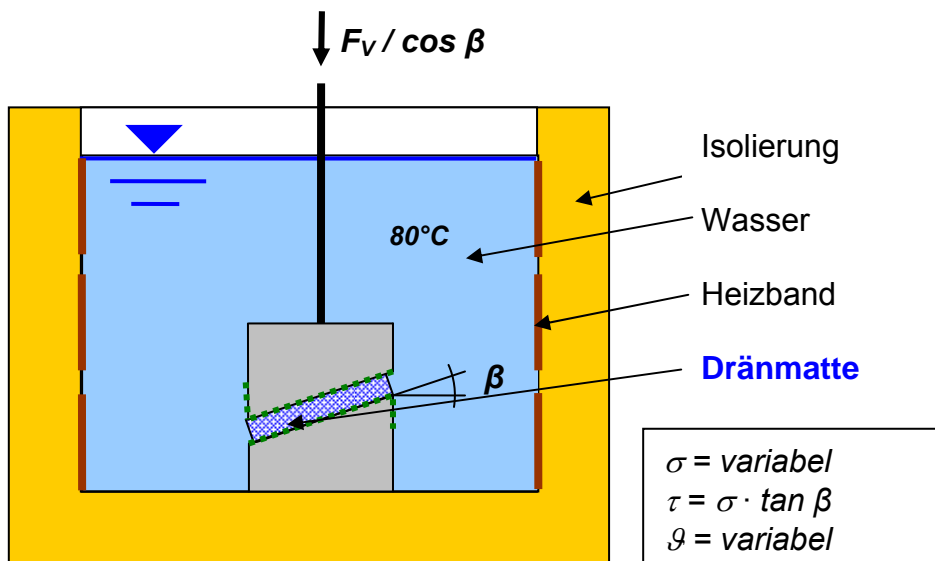


Bild 28: Druck-Kriechversuch mit Schubbelastung, in Wasser (Auslaugung von Stabilisatoren)

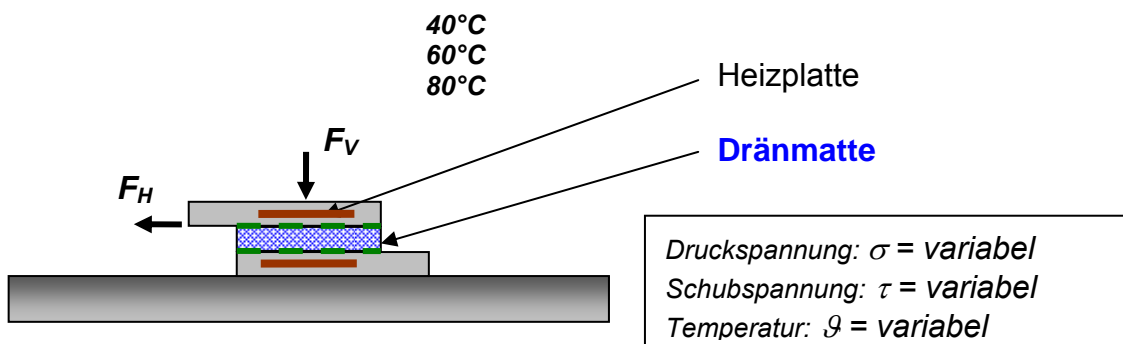


Bild 29: Druck-Kriechversuch mit Schubbelastung, in Luft (oxidative Alterung)

Die Alterung kann auf unterschiedliche Art und Weise versuchstechnisch simuliert werden. Zur Oxidation ist Sauerstoff notwendig. Dieser ist in der Luft in ausreichendem Maße vorhanden. Auch Dränmatten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen sind die meiste Zeit über von Luft umgeben. Führt man die Alterungsversuche in Wasser durch (Bild 28), so laufen die Oxidationsprozesse sehr verlangsamt ab, weil in Wasser der Sauerstoffgehalt gering ist. Insbesondere in warmem Wasser ist wenig Sauerstoff gebunden. Hingegen könnte die Migration von Antioxidantien bei der Immersion in heißem Wasser auch die kritischere Prüfung darstellen. Da Dränmatten auf Deponieoberflächen nicht dauerhaft in Wasser gelagert sind, ist eine reine Wasserlagerung hingegen eher praxisfremd. Lediglich die zur Witterungsbeständigkeit eingesetzten UV-Stabilisatoren werden infolge Migration in Wasser leichter ausgewaschen. Diese tragen aber zur Oxidationsstabilität nur untergeordnet bei.

Um die Lebensdauer der Dränmatte sicher beurteilen zu können, sind beide Mechanismen – Alterung in Luft (Oxidation) und Alterung in Wasserlagerung (Auslaugung von Stabilisatoren) – zu überprüfen. Konsequenterweise werden die Messproben in Luft gelagert und werden über Heizplatten erhöhten Temperaturen ausgesetzt (Bild 29). Die Geotextilien liegen lose über und unter dem Sickerkörper. Die Stahlplatten, über die die Normalspannungen und die Schubspannungen in die Dränmatte eingeleitet werden, sollten mit einer möglichst geringen Rauigkeit ausgestattet, die dennoch dafür ausreichend ist, um die Schubkräfte auf das Geotextil übertragen zu können. Begleitend zu den Untersuchungen werden die OIT-Werte und die Stabilisatorgehalte an der Dränmatte nach verschiedenen Einlagerungszeiten bestimmt. Mit diesen Messergebnissen kann daraufhin unter Verwendung der Arrhenius-Formel eine Lebensdauerabschätzung vorgenommen werden.

Bild 30 zeigt beispielhaft das Druck-Kriechverhalten einer Dränmatte bei zusätzlicher Schubbeanspruchung unter erhöhter Temperatur. Es zeigt den Verlauf der Dicke und der Schubverformung, die jeweils separat zu messen sind. Damit kann nachgewiesen werden, dass die Formstabilität für den Prüfzeitraum erhalten bleibt und dass die Innere Scherfestigkeit für die Standsicherheit ausreichend ist.

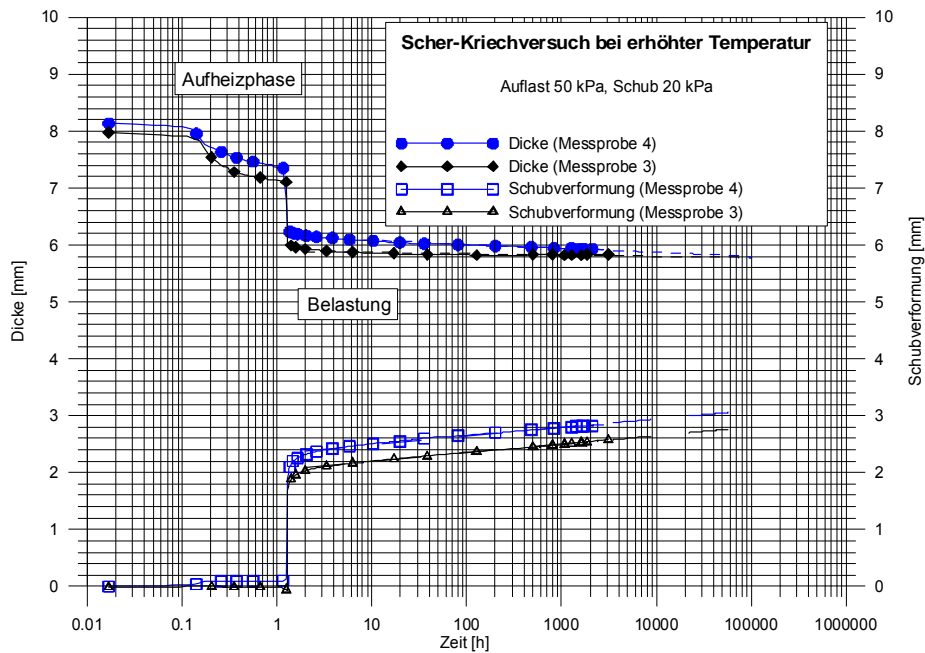


Bild 30: Scher-Kriechverhalten einer Dränmatte bei einer Druckspannung von 50 kPa und einer Schubspannung von 20 kPa unter erhöhter Lufttemperatur (Formstabilität und Innere Scherfestigkeit ist gewährleistet.)

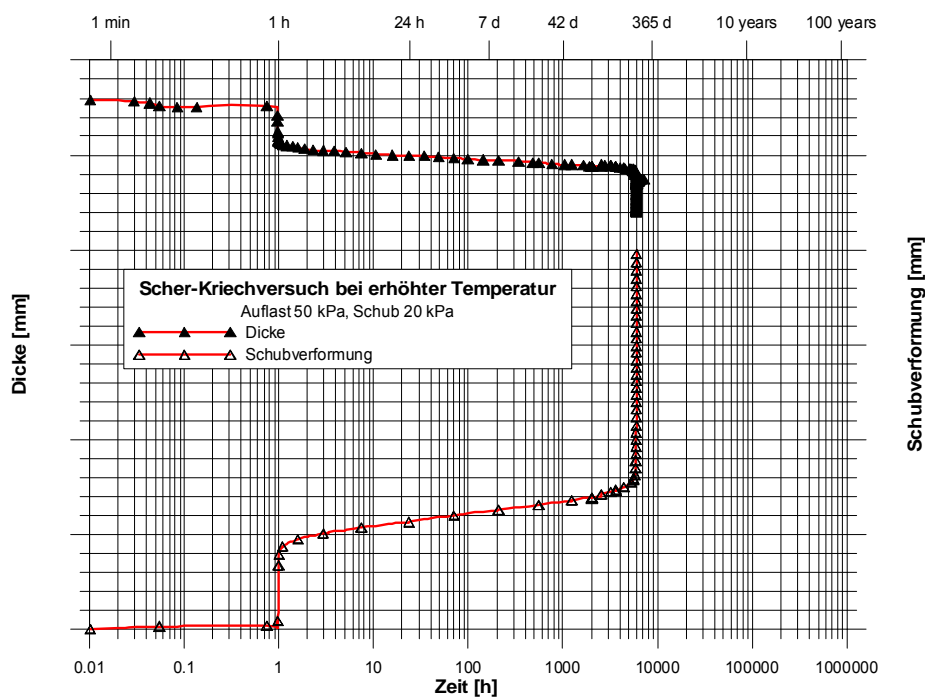


Bild 31: Dränmatte mit einem Geonetz-Sickerkörper in Produktionsrichtung gesichert! (In der Dränmatte tritt ein Stabilitäts- und Scherversagen auf!)

Der auf Bild 31 dargestellte Versagensmechanismus (Kap. 5.1, Bild 9) an einer Dränmatte mit Geonetz wurde auch an anderer Stelle von Yeo und Hsuan [2007] bei „SIM-Versuchen“ mit zusätzlicher Schubbelastung festgestellt (Kap. 5.3). In dem vorliegenden Beispiel ist es für die Standsicherheit entscheidend, ob die Rolle in Produktionsrichtung (Bild 31) entlang der Böschungsfällrichtung oder ob sie entgegen der Produktionsrichtung (Bild 32) entlang der

Böschungfallrichtung verlegt wird. Auf Bild 31 knickt die Dränmatte ein und es kommt zu einem Scherversagen. Auf Bild 32 nimmt die Dicke der Dränmatte sogar zu, weil die Rippen sich im Laufe des Versuchs aufstellen, und es tritt kein Versagen innerhalb der einjährigen Druck-Schub-Belastung unter erhöhter Temperatur ein. Die Verlegerichtung der Dränmatte kann deshalb entscheidend sein für deren Standsicherheit. Bei Druck-Kriechversuchen mit Schubbeanspruchung ohne Temperaturerhöhung (ohne Alterungseinfluss) wäre der auf Bild 31 gezeigte Versagensmechanismus nicht festgestellt worden.

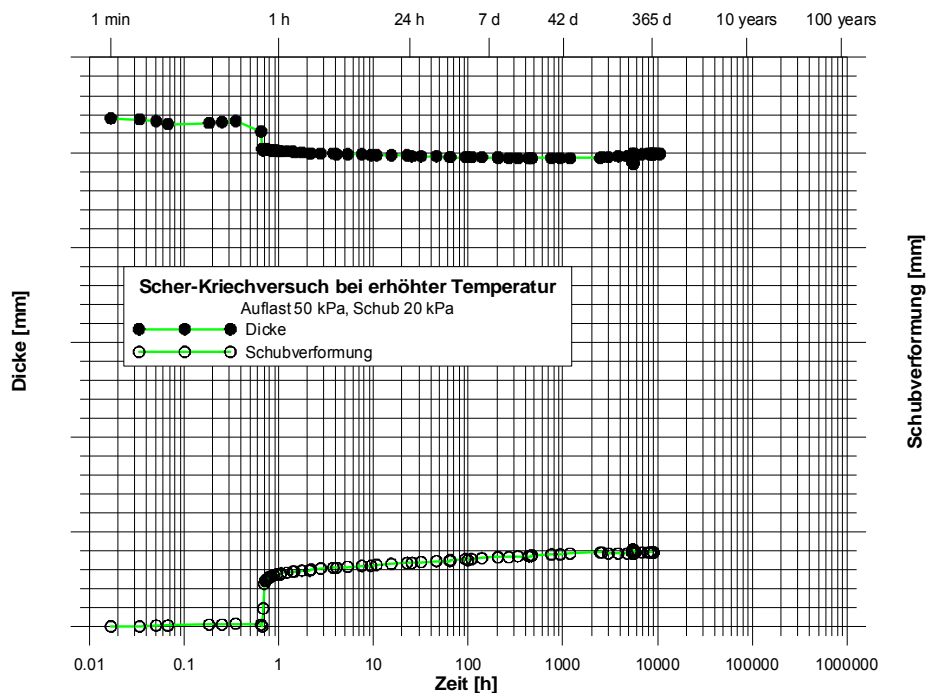


Bild 32: Dränmatte mit einem Geonetz-Sickerkörper entgegen der Produktionsrichtung geschert! (In dieser Schub-Richtung blieb die Dränmatte stabil. Es trat weder ein Stabilitäts- und noch ein Scherversagen auf!)

6 Zusammenfassung

Für eine Eignungsbeurteilung des Langzeitverhaltens einer Dränmatte im Oberflächenabdichtungssystem einer Deponie müssen neben den Grundanforderungen für die Funktionen Trennen, Filtern, Dränen und Schützen auch Angaben zur Inneren Scherfestigkeit vorgelegt werden, um eine Dimensionierung zu ermöglichen. Darüber hinaus muss ein hinreichendes Alterungsverhalten aller Komponenten für Zeiträume von 100 Jahren nachgewiesen werden.

Das „Langzeit-Wasserableitvermögen“ der Dränmatten wird maßgeblich durch das Kriechen des Sickerkörpers unter Druck bestimmt. Konventionelle Druck-Kriechversuche allein sind nicht dazu in der Lage, das Zeitstandverhalten von druckstabilen Dränmatten zu ermitteln.

Bei konventionellen Druck-Kriechversuchen ist eine zeitliche Extrapolation des Stauchungsverhaltens bis maximal zwei Zeitdekaden hinweg zulässig – vorausgesetzt der Sickerkörper weist ein kontinuierliches zeitabhängiges Druck-Kriechverhalten auf. Bei Dränmatten, die zum Stabilitätsversagen neigen, ist das Zeitstandversagen unter Druckbeanspruchung zu untersuchen. Die Kenntnis des Zeitstandversagens ist daher stets Voraussetzung für die Extrapolation von Druck-Kriechkurven von zum Stabilitätsversagen neigenden Dränmatten.

Zeitraffende Untersuchungsmethoden sind für die Extrapolation der Versuchsergebnisse notwendig. Kriechversuche mit dem „SIM-Verfahren“ erlauben eine Beschleunigung des Kriechverhaltens durch die Erhöhung der Temperaturen. Mit dieser Zeit-Temperatur-Verschiebungs-Methode lässt sich die Prüfdauer verringern, die bei reiner Prüfung unter Raumtemperatur notwendig wäre, um lange Kriechkurven zu bekommen. Zeitraffende Untersuchungsmethoden erlauben zusammen mit konventionellen Druck-Kriechversuchen eine sichere Prognose des Kriechverhaltens und des Zeitstand-Verhaltens von Dränmatten und damit eine Vorhersage der Langzeitdicke. Indirekt ist somit eine Beurteilung des Langzeit-Wasserableitvermögens möglich .

Innerhalb des zu extrapolierenden Zeitraums dürfen Alterungsvorgänge keine relevanten Materialveränderungen in der Dränmatte hervorrufen und es darf kein Stabilitätsversagen auftreten, das zu nennenswerter Querschnittsveränderung oder Scherfestigkeitsverringern führt. Scherkriechversuche an der Dränmatte unter erhöhten Temperaturen und separate Alterungsversuche an den Einzelkomponenten erlauben derartige Beurteilungen.

Literatur

- [1] Alexiew, D. (1993a): Gerät zur Bestimmung der Transmissivität von im Boden gebetteten Dränmatten. Geotechnik 16, Heft 1, DGGT, Essen, S. 25-27.
- [2] Alexiew, D. (1993b): Transmissivität von Geokunststoffen – Performance-Tests. 9. Nürnberger Deponieseminar 1993, Eigenverlag LGA. S. 265-279.
- [3] Allen, S. (2005): The use of accelerated test procedure to determine the creep reduction factors of a geosynthetic drain. Geotechnical special publication, Geo-Frontier, 13. 3297-3309.
- [4] ASTM D6992-2003: Standard test method for accelerated tensile creep and creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using the stepped isothermal method.

- [5] BAM (2003): Richtlinie für den Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Deponie-Oberflächenabdichtungen. herausgegeben vom Labor IV.32, Deponietechnik, 2. Fassung, September 2003
- [6] Berkhout, H.C. (1994): Messen der Wasserdurchlässigkeit in der Ebene von Geokunststoff-Dräns, bestimmt für den Straßen-, Wasser- und Tiefbau. Bauingenieur 69, Heft 1, Springer-Verlag, S. 37-42.
- [7] Böttcher, R.-D. (2006): Long-term flow capacity of geocomposites. Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki (eds.), 8th International Geosynthetics Conference, Yokohama, Milpress, Rotterdam, S. 423-426.
- [8] Bräcker, W. (1999): Dränelemente aus Kunststoff als Entwässerungsschicht in Deponieoberflächenabdichtungen. AbfallwirtschaftsFakten 5.1, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 4 Seiten.
- [9] DIN EN 12224 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Bestimmung der Witterungsbeständigkeit"
- [10] DIN EN 12225 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Prüfverfahren zur Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Erdeingravingsversuch"
- [11] DIN EN 13252 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Dränanlagen"
- [12] DIN EN 14415 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit gegen Auslaugen"
- [13] DIN EN ISO 10319 "Geotextilen – Zugprüfung am breiten Streifen"
- [14] DIN EN ISO 11058 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, ohne Auflast"
- [15] DIN EN ISO 12236 "Geokunststoffe – Stempeldurchdruckversuch"
- [16] DIN EN ISO 12956 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite"
- [17] DIN EN ISO 12957-1 "Geokunststoffe – Bestimmung der Reibungseigenschaften, Teil 1: Scherkastenversuch"
- [18] DIN EN ISO 12958 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Bestimmung des Wasserleitvermögens in der Ebene"
- [19] DIN EN ISO 13433 "Geokunststoffe – Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch)"
- [20] DIN EN ISO 13438 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit"
- [21] DIN EN ISO 9863-1 "Geokunststoffe – Bestimmung der Dicke unter festgelegten Drücken, Teil 1: Einzellagen"

- [22] DIN EN ISO 9864 "Geokunststoffe – Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Geotextilen und geotextilverwandten Produkten"
- [23] DIN-Fachbericht 86 (2000): Leitfaden zur Beständigkeit von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten
- [24] Gartung, E. und Zanzinger, H. (1999): Abminderungsfaktoren zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Geokunststoff-Dränelementen. 15. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [25] GDA E 3-9 Eignungsprüfung für Geokunststoffe, GDA-Empfehlungen – Geotechnik der Deponien und Altlasten, DGGT, Essen, Verlag Ernst & Sohn.
- [26] Hoekstra, S.E. and Berkhout, H.C. (1986): Geotextile/"geospacer" composites for environmental projects. Proceedings of the 3rd International Conference on Geotextiles, Vienna, S. 343-347.
- [27] Hsuan, Y.G. and Koerner, R.M. (1998): Antioxidant Depletion Lifetime in High Density Polyethylen Geomembranes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 6, S. 532-541.
- [28] ISO/DIS 25619-1: Geosynthetics – Determination of compression behaviour – Part 1: Determination of compressive creep properties
- [29] ISO/DIS 25619-2: Geosynthetics – Determination of compression behaviour – Part 2: Determination of short-term compression behaviour
- [30] ISO/TR 20432: Guidelines to the determination of long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement
- [31] Koerner, R.M., Hsuan Y.G. and Yeo, S.-S. (2006): Creep, Creep Rupture, and Accelerated Creep by TTS and SIM. (PowerPoint-Vortrag ohne Angabe der Quelle)
- [32] Müller, W., Büttgenbach, B., Jakob, I. and Mann, H. (2003): Comparison of the oxidative resistance of various polyolefin geotextiles. Geotextiles and Geomembranes, 21(2003), S. 289-315.
- [33] Müller, W. and Jakob, I. (2000): Comparison of oxidation stability of various geosynthetics. Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference, EuroGeo2, Bologna, S. 449-454.
- [34] Müller, W. (2004): Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen. 20. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [35] Müller, W. (2005): Eignungsgutachten für Kunststoff-Dränelemente durch die BAM. 21. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [36] Narejo, D. and Allen, S. (2004): Using the Stepped Isothermal Method of Geonet Creep Evaluation, Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference, EuroGeo3, Munich, S. 539-544.

- [37] Salman, A., Elias, V. and DiMillio, A. (1998): The effect of oxygen pressure, temperature and manufacturing processes on laboratory degradation of polypropylene geosynthetics. Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, S. 683-690.
- [38] Sama, S.R. (2006): Use of accelerated testing method (Stepped Isothermal Method) to determine the compressive creep behaviour of drainage geocomposites. Master thesis report, Aalen University (unveröffentlicht).
- [39] SKZ (2006): Zeitstand-Druckkriechversuche in Anl. an DIN EN 1897 an „Enkadrain 5006C/M200PP“ (unveröffentlicht).
- [40] Thomas, R.W. (2002): Thermal oxidation of polypropylene geotextile used in geosynthetic clay barriers. Zanzinger, H., Koerner, R.M. and Gartung, E. (Eds.), Clay Geosynthetic Barriers. A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, S. 87-96.
- [41] Thornton, J.S. and Sandri, D. (2005): Introducing the Stepped Isothermal Method. Geo-Frontiers, Vol. 17, No. 3, S. 18-20.
- [42] Thornton, J.S., Allen, S.R. and Siebken, J.R. (2000): Long term, compressive creep behavior of high polyethylene geonets. Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference, EuroGeo2, Bologna, S.869-873.
- [43] Yanful, E.K. (1993): Oxygen diffusion through soil covers on sulfuric mine tailings. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 8, S. 1207-1228.
- [44] Yeo, S.-S. and Hsuan, Y.G. (2007): The short- and long-term compressive behavior of high density polyethylene geonet and geocomposite at inclined conditions. Geosynthetics International (to be published).
- [45] Zanzinger, H. (2000): Reduction factors for the long-term water flow capacity of drainage-geocomposites. Filters and drainage in geotechnical and environmental engineering. Proceedings of the third international conference Geofilters 2000, Warsaw, Wolski, W. and Mlynarek, J. (eds.), A.A. Balkema, pp 245-249, Rotterdam.
- [46] Zanzinger, H. und Berkhout, H. (1995): Bestimmung des Wasserleitvermögens und deren Deutung. 11. Nürnberger Deponieseminar 1995, Eigenverlag LGA. S. 331-344.

Anschrift: Dipl.-Ing. Helmut Zanzinger
SKZ – TeConA GmbH
Friedrich-Bergius-Ring 22
97076 Würzburg
e-mail: h.zanzinger@skz.de
Fon: 0931 4104 259
Fax: 0931 4104 207