

Was gibt es Neues?

Stand der Zulassungen von Geokunststoffen nach der DepV

Werner Müller

Andreas Wöhlecke

Zusammenfassung

Kunststoff-Dränelemente sind offenbar nach wie vor nicht ganz unumstritten. Vermutlich deshalb hat sich eine uneinheitliche Genehmigungspraxis eingebürgert. Es geht dabei um filtertechnische, aber auch um bemessungstechnische Fragen. Wie werden aus den charakteristischen Werten des Langzeitleitvermögens im Zulassungsschein die Bemessungswerte ermittelt? Sind die Sicherheiten ausreichend? Ist eine zusätzliche mineralische „Notentwässerungsschicht“ sinnvoll? Über den aktuellen Stand der Diskussion wird informiert.

In den auf der Internetseite der BAM erhältlichen Dokumenten über die Fremdprüfung wird der Stand der Technik ausführlich beschrieben. Hier wurden kleinere Ergänzungen vorgenommen. Es darf allerdings kein Missverständnis entstehen: Die Standard-Qualitätssicherungspläne beschreiben Mindestanforderungen. Der verantwortliche Fremdprüfer kann, wenn es aus seiner Sicht fachlich erforderlich ist, über diese Anforderungen hinausgehen. Das kann z. B. bei Art und Umfang der Probenahme der Fall sein.

Auch über Bentonitmatten wird wieder diskutiert, seitdem hier eine neue Produktidee umgesetzt wurde: die Bentonitmatte mit Kunststoffschutzbahn gegen Durchwurzeln und Austrocknung. Die Bewertung der Eigenschaften eines solchen Produkts ist ziemlich schwierig. Diese Produkte sind keine als Rollenware gelieferten Kombinationsdichtungen. Auch wenn in Reklameschriften manchmal dieser Eindruck vermittelt werden soll. Wir geben einen kurzen Einblick in die Bewertungsprobleme.

Derzeit werden neue europäische harmonisierte technische Spezifikationen für Geokunststoffe vorbereitet. Genauer: der Annex B der Anwendungsnormen, der Anforderungen an die Beständigkeit regelt, wird überarbeitet. Die neuen technischen Spezifikationen sind jedoch nach wie vor nicht gleichwertig zu den technischen Anforderungen der DepV. Sie sollen es auch nicht sein. Das Zulassungsverfahren für Geokunststoffe ist daher nur insoweit betroffen, als eventuelle neue Prüfverfahren zur Anwendung kommen. In diesem Zusammenhang

berichten wir auch kurz über die Fachdiskussionen zur Autoklav-Prüfung der oxidativen Beständigkeit und zum Zugversuch bei PEHD-Dichtungsbahnen.

Einleitung

Was gibt es Neues? In diesem Beitrag wird über den aktuellen Stand bei der Zulassung von Geokunststoffen berichtet. Was die erteilten Zulassungen selbst anbelangt, so kann sich jeder an Hand einer Liste im Internet¹ informieren. Dort findet man auch alle Dokumente zur Zulassung. Im Folgenden geht es daher um einige aktuelle fachliche Themen und zugehörige Fragen, die bereits in der obigen Zusammenfassung umrissen wurden.

1. Kunststoff-Dränelemente (KDE)

1.1 KDE und DepV

Nach der Deponieverordnung (DepV, Tabelle 2, Anhang 1) ist bei Oberflächenabdichtungen von Deponien der Klasse I, II und III eine mindestens 30 cm dicke Entwässerungsschicht mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $\geq 10^{-3}$ m/s und einem Gefälle von mindestens 5 % erforderlich. Eine solche Schicht kann nur aus mineralischen Baumaterialien, bestehend aus mittel bis grobem Kies, hergestellt werden. Sie muss mit einem Filtervliesstoff vom Rekultivierungsboden getrennt werden. Die Deponieverordnung steht im Einklang mit der Europäischen Deponierichtlinie. Danach sollte ein Oberflächenabdichtungssystem, falls man dieses für erforderlich hält, sogar einen „Drainage layer“ mit einer Dicke von mehr als 50 cm enthalten! Aus geotechnischer Sicht sind solche „mächtigen“ Entwässerungsschichten überdimensioniert. Ob es andere vernünftige Gründe gibt, sie zu bauen, sei dahin gestellt. Sie waren ursprünglich für die Basisabdichtung von „klassischen“ Hausmülldeponien konzipiert worden, um das spezielle Problem der Inkrustation der Basisentwässerungssysteme durch Ausscheidungen aus biologischen Stoffwechselprozessen in den Griff zu bekommen (Holzlöhner et al., 1995). Die Anforderungen waren dann aber „unbesehen“ für die Entwässerungsschicht in der Oberflächenabdichtung übernommen worden. Dort haben sie sich seither gehalten.

¹ Die Dokumente finden sich auf der Internetseite der BAM unter Service > Amtliche Mitteilungen > Abfallrecht bzw. unter der URL.: http://www.bam.de/de/service/amtliche_mitteilungen/abfallrecht/index.htm

In der Fußnote 4 zur genannten Tabelle der DepV wird aber immerhin die Möglichkeit eröffnet, dass von allen drei Anforderungen (Dicke, Durchlässigkeitsbeiwert und Gefälle) abgewichen werden kann, „*wenn nachgewiesen wird, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht und die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht dauerhaft gewährleistet sind.*“ Im Sinnzusammenhang der DepV bedeutet dauerhaft: Funktionserfüllung über mindestens 100 Jahre unter allen äußeren und inneren Einwirkungen. Ein geotechnisch fundierter Bau von Entwässerungsschichten muss sich auf die Fußnote 4 stützen. Wenn dieser Nachweis geführt werden kann, dürfen auch KDE verwendet werden. Eigentlich scheint klar, wie die Nachweisführung auszusehen hat, nämlich: Verwendung von Produkten, die von der BAM für diesen Anwendungszweck zugelassen wurden, und eine Bemessung im Einzelfall nach den anerkannten Regeln der Technik (GDA-Empfehlungen und DVWK-Merkblatt). Dass diese Bemessungsregeln ausreichend sind, wird immer wieder bezweifelt. Erneut gibt es daher eine Auseinandersetzung um die gelegentlich immer noch hartnäckig erhobene Forderung, ein KDE nur in Kombination mit einer mineralischen „Notentwässerungsschicht“ zu verwenden. Damit geht eine uneinheitliche Genehmigungspraxis einher. Im Folgenden soll auf dieses Problem eingegangen werden.

1.2 KDE und Notentwässerungsschicht

Die Forderung nach der Kombination von KDE und mineralischer Notentwässerungsschicht geht zurück auf eine sehr alte Empfehlung vom Juni 1999 der damaligen LAGA-Arbeitsgruppe „*Infiltration von Wasser in den Deponiekörper und Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen*“. In dem dann auch vom abfalltechnischen Ausschuss der LAGA gebilligten Arbeitsgruppenpapier „*Themenbereich Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen, Geotextile Entwässerungsschichten*“ wurde vorgeschlagen, diese bei Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien der Klasse I, II und bei Altdeponien zu verwenden, aber nur in Verbindung mit einer reduzierten mineralischen Entwässerungsschicht. Diese Einschränkung wurde mit Forschungsbedarf im Hinblick auf Durchwurzelungsproblematik und Langzeitfestigkeit der Geokunststoffe begründet. Dabei wurde ausdrücklich auf ein Forschungsvorhaben *Filter- und Dränwirksamkeit von Abdecksystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien* am Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München verwiesen (Heyer et al., 2004).

Im Jahr 2004 wurde der Abschlussbericht dieses Forschungsvorhabens vorgelegt. Die Zusammenfassung kommt zu einer klaren Schlussfolgerung (Heyer et al., 2004).

„Die Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten von Dränmatten ergaben unter den Randbedingungen von Oberflächenabdichtungssystemen vergleichsweise hohe Abflussleistungen, so dass sie als gleichwertige Alternative zu mineralischen Dränschichten eingesetzt werden können. Diese Gleichwertigkeit im Hinblick auf die hydraulische Leistungsfähigkeit konnte auch durch Messungen im Testfeld der Deponie Kienberg belegt werden.

Im Rahmen dieser Forschung wurden umfangreiche Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Dränmatten in Oberflächenabdichtungssystemen durchgeführt und mit Erfahrungen aus der Praxis sowie Messungen in Testfeldern ergänzt. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Dränmatten weisen in der Regel ausreichende Scherfestigkeiten auf, so dass die Standsicherheit von Böschungen bis zur Neigung 1:3 ohne zusätzliche Bewehrungslagen nachgewiesen werden kann. Strukturzusammenbrüche wurden trotz großer Zusammendrückungen insbesondere in Kombination von lotrechter Last mit zusätzlicher Schubbeanspruchung bei üblichen Böschungsneigungen nicht festgestellt.

- *Dränmatten sind in der Regel ausreichend hydraulisch leistungsfähig, so dass im Regelfall eine ausreichende Abflussleistung nachgewiesen werden kann. Beim Nachweis sollten jedoch keine Sicherheitsbeiwerte analog FS_{CR} der GDA-Empfehlungen, sondern Erkenntnisse aus Langzeituntersuchungen Anwendung finden.*
- *Ausgrabungen zeigten nur eine vernachlässigbar geringe Beeinträchtigung der Abflussleistung infolge chemischer und biologischer Einwirkungen.*
- *Die Messungen im Testfeld der Deponie Kienberg belegen auch bei extremen Regenereignissen die Gleichwertigkeit zu mineralischen Dränsystemen. ...“*

Die Frage der Langzeitfestigkeit von KDE wurde Anfang der 2000er Jahre von der BAM im Zusammenhang mit Eignungsgutachten untersucht. Dabei wurde ein Verfahren angegeben, um produktbezogen anhand von Langzeituntersuchungen die Auswirkungen der allmählichen Formveränderung der KDE unter der mechanischen Belastungen (das sogenannte Kriechen) auf das Langzeit-Wasserleitvermögen zu bestimmen (Müller et al., 2008). Dadurch konnte der pauschale Sicherheitsbeiwert FS_{CR} ersetzt werden. Aus der Tatsache, dass im Rahmen der Untersuchungszeiträume des Forschungsvorhabens kein Strukturzu-

sammenbruch gefunden wurde, darf man noch nicht schlussfolgern, dass er auch nach viel längeren Zeiten nicht noch auftreten könnte. Es wurde daher gezeigt, wie die Belastungsgrenzen (Druck- und Scherspannungen) für die Kunststoff-Dränelemente im Hinblick auf ein langfristig durch Formveränderung ausgelöstes Scherversagen und einen Strukturzusammenbruch im Dränkern – bzw. ein Stabilitätsversagen, wie wir das nennen – ermittelt werden können (Müller et al., 2008; Zanzinger, 2012).

Diese Forschungsergebnisse fanden auch Eingang in die Zulassungsrichtlinie und die Zulassungen der Produkte. Ein von der BAM zugelassenes KDE hat eine ausreichende Haltbarkeit. Jedes Kunststoffprodukt verändert sich jedoch durch die Kriechverformung unter der Einwirkung von Druck- und Scherkräften. Im Zulassungsschein werden daher für jedes KDE die charakteristischen Werte des Langzeit-Wasserleitvermögens unter dieser Einwirkung angegeben. Ebenso werden die charakteristischen Werte der maximal zulässigen Druck- und Scherkräfte aufgeführt. Diese Werte bilden den Ausgangspunkt für die Bemessung nach den Regeln der Technik.

In diesem Zusammenhang sei auch auf andere Forschungsergebnisse zu den Eigenschaften von KDE verwiesen (Melchior, 2010; Müller-Rochholz, 1999; Müller-Rochholz and Bronstein, 2000). Durch diese Forschungsarbeiten, durch die Etablierung eines Zulassungsverfahrens, das die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen berücksichtigt, und durch die entsprechende Überarbeitung der Bemessungsrichtlinien wurden die damals berechtigten Bedenken der LAGA ausgeräumt und der Weg aufgezeigt, wie Kunststoff-Dränelemente DepV-konform verwendet werden können. Warum wird also dennoch immer wieder die Notentwässerungsschicht ins Gespräch gebracht? Vielleicht hängt das damit zusammen, dass bei den Bemessungsregeln noch einige Unklarheiten bestehen. Diese sind jedoch nicht grundsätzlicher Natur. Erforderlich sind vielmehr nur einzelne Ergänzungen und Verbesserungen.

1.3 KDE und Bemessung Wasserleitvermögen

Die Bemessung muss (unter anderem) drei Fragen beantworten. Reicht das Langzeit-Wasserleitvermögen des KDE im Hinblick auf alle Einwirkungen im Bauwerk tatsächlich aus? Funktioniert auch der geotextile Filter bei der vorgesehenen Rekultivierungsschicht? Besitzt schließlich das Kunststoff-Dränelement einen ausreichenden Widerstand gegen die im Bauwerk wirksam werdenden Druck- und Scherkräfte? Diese Fragen können nur im Zusammenhang mit den Einwirkungen bei einem gegebenen Bauvorhaben beantwortet werden. Die Frage, ob ein KDE eingesetzt werden kann, entscheidet sich daher im Einzelfall bei

der Bemessung nach den anerkannten Regeln der Technik. Zunächst sollen die Diskussionspunkte beim Wasserleitvermögen betrachtet werden, siehe dazu die GDA Empfehlung E2-2.

Diese Empfehlung behandelt die Einwirkungen bei der mineralischen Entwässerungsschicht und beim KDE unterschiedlich. Für die mineralische Entwässerungsschicht wird generell gefordert:

„Für Vorbemessungen von Entwässerungsschichten sollte grundsätzlich von einer maßgeblichen Dränspende von $q_s = 25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) = 25 \text{ mm}/\text{d}$ (Tagesspitzenwert) ausgegangen werden. Bei einer stationären Bemessung mit diesem Wert erübrigt sich in der Regel ein projektspezifischer Nachweis.“

Bei den KDE heißt es dagegen ergänzend:

„Bei Ansatz einer hohen Dränspende $q_s = 10 \text{ mm}/\text{d}$ ($1,16 \cdot 10^{-4} \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) und Rekultivierungsschichtmächtigkeiten mit $d = 1,0 \text{ m}$ wird ein Sicherheitsfaktor $S \geq 1,1$ empfohlen. Bei Ansatz einer maximalen Dränspende $q_s = 25 \text{ mm}/\text{d}$ ($2,89 \cdot 10^{-4} \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) ist $S = 1,0$ ausreichend.“

Es gibt keinen Grund die Seite der Einwirkung in der Bemessungsgleichung bei mineralischer und geotextiler Entwässerungsschicht unterschiedlich zu handhaben. Dieser Absatz sollte daher gestrichen oder eine einheitliche Formulierung gefunden werden.

Das Hauptproblem besteht jedoch darin, dass manchmal der GDA-Empfehlung E2-20 gegenüber, insoweit sie KDE behandelt, ein grundsätzlicher Vorbehalt formuliert wird. Der besteht in der Auffassung, dass eine relativ dicke, mittel- bis grobkiesige Entwässerungsschicht eine größere „Sicherheitsreserve“ hätte als das dünne KDE. Diese Auffassung beruht auf sehr einfachen intuitiven Vorstellungen, wie Wassertransport, Durchwurzelungs- und Ausfällungsvorgänge in Entwässerungsschichten wohl ablaufen würden. Empirisch konnten nicht zutage gefördert werden, dass solche „Sicherheitsreserven“ (Heyer et al., 2004; Müller-Rochholz and Bronstein, 2000) erforderlich sind. Die „Sicherheitsreserven“ sind in ihrem Wirkungsmechanismus auch nirgendwo fachlich beschrieben oder gar quantifiziert. Es wird vergessen, dass diese „Sicherheitsreserven“ aus der Betrachtung von biologischen Inkrustationsvorgängen in der Basis von Hausmülldeponien abgeleitet wurden, die mit den Prozessen in Oberflächenabdichtungen nichts zu tun haben. Diese Reserven seien, so wird weiter argumentiert, bemessungstechnisch auch gar nicht zu erfassen, aber eben doch da. Daraus wird dann geschlussfolgert, dass eine auf der Basis der Fußnote 4 der Tabelle 2 im Anhang

1 der DepV konzipierte Entwässerungsschicht mit KDE automatisch mit einer mineralischen Notentwässerungsschicht kombiniert werden muss, um eben diese „Sicherheitsreserve“ zu implementieren. Die Intention von Fußnote 4 wird damit aber konterkariert.

Solch eine Betrachtung ignoriert, dass auch dünne KDE ein hohes Wasserableitvermögen haben und die Bemessungsgleichung für diese Elemente sehr konservativ ist. Mit der Bemessungsgleichung wird angenommen, dass „auf einen Schlag“ die über die gesamte Entwässerungslänge anfallende Wassermenge im Fußpunkt durch den Querschnitt des KDE hindurchgehen können muss. Der Abfluss wird in der Regel nicht so verlaufen und F. Saathoff hat gezeigt, dass auch ein KDE bei realistischen Szenarien noch eine Sicherheitsreserve hat (Saathoff, 1999).

Der Vorbehalt hängt wohl auch zusammen mit einer gewissen Überschätzung der Bedeutung der Leistungsfähigkeit einer Entwässerungsschicht für die Standsicherheit der Rekultivierungsschichten. Bei Rekultivierungsböden mit hohem Wasserspeichervermögen, eher geringer Durchlässigkeit und relevanter Änderung der Scherfestigkeit mit dem Wassergehalt wird das Wasserableitvermögen der Entwässerungsschicht bei einem Regenereignis eher gering beansprucht. Umgekehrt ist ein hohes Wasserableitvermögen beim Regenereignis dann erforderlich, wenn der Boden gut durchlässig ist und ein geringes Wasserspeichervermögen hat. Die Scherfestigkeit eines Bodens mit diesen Eigenschaften wird sich aber in der Regel mit dem Wassergehalt auch nur wenig ändern.

Rutschungen in Oberflächenabdichtungssystemen hängen vor allem mit unzureichender Reibung in den Grenzflächen der Dichtungskomponenten zusammen und sind zumeist vergleichsweise harmlos (Witt, 2005, 2009). Regenereignisse führen vor allem durch die Erosion zu großen, oberflächennahen Rutschungen in noch nicht ausreichend mit Bewuchs ausgestatteten Rekultivierungsschichten. Weiterhin können sie in „Stauhorizonten“ innerhalb der Rekultivierungsschicht auftreten. Dass ein Rekultivierungsboden direkt oberhalb der Entwässerungsschicht aufgrund einer Durchnässung rutscht, die durch ein Überschreiten von deren Wasserableitvermögen bei Regenereignis verursacht wurde, sollte im Vergleich dazu als ein eher selten vorkommendes und auch unspektakuläres Ereignis bewertet werden, da es primär im Fußpunkt der Flächenentwässerung stattfinden würde (Witt, 2009). Die Vorlage und Auswertung von Fallstudien tatsächlicher Rutschungen könnte helfen, eine übertriebene Besorgnis abzubauen.

Der Fachbeirat hat die DGGT gebeten, solche Vorbehalte in der GDA-Empfehlung zu berücksichtigen. Dabei wurde folgender Diskussionsvorschlag unterbreitet (siehe dazu das Protokoll der 9. Fachbeiratssitzung):

„GDA E 2-20 Nr. 5.4 Absatz 3 sollte nach den Spiegelstrichen wie folgt ergänzt werden:

Ergänzende Nachweise sollten insbesondere geführt werden bei

- *einem hohen rechnerischen hydraulischen Auslastungsgrad der Dränmatte,*
- *sehr langen Böschungen,*
- *sehr steilen Böschungen oder*
- *besonderer Empfindlichkeit oder Umweltrelevanz des Standortes.*

Erforderlichenfalls ist zusätzlich zur Dränmatte eine gegenüber den Anforderungen der Deponieverordnung dickenreduzierte mineralische Entwässerungsschicht vorzusehen.“

Dieser Vorschlag hat allerdings den Nachteil, dass nicht klar ist, was mit „ergänzenden Nachweisen“ und mit „erforderlichenfalls“ gemeint ist. Zudem wird einseitig auf die Notentwässerungsschicht als einzige Maßnahme abgehoben. Es würde sich mit dieser Formulierung an den „genehmigungstechnischen“ Problemen und den Unsicherheiten im Umgang mit den KDE praktisch kaum etwas ändern. Man könnte jedoch auf den „hohen rechnerischen hydraulischen Auslastungsgrad“ des KDE abheben, der bei kritischen Bedingungen eben nicht mehr akzeptabel wäre. In enger Anlehnung an die Fußnote 4 der DepV würden wir vorschlagen, folgende Formulierung in die GDA E2-20 aufzunehmen:

„In Fällen, die kritisch im Hinblick auf die Standsicherheit sind (z. B. wenn Böschungen sehr lang oder sehr steil sind oder wenn aufgrund einer möglichen Schadenshöhe das Risiko von Rutschungen als besonders hoch bewertet wird) und die zugleich kritisch im Hinblick auf die hydraulische Leistungsfähigkeit sind (hoher Auslastungsgrad des für die Bemessung berechneten Wasserleitvermögens) sollten zusätzlich konstruktive Maßnahmen ergriffen werden (z. B. Einbau einer dickenreduzierten mineralischen Entwässerungsschicht oder Maßnahmen, wie sie in (Borrmann, 2007) oder (Witt, 2009) beschrieben werden)“.

Streng genommen, könnte man die kritischen Fälle und den in diesen Fällen noch zulässigen Auslastungsgrad noch mit Zahlen weiter spezifizieren. Andererseits würde das den Ermessensspielraum von Beteiligten vielleicht zu sehr einengen. Wir hoffen, dass die gemeinsame Unterarbeitsgruppe des AK 5.1 und 6.1 der DGGT sich in absehbarer Zeit mit diesem Thema befassen und eine Überarbeitung der GDA E2-20 vornehmen wird.

Abschließend soll noch kurz auf ein neues Argument für die vermeintlichen oder tatsächlichen Sicherheitsreserven der mineralischen Entwässerungsschicht eingegangen werden. Käme es in der Oberflächenabdichtung zu Setzungen, bei denen sich Mulden ausbilden, das Gefälle sich also nicht nur verringert, sondern sogar umkehrt, dann würde der Wasserspiegel des Einstaus in dieser Mulde in einer dicken mineralischen Entwässerungsschicht innerhalb dieser Schicht verbleiben. Bei einem dünnen KDE würde er dagegen in die Rekultivierungsschicht wandern. Es handelt sich hier aber um ein Scheinargument. Diese Durchnässung der Rekultivierungsschicht wäre gar nicht relevant für die Standsicherheit, da dort wo sie auftritt, eo ipso keine Hangabtriebskraft wirkt. Zudem würden Mulden-artige Setzungen in Oberflächenabdichtungen vermutlich zu lokalen Dehnungen in den Dichtungskomponenten führen, die die zulässigen Grenzen praktisch aller erlaubter Dichtungskomponenten überschreiten würden. Kontrolle und Reparatur wären ohnehin erforderlich.

1.4 KDE und Bemessung von Böschungsneigung und Auflast

Die Reibungskräfte in den Grenzschichten zwischen den Abdichtungskomponenten und die innere Scherfestigkeit der Komponenten bestimmen, welche Auflast und Böschungsneigung möglich ist. Die Bestimmung von Reibungsbeiwerten und die Bemessung im Hinblick auf Reibungskräfte stehen dabei nicht zur Diskussion. Bei den Kunststoff-Dränelementen muss jedoch die Kurzeit-Scherfestigkeit, die bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten ermittelt wird, von der Langzeit-Scherfestigkeit, die von der allmählichen Verformung unter der dauerhaften Einwirkung der Kräfte beeinflusst wird, unterscheiden (Müller, 2012). Weiterhin kann es bei hohen Auflasten und großen Scherkräften zum Stabilitätsversagen des Dränkerns und zu einer drastischen Verminderung des Wasserableitvermögens kommen (Müller et al., 2008). In manchen Fällen finden die zulässigen Auflasten und Böschungsneigungen ihre Grenze in diesem Phänomen und nicht in der Reibung oder inneren Scherfestigkeit. Im Zulassungsschein werden daher für jedes Produkt die noch zulässigen Druck- und Scherspannungen angegeben. Es handelt sich dabei um charakteristische Werte, die aus experimentellen Untersuchungen gewonnen wurden.

Welche Bemessungswerte ergeben sich daraus? Folgt man der Vorgehensweise bei den Reibungsbeiwerten, siehe GDA E3-8, so müssten die charakteristischen Werte durch Teilsicherheitsbeiwerte dividiert werden. Die Teilsicherheitsbeiwerte müssten nach DIN 1054 abhängig vom Anwendungsbereich, von der Art des Parameters und vom Lastfall festgelegt werden. Für Standsicherheitsnachweise nach dem Sicherheitskonzept mit globalen Sicherheitsbeiwerten wären Rechenwerte aus den charakteristischen Werten nach E 96 der EAU 1990 zu bestimmen und diese in Berechnungen der Standsicherheit nach den bisherigen globalen Methoden anzusetzen. Welche Werte und Rechenverfahren werden hier verwendet? Diese Frage scheint uns noch nicht abschließend geklärt zu sein. Die gemeinsame Unterarbeitsgruppe des AK 5.1 und 6.1 der DGGt wird sich auch mit diesem Thema befassen müssen.

1.5 KDE und filtertechnische Bemessung

Ob KDE und Rekultivierungsboden filtertechnisch zueinander passen, muss durch eine Bemessung nach den Anforderungen des DVWK-Merkblatt 221 aus dem Jahr 1992 geklärt werden. Das Merkblatt weist auf die Bedeutung der Dicke des geotextilen Filters hin und enthält die Empfehlung, dass die Dicke mindestens der (25 bis 50)-fachen Öffnungsweite entsprechen sollte. Schon damals war allerdings nicht unumstritten, wie bedeutsam dieses Kriterium tatsächlich ist (Kossendey and Karam, 1998)². Dies hatte wohl dazu geführt, dass in der Praxis die Empfehlung eher selten konsequent befolgt wurde. Der Fachbeirat zur Zulassung beschloss daher im Jahr 2011, dass der Empfehlung im Rahmen der Zulassung wieder Geltung verschafft werden muss. Filtervliesstoffe sollten nur zugelassen werden, wenn sie dieses Kriterium erfüllen. Dies sollte ab 01. Januar 2013 auch für die Filtervliesstoffe in den KDE gelten.

Im Zusammenhang dieser Diskussion wurden für die zugelassenen Kunststoff-Dränelemente mit den nur 200 g/m² schweren Filtervliesstoffen, die das genannte Kriterium verfehlen, spezielle Filterregeln in den Zulassungsscheinen angegeben, die auch für diese Produkte einen filtertechnischen Eignungsnachweis ermöglichen (Saathoff et al., 2012). Der Fachbeirat war der Meinung, dass diese Sonderregelung auslaufen sollte, so dass filtertechnische Nachweise wieder einheitlich auf der Grundlage des DVWK-Merkblatts erfolgen. Es wäre jedoch unverhältnismäßig gewesen, die bereits laufenden oder schon beauftragten Projekte mit dieser

² Siehe dazu auch die Vorträge auf der 3. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, Geotechnik, Sonderheft 1993. Ein Einblick in den aktuellen Stand der internationalen filtertechnischen Diskussion wird gegeben in: Giroud, J.P., 2010. Development of criteria for geotextile and granular filters. Prestigious Lecture, Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Guarujá, Brazil, pp. 45-64.

Umstellung zu belasten. Die Zulassung dieser Produkte wurde daher mit ausdrücklichem Bezug auf einzelne Baumaßnahmen verlängert. Bei den in den Nachträgen zur Zulassung genannten Bauvorhaben gilt daher die Zulassung dieser Produkte ohne Einschränkung, aber auch mit allen sich aus dem Zulassungsschein und den Zulassungsrichtlinien ergebenden Pflichten weiter. Alle drei Hersteller zugelassener Produkte haben dazu Listen von solchen Bauvorhaben vorgelegt, die noch ein bis zwei Jahre, in Einzelfällen auch noch etwas länger laufen. Alle genannten Bauvorhaben umfassen insgesamt eine Fläche von gut 1,5 Millionen Quadratmeter. Man kann daran ablesen, dass KDE doch in erheblichem Umfang – „Notentwässerungsschicht“ hin oder her – Eingang in den Deponiebau gefunden haben.

2. Änderungen bei europäischen technischen Spezifikationen

Bisher sahen die geotechnischen Anwendungsnormen nur die Angabe einer Lebensdauer von mindestens 25 Jahren vor. Nunmehr soll es eine Lebensdauer-Klassifikation geben. Ein Produkt kann bis zu 25 Jahren, bis zu 50 Jahren und *bis zu* 100 Jahren beständig sein. Für jeden Alterungsmechanismus (z. B. Hydrolyse oder Oxidation) wird ein Prüfverfahren angegeben. Das wird einheitlich auf alle vom jeweiligen Alterungsmechanismus betroffenen Produkte angewendet und dabei immer nur die Veränderung der Zugfestigkeit gemessen. Die Eingruppierung in die Lebensdauerklassen erfolgt nach Prüfzeiten. Ist nach einer gewissen festgelegten Prüfzeit die Restfestigkeit größer als 50 % erfolgt die Zuordnung zu der mit dieser Prüfzeit verbundenen Beständigkeitsklasse. Man hat sich damit allerdings auf etwas dünnes Eis begeben. Im Vorwort zum Annex B der Anwendungsnormen, der die Beständigkeit behandelt, heißt es vorsichtig:

„The indicated service life of the geosynthetic cannot be interpreted as a guarantee given by the manufacturer but should be regarded only as a tool for selecting a product suitable for the anticipated working life. The tests described in this annex do not allow the determination of reduction factors. The tests described in this annex are screening tests to show the ability of a product to serve for a certain time.“

Wir sind der Auffassung, dass man für das *screening* in Bezug auf die *ability to serve for a certain time* (1) auch die Untersuchung der Additive, die die Lebensdauern bei polyolefinen Produkten überhaupt erst gewährleisten, und deren Veränderung mit einbeziehen müsste, (2) bei etwas tieferen Temperaturen prüfen (80 °C statt 100 °C) und (3) sich etwas mehr Prüfzeit lassen sollte.

Mit diesem neuen Annex B zu *Durability aspects* werden die Anwendungsnormen als harmonisierte technische Spezifikationen nicht so erweitert, dass eine Gleichwertigkeit zu den Anforderungen der DepV, die eine Funktionserfüllung unter allen äußeren und inneren Einwirkungen im Abdichtungssystem über *mindestens* 100 Jahre fordert, gegeben ist³. Das war auch nicht die Intention dieser Erweiterung. Im deutschen Deponiebau kann daher auch nach Verabschiedung dieser Normen eine CE-Kennzeichnung gemäß harmonisierter technischer Spezifikation nicht die Zulassung nach der DepV ersetzen.

Im Zusammenhang mit diesen Änderungen gab es eine sehr intensive und heftige Diskussion darüber, ob der sogenannte Autoklav-Versuch Stand der Technik bei der Prüfung und Beurteilung der Lebensdauer von Geokunststoffen aus PE und PP werden soll. Bei diesem Verfahren werden Versagenszeiten nicht nur bei hohen Temperaturen, sondern auch bei sehr hohen Sauerstoffdrücken ermittelt und daraus die Lebensdauer berechnet⁴. Obwohl dieser Versuch schon vor bald 15 Jahren vorgeschlagen wurde, gibt es kaum Veröffentlichungen und verwertbare Daten. Eine Analyse der zugänglichen Daten zeigt aber, dass man selbst hochwertigen Produkten, die in der Geotechnik und z. T. auch im Deponiebau schon seit langem verwendet werden, auf der Grundlage dieses Verfahrens keine Lebensdauer von 100 Jahren attestieren dürfte. Bild 1 zeigt ein Beispiel (Greenwood and Curson, 2012).

³ Der Nachweis der Funktionserfüllung umfasst nicht nur die Überprüfung der rein materialtechnischen Lebensdauer, sondern auch der andere relevanten technischen Eigenschaften (z. B. Langzeit-Wasserableitvermögen und Langzeit-Scherfestigkeit bei Kunststoff-Dränelementen), die derzeit noch nicht Bestandteil der harmonisierten technischen Spezifikationen sind.

⁴ Bei diesem Versuch werden die Zeiten bis zum Abfall der Zugfestigkeit auf 50 % bei 80 °C und drei sehr hohen Sauerstoffdrücken von 1, 2 und 5 MPa sowie bei 5 MPa und drei Temperaturen von 60, 70 und 80 °C in einem speziellen Autoklav gemessen. Aus den insgesamt 5 Messpunkten wird mit der Arrhenius-Gleichung und einer linearen Druckabhängigkeit der Aktivierungsenergie die Lebensdauer berechnet.

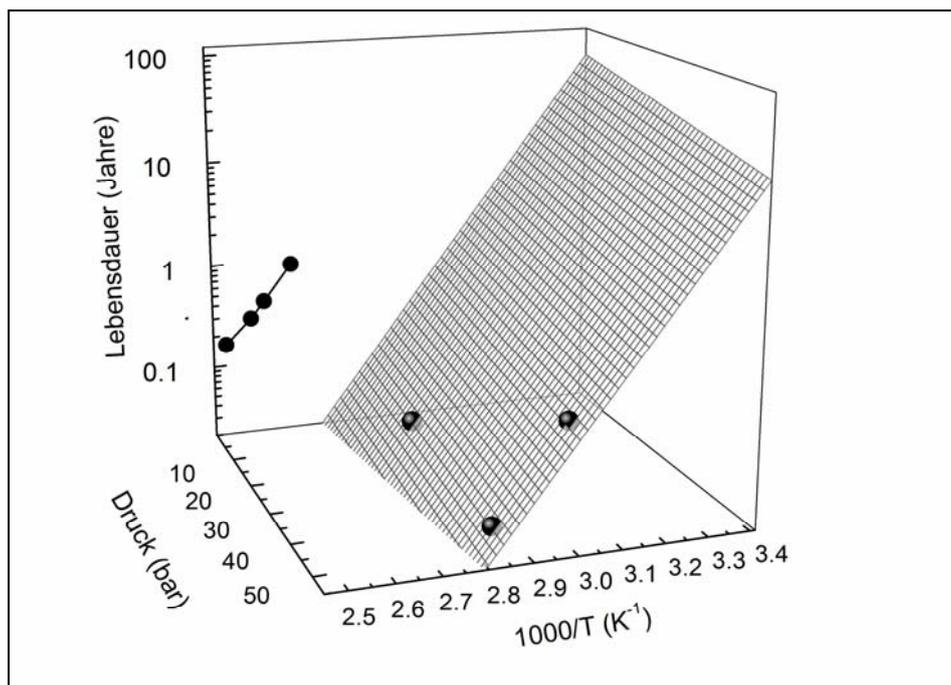


Bild 1: Arrhenius-Diagramm für Druck- und Temperaturabhängigkeit der Lebensdauer eines PP-Bewehrungsgitters. Kugeln: Autoklav-Versuch. Schwarze Punkte: Warmlagerungsversuch im Umluftwärmeschrank. Die Extrapolation der Autoklav-Ergebnisse über die ebene Extrapolationsfläche ergibt einen vollständigen Festigkeitsverlust bei diesem PP-Bewehrungsgitter nach bereits 75 Jahren bei normalen Bedingungen (20 °C und 0,2 bar Sauerstoffpartialdruck der Luft) (Greenwood and Curson, 2012).

Das Verfahren ist umstritten. Kurz gesagt gibt es zwei Kritikpunkte, die sich auf zwei Beobachtungen abstützen.

1. Unter hohem Sauerstoffdruck kommt die Stabilisierung, die eigentlich für die Lebensdauer verantwortlich ist, nicht genügend zu Geltung. Dies gilt vor allem für phenolische Antioxidantien (Robertson, 2013; Zanzinger and Hausmann, 2013). Daraus folgt, dass man hohem Druck die Produkte im Hinblick auf eine ihrer wichtigsten Eigenschaften, nämlich Art und Menge der Antioxidantien, nicht vergleichen kann.
2. Aus der Messung bei hohem Sauerstoffdruck wird die Versagenszeit bei 0,02 MPa Sauerstoffpartialdruck der Luft extrapoliert. Führt man dieses Extrapolationsverfahren bei 80 °C durch, so ist die extrapolierte Versagenszeit um ein bis zwei Größenordnungen (!) kleiner als die Versagenszeit, die tatsächlich bei 80 °C in Luft gemessen wird (siehe Bild 1, (Greenwood and Curson, 2012)). Man kann die Lebensdauer in Luft bei 80 °C mit diesem Verfahren also nicht richtig vorhersagen. Daraus folgt, dass man *a fortiori* annehmen muss, dass die Lebensdauer bei 20 °C in Luft dann erst recht nicht vorhergesagt werden kann.

Dies lässt sich noch etwas genauer an Hand von Bild 1 erläutern: Tatsächlich ist die in Bild 1 gezeigte Extrapolation über den Druck offenbar falsch, da selbst ohne Sauerstoff (0 bar) noch Abbau durch Oxidation angezeigt wird. Die extrapolierte Lebensdauer wäre auch ohne Sauerstoff nur klein. Was natürlich nicht sein kann. Die „wahre“ Extrapolationsfläche müsste sich zur hinteren Wand im Bild 1 hin daher steil nach oben biegen, wie es auch die Warmlagerungsdaten zeigen. Die Lebensdauer würde dadurch erheblich länger. Andererseits ist die Neigung der Fläche über der Achse ($1000/T$) bei kleinen Drücken viel zu steil. Sie entspricht der Neigung der Verbindungslinie der Daten aus der Warmlagerung. Man weiß aber, dass sich diese Linie zu tiefen Temperaturen hin abflachen wird. Die „wahre“ Extrapolationsfläche würde sich daher zur hinteren Ecke hin deutlich abflachen. Die Lebensdauer würde dadurch wiederum kürzer. Es ist also gar nicht möglich aus Messungen bei hohen Drücken und Temperaturen die Lebensdauer vorherzusagen.

Es wurde noch kein abschließendes Urteil über den Autoklav-Versuch gefällt. Zanzinger und Hausmann (2013), aber auch wir, schlagen z. B. vor, dass man bei Sauerstoffdrücken prüfen sollte, die deutlich unterhalb von 1 MPa liegen, z. B. bei 0,1, 0,2 und 0,5 MPa. Man würde dabei die genannten Kritikpunkte vermeiden, hätte immer noch einen gewissen Beschleunigungseffekt und könnte vor allem die Vorteile des Autoklav-Versuchs (gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit) weiterhin nutzen.

Die Zulassungsstelle muss ein solches Verfahren, wenn es als Stand der Technik betrachtet wird, auch auf die bereits zugelassenen Produkte dann anwenden, wenn die Vorhersagen dieses Verfahrens in deutlichem Widerspruch zu den Vorhersagen der bereits verwendeten Verfahren stehen können. Die BAM verfügt über genügend Prüfkapazität, so dass dieses Verfahren (siehe Fußnote 1) der Lebensdauerbestimmung für alle Zulassungsnehmer einheitlich und damit fair angewendet werden kann. Die Dinge sind im Fluss. Es scheint aber so, als werde durch die Kontroverse über den Autoklav-Versuch die Diskussion, ob Vliesstoffe und Gewebe aus PP und aus diesen hergestellte Verbundprodukte überhaupt für den Deponiebau geeignet sind, an einer ganz unerwarteten Stelle neu eröffnet.

Man sollte hinzufügen, dass die Idee, in reiner Sauerstoffatmosphäre bei hohem Druck die Beständigkeit gegen Oxidation zu prüfen und dadurch die Prüfzeiten drastisch zu verkürzen, schon sehr alt ist. Sie war vor über 30 Jahren in der Gummi- und Kabelindustrie geboren worden. Man machte dort aber die Erfahrung, dass keine Korrelation zwischen den Ergebnissen der Hochdruckprüfung und dem tatsächlichen Verhalten der Produkte bei der Anwendung bestand. Man kam daher von dieser Prüfmethode wieder ab (Spetz, 1995). Vielleicht muss auch die Geokunststoffindustrie hier ihren eigenen Lernprozess durchlaufen.

3. En passant: Schutzschichten.

Was hat man sich nicht auf diesen Fachtagungen über das Kriterium für die Bemessung von Schutzschichten gestritten. Mache einen Lastplattendruckversuch, lasse sich die Dellen in der Dichtungsbahn im darunter liegenden Weichblech abbilden, bestimme den Kreisbogen, der in die Delle passt, berechne das Verhältnis von Bogenlänge zur Sekante: Soweit bestand Konsens. Aber dann: diese „Wölbogendehnung“ müsse $\leq 0,25\%$ sein, so forderten die Einen. Ihr seid doch nicht bei Trost, sagten die Anderen: Die Dichtungsbahn schaffe auf alle Fälle eine Langzeit-Dehnung von mindestens 3% . Da könne man doch nicht $0,25\%$ als Grenzdehnung für die Bemessung von Schutzschichten im Rahmen der Zulassung fordern. Der Grenzwert von $0,25\%$, wurde erwidert, gilt für die Wölbogendehnung und die entspricht nur der reinen Flächendehnung. Selbst wenn die Schutzschicht so gut vor dem 16/32 Kies schützt, dass allenfalls Dellen mit nur noch relativ kleiner Flächendehnungen entstehen, dann werden aber immer noch Biegedehnungen in den gekrümmten Randbereichen der Dellen auftreten, die erheblich größer sind und sogar im Bereich der noch zulässigen Langzeit-Dehnung liegen können. Man verhindert diese zu großen Randfaserdehnungen durch eine Schutzschicht eben nur dann, wenn die dafür sorgt, dass die Flächendehnung kleiner als $0,25\%$ ist. Das hat den Siegeszug der Sandmatte ermöglicht. So ungefähr geht die Geschichte. Sie stimmt nicht ganz, weil sie etwas unvollständig erzählt ist.

Inzwischen ist im Deponiebau akzeptiert, dass man Schutzschichten so bauen muss, dass die Wölbogendehnung der Dichtungsbahn in den Dellen, die unter der Schutzschicht noch entstehen, sehr klein ist. Im Tunnelbau verfährt man aber z. B. immer noch anders. Die Zulassungsanforderung wurde mit theoretischen Überlegungen und experimentellen Befunden begründet. Es gab allerdings keinen direkten experimentellen Beweis für die Richtigkeit dieser Vorgehensweise. Der wurde jetzt von F. B. Abdelaal, R. K. Rowe und R. W. I. Brachman mit einer bei *Geosynthetics International* eingereichten Arbeit geliefert. Eine Dichtungsbahn wurde von den Autoren vorgealtert, dann in einen Zeitstand-Lastplattendruckversuch gepackt. Und siehe da: Die Spannungsrisse entstanden genau dort, wo die hohen Biegespannungen in den Randbereichen der Dellen auftraten (Bild 2). Der Grenzwert der Randfaserdehnung, oberhalb dessen die Bildung von Spannungsrisse zu beobachten war, lag ziemlich genau dort, wo die BAM ihn angesiedelt hatten (Bild 3).

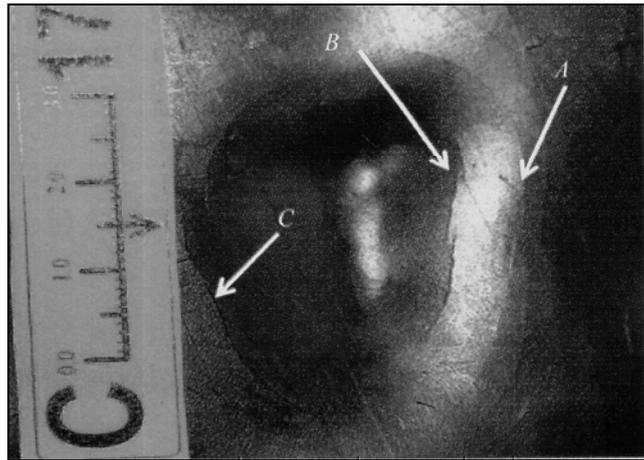


Bild 2: Spannungsrissbildung im Randbereich von Dellen in einem Zeitstand-Lastplattendruckversuch bei 75 °C an einer vorgealterten 1,5 mm dicken PEHD-Dichtungsbahn. Aufbau: Sandschicht, Bentonitmatte, Weichblech, Dichtungsbahn, 560 g/m² schwerer Vliesstoff, grober Kies (D₁₀ = 32 mm, D₈₅ = 55 mm), Auflast 250 kPa. Die Abbildung wurde aus (Abdelaal et al., 2014) entnommen.

Die Autoren folgern aus ihren Versuchen, dass man wesentlich dickere und wirksamere Schutzschichten in der Basisabdichtung braucht, als die dünnen, nur 500 bis 800 g/m² schweren Vliesstoffe, die in vielen Teilen der Welt verwendet werden. Man kann nur so dafür sorgen, dass sich dann, wenn nach vielen Jahrzehnten die Antioxidantien nicht mehr schützen und die eigentliche oxidative Alterung der Dichtungsbahn beginnt, nicht schon relativ bald Spannungsrisse im Randbereich der Eindellungen bilden. Professor Brachman erzählte einem von uns (Wöhlecke) auf einer Tagung in Indien, dass man allerdings solche wissenschaftlichen Erkenntnisse leider auf dem amerikanischen Markt praktisch kaum durchsetzen könne. In Deutschland werden über die behördliche Zulassung bestimmte Standards für den Deponiebau vorgeschrieben. Die Forderung der DepV nach *mindestens* 100 Jahren Lebensdauer macht ein solches Vorgehen erforderlich. Die Schutzschichten sind ein Beispiel dafür, dass dieses Vorgehen tatsächlich zweckmäßig und angemessen sein kann. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass eine „dicke“ Schutzschicht auch einbautechnische Vorteile hat. Übrigens spielen solche Überlegungen in den europäischen harmonisierten technischen Spezifikationen noch gar keine Rolle.

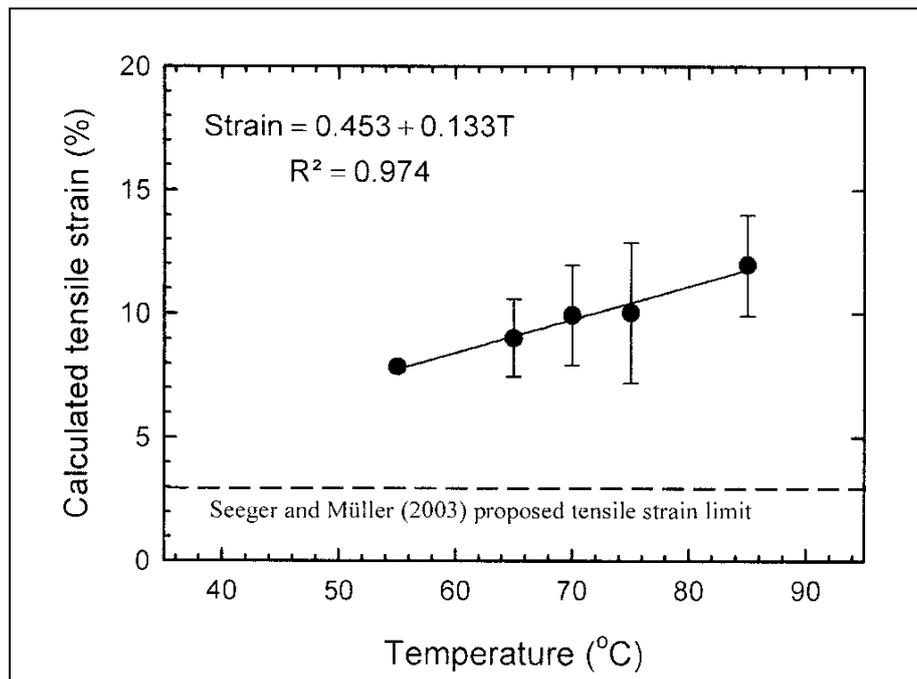


Bild 3: Maximale Dehnung in der Randfaser im Bereich der Spannungsrisbildung als Funktion der Prüftemperatur. Die Abbildung wurde aus (Abdelaal et al., 2014) entnommen.

4. Fremdprüfung

Auf der Internetseite der BAM steht die Richtlinie für die Fremdprüfung beim Einbau von Kunststoffkomponenten im Deponiebau. Zu dieser Richtlinie gehören als Anlagen 4.1 bis 4.6 Standard-Qualitätssicherungspläne für die verschiedenen Komponenten (Dichtungsbahn, Bentonitmatte, Kunststoff-Dränelemente, Geotextilien zum Schützen und Filtern, Rohre, Schächte und Bauteile). Diese Texte sollten Grundlage für die Aufstellung der Qualitätssicherungspläne bei jedem Deponiebauvorhaben sein. Mit Hilfe dieser Texte kann sich auch die zuständige Behörde davon überzeugen, ob vorgelegte Qualitätssicherungspläne tatsächlich dem Stand der Technik entsprechen. Allerdings wurde bemängelt, dass in den jetzt vorliegenden Fassungen die Rolle der zuständigen Behörde und die Anforderungen an die Kommunikation zwischen Fremdprüfer und Behörde an einigen Stellen vielleicht etwas missverständlich formuliert wurden. In Zusammenarbeit mit dem LUA Brandenburg (Herr Dr. Stock und Herr Drewes) wurden die Texte überarbeitet. Die neue Fassung wird ins Netz gestellt. Was den eigentlichen Inhalt der Arbeit des Fremdprüfers anbelangt, ergaben sich dabei jedoch keine Änderungen.

Inzwischen gibt es auch einen bundeseinheitlichen Qualitätsstandard BQS 9-1 der LAGA Ad-hoc-AG Deponietechnik für die Fremdprüfung beim Einbau mineralischer Baustoffe in Deponieabdichtungssysteme. Auch hier wird Akkreditierung für die Fremdprüfung im Deponiebau nach DIN EN ISO/IEC 17020 als Inspektionsstelle und nach DIN EC ISO/IEC 17025 als Prüflaboratorium gefordert, siehe dazu auch DepV, Anhang 1, Abschnitt 2.1). Zur Beauftragung heißt es jetzt in beiden Texten gleichlautend:

„Gegenstand und Umfang der Qualitätskontrolle und die wesentlichen Elemente des Qualitätsmanagements werden bereits in der Planungs- und Genehmigungsphase erarbeitet und in einem Qualitätsmanagementplan festgelegt. Hieraus ergeben sich fachspezifische Anforderungen, die in die Ausschreibungsunterlagen eingehen sollten. Die fremdprüfende Stelle sollte deshalb zum Beginn der Phase der Ausführungsplanung, in jedem Fall vor Ausschreibung der Bauleistungen, beauftragt werden.“

Wenn die Qualifikationen gemäß BQS 9.1 und Fremdprüferrichtlinie der BAM vorliegen, kann eine fremdprüfende Stelle sowohl mit der Fremdprüfung für mineralische Baustoffe als auch für Kunststoffkomponenten beauftragt werden.

Nach der Zulassungsrichtlinie-KDB und dem QSP-KDB ist ein gewisser Mindestumfang von Laborprüfungen an Schweißnahtproben erforderlich. An mindestens 25 % der vor Anfertigung der Nähte geschweißten Probestücke oder der Proben aus dem Nahtanfang und Nahtende müssen im Labor Schälversuche durchgeführt werden. Pro Tag, pro Schweißmaschine und pro Schweißgerät sowie pro Schweißer müssen jedoch mindestens 2 Proben für Laborprüfungen genommen werden. Schweißt z. B. ein Schweißer mit einer Schweißmaschine die Heizkeildoppelnähte und ein anderer Schweißer mit zunächst einem Schweißgerät und im Laufe des Tages mit einem anderen Schweißgerät die Extrusionsnähte, dann müssen an diesem Tag insgesamt mindestens 6 Proben ins Labor gehen. Es handelt sich bei diesen Festlegungen natürlich nur um Mindestanforderungen. Es kann verschiedene Gründe für das Überschreiten dieser Mindesthäufigkeit von Probenahmen geben. Werden z. B. im Laufe eines Arbeitstags sowohl Nähte zwischen glatten Dichtungsbahnen als auch Nähte zwischen glatten und strukturierten Dichtungsbahnen hergestellt oder wird zusätzlich noch ein Naht zwischen der neuen Dichtungsbahn und einer in einem Altbereich bereits eingebauten Dichtungsbahn geschweißt, dann muss jede dieser unterschiedlichen Nähte an Hand von je 2 Laborproben überprüft werden und zwar auch dann, wenn sie vom gleichen Schweißer mit der gleichen Maschine geschweißt wurden. Völlig neu muss über Art und Umfang der zusätzlich erforderlichen Laborprüfungen entschieden werden, wenn sich herausgestellt hat, dass eine Nahtprobe die Laborprüfung nicht bestanden hat. Der Fremdprüfer muss dann

festlegen, wie viele Proben aus der problematischen Naht an welcher Stelle noch entnommen werden müssen. Das gleiche gilt, wenn sich bei der Dichtigkeitsprüfung Mängel zeigen.

5. Geosynthetische Tondichtungsbahn (GCL) mit Kunststoff-Schutzbahn (KSB)

Der bundeseinheitliche Qualitätsstandard für GCL fordert, dass bei der Verwendung der GCL als alleiniges Abdichtungselement eine 30 cm dicke Feinsandschicht eingebaut wird und die darüber liegende Rekultivierungsschicht eine Dicke von mindestens 1,5 m haben muss. Durch diesen Aufbau sollen Schäden in der GCL durch Austrocknung oder Durchwurzelung vermieden werden. Die Sandschicht dient dabei als Feuchtigkeitsreservoir und zur Herabsetzung der Saugspannung. Die dickere Rekultivierungsschicht bietet mehr Raum für die Pflanzenwurzeln.

Die Firma BECO hat ein neues GCL-Produkt vorgestellt, bei dem auf das herkömmliche GCL-Produkt eine 1,5 bis 2 mm dicke KSB laminiert wird. Die KSB soll die Austrocknung und das Eindringen von Wurzeln verhindern. Damit würden die oben beschriebenen, mit erheblichen Kosten verbundenen konstruktiven Maßnahmen überflüssig. Auf die Sandschicht könnte verzichtet werden und die Rekultivierungsschicht bräuchte wieder nur eine Dicke von mindestens 1 m haben. Das GCL-KSB-Produkt ist so gestaltet, dass die sich überlappenden KSB auf der Baustelle verschweißt werden.

Die KSB dient dabei aber nicht als Konvektionssperre für Wasser oder Gas. Eine solche Konvektionssperre, also eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB), muss eine Mindestdicke von 2,5 mm haben und von der BAM zugelassen sein. Unter anderem muss dabei das Einbau- und Fügeverfahren besondere Anforderungen erfüllen. Im Prinzip kann eine BAM-zugelassene KDB ebenfalls mit einer GCL schon im Werk kombiniert werden. Man könnte dann tatsächlich eine Kombinationsdichtung als Rollenware auf die Baustelle liefern. Das ist jedoch gerade nicht der Ansatz dieser Produktidee. Vielmehr will man eine Kunststoff-Schutzbahn, die möglichst dünn ist, die aber andererseits mindestens 100 Jahre lang zuverlässig vor Austrocknung und Durchwurzelung schützt. Die LAGA-Ad-hoc-AG Deponietechnik, die für die Beurteilung von GCL-Produkten zuständig ist, ist an die BAM mit der Bitte herangetreten ein Konzept für die Beurteilung der Eignung dieser KSB im Hinblick auf Lebensdauer und Wirksamkeit zu entwickeln. Eine solche Beurteilung ist sicherlich wesentlicher Bestandteil der Beurteilung des Produkts GCL-KSB insgesamt.

Manchmal werden KDB mit Dichtungskontrollsystemen kombiniert. Die Ergebnisse dieser Kontrollmessungen zeigen, dass die Fehlerhäufigkeit bei BAM-zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen, die nach den Anforderungen der Zulassung eingebaut werden, äußerst gering ist. Mit Hilfe BAM-zugelassener Dichtungsbahnen kann daher eine zuverlässig wirkende Konvektionssperre hergestellt werden. Bei einer dünnen Kunststoff-Schutzbahn und den damit verbundenen besonderen Einbau- und Fügebedingungen muss man jedoch mit einer relativen hohen Häufigkeit von lokalen Fehlstellen rechnen. Das bedeutet zwar, dass die Kunststoff-Schutzbahn keinesfalls eine Konvektionssperre darstellt. Es bedeutet jedoch nicht, dass dadurch auch kein wirksamer Schutz vor Austrocknung und Durchwurzelung mehr gewährleistet ist. Die Frage ist also, in welchem Umfang können bei diesem System lokale Fehler akzeptiert werden, ohne dass die Wirksamkeit im Hinblick auf Durchwurzelung- und Austrocknungsschutz wesentlich beeinträchtigt wird. Derzeit wird versucht, solche Grundsatzfragen zu klären.

6. Zugversuch

Der Zugversuch ist ein in der Werkstofftechnik häufig eingesetztes Prüfverfahren. Der Zugversuch an Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) aus PEHD (Polyethylen hoher Dichte) ist in der jüngeren Vergangenheit in die Diskussion geraten. Wie wird ein Zugversuch *richtig* durchgeführt? Welche Kennwerte sind zu ermitteln? Wo ist die Methode für diese spezielle Anwendung dokumentiert? Wie wird die Bruchdehnung bzw. die nominelle Bruchdehnung bestimmt? In welchem Umfang können oder müssen Extensometer bei der Qualitätssicherung bzw. Produktcharakterisierung von KDB in der Geotechnik verwendet werden? Welcher Referenzwert muss bei der Bestimmung der Bruchdehnung hinzugezogen werden? Durch neue Festlegungen in der Normung sind hier Unklarheiten entstanden und die Zulassungsstelle wurde um Klärung dieser Fragen gebeten. Im Folgenden soll daher ausführlich auf den Zugversuch an PEHD-Dichtungsbahnen eingegangen werden.

6.1 Einflüsse und Verhalten

Die mechanischen Eigenschaften von PEHD Dichtungsbahnen sind von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Als Beispiel sollen die Prüfgeschwindigkeit und die Prüftemperatur genannt sein. Im Bereich der KDB wird in der internationalen Normung im Allgemeinen eine Prüftemperatur von 23 ± 2 °C verlangt. Bild 4 zeigt die Abhängigkeit der Streckspannung einer PEHD Dichtungsbahn in diesem engen Temperaturbereich. Den wesentlichsten Einfluss auf die Prüfergebnisse hat aber die Art des Werkstoffs. Darüber hinaus können

durch den Zugversuch morphologische Effekte, wie Orientierungen aufgrund von Produktionseinflüssen, aufgezeigt werden. Bestimmte Materialkennwerte ändern sich bei der Alterung des Materials oder durch Verunreinigungen während der Produktion, etc. Besonders empfindliche Kennwerte für diese Einflüsse sind bei PEHD Dichtungsbahnen die nominelle Bruchdehnung und die Bruchspannung (Müller, 2007; Sikora and Bielinski, 1988).

PEHD Dichtungsbahnen neigen zur heterogenen Kaltverstrecken. Das Phänomen wird z. B. in (Jäckel, 1954) beschrieben. Das Kaltverstrecken führt jenseits der Streckgrenze zu einer Einschnürung im langen parallelen Teil eines Probekörpers. Die Streckgrenze bildet das erste Maximum im Spannungsverlauf (Bild 5). Im folgenden Verlauf breitet sich die Einschnürung über den gesamten engen parallelen Bereich aus. Die Spannung fällt dabei zunächst ab und bleibt dann während des Vorgangs auf einem konstanten Niveau. Ist der gesamte enge parallele Teil verstreckt, beginnt der breitere Einspannbereich zu verstrecken. Dabei steigt die Spannung bis zum Bruch der Probe an. Aus diesem Verhalten resultieren die enormen nominellen Bruchdehnungen von einigen hundert Prozent.

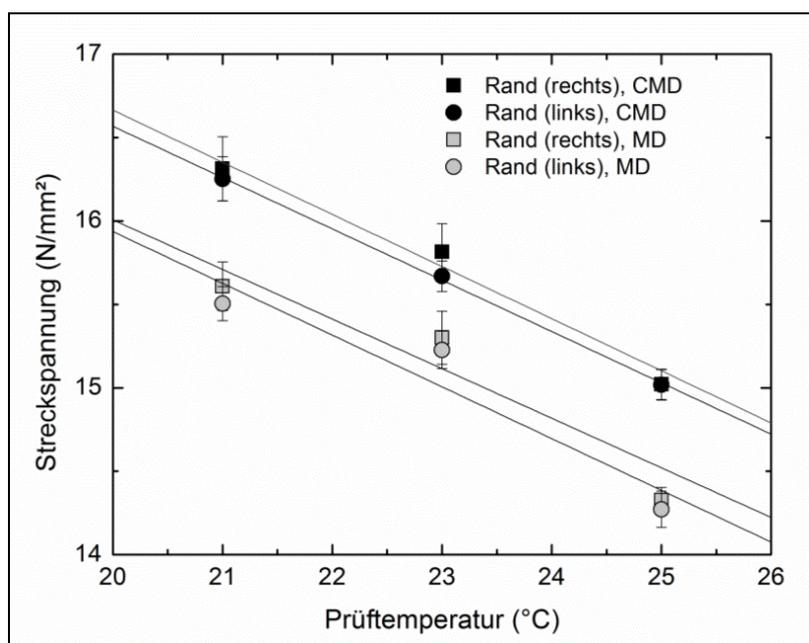


Bild 4: Abhängigkeit der Streckspannung einer PEHD Dichtungsbahn in Produktionsrichtung (MD) und quer zur Produktionsrichtung (CMD) von der Prüftemperatur im Bereich von 23 ± 2 °C.

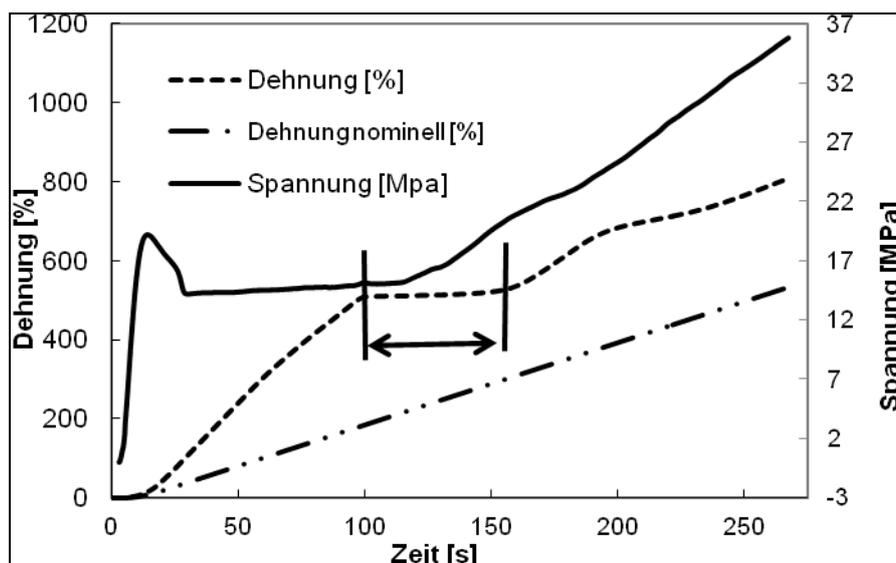


Bild 5: Verlauf der Spannung, Dehnung und nominellen Dehnung eines Zugversuchs an einer PEHD Dichtungsbahn mit der Prüfzeit

6.2 Normung

Für Kunststoffe sind die Prüfbedingungen und Verfahrensweisen für Zugversuche in der Normenreihe DIN EN ISO 527 festgelegt. ISO 527-1 führt allgemein in die Prüfung ein. Bei dem Zugversuch für KDB wird in der Regel auf die ISO 527-3 verwiesen. Die ISO 527-3 konkretisiert den Zugversuch im gewissen Umfang für Kunststofffolien und Tafeln. Wobei die ISO 527-3 eigentlich nur für Produkte mit einer maximalen Dicke von 1 mm anwendbar ist. Bei Prüfmustern, die diese Dicke überschreiten wird wiederum auf die Norm ISO 527-2 verwiesen. Wesentlich für die Prüfungen von PEHD Dichtungsbahnen ist, dass ISO 527-3 den Prüfkörper für die Untersuchungen definiert. Zudem werden bestimmte Festlegungen in den europäischen Anwendungsnormen getroffen (s. z. B. DIN EN 13493). Aber auch die DIN EN 12226 trifft in diesem Zusammenhang eigene Festlegungen. Darüber hinaus sollen hier auch die Standards der American Society for Testing and Materials (ASTM) erwähnt werden. Diese werden hauptsächlich im amerikanischen Raum verwendet, haben aber auch einen direkten Einfluss auf die Prüfungen im europäischen Raum. Die ASTM D638 beschreibt den Zugversuch an Kunststoffen ganz allgemein. Die ASTM D6693 beschreibt den Zugversuch ganz speziell für Dichtungsbahnen aus Polyethylen und Polypropylen. Allein diese Aufzählung lässt erahnen, wie vertrackt das Normwesen in diesem Bereich ist.

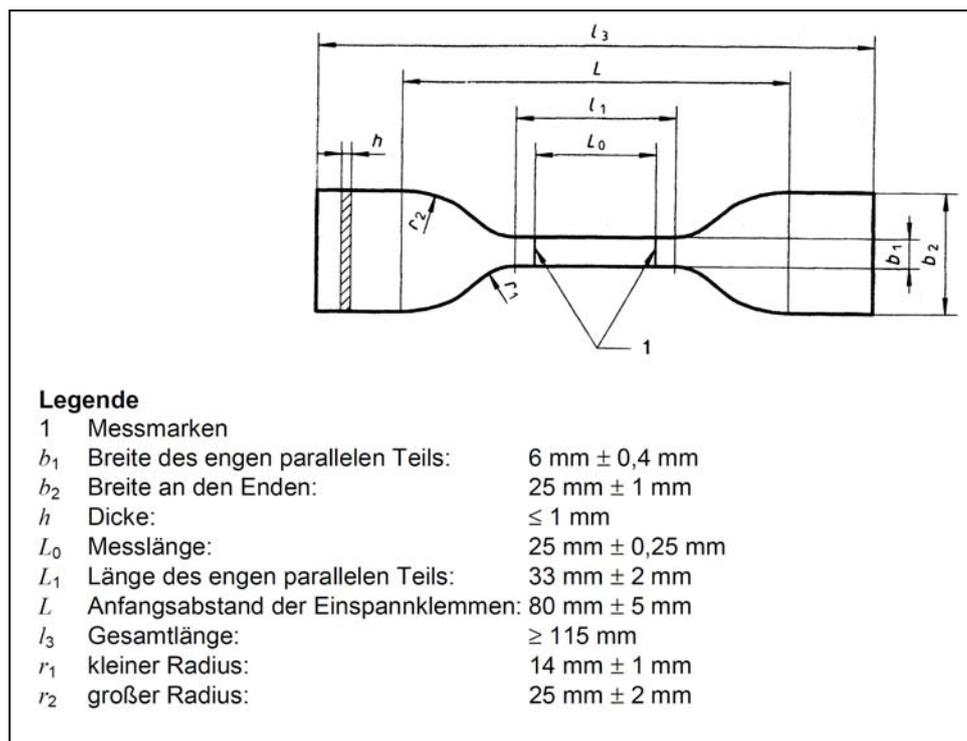


Bild 6: Prüfkörper Typ 5 der Norm ISO 527-3.

6.3 Durchführung und Auswertung

Ein Zugversuch in der Kunststofftechnik wird stark vereinfacht wie folgt durchgeführt. Ein definierter Probekörper wird mit dem Klemmenabstand (L) eingespannt (Bild 6). Es werden Messmarken oder Messfühler im Abstand (L_0) mittig im langen parallelen Bereich (L_1) aufgebracht. Die Einspannklemmen werden dann mit einer definierten Geschwindigkeit auseinandergedehnt. Während des Zugversuchs werden: (1) die Kraft F die zum Verfahren der Einspannklemmen nötig ist, (2) die Verlängerung des Abstandes zwischen den Einspannklemmen (ΔL_t) und (3) die Verlängerung der Messlänge zwischen den Messmarken (ΔL_0) aufgezeichnet. Die gemessene Kraft wird dividiert durch den Anfangsquerschnitt (A) und so die *Spannung* berechnet. Die Verlängerung der Messlänge (ΔL_0) wird mit einem Extensometer bestimmt und durch die Anfangsmesslänge (L_0) dividiert. So wird die *Dehnung* berechnet. Die *nominelle Dehnung* wird dagegen nach den internationalen Normen berechnet aus der Verlängerung des Abstandes (ΔL_t) zwischen den Einspannklemmen (Traversenweg) dividiert durch den Anfangsklemmenabstand L . Die Spannung wird zur Auswertung über die Dehnung im sogenannten Spannungs-Dehnungsdiagramm aufgetragen. In dem Spannungs-Dehnungsdiagramm von PEHD Dichtungsbahnen wird in diesem Zusammenhang ein wesentlicher Punkte ausgewertet, nämlich das erste Maximum im Kurvenverlauf, wo ein Zuwachs der Dehnung ohne Steigerung der Spannung stattfindet (Streckgrenze). An diesem

Punkt wird die Streckspannung zusammen mit der Streckdehnung abgelesen. Daneben ist die Bruchspannung zusammen mit der nominellen Bruchdehnung ein zweiter wichtiger Punkt.

6.4 Schwierigkeiten bei der Auswertung

Mit diesen Kennwerten tut sich die Normung im Bereich der europäischen Anwendungsnormen schwer. Hintergrund ist u. a., dass unterschiedliche Materialien mit denselben Kriterien bewertet werden müssen. Doch welche Schwierigkeiten entstehen im Moment bei der Auswertung der Zugversuche und woraus resultieren diese? In der alten DIN EN 13493:2005 wurde ausschließlich die Zugfestigkeit als spannungsbezogener charakteristischer Kennwert gefordert. Nach ISO 527-1 ist die Zugfestigkeit aber *die Spannung beim ersten Spannungsmaximum während des Zugversuchs*. Bei einem Material ohne Streckgrenze ist dies die Bruchspannung, bei den PEHD Dichtungsbahnen aber die Streckspannung. Das Problem wurde bei der letzten Überarbeitung der Norm erkannt und in der deutschen Fassung wurde aus der Zugfestigkeit die Höchstfestigkeit. In der englischen Version, die maßgebend ist, wird allerdings weiterhin die *tensile strength* (Zugfestigkeit) verlangt. Eigentlich sollte man hier konsequent von der Bruchspannung (stress at break) sprechen.

Bei der Bestimmung der Dehnungen bzw. bei der Bestimmung der nominellen Bruchdehnung beginnen die Kontroversen. Wann muss die Dehnung eingesetzt werden und wann die nominelle Dehnung? Die Norm ISO 527-1 stellt klar, dass in der Regel die Dehnung über Extensometer bestimmt werden soll. Sie sieht allerdings verschiedene Ausnahmen vor, z. B. bei Kleinprobekörpern. Es heißt hier:

„Die Bestimmung von Dehnungswerten mittels eines Extensometers [...] ist so lange korrekt und sinnvoll, wie die Verformung des Probekörpers innerhalb der Messlänge homogen ist. [...] Wenn beim Werkstoff eine Einschnürung auftritt, wird die Dehnungsverteilung inhomogen und die mittels Extensometer bestimmten Dehnungen werden von der Lage und Größe des Einschnürbereichs stark beeinflusst. In derartigen Fällen wird die nominelle Dehnung zur Beschreibung der Dehnung jenseits der Streckgrenze angewendet.“

Einige Prüfstellen bestimmen trotz dieser Festlegungen der ISO 527-1 die Dehnung bis zum Bruch per Extensometer. Wie kam es dazu? Ein wesentliches Problem war wiederum die Norm DIN EN 13493. Hier wurde in der Vergangenheit festgelegt, dass die Dehnung über die „Rastertrennmessung“ bestimmt werden muss. Das Wort Rastertrennmessung gibt es außerhalb dieser Norm nicht. Dies hat bei den Anwendern zu verschiedenen Theorien über

die Bedeutung geführt. Einige Anwender der Norm, sowohl Hersteller als auch Prüfanstalten, versicherten der Zulassungsstelle, dass damit die Extensometermessung gemeint sei. In der englischen Fassung heißt es: *Calculation of elongation as defined in EN ISO 527-1:2012, 10.2, using grip separation measurement*. Diese Formulierung ist eindeutig. Es ist nach der Regelung der DIN EN ISO 527-1 zu verfahren: nämlich Berechnung der nominellen Dehnungen aus der Veränderung des Abstands (*separation*) der Klemmen (*grips*) mit Bezug auf den Anfangsabstand der Klemmen. Die überarbeitete deutsche Norm verwendet nun eindeutig den Terminus Traversenwegmessung. Damit sollte das Problem nun hoffentlich gelöst sein. Damit sehen die europäischen Anwendungsnormen vor, dass gar keine Extensometer eingesetzt werden.

Die ISO 527-1 sieht vor, dass bei der Bestimmung der nominellen Dehnung über den Klemmenabstand ($L = 80 \text{ mm}$) normiert wird. Die meisten Prüfstellen verwenden jedoch stattdessen den Wert 50 mm als Referenzgröße. Die 50 mm entsprechen der Vorgabe der ASTM D 6693 zur Bestimmung der Bruchdehnung. Durch dieses abweichende Verfahren sind die nominellen Bruchdehnungen um den Faktor 1,6 ($80 \text{ mm}/50 \text{ mm}$) größer als bei dem normgemäßen Verfahren. Die Hersteller befürchten, dass durch eine Umstellung von 50 mm auf 80 mm Verwirrung über die Eigenschaften der Dichtungsbahn und Wettbewerbsnachteile entstehen.

Darüber hinaus werden die Extensometer bei der einen oder anderen Prüfstelle für die gesamte Messung eingesetzt und die Messlänge ($L_0 = 25 \text{ mm}$) als Referenzwert genommen. Dieses Vorgehen würde z. B. der Norm DIN EN 12226 entsprechen. Der Wert der Bruchdehnung passe dabei relativ gut zu den Werten, die mit 50 mm als Referenzwerte bei der Klemmenabstandsmessung gefunden werden. Allerdings ist dies Zufall und auf die Wahl der Parameter wie der Prüfkörpergeometrie zurückzuführen. Die Beobachtung kann damit nicht pauschalisiert werden. Verändert sich z. B. die Dicke des Prüfkörpers, könnte sich in diesem Fall das Verhältnis von Bruchdehnung und nomineller Bruchdehnung stark verändern. Wiederum andere Prüfstellen verwendeten die Messlänge von 25 mm und arbeiteten trotzdem mit dem Klemmenabstand. Das alles hat dazu geführt, dass die Ergebnisse im Moment im Grunde nicht vergleichbar sind.

Bild 5 zeigt auf, warum die Extensometermessung bis zum Bruch so problematisch ist. Betrachtet man die Dehnung, fällt auf, dass sie nach einem linearen Anstieg ein Plateau erreicht und nach einer gewissen Zeit weiter ansteigt. Dieses Plateau zeigt eben den Bereich auf, bei dem die lokale Dehnung außerhalb des von dem Extensometer erfassbaren Bereiches stattfindet und die Längenänderung damit gar nicht mehr bestimmt werden kann. Dies

betrifft immerhin ca. 20 % der gesamten Messzeit. In dieser Zeit kann auch nicht das tatsächliche Spannungs-Dehnungsverhältnis nachvollzogen werden.

6.5 Bewertung der Kennwerte

Welchen Stellenwert haben die ermittelten Kennwerte? Es handelt sich dabei um keine für die Bemessung relevanten Größen, denn eine Dehnung im Zugversuch von einigen hundert Prozent hat für die Anwendung keine Relevanz. Auch die Streckspannung und -dehnung spielt keine Rolle bei der Bemessung. KDB dürfen nicht so eingebaut werden, dass sie dauerhaft unter Zugspannung gesetzt werden. Das würde über Kurz oder Lang zur Spannungsrissbildung führen. Aus diesem Grund wird für Dichtungsbahnen ein dehnungsbezogener Ansatz gewählt. Sie dürfen Dehnungen durch Setzungen oder andere Verformungen ausgesetzt werden. Die Dehnungen dürfen dabei bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Die Anforderungen an das Auflager und die Schutzschichten zeugen davon. Kennwerte aus dem Zugversuch charakterisieren typische Materialeigenschaften und dienen der Qualitätssicherung. Daraus folgt, dass auch für die Streckspannung und -dehnung die nominellen, also ohne Extensometer gemessenen Werte ausreichen, wie es in der ASTM D 6693 gemacht wird. Natürlich müssten die Anforderungen entsprechend angepasst werden. Die ISO 527-1 eröffnet die Möglichkeit ganz ohne Extensometer zu prüfen und die Norm DIN EN 13493 sieht es sogar vor. Wenn also die Genauigkeit der Dehnungsmessung über den Klemmenabstand den Anforderungen der ISO 527-1 entspricht und die Art der Prüfung eindeutig festgelegt wäre, dann würde diesem Vorgehen nichts entgegenstehen. Würde allerdings z. B. der E-Modul bestimmt werden, dann wäre ein Extensometer unbedingt erforderlich.

All diese Probleme wurden von der Normung erkannt. Daher wurde nun der WG3 (*Working Group Mechanical Testing*) des TC 189 im CEN (europäische Normungsorganisation) das Mandat erteilt, eine eigene Zugversuchsnorm für PEHD Dichtungsbahnen zu erarbeiten, die die aufgeworfenen Fragestellungen klar beantworten soll. Bis dahin gilt für Zulassungsprüfungen, Fremdüberwachung und Fremdprüfung im Rahmen der Zulassung die folgende Regelung: die Streckdehnung wird mit dem Extensometer gemessen. Zugfestigkeit wird aufgefasst als Spannung beim Bruch und es wird die nominelle Bruchdehnung angegeben, die über den Traversenweg mit einer Bezugslänge von 50 mm berechnet wird.

Danksagung

30 Jahre Fachtagung „Die sichere Deponie“: Seit 1986 war die BAM mit Ausnahme der Jahre 1989, 1991, 2001 und 2006 bei jeder Fachtagung mit einem oder sogar zwei Vorträgen vertreten. Vorgetragen haben die Herren Prof. Dr. August (7), Dr. Lüders (3), Dr. Müller (17), Preuschmann (1), Dr. Seeger (3) und Frau Tatzky-Gerth (1). Man sieht daran, wie wichtig diese Veranstaltung für die BAM als Zulassungsstelle für Geokunststoffe im Deponiebau in all den Jahren war. Wir konnten hier unsere Überlegungen und unser Vorgehen der Fachöffentlichkeit erläutern. Umgekehrt konnten wir Anregungen und Kritik aufnehmen und sozusagen auf der Tagung den Stand der Technik „erlauschen“. Dafür möchten wir uns namens der BAM bei der Leitung der Tagung, den Herren Albers und Jost (AK GWS), beim Organisator, Herrn Hefner (SKZ) und natürlich vor allem bei Herrn Dr. Knipschild, dem *spiritus rector* dieser Tagungen, herzlich bedanken. Zukünftig wird diese Aufgabe wohl die Deponiefachtagungen in Karlsruhe und Leipzig übernehmen müssen. Wir wollen aber den nun vom SKZ geplanten Tagungen „Geokunststoffe im Umweltschutz“ über unsere fachliche Arbeit verbunden bleiben.

Literatur

- Abdelaal, F., Rowe, R.K., Brachman, R.W.I., 2014. Brittle rupture of an aged HDPE geomembrane at local gravel indentations under simulated field conditions. *Geosynthetic International* 21, 1-21.
- Borrmann, C., 2007. Bewertung von Dränsystemen in Oberflächenabdichtungen unter Langzeitaspekten mit besonderem Augenmerk auf geosynthetische Dränelemente, in: Jost, D., Albers, K. (Eds.), 23. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". SKZ-ConSem GmbH, Würzburg, pp. D1-D10.
- Giroud, J.P., 2010. Development of criteria for geotextile and granular filters. Prestigious Lecture, Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Guarujá, Brazil, pp. 45-64.
- Greenwood, J.H., Curson, A., 2012. Life prediction of the oxidation of geogrids by three different methods. *Geotextiles and Geomembranes* 34, 93-99.
- Heyer, D., Rödl, P., Bauer, A., Ranis, D., 2004. Filter- und Dränwirksamkeit von Abdecksystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien, Schlussbericht zum BAY FORREST Forschungsvorhaben F58(F). Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, München.

- Holzlhner, U., August, H., Meggyes, T., Brune, M., 1995. Landfill liner systems, a state of the art report. Penshaw Press, Cleadon, U.K.
- Jäckel, K., 1954. Ein Beitrag zur Kaltverstreckung der Hochpolymere. Kolloid-Zeitschrift 137, 130-162.
- Kossendey, T., Karam, G., 1998. Large-scale Performance Tests to Evaluate Filtration Processes, in: Rowe, R.K. (Ed.), Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics. Industrial Fabrics Association International (IFAI), Roseville, MN, USA, pp. 1021-1026.
- Melchior, S., 2010. Langzeitverhalten einer Dränmatte in einer Deponieoberflächenabdichtung - ein Fallbeispiel, in: Kilchert, M. (Ed.), 6. Leibziger Deponiefachtagung, Planung, Bau, Betrieb, Stilllegung, Nachsorge, Nachnutzung und Rückbau von Deponien. Hochschule für Technik, Wissenschaft und Kultur Leipzig, pp. B 09 - 01 bis B 09 - 21.
- Müller-Rochholz, J., 1999. Dränelemente aus Kunststoffen (Geodräns), Anforderungen und Nachweismöglichkeiten, in: Knipschild, F.W. (Ed.), Tagungsband der 15. Fachtagung "Die sichere Deponie, wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen". Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg.
- Müller-Rochholz, J., Bronstein, Z., 2000. Long-term Behavior of Geodrain Composites in Landfill Capping - Results of Exhumations, in: Cancelli, A., Cazzuffi, D., Soccodato, C. (Eds.), Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference. Pàtron Editore, Bologna, pp. 597-600.
- Müller, W.W., 2007. HDPE geomembranes in geotechnics. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Müller, W.W., 2012. Zur inneren Scherfestigkeit von Kunststoff-Dränelementen. Geotechnik 35, 257-262.
- Müller, W.W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R., 2008. Long-term water flow capacity of geosynthetic drains and structural stability of their drain cores. Geosynthetics International 15, 437-451.
- Robertson, D., 2013. The oxidative resistance of polymeric geosynthetic barriers (GBR-P) used for road and railway tunnels. Polymer Testing 32, 1594-1602.
- Saathoff, F., 1999. Dränsysteme aus Wirrgelege und Vliesstoff, in: Knipschild, F.W. (Ed.), Tagungsband der 15. Fachtagung "Die sichere Deponie, wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen". Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg.

- Saathoff, F., Cantré, S., Müller, W.W., 2012. The new German filtration criteria for geosynthetics in landfill construction, in: Blanco, M., Leiro, A., Mateo, B., Torregrosa, L.B., Abad, P., Pardo de Santayana, F., Santalla, J. (Eds.), Proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress, Volume 5, Mining & Environmental Application. IGS-Spain, www.igs-espana.com, pp. 264-268.
- Sikora, R., Bielinski, M., 1988. Festigkeitseigenschaften von verschmutztem wiederaufbereitetem Polyethylen. *Kunststoffe* 78, 335-338.
- Spetz, G., 1995. Recent Development in Heat Ageing Tests and Equipment. *Polymer Testing* 15, 381-395.
- Witt, K.-J., 2005. Unorthodoxe Gedanken zur Eignungsfeststellung von mineralischen Abdichtungskomponenten für Oberflächenabdichtungen von Deponien, in: Jost, D., Albers, K. (Eds.), Tagungsband der 21. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". SKZ-ConSem GmbH, Würzburg, pp. B1-B13.
- Witt, K.-J., 2009. Die Standsicherheit im Lebenszyklus einer Oberflächenabdichtung, in: Jost, D., Albers, K. (Eds.), 25. Fachtagung "Die sichere Deponie". SKZ-ConSem GmbH, Würzburg, pp. B1-B22.
- Zanzinger, H., 2012. Labortechnische Untersuchungen von Dränmatten, in: Jost, D., Albers, K. (Eds.), 28. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". SKZ - ConSem GmbH, Würzburg, pp. G1-G22.
- Zanzinger, H., Hausmann, S., 2013. Thermo-oxidative Alterung von Polyolefinen mit zeitraffenden Prüfverfahren, in: Nutzungsdauer von Rohren und Geokunststoffen aus Polyolefinen. SKZ-ConSem GmbH, Würzburg, 14-15 November.

