

Zeitraffende Druck-Kriechversuche an Dränmatten mit dem SIM-Verfahren

Einleitung

Dränmatten aus Kunststoff werden seit 20 Jahren in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien eingesetzt [Hoekstra/Berkhout 1986]. Mit zunehmender Verwendung von Dränmatten wird auch verstärkt das Langzeitverhalten dieser Geokunststoffe für sehr lange Zeiträume hinterfragt [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.

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 zeitraffende Untersuchungsmethoden notwendig, die eine Extrapolation der Versuchsergebnisse möglich machen. Konventionelle Druck-Kriechversuche allein sind nicht dazu in der Lage, das Zeitstandverhalten von druckstabilen Dränmatten zu ermitteln. Druck-Kriechversuche mit der neunten „Stepped-Isothermal-Method“ erlauben in sehr kurzer Prüfzeit die Dicke und auch ein eventuell auftretendes Stabilitätsversagen der Dränmatte für sehr lange Zeiträume zu bestimmen. Darüber hinaus ist der zusätzliche Einfluss der Alterung infolge von Oxidations- und Migrationsvorgängen zu berücksichtigen. Innerhalb des zu extrapolierenden Zeitraums darf kein Stabilitätsversagen auftreten und die Alterungsvorgänge dürfen auch keine relevanten Materialveränderungen in der Dränmatte hervorrufen.

1 Typische Produktvarianten für Dränmatten

Als Sickerkörper werden Geomatten (GMA), Geonetze (GNT) und auch Noppenbahnen verwendet. Geomatten gibt es als Wirrgelege ohne Struktur (Bild 1a, 1b), als Strukturmatten mit pyramidaler Form und als Strukturmatten mit „Zick-zack- oder Wellenstruktur“ (Bild 2a, 2b). 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 Belastungsdau-

er. Meist kommt als Rohstoff Polypropylen (PP) zum Einsatz. Geonetze werden aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) hergestellt (Bild 4a, 4b, 4c). 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 3a, 3b). Sie sind wenig kriechempfindlich, neigen aber stärker zum Stabilitätsversagen.



Bild 1a: Geomatte als Wirrgele ohne Struktur (schematischer Querschnitt)



Bild 1b: Geomatte mit Wirrgele ohne Struktur (Beispiel)

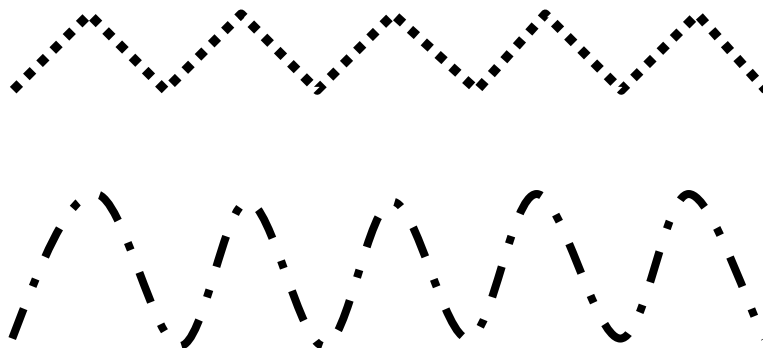


Bild 2a: Schematische Querschnitte von Geomatten mit Zick-Zack-Struktur (oben) oder Wellen-Struktur (unten)

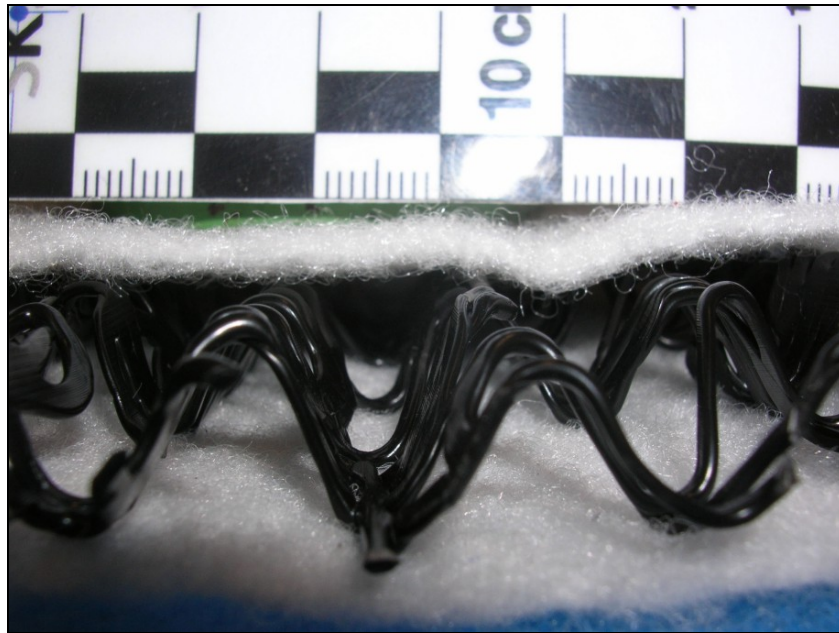


Bild 2b: Geomatte als Wellen-Struktur (Beispiel)

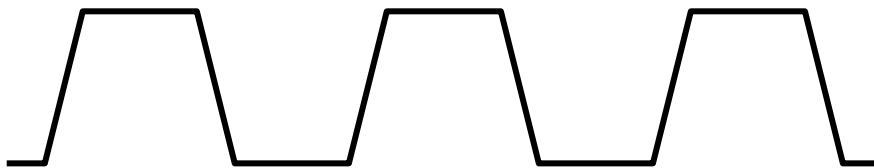


Bild 3a: Noppenbahn (schematischer Querschnitt)



Bild 3b: Noppenbahn (Beispiel)

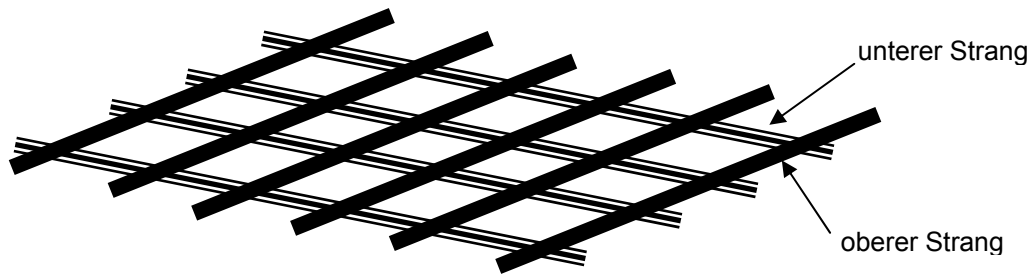


Bild 4a: Geonet (Draufsicht, schematisch)

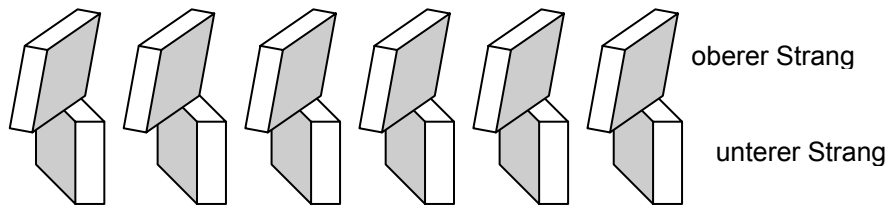


Bild 4b: Geonet (perspektivische Darstellung der Kreuzungspunkte, schematisch)



Bild 4b: Geonet (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 Eigenschaften angegeben, die im Begleitdokument für die CE-Kennzeichnung nach DIN EN 13252 genannt sein müssen. Darüber hinaus sind in Tabelle 2 zusätzliche für die Beurteilung und Dimensionierung einer Dränmatte notwendige Kennwerte aufgeführt.

Tabelle 1: Relevante Mindestangaben einer Dränmatte

Eigenschaft	Prüfmethode
Zugfestigkeit T_{\max} des Filtervliesstoffs	DIN EN ISO 10319
Zugfestigkeit T_{\max} des Geoverbundstoffs	
Stempeldurchdrückkraft F_P des Filtervliesstoffs	DIN EN ISO 12236
Lochdurchmesser D_C des Filtervliesstoffs beim Kegelfallversuch	DIN EN ISO 13433
Charakteristische Öffnungsweite O_{90} des Filtervliesstoffs	DIN EN ISO 12956
Wasserdurchflussrate q_N des Filtervliesstoffs	DIN EN ISO 11058
Wasserleitvermögen q_P des Geoverbundstoffs	DIN EN ISO 12958 20 kPa, $i=1$, weich/weich, MD

Tabelle 2: Weitere Eigenschaften einer Dränmatte

Eigenschaft	Prüfmethode
Dicke d des Filtervliesstoffs bei 2 kPa	DIN EN ISO 9863-1
Flächenbezogene Masse ρ_A des Filtervliesstoffs	DIN EN ISO 9864
Stempeldurchdrückkraft F_P des Filtervliesstoffs	DIN EN ISO 12236
Innere Kurzzeit-Scherfestigkeit (δ_p und a_p) des Geoverbundstoffs	in Anl. an DIN EN ISO 12957-1
Kurzzeit-Druckfestigkeit σ_m des Geoverbundstoffs	E DIN EN ISO 25619-2
Druck-Kriechverhalten des Geoverbundstoffs	E DIN EN ISO 25619-1
Schutzwirksamkeit des Geoverbundstoffs	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	DIN EN ISO 12958

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 der in Tabelle 3 aufgeführten Auswahlprüfverfahren eine Mindestfunktionsdauer von 25 Jahren gewährleistet.

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

Eigenschaft	Prüfmethode
Oxidationsbeständigkeit des Filtervliesstoffs (28 d, 110°C)*	DIN EN ISO 13438
Oxidationsbeständigkeit des Sickerkörpers (28 d, 110°C)*	
Witterungsbeständigkeit des Filtervliesstoffs (430 h, 50 MJ/m ²)	DIN EN 12224
Witterungsbeständigkeit des Sickerkörpers (430 h, 50 MJ/m ²)	
Mikrobiologische Best. des Filtervliesstoffs (16 Wochen, aktive Erde)	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 abgesichert.

„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 der Alterung der Verbindung zwischen Geotextil und Sickerkörper in zeitraffenden Versuchen berücksichtigt.

3 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 starren 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.

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

4 Druck-Kriechverhalten mit und ohne Schubbelastung

Das Verhalten des Sickerkörpers unter Druckbelastung hat zentrale Bedeutung für das Wasserableitvermögen von Dränmatten. Der Sickerkörper in einem Deponieoberflächenabdichtungssystem 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.

4.4.1 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.

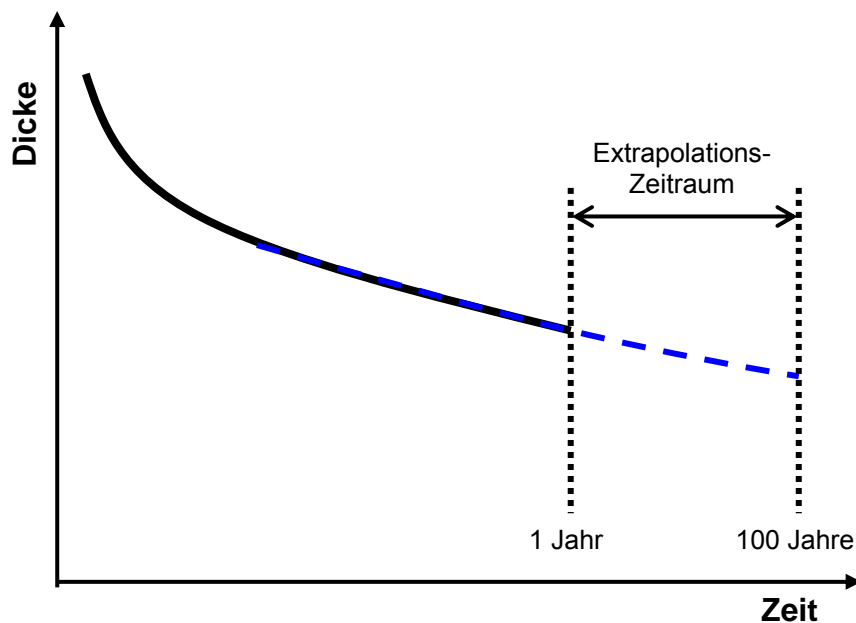


Bild 5: Extrapolation des Kompressionsverhaltens einer kompressiblen Dränmatte
(Extrapolation ist gerechtfertigt!)

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 Zeitstandversagen 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.

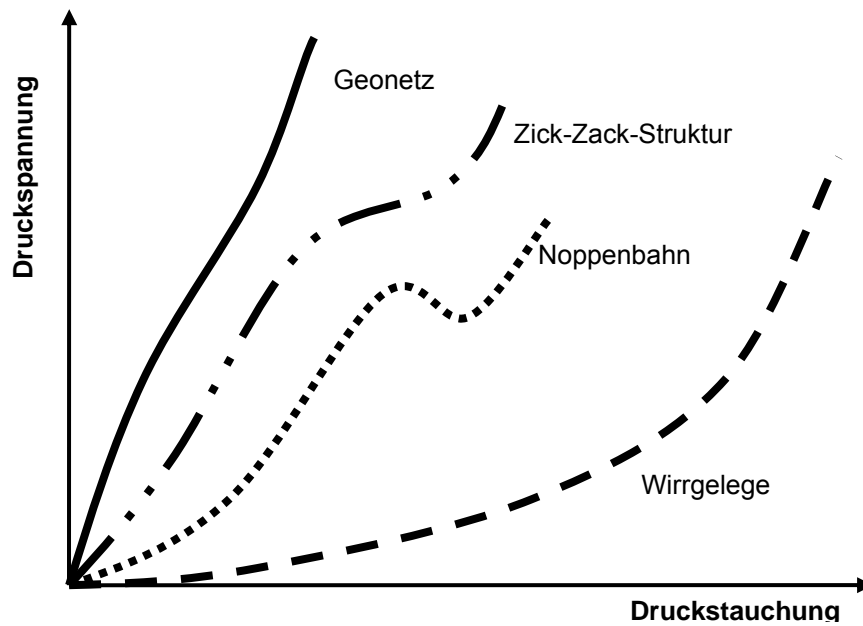


Bild 6: typisches Druck-Stauchungs-Verhalten von 4 unterschiedlichen Sickerkörpern [DIN EN ISO 25619-2]

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 Zeitstandsversagen unter Druckbeanspruchung (Bild 7).

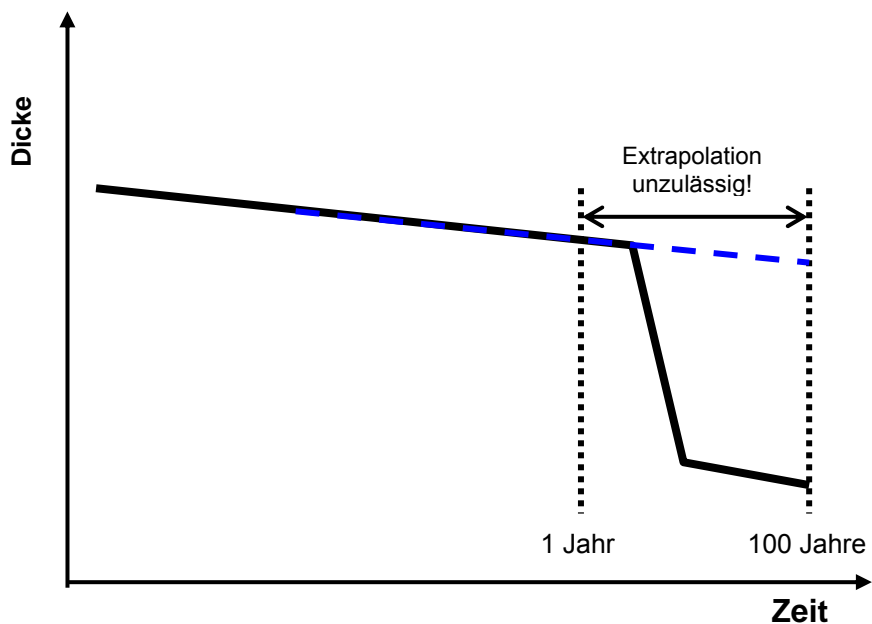


Bild 7: Kompressionsverhalten einer Dränmatte mit Zeitstandsversagen (Dränmatte zeigt ein Stabilitätsversagen des zu Extrapolationszeitraums. Extrapolation ist in diesem Fall unzulässig!)

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.

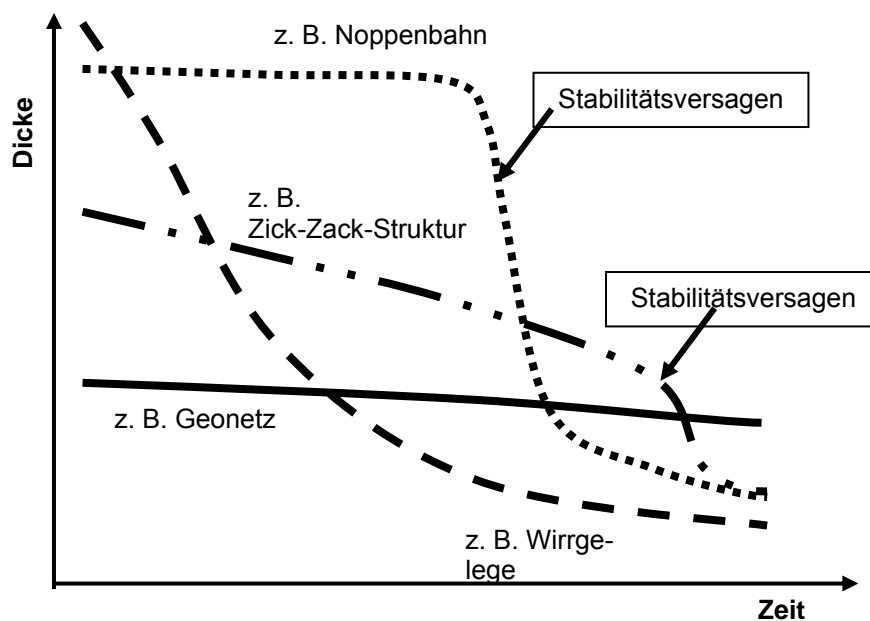


Bild 8: typisches Druck-Kriechverhalten von 4 unterschiedlichen Sickerkörpern

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.

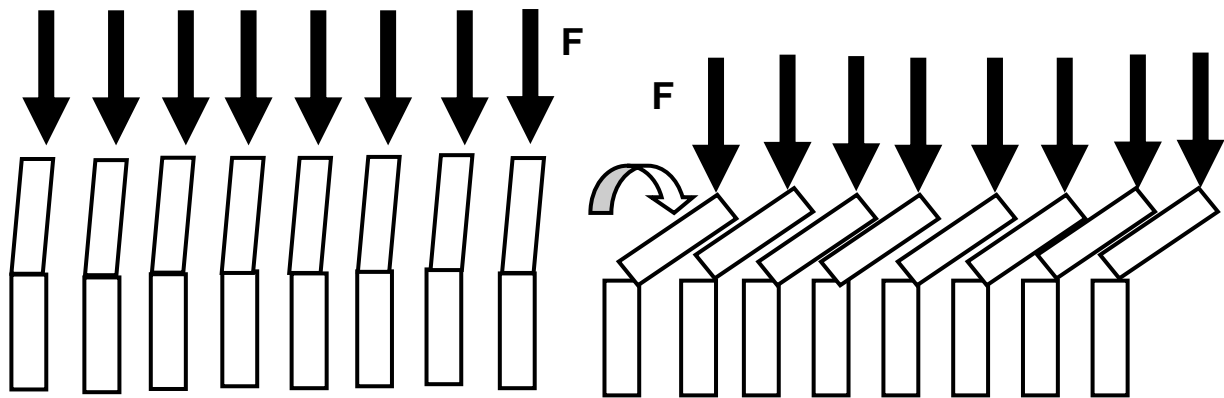


Bild 9: Querschnitt eines Geonetzes: Umknicken der oberen Stränge (oder Rippen) infolge Druckbeanspruchung

Bei Dränmatten mit einem Zeitstandversagen ist somit die Extrapolation der Druck-Kriechkurven durch den jeweiligen Versagenszeitpunkt begrenzt. Somit ist die Kenntnis des Zeitstandversagens 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 noch kompressible Dränmatten Pate für die Beurteilungskriterien des Kriechverhaltens, da die kompressiblen Dränmatten bis dahin auf deutschen Deponien auch hauptsächlich zum Einsatz kamen. Beurteilt wurden von der BAM auf Basis der BAM-Prüfrichtlinie aber anschließend druckstabile Dränmatten, die ein Zeitstandversagen 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 Zeitstandverhaltens notwendig, um die Extrapolation der Druckstauchung und der Schubverformung wie z. B. in Bild 10 auf 100 Jahre verantworten zu können.

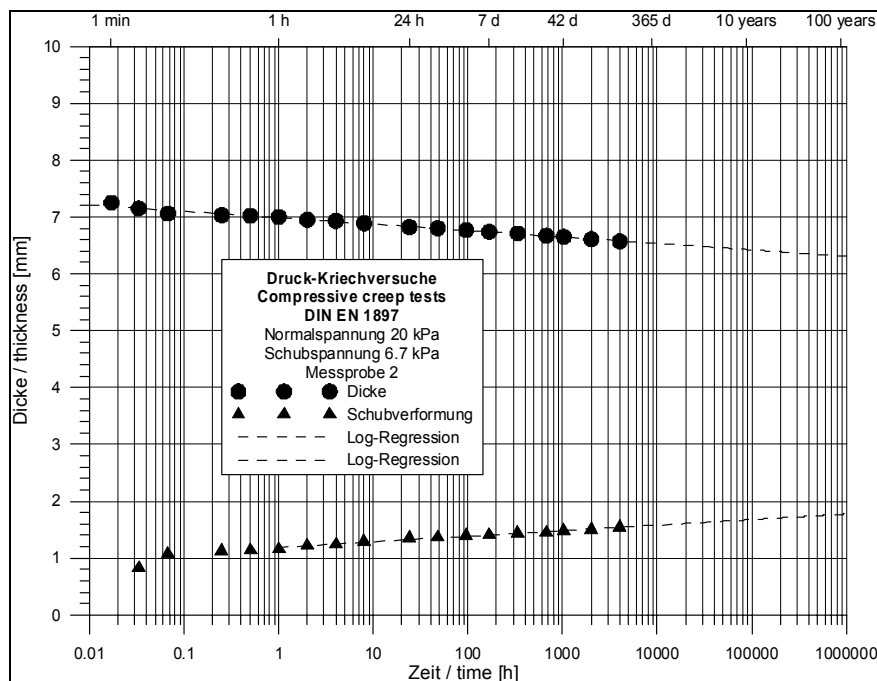


Bild 10: Druck-Kriechverhalten einer Dränmatte unter Druck- und Schubbelastung [DIN EN ISO 25619-1] bei Raumtemperatur (konventionelle Methode)

4.4.2 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).

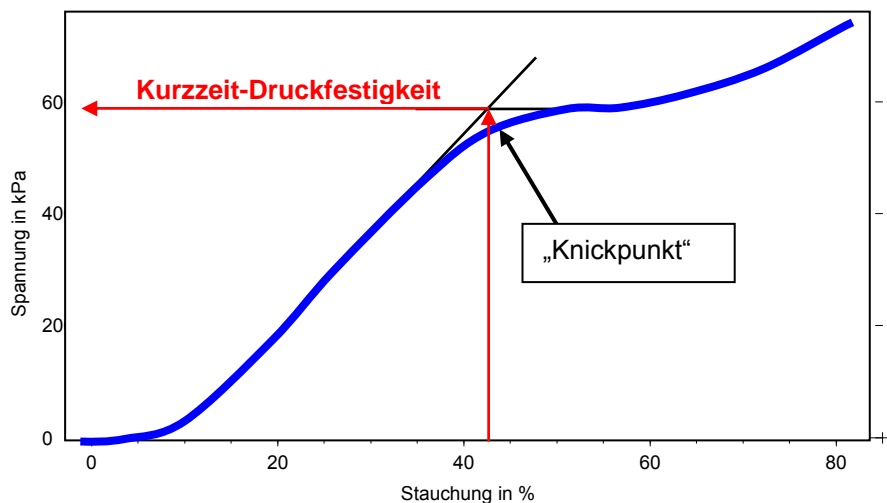


Bild 11: Stauchungsverhalten einer Dränmatte mit ausgeprägter Steifigkeitsänderung

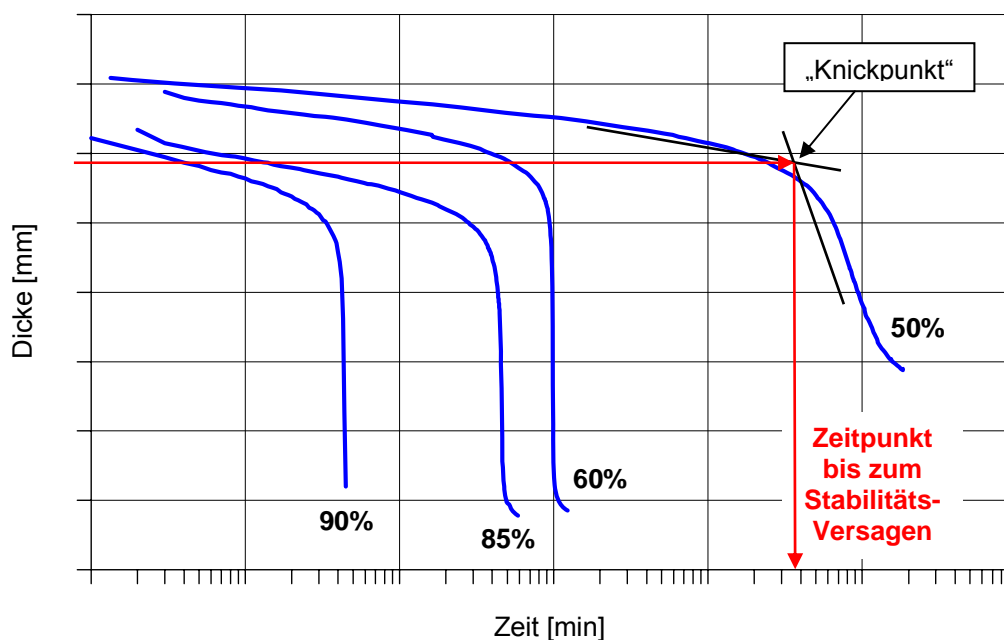


Bild 12: Zeitstand-Versagen einer Dränmatte bei verschiedenen Auslastungsgraden, Beispiel

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).

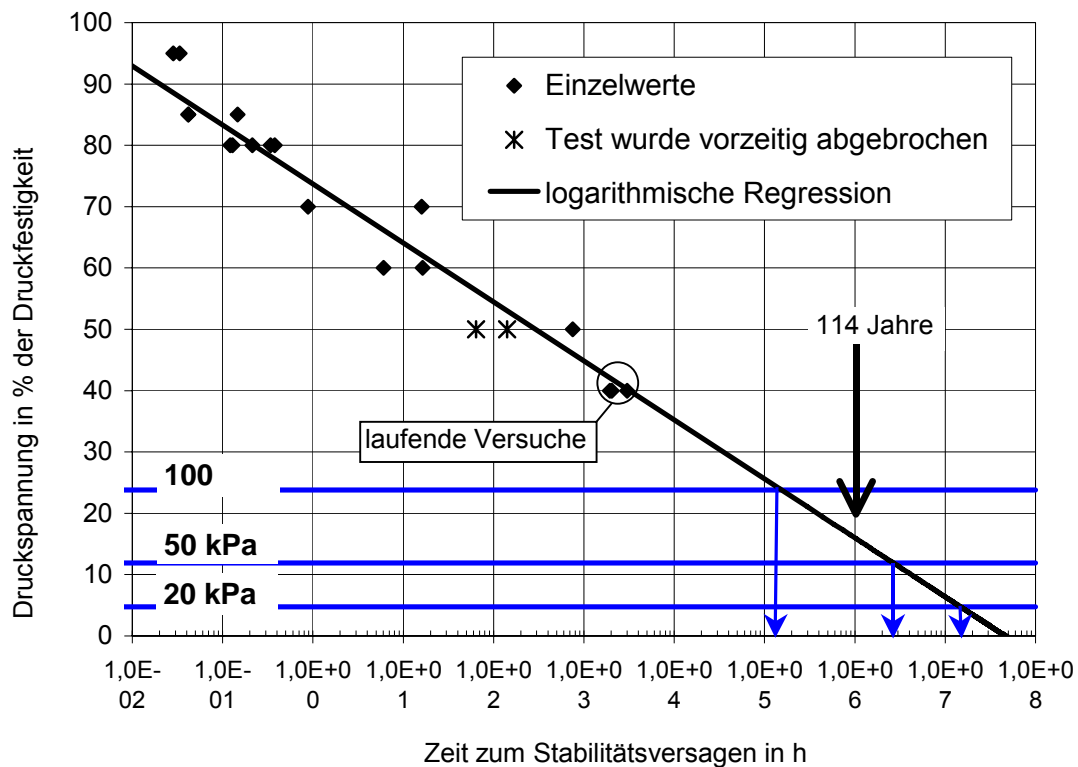


Bild 13: Zeitstand-Druckkriech-Diagramm einer Dränmatte, Beispiel

Sie 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].

4.4.3 Kriechversuche mit dem „TTS-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 (3 Zehnerpotenzen im obigen Beispiel von Bild 14) für die niedrigste Referenztemperatur.

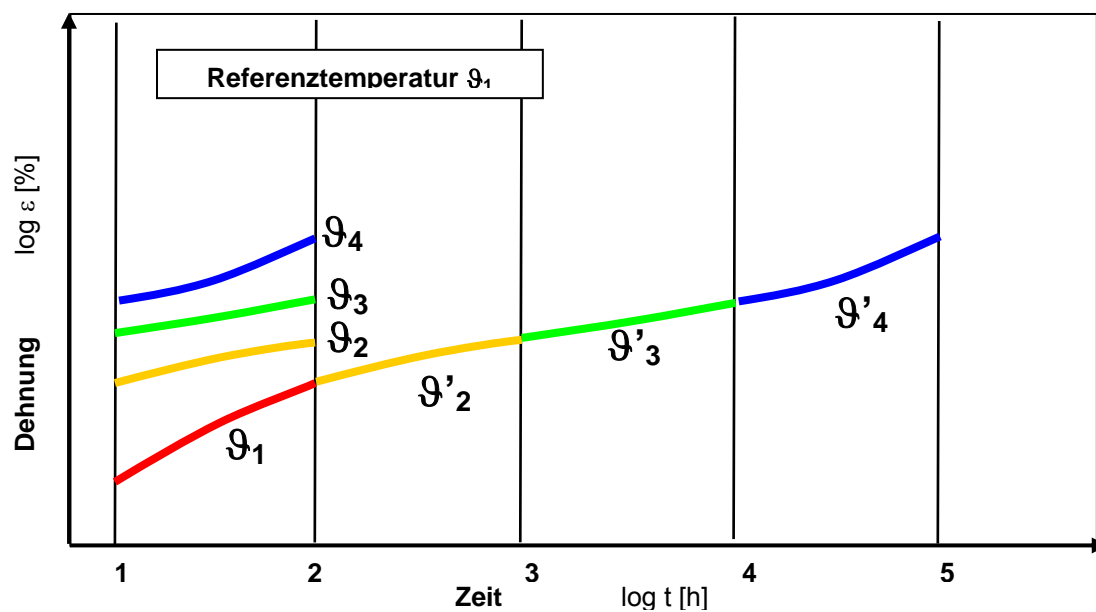


Bild 14: „frühere TTS-Methode“: direkte Verschiebung der Dehnungswerte auf der logarithmischen Zeitachse [Koerner et al. 2006]

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. Anhand eines Zugkriechversuchs ist die neue „TTS-Methode“ beispielhaft vorgestellt (siehe Bilder 15 bis 20).

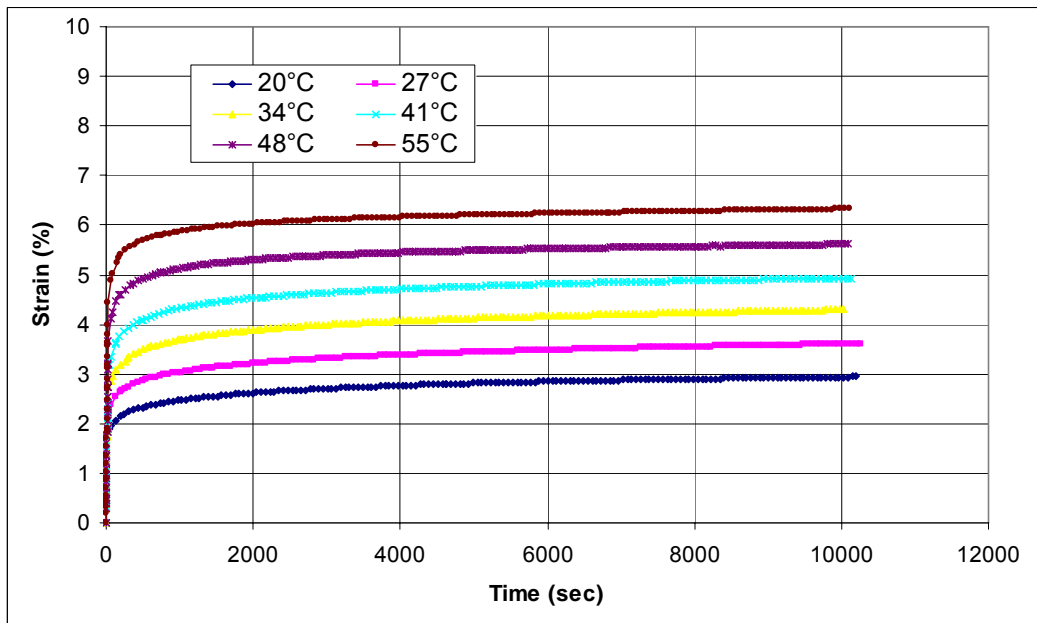


Bild 15: „neue TTS-Methode“: Rohdaten der Dehnung (jeder Versuch startet bei Null)
[Koerner et al. 2006]

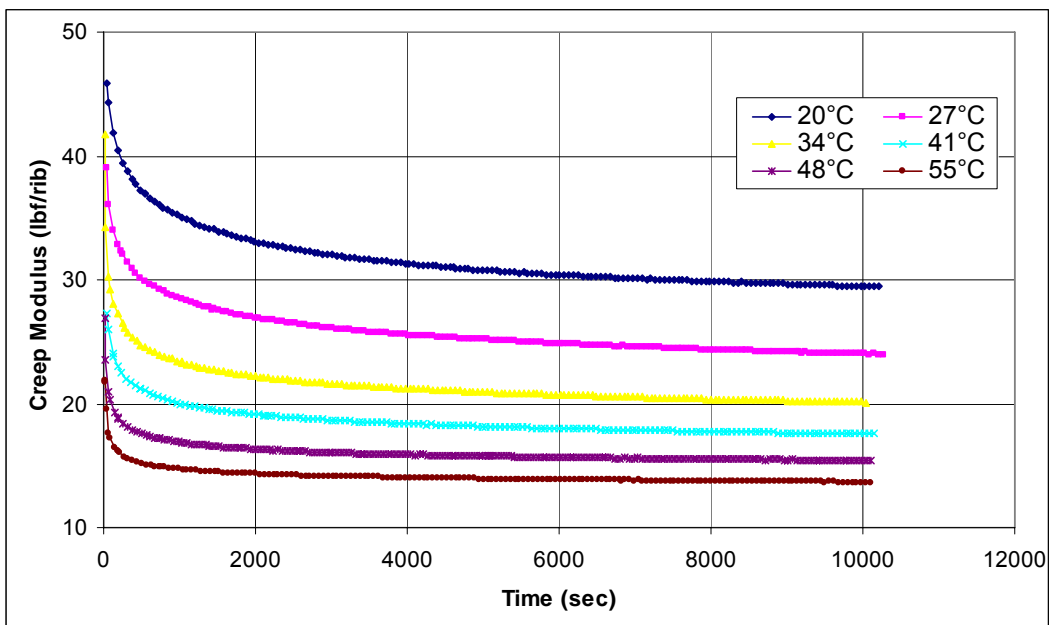


Bild 16: „neue TTS-Methode“: Umwandlung der Dehnung in Kriechmodul
[Koerner et al. 2006]

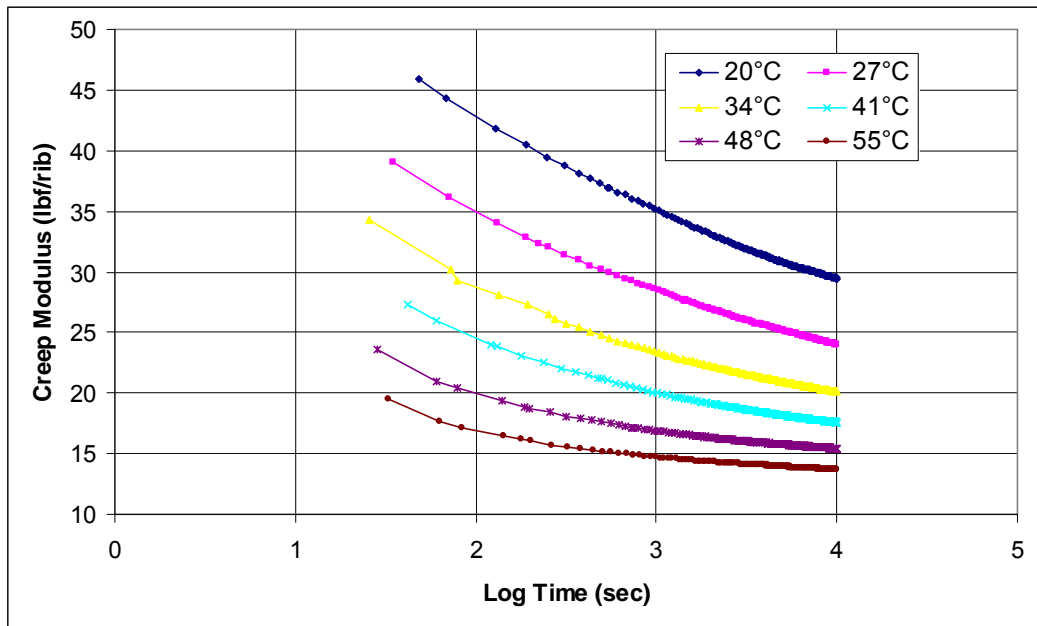


Bild 17: „neue TTS-Methode“: Kriechmoduln halblogarithmisch aufgetragen [Koerner et al. 2006]

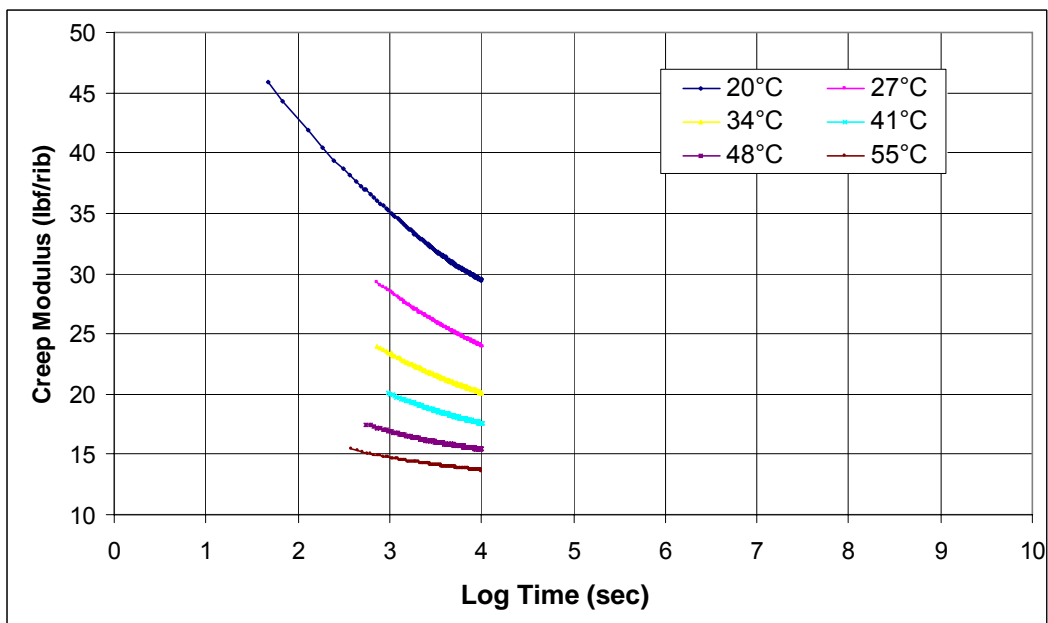


Bild 18: „neue TTS-Methode“: Kriechmoduldaten auf Höhe gleicher Modulwerte horizontal „abgeschnitten“ [Koerner et al. 2006]

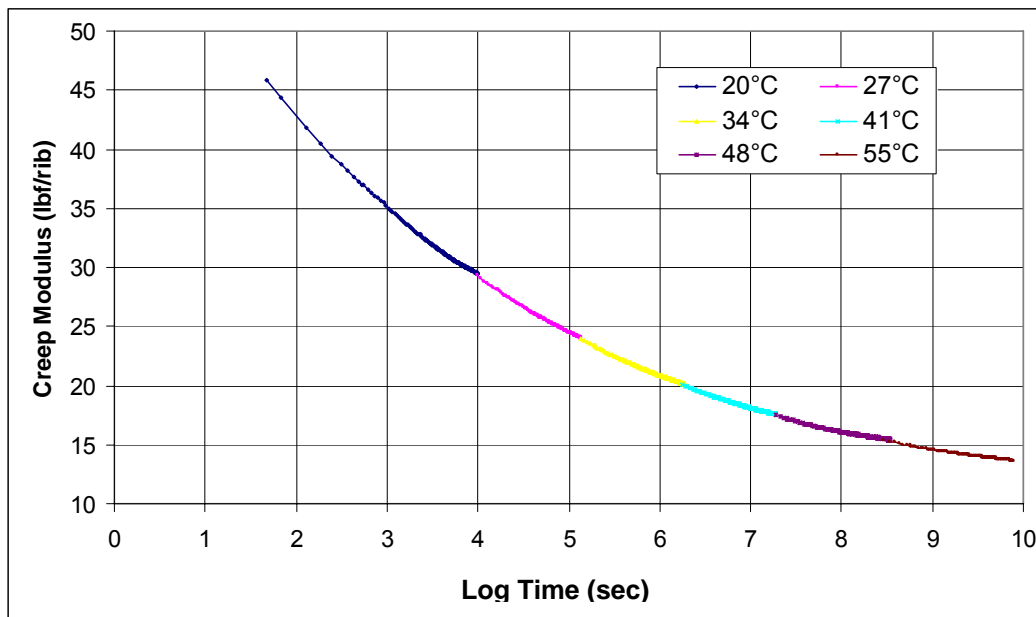


Bild 19: „neue TTS-Methode“: Horizontal abgeschnittene Daten auf der Zeitachse horizontal „verschoben“ (Anfang des Abschnitts wird an das Ende des letzten Abschnitts angesetzt.) [Koerner et al. 2006]

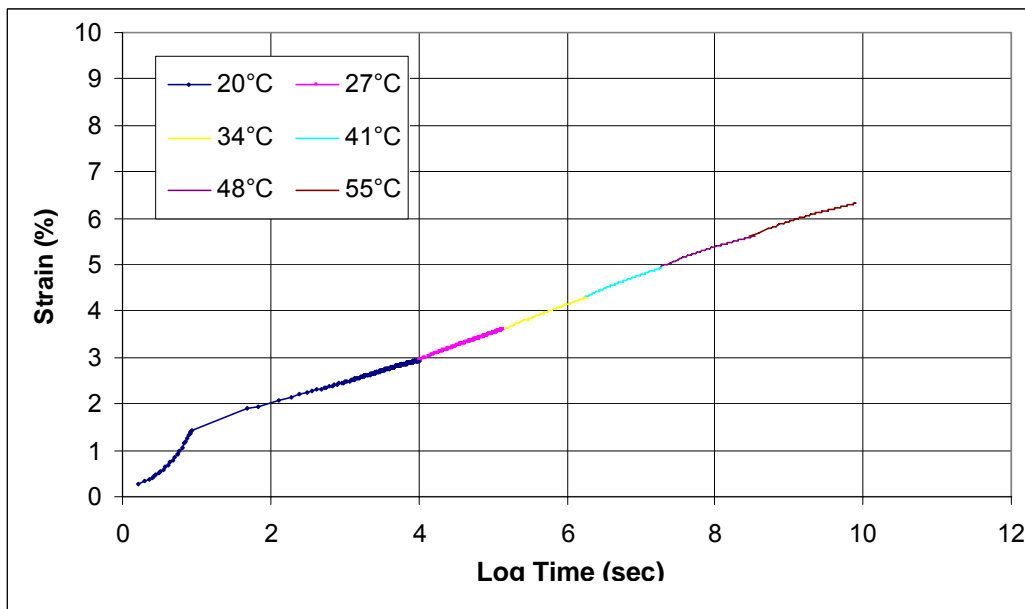


Bild 20: „neue TTS-Methode“: Modul-Werte in Dehnung zurückgewandelt: Beachte, bei 10^{10} Sekunden (316 Jahre) beträgt die Dehnung 6,4%. [Koerner et al. 2006]

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 nach wie vor 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.

4.4.4 Druck-Kriechversuche mit dem SIM-Verfahren

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 (Bild 21). 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.

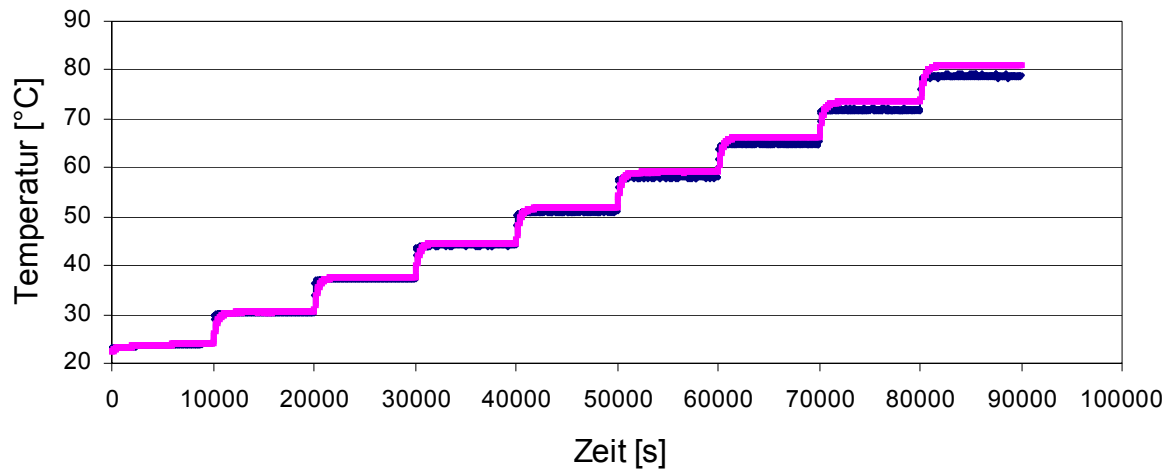


Bild 21: Temperatur an der Messprobe und in der Wärmekammer, 9 Temperaturstufen

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 wie bei der „TTS-Methode“ zuerst Druckstauchungen (Bild 22) und anschließend Kriechmodule (Bild 23) errechnet.

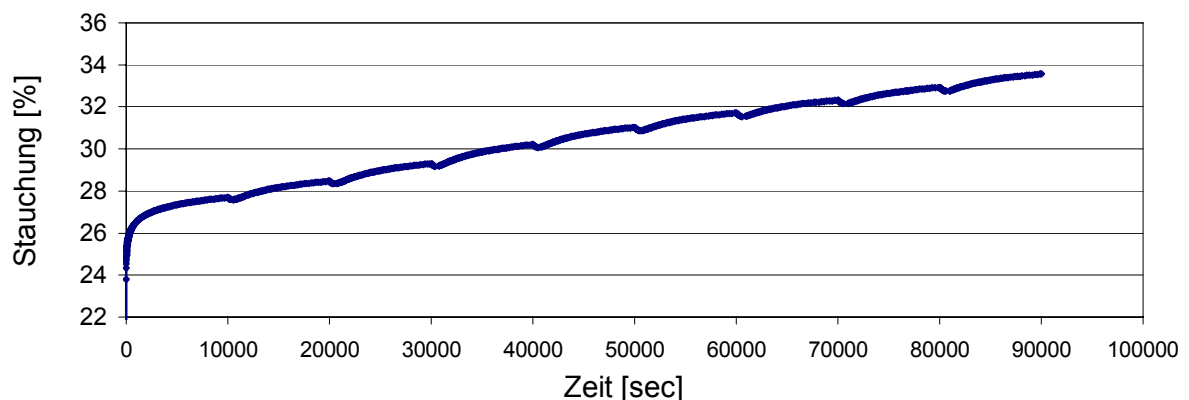


Bild 22: gemessene Druckstauchungen einer Dränmatte mit dem „SIM-Verfahren“

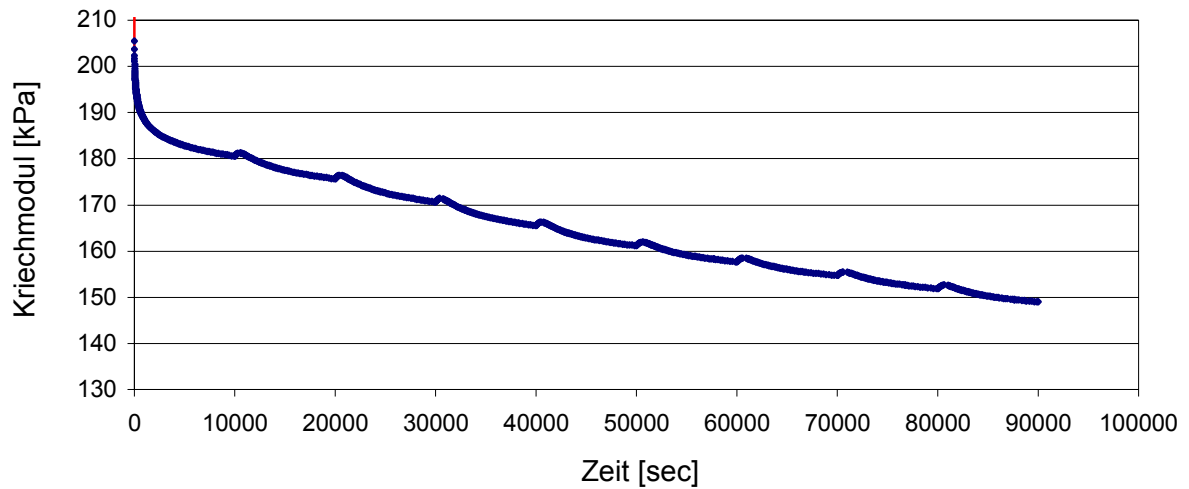


Bild 23: „SIM-Verfahren“: Kriechmodul (aus gemessenen Druckstauchungen errechnet)

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.

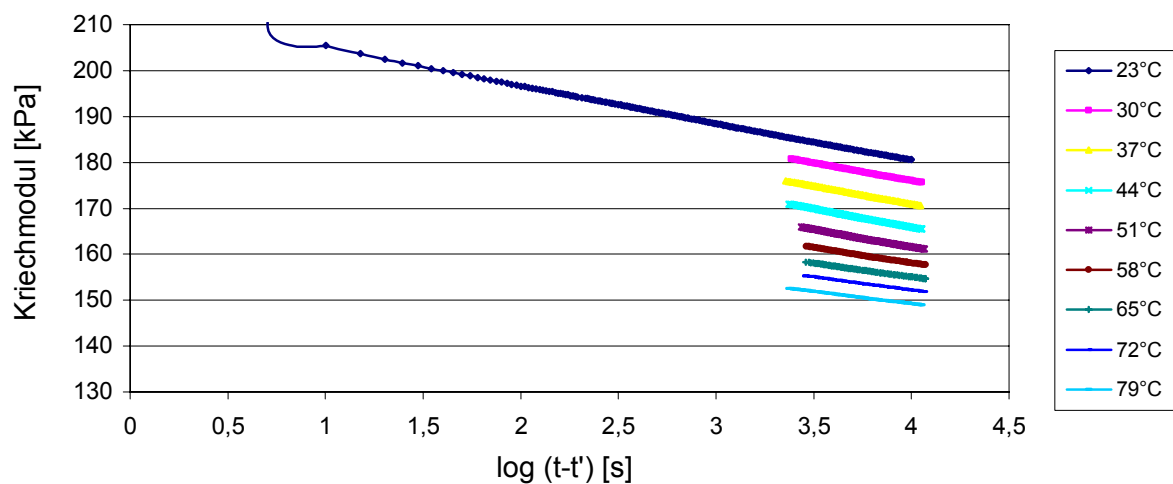


Bild 24: „SIM-Verfahren“: Kriechmodul auf logarithmischer Zeitachse aufgetragen

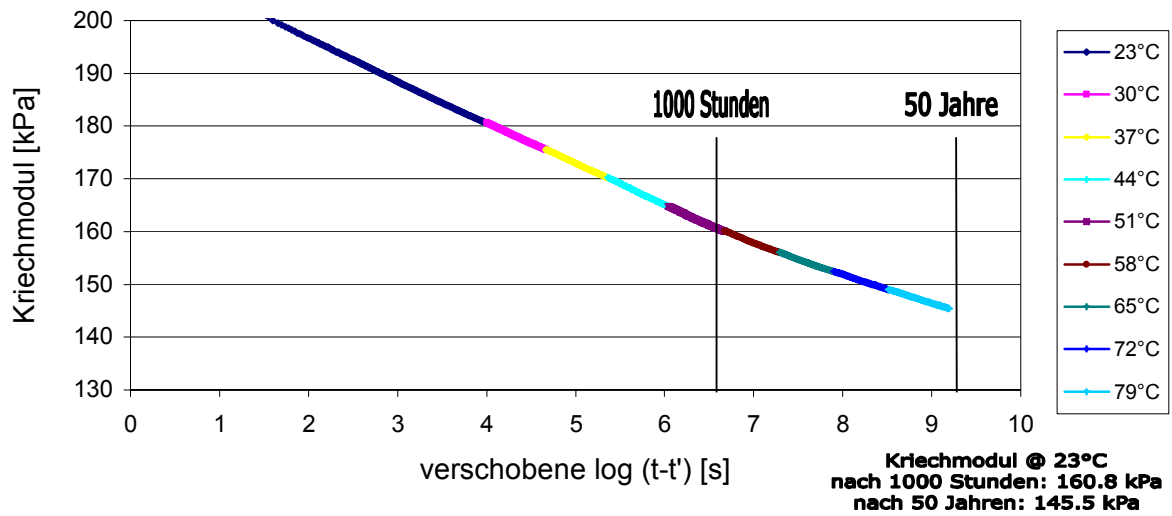


Bild 25: „SIM-Verfahren“: Kriechmodul als Masterkurve nach der Verschiebung auf der Zeitachse (Anfang jedes Abschnitts an das Ende des letzten Abschnitts angesetzt)

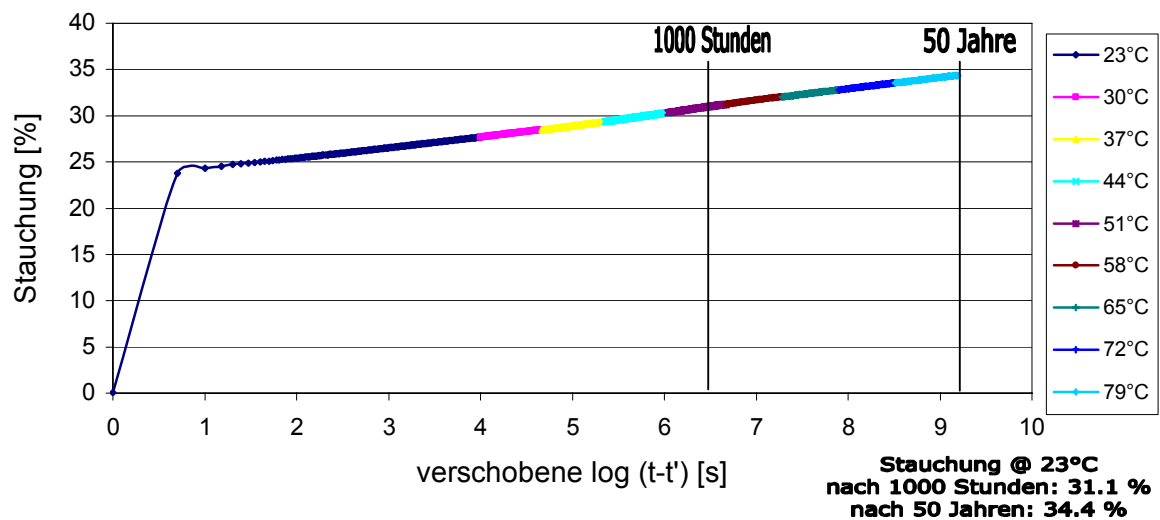


Bild 26: „SIM-Verfahren“: Druckstauchung nach Rückumwandlung

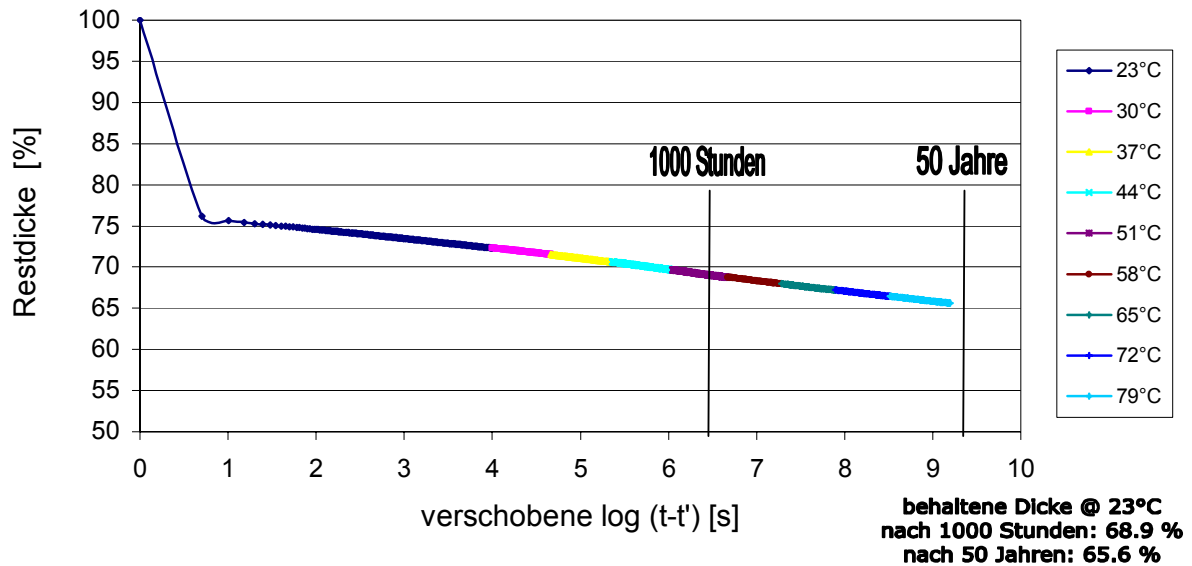


Bild 27: „SIM-Verfahren“: Restdicke nach „Zeitverschiebung“ und Überlagerung

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. Es ist damit auch möglich Druck-Kriechversuche im Rahmen der Qualitätssicherung (Eigenüberwachung, Fremdüberwachung und bei Kontrollprüfungen von auf der Baustelle entnommenen Proben) durchzuführen.

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 neigen („roll-over“).

4.4.5 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 Druck-Kriechverhalten 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.

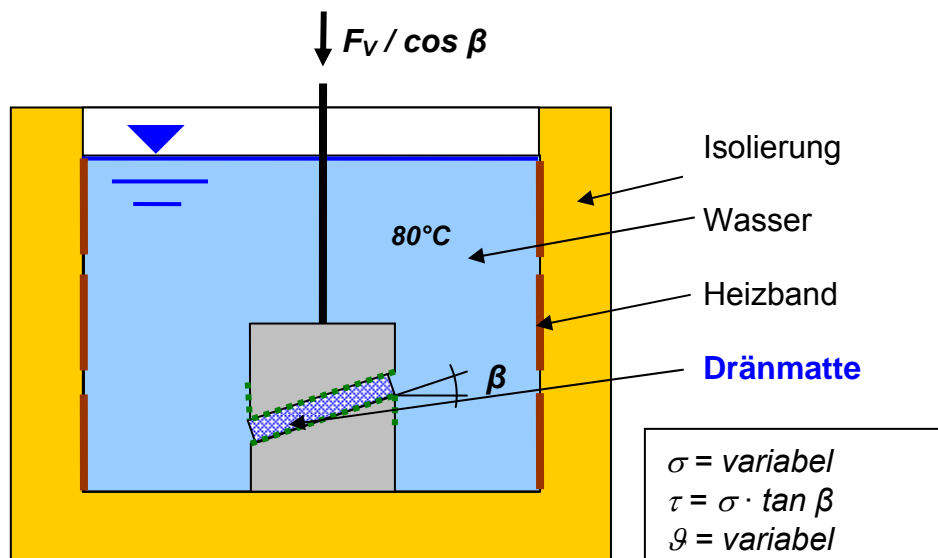


Bild 28: Druck-Kriechversuch mit Schubbelastung, in Wasser (Auslaugung von Stabilisatoren)

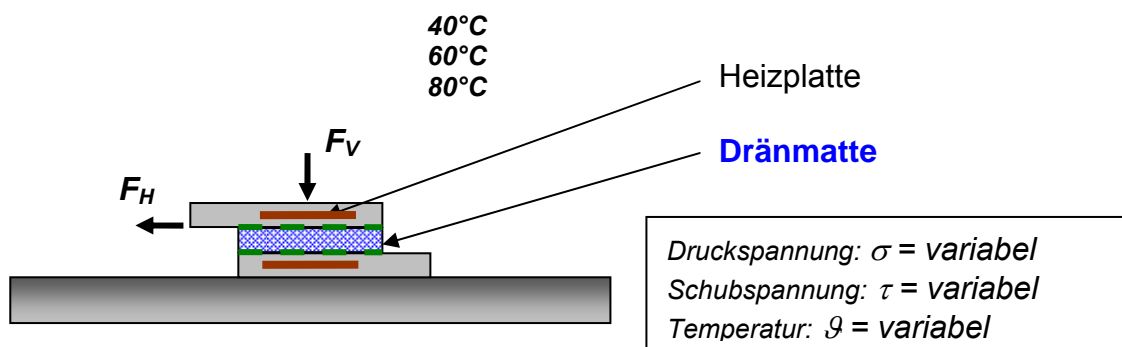


Bild 29: Druck-Kriechversuch mit Schubbelastung, in Luft (oxidative Alterung)

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, 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 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. 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.

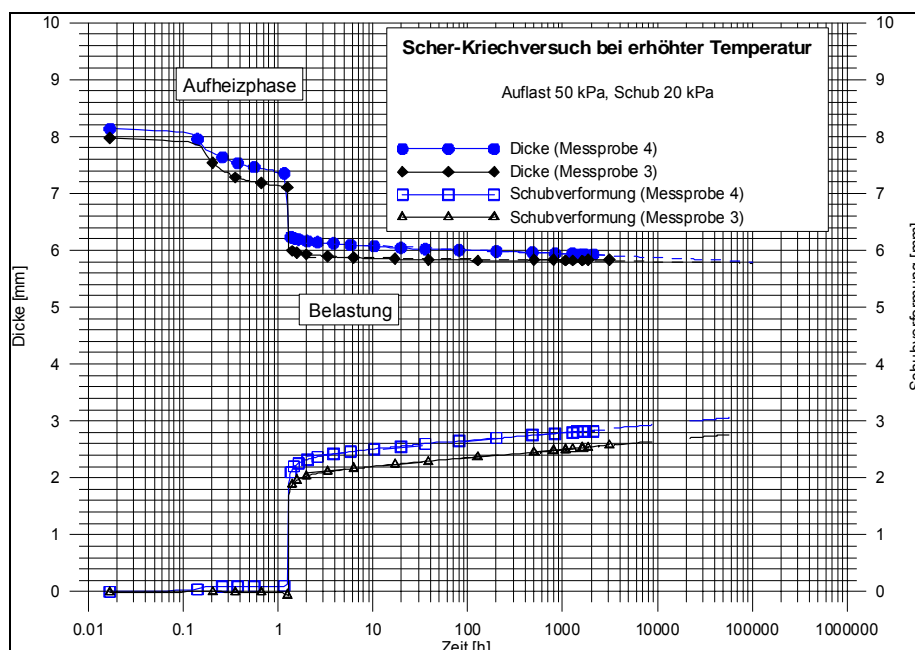


Bild 30: Scher-Kriechverhalten einer Dränmatte bei einer Druckspannung von 50 kPa und einer Schubspannung von 20 kPa unter erhöhter Lufttemperatur (Formstabilität und Innere Scherfestigkeit ist gewährleistet.)

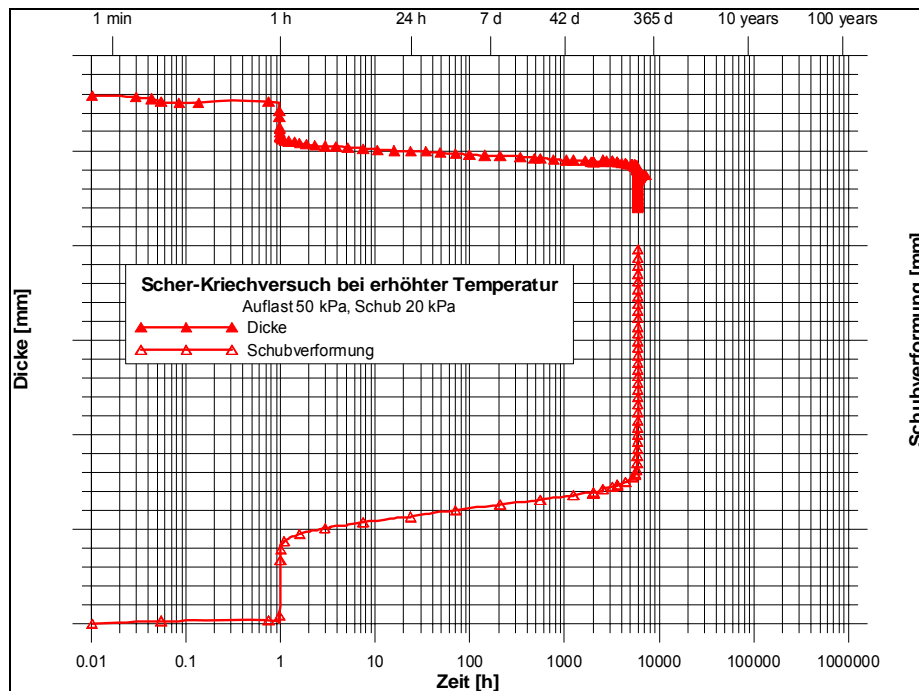


Bild 31: Dränmatte mit einem Geonetz-Sickerkörper in Produktionsrichtung geschert!
 (In der Dränmatte tritt ein Stabilitäts- und Scherversagen auf!)

Der auf Bild 31 dargestellte Versagensmechanismus (Kap. 4.4.1, Bild 9) an einer Dränmatte mit Geonetz wurde auch an anderer Stelle von Yeo und Husan [2007] bei „SIM-Versuchen“ mit zusätzlicher Schubbelastung festgestellt (Kap. 4.4.4). In dem vorliegenden Beispiel ist es für die Standsicherheit entscheidend, ob die Rolle in Produktionsrichtung (Bild 31) entlang der Böschungfallrichtung 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 aufstellen im Laufe des Versuchs, 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.

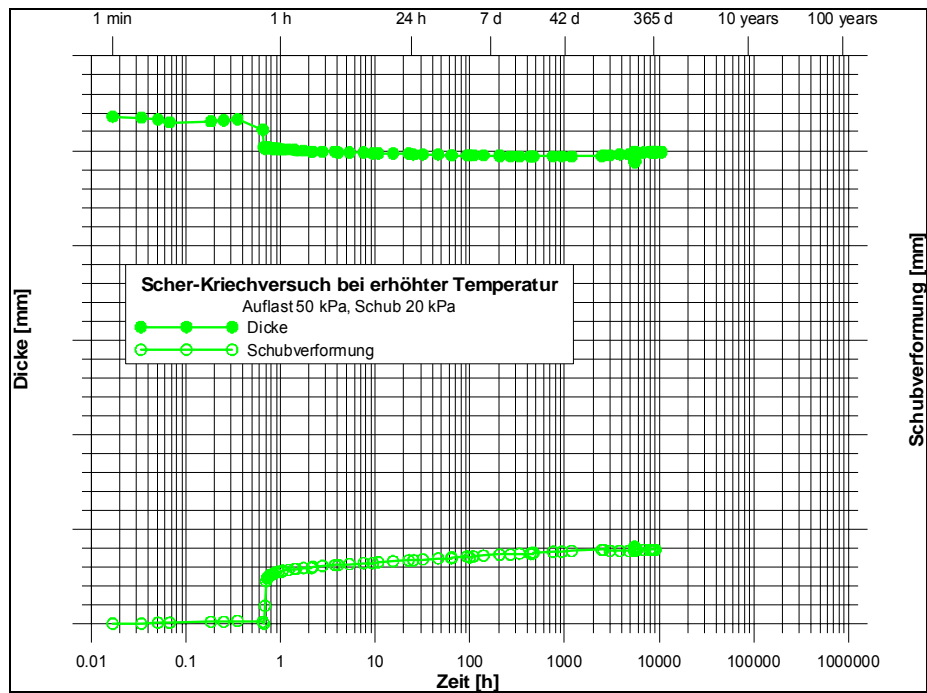


Bild 32: Dränmatte mit einem Geonetz-Sickerkörper entgegen der Produktionsrichtung gesichert! (In dieser Schub-Richtung blieb die Dränmatte stabil. Es trat weder ein Stabilitäts- und noch ein Scherversagen auf!)

5 Zusammenfassung

Zur Abklärung des Langzeit-Druckkriechverhaltens ist eine Reihe von unterschiedlichen Untersuchungen nötig. Tabelle 4 stellt ein umfassendes Versuchsprogramm für Dränmatten zusammen, das die Aspekte des Kriechens allein, der Alterung allein und des Kriechens unter Alterungseinfluss abdeckt.

Tabelle 4: „Langzeit-Untersuchungsprogramm“ für Dränmatten

Eigenschaft	Prüfmethode
Langzeit-Druckkriechverhalten	
Zeitstand-Druckkriechverhalten, konventionell <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
Druck-Kriechverhalten mit Schubbeanspruchung, konventionell <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
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	SIM (in Anl. an ASTM D6992)
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	SIM (in Anl. an ASTM D6992)
Druck-Kriechverhalten mit Schubbeanspruchung, konventionell 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, konventionell 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)
Dauerhaftigkeit	
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 ¹⁾
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 ¹⁾
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, 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 ¹⁾
„Langzeit-Wasserleitvermögen“	
Wasserleitvermögen (direkte Methode) an Messproben, die unter weicher Bettung vorbelastet wurden <u>Belastung:</u> $\sigma = 20$ kPa und 50 kPa <u>Bettung:</u> weich/weich und hart/weich <u>Prüfdauer für die Vorbelastung:</u> bis zu $t = 1$ Jahr	in Anl. an DIN EN ISO 12958
Wasserleitvermögen (indirekte Methode) an Messproben, die unter weicher Bettung vorbelastet wurden <u>Belastung:</u> Normalspannung, die zwischen starren Platten kurzzeitig eine prognostizierte Restdicke nach 100-jähriger Belastung unter $\sigma = 20$ 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

¹⁾ Bestimmung der OIT-Werte, der Stabilisatorgehalte und mechanischer Kennwerte nach unterschiedlichen Einlagerungszeiten

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

Das „Langzeit-Wasserableitvermögen“ wird maßgeblich durch das Kriechen des Sickerkörpers unter Druckbelastung 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 „TTS-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. Durch die Verschiebung der einzelnen Kriechmodul-Kurvenabschnitte auf der logarithmischen Zeitachse kann man die Masterkurve des Kriechmoduls direkt auf lange Zeitdauern hin extrapolieren.

Das „SIM-Verfahren“ (stepped isothermal method) ist eine Weiterentwicklung der „TTS-Methode“. Es benötigt für eine Masterkurve nicht mehrere Messproben sondern es können an ein und derselben Messprobe alle notwendigen Temperaturstufen durchfahren werden. Zeitraffende Untersuchungsmethoden erlauben zusammen mit konventionellen Druck-Kriechversuchen eine sichere Prognose des Kriechverhaltens und des Zeitstand-Verhaltens von Dränmatten.

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.

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 13252 "Geotextilen und geotextilverwandte Produkte – Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Dränanlagen"
- [10] DIN-Fachbericht 86 (2000): Leitfaden zur Beständigkeit von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten
- [11] Gartung, E. und Zanzinger, H. (1999): Abminderungsfaktoren zum Nachweis der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Geokunststoff-Dränelementen. 15. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [12] 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.
- [13] ISO/DIS 25619-1: Geosynthetics – Determination of compression behaviour – Part 1: Determination of compressive creep properties

- [14] ISO/DIS 25619-2: Geosynthetics – Determination of compression behaviour – Part 2: Determination of short-term compression behaviour
- [15] ISO/TR 20432: Guidelines to the determination of long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement
- [16] 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)
- [17] Müller, W. (2004): Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen. 20. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [18] Müller, W. (2005): Eignungsgutachten für Kunststoff-Dränelemente durch die BAM. 21. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“. Würzburg.
- [19] 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.
- [20] 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).
- [21] SKZ (2006): Zeitstand-Druckkriechversuche in Anl. an DIN EN 1897 an „Enkadrain 5006C/M200PP“ (unveröffentlicht).
- [22] Thornton, J.S. and Sandri, D. (2005): Introducing the Stepped Isothermal Method. Geo-Frontiers, Vol. 17, No. 3, S. 18-20.
- [23] 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.
- [24] 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).
- [25] 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.
- [26] Zanzinger, H. und Berkhout, H. (1995): Bestimmung des Wasserableitvermögens und deren Deutung. 11. Nürnberger Deponieseminar 1995, Eigenverlag LGA. S. 331-344.