

Gutachten Nr.: 117900/15

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Projekt Nr. 3610

Auftrag: Einsatz von PE-Materialien für Rohre, Schächte und Bauteile in Deponien: Überprüfung der Materialqualität von PE-Rohren und PE-Schächten nach mehrjähriger Nutzungsdauer und Anwendung der Forschungsergebnisse auf Neubau und Bestand in bayerischen Deponien

Vertrag vom: 28. September 2015 **Zeichen:** Az. 36-0270-55313/2015

Das Gutachten umfasst 81 Seiten.

Würzburg, 2017-02-23
Za/Mn/mo

i. V.



Dr.-Ing. Marcus Heindl

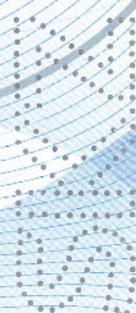


i. A.



M. Sc. Anja Martin

Die ungekürzte oder auszugsweise Wiedergabe, Vervielfältigung und Übersetzung dieses Berichtes zu Werbezwecken bedarf der schriftlichen Genehmigung der SKZ-Testing GmbH. Die Ergebnisse beziehen sich auf die geprüften Produkte. Die Akkreditierungen gelten nur für die in den Urkunden aufgeführten Normen und Verfahren, die im Internet unter www.skz.de eingesehen werden können.



Inhaltsverzeichnis

1	Auftrag	4
2	Einleitung und Forschungsziel.....	4
3	Mindestanforderungen	8
4	Versuchsmaterial.....	12
5	Konzeption und Zeitplan.....	19
6	Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden	24
6.1	FEM Berechnungen.....	24
6.1.1	Parameter der Berechnungen / Grundlagen	24
6.1.2	FEM-Modellierung	27
6.1.3	Berechnungen	27
6.2	Spannungsrisssbeständigkeit.....	29
6.2.1	Full Notch Creep Test (FNCT)	29
6.2.2	Strain Hardening Test (SHT)	30
6.3	Thermo-oxidative Beständigkeit.....	32
6.3.1	Oxidations-Induktionszeit (OIT)	32
6.3.2	Hochdruck-Autoklavenversuch (High Pressure Autoclave Test, HPAT).....	32
6.4	Zeitstand-Innendruckversuch.....	35
7	Versuchsergebnisse.....	36
7.1	Grundlegende Untersuchungen an Materialproben	36
7.1.1	Ergebnisse der FEM Berechnungen.....	36
7.1.1.1	Tabellarische Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für die allgemeinen Berechnungen	36
7.1.1.2	Berechnungen für die Deponie Z.....	38
7.1.1.3	Berechnungen für die Deponie Y	38
7.1.1.4	Berechnungen für die Deponie X (Schacht)	39

7.1.2	Spannungsrissbeständigkeit.....	40
7.1.3	Thermo-oxidative Beständigkeit.....	43
7.1.4	Abschätzung der Nutzungsdauer.....	49
7.1.4.1	Spannungsrissversagen.....	49
7.1.4.2	Wärmealterung – thermo-oxidatives Versagen.....	53
7.1.4.3	Ausweitung der Nutzungsdauerabschätzung auf verschiedene Einbausituationen	55
7.2	Erweiterte Untersuchungen an Material Z_1	58
7.2.1	Extrapolation des Spannungsrissversagens auf Basis von FNCT.....	58
7.2.2	Extrapolation des thermo-oxidativen Versagens auf Basis von HPAT	60
7.3	Abschließende Betrachtung/Beurteilung der ausgebauten Rohre	63
8	Handlungsempfehlungen.....	66
9	Zusammenfassung.....	67
10	Ausblick.....	72
11	Danksagung	72
12	Literatur	73
13	Anhang.....	78

1 Auftrag

Das Bayerische Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg, beauftragte die SKZ – Testing GmbH mit Auftrag vom 28. September 2015 mit der Durchführung des Vorhabens „Einsatz von PE-Materialien für Rohre, Schächte und Bauteile in Deponien: Überprüfung der Materialqualität von PE-Rohren und PE-Schächten nach mehrjähriger Nutzungsdauer und Anwendung der Forschungsergebnisse auf Neubau und Bestand in bayerischen Deponien“, kurz: „Überprüfung der Materialqualität von PE-Rohren“.

2 Einleitung und Forschungsziel

Für die Entwässerung von Deponien kommen seit den 80er Jahren Kunststoffrohre aus Polyethylen (PE) zum Einsatz. Davor wurden vornehmlich Steinzeugrohre verwendet, die für die hohen statischen Belastungen an der Deponiebasis nur bedingt einsetzbar waren.

In Deutschland werden nahezu ausschließlich dickwandige PE-Rohre eingesetzt, die gelocht oder – überwiegend -geschlitzt ihre Aufgabe als Sickerrohr im Deponiebau erfüllen. Bei der Einführung biegeweicher Rohre aus PE kamen vor ca. 25 Jahren Fragen auf, wie diese Rohre statisch richtig zu bemessen seien. Im Gegensatz zu starren Steinzeugrohren können sich PE-Rohre einer Überbelastung durch Verformung entziehen - mit dem Nachteil einer u. U. zu großen Deformation, die als eine Vertikalverformung des Rohrs zwischen Scheitel und Sohle ausgedrückt wird.

Sickerrohre werden nach DIN 4266-1 ausgeschrieben. Diese Norm liefert Angaben zum Kriechmodul und den zugehörigen Abminderungsfaktoren sowie zur Geometrie und den erforderlichen Wassereintrittsöffnungen und sie fordert für PE eine Dichte von $> 0,930 \text{ g/cm}^3$ und eine Schmelze-Massefließrate (MFR) 190/5 von $\leq 1,6 \text{ g/10 min}$.

Für eine statische Bemessung sind andere Kenngrößen eines PE-Rohrs notwendig [HLZ93]:

- Kurzzeit- und Langzeitkriechmodul
- zulässige Kurzzeit- und Langzeitspannungen
- Abminderungsfaktoren für die Spannungen
- zulässige Kurzzeit- und Langzeitrandfaserdehnungen

Es ist bekannt, dass bei Thermoplasten statt mit einem Elastizitätsmodul mit einem Kriechmodul gearbeitet werden muss. Dieser ist zeit-, spannungs-, temperatur- und medienabhängig. Gegenüber einem Vollwandrohr hat man bei einem Sickerrohr wegen der Wassereintrittsöffnungen eine reduzierte Rohrsteifigkeit. Bei einer Mindest-Wassereintrittsfläche von 100 cm²/lfm kann sich die Rohrsteifigkeit um bis zu 25 % reduzieren. Bei alten Rohren kamen zusätzlich Beeinträchtigungen der Langzeit-Standsicherheit durch scharfkantig ausgebildete – nicht ausgerundete - Schlitzecken vor, weil an diesen Stellen überhöhte Kerbspannungen auftreten. Kerben können auch beim Verlegen, beim Einbau oder bei unsachgemäßer Verarbeitung entstehen [Fra05]. Neben Löchern und Schlitzen können auch Schweißverbindungen oder Inhomogenitäten im Material Kerbwirkungen verursachen.

In der statischen Berechnung der PE-Rohre werden Spannungs-, Stabilitäts- und Verformungsnachweise geführt. Die Berechnung basiert in Deutschland auf den Berechnungsalgorithmen der ATV M 127 / DWA A 127. Alternativ werden Nachweise mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) geführt.

Bezüglich der Bemessung von biegeweichen Rohren in Deponien gab es anfangs Unklarheiten darüber, dass nicht nur der Kunststoff ein nichtlineares Werkstoffverhalten hat, sondern auch die Böden, in denen das Rohr gebettet ist. Schon sehr frühzeitig förderte daher das damalige Bayerische Landesamt für Umweltschutz Grundsatzuntersuchungen über die statische Berechnung von Rohrleitungen in Sickerwasserentsorgungssystemen bei Abfalldeponien [ZGH92] und auch Modellversuche im Maßstab von 1:1 [Zan94, ZSG97], um die Bemessung von PE-Sickerrohren in Deponien absichern zu können. Ebenso gab es Untersuchungen und Vorgaben für das Rohraufrager („Mischung M9“) [FLO96].

Speziell in Bayern müssen alle statischen Bemessungen von Deponie-Sickerrohren durch das Institut für Statik der TÜV- Rheinland-LGA Bautechnik GmbH geprüft werden. Dabei wurde seitens der TÜV- Rheinland-LGA Bautechnik GmbH von Anfang an darauf geachtet, dass neben der richtigen Bemessung Qualitätswerkstoffe zum Einsatz kamen. Über viele Jahre wurde der Werkstoff Hostalen GM5010T2 der Firma Hoechst für die Herstellung der PE-Rohre verwendet. In Bayern sind bis heute wohl wegen dieser konsequenten Vorgehensweise und ordnungsgemäßer Bettung sowie Vermeidung einer Überschreitung der zulässigen Belastung (Überhöhung Deponie) keine Schäden an fachgerecht eingebauten PE-Leitungen bekannt geworden.

Als mögliches Versagensszenario für biegeweiche Rohre wurde ein Kollabieren in Betracht gezogen. Edenberger [Ede10] hat jedoch in den letzten Jahren von Rissen in Deponiesickerwasserleitungen aus PE berichtet. Ihm sind mittlerweile Schadensfälle mit Rissbildungen in PE-Leitungen in über 15 Deponien im gesamten Bundesgebiet bekannt. PE-Rohre wurden seit Mitte der 80er Jahre deshalb auf der Deponie-Basisabdichtung eingesetzt, weil man davon ausging, dass diese den hohen chemischen und physikalischen Beanspruchungen in einem Deponiekörper gewachsen sind. Die Rohre sollen gemäß den Anforderungen der die Deponieverordnung (2013) mindestens 100 Jahre die Funktion der Entwässerung des Deponiekörpers sicherstellen. Über Schäden in Form von Rissen [Mai10], die in letzter Zeit vereinzelt festgestellt wurden, wird noch spekuliert [TsE10]. Mögliche Gründe für das Materialversagen könnten sein, dass:

- teilwisedauerhaft hohe Temperaturen in der Vergangenheit von zum Teil über 50 °C zu einer Versprödung der Rohre geführt haben,
- ungeeignete PE-Formmassen eingesetzt wurden,
- die Rohre durch Baufehler falsch gebettet waren,
- die Rohre in Rohrlängsrichtung ungleichmäßig gelagert waren, oder
- die Kerbwirkung in den Ecken der Dränschlitze ursächlich war.

Wie so oft können die Gründe für die Risse an den PE-Leitungen vielschichtig sein. Die Fragen sind also:

1. „Wurde der richtige Werkstoff verwendet?“
2. „Wurden die Rohre richtig verlegt und richtig gebettet?“
3. „Waren äußere Umwelteinflüsse für die Risse verantwortlich?“
4. „Waren die statischen Belastungen höher als vorgesehen?“
5. „Wurde die Perforation fachgerecht hergestellt?“

In den letzten Jahren werden spannungsrisseempfindlichere Rohre aus PE 80 im Deponiebau verwendet. Mittlerweile wird in vielen Fällen PE 100 Material eingesetzt [FrH09]. Noch in den 90er Jahren sprach man nur von „PEHD“. Die Klassifizierung folgte einer Einteilung nach der Dichte. „PEHD“ steht daher für Polyethylen hoher Dichte. Für den Rohrleitungsbereich hat sich aber gezeigt, dass diese Einteilung unzureichend ist [Rie06]. Seit 1999 werden PE-Formmassen nach der Langzeit-Druckbeständigkeit bzw. der zulässigen Ringzugspannung klassifiziert. Entscheidend sind Zeitstand-Innendruckversuche. Die nach Norm zulässigen Ringzugspannungen werden auf eine Lebensdauer von 50 Jahren bei einer Temperatur von 20 °C bezogen. D.h. PE 80 hat eine zulässige Ringzugspannung von 8 MPa. Bei PE 100 liegt diese bei 10 MPa (DIN 8074, DIN 8075). Grundsätzlich müssen PE-Rohre für Langzeitanwendungen einen ausreichend hohen Widerstand gegen Rissfortpflanzung und gegen thermisch-oxidativen Abbau aufweisen. Vor 20 Jahren bestanden lediglich Anforderungen an die Langzeit-Grenzspannung und den Langzeit-Kriechmodul von PE-Rohren. Es gab aber keine Anforderungen an die Spannungsrissebeständigkeit sowie an die Oxidationsstabilität.

Aufbauend auf der in 2011-2012 vom SKZ durchgeführten „Vorstudie zur Überprüfung der Materialqualität von PEHD-Dränrohren nach mehrjähriger Nutzungsdauer“ (SKZ-Gutachten Nr. 98329/11, LfU-Az. 36-0270-38587/2011) sollten in diesem Projekt quantitative Aussagen zur Restnutzungsdauer von alten PEHD-Deponierohren getroffen werden, indem eine Korrelation zwischen den ermittelten Kennwerten zur Spannungsrissebeständigkeit (FNCT und SHT)¹ bzw. zur Oxidationsbeständigkeit (OIT und HPAT)² und dem mechanischen Zeitstandverhalten der Rohre hergestellt wird.

¹ FNCT = Full Notch Creep Test; SHT = Strain Hardening Test

² OIT = Oxidationsinduktionszeit; HPAT = Hochdruck-Autoklaventest

Neben alten PEHD-Rohren sollten hierfür zusätzlich neuwertige PE-Rohrqualitäten untersucht werden, von denen derzeit ausgegangen wird, dass sie unter Betriebsbedingungen (erhöhte Temperaturen und aggressives Sickerwasser) eine Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren aufweisen.

Ziel ist eine Überprüfung der in Normen (DIN 4266-1:2011) bzw. in der Güterrichtlinie „Rohre, Schächte und Bauteile in Deponien“ (SKZ/TÜV-LGA Güterrichtlinie (2013)) geforderten Mindestkennwerte für FNCT und OIT sowie das Ableiten von Handlungsempfehlungen im Hinblick auf eine Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren unter verschiedenen Betriebsbedingungen der Deponien.

3 Mindestanforderungen

Zum Erreichen eines einheitlichen Qualitätsstandards für eingebaute Rohre in Deponien in Deutschland sind in Normen und Richtlinien Anforderungen hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit verankert. Als maßgebende Eigenschaften werden hierfür die thermo-oxidative Stabilisierung und der Widerstand gegenüber Spannungsrissen betrachtet.

Wie in dargestellt kamen nach der Jahrtausendwende immer mehr Anforderungen bezüglich Spannungsrissbeständigkeit über den FNCT-Wert auf. Beispielweise forderte das DIBt³ für Rohre, die eine Zulassung erhalten wollen, in den Zulassungsgrundsätzen 2004 mind. 20 h FNCT Standzeit für PE HD, mind. 100 h für PE 80 und mind. 300 h für PE 100. Diese Forderungen gelten im Zulassungsverfahren auch heute noch. Philipp Frank [Fra05] forderte im Jahre 2005 einen Nachweis von über 500 h Standzeit für PE-Werkstoffe wegen der hohen Kerbwirkung durch Perforation und einer großen Punktbelastung. Mit dem Aufkommen der besonders spannungsrissunempfindlichen PE 100-RC (RC = Resistance to Crack) Materialien forderte die PAS 1075 Standzeiten von min. 8760 h (1 Jahr) für die PE 100-RC Formmassen.

³ DIBt = Deutsches Institut für Bautechnik

Während in der Ausgabe der DIN 4266-1 von 1992 noch keine Anforderungen an FNCT genannt sind, wurden Mindestanforderungen an die Spannungsrissbeständigkeit in der Ausgabe von 2011 (300 h bei Standardanwendung und 1600 h bei erhöhter Anforderung) mit aufgenommen. Das heißt, es wurden in den 90er Jahren Rohre in Deponien eingebaut, für die keine Anforderungen bezüglich Spannungsrissbeständigkeit über den FNCT formuliert waren.

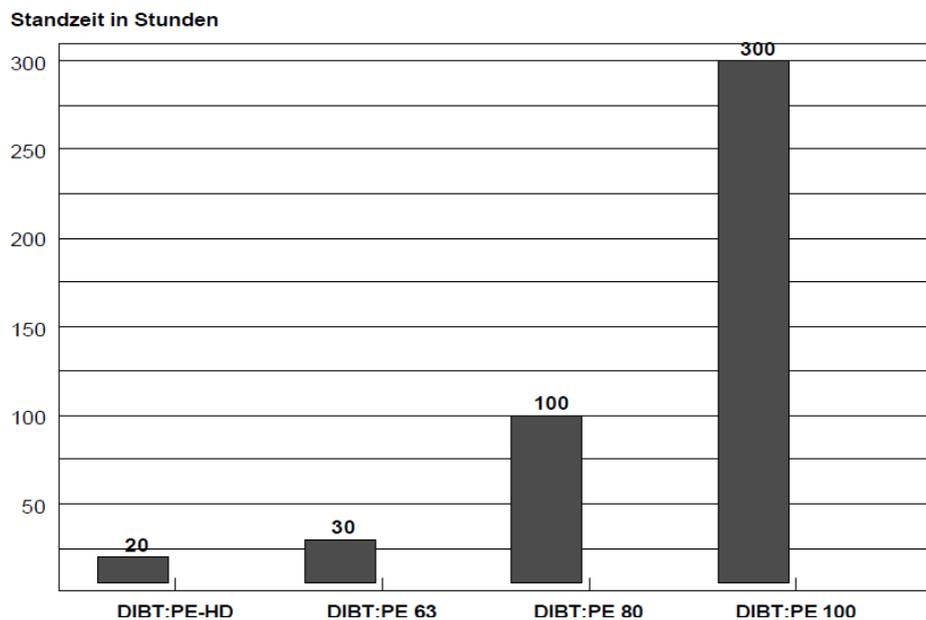


Abbildung 1: Anforderungen des DIBt an die FNCT Standzeiten für die bauaufsichtliche Zulassung von Formmassen für PE-Rohre [Hes12]

Tabelle 1: Anforderungen zur Standzeit an die Formmassen beim FNCT (80 °C, 4 MPa, 2 % Arkopal N100)

Norm/Richtlinie/ Quelle	Werkstoff	Prüfung	Anforderung zur Standzeit an die Formmassen beim FNCT
DIN 4266-1: 1992-01	-	FNCT	keine Anforderung
DIBt Zulassungsgrundsätze (Ausgabe etwa 2004) [Hes12] Abbildung 1	PE HD	FNCT	≥ 20 h
	PE 63	FNCT	≥ 30 h
	PE 80	FNCT	≥ 100 h
	PE 100	FNCT	≥ 300 h
Frank (2005) [Fra05]	PE HD	FNCT	> 500 h
PAS 1075: 2009-04	PE 100-RC	FNCT	≥ 8760 h
SKZ/ TÜV-LGA Güterichtlinie 2010	PE 100	FNCT	≥ 300 h ¹⁾
DIN 4266-1: 2011-11	PE 80 und PE 100	FNCT	> 300 h ¹⁾
SKZ/ TÜV-LGA Güterichtlinie 2013	PE 100/ PE 100-RC	FNCT	≥ 1600 h
	PE 80	FNCT	≥ 300 h

¹⁾ 300 h bei Standardeinbaubedingungen. 1600 h bei erhöhten Anforderungen.

Als Maß für die Langzeitstabilisierung wird meist der OIT-Wert herangezogen. Insbesondere für die phenolisch stabilisierten PE-Rohre im Deponiebau stellt die OIT-Messung eine geeignete, schnelle Methode zur Bewertung der Stabilisierung gegen thermo-oxidatives Versagen dar. Einige Anforderungen an den OIT-Wert sind in Tabelle 2 aufgelistet. Bereits vor dem Jahr 2005 fordert das DIBt in den Zulassungsgrundsätzen einen OIT_{200 °C} von 30 min, bzw. OIT_{210 °C} von 15 min für PE 80 und PE 100. Mit dem Entwurf der DIN 4266-1 aus dem Jahr 2010 wurde eine Anforderung (OIT_{200 °C} ≥ 20 min) aufgegriffen, die es in der Version von 1992-01 noch nicht gab. In der neu überarbeiteten DIN 8075 von 2011 wird ein OIT_{200 °C} Wert von größer 20 min gefordert. Zuvor gab es keine Anforderungen in dieser Norm an den OIT-Wert. Rohre, die nach der SKZ/TÜV-LGA Güterichtlinie (2013) bzw. dem Bundeseinheitlichen Qualitätsstandard 8-1 der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ hergestellt und geprüft werden, müssen im Rahmen des Eignungsnachweises eine Beständigkeit von mehr als 100 Jahren erreichen.

In der Fassung von 2010 wird ein OIT_{200 °C} – Wert von mind. 20 min gefordert. Die Forderung hat sich in der Ausgabe von 2013 auf 20 min verschärft, bei einer Prüftemperatur von 210 °C.

Tabelle 2: Anforderungen an den OIT

Norm / Richtlinie / Quelle	Werkstoff	Prüfung	Anforderung
DIN 4266-1: 1992-01	-	OIT	keine Anforderung
DIN 8074 : 1999-08 (Vorgängerdokument der DIN 16842 : 2013)	-	OIT	keine Anforderung
DIN 8075 : 1999-08	-	OIT	keine Anforderung
DIBt (Zulassungsgrundsätze bereits vor dem Jahr 2005)	PE 80 und PE 100	OIT _{200 °C} OIT _{210 °C}	> 30 min > 15 min
DIN 4266-1 : 2011-11	PE 80 und PE 100	OIT _{210 °C}	≥ 20 min
DIN 8075 : 2011-12	PE 80 und PE 100	OIT _{200 °C}	> 20 min
DIN 16842 : 2013-05	PE HD	OIT _{200 °C}	≥ 20 min
Entwurf der DIN 16842: 2012-02	PE HD	OIT _{200 °C}	≥ 15 min
SKZ/ TÜV-LGA Güterrichtlinie Ausgabe 2010		OIT _{200 °C}	≥ 20 min
Ausgabe 2013		OIT _{210 °C}	≥ 20 min

Es kommt die Frage auf, ob die vor der Jahrtausendwende eingebauten Rohre, an die keine gesonderten Anforderungen an Spannungsrissbeständigkeit (FNCT) und Langzeitstabilisierung (OIT) gestellt wurden, mittelfristig saniert werden müssen oder noch viele Jahre weiter betrieben werden können.

Sind die „aktuellen“ Anforderungen an PE-Werkstoffe unter erhöhten Betriebsbedingungen im Deponiebau ausreichend für eine Nutzungsdauer von 50 oder sogar 100 Jahren?

4 Versuchsmaterial

Im Rahmen dieser Studie wurden dem SKZ mit Unterstützung der TÜV-LGA Rohr- und Schacht-Stücke aus sechs unterschiedlichen Deponien / Entnahmen mit unterschiedlicher Vorgeschichte zur Verfügung gestellt. Aus dieser Auswahl wurden drei Materialien (X, Y und Z) ausgewählt, deren Probenanzahl und -abmessungen für umfassende Untersuchungen ausreichend waren. Zusätzlich wurden Untersuchungen an einem neuwertigen Rohr (R) „Referenz“ aus PE HD vorgenommen.

Zur vergleichenden Einordnung der Ergebnisse wurden weiterhin die Proben (A, B, C₁, C₂, D und E) aus der Vorstudie hinzugezogen.

Tabelle 3: Übersicht über das Probenmaterial dieser Studie (X, Y, Z, R) und der Vorstudie (A, B, C, D, E)

Bezeichnung	Alter/ Jahre	Einbautiefe/ m	Deponieart	Temperatur/ °C
X – Schachtausschnitte PE	18	bis 20	Hausmüll	20 - 30
Y – Drainagerohre PE	28	bis 37	Hausmüll	20 - 30
Z – Vollwandrohre PE 80	16	bis 24	Hausmüll, Bauschutt, Asche	bis über 50
R – Neurohr PEHD	-	-	-	-
A – Vollwandrohr PE	20	bis 40	Hausmüll	bis über 50
B – Dränrohr PE	20 - 25	ca. 20	Hausmüll	30
C – T-Rohrstück PE	15	ca. 10	Hausmüll	20
D – Neurohr PE 80	-	-	-	-
E – Neurohr PE 100	-	-	-	-

Material X:

Drei ca. 52 cm bis 57 cm lange, ca. 50 cm breite und ca. 14 cm dicke „obere Schachtteile“, schwarz mit grauen Innenrohren (Abbildung 2) und zwei ca. 74 cm, bzw. 20 cm lange, ca. 32 cm, bzw. 40 cm breite und ca. 10 cm dicke „untere Schachtteile“, schwarz mit grauen Innenrohren (Abbildung 3).



Abbildung 2: Material X: Oberer Schachtteil „OS3“ im Anlieferungszustand als Repräsentant für die oberen Schachtteile



Abbildung 3: Material X: Unterer Schachtteil „US2“ im Anlieferungszustand als Repräsentant für die unteren Schachtteile

Einbausituation von Material X:

Einbauzeitraum: 1995 - 1996

Entnahmedatum: 2013

Deponieart: Hausmülldeponie

Bettungsmaterial/Einbettung: Kies / Styropor

Bodenart/-gruppe: 1 / 4 nach ATV A 127

Einbautiefe: bis 20 m

Durchflussmedium: Gas

Medium-/Betriebstemperatur: 20 °C bis 30 °C

Es handelt sich, wie in Abbildung 26 (Seite 64) ersichtlich wird, um einen Schadensfall (Stabilitätsversagen in Form von Einbeulen)

Material Y:

Zehn ca. 65 cm bis 100 cm lange, schwarze Drainage-Rohrabschnitte (gelocht), Wanddicke ca. 13,5 mm, stark deformiert, teilweise mit Rissen in der Sohle, aus der Deponie Y aus dem Einbauzeitraum 1986 (Abbildung 4)



Abbildung 4: Material Y: Drainage-Rohrstücke im Anlieferungszustand

Einbausituation von PE-Material Y:

Einbauzeitraum: 1986

Entnahmedatum: 2014-2015

Deponieart: Hausmülldeponie

Bettungsmaterial/Einbettung: Kies / Unterseite Ton

Bodenart/-gruppe: 1 / 4 nach ATV A 127

Einbautiefe: bis 37 m

Durchflussmedium: Sickerwasser

Medium-/Betriebstemperatur: 20 °C bis 30 °C

Es handelt sich, wie in Abbildung 25 zu sehen ist, um einen Schadensfall (Rohre sind stark verformt mit Rissen in der Sohle).

Material Z:

Zwei ca. 100 cm lange, schwarze Drainage-Rohrabschnitte und drei ca. 100 cm lange Rohrabschnitte (Vollwandrohr) mit einem Durchmesser von ca. 32 cm und 36 cm aus PE 80 aus der Deponie Z (Abbildung 5)



Abbildung 5: Material Z: Drainage-Rohrstücke im Anlieferungszustand

Einbausituation von PE 80-Material Z:

Einbauzeitraum: 1999 - 2001

Entnahmedatum: 2015

Deponieart: Hausmülldeponie bis 2005, dann Bauschutt und Asche

Bettungsmaterial/Einbettung: Kies / Unterseite Ton

Bodenart/-gruppe: 1 / 4 nach ATV A 127

Einbautiefe: 6 m bis 24 m

Durchflussmedium: Sickerwasser

Medium-/Betriebstemperatur: 30 °C, zwischen 2001 und 2005 bis 50 °C, 2006 bis 2010 über 50 °C, zeitweise über 60 °C

Änderung der Betriebsart/erhöhte statische Anforderung

Kein Schadensfall

Ziel des Forschungsprojekts ist eine Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse auf Neubau und Bestand in bayerischen Deponien. Die untersuchten Rohre wurden aus dem gesamten Bundesgebiet entnommen. Dennoch ist eine Anwendung der Ergebnisse dieser Studie auf bayerische Deponien vollständig gegeben, da zum einen die Deponierohre in Deutschland fast ausschließlich von zwei Lieferfirmen stammen. Zum anderen sind die Einbaubedingungen und Einbauverfahren, sowie die Dimensionierung von Rohren im Deponiebau deutschlandweit einheitlich, sodass die Erkenntnisse aus dieser Studie auf bayerische Deponien angewendet werden können.

Material R:

PE HD-Vollwandrohr, D50, Neurohr

Referenzrohr mit umfangreichen Zeitstandinnendruckdaten für unterschiedliche Temperaturen und Spannungen

Materialien aus der Vorstudie:

Bei den Versuchsmaterialien aus der Vorstudie (2011-2012)⁴ handelt es sich um folgende Proben (Details, siehe Tabelle 4) :

- Material A: PE-Vollwandrohr, $d_A = 280$ mm, ca. 20 Jahre alt
- Material B: geschlitztes PE-Rohr, $d_A = 250$ mm, 20 bis 25 Jahre alt
- Material C: PE-Vollwandrohr mit T-Stück, $d_A = 90$ mm, ca. 15 Jahre alt
- Material D: PE 80-Rohr, $d_A = 108$ mm (Referenzrohr, neu)
- Material E: PE 100-Rohr, $d_A = 108$ mm (Referenzrohr, neu)

⁴ „Vorstudie zur Überprüfung der Materialqualität von PEHD-Dränrohren nach mehrjähriger Nutzungsdauer“ (SKZ-Gutachten Nr. 98329/11, LfU-Az. 36-0270-38587/2011)

Tabelle 4: Versuchsmaterialien der Vorstudie

Material	Geometrie	Außendurchmesser	Wanddicke	Alter*	Anmerkung
A	Vollwandrohr	280 mm	28 mm	ca. 20 Jahre	Riss in Sohle, ca. 5 % verformt, 50 - 60 °C Dauertemperatur
B	Dränrohr geschlitzt	250 mm	25 mm	20 - 25 Jahre	stark verformt, ca. 20 m Müllhöhe
C ₁	T-Rohrstück	90 mm	12 mm	ca. 15 Jahre	unbeschädigt
C ₂	angeschweißtes Rohrstück		9 mm		
D	Vollwandrohr	108 mm	10 mm	neu	---
E	Vollwandrohr	108 mm	10 mm	neu	---

* Zum Zeitpunkt der Untersuchungen (2011-2012)



Abbildung 6: Material A (Vollwandrohr, $d_A = 280$ mm, ca. 20 Jahre alt); Riss in der Rohrinneenseite im Sohlbereich



Abbildung 7: Material B (geschlitztes Rohr, $d_A = 250$ mm, 20 bis 25 Jahre alt)



Abbildung 8: Material C (Vollwandrohr mit T-Stück, $d_A = 90$ mm, ca. 15 Jahre alt)

5 Konzeption und Zeitplan

Im Rahmen der aktuellen Studie wurden im ersten Teil, auf Basis der bereits vorliegenden Ergebnisse aus der vorangegangenen Vorstudie (SKZ-Gutachten Nr. 98329/11, LfU-Az. 36-0270-38587/2011), drei weitere ältere Dränrohre/Schächte aus Deponien bezüglich deren Istzustands hinsichtlich Spannungsrisssbeständigkeit und Oxidationsbeständigkeit untersucht. Als Prüfmethode zur Charakterisierung des Spannungsrisssverhaltens wurden der FNCT und SHT eingesetzt. Die Bestimmung des thermo-oxidativen Alterungszustandes erfolgte mittels OIT und HPAT. Zusätzlich zu den drei bereits gealterten Proben aus den Deponien wurden diese Prüfmethode an einem Neurohr bekannter PE HD-Qualität angewendet. Für dieses Referenzrohr liegen außerdem umfangreiche Ergebnisse aus Zeitstandinnendruckversuchen bei unterschiedlichen Spannungen und Temperaturen vor (Abbildung 16, Seite 42). Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 9 die für die Nutzungsdauerabschätzung wichtigen Versagensarten Spannungsrisssversagen (Versagensast II) und thermo-oxidatives Versagen (Versagensast III) am Beispiel eines schematischen Zeitstanddiagramms für PE-Rohre.

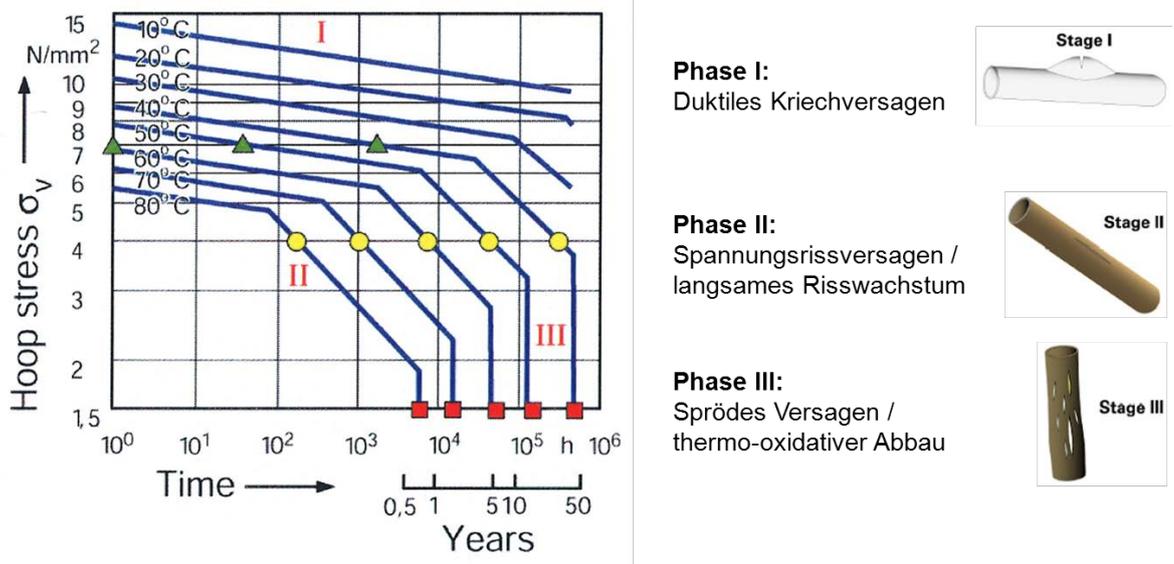


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Zeitstandverhaltens von PE-Rohren (in Abhängigkeit von der Spannung, und Temperatur) mit den möglichen Versagensarten [Vog10]

- Phase I (1. Versagensast) ist gekennzeichnet durch ein duktilen Versagen durch lokales Überschreiten der Streckspannung infolge Kriechen. Dies zeigt sich als eine flache Gerade bei hoher Prüfspannung.
- Phase II (2. Versagensast) beschreibt ein Bruchversagen durch langsames Risswachstum (Spannungsrisssversagen). Dies ist eine steilere Gerade bei mittlerer Prüfspannung und auch längerer Prüfdauer.
- In Phase III (3. Versagensast) findet sprödes Versagen durch thermo-oxidativen Abbau des Polymers statt. Dieses Versagen tritt nahezu unabhängig von der aufgetragenen Prüfspannung ein und braucht dafür sehr lange Prüfzeiträume.

In Abbildung 27 bis Abbildung 30 (Anhang) sind die Mindestzeitstandkurven aus der DIN 8075 (Ausgaben von 1987 bzw. 1999) für verschiedene PE-Werkstoffe (PE HD, PE 63, PE 80 und PE 100) gezeigt. Die einzelnen Kurvenäste lassen sich mittels der in der DIN 8075 genannten Gleichung (1) beschreiben:

$$\log t = A + \frac{C}{T} + D \log \sigma \quad \text{mit} \quad C = \frac{E_A}{2,303 \cdot R} \quad (1)$$

A, C und D sind Koeffizienten, abhängig vom PE-Werkstoff (PE HD, PE 63, PE 80 und PE 100) sowie vom jeweiligen Versagensast. t ist die Zeit in h, T die Temperatur in K und σ die Umfangsspannung in N/mm². E_A ist die Aktivierungsenergie für den jeweiligen Versagensmechanismus (1., 2. bzw. 3. Versagensast) und R die universelle Gaskonstante. Die Aktivierungsenergie des duktilen Versagens von PE ergibt sich aus der Temperaturabhängigkeit der Mindestkurven in der DIN 8075 zu ca. 400 kJ/mol. Für das Spannungsrisssversagen ergibt sich eine Aktivierungsenergie von ca. 170 kJ/mol. Die Aktivierungsenergie für thermo-oxidatives Versagen von PE beträgt ca. 90 kJ/mol [Vog10].

Durch Fleißner [Fle87 und Fle98] wurde nachgewiesen, dass die Ergebnisse von FNCT-Versuchen mit Zeitstandinnendruckversuchen (ZIV) an Rohren (2. Versagensast) korrelieren. Für die Korrelation der Standzeiten im FNCT-Test mit der Lage des 2. Versagensastes im ZIV wird deshalb folgende Beziehung aufgestellt:

$$t_i(\text{ZIV}^{\text{II}}) = \frac{t_i(\text{FNCT})}{t_{\text{ref}}(\text{FNCT})} \cdot t_{\text{ref}}(\text{ZIV}^{\text{II}}) \quad (2)$$

Das Verhältnis der Standzeit im Zeitstandversuch einer Probe i in der zweiten Phase $t_i(ZIV^{II})$ und der Standzeit der Referenzprobe „R“ (Neurohr) in der zweiten Phase $t_{ref}(ZIV^{II})$ entspricht dem Verhältnis von der FNCT-Standzeit der Probe i $t_i(FNCT)$ und der FNCT-Standzeit der Referenzprobe (Neurohr) $t_{ref}(FNCT)$.

Es wird angenommen, dass das im HPAT hervorgerufene spröde Werkstoffversagen und das Versagen im 3. Versagensast beim ZIV dem gleichen Mechanismus folgt, da sie beide durch thermo-oxidative Alterung hervorgerufen werden. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die dritte Phase des ZIV ein senkrecht abfallender und somit von der anliegenden Spannung unabhängiger Ast ist. Folglich wird erwartet, dass die Lage des 3. Versagensastes im ZIV mit dem HPAT korreliert:

$$t_i(ZIV^{III}) = \frac{t_i(HPAT)}{t_{ref}(HPAT)} \cdot t_{ref}(ZIV^{III}) \quad (3)$$

Das Verhältnis der Standzeiten der dritten Phase einer Probe i im Zeitstandversuch $t_i(ZIV^{III})$ und der Referenzprobe $t_{ref}(ZIV^{III})$ kann mit dem Verhältnis der Versagenszeiten im Autoklaven $t_i(HPAT)/t_{ref}(HPAT)$ gleichgesetzt werden.

Über die Ermittlung der Spannungsrissbeständigkeit (FNCT-Wert) und der thermo-oxidativen Beständigkeit (HPAT-Wert) der ausgebauten Deponie-Rohre und des Referenzrohres R (mit umfangreichen Zeitstandinnendruckdaten für unterschiedliche Temperaturen und Spannungen) können so für Deponierohre unter verschiedenen Betriebsspannungen und Betriebstemperaturen über die Gleichungen (1) bis (3) Versagenszeiten im Zeitstanddiagramm berechnet werden.

Für den Vergleich der zulässigen Spannungen (Zeitstandfestigkeiten) mit denen im Deponiekörper unter verschiedenen Betriebsbedingungen auftretenden Betriebsspannungen wurde die Finite Elemente Methode (FEM) angewendet. Unter Einbeziehung der Mindestzeitstandkurven für PE HD, PE 80 und PE 100 aus den entsprechenden Normen, sowie unter Berücksichtigung von Langzeitkriechdaten, wurden die Betriebsspannungen (auftretenden Spannungen und Dehnungen) von Rohren in den Deponien berechnet. Als weitere Parameter wurden hierbei unter anderem die Einbaubedingungen (Flächenlast und Auflagerbedingungen), die Temperatur, sowie die Rohrklasse und Rohrgeometrien einbezogen, um die Einflüsse von Medium, Bauart und Deponieklasse abzudecken.

Die über FEM berechneten Betriebsspannungen in Rohren wurden mit den zulässigen Spannungen verglichen und somit die Mindestnutzungsdauer von 50 bzw. 100 Jahren unter Betriebsbedingungen überprüft. In Abbildung 10 ist die Vorgehensweise zum Betriebsfestigkeitsnachweis schematisch dargestellt.

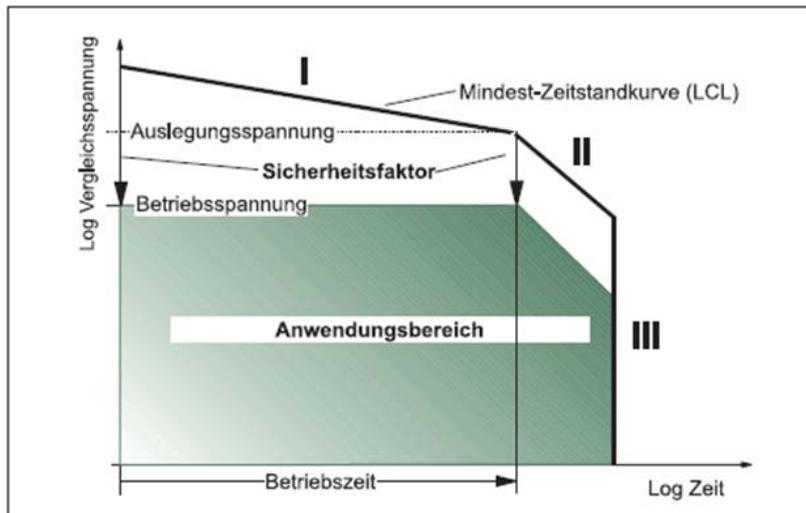


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Betriebsfestigkeitsnachweises für die geforderte Mindestnutzungsdauer von 50 bzw. 100 Jahren [Hes06]

Neben der Überprüfung der Mindestnutzungsdauer von 50 bzw. 100 Jahren der entnommenen Deponie-Rohre können auf Grundlage dieser Datenbasis Mindestanforderungen an die verwendeten PE-Werkstoffe bezüglich Spannungsrissbeständigkeit (FNCT und SHT) und thermo-oxidativen Beständigkeit (OIT und HPAT) abgeleitet werden. Im Zuge dessen soll eine Überprüfung der in Regelwerken, wie z. B. DIN 4266-1, DIN 16842 oder der SKZ/TÜV-LGA Güterichtlinie (2013), genannten Werte von FNCT und OIT für (neue) PE 80 bzw. PE 100 Rohre stattfinden.

Des Weiteren wurden Verformungsnachweise für die entnommenen Rohre entsprechend ihrer Einbausituation zur Unterscheidung ihrer Versagensart durchgeführt. Dieses Vorgehen soll klären, ob das Ende der Nutzungsdauer/der Schadensfall aufgrund zu großer Verformungen (Vertikalverformung > 6%) oder durch Alterung hervorgerufen wurde.

Im zweiten Teil der Studie wurden an der schlechtesten Rohrqualität der ausgebauten alten Deponierohre zusätzliche Messungen durchgeführt, um die getroffenen Annahmen (Gleichungen (2) und (3)) weiter zu überprüfen. Zur Ermittlung des Spannungsrisssversagens wurden die FNCT-Messungen auf mehrere Temperaturen und Spannungen ausgeweitet, um anschließend direkt auf Anwendungsbedingungen (Betriebstemperatur und Maximalspannung im Rohr) zu extrapolieren. Die thermo-oxidative Nutzungsdauer des PE-Rohrs wurde durch Hochdruck-Autoklaventests bei unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen und anschließender Extrapolation auf Anwendungsbedingungen (Temperatur und Sauerstoffkonzentration an der Deponiebasis) überprüft.

Projektplan

Das Projekt hatte eine ursprüngliche Laufzeit vom 28. September 2015 bis 30. November 2016. Die zeitliche Planung sah vor, das Projekt in 2 Teile und verschiedene Arbeitspakete zu unterteilen. Wegen eines größeren Untersuchungsbedarfs wurde das Projekt mit folgendem Arbeitsplan verlängert (Tabelle 5).

Tabelle 5: Arbeitsplan nach Projektverlängerung bis 28.02.2017

Arbeitspakete		Projektmonat																
		Okt 15	Nov 15	Dez 15	Jan 16	Feb 16	Mrz 16	Apr 16	Mai 16	Jun 16	Jul 16	Aug 16	Sep 16	Okt 16	Nov 16	Dez 16	Jan 17	Feb 17
Teil 1	AP 1.1 Projektkoordination und Probenentnahme																	
	AP 1.2 Literatur/datenrecherche, Aufbereitung und Auswertung																	
	AP 1.3 Betrachtung Spannungsrisssversagen																	
	AP 1.4 Betrachtung thermo-oxidatives Versagen																	
	AP 1.5 FEM Berechnungen																	
	AP 1.6 Ergebnisbewertung und Ableitung von Handlungsempfehlungen																	
Teil 2	AP 2.1 Erweiterung/Überprüfung der Ergebnisse zum Spannungsrisssversagen																	
	AP 2.2 Erweiterung/Überprüfung der Ergebnisse zum thermo-oxidativen Versagen																	
	AP 2.3 FEM Berechnungen auf Basis der erweiterten Datenbasis																	
AP 3 Berichterstellung																		ESB, SB*

ZB = Zwischenbericht
 ESB = Entwurf Schlussbericht
 SB = Schlussbericht
 ESB: 13.02.2017
 SB: 1 Woche nach Abstimmung des Entwurfs

6 Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden

6.1 FEM Berechnungen

6.1.1 Parameter der Berechnungen / Grundlagen

Der Einbau von Rohren im Deponiebau war in DIN 19667 (Mai 1991) geregelt, es liegt aktuell der Stand 08/2015 der DIN vor. Abbildung 11 zeigt den dort vorgegebenen Regeleinbau eines Deponierohres in speziellem Auflagermaterial z. B. Mischung M9. Alternativ war der Einbau in einem Auflager, das direkt in die Deponiebasisdichtung gebaut wird und wasserundurchlässig ist, in bayerischen Deponien verbreitet. Ausgeführt werden dabei üblicherweise Auflagerwinkel $2\alpha = 120^\circ$. Dies entspricht einem Wasserzufluss durch eine Perforation über 2/3 des Rohrumfangs.

Um den vorgegebenen Mindestinnendurchmesser zu erreichen, werden meist Rohre mit Außendurchmesser DA 315 mm und DA 355 mm verwendet. In Abhängigkeit von der Überdeckungshöhe kommen die SDR⁵ Versionen 11 und 7,3 zum Einsatz. Die Rohre sind über 2/3 ihres Umfangs perforiert. Üblich sind Perforationen durch Lochung mit Durchmesser 12 mm im Abstand von 60 mm oder Schlitzungen. Schlitzungen waren bei älteren Rohren mehrfach Ausgangspunkt für Risse in den Rohrwänden, da diese nicht materialschonend ausgeführt waren. Die Schwächung der Rohrsteifigkeit durch die Perforation wird im Folgenden mit 0,9 der oberen 2/3 des Rohres rechnerisch angesetzt. Dies umfasst alle üblichen Lochungen und neuere Schlitzungen. Der jeweilige Verschwächungsfaktor für ein Lochbild kann nach ATV M 127 berechnet werden. Für einige Schlitzungen kann dies auf der unsicheren Seite liegen. Die Berücksichtigung eines größeren Abminderungsfaktors bewirkt, bei geringfügig höherer Verformung, ein Absinken der Spannungen. Da die Beurteilung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auf Grundlage der Zugspannungen erfolgt, werden die Berechnungen mit 0,9 als sinnvollem Mittelwert durchgeführt. Nicht erfasst sind Perforationen, die unsachgemäß hergestellt wurden, sowie Schlitzungen mit nicht ausgerundeten Schlitzecken. Eine unsachgemäße Herstellung von Perforationen kann Schädigungen angrenzender Rohrbereiche hervorrufen. In den Ecken nicht ausgerundeter Schlitzungen treten Kerbspannungen auf, die ein mehrfaches der berechneten Rohrspannungen betragen können. In diesen beiden Fällen sind Einzelfallbetrachtungen erforderlich.

⁵ SDR (Standard Dimension Ratio) = Verhältnis zwischen Außendurchmesser und Wanddicke eines Rohres

Für die Bettung der Rohre werden für Ton und Kies basierend auf den Ergebnissen des großmaßstäblichen Modellversuchs von Zanzinger [Zan94], sowie der Modifikationen gemäß Untersuchungen der „Parameterstudie zur Rohrauflagergestaltung in Deponien“ [DoI96] und den Ergebnissen von Prüfungen statischer Berechnungen von Deponierohren der TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH als Mindestwerte die Werte nach Tabelle 7 angesetzt. Für Rohrauflagermaterial wird eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls des Tonmaterials angenommen. Festigkeitswerte von Rohrauflagermaterialien werden bei Laborversuchen in sehr unterschiedlichen Größenordnungen ermittelt. Die angesetzten Mindestbodenkennwerte stellen sicher, dass bei korrektem Einbau und anforderungsgemäßer Auswahl der Grundmaterialien die Berechnungsergebnisse angewendet werden können.

Die Einwirkungen aus der Deponie setzen sich aus Überdeckungshöhe $h_{\ddot{u}}$ und Abfallwichte γ_{Abfall} zusammen. Allgemein wird eine Wichte von $\gamma_{\text{Abfall}} = 20 \text{ kN/m}^3$ für Erdaushub und Bauschutt sowie von $\gamma_{\text{Abfall}} = 15 \text{ kN/m}^3$ für Hausmüll in Ansatz gebracht. Eine Oberflächenabdichtung wird mit einer mittleren Wichte von $\gamma_{\text{OA}} = 20 \text{ kN/m}^3$ angesetzt. Die allgemeinen Berechnungen dieses Berichtes erfolgen bis zu einer rechnerischen Auflast p_v von 2.000 kN/m^2 . Für die Deponien Z und Y werden die tatsächlichen Überdeckungshöhen angesetzt. Die Ermittlung erfolgt nach ATV M 127 zu:

$$p_v = \gamma_{\text{Abfall}} \cdot h_{\ddot{u},\text{Abfall}} + \gamma_{\text{OA}} \cdot h_{\ddot{u},\text{OA}} \quad (4)$$

Tabelle 6: Abminderungsfaktoren A_3 für Temperatur nach DIN 4266-1 : 1992

Temperatur	20 °C	30 °C	40 °C
Dep. Klassen	DK 0 / I	DK II	DK II / III
Abminderung	1,00	0,85	0,75

Tabelle 7: Angewendete Bodenkenwerte (Mindestwerte in Anlehnung an [Zan94, DoI96])

Boden	Wichte / kN/m^3	E-Modul / N/mm^2	Querdehnzahl
Kiesdrän	18	40	0,2
Sand-Auflager	20	20	0,3
Ton-Dichtung	22	8	0,4

6.1.2 FEM-Modellierung

Im mechanischen Modell wurde eine Vorverformung (nach dem Einbau) von 3 % des mittleren Rohr-Durchmessers angenommen. Der umgebende Boden wurde durch Scheibenelemente diskretisiert⁶. Die Verbindungen zwischen Rohr und Boden wurden mit Hilfe von Gap/Friction-Elementen (reine Druckkraftübertragung) simuliert. Die Auflast wurde durch Anordnung einer Linienlast auf dem oberen Modellrand angesetzt. Eine verwendete Diskretisierung ist in Abbildung 12 dargestellt, verschiedene Materialien sind farblich abgehoben. Es erfolgten geometrisch nichtlineare Berechnungen, in denen die Belastung schrittweise gesteigert wurde. Perforationen der Rohre wurde durch eine Abminderung der mittragenden Breite berücksichtigt.

6.1.3 Berechnungen

Im ersten Berechnungsschritt erfolgten Berechnungen für Rohre DA 355 SDR 7,3 und SDR 11. Berechnet wurden die statischen Nachweise für die beiden i.d.R. ausgeführten Einbauarten in Ton direkt und in einem zusätzlich unter den Rohren eingebautem Auflagermaterial. Alle Berechnungen erfolgten mit einer maximalen vertikalen Einwirkung von 2.000 kN/m², die in Schritten von 100 kN/m² aufgebracht wurde. Die Einwirkungshöhe kann auch als Lastfaktor angegeben werden (1,0 entspricht 2.000 kN/m², z. B. 0,25 entspricht 0,25 · 2.000 kN/m² = 500 kN/m²). Diese theoretische Einwirkung ist höher als tatsächlich im Deponiebau ausgeführte Einwirkungen. Vom Berechnungsprogramm wird die Berechnung abgebrochen, wenn diese Einwirkung erreicht ist. Wird die Berechnung vor Erreichen der Endeinwirkung abgebrochen, sind rechnerisch Instabilitäten aufgetreten.

Auf Grundlage der Modelle erfolgten Beurteilungen der Rohre der Deponie Z, die von den Berechnungen für Einbau von Rohren SDR 11 in Tonmaterial erfasst werden. Für die Berechnungen der Deponie Y wurde ein weitgehend identisches Modell, jedoch mit Rohren SDR 17, erstellt und ausgewertet.

Die Nachweise für den Schacht der Deponie X erfolgten analytisch. Die angewandten Berechnungsalgorithmen basieren auf der DWA A 127. Die Annahmen für Bettung und Einwirkungen sind ebenfalls auf Grundlage der ATV A 127 für die Anwendung auf „senkrecht“ eingebaute Rohre modifiziert.

⁶ Einteilung von kontinuierlichen Objekten in eine endliche Anzahl voneinander getrennter, unterscheidbarer Objekte

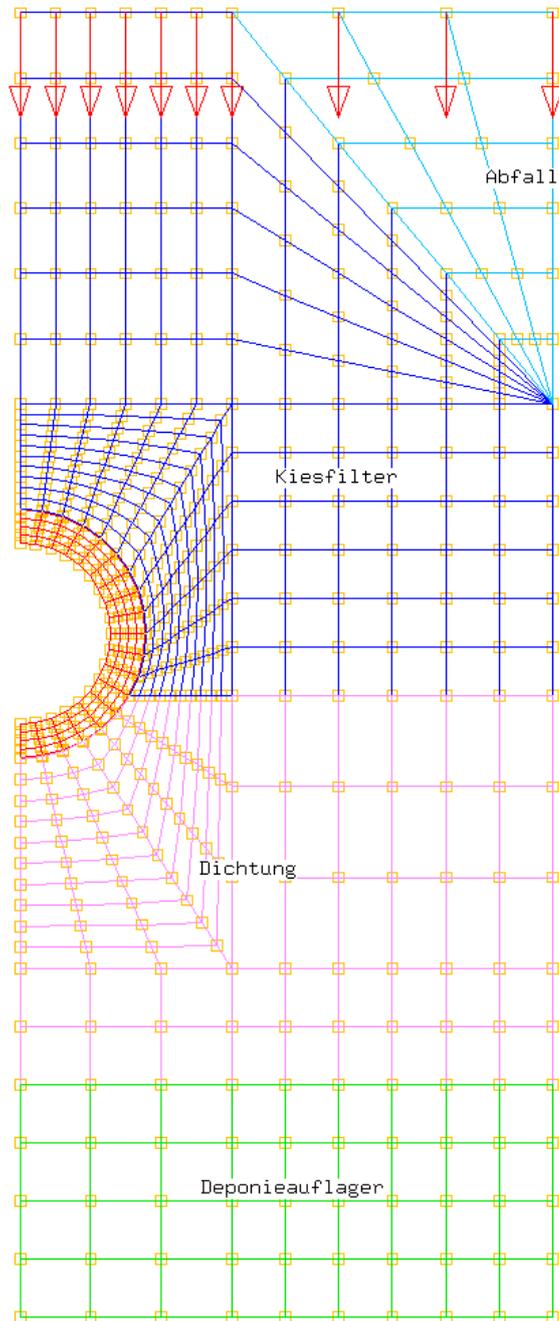


Abbildung 12: Modell DA 355 SDR 7,3 Tonaufleger

Im Zuge des Forschungsvorhabens wird als Kriterium der Bemessung die Spannung nachgewiesen. Die allgemeinen Berechnungen erfolgen dabei mit Kriechmodulen, die aus den Grundwerten der Kriechmodule gemäß ATV A 127 unter Berücksichtigung von Abminderungen nach DIN 4266-1 (1992) ermittelt werden.

Die allgemeinen Berechnungen berücksichtigen einen nach ATV A 127 / M 127 zulässigen Einbau. Dieser wird üblicherweise für Deponiesickerwasserrohre (bei korrektem Einbau) durch die maximal zulässige Vertikalverformung von $\delta \leq 6 \%$ definiert. Für die berechnete maximale Überdeckung werden Verformungen und maximale Spannungen angegeben.

6.2 Spannungsrisssbeständigkeit

6.2.1 Full Notch Creep Test (FNCT)

Die Prüfung der Spannungsrisssbeständigkeit von (modernen) PE-Werkstoffen über Zeitstandinnendruckversuche (ZIV) ist in vertretbaren Zeiten nicht möglich. Deshalb wurden Prüfmethode entwickelt, die eine Zeitraffung ermöglichen. Der Full-Notch-Creep-Test (FNCT) nach ISO 16770 bzw. DIN EN 12814-3 gilt als die in Europa am häufigsten eingesetzte Prüfmethode zur Beurteilung der Spannungsrisssbeständigkeit von PE-Rohrwerkstoffen.

Beim FNCT handelt es sich um einen Zeitstand-Zugversuch an stabförmigen Probekörpern mit umlaufender Kerbung bei erhöhter Temperatur (meist 80 °C) in wässriger Netzmittellösung (meist 2 % Arkopal® N100). Ermittelt werden die Versagenszeiten bis zum quasi-spröden Spannungsrisssversagen bei konstanter Prüfspannung (meist 4 MPa). Durch Fleißner [Fle87, Fle98] wurde nachgewiesen, dass die Ergebnisse von FNCT-Versuchen mit Zeitstandinnendruckversuchen an Rohren korrelieren.

Im Rahmen dieser Studie wurden stabförmige Probekörper in Produktionsrichtung gemäß DVS 2203-4, Beiblatt 2 aus der Rohrwandmitte entnommen. Die Versuche wurden bei 80 °C und 4 MPa in einer wässrigen Netzmittellösung (2 % Arkopal® N100) durchgeführt.

Die ermittelten FNCT-Werte dienen der Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit der ausgebauten Deponierohre und werden in Relation gesetzt zu den FNCT-Werten der Deponierohre aus der Vorstudie, des PE HD Referenzrohres (Mat. R) sowie der Neurohre aus PE 80 und PE 100 (Mat. D und E).

An Material Z wurden neben der Standard-Prüfbedingung für den FNCT (4 MPa bei 80 °C in 2% Arkopal N100) auch Prüfungen bei weiteren Temperaturen und Spannungen durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Versagenszeiten im FNCT-Versuch die gleichen Abhängigkeiten von den Prüfparametern Spannung und Temperatur zeigen wie die Versagenszeiten im Zeitstandinnendruckversuch. Sowohl höhere Lasten als auch höhere Temperaturen, welche in der Deponie auf die Rohre einwirken, bewirken eine Verringerung der Lebensdauer.

Es sei angemerkt, dass Ergebnisse aus FNCT-Messungen z.T. sehr große Streuungen aufweisen können, da neben Prüfmedium, Temperatur und Prüfspannung weitere Parameter wie Strömungsverhältnisse im Prüfbecken und Netzmittelalter deutlichen Einfluss auf die ermittelten Standzeiten haben können. Zudem stößt die Methode bei hochspannungsrisssbeständigen PE-Typen (wie PE 100-RC) inzwischen an seine Grenzen (Prüfzeiten > 1 Jahr), so dass alternative Prüfmethoden wie der Strain Hardening Test (Kap. 6.2.2) immer mehr an Bedeutung gewinnen.

6.2.2 Strain Hardening Test (SHT)

Kurelec et al. [KTS+05] entwickelten eine neue Methode zur Bestimmung des Widerstandes von PE-Werkstoffen gegen langsames Risswachstum anhand eines uniaxialen Zugversuches bei 80 °C - ohne die Verwendung eines Netzmittels wie beim FNCT. Sie zeigten, dass die Steigung einer Spannungs-Dehnungs-Kurve im Bereich der Dehnverfestigung (Dehnverfestigungsmodul) gut mit den Standzeiten von konventionellen Spannungsrissversuchen (z. B. FNCT) korreliert (Abbildung 13). Die Ermittlung des Dehnverfestigungsmoduls/Verstreckmoduls $\langle G_p \rangle$ ist zwischenzeitlich in ISO 18488: 2015 genormt.

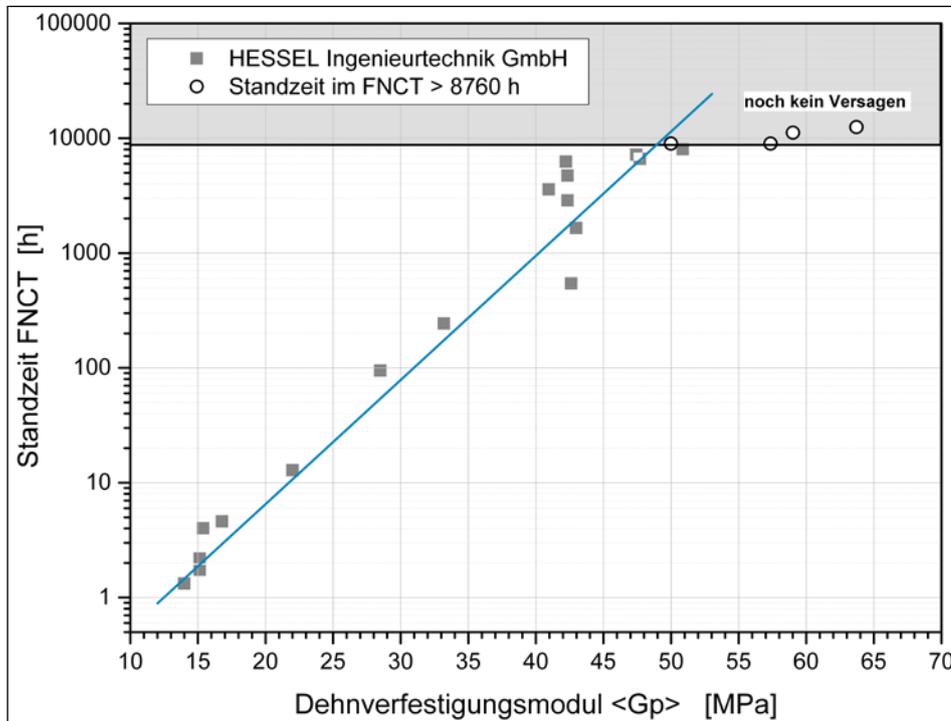


Abbildung 13: Korrelation der Dehnverfestigung $\langle G_p \rangle$ mit der Standzeit im FNCT-Versuch (Daten aus [HDM+10])

Für die Ermittlung des Dehnverfestigungsmoduls $\langle G_p \rangle$ der Deponierohre wurden aus der Rohrwandmitte Probekörper des Typs 5B nach DIN EN ISO 527-2 (allerdings mit verbreitertem Schulterbereich) herausgearbeitet. Es wurden von allen Versuchsmaterialien jeweils mindestens 3 Probekörper in Extrusionsrichtung der Rohre geprüft.

Die ermittelten Strain Hardening - Werte dienen der Bewertung der Spannungsrissbeständigkeit der ausgebauten Deponierohre und werden in Relation gesetzt zu den SHT-Werten der Deponierohre aus der Vorstudie, des PE HD Referenzrohres (Mat. R) sowie der Neurohre aus PE 80 und PE 100 (Mat. D und E).

6.3 Thermo-oxidative Beständigkeit

6.3.1 Oxidations-Induktionszeit (OIT)

Die Oxidations-Induktionszeit (OIT) beschreibt die Zeitdauer, über die das Polymer bei Messtemperatur noch durch die Antioxidantien vor oxidativem Abbau geschützt ist. Geht der OIT-Wert nach einer gewissen Einlagerungszeit infolge von Alterung gegen Null, so ist der Stabilisator vollständig verbraucht. Dies ist der frühestmögliche Zeitpunkt, ab dem mit einem thermo-oxidativen Abbau des Polymeren zu rechnen ist. Dabei ist zu beachten, dass auch ein unstabilisiertes Polymer noch einen gewissen Widerstand gegen thermo-oxidativen Abbau aufweist.

Die OIT-Untersuchungen wurden nach DIN EN ISO 11357-6 bzw. DIN EN 728 durchgeführt. Dazu wurde eine kleine Menge (ca. 5 mg) Probenmaterial aus der Rohrwandmitte entnommen und in einer dynamischen Differenzkalorimetrie-Anlage (DSC) die Oxidations-Induktionszeit bei einer Messtemperatur von 200 °C bestimmt.

Die ermittelten OIT-Werte dienen der Beurteilung der Reststabilisierung der ausgebauten Deponierohre und werden in Relation gesetzt zu den OIT-Werten der Deponierohre aus der Vorstudie, des PE HD Referenzrohres (Mat. R) sowie der Neurohre aus PE 80 und PE 100 (Mat. D und E).

Neben der standardmäßigen Ermittlung des OIT-Wertes in Rohrwandmitte wurden an den Deponierohren der aktuellen Studie auch zusätzliche Messungen an der Rohrrinnenseite bzw. bei Mat. Z auch als Tiefenprofil über die Wanddicke durchgeführt.

6.3.2 Hochdruck-Autoklavenversuch (High Pressure Autoclave Test, HPAT)

Mit dem Hochdruck-Autoklaventest kann eine beschleunigte Alterung simuliert werden. Die thermo-oxidative Alterung im Hochdruck-Autoklav geht wegen der Bereitstellung von ausreichend Sauerstoff weitaus schneller vonstatten als bei einer Einlagerung im Wärmeofen – selbst bei niedrigeren Temperaturen. Darüber hinaus befinden sich die Probekörper im Hochdruck-Autoklaven in einer wässrigen Lösung mit basischem Milieu. Dadurch wird neben der oxidativen Alterung auch eine Auslaugung von Stabilisatoren erzielt.

Beim Hochdruck-Autoklavenversuch werden Zugprobekörper in einem Druckbehälter einer erhöhten Temperatur und einem hohen Sauerstoffdruck ausgesetzt. Dadurch wird die unter Anwendungsbedingungen allmählich stattfindende Oxidation stark beschleunigt und es kann mit vertretbaren Versuchsdauern eine Aussage über die Qualität der Materialstabilisierung getroffen werden.

Der Versuch findet in Anlehnung an DIN EN ISO 13438 (Methode C) statt. Diese Norm bezieht sich auf Geotextilien. Durch die ähnlichen Umgebungsbedingungen im Einsatz ist die Norm jedoch gut auf Rohrmaterialien übertragbar. Die Probekörper wurden bei 80 °C und einem absoluten Sauerstoffdruck von 51 bar (50 bar Sauerstoff-Überdruck) in einer 0,01 molaren NaHCO₃-Lösung eingelagert. Der pH-Wert der Lösung wurde mit 1 mol/l NaOH auf pH = 10 eingestellt. Das Gasvolumen im verschlossenen Hochdruck-Autoklav betrug ca. 20 % des Flüssigkeitsvolumens (siehe Abbildung 14). Um bei Versuchsbeginn einen konstanten Sauerstoffdruck zu gewährleisten, wurde dieser bereits 24 h vor dem Einlagern der Messproben eingestellt. Nach definierten Zeitintervallen wurden jeweils 2 bis 5 Zugprüfstäbe (Typ 2) nach DIN EN ISO 6259-3 entnommen und nach 24stündiger Konditionierung bei Normalklima Zugprüfungen in Anlehnung an DIN EN ISO 6259-3 durchgeführt. Daneben wurden auch Kontrollproben bezüglich ihrer Zugeigenschaften geprüft, die für 24 h einer Wärmebehandlung von 80 °C unterzogen wurden. Die Ergebnisse der Zugversuche an den Kontrollproben dienen als Referenzwerte (Ausgangswerte = 100 %) für die im HPAT beanspruchten Proben. Außerdem wurde während des Versuchs der Sauerstoffdruckverlauf kontinuierlich aufgezeichnet.

Als Kriterium zur Auswertung der thermo-oxidativen Lebensdauer im HPAT bieten sich verschiedene Kenngrößen an: Eine Restfestigkeit von 50 %, eine Rest-Bruchdehnung von 50 % (jeweils bezogen auf den Ausgangswert = 100 %) oder der Beginn des Sauerstoffdruckabfalls, bedingt durch den Verbrauch an Sauerstoffmolekülen durch die Oxidation des Polymers. Der Verbrauch an Sauerstoff tritt auf, wenn das Polymer oxidiert wird und er ist ein guter Indikator für einen oxidativen Abbau. Im Rahmen dieser Studie wurden alle drei Versagenskriterien berücksichtigt, um eine möglichst breitgefächerte Auswertung vornehmen zu können.

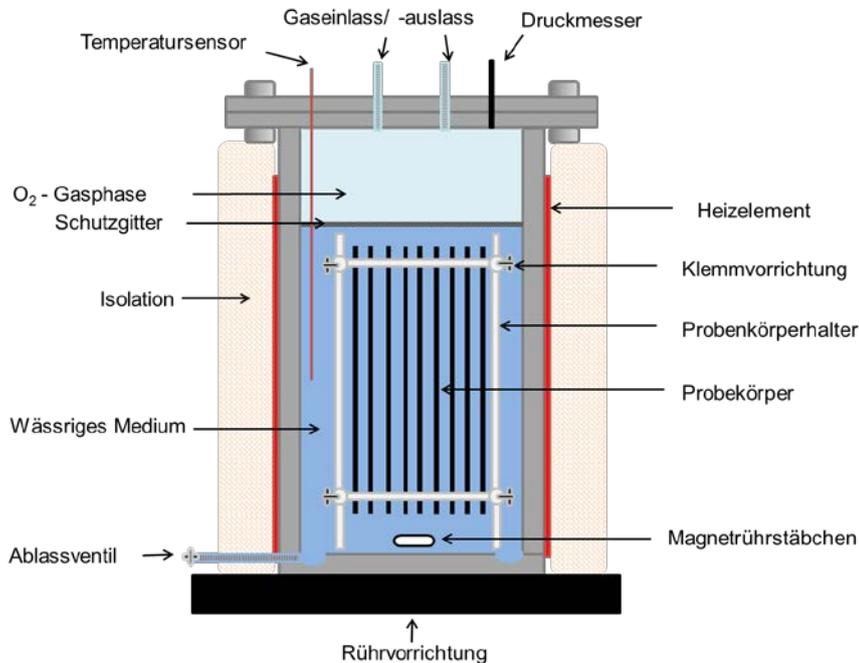


Abbildung 14: Schematischer Aufbau eines Hochdruck-Autoklaven

Neben der Prüfbedingung 80 °C / 51 bar wurde das Material Z zusätzlich bei folgenden Druck- und Temperaturpaaren untersucht und eine Extrapolation auf Anwendungsbedingungen durchgeführt:

Druckvariation: 80 °C / 11 bar, 80 °C / 4 bar, 80 °C / 1,9 bar

Temperaturvariation: 70 °C / 51 bar, 60 °C / 51 bar

Mittels Arrhenius-typischer Auftragung der logarithmierten Versagenszeiten über der inversen absoluten Temperatur lässt sich eine Extrapolation der Versagenszeiten auf Anwendungstemperatur (und Prüfdruck von 51 bar) durchführen. Die Extrapolation auf Anwendungs-Sauerstoff-Partialdruck und Prüftemperatur (80 °C) erfolgte mittels doppellogarithmischer Darstellung der Versagenszeiten über dem Druck. Für die Extrapolation auf Anwendungsdruck (ca. 0,21 bar) und Anwendungstemperatur (ca. 40 °C) ist eine „3D-Extrapolation“ notwendig.

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Bruchdehnung) erfolgte im Zugversuch nach DIN EN ISO 6259-3. Die Zugprüfungen wurden im Normalklima 23/50 der Klasse 1 nach DIN EN ISO 291 nach mindestens 24 h Lagerung in diesem Klima durchgeführt. Geprüft wurde an einer Universalprüfmaschine der Fa. Zwick mit Probekörpertyp 2, einer Einspannlänge von 80 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 25 mm/min.

6.4 Zeitstand-Innendruckversuch

Die Norm DIN EN ISO 9080 beschreibt ein Verfahren für die Ermittlung der Zeitstand-Innendruckfestigkeit von thermoplastischen Werkstoffen durch statistische Extrapolation. Die Prüfungen selbst werden nach DIN EN ISO 1167-1 und DIN EN ISO 1167-2 durchgeführt. Sie erfolgen an Rohren bzw. rohrförmigen Probekörpern. Das Grundprinzip ist, dass Probekörper mit Wasser gefüllt und in ein auf Prüftemperatur temperiertes Wasserbecken bzw. einen Wärmeschrank eingelegt werden. Dann werden sie an eine Druckstation angeschlossen und so lange mit konstantem hydrostatischen Innendruck beaufschlagt, bis sie zu Bruch gehen. Die Zeitdauer bis zum Bruch der Probekörper („Standzeit“) wird aufgezeichnet. Je niedriger die Temperatur bzw. der Druck ist, desto länger sind die Standzeiten. Die Prüftemperatur, der Prüfdruck und die Standzeit sowie die Bruchart (duktil oder spröd) werden für die Auswertung nach DIN EN ISO 9080 herangezogen.

7 Versuchsergebnisse

7.1 Grundlegende Untersuchungen an Materialproben

7.1.1 Ergebnisse der FEM Berechnungen

Als Grundlagen wurden Deponierohre SDR 11 und SDR 7,3 für die beiden beschriebenen Einbauarten berechnet. Als Ergebnisse der Berechnungen werden die Spannungen, die bei der maximal zulässigen Verformung (Vertikalverformung $\delta \leq 6 \%$) auftreten, angegeben. Aufgelistet sind die Ergebnisse für verschiedene Kriechmodule, die von der Last, der Temperatur, der Beanspruchungsdauer und dem Werkstoff abhängig sind (vgl. DVS-Kurven in den Abbildung 31 bis Abbildung 33, Anhang).

Der Kriechmodul $E = 100 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich beispielsweise bei einem „üblichen“ PE-Material in einer Hausmülldeponie mit Sickerwassertemperaturen bis $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Der Kriechmodul $E = 160 \text{ N/mm}^2$ bei einem „üblichen“ PE-Material wird in einer Inertstoffdeponie mit Sickerwassertemperaturen bis $20 \text{ }^\circ\text{C}$ erhalten.

Bei einem PE 100 Material ergibt sich der Kriechmodul $E = 200 \text{ N/mm}^2$ in einer Inertstoffdeponie mit Sickerwassertemperaturen bis $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die genannten Kriechmodule können sich aber auch aus anderen Temperatur-, Werkstoff-, Dauer- und Lastkombinationen ergeben. Als Berechnungsergebnisse werden jeweils die Flächenlasten, bei denen die zulässige Verformung nicht überschritten wird, die dazugehörigen maximalen Vergleichsspannungen (von Mises-Spannungen) sowie die maximalen Zug- und Druckspannungen angegeben.

7.1.1.1 Tabellarische Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für die allgemeinen Berechnungen

In den folgenden Tabellen (Tabelle 8 bis Tabelle 11) sind die Flächenlasten und die Spannungen angegeben, bei denen die nach ATV A 127 zulässige maximale Verformung nicht überschritten wird.

Tabelle 8: Tonaufleger SDR 7,3 DA 355

Kriech- modul / N/mm ²	Flächenlast / kN/m ²	Vertikal- verformung / %	Vergleichs- spannung / N/mm ²	Zug- spannung / N/mm ²	Druck- spannung / N/mm ²
100	500	5,2	3,84	1,18	-3,69
160	600	5,2	5,67	2,30	-5,65
200	700	5,6	7,30	3,35	-7,30

Tabelle 9: Tonaufleger SDR 11 DA 355

Kriech- modul / N/mm ²	Flächenlast / kN/m ²	Vertikal- verformung / %	Vergleichs- spannung / N/mm ²	Zug- spannung / N/mm ²	Druck- spannung / N/mm ²
100	400	5,26	2,99	0,71	-3,18
160	500	5,79	4,90	1,99	-5,33
200	500	5,43	5,45	2,53	-5,87

Tabelle 10: Auflager nach DIN 19667 SDR 7,3 DA 355

Kriech- modul / N/mm ²	Flächenlast / kN/m ²	Vertikal- verformung / %	Vergleichs- spannung / N/mm ²	Zug- spannung / N/mm ²	Druck- spannung / N/mm ²
100	700	6,05	4,08	0,91	-4,25
160	800	6,07	6,25	2,08	-6,53
200	800	5,60	7,06	2,66	-7,06

Tabelle 11: Auflager nach DIN 19667 SDR 11 DA 355

Kriech- modul / N/mm ²	Flächenlast / kN/m ²	Vertikal- verformung / %	Vergleichs- spannung / N/mm ²	Zug- spannung / N/mm ²	Druck- spannung / N/mm ²
100	600	5,67	3,12	0,53	-3,16
160	700	6,07	4,97	0,71	-5,05
200	700	5,81	5,67	0,76	-5,79

Für die Entstehung von Spannungsrissen sind Zugspannungen notwendig, unter Druckspannungen kommt es zu keinem Spannungsrissversagen. Druckspannungen sind für Spannungs- und Stabilitätsnachweise von Bedeutung und daher im Zusammenhang mit den Zielen dieses Forschungsvorhabens nicht maßgebend. Wie in obigen Tabellen zu sehen ist, liegen die Zugspannungen bei einem SDR 7,3 Rohr mit DA 355 und einem Kriechmodul von 200 N/mm² mit 3,35 N/mm² am höchsten. Bei Verwendung eines SDR 11 Rohres mit Außendurchmesser DA 355 werden beim Tonaufleger Zugspannungen von maximal 2,5 N/mm² (bei einem Kriechmodul von 200 N/mm²) auftreten.

Besteht die Auflagerung aus einem Auflagermaterial gemäß DIN 19667: 1991, so sind die Zugspannungen kleiner als bei Rohren mit Tonaufleger. Sie betragen beispielsweise bei einem Kriechmodul von 200 N/mm² bei dem SDR 7,3 DA 355 Rohr 2,7 N/mm². In einem SDR 11 Rohr treten bei dieser Auflagerung Zugspannungen von < 1 N/mm² auf.

7.1.1.2 Berechnungen für die Deponie Z

Eingebaut sind Rohre aus PE 80 Material. Messungen der Temperatur liegen im Mittel bei ca. 48° C (angesetzt auf Grund der Datenlage wurde das arithmetische Mittel)⁷. Die Überdeckung betrug bis 25 m mit Haus- und Gewerbemüll ($\gamma = 12 - 20$ kN/m³ im Mittel), d.h. maximale Auflast ca. 400 kN/m² (entspricht Lastfaktor 0,2). Die Rohre der Deponie Z sind mit den Berechnungen der Rohre SDR 11 im Tonaufleger entsprechend Abschnitt 7.1.1.1 erfasst. Abweichend ist jedoch keine Perforation vorhanden, so dass das Modell ohne die Abminderung für die Perforation berechnet wird.

Der Kriechmodul beträgt ca. 100 N/mm². Es ergibt sich eine Verformung unter 400 kN/m² Auflast von: $\delta = 15,7$ mm. Dies entspricht 4,9 % des mittleren Durchmessers. Die Vergleichsspannung im Rohr beträgt 2,9 N/mm². Die maximalen Spannungen im Rohr betragen 2,9 N/mm² (Druck -2,9 N/mm² / Zug +0,4 N/mm²)

Tabelle 12: Deponie Z

Kriechmodul / N/mm ²	Flächenlast / kN/m ²	Vertikalverformung / %	Vergleichsspannung / N/mm ²	Zugspannung / N/mm ²	Druckspannung / N/mm ²
100	400	4,90	2,90	0,40	-2,90

7.1.1.3 Berechnungen für die Deponie Y

Durchgeführte Temperaturmessungen ergaben Sickerwasser-temperaturen im Bereich von 20° C. Die Auflast beträgt maximal ca. 35 m. Die Deponie ist eine ehemalige Hausmülldeponie. Gemäß Bohrungen während Baumaßnahmen stehen schichtenweise außer Hausmüll auch bindige Böden an.

Die Wichten liegen daher zwischen $\gamma = (12 - 20)$ kN/m³. Im Mittel wird, da deutlich mehr Hausmüll ansteht, ca. 15 kN/m³, d. h. Auflast ca. 525 kN/m² (entsprechend Lastfaktor 0,2625), angenommen.

⁷ Hinweis: Das arithmetische Mittel berücksichtigt keine Schadensakkumulationen.

Das eingebaute Rohr ist ein mit Löchern perforiertes PE Rohr SDR 17 mit DA 225 und Wandstärke s 12,8 mm.

Das PE-Material ist nicht bekannt.

Der Kriechmodul wird mit $E_c = 150 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Die maximale rechnerische Spannung (Vergleichsspannung) für $E_c = 150 \text{ N/mm}^2$ beträgt $5,25 \text{ N/mm}^2$. Die Verformung ergibt sich zu 14,9 mm. Das entspricht 7,02 % und ist somit größer als 6 %. Es treten lediglich geringe Zugspannungen von $0,3 \text{ N/mm}^2$ auf.

Tabelle 13: Deponie Y

Kriechmodul / N/mm ²	Flächenlast / kN/m ²	Vertikalverformung / %	Vergleichsspannung / N/mm ²	Zugspannung / N/mm ²	Druckspannung / N/mm ²
150	525	7,02	5,25	0,30	-4,60

Die Berechnungen ergeben, dass die Rohre für diese Einwirkungshöhe nicht eingesetzt werden durften (Vertikalverformung > 6 %).

7.1.1.4 Berechnungen für die Deponie X (Schacht)

Der Schacht der Deponie X wird für eine maximale Einbautiefe von 25 m berechnet. Als Bettung wird Styropor angesetzt. Zusätzlich erfolgt eine Berechnung ohne den Ansatz der Lastabminderung durch Styropor. Für den anstehenden Boden hinter der Schachteinbettung wird Hausmüll angenommen. Das verwendete PE-Material ist nicht bekannt. Sein Kriechmodul beträgt gemäß der dazugehörigen statischen Berechnung langfristig 180 N/mm^2 . Dieser Wert wird für Temperatur- und Medieneinfluss abgemindert angesetzt [Deg95].

Tabelle 14: Schacht Deponie X

Kriechmodul / N/mm ²	Flächenlast / kN/m ²	Verformung / %	Vergleichsspannung / N/mm ²	Zugspannung / N/mm ²	Druckspannung / N/mm ²
137,5	100	8,6	3,56	Querschnitt überdrückt	-3,56

Die Berechnungen ergeben, dass der Querschnitt des Schachtes überdrückt wird, d. h. es treten keine Zugspannungen auf.

7.1.2 Spannungsrisssbeständigkeit

An den Materialproben X, Y und Z wurden im Anlieferungszustand FNCT und SHT zur Charakterisierung der Spannungsrisssbeständigkeit vorgenommen. Die Materialien A, B und C wurden bereits im Rahmen der Vorstudie hinsichtlich ihres Spannungsrisssverhaltens untersucht, beziehungsweise die Herstellerangaben (FNCT-Wert) von Material D und E verwendet.

Die FNCT-Standzeiten der ausgebauten, in der Deponie bereits gealterten Materialien X, Y und Z liegen zwischen 10 h und 60 h (Tabelle 15). Das Neurohr „Material R“ weist mit 4 h eine kurze Standzeit auf. Das Ergebnis entspricht jedoch den Erwartungen an dieses PE HD. PE-Werkstoffe nachfolgender Generationen (PE 80, PE 100 und PE 100-RC) sind deutlich beständiger gegenüber Spannungsrisen (vgl. Tabelle 1 und Abbildung 1, Seite 9).

Tabelle 15: Ergebnisse der Full Notch Creep Tests und der Strain Hardening Tests

Material	$t_{\text{FNCT}} / \text{h}$	Verstreckmodul / MPa
X	$10 \pm 5,7$	$16,7 \pm 0,2$
Y	$60 \pm 8,3$	$24,4 \pm 0,4$
Z	$18 \pm 1,0$	$20,3 \pm 0,6$
R	$4 \pm 0,5$	$20,1 \pm 0,5$

Der Verstreckmodul (Strain Hardening Modul) korreliert gut mit den FNCT-Standzeiten (Abbildung 15). Zur besseren Einordnung sind die Ergebnisse der Materialproben aus der Vorstudie inklusive zweier Neurohre aus PE 80 (Mat. D) bzw. PE 100 (Mat. E) in der Abbildung 15 mit dargestellt. Die Untersuchungen bestätigen damit die in [HDM+10] gefundene Korrelation (Abbildung 13).

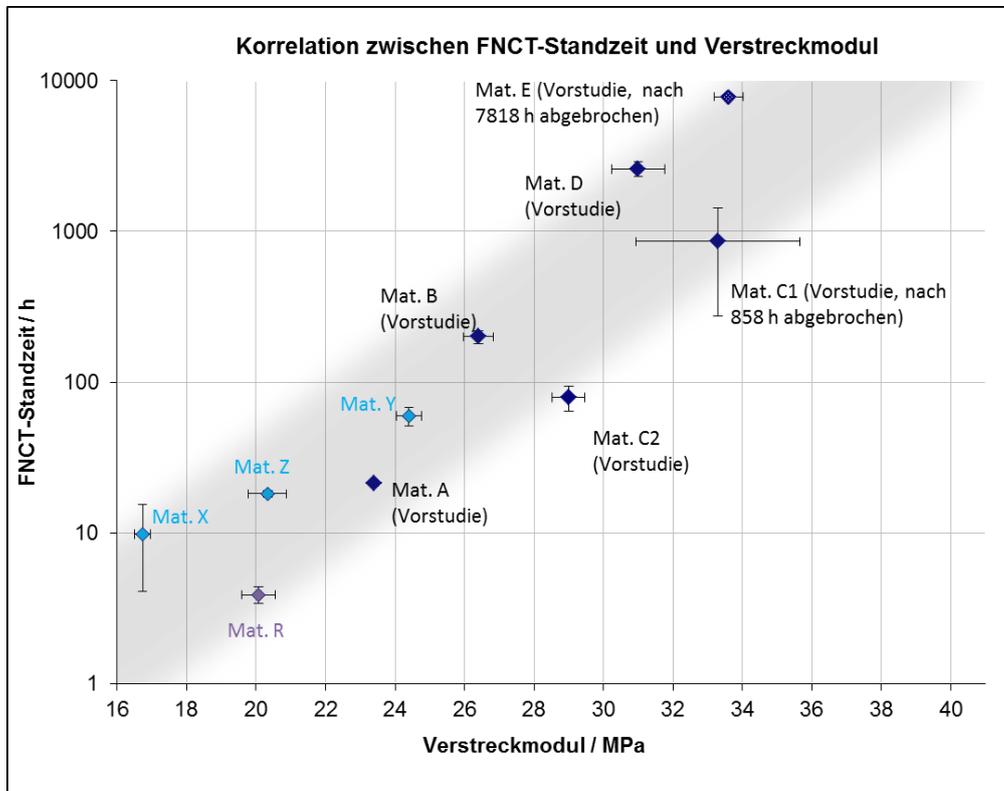


Abbildung 15: Korrelation von FNCT-Standzeiten und Verstreckmodul im SHT

Welche Belastungen halten die Rohre hinsichtlich ihrer Spannungsrisssbeständigkeit für 100 Jahre aus? Zur Berechnung der in den Rohren zulässigen Vergleichs-Spannungen wurden die Daten des Referenzrohres (Mat. R, PE HD-Neurohr) ausgewertet. An dem Neurohr wurde neben FNCT und SHT auch Zeitstandinnendruckversuche (ZIV) bei verschiedenen Temperaturen und Drücken durchgeführt. Die Zeitstandkurven sind in Abbildung 16 zusammen mit den Mindestzeitstandkurven (Referenzkennlinien) der DIN 8075:1987 gezeigt. Alle Versagenszeiten der bis zu einem Jahr dauernden Prüfungen liegen über den Referenzkennlinien der Norm. Aus der oben genannten Gleichung (2) von FNCT-Standzeit und 2. Phase des Zeitstanddiagramms wurden unter Variation der Last und Temperatur die Nutzungsdauern der anderen Proben abgeschätzt.

Die Zeitstandkurven basieren auf konstanten Prüfbedingungen (konstante Temperatur und konstante Last (Innendruck) über die gesamte Prüfdauer). In der Deponie wird jedoch während der Verfüll- und Aufbauphase die Last schrittweise ansteigen. Die Temperatur in der Deponie ist ebenfalls nicht konstant, sondern verringert sich üblicher Weise im Lauf der Zeit. Da die maximale Last und die maximale Temperatur angesetzt wird, kann die Nutzungsdauerabschätzung für die Deponierohre als konservativ betrachtet werden.

Die berechneten Mindestnutzungsdauern der Deponierohre sind in Kapitel 7.1.4 unter Berücksichtigung verschiedener Einbaubedingungen, Rohrdimensionen und Materialqualitäten dargestellt.

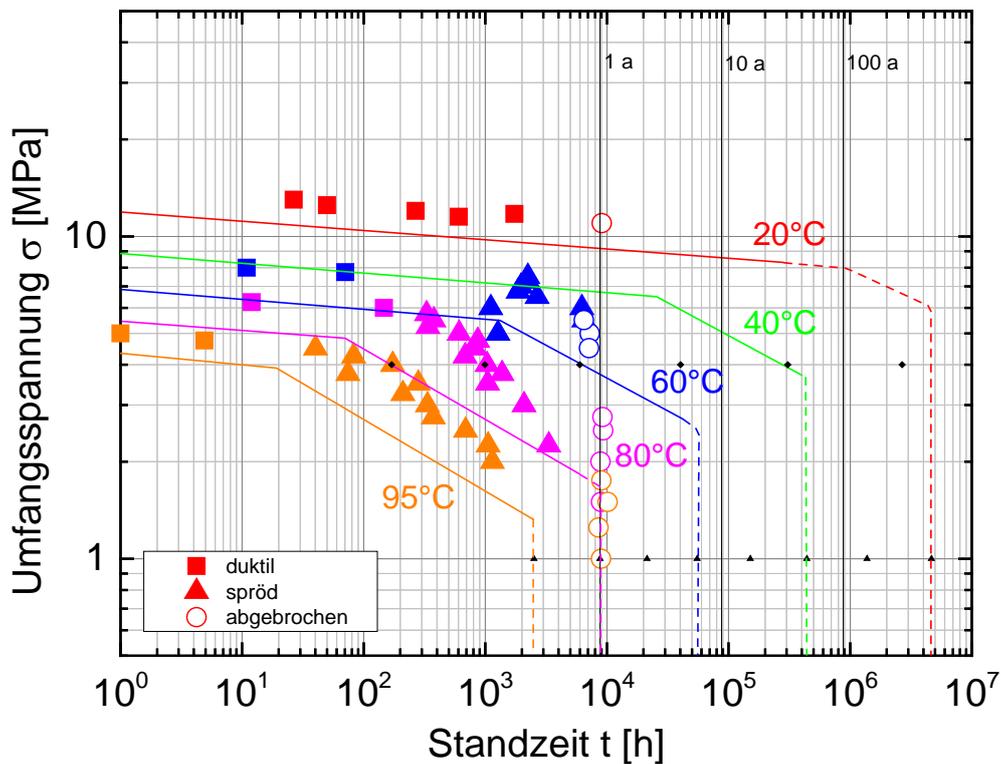


Abbildung 16: Diagramm der Zeitstandinnendruckversuche an Material R und Mindestzeitstandkurven aus der DIN 8075 : 1987-05

Eine im Jahr 2012 vom Umweltministerium Baden-Württemberg in Auftrag gegebene Studie „Standzeitprognose von Sickerwasserleitungen aus PE“ behandelt die Ursachen von Rissen in den Sickerwasserleitungen der Deponie Burghof. Das im Jahr 1987 eingebaute Rohr zeigte im Jahr 2012 FNCT-Standzeiten von max. 26 h und liegt damit in der Größenordnung der in dieser Studie untersuchten Materialproben. Das Rohr entsprach zwar dem damaligen Stand der Technik, war aber unter den heutigen Gesichtspunkten nicht für eine Langzeitanwendung gegen Spannungsrissversagen ausgelegt. Die aktuellen Anforderungen an die FNCT-Standzeit liegen mit > 300h für Standardeinbaubedingungen und 1.600 h bei erhöhten Anforderungen (DIN 4266-1 : 2011-11) deutlich höher (vgl. Abbildung 1 und Tabelle 1).

7.1.3 Thermo-oxidative Beständigkeit

Als Maß für die thermo-oxidative Beständigkeit wird seit Jahrzehnten als Standardverfahren die Bestimmung der Oxidations-Induktionszeit (OIT) praktiziert (s.a. Kapitel 6.3.1). Sie beschreibt die Zeitdauer, über die das Polymer bei Messtemperatur noch durch die Antioxidantien vor oxidativem Abbau geschützt ist. Inwiefern das Polymer selbst oxidiert wird, nachdem der Stabilisator komplett verbraucht und der OIT-Wert gegen null gegangen ist, kann im Hochdruck-Autoklavenversuch gezeigt werden.

In Tabelle 16 sind bezüglich des HPAT die Versagenszeiten basierend auf verschiedenen Auswertekriterien dargestellt. Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen beispielhaft die Auswertung der Versagenszeit im HPAT auf Basis der Kriterien Sauerstoffdruckabfall bzw. 50 % Rest-Bruchspannung und 50 % Rest-Bruchdehnung. Der Vorteil der Detektion über den Sauerstoffdruckabfall liegt darin, dass der Sauerstoffdruck kontinuierlich aufgezeichnet werden kann, wohingegen die Detektion der mechanischen Versprödung des Materials (über Rest-Bruchspannung bzw. Rest-Bruchdehnung) nur zu bestimmten Entnahmezeitpunkten möglich ist.

Der Sauerstoffdruckabfall wurde – abhängig vom Kurvenverlauf - unterschiedlich ausgewertet. Zum einen wurde der Onset des Sauerstoffdruckabfalls ermittelt. Hierfür wurde eine Tangente an den konstanten Druckverlauf und einer Tangente an die abfallende Flanke angelegt. Der Schnittpunkt ergibt den Onset⁸, der als Beginn des Druckabfalls definiert wird (vgl. Abbildung 17). Diese Methode wurde hauptsächlich bei den Materialien aus der Vorstudie und dem Referenzmaterial, sowie bei Z_2 und Rohr Y eingesetzt. Da es durch häufige Entnahmen (Ablassen des Drucks, Entnehmen eines Probekörpers und erneutes Aufbringen des Sauerstoffdrucks) zu Unstetigkeiten im Druckverlauf kommen kann, ist ein sinnvolles Anlegen der Tangenten nicht immer möglich. In solchen Fällen (wie bei Material A) wird als Ende der Prüfzeit ein Druckabfall um 1 %, d. h. um 0,51 bar bei einem Prüfdruck von 51 bar herangezogen. Bei den sehr kurzen Prüfzeiten von Material Z nahm der Sauerstoffdruck von Beginn an ab, sodass hier der Wendepunkt in der Kurve als Ende der Prüfzeit definiert wurde.

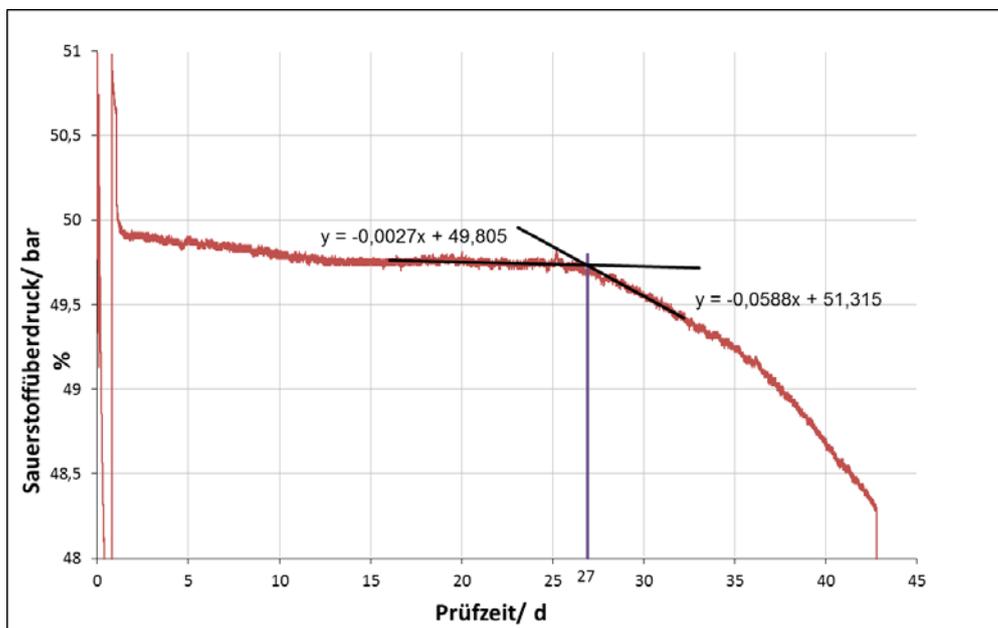


Abbildung 17: Sauerstoffdruckverlauf mit Tangenten zur Auswertung des Onsets des Druckabfalls während des HPAT bei 80 °C und 50 bar Sauerstoffüberdruck (51 bar absolutem Sauerstoffdruck), Material R

⁸ Einsetzen des Druckabfalls

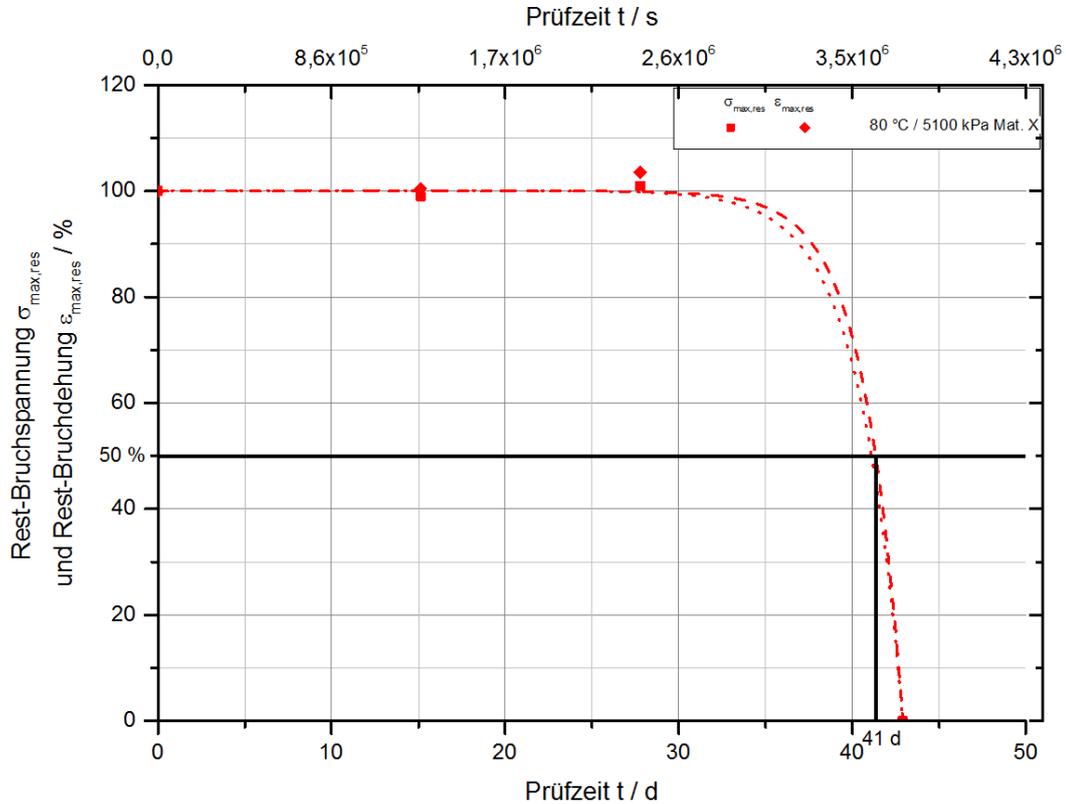


Abbildung 18: Material X, HPAT (80 °C, 51 bar absolutem Sauerstoffdruck), Abnahme der Rest-Bruchspannung und Rest-Bruchdehnung während der Prüfzeit

Tabelle 16: Versagenszeiten im Hochdruck-Autoklaven (bei 80 °C und 51 bar) sowie OIT_{200 °C} an Material X, Y, Z und dem Neurohr R, jeweils in der Rohrwandmitte und Sohle (außer Z_2: Scheitel)

Material	HPAT (80 °C, 51 bar) /d, basierend auf			OIT _{200 °C} /min
	$\sigma_{\text{Bruch,res}} = 50 \%$	$\epsilon_{\text{Bruch,res}} = 50 \%$	O ₂ -Druckabfall	
X (Scheitel)	41	41	44 ^a	82,2 ± 0,9
Y (Scheitel)	45	36	35 ^b	54,7 ± 2,5
Z_1 (Scheitel)	4	3	2 ^c	127,3 ± 3,7
Z_2 (Scheitel)			28 ^d	49,7 ± 0,2
R			27 ^d	23,8 ± 1,0

^a Versagenszeit entspricht der Abnahme des Sauerstoffdrucks um 1 %

^b Versagenszeit über Tangentenverfahren ermittelt

^c Versagenszeit über Wendepunkt bestimmt

^d Versagenszeit im HPAT wurde nur über Sauerstoffdruckabfall ermittelt (Tangentenverfahren)

Die Ergebnisse aus den OIT-Messungen und HPAT sind in Abbildung 19 im Kontext mit den Materialien aus der Vorstudie dargestellt. Wie gezeigt, liefern die unterschiedlichen Versagenskriterien – 50 % Restbruchdehnung, 50 % Restfestigkeit und Sauerstoffdruckabfall - beim HPAT nahezu identische Versagenszeiten.

Im Autoklaven werden Versagenszeiten von über 25 d erreicht, mit Ausnahme der Probe Z_1 mit einer unerwartet kurzen Versagenszeit von ca. 3 d. Von der Deponie Z lagen mehrere Rohrabschnitte vor. Zur Überprüfung, ob ein anderer Abschnitt eine ebenso kurze Versagenszeit aufweist, wurde ein zweiter Abschnitt Z_2 vom Scheitel dem Autoklaventest unterzogen. Die Versagenszeit von Z_2 lag bei ca. 28 d. In der Hausmüll/Asche-Deponie Z wurden Temperaturen von deutlich über 50 °C (bis 60 °C) gemessen. Gegebenenfalls könnten diese sehr hohen Temperaturen lokal zu einer vorzeitigen Wärmealterung geführt haben. Dies müsste genauer untersucht werden. Demgegenüber steht, dass die OIT-Messungen am Rohrabschnitt Z_1 noch eine hohe Reststabilisierung nachweisen.

Eine Korrelation zwischen den OIT- und HPAT-Werten wird nicht beobachtet und erwartet: Der OIT-Wert stellt eine Größe für den Restgehalt an Stabilisator/Antioxidantien dar, während im Hochdruck-Autoklavenversuch die Degeneration des Polymers selbst durch Wärmealterung erfasst wird.

Die Referenzprobe R hat den kleinsten OIT-Wert mit 24 min während die Materialien X und Y, ähnlich wie die der Vorstudie, OIT-Werte von über 50 min aufweisen.

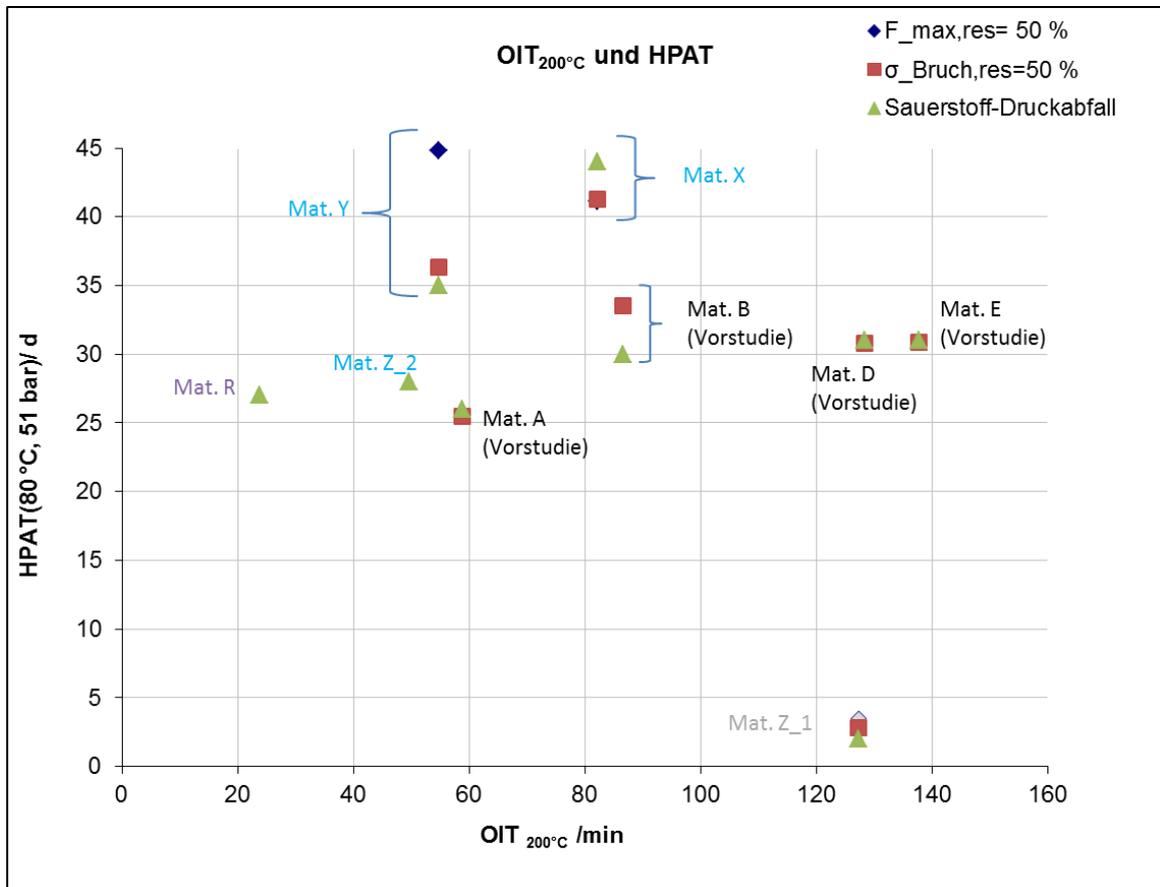


Abbildung 19: Auftragung der Versagenszeit im HPAT gegen den OIT_{200 °C} –Wert

In Tabelle 17 sind die OIT-Einzelmessungen von Rohr X, Y und Z mit Entnahmen jeweils in der Rohrwandmitte und der Innenwand zu sehen. Bei dem Schacht X und Rohr Z sind die Werte an der Innenwand zwar deutlich kleiner als in der Wandmitte, trotzdem ist noch ausreichend Reststabilisierung vorhanden. An der Innenwand von Rohr Y wurden Messwerte von über 70 Minuten bis von nur wenigen Minuten gefunden. Hier liegt die Vermutung nahe, dass das Material an der Innenseite sehr inhomogen ist und stellenweise der Stabilisator bereits oxidiert oder ausgewaschen wurde.

Tabelle 17: OIT-Einzelmessungen / min in Abhängigkeit von der Entnahmeposition:

Material	OIT _{200 °C} Einzelwerte / min	
	Wandmitte	Innenwand
X	82,2 / 83,5	21,3 / 43,1
Y	52,9 / 56,4	14,2 / 72,9 / 9,9 / 2,1
Z	124,7 / 129,9	60,8

In Abbildung 20 ist für Material Z_1 ein Tiefenprofil der OIT-Werte gezeigt: An der Innenwand des Rohres treten geringere OIT-Werte als in der Rohrwandmitte oder der Außenwand auf. Bei einem Abstand von wenigen Millimetern zur Rohrwand werden wieder OIT-Werte auf dem Niveau der Rohrwandmitte gemessen. Mit einem OIT-Wert von OIT_{200 °C} = 60 min liegt dennoch ein hoher OIT-Wert an der Rohrwand vor.

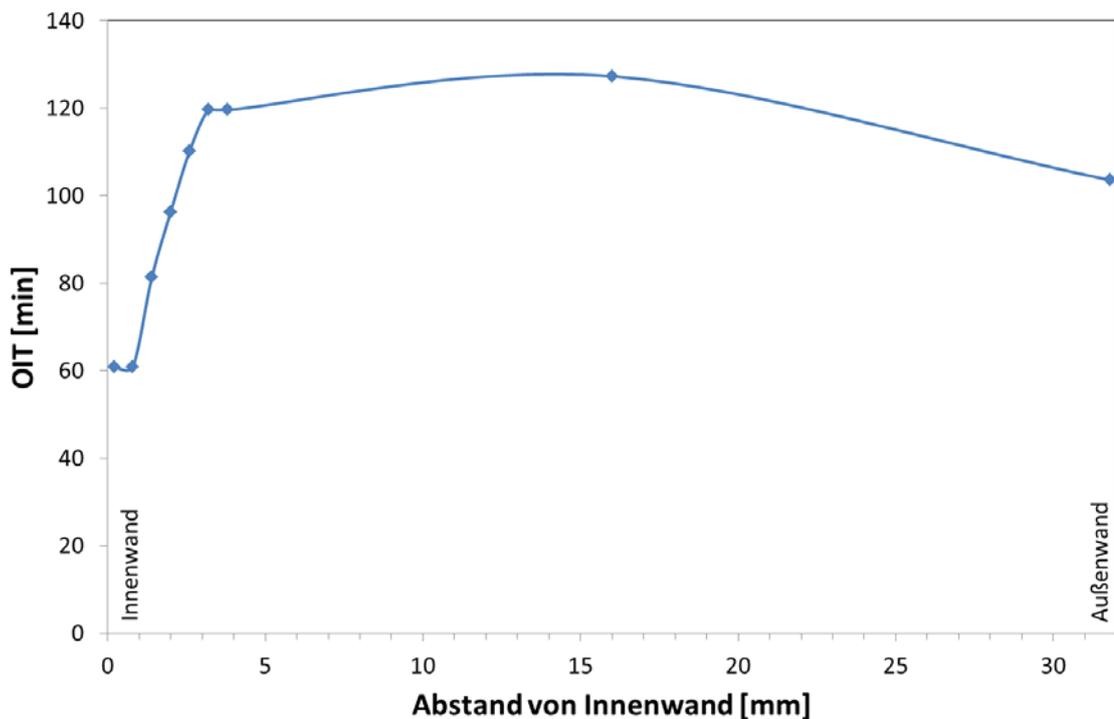


Abbildung 20: OIT-Verlauf über Wanddicke für Material Z_1

Zur Berechnung der Mindestnutzungsdauer bezüglich thermo-oxidativem Versagen wurden die Zeitstandkurven des Referenzrohres R hinzugezogen und gemäß Gleichung (3) Korrelationen zwischen der Mindestlage des 3. Versagensastes im Zeitstandinnendruckdiagramm (kein thermo-oxidatives Versagen nach 1 Jahr bei 95 °C für Umfangsspannungen < 2 MPa, Abbildung 16) und der Versagenszeit im HPAT hergestellt. Über die Aktivierungsenergie für thermo-oxidatives Versagen von ca. 90 kJ/mol [Vog10] kann so die thermo-oxidative Mindestnutzungsdauer der Deponierohre bei unterschiedlichen Temperaturen berechnet werden. Die Berechnungsergebnisse sind in Kapitel 7.1.4.2 dargestellt. Bei den Labortests im Hochdruck-Autoklaven liegt eine konstante Temperatur über die gesamte Prüfdauer vor, in der Deponie jedoch ändert sich die Temperatur mit dem Lebenszyklus. Daher kann die maximale Temperatur in der Deponie für eine konservative Nutzungsdauerabschätzung angenommen werden.

7.1.4 Abschätzung der Nutzungsdauer

Der Lebensdauernachweis ist für die Versagensmechanismen Spannungsrissversagen und thermo-oxidatives Versagen separat zu führen.

7.1.4.1 Spannungsrissversagen

Als Basis für die folgend dargestellten abgeschätzten Nutzungsdauern bezüglich Spannungsrissversagen wurden die Referenzkennlinien der Zeitstandinnendruckfestigkeit (Mindestkurven der DIN 8075) zugrunde gelegt. Die Nutzungsdauern wurden über Gleichung (1) mit den in der DIN 8075 : 1999 angegebenen Koeffizienten A, C, D berechnet. Die Koeffizienten für die Lebensdauer von PE HD wurden über einen Kurvenfit der Mindestkurven aus DIN 8075 : 1987 generiert, da die Koeffizienten für PE HD nicht explizit angegeben sind.

Die in Zeitstandinnendruckversuchen resultierende Vergleichsspannung σ_V oder Umfangsspannung σ_U ergibt sich aus dem Innendruck p (in N/mm²)⁹, dem mittleren Rohrdurchmesser d_m und der Wanddicke s nach der sogenannten Kesselformel (Gleichung (5)). Die Spannung in Umfangsrichtung ist doppelt so groß wie die Spannung in Axialrichtung. Die Vergleichsspannung entspricht daher näherungsweise der Spannung in Umfangsrichtung an der Rohrinnenfläche (Normalspannungshypothese).

⁹ 1 bar = 0,1 MPa = 0,1 N/mm²

$$\sigma_V = \sigma_U = \frac{p \cdot d_m}{2 \cdot s} = \frac{p \cdot (d_a - s)}{2 \cdot s} \leq \sigma_{zul} \quad (5)$$

Die genaue Kenntnis der für den jeweiligen Rohrwerkstoff zulässigen Spannung σ_{zul} bildet unter Verwendung der obigen Kesselformel die Grundlage für die Rohrdimensionierung bei gegebenem Innendruck. Die zum Bruch führende Spannung ist werkstoffspezifisch und hängt bei Kunststoffen von der Beanspruchungsdauer sowie der Temperatur (und dem jeweiligen Medium, beim Zeitstandinnendruckversuch: Wasser) ab.

Die berechneten Mindestnutzungsdauern sind für die versch. PE-Qualitäten (PE HD, PE 80 und PE 100) für verschiedene Umfangsspannungen und Temperaturen in Tabelle 18 dargestellt. Eine rote Hervorhebung steht für eine abgeschätzte Mindestnutzungsdauer von unter 50 Jahren, eine grüne Hervorhebung für über 100 Jahren und orange für eine geschätzte Mindestnutzungsdauer zwischen 50 und 100 Jahren.

Tabelle 18: Nutzungsdauerabschätzung (Mindest-Nutzungsdauer in Jahren) auf Basis der Referenzkennlinien der Zeitstandinnendruckfestigkeit aus DIN 8075

Mindestanforderung PE HD (DIN 8075:1987)					Mindestanforderung PE 80 (DIN 8075:1999)					Mindestanforderung PE 100 (DIN 8075:1999)				
$\sigma_V /$ MPa	T / °C				$\sigma_V /$ MPa	T / °C				$\sigma_V /$ MPa	T / °C			
	20	30	40	50		20	30	40	50		20	30	40	50
1					1					1				
2				140	2				236	2				
3			143	19	3				61	3				329
4		297	34	4,6	4			175	24	4				90
5		99	11	1,5	5			84	11	5				33
6	400	40	4,7	0,6	6		386	46	6,1	6			121	14

Es wird ersichtlich, dass nur bei sehr hohen Zugspannungen und hohen Temperaturen die Nutzungsdauer von 100 oder 50 Jahren nicht erreicht werden.

Aufgrund der in Kapitel 7.1.1.1 berechneten maximalen Zugspannungen $< 3,5 \text{ N/mm}^2$ wird ein Nutzungsdauer von 100 Jahren für PE 100 und für PE 80 (das den Referenzkennlinien der DIN 8075 entspricht) bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht. In Deponien, in denen die eingesetzten PE Rohre lediglich den Mindestanforderungen an PE HD Rohre nach DIN 8075: 1987 entsprechen, sollte die Temperatur unterhalb von $40 \text{ }^\circ\text{C}$ liegen und die Zugspannungen unter 3 MPa . Nur so kann eine Nutzungsdauer von 100 Jahren erreicht werden. Druckspannungen können kein Spannungsrissversagen verursachen, für den Lebensdauernachweis bezüglich Spannungsrissversagen sind daher nur die Zugspannungen relevant.

Zu beachten ist, dass bei diesen Abschätzungen nur das potenzielle Spannungsrissversagen überprüft wird. Ein Nachweis gegen mögliches thermo-oxidatives Versagen ist gesondert zu führen (Kap.7.1.4.2).

Das Referenzmaterial R (PE HD) weist im Zeitstandinnendruckversuch bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Umfangsspannung von 4 MPa eine Standzeit von ca. 1.000 h auf und liegt damit deutlich oberhalb der Mindestkurve für PE HD nach DIN 8075: 1987 (Abbildung 16). Die für unterschiedliche Umfangsspannungen und Temperaturen berechneten Versagenszeiten sind in Tabelle 19 gezeigt. Das Material R hat einen FNCT-Standzeit von $3,9 \text{ h}$.

Tabelle 19: Nutzungsdauerabschätzung (Versagenszeit in Jahren) des Referenzmaterials R

σ_v / MPa	T / $^\circ\text{C}$			
	20	30	40	50
1				
2				
3				102
4			186	25
5			62	8,2
6		216	25	3,3

Über Gleichung (2) lässt sich über das Verhältnis der FNCT-Standzeiten die Lage des 2. Versagensastes im Zeitstanddiagramm auch für andere PE-Rohre abschätzen. Tabelle 20 zeigt die Nutzungsdauerabschätzung in Jahren für PE HD Rohre, PE 80 Rohre und PE 100 Rohre, die die Mindestanforderungen des DIBts bezüglich FNCT erfüllen (vgl. Abbildung 1 und Tabelle 1).

Tabelle 20: Nutzungsdauerabschätzung (in Jahren) von PE HD Rohren mit $t_{FNCT} > 20$ h, PE 80 Rohren mit $t_{FNCT} > 100$ h und PE 100 Rohren mit $t_{FNCT} > 300$ h

Mindestanforderung PE HD (DIBt) $t_{FNCT} > 20$ h					Mindestanforderung PE 80 (DIBt) $t_{FNCT} > 100$ h					Mindestanforderung PE 100 (DIBt) $t_{FNCT} > 300$ h				
σ_V / MPa	T / °C				σ_V / MPa	T / °C				σ_V / MPa	T / °C			
	20	30	40	50		20	30	40	50		20	30	40	50
1					1					1				
2					2					2				
3					3					3				
4				126	4					4				
5				42	5					5				
6			129	17	6				158	6				406

Die Zusatzanforderung an PE HD Rohre mit einer geforderten FNCT-Standzeit von > 20 h stellt eine deutliche Verschärfung gegenüber den PE HD Mindestkurven nach DIN 8075: 1987 dar (vgl. Tabelle 20 und Tabelle 18). Bei PE 80 Rohren mit $t_{FNCT} > 100$ h und PE 100 Rohren mit $t_{FNCT} > 300$ h wird die Anforderung an eine Nutzungsdauer von 100 Jahren hinsichtlich der Spannungsrißbeständigkeit auch bei hohen Spannungen und Temperaturen als unkritisch betrachtet.

Das in dieser Studie untersuchte und ausgebaute Deponierohr Y weist noch FNCT-Standzeiten von 60 h auf, Deponie Rohr Z noch 18 h, obwohl sie bereits viele Jahre lang betrieben wurden. Die abgeschätzten Restnutzungsdauern würden nahe an und über der von PE HD mit $t_{FNCT} > 20$ h, wie in Tabelle 20 dargestellt, liegen und wegen der berechneten maximalen Zugspannungen von < 1 MPa unkritisch sein.

Für Schächte kann keine allgemeine Einordnung in SDR oder andere Klassifizierungen erfolgen, da Wandaufbau und Wanddicken weit gestreut ausgeführt werden. Eine Möglichkeit, dennoch eine Nutzungsdauerabschätzung vorzunehmen, ist, die vor dem Schachtbau durchgeführten statischen Berechnungen einzusehen. Die darin hinterlegte maximale Zugspannung kann für die Mindestnutzungsdauerabschätzung gemäß Tabelle 20 herangezogen werden. Für Schacht X ergaben sich über die analytischen Berechnung lediglich Druckspannungen und keine Zugspannungen. Bezüglich Spannungsrißversagen bestünden also keinerlei Bedenken für Nutzungsdauern größer 100 Jahre. Am Schacht X trat ein – im Wesentlichen spannungsunabhängiges - Stabilitätsversagen auf, das sich in Form von Einbeulen äußerte.

7.1.4.2 Wärmealterung – thermo-oxidatives Versagen

Die Mindestkurven von PE 63, PE 80 und PE 100 in der DIN 8075 (Abbildung 28 und Abbildung 30, Anhang) weisen nach einem Jahr Prüfzeit bei 80 °C noch keinen Übergang in die dritte Phase (thermo-oxidatives Versagen) auf. Das heißt, dass mit dem Beginn der dritten Phase bei 80 °C frühestens nach 1 Jahr zu rechnen ist. Auf Basis der für PE als abgesichert anzunehmenden Aktivierungsenergie für thermo-oxidatives Versagen von 90 kJ/mol [Vog10] ergeben sich die in Tabelle 21 dargestellten Mindest-Nutzungsdauern bezüglich thermo-oxidativem Versagen für PE- Rohre.

Tabelle 21: Mindest-Nutzungsdauer (in Jahren) hinsichtlich der Wärmealterung von PE mit einer Standzeit im ZIV von mehr als 1 Jahr bei 80 °C

Temperatur / °C	20	30	40	50
Zeit / a		158	50	17

Die Wärmealterung kann bei PE HD mit einer der DIN 8075 entsprechenden Mindestqualität die Nutzungsdauer bei Deponien mit hohen Temperaturen von 40 °C und mehr einschränken.

Das Referenzrohr R zeigte im Zeitstandinnendruckversuch selbst nach einem Jahr bei 95 °C noch keinen Übergang in die dritte Phase. Daher kann die dritte Phase (thermo-oxidatives Versagen) frühestens nach einem Jahr bei 95 °C einsetzen. Mit diesem Ergebnis und der Aktivierungsenergie für PE von 90 kJ/mol [Vog10] werden die in Tabelle 22 dargestellten Mindestnutzungsdauerabschätzungen für das Rohr R erhalten. Das Referenzrohr R weist im HPAT eine Versagenszeit von 27 d auf, der OIT-Wert beträgt $OIT_{200^{\circ}C} = 23,8$ min.

Tabelle 22: Mindest-Nutzungsdauer (in Jahren) hinsichtlich der Wärmealterung in Abhängigkeit der Temperatur für des Referenzmaterials R (PE HD): ZIV > 1 Jahr bei 95 °C

Temperatur / °C	20	30	40	50
Zeit / a			176	60

Bei dem Referenzmaterial ist die Wärmealterung bei 40 °C Anwendungstemperatur noch unbedenklich. Steigt die Temperatur über längere Zeit über 50 °C könnte es u. U. bereits vor Ende der angestrebten 100 Jahre Nutzungsdauer zum thermo-oxidativen Versagen kommen.

Über Gleichung (3) lässt sich über das Verhältnis der HPAT-Zeiten die Mindestlage des 3. Versagensastes im Zeitstanddiagramm auch für andere PE-Rohre abschätzen.

Bei den ausgebauten untersuchten Rohren lag die HPAT Prüfzeit in der Größenordnung des Referenzrohrs, obwohl die Deponierohre bereits eine Nutzungsdauer von ca. 20 Jahren hinter sich gebracht hatten. Daher besteht für diese Rohre hinsichtlich Wärmealterung kein akuter Handlungsbedarf. Auch die OIT-Messungen zeigen, dass noch ausreichend Stabilisator vorhanden ist, welcher das Polymer vor thermo-oxidativem Abbau schützt.

Einzig das Rohr Z_1 wies eine unerwartet niedrige Versagenszeit von 3 d im HPAT (80 °C, 51 bar) auf. Die abgeschätzten Rest-Nutzungsdauern betragen bei 40 °C noch min. 20 Jahre bis Versagen aufgrund von Wärmealterung eintreten könnte (siehe Tabelle 23). Jedoch steht die kurze Versagenszeit im Hochdruck-Autoklaven im Widerspruch zu dem hohen OIT_{200 °C}-Wert von 127 min. Der hohe OIT-Wert würde auf eine gute Stabilisierung durch Antioxidantien schließen lassen. Normalerweise wäre davon auszugehen, dass zunächst diese Antioxidantien „verbraucht“ werden, bevor das Polymer selbst oxidativ angegriffen wird. Anhand des OIT-Wertes wäre eine längere Versagenszeit im HPAT erwartet worden.

Tabelle 23: Konservative Rest-Nutzungsdauerabschätzung für Material Z_1 basierend auf der HPAT-Messung bei 80 °C, 51 bar

Temperatur / °C	20	30	40	50
Zeit / a	215	64	20	7

Die HPAT-Prüfung eines anderen Rohrabschnitt „Z_2“ von der Deponie Z hingegen ergab eine Versagenszeit von 28 d. Die Nutzungsdauerabschätzung entspricht somit etwa der in Tabelle 22 dargestellten des Referenzmaterials. Darüber, woher diese Inhomogenität genau kommt, kann nur spekuliert werden. Fakt ist, dass die Temperaturbelastung in der Deponie Z mit gemessenen über 50 °C sehr hoch war. Eventuell könnten diese sehr hohen Temperaturen lokal zu einer Wärmealterung geführt haben.

Die Temperaturangaben in oben genannten Tabellen entsprechen einer angenommenen, langfristig wirkenden, konstanten Temperatur. In einer Deponie wird die Temperatur jedoch nicht konstant sein, sondern sich mit dem Lebenszyklus der Deponie ändern: Während der Einbauphase können hohe Temperaturen in der Deponie auftreten. Nach Abschluss des Abfalleinbaus kühlt die Deponie langsam ab. Die Dauer der Temperaturphasen – insbesondere im Bereich der Sickerwasserrohre - hängt von der Abfallart und -verteilung ab und kann nicht allgemeingültig angegeben werden. Für die Nutzungsdauerabschätzung wird daher die maximale Temperatur angenommen und somit eine konservative Nutzungsdauerabschätzung erhalten.

7.1.4.3 Ausweitung der Nutzungsdauerabschätzung auf verschiedene Einbausituationen

Den untenstehenden Tabellen (Tabelle 24 bis Tabelle 27) können in Abhängigkeit der verbauten Rohre, des Auflagers und der Deponieart die maximal zulässigen Auflasten entnommen werden, die hinsichtlich einer Nutzungsdauer von 100 Jahren hinsichtlich Spannungsrissversagen aufgebracht werden können.

Dieser Auswertung zugrunde gelegt wurden die in Tabelle 18 gezeigten Mindestnutzungsdauern. Unterschieden wurden:

- Hausmülldeponien mit PE Rohren ohne Spezifikation des verwendeten PE Materials einschließlich PE 80, für die chemische Angriffe aus Deponiegas und/oder Deponiesickerwasser sowie Temperatureinflüsse bis 40 °C angenommen werden können,
- Inertstoffdeponien mit PE Rohren ohne Spezifikation des verwendeten PE Materials einschließlich PE 80 mit Sickerwassertemperatur von ca. 20 °C,
- Inertstoffdeponien, in denen, bei einer Sickerwassertemperatur von ca. 20 °C PE 100 - Materialien als Rohrwerkstoffe eingesetzt wurden.

Tabelle 24: Maximal zulässige Auflasten eines SDR 11 Rohrs mit Tonaufleger in verschiedenen Einbausituationen hinsichtlich 100 Jahren Lebensdauer hinsichtlich Spannungsrisssversagen

SDR 11 Tonaufleger	Temperatur / °C	Last / kN/m²
Deponieart		
Hausmüll	40	400
Inertstoffe (PE HD, PE 80)	20	500
Inertstoffe (PE 100)	20	500

Tabelle 25: Maximal zulässige Auflasten eines SDR 11 Rohrs mit Auflager nach DIN 19667 in verschiedenen Einbausituationen hinsichtlich 100 Jahren Lebensdauer hinsichtlich Spannungsrisssversagen

SDR 11 DIN 19667	Temperatur / °C	Last / kN/m²
Deponieart		
Hausmüll	40	600
Inertstoffe (PE HD, PE 80)	20	700
Inertstoffe (PE 100)	20	700

Tabelle 26: Maximal zulässige Auflasten eines SDR 7,3 Rohrs mit Tonaufleger in verschiedenen Einbausituationen hinsichtlich 100 Jahren Lebensdauer hinsichtlich Spannungsrisssversagen

SDR 7,3 Tonaufleger	Temperatur / °C	Last / kN/m²
Deponieart		
Hausmüll	40	500
Inertstoffe (PE HD, PE 80)	20	600
Inertstoffe (PE 100)	20	700

Tabelle 27: Maximal zulässige Auflasten eines SDR 7,3 Rohrs Auflager nach DIN 19667 in verschiedenen Einbausituationen hinsichtlich 100 Jahren Lebensdauer hinsichtlich Spannungsrisssversagen

SDR 7,3 DIN 19667	Temperatur / °C	Last / kN/m²
Deponieart		
Hausmüll	40	700
Inertstoffe (PE HD, PE 80)	20	800
Inertstoffe (PE 100)	20	800

Für SDR 11 oder SDR 7,3 Rohre mit Auflagerung auf der Basisabdichtung (Tonaufleger) wird eine Nutzungsdauer von über 100 Jahren hinsichtlich Spannungsrissbeständigkeit erreicht, wenn bei Hausmüll- (40 °C) oder Inertstoffdeponien (20 °C) die Last kleiner als 400 kN/m² beträgt.

Für SDR 11 oder SDR 7,3 Rohre mit Auflager nach DIN 19667 wird eine Nutzungsdauer von über 100 Jahren hinsichtlich Spannungsrissbeständigkeit erreicht, wenn bei Hausmüll- (40 °C) oder Inertstoffdeponien (20 °C) die Last weniger als 600 kN/m² bzw. 700 kN/m² beträgt.

Auch diese Abschätzungen sind konservativ wegen der konstanten Prüfbedingungen (Temperatur und Last) über die gesamte Prüfdauer bei den Laborversuchen.

Wie unter Kap. 6.1.1 beschrieben kann die Auflast p_v mit Gleichung (4) berechnet werden. Für verschiedene Schichtungen p_v ergibt sich:

$$p_v = \gamma_{\text{Abfall1}} \cdot h_{\text{ü,Abfall1}} + \gamma_{\text{Abfall2}} \cdot h_{\text{ü,Abfall2}} + \gamma_{\text{OA}} \cdot h_{\text{ü,OA}} \quad (6)$$

Der Nachweis der Beständigkeit gegen Spannungsrissversagen des verwendeten PE Materials ersetzt nicht eine statische Berechnung. Eine fachgerechte Auflagerausbildung, die über die gesamte Rohrlänge konstant ist, wird vorausgesetzt.

Zusätzlich zu dem Nachweis gegen Spannungsrissversagen ist der Nachweis gegen thermo-oxidatives Versagen zu führen. Werden in Abhängigkeit der Deponieart für Inertstoffdeponien 20 °C und Hausmülldeponien 40 °C angesetzt, wird aus Tabelle 21 ersichtlich, dass eine Temperatur von 20 °C unbedenklich hinsichtlich Wärmealterung ist. Temperaturen größer 40 °C könnten jedoch zu einem vorzeitigem Versagen führen.

7.2 Erweiterte Untersuchungen an Material Z_1

7.2.1 Extrapolation des Spannungsrissversagens auf Basis von FNCT

In der vorliegenden Studie werden zur Bestimmung der Lage des 2. Versagensastes (Spannungsrissast) im Zeitstandinnendruck-Diagramm die FNCT-Werte der unterschiedlichen Deponierohre herangezogen. Durch Fleißner [Fle87, Fle98] wurde nachgewiesen, dass die Ergebnisse von FNCT-Versuchen mit Zeitstandinnendruckversuchen an Rohren korrelieren. Im Rahmen der erweiterten Untersuchungen soll zudem überprüft werden, ob die Versagenszeiten im FNCT-Versuch die gleichen Abhängigkeiten von den Prüfparametern Spannung und Temperatur zeigen wie die Versagenszeiten im Zeitstandinnendruckversuch.

An Material Z wurden deshalb neben der Standard-Prüfbedingung für den FNCT (4 MPa bei 80 °C in wässriger Netzmittellösung / 2 % Arkopal N100) Prüfungen bei weiteren Temperaturen und Spannungen durchgeführt. Wie im Zeitstand-Innendruckversuch bewirken auch im FNCT eine Erhöhung der Prüftemperatur und/oder der Prüfspannung eine Verkürzung der Versagenszeiten (Abbildung 21).

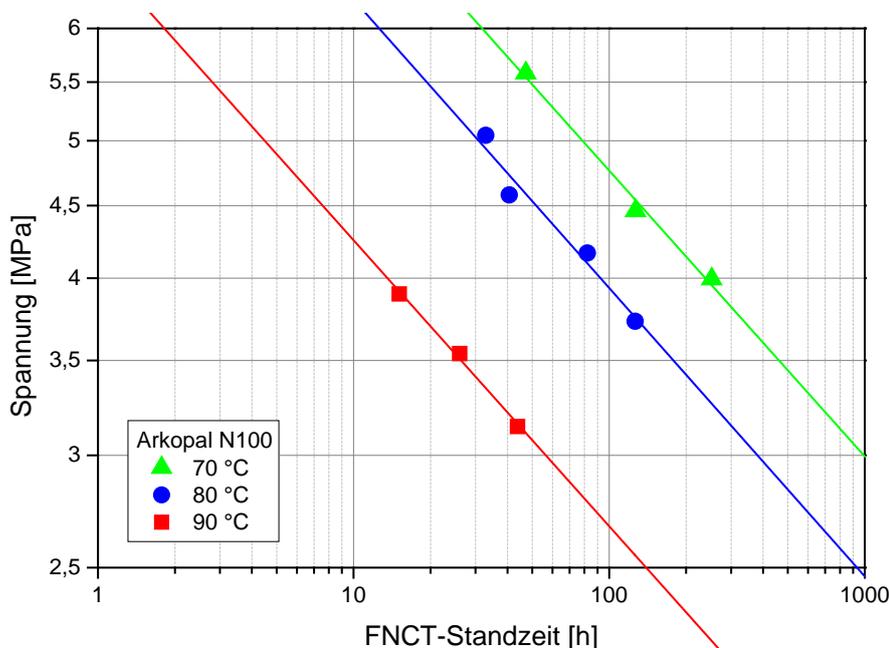


Abbildung 21: FNCT-Standzeiten für Material Z als Funktion der Prüfspannung und Prüftemperatur

Die Steigung der Versagensäste ist dabei für unterschiedliche Temperaturen näherungsweise parallel und entspricht auch der Steigung der Zeitstand-Mindestkurven für PE HD aus DIN 8075:1987 (Abbildung 27).

Die Aktivierungsenergie für den 2. Versagensast für die Zeitstand-Mindestkurven beträgt ca. 170 kJ/mol. Die aus den FNCT-Messungen an Material Z ermittelte Aktivierungsenergie beträgt ca. 150 kJ/mol.

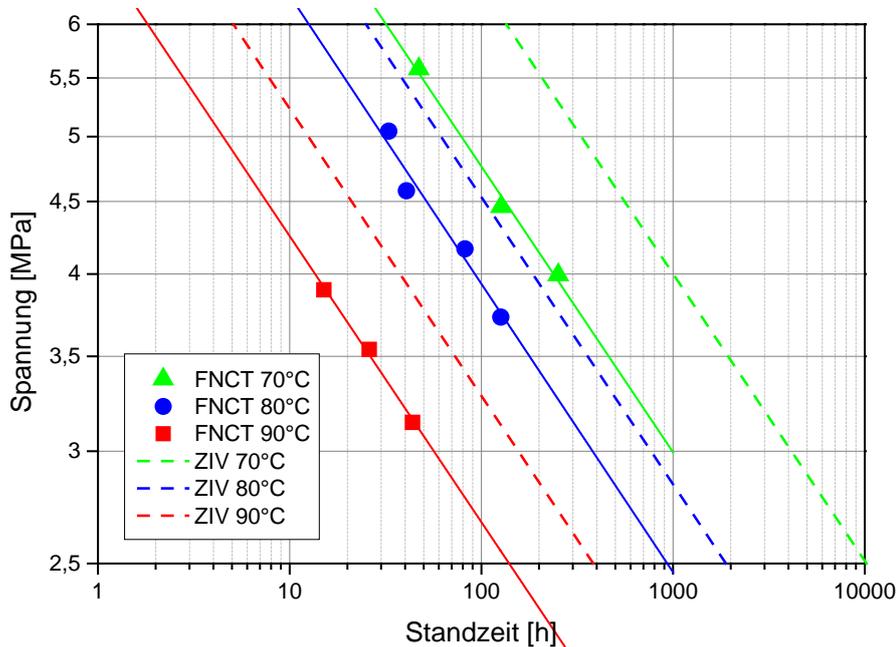


Abbildung 22: Vergleich des Spannungsrißastes von FNCT mit Zeitstandinnen- druckversuch (Mindestkurven für PE HD aus DIN 8075:1987)

Die erweiterten Untersuchungen bestätigen damit die Eignung der eingesetzten beschleunigten Prüfmethode FNCT und korrelierenden Schnelltestmethode SHT zur Prognose der Lage des 2. Versagensastes im Zeitstanddiagramm, welcher zum Festigkeitsnachweis herangezogen wird.

Es sei noch angemerkt, dass die erweiterten FNCT-Untersuchungen auf einer anderen Prüfanlage mit vorgealtertem Netzmittel durchgeführt wurden. Die Absolutwerte der FNCT-Standzeiten sind deshalb (insbesondere bei kurzen Prüfzeiten) etwas länger als die unter Kap. 6.1.2 präsentierten FNCT-Werte mit frischer Netzmittellösung. Für einen quantitativen Vergleich der FNCT-Werte unterschiedlicher Deponierohre und die durchgeführten Korrelationen wurde jedoch mit konstanten Prüfbedingungen geprüft.

7.2.2 Extrapolation des thermo-oxidativen Versagens auf Basis von HPAT

Zur Extrapolation der Mindestlage des dritten Versagensastes von 80 °C bzw. 95 °C auf Anwendungstemperatur (typischerweise 20°C bis 40 °C) wurde eine Aktivierungsenergie von 90 kJ/mol herangezogen. Vogt [Vog10] konnte zeigen, dass die Aktivierungsenergie für thermo-oxidatives Versagen von PE (unabhängig von der Stabilisierung oder dem Oxidationsmittel) ca. 90 kJ/mol beträgt.

Im Rahmen der erweiterten Untersuchungen soll mittels einer zweiten Untersuchungsmethode (HPATs mit Druck- und Temperaturvariation inklusive 3D Extrapolation) überprüft werden, ob die über die Mindestlage des 3. Astes abgeschätzten Nutzungsdauern in der gleichen Größenordnung liegen.

An Material Z_1 wurden deshalb, neben der Standard-Prüfbedingung für HPAT (80 °C, 51 bar), Tests mit niedrigeren Temperaturen und mit reduzierten Sauerstoffdrücken vorgenommen. Je kleiner die Temperatur und je kleiner der Prüfdruck, desto länger ist die Prüfzeit, bis sich die mechanischen Eigenschaften aufgrund thermo-oxidativer Versprödung deutlich verschlechtern.

Exemplarisch zeigt Abbildung 23 die Rest-Festigkeit und Rest-Bruchdehnung während den Autoklavenprüfungen bei 51 bar Sauerstoffdruck und unterschiedlichen Temperaturen (51 bar/60 °C, 51 bar/70 °C und 51 bar/80 °C):

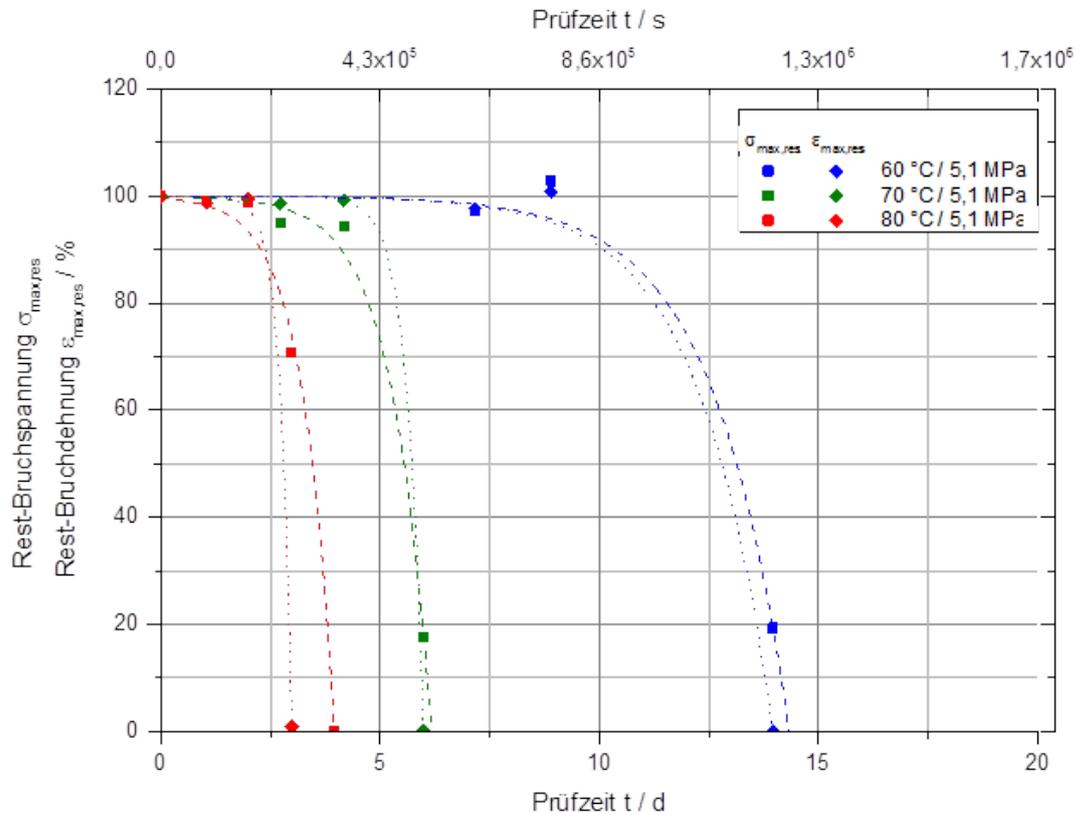


Abbildung 23: Rest-Bruchspannung und Rest-Bruchdehnung von Material Z_1 beim HPAT unter den Prüfbedingungen 51 bar / 60 °C, 51 bar/70 °C und 51 bar/80 °C

Die durch die zusätzlichen Autoklavenversuche ermittelten Versagenszeiten unter verschiedenen Prüfbedingungen sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Versagenszeiten im HPAT bei verschiedenen Prüfbedingungen

Prüfbedingung	Versagenszeit / d basierend auf		
	$\sigma_{\text{Bruch_res}} = 50 \%$	$\epsilon_{\text{Bruch_res}} = 50 \%$	Druckabfall ($p(\text{O}_2)$)=95 %
80 °C / 51 bar	3	3	2 ^a
70 °C / 51 bar	6	6	6 ^a
60 °C / 51 bar	13	13	21
80 °C / 11 bar	13	11	14
80 °C / 4 bar	39	38	42
80 °C / 1,9 bar			84

^a Wendepunkt des Sauerstoffdruckverlaufs wurde als Versagenskriterium verwendet

Zur Berechnung der Versagenszeiten unter **Anwendungsbedingung** (0,21 bar Sauerstoffdruck und 40 °C) wurden die logarithmierten Versagenszeiten bei Prüfbedingungen, wie in Abbildung 24 gezeigt, über der inversen absoluten Temperatur und dem logarithmierten Sauerstoffdruck aufgetragen. Durch eine 3D Extrapolation, d. h. dem Aufspannen einer Ebene durch die Versagenspunkte, wurden Rest-Nutzungsdauern von ca. 30 Jahren bis 50 Jahren bei Anwendungsbedingungen (Sauerstoffdruck = 0,21 bar und Temperatur = 40 °C) abgeschätzt, siehe Tabelle 29. Im Rahmen der zu erwartenden Prognosegenauigkeit (logarithmische Zeitachse) decken sich die auf Basis des Versagenskriteriums $\sigma_{\text{Bruch,res}} = 50\%$ abgeschätzte Restnutzungsdauer von 33 Jahren gut mit der auf Basis des alternativen Kriteriums $\epsilon_{\text{Bruch,res}} = 50\%$ erhaltenen Restnutzungsdauer von 54 Jahren.

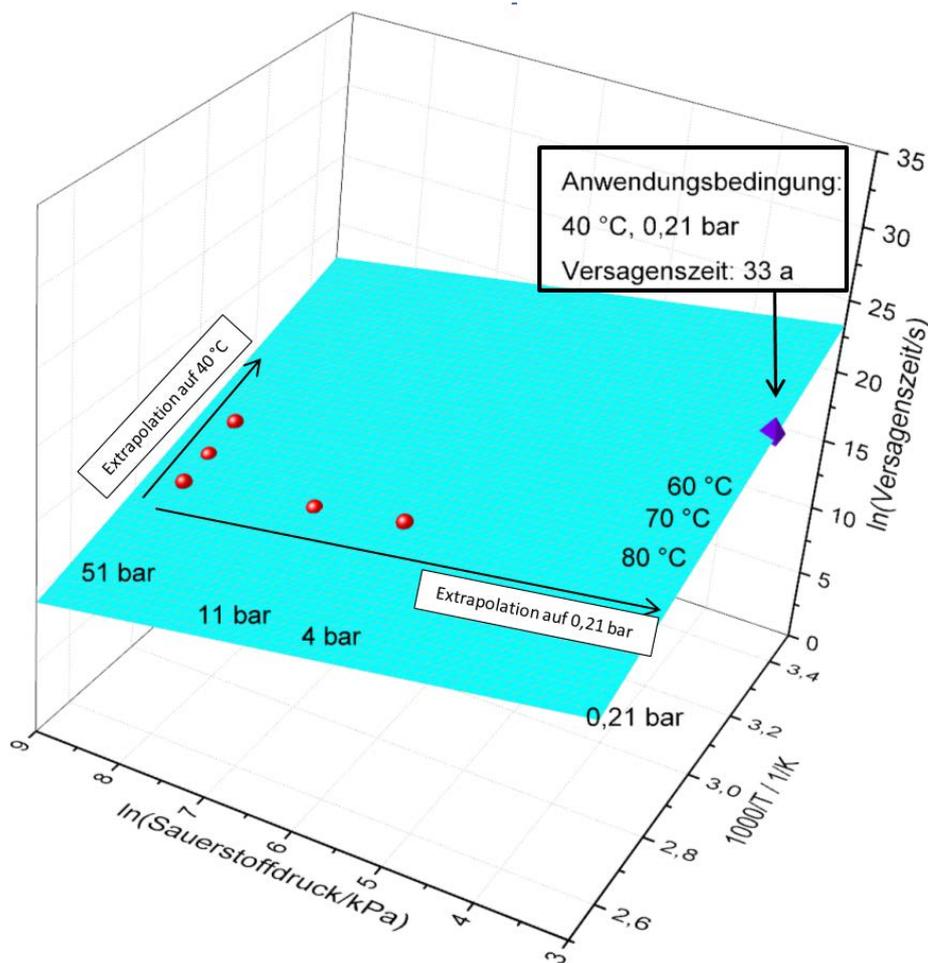


Abbildung 24: 3D-Extrapolation auf Anwendungsbedingungen (0,21 bar und 40 °C) basierend auf den Versagenszeiten $\sigma_{\text{max,res}}=50\%$ im HPAT

Tabelle 29: Nutzungsdauerabschätzung bei 40 °C und Atmosphärendruck basierend auf HPAT

Nutzungsdauerabschätzung / Jahre	
basierend auf $\sigma_{\text{Bruch_res}} = 50 \%$	33
basierend auf $\epsilon_{\text{Bruch_res}} = 50 \%$	54

Über Korrelation der Versagenszeiten im HPAT mit der Mindestlage des 3. Versagensastes im Zeitstanddiagramm für das Referenzmaterials R (Gleichung (3)) wurden für das Rohr Z_1 mit der „Einpunktautoklavenprüfung bei 80 °C, 51 bar“ eine thermo-oxidative Restnutzungsdauer von mind. 20 Jahren bei 40 °C erhalten (siehe Tabelle 23). Das umfassende Untersuchungsprogramm bestätigt somit die zuvor durchgeführten Korrelationen.

Die mittels Arrhenius-Fit berechnete Aktivierungsenergie bei Atmosphärendruck lag bei ca. 70 kJ/mol basierend auf dem Versagenskriterium 50 % Rest-Festigkeit und ca. 80 kJ/mol basierend auf dem Kriterium 50 % Rest-Bruchdehnung und damit etwas niedriger als die erwarteten 90 kJ/mol.

7.3 Abschließende Betrachtung/Beurteilung der ausgebauten Rohre

Es kommt die Frage auf, wieso es sich bei dem ausgebauten Schacht X und dem ausgebauten Rohr Y um Schadensfälle nach nur ca. 20 Jahren Betriebszeit handelt, obwohl die prognostizierte Mindestnutzungsdauer über 100 Jahre beträgt.

Die FEM Berechnungen ergaben, dass bei Deponie Y die Auflast zu groß war, sodass eine Vertikalverformung von > 6 % auftrat. Wie in Abbildung 25 gezeigt, ist das Rohr kollabiert. Es wurden die falschen Rohre eingebaut bzw. die Überdeckung zu groß gewählt. Zu dem Schadensfall führte also weder thermo-oxidative Alterung noch Spannungsrissversagen, sondern eine fehlerhafte Auslegung.



Abbildung 25: Kollabiertes Rohr in der Deponie Y

Am Schacht X trat ein – im Wesentlichen spannungsunabhängiges - Stabilitätsversagen auf, das sich, wie in Abbildung 26 zu sehen ist, in Form von Einbeulen äußerte. Die Ursachen hierfür liegen in einer falschen Einschätzung des Zusammenwirkens vertikaler und horizontaler Einwirkungen und / oder einer Verkantung der Teleskopelemente durch nicht rundum gleichmäßige Verteilung der Lasteinwirkungen.



Abbildung 26: Schacht X mit Einbeulung

Das PE 80 Rohr Z ist nicht wegen eines Schadenfalls ausgebaut worden, sondern wegen geplanter Umbaumaßnahmen. Rohr-Abschnitt Z_1 zeigt im HochdruckAutoklavenversuch erstaunlich kurze Versagenszeiten. Der Rohr-Abschnitt Z_2 hingegen weist eine deutlich höhere Versagenszeit im HPAT auf, die im Bereich der anderen Deponierohre liegt. In der Hausmüll/Asche-Deponie Z wurden Temperaturen von deutlich über 50 °C (bis 60 °C) gemessen. Gegebenenfalls könnten diese sehr hohen Temperaturen lokal zu einer vorzeitigen Wärmealterung geführt haben. Dies müsste genauer untersucht werden. Demgegenüber steht, dass die OIT-Messungen am Rohrabschnitt Z_1 noch auf eine hohe Reststabilisierung schließen lassen sollten. Die über FEM berechnete maximale Zugspannung ist mit 0,4 N/mm² sehr klein. Es wird daher, trotz sehr hoher Temperatur, nicht mit einem vorzeitigen Spannungsrisssversagen gerechnet.

Das Rohr A aus der Vorstudie ist ebenfalls ein Schadensfall. Dieses Rohr war statisch nicht ausreichend dimensioniert. Gemäß einer statischen Nachrechnung lag insbesondere die Steifigkeit der seitlichen Bettung deutlich unter den Anforderungen. Die gemessenen Sickerwassertemperaturen betragen über 40 °C.

Das Schadensbild von den Rohren aus Deponie B sah so aus, dass ausgehend von den Drainageschlitzten Risse gefunden wurden, die teilweise von Schlitz zu Schlitz reichten. An manchen Stellen wurden Versprödungen festgestellt (teilweise kam es zur Scherbenbildung). An anderen Stellen wiederum gab es keine Hinweise auf Versprödung.¹⁰ Das Entstehen der Risse kann durch die nicht ausgerundeten Ecken der Drainageschlitze erklärt werden. Durch diese Schlitzgeometrie entstehen Kerbspannungen. Diese werden bei der Dimensionierung von Rohren nicht berücksichtigt. Kerbspannungen können die rechnerischen Zugspannungen aus den berücksichtigten Einwirkungen deutlich (um Faktor zwei bis drei) erhöhen. Durch Kerbspannungen verursachte Risse können sich fortsetzen und dadurch zu den aufgetretenen Rissen „von Schlitz zu Schlitz“ führen.

Diese Beispiele zeigen, dass als Voraussetzung für eine lange Nutzungsdauer nicht allein die Anforderungen an den verwendeten Werkstoff (eine ausreichende Spannungsrisssbeständigkeit sowie Stabilisierung gegen thermo-oxidativen Abbau) entscheidend sind, sondern dass ebenso eine fachgerechte Verlegung, fehlerfreie statische Auslegung und fachgerechte Rohrherstellung sichergestellt sein müssen.

¹⁰ Information von Hr. Kässinger, Fa. ICP – Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH, Urbach

8 Handlungsempfehlungen

In Folge der - bei sachgerechtem Einbau - auftretenden Betriebsspannungen (max. Zugspannungen unter 3,4 MPa, größtenteils unter 1 MPa) werden bereits eingebaute Rohre aus PE HD bei niedrigen Durchschnittstemperaturen ($< 40\text{ °C}$) im Deponiekörper als unkritisch betrachtet.

Handlungsbedarf bestünde nur bei sehr hohen, langfristig auftretenden Temperaturen ($> 40\text{ °C}$) und Rohren aus PE HD mit geringen FNCT-Standzeiten. PE HD Rohre, die bereits den DIBt - Anforderungen hinsichtlich $t_{\text{FNCT}} > 20\text{ h}$ oder strengeren Anforderungen genügen, sind weniger kritisch hinsichtlich Spannungsrissversagen. Die aktuell in den Normen und Regelwerken verankerten Anforderungen an die Spannungsrissbeständigkeit werden als ausreichend betrachtet. Vor allem die Verwendung von PE 80 und PE 100 oder sogar PE 100-RC Rohren bietet hinsichtlich Spannungsrissversagen Sicherheit.

Allerdings darf bei Temperaturen von 40 °C und mehr der Einfluss der Wärmealterung keinesfalls vernachlässigt werden. Die Anforderungen bezüglich des OIT-Werts sollten überdacht werden, da der OIT-Wert nur die Zeitdauer beschreibt, über die das Polymer bei Messtemperatur noch durch die Antioxidantien vor oxidativem Abbau geschützt ist. Jedoch wird keine Information über die Stabilisierung durch das Polymer selbst erhalten.

Außerdem ist zur Absicherung außerplanmäßiger Beanspruchungen, wie temporäre Temperaturen von 50 °C oder höher oder starke Auswaschung durch hohes Sickerwasseraufkommen hoch konzentrierter aggressiver Medien, eine höhere Stabilisierung der Rohre gegen thermo-oxidativen Abbau anzustreben. Zusätzliche Sicherheiten hinsichtlich der Materialqualität beugen teure und aufwändige Sanierungsarbeiten vor. Zur Überprüfung der thermo-oxidativen Beständigkeit sollten Anforderungen an HPAT-Versagenszeiten in Normen mit aufgenommen werden.

Da die Ermittlung der Spannungsrissbeständigkeit über den FNCT zeit- und kostenintensiv ist, wird sich unter Umständen zukünftig der (wie es scheint mit dem FNCT gut korrelierende) SHT als Charakterisierungsmethode durchsetzen. Erste Korrelationsansätze gibt es bereits. Jedoch fehlt eine breite Datenbasis. Bei zukünftigen Überarbeitungen von Normen und Regelwerken sollte über eine Aufnahme des SHT inklusive sinnvoller Anforderungen diskutiert werden.

9 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes war es, quantitative Aussagen zur Restnutzungsdauer von alten PE HD-Deponierohren aus materialtechnischer Sicht zu treffen. Außerdem sollte eine Überprüfung der aktuell in Normen (DIN 4266-1: 2011-11) und Regelwerken (SKZ/TÜV-LGA Güterichtlinie: 2013) geforderten Mindestkennwerten für FNCT und OIT sowie das Ableiten von Handlungsempfehlungen im Hinblick auf eine geforderte Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren unter verschiedenen Deponie – Betriebsbedingungen erfolgen.

Zum Erreichen des Forschungsziels wurden neben alten, ausgebauten PE HD-Rohren zusätzlich neuwertige PE Rohrqualitäten untersucht, von denen derzeit davon ausgegangen wird, dass sie unter Betriebsbedingungen (erhöhte Temperaturen und aggressives Sickerwasser) eine Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren aufweisen. Die Untersuchungen umfassten ebenfalls die Korrelation mit einem „Referenzrohr“ (Neurohr) aus PE HD, für welches zusätzlich umfangreiche Ergebnisse aus Zeitstandinnen-druckversuchen vorliegen. Es wurde eine Korrelation zwischen den ermittelten Kennwerten zur Spannungsrissbeständigkeit (FNCT und SHT)¹¹ bzw. zur Oxidationsbeständigkeit (OIT bzw. HPAT)¹² und dem mechanischen Zeitstandverhalten der Rohre hergestellt.

Für eine Nutzungsdauerabschätzung sind aus materialtechnischer Sicht zwei Versagensarten zu berücksichtigen:

- Eine Lebensdauerabschätzung hinsichtlich Spannungsrissversagen
- Eine Abschätzung hinsichtlich thermo-oxidativen Versagens.

Die Abschätzungen sind wegen der konstanten Prüfbedingungen bei den Laborversuchen (konstante Temperatur und Last) konservativ. In der Deponie wird die Last jedoch schrittweise aufgebracht, da die Deponie nach und nach aufgefüllt wird. Auch die Temperatur in der Deponie ändert sich mit der Zeit.

¹¹ FNCT = Full Notch Creep Test; SHT = Strain Hardening Test

¹² OIT = Oxidationsinduktionszeit; HPAT = Hochdruck-Autoklaventest

Spannungsrissversagen:

Die Zugspannungen wurden über FEM-Berechnungen ermittelt. In den Berechnungen wurde die Schwächung durch Perforation der Sickerwasserrohre, unterschiedliche Rohraufleger, sowie die Last aus der Überdeckungshöhe berücksichtigt. Außerdem erfolgte eine Abminderung des Kriechmoduls und der Langzeitbiegefestigkeit für die Temperatur und das Medium, das in Abhängigkeit der Deponieklasse, Deponieart und Abfallart wirkt.

Die FEM Berechnungen ergaben, dass die Zugspannungen in DA 355 Rohren mit SDR 11 oder SDR 7,3 und einem Tonaufleger oder einem Auflager nach DIN 19667 bei Kriechmodulen von 100 N/mm² bis 200 N/mm² weniger als 3,4 N/mm² betragen.

Unter Zuhilfenahme der Zeitstandkurven aus der DIN 8075 konnten Mindestnutzungsdauern hinsichtlich der Spannungsrissbeständigkeit in Abhängigkeit der Betriebstemperatur in der Deponie und der im Deponie-Rohr wirkenden maximalen Zugspannungen für PE HD, PE 80 und PE 100 abgeschätzt werden (siehe Tabelle 30). Auf Basis der berechneten maximalen Zugspannungen < 3,4 N/mm², wird eine Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren für PE 100 und für PE 80 (das den Referenzkennlinien der DIN 8075 entspricht) bei 40 °C erreicht. In Deponien, in denen PE HD Rohre ohne gesonderte Anforderungen an die Spannungsrissbeständigkeit (FNCT) eingesetzt wurden, sollte die Temperatur unterhalb von 40 °C liegen und die Zugspannungen unter 3 MPa, sodass 100 Jahre Nutzungsdauer erzielt werden können.

Tabelle 30: Nutzungsdauerabschätzung (Mindest-Nutzungsdauer in Jahren) auf Basis der Referenzkennlinien der Zeitstandinnendruckfestigkeit aus der DIN 8075

Mindestanforderung PE HD (DIN 8075:1987)					Mindestanforderung PE 80 (DIN 8075:1999)					Mindestanforderung PE 100 (DIN 8075:1999)				
σ_v [MPa]	T [°C]				σ_v [MPa]	T [°C]				σ_v [MPa]	T [°C]			
	20	30	40	50		20	30	40	50		20	30	40	50
1					1					1				
2				140	2				236	2				
3			143	19	3				61	3				329
4		297	34	4,6	4			175	24	4				90
5		99	11	1,5	5			84	11	5				33
6	400	40	4,7	0,6	6		386	46	6,1	6			121	14

Bei Rohren, die den Mindestanforderungen des DIBt genügen (PE HD Rohren mit $t_{FNCT} > 20$ h, PE 80 Rohren mit $t_{FNCT} > 100$ h und PE 100 Rohren mit $t_{FNCT} > 300$ h) wird die Anforderung an eine Nutzungsdauer von 100 Jahren hinsichtlich der Spannungsrissbeständigkeit als unkritisch betrachtet (Tabelle 31). Die in Tabelle 31 berechneten Nutzungsdauern ergeben sich über eine Korrelation der FNCT-Standzeiten mit der Lage des 2. Versagensastes (Spannungsrissversagen) im Zeitstanddiagramm.

Tabelle 31: Nutzungsdauerabschätzung (in Jahren) von PE HD Rohren mit $t_{FNCT} > 20$ h, PE 80 Rohren mit $t_{FNCT} > 100$ h und PE 100 Rohren mit $t_{FNCT} > 300$ h

Mindestanforderung PE HD (DIBt) $t_{FNCT} > 20$ h					Mindestanforderung PE 80 (DIBt) $t_{FNCT} > 100$ h					Mindestanforderung PE 100 (DIBt) $t_{FNCT} > 300$ h				
σ_V / MPa	T / °C				σ_V / MPa	T / °C				σ_V / MPa	T / °C			
	20	30	40	50		20	30	40	50		20	30	40	50
1					1					1				
2					2					2				
3					3					3				
4				126	4					4				
5				42	5					5				
6			129	17	6				158	6				406

Die Nutzungsdauerabschätzung für die alten, ausgebauten Rohre ergibt hinsichtlich Spannungsrissversagen mindestens 100 Jahre bei Temperaturen kleiner 40 °C und maximalen Zugspannungen kleiner 3 MPa (berechnet wurden < 0,5 MPa bei Rohr X und Z).

Die aktuell in den Normen (DIN 4266-1: 2011-11) und Regelwerken (SKZ/ TÜV-LGA Güterichtlinie: 2013) verankerten Anforderungen hinsichtlich der Spannungsrissbeständigkeit ($t_{FNCT} > 300$ h bei Standardeinbaubedingungen bzw. > 1.600 h bei erhöhten Anforderungen) sind ausreichend. Vor allem die Verwendung von PE 80 und PE 100 oder sogar PE 100-RC Rohren bietet hinsichtlich Spannungsrissversagen Sicherheit. Zukünftig wäre es sinnvoll, den schnelleren und kostengünstigeren SHT, der mit dem FNCT zu korrelieren scheint, in Normen und Richtlinien mit aufzunehmen.

Die Berechnungen und Betrachtungen beziehen sich auf die Überprüfung der Mindestanforderungen an die Spannungsrissbeständigkeit der eingesetzten PE-Materialien. Eine fachgerechte Verlegung, fehlerfreie statische Auslegung und fachgerechte Rohrherstellung wird vorausgesetzt. Spannungsüberhöhungen wegen Kerbspannungen, z. B. an nicht ausgerundeten Ecken von Drainageschlitzten, wurden nicht betrachtet.

Thermo-oxidatives Versagen:

Das Versagen aufgrund Wärmealterung erfolgt (nahezu) spannungsunabhängig. Grundlage für die zeitliche Abschätzung dieser Versagensart war die Mindestlage des 3. Astes im Zeitstandinnendruckdiagramm des Referenzrohres und in den Mindestkurven der DIN 8075, sowie die anzunehmende Aktivierungsenergie für thermo-oxidatives Versagen von ca. 90 kJ/mol [Vog10] (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32: Mindest-Nutzungsdauer (in Jahren) hinsichtlich der Wärmealterung von PE HD mit einer Standzeit im ZIV von mehr als 1 Jahr bei 80 °C

Temperatur [°C]	20	30	40	50
Zeit [a]		158	50	17

Die Untersuchungen ergaben, dass die Wärmealterung bei PE HD, mit einer der DIN 8075 entsprechenden Mindestqualität, die Nutzungsdauer bei Deponien mit Temperaturen von 40 °C und mehr einschränken kann. Bei dem Referenzmaterial und den ausgebauten Rohren, die eine Versagenszeit im HPAT von ca. 27 d und mehr aufwiesen, ist die Wärmealterung bei 40 °C Anwendungstemperatur noch unbedenklich. Steigt die Temperatur über längere Zeit über 50 °C, könnte es bereits vor Ende der angestrebten 100 Jahre Nutzungsdauer zum thermo-oxidativen Versagen kommen.

Über Korrelation der Versagenszeiten im HPAT mit der Mindestlage des 3. Versagensastes (thermo-oxidatives Versagen) im Zeitstanddiagramm für das Referenzmaterial R können zum Teil längere Mindestnutzungsdauern hinsichtlich Wärmealterung prognostiziert werden (Tabelle 33). Das Referenzrohr R zeigte im Zeitstandinnendruckversuch selbst nach einem Jahr bei 95 °C noch kein thermo-oxidatives Versagen. Die Versagenszeit im HPAT betrug 27 d, der OIT-Wert lag bei $OIT_{200^{\circ}C} = 23,8$ min.

Tabelle 33: Mindest-Nutzungsdauer (in Jahren) hinsichtlich der Wärmealterung in Abhängigkeit der Temperatur für des Referenzmaterials R (PE HD): ZIV > 1 Jahr bei 95 °C

Temperatur / °C	20	30	40	50
Zeit / a			176	60

Die Anforderungen in den aktuellen Normen und Regelwerken an die Wärmebeständigkeit (Langzeitstabilisierung) der im Deponiebau verwendeten PE-Rohrmaterialien allein über den OIT-Wert sollte überdacht werden. Der OIT-Wert beschreibt nur die Zeitdauer, über die das Polymer bei Messtemperatur (200 °C bzw. 210 °C, also in der Schmelze und damit weit oberhalb typischer Betriebstemperaturen in Deponien von 20 °C bzw. 40 °C) noch durch die Antioxidantien vor oxidativem Abbau geschützt ist. Jedoch wird keine Information über die Stabilisierung durch das Polymer selbst erhalten. Es ist deshalb sinnvoll, zukünftig den HPAT als Anforderung in Normen und Richtlinien dort mit aufzunehmen, wo Messungen üblicherweise bei Temperaturen von 80 °C durchgeführt werden.

Im Rahmen des erweiterten Untersuchungsprogramms konnten die für die Lebensdauerprognose herangezogenen Korrelationen von Versagenszeit im FNCT mit der Lage des 2. Versagensastes im ZIV (Spannungsrisssversagen) bzw. von Versagenszeit im HPAT mit der Lage des 3. Versagensastes im ZIV (thermo-oxidatives Versagen) bestätigt werden.

10 Ausblick

Weiterer Forschungsbedarf besteht aus Sicht der Autoren in der Ausarbeitung einer breiteren Datenbasis.

Es sollte weiter an einer Korrelation von FNCT und SHT geforscht werden, sodass zukünftig der schnellere und günstigere SHT zur Charakterisierung der Spannungsrißbeständigkeit für im Deponiebau verwendete PE-Rohrwerkstoffe in Normen verankert werden kann. Auf Basis einer breiteren Datenbasis könnten Mindestanforderungen an den im SHT ermittelten Dehnverfestigungsmodul abgeleitet werden.

Sind die neuen PE 100-RC Werkstoffe, die einen sehr hohen Widerstand gegen Spannungsrißversagen aufweisen, auch ausreichend gut gegen thermo-oxidativen Abbau stabilisiert? Um den Einfluss der thermo-oxidativen Alterung bei der Materialentwicklung neuer Rohrwerkstoffe nicht zu vernachlässigen, sollte dieser Fragestellung nachgegangen werden. Der HPAT ist in der Lage, innerhalb relativ kurzer Zeiten ein thermo-oxidatives Versagen von PE-Werkstoffen und -Bauteilen zu prüfen. Aus Sicht der Autoren macht es deshalb Sinn, diesen Test künftig als Anforderung in Normen und Richtlinien mit aufzunehmen und Mindestwerte für im HPAT ermittelte Versagenszeiten abzuleiten.

11 Danksagung

Dieses Forschungsprojekts wurde durch das Bayerische Landesamt für Umwelt in Auftrag gegeben und fachlich begleitet. Die Finanzierung erfolgte durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, wofür sich die Autoren bedanken.

Dipl.-Ing Armin Stegner von der TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH stellte die ausgebauten Deponierohre zur Verfügung und führte die statischen Berechnungen durch.

Von Seiten des Kunststoff-Zentrum SKZ waren maßgeblich Frau M. Sc. Anja Martin, Herr Dr.-Ing. Kurt Engelsing sowie Herr Dipl.-Ing. Helmut Zanzinger an der Durchführung der Untersuchungen und der Berichterstellung beteiligt.

12 Literatur

- [Dol96] Doll, H.: „Parameterstudie zur Rohraufлагergestaltung in Deponien, Parameterstudie, Bay. LfU München, 1996.
- [Ede10] Edenberger, W.: Rissbildung in PE-Leitungen. Workshop über „Risse in Deponiesickerwasserleitungen aus PE“, AVL und ICP, 18. Mai 2010 im Landratsamt Ludwigsburg, Seite 17-24.
- [Fle87] Fleißner, M.: Langsames Risswachstum und Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polyethylen. *Kunststoffe* 77 (1987) 1, S. 45-50
- [Fle98] Fleißner, M.: Experience With a Full Notch Creep Test in Determining the Stress Crack Performance of Polyethylenes. *Polymer Engineering and Science* 38 (1998) 2, S. 330-340.
- [FrG11] Frank, H. / Großmann, B.: Die SKZ / TÜV-LGA Güterrichtlinie "Rohre, Rohrleitungsteile, Schächte und Bauteile in Deponien". 27. Fachtagung „Die sichere Deponie 2011 – Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“, SKZ - ConSem GmbH, Würzburg 2011.
- [FrH09] Frank, H. / Holtmann, G.: Rohre, Bauteile und Schächte aus Kunststoffen im Deponiebau. 25. Fachtagung „Die sichere Deponie 2009 – Abdichtung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen“, SKZ - ConSem GmbH, Würzburg (2009).
- [Fra05] Frank, P.: Besondere Anforderungen an Polyethylen-Formmassen für Rohre und Bauteile in Deponien - Punktlasten durch Kiesfilter erfordern eine erhöhte Beständigkeit gegen langsame Rissfortpflanzung. 21. Fachtagung „Die sichere Deponie" Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen, SKZ - ConSem GmbH, Würzburg (2005).
- [HDM+10] Havermans van Beek, D. J. M. / Deblieck, R. / McCarthy / M., Kloth, R. / Kurelec, L: An elegant and fast method to predict the slow crack growth behaviour of HDPE pipe materials, *3R international* 49 (2010) 10, 548 551.
- [HLZ93] Hoch, A. / Lottner, U. / Zanzinger, H.: Statische Berechnung von Rohrleitungen im Sickerwasserentsorgungssystem bei Abfalldeponien. *Müll und Abfall*, Heft 1/93, Berlin (1993).

- [Hes06] Hessel, J.: 50 Jahre Rohre aus Polyethylen – Eine Ingenieurtechnische Betrachtung, *3R Internat.* (45) 3-4 (2006).
- [Hes12] Hessel, J., Standzeitprognose von Sickerwasserleitungen aus PE, *Studie des Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, Urbach*, (2012).
- [KTS+05] Kurelec, L., Teeuwen, M., Schoffeleers, H. and Delieck, R.: Strain hardening modulus as a measure of environmental stress crack resistance of high density polyethylene, *Polymer* 46: 6369-6379 (2005).
- [Mai10] Maier, P.: Risse in Deponiesickerwasserleitungen aus PE – Problemschilderung am Beispiel der Deponie „Burghof“. *Workshop über „Risse in Deponiesickerwasserleitungen aus PE“, AVL und ICP*, 18. Mai 2010 im Landratsamt Ludwigsburg, Seite 1-10 (2010).
- [Rie06] Riegl, P.: Anforderungen an PEHD-Formmassen im Hinblick auf das Trag- und Langzeitverhalten von Rohren und Bauteilen in Deponien. *22. Fachtagung „Die sichere Deponie“ Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*, SKZ - ConSem GmbH, Würzburg (2006).
- [Son66] Sonntag, G.: Die Stabilität dünnwandiger Rohre im kohäsionslosen Kontinuum, *Felsmechanik und Ingenieurgeologie Vol. 4/3*, Springer Verlag (1966).
- [Deg95] Degen, H.: Deponie Bornhausen SW Pumpenschacht Nachweis der Standsicherheit von PE HD SchachtbauwerkenSW Pumpenschacht, *Bodstedt Neumünster* (1995).
- [TsE10] Tschackert, A. / Edenberger, W.: Risse in Deponiesickerwasserleitungen aus PE – Bericht über ein erstes Forschungsvorhaben. *Workshop über „Risse in Deponiesickerwasserleitungen aus PE“, AVL und ICP*, 18. Mai 2010 im Landratsamt Ludwigsburg, Seite 25-40 (2010).
- [Vog10] Vogt, H.: Alterung von PE-Druckrohren aus PE 100 unter Betriebsbedingungen; *Vortrag auf Sitzung des AK Rohre im SKZ, Würzburg* (2010).
- [Zan94] Zanzinger, H.: Verhalten von PEHD-Rohren an der Deponiebasis - Ergebnisse des großmaßstäblichen Modellversuchs. Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien -1994- 10. *Nürnberg Deponieseminar, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 72*, Nürnberg (1994).

[ZGH92] Zanzinger, H. / Gartung, E. / Hoch, A.: Grundsatzuntersuchung über die statische Berechnung von Rohrleitungen in Sickerwasserentsorgungssystemen bei Abfalldeponien. *Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 61*, Nürnberg (1992).

[ZSG97] Zanzinger, H. / Steiglechner, A. / Gartung, E.: Endergebnisse der großmaßstäblichen Rohrbelastungsversuche. Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien -1997- 13. *Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 76*, Nürnberg (1997).

[FLO96] Mischung M9: Optimierung des Auflagermaterials von Dränrohren in Deponiebasisabdichtungssystemen, StMLU-Forschungsvorhaben E12, TUM, Schlussbericht von März 1996: 50 S., 6 Anl., München.

Normen und Richtlinien

ATV A 127: Regelwerk-Abwasser-Abfall, Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen, 3. Auflage August (2000).

ATV M 127-1: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungsleitungen für Sickerwasser aus Deponien. Ergänzung zum Arbeitsblatt ATV-A 127, Ausgabe: 03/1996.

Vorläufige Bemessungsgrundsätze für Bauteile in Deponien - Rohrleitungen aus PE HD für Basisentwässerungssysteme - Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Ausgabe: 11/1995.

Deponieverordnung: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die durch Art. 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist

DIN 4266-1: Sickerrohre für Deponien – Teil 1: Sickerrohre aus PE und PP“.

DIN 8074: Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 63, PE 80, PE 100, PE HD – Maße.

DIN 8075: Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 63, PE 80, PE 100, PE HD - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfungen.

DIN 19667: Dränung von Deponien. Technische Regeln für Planung, Bauausführung und Betrieb.

- DIN EN 728: Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme - Rohre und Formstücke aus Polyolefinen - Bestimmung der Oxidations-Induktionszeit.
- DIN EN 12814-3: Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Teil 3: Zeitstand-Zugversuch.
- DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
- DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.
- DIN EN ISO 1167-1: Rohre, Formstücke und Bauteilkombinationen aus thermoplastischen Kunststoffen für den Transport von Flüssigkeiten - Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegen inneren Überdruck - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren.
- DIN EN ISO 1167-2: Rohre, Formstücke und Bauteilkombinationen aus thermoplastischen Kunststoffen für den Transport von Flüssigkeiten - Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegen inneren Überdruck - Teil 2: Vorbereitung der Rohr-Probekörper.
- DIN EN ISO 9080: Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme - Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens von thermoplastischen Rohrwerkstoffen durch Extrapolation.
- DIN EN ISO 6259-3: Rohre aus Thermoplasten - Bestimmung der Eigenschaften im Zugversuch - Teil 3: Polyolefin-Rohre.
- DIN EN ISO 13438: Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Auswahlprüfverfahren zur Bestimmung der Oxidationsbeständigkeit.
- DVS 2203-4: Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen - Zeitstand-Zugversuch.
- EN ISO 2578: Plastics - Determination of time-temperature limits after prolonged exposure to heat.
- DIN EN ISO 11357-6: Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 6: Oxidations-Induktionszeit (isothermische OIT) oder -Temperatur (isodynamische OIT).

- ISO 16770: Kunststoffe - Bestimmung der Spannungsrissbeständigkeit von Polyethylen unter Medieneinfluss (ESC) - Kriechversuch an Probekörpern mit umlaufender Kerbe (FNCT).
- ISO 6259-3: Thermoplastische Rohre - Bestimmung der Eigenschaften im Zugversuch - Teil 3: Polyolefin-Rohre.
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 8-1. Rohre, Rohrleitungsteile, Schächte und Bauteile in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien vom 02.12.2015; www.laga-online.de.
- PAS 1075: Rohre aus Polyethylen für alternative Verlegetechniken – Abmessungen, technische Anforderungen und Prüfung, Ausgabe 04/2009.
- SKZ/TÜV-LGA Güterichtlinie: Rohre, Rohrleitungsteile, Schächte und Bauteile in Deponien, Ausgabe 2013.

13 Anhang

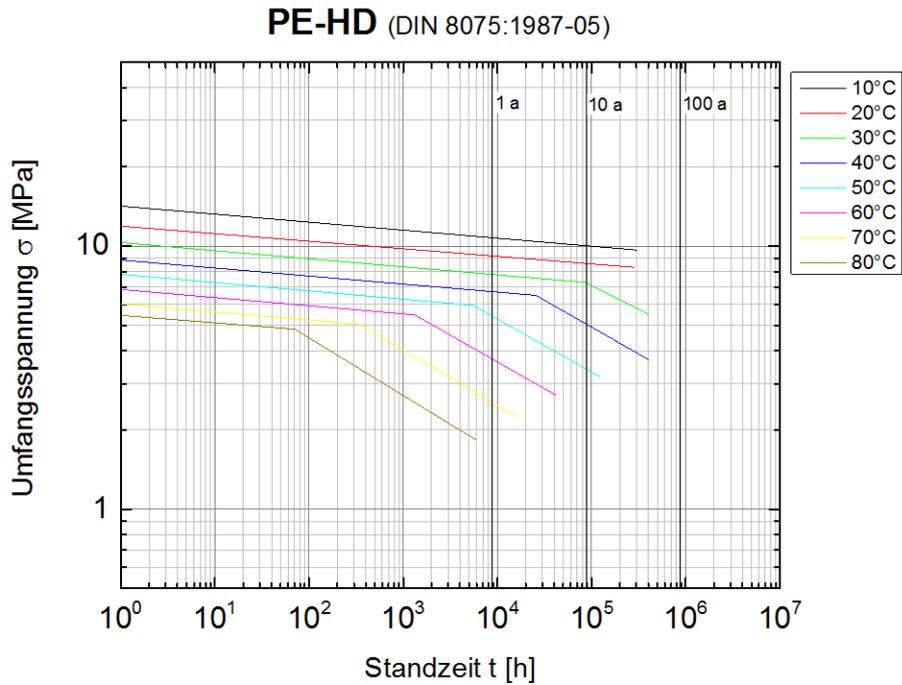


Abbildung 27: Mindestkurven für PE- HD nach DIN 8075: 1987

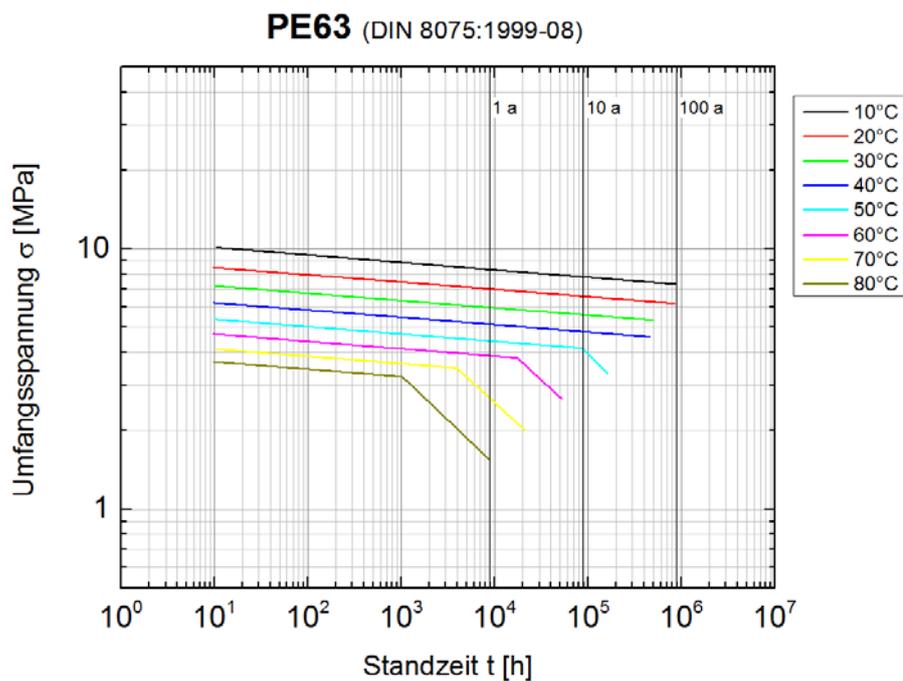


Abbildung 28: Mindestkurven für PE 63 nach DIN 8075: 1999

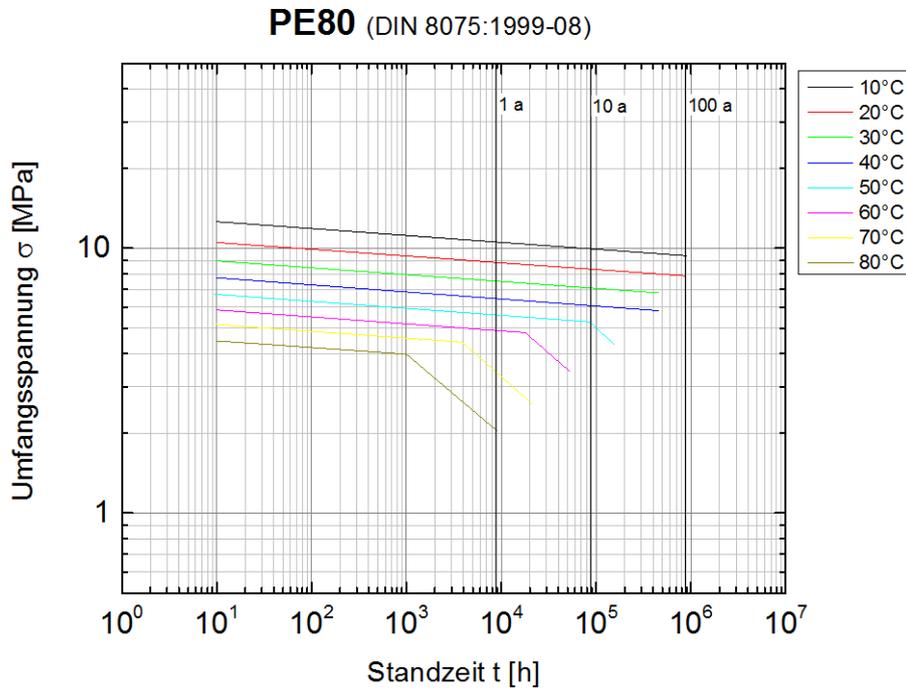


Abbildung 29: Mindestkurven für PE 80 nach DIN 8075: 1999

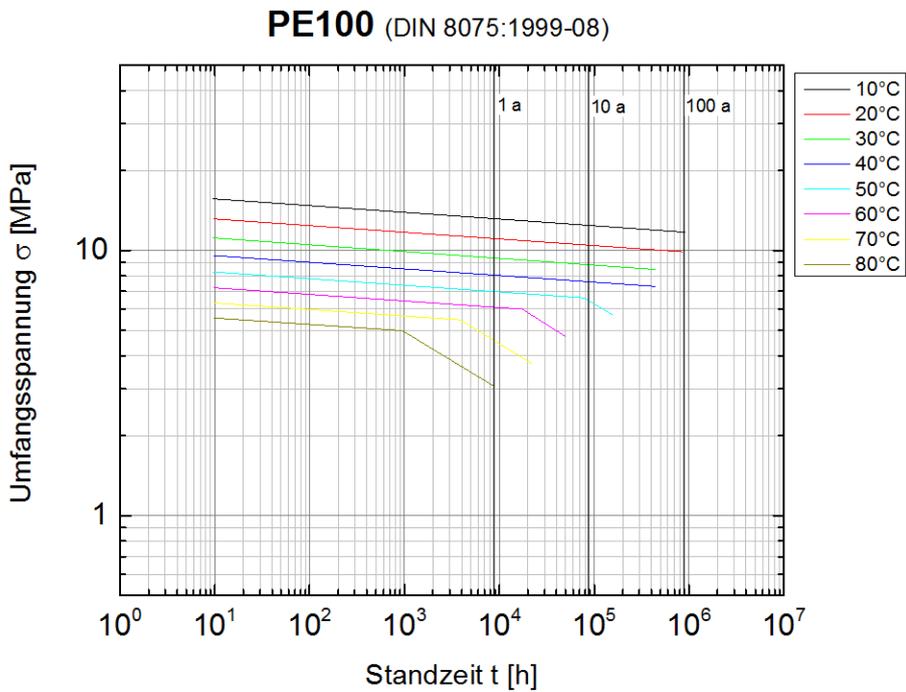


Abbildung 30: Mindestkurven für PE 100 nach DIN 8075 nach DIN 8075 : 1999

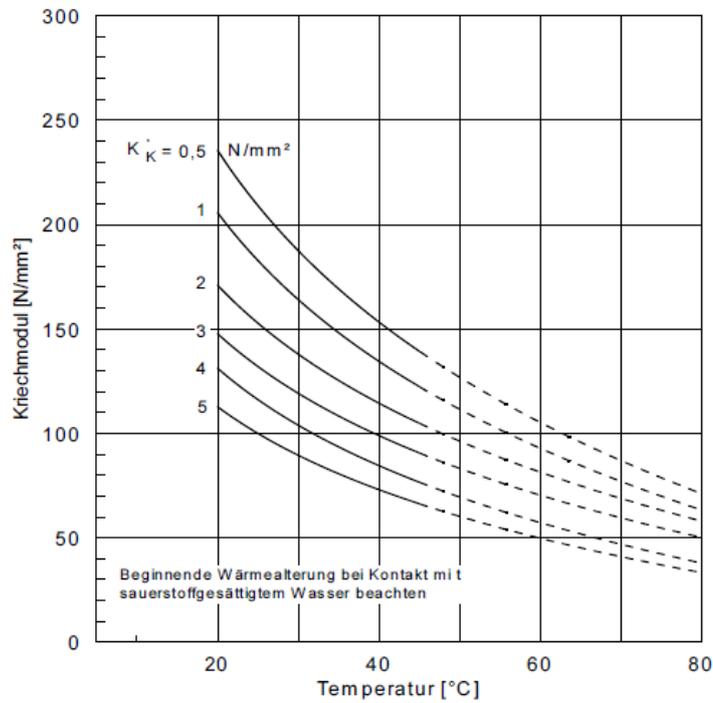
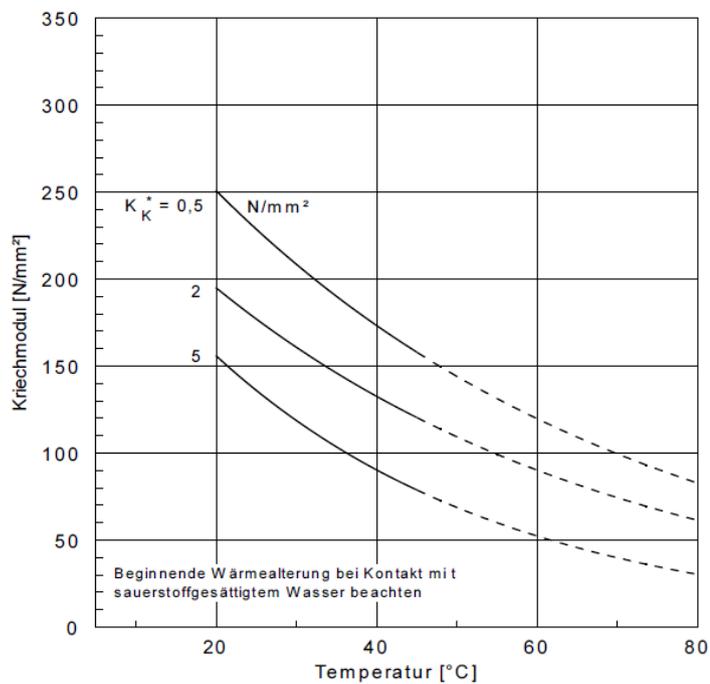
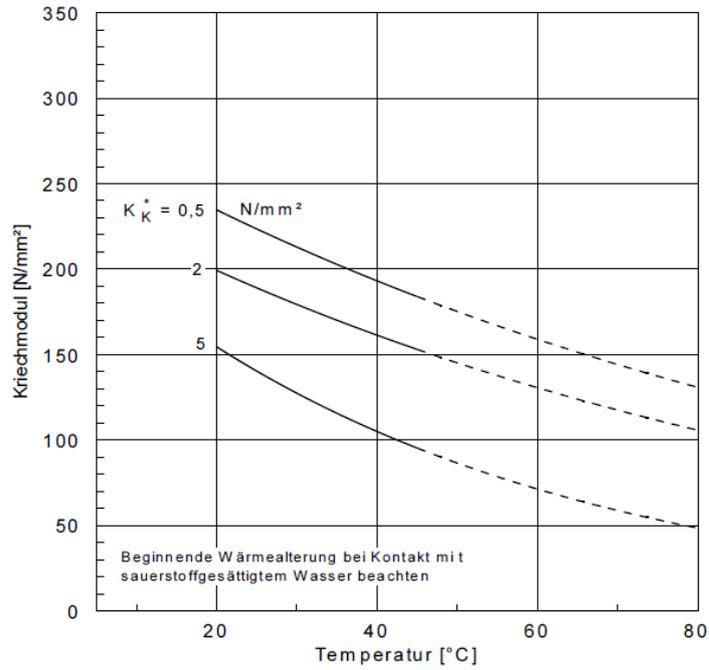


Abbildung 31: Kriechmodul für PE 63 für 25 Jahre aus der DVS 2205-1 Beiblatt 1



Anmerkung: Der Nachweis wurde mit Hostalen GM 5010 T3 geführt

Abbildung 32: Kriechmodul für PE 80 für 25 Jahre aus der DVS 2205-1 Beiblatt 1



Anmerkung: Der Nachweis wurde mit Hostalen CRP100 geführt

Abbildung 33: Kriechmodul für PE 100 für 25 Jahre aus der DVS 2205-1 Beiblatt