

Besondere Anforderungen an Polyethylen-Formmassen für Rohre und Bauteile in Deponien

**Punktlasten durch Kiesfilter erfordern eine erhöhte Beständigkeit gegen
langsame Rissfortpflanzung**

Dipl.-Ing. Philipp Frank, Wölfersheim

1 Einleitung

Die kontrollierte Beherrschung von Stoffströmen in der Deponietechnik erfordert eine sichere Abdichtung und funktionsfähige Rohrsysteme zum Transport.

Zu den Rohrsystemen zählen:

- Sickerleitungsrohre
- Durchdringungsbauwerke
- Sickerwasserschächte
- Sickerwassersammelleitungen
- Sickerwasserstauräume und -pumpwerke
- Gaskollektoren
- Gas-, Sammel- und Regelschächte
- Kondensatabscheider
- Kondensattransportleitungen
- Form- und Verbindungsteile.

Aus gegebener Veranlassung werden in diesem Beitrag die Sickerwasserdränrohre in Deponien genauer betrachtet.

2 Sickerwasserdränrohre

Die DIN EN 1610 fordert für Abwasserleitungen eine Verlegung in verdichtungsfähigem Boden. Es werden einzelne Körner – je nach Rohrdurchmesser – von 20 mm bis 40 mm toleriert. Sickerwasserdränrohre in Deponien werden normalerweise in einem Kiesfilter mit einer Körnung von 16-32 mm verlegt. Der Regelaufbau ist in der DIN 19667 festgelegt.

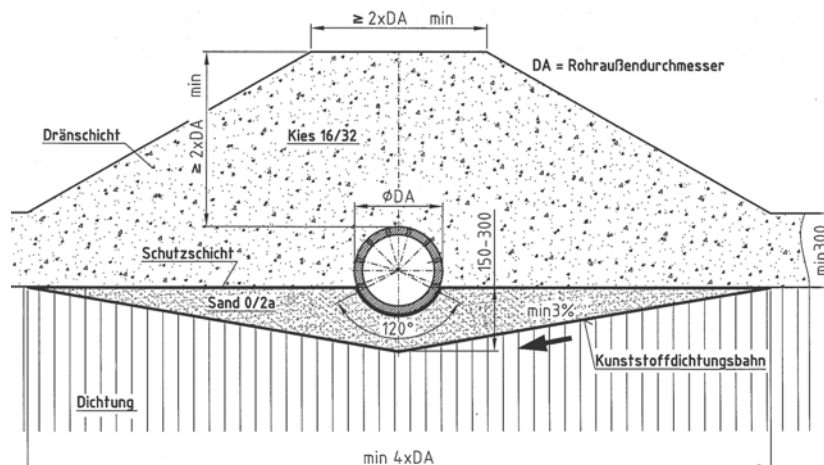


Abbildung 1: Ausführungsbeispiel für die Leitungszone nach DIN 19667

Der Mindestdurchmesser ist zwecks Kamerabefahrung innen mit 250 mm festgeschrieben (DIN 19667). Je nach Auflast wird die erforderliche Wanddicke nach ATV A/M 127 berechnet. Die zulässige Langzeitverformung darf 6 % betragen.

Um die 250 mm zwischen Sohle und Scheitel auch nach einer Verformung sicher zu stellen, wird der Innendurchmesser normalerweise zwischen 265 und 280 mm ausgeführt.

Eine unzureichende Bettung der Rohre – wie zum Beispiel bei einer Verlegung in Ton – kann zu einer höheren Verformung führen. Aus verschiedenen Untersuchungen und praktischen Erfahrungen ist bekannt, dass ein PE-Rohr auch bei 15 % Verformung noch funktionsfähig bleibt – **den geeigneten Werkstoff vorausgesetzt!**

3 Schadensfälle

„Nach heutigen Erkenntnissen gibt es für Rohre und Bauwerke in Deponien keinen besseren Werkstoff als PE.“

Diese Aussage wurde hinterfragt, nachdem von mindestens drei Deponien in Deutschland Schäden bekannt sind. Dort zeigen im Müllkörper eingebaute Sickerwasserdränrohre Längsrisse (siehe Abbildung 2 bis 4).



Abbildung 2: Längsriss im Sickerwasserrohr gelocht [5]



Abbildung 3: Risse im Sickerwasserrohr geschlitzt [5]



Abbildung 4: Risse im Sickerwasserrohr in der ungelochten Sohle [5]

4 Rohstoffvorgaben

Im Gegensatz zu den PE-Rohren gibt es zu den PE-Dichtungsbahnen für Deponien klare Qualitätsvorgaben durch die BAM-Zulassung.

Es werden neben allgemeinen optischen Kriterien und Maßkontrollen folgende Eigenschaften überwacht:

Eigenschaften	Norm
Homogenität	DIN 16726
Rußgehalt	DIN EN ISO 11358
Rußverteilung	ASTM D 5596-94
Schmelzindex	DIN ISO 1133
Oxidationsstabilität – OIT	DIN EN 728-B5
Wölbogendehnung	DIN 53861-1
Zugversuch	DIN EN ISO 527-3
Weiterreissfestigkeit	DIN 53356 A und DIN 53515
Stempeldruckversuch	DIN EN ISO 12236
Kältesprödigkeit	DIN EN 1876-1
Relaxationsverhalten	DIN 53441
Chemikalienbeständigkeit	DIN ISO 175
Beständigkeit gegen Rissbildung	ASTM D 5397
Langzeitverhalten bei kombin. Beanspruchung (Rohrkurve)	DIN 16887

Tabelle 1: Werkstoffanforderungen für PE-Dichtungsbahnen

Zu Qualitätsvorgaben für PE-Rohre und Bauwerke in Deponien gibt es keine eigenständigen Regelwerke mit Mindestanforderungen. Bestenfalls wird Bezug genommen auf die gültigen Normen.

4.1 Vorgaben nach DIN 8075

Qualitätsvorgaben für Rohre aus Polyethylen findet man in der DIN 8075. In dieser Norm wird unterschieden zwischen PE-HD, PE 63, PE 80 und PE 100.

Seite 2
DIN 8075 : 1999-08

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für gerade runde, nahtlose Rohre aus Polyethylen PE 63, PE 80 und PE 100.

Rohre aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), siehe normativer Anhang A, sind geeignet für drucklose Rohre und Kabelschutzrohre.

In Technischen Lieferbedingungen für bestimmte Anwendungsgebiete können einzelne Anforderungen wegfallen oder ergänzt werden.

ANMERKUNG: Geltende anwendungsbezogene Europäische Normen sind zu beachten.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

- DIN 323-1
Normzahlen und Normzahlreihen – Hauptwerte, Genauwerte und Rundwerte
- DIN 8074
Rohre aus Polyethylen (PE), PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD – Maße
- DIN EN 743
Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme – Rohre aus Thermoplasten – Bestimmung des Längsschrumpfes; Deutsche Fassung EN 743:1994
- DIN EN 921
Kunststoff-Rohrleitungssysteme – Rohre aus Thermoplasten – Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens bei konstanter Temperatur; Deutsche Fassung EN 921:1994
- DIN EN 10204
Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen (enthält Änderung A1:1995); Deutsche Fassung EN 10204:1991 + A1:1995
- DIN EN ISO 12162
Thermoplastische Werkstoffe für Rohre und Formstücke bei Anwendungen unter Druck – Klassifizierung und Werkstoffkennzeichnung, Gesamtbetriebs(berechnungs-)koeffizient (ISO 12162:1995); Deutsche Fassung EN ISO 12162:1995
- ISO/TR 9080:1992
Thermoplastics pipes for the transport of fluids – Methods of extrapolation of hydrostatic stress rupture data to determine the long-term hydrostatic strength of thermoplastics pipe materials

3 Definitionen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Definitionen.

Tabelle 2: Koeffizienten zur Berechnung der Referenzkennlinien

Werkstoffbezeichnung	Teil der Referenzkennlinien	Koeffizienten		
		A	C	D
PE 63	flach Ast	-41,4173	22 008,572 2	-35,098 7
	steil Ast	-19,8823	8 619,357 0	-3,039 0
PE 80	flach Ast	-40,957 8	23 596,349 5	-37,575 8
	steil Ast	-19,941 7	8 804,433 3	-3,321 9
PE 100	flach Ast	-38,937 5	24 482,467 0	-38,978 9
	steil Ast	-20,315 9	9 342,693 0	-4,507 6

Der Nachweis nach ISO/TR 9080:1992 hat unter Berücksichtigung der Temperatur-Zeitgrenzen zu erfolgen.

3.1 Zeitstand-Innendruckfestigkeit

Die Zeitstand-Innendruckfestigkeit σ ist die Festigkeit eines mit Innendruck p beaufschlagten Rohres und berechnet sich nach

$$\sigma = p \frac{d-s}{2s} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

wobei d der Außendurchmesser und s die Wanddicke ist.

3.2 Werkstoffbezeichnung

Die Bezeichnung der Polyethylenwerkstoffe für Rohre wird bestimmt durch die Zeitstand-Innendruckfestigkeit bei 20 °C nach 50 Jahren mit Prüfmedium Wasser und ist festgelegt in DIN EN ISO 12162 (gilt nicht für PE-HT).

Tabelle 1: Werkstoffbezeichnung

Werkstoffbezeichnung	MRS ¹⁾ N/mm ²
PE 63	6,3
PE 80	8,0
PE 100	10,0
PE-HD	–

¹⁾ MRS: Minimum Required Strength in N/mm²
(Definition siehe DIN EN ISO 12162)

3.3 Ovalität (Unrundheit)

Die Ovalität (Unrundheit) ist die Differenz zwischen dem gemessenen maximalen und dem gemessenen minimalen Außendurchmesser am selben Querschnitt.

4 Werkstoff/Formstoff

4.1 Allgemeines

PE, stabilisiert mit geeigneten Antioxydantien und in der Regel eingefärbt z. B. mit Ruß oder anderen Pigmenten.

Dabei ist die Wahl der Stabilisatoren und sonstiger Zusatzstoffe dem Hersteller überlassen.

Formmassen unbekannter Zusammensetzung dürfen nicht verwendet werden.

4.2 Nachweis der Zeitstand-Innendruckfestigkeit

Für PE 63, PE 80 und PE 100 muß nachgewiesen sein, daß die Zeitstand-Innendruckfestigkeit auf oder oberhalb der entsprechenden Referenzkennlinien (Mindestkurven) liegt, siehe Bild 1 bis Bild 3. Die Referenzkennlinien basieren auf der Gleichung

$$\lg t = A + \frac{C}{T} + D \cdot \lg \sigma \quad (2)$$

Dabei ist:

A, C und D Koeffizienten nach Tabelle 2

T Temperatur in Kelvin

t Zeit in Stunden

Abbildung 5: Auszug aus DIN 8075, Seite 2

In dieser Norm ist für PEHD nur die 170-h-Prüfung bei 80° und 4 N/mm² gefordert, PEHD ist nur für drucklose Rohre geeignet (siehe Tabelle 2 und 3).

Tabelle 3: Prüfbedingungen für den Zeitstand-Innendruckversuch

Werkstoffbezeichnung	Prüftemperatur	Prüfspannung	Beanspruchungsdauer (Mindeststandzeit)
	°C	σ_0 N/mm ²	t h
PE 63	20	8,0	100
	80	3,5	165
	80	3,2	1 000
PE 80	20	10,0	100
	80	4,6	165
	80	4,0	1 000
PE 100	20	12,4	100
	80	5,5	165
	80	5,0	1 000

Tabelle 2: Zeitstandanforderungen an PE-Rohstofftypen

Anhang A (normativ)

Festigkeitsnachweis für Rohre aus PE-HD

Für drucklose Anwendungen wird folgende Anforderung als Festigkeitsnachweis angesehen.

Tabelle A.1: Prüfbedingungen für den Zeitstand-Innendruckversuch

Werkstoffbezeichnung	Prüftemperatur	Prüfspannung	Beanspruchungsdauer (Mindeststandzeit)
	°C	σ_0 N/mm ²	t h
PE-HD	80	4	170

Tabelle 3: Innendruckprüfungen an PEHD

Aus der Historie heraus und aufgrund der Werkstoffbezeichnungen im Bereich der Kunststoffdichtungsbahnen wird in Ausschreibungen für Deponien in der Regel die „Qualität“ **PEHD** für Rohre und Schächte ausgeschrieben.

Es bleibt der Fantasie des Anwenders überlassen, welche Qualität bei Rohren zum Einsatz kommt, wenn lediglich PEHD als Werkstoff gefordert ist!

Bei der Werkstoffauswahl für erdverlegte Gas- und Trinkwasserrohre setzen große Versorgungsunternehmen mit eigenen Prüflaboren und natürlich auch der DVGW als Zulassungsinstitution Qualitätsmaßstäbe. In diesem Anwendungsbereich ist die Bezeichnung PEHD schon Jahre ein Tabu! Dort wird entweder PE 80 oder PE 100 eingesetzt.

Mit der derzeit gültigen DIN 8075 ist mit PEHD eine „PE-Gießkannenqualität“ als Rohrwerkstoff legitimiert.

Normen laufen bekanntlich den Entwicklungen um Jahre – um nicht zu sagen Jahrzehnte – hinterher.

4.2 Bimodale Formmassen mit hohem Widerstand gegen Rissfortpflanzung

Die Entwicklung von bimodalen PE-Formmassen hat vor allem wegen des hohen Widerstandes gegen langsame Rissfortpflanzung dazu geführt, die Sicherheitsbeiwerte für Druckrohre aus PE 80 und PE 100 von früher 1,6 auf 1,25 zurückzuführen (z. B. Trinkwasseranwendungen).

Die Tatsache, dass kleine Fehlstellen bzw. Kerben bei langen Beanspruchungszeiten und/oder hohen Temperaturen zu einem spröden Versagen von PEHD-Rohren führen können (das Bruchbild zeigt einen kleinen Riss, der längs der Rohrachse verläuft), wird durch diesen Prozess des langsamen Risswachstums beschrieben. Dieser Versagensmechanismus entsteht, da bei Polyethylen infolge seiner teilkristallinen Struktur am Kerbgrund (Rissspitze) eine Spannungskonzentration zur Bildung der so genannten Crazing-Zone (beginnend als Nukleierungszone, siehe auch Abb. 6) führt.

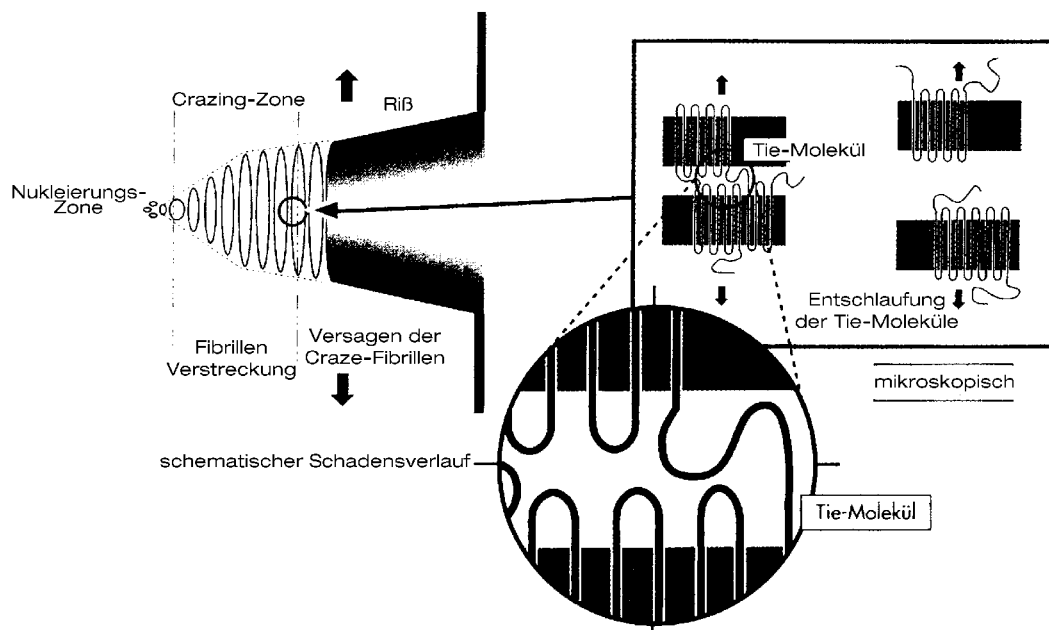


Abbildung 6: Prozess des langsamen Risswachstums

Die Crazing-Zone besteht aus einzelnen Craze-Fibrillen, die mit fortdauernder Belastung bis zum Versagen verstreckt werden. Dadurch erhöht sich immer wieder die Spannung im Kerbgrund, wodurch sich weitere Craze-Fibrillen aus der Nukleierungszone bilden. Das Versagen der Craze-Fibrillen ist durch das „Entschlaufen“ der Tie-Moleküle (Moleküle, die mehrere kristalline Bereiche miteinander verknüpfen) anschaulich beschrieben. Die ständige Wiederholung dieser Vorgänge führt zum langsamen Fortschreiten des Risses durch das Material.

Die neuen bimodalen Werkstoffe verfügen über mehr Seitenketten, die eine Verbindung zwischen den kristallinen Bereichen schaffen. Die Entschlaufung der Moleküle wird dadurch behindert – das Risswachstum gebremst.

Rissursachen sind unter anderem Kerben, die beim Verlegen oder Einbau oder bei unsachgemäßer Verarbeitung entstehen können. Kerbwirkungen können auch durch Lochen/Schlitzten (Sickerwasserrohre) sowie an Schweißverbindungen oder durch Inhomogenität im Material auftreten.

4.3 Punktlasten und Kerben als Beanspruchungskriterien

Das bei Punktlasten im Kiesfilter wichtige Verhalten gegen langsames Risswachstum wird zum Beispiel nach DVS 2203-4 Beiblatt 2 bestimmt. Diese aussagekräftige Prüfung ist in der DIN 8075 nicht vorgesehen.

Bei dieser Prüfung wird ein allseits gekerbter Probestab in einem Netzmittel bei 80° im Langzeit-Zugversuch mit einer Zugspannung von 4 N/mm² – bezogen auf den ungekerbten Restquerschnitt – belastet.

Das Ergebnis dieses **F**ull **N**otch **C**reep **T**estes ist der FNCT-Wert in Stunden.

Die Korrelation der Ergebnisse aus dem FNCT mit Messungen aus Zeitstandinnendruckversuchen wurde mehrfach nachgewiesen [1], [2], [3].

5 Prüfungen an Rohren

Aufgrund eines Schadenfalles an einer PE-Sickerrohrleitung wurde uns ein aus einer Deponie ausgebautes PE-Rohrstück durch Ingenieurbüro ICP, Karlsruhe, zur Begutachtung und Überprüfung zur Verfügung gestellt.

Dieses Rohrmuster wurde zur Bestimmung des FNCT-Wertes an Hessel Ingenieurtechnik weitergeleitet. Nachfolgend ist der Prüfbericht abgedruckt.

Vorbemerkung

Ziel der Untersuchungen ist es, den Widerstand von Proben aus der Rohrwand eines Sickerwasserrohres gegenüber langsamen Rissfortschritt im FNCT festzustellen.

Der Full Notch Creep Test (FNCT) dient zur Bestimmung des Spannungsrißverhaltens von Polymeren unter Verwendung von gekerbten Proben. Die Ergebnisse von FNCT-Versuchen korrelieren mit Zeitstandinnendruckversuchen an Rohren.¹

Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 12814-3² und Richtlinie DVS 2203 Teil 4; Beiblatt 2 (12/2001).³ Zur Abkürzung der Prüfzeit werden die Versuche in einer 2%igen wäßrigen Netzmittellösung (Arkopal N-100) durchgeführt.⁴

Prüfmuster

Das Prüfmuster (Schale aus extrudiertem Sickerwasserrohr ca. 350 mm x 260 mm, Wanddicke ca. 17 mm) wurde uns vom Auftraggeber zugeschickt (Probeneingang 13.12.2004). Weitere Angaben zu dem Prüfmuster sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Interne Bezeichnung	Rohstoff	Farbe
953	Polyethylen	schwarz

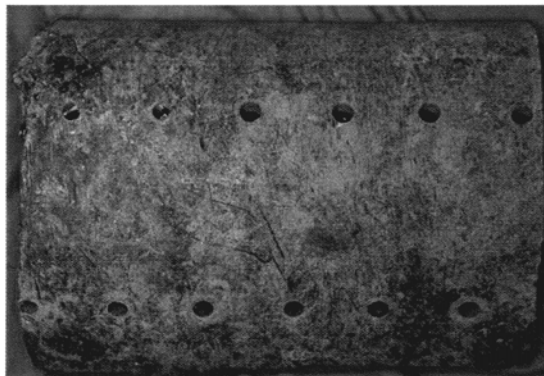
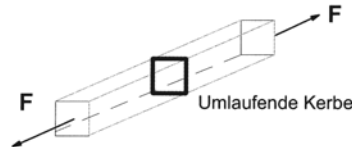


Abbildung 7: Zeitstandzugprüfungen an Proben aus einem Sickerwasserrohr, Auszug aus: Prüfbericht R04 04 953 Hessel Ingenieurtechnik, Seite 2

Probenvorbereitung und Prüfbedingungen

Aus dem Prüfmuster wurden 3 Probestäbe mit quadratischem Querschnitt (10 x 10 mm) in Längsrichtung aus der Rohrwandmitte herausgearbeitet.

Alle Proben wurden mittig gekerbt (s. Skizze).



3 Proben wurden im Zeitstand-Zugversuch nach Richtlinie DVS 2203 Teil 4, Beiblatt 2, bei der Prüftemperatur $80\text{ °C} \pm 0,2\text{ K}$ geprüft.

Die Prüfspannung von $4,0\text{ N/mm}^2$ wurde auf den verbleibenden ungekerbten Restquerschnitt bezogen. Als Prüfmedium wurde eine 2%ige wäßrige Lösung aus einem Netzmittel (Arkopal N-100) und deionisiertem Wasser verwendet.

Ergebnisse der Untersuchungen

Die bei den Zeitstanduntersuchungen bei 80 °C und $4,0\text{ N/mm}^2$ erreichten Standzeiten sind in Tabelle 2 angegeben.

Muster	Nr. - Probe	Standzeit (Stunden)	Geometrischer Mittelwert (Stunden)	Bemerkung
953	1	29,8	27,9	Sprödbrüche
	2	26,5		
	3	27,6		

Abbildung 8: Zeitstandzugprüfungen an Proben aus einem Sickerwasserrohr, Auszug aus: Prüfbericht R04 04 953 Hessel Ingenieurtechnik, Seite 3

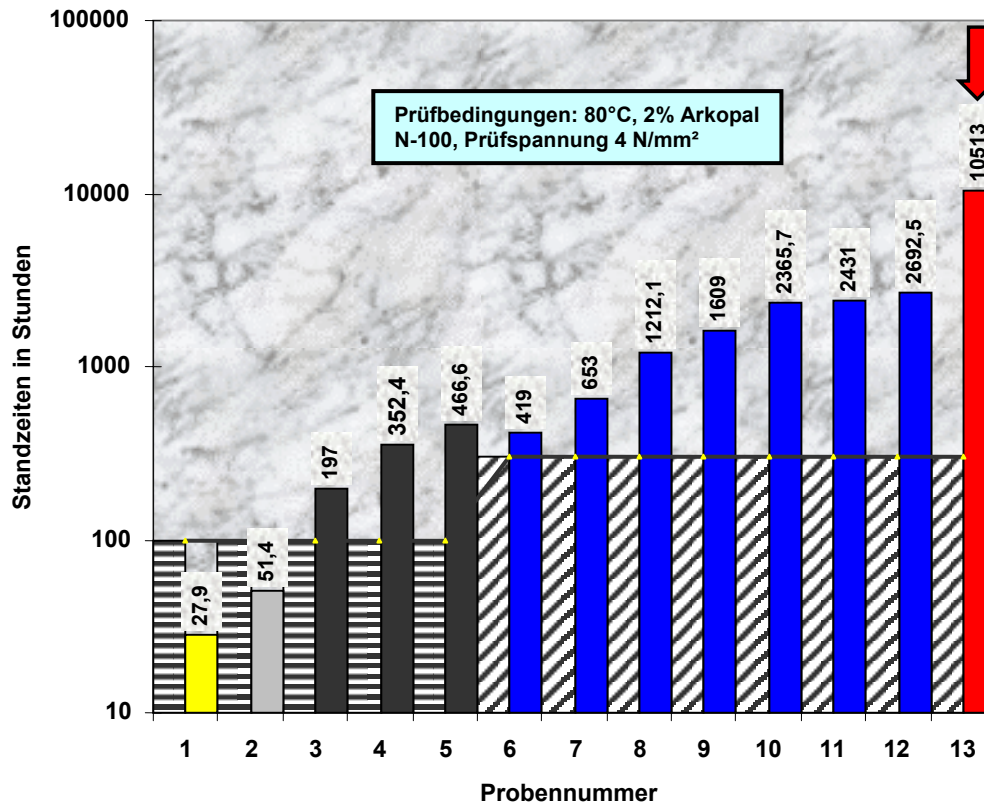
Das Ergebnis mit 27,9 h (Mittelwert) liegt deutlich unter den Anforderungen des DIBt. Dort werden in den Zulassungsgrundsätzen folgende Mindestanforderungen für v. g. Prüfbedingungen gestellt:

Für PE 80 $\geq 100\text{ h}$

Für PE 100 $\geq 300\text{ h}$.

In nachfolgender Tabelle sind die in unserem Auftrag von Dr. Hessel im letzten Jahr durchgeführten FNCT-Prüfungen wiedergegeben.

Standzeiten von gekerbten Proben aus Polyethylen - FNCT



- Probe 1: PEHD-Muster aus Deponie
- Probe 2: Wickelrohr Wettbewerb
- Probe 3-5: Messungen an PE-80-Rohren
- Probe 6-12: Messungen an PE-100-Rohren
- Probe 13: Sureline-Rohr Agru-Frank, Prüfung noch nicht abgeschlossen
- DIBt-Anforderungen an PE-80-Formmassen: > 100 h
- DIBt-Anforderungen an PE-100-Formmassen: > 300 h

Abbildung 9: Im FNCT ermittelte Standzeit aus verschiedenen Rohrwerkstoffen

Abgesehen von der aus aktuellem Anlass untersuchten Rohrprobe und einem Wettbewerbsprodukt liegen die gemessenen Werte deutlich über den Anforderungen des Deutschen Instituts für Bautechnik.

Für PEHD gibt es keine Zulassungsgrundsätze, daher auch keine Anforderungen!!!

Der Grund dafür ist, dass nach Ansicht des DIBt PEHD nicht mehr zeitgemäß ist – eine Zulassung ist nicht mehr erforderlich.

6 Schlussbetrachtung (Zusammenfassung)

Sickerleitungsrohre in Deponien müssen einer extremen Punktbelastung standhalten.

Die Kerbwirkung durch Perforation (Lochen oder Schlitzen) wirkt sich ebenfalls auf mögliche Rissbildung aus.

Für diese Anwendung ist daher nach unserer Meinung ein PE-Werkstoff mit einem nachgewiesenen

FNCT-Wert > 500 h

zu fordern.

In der DIN 8075 (Stand August 1999) steht folgender wesentliche Satz:

„Die bisher mit 50 Jahren angesetzte Betriebsfähigkeit wird aufgrund langjähriger Versuche und Erfahrungen für PE-Rohre mit mindestens 100-jährige Betriebsfähigkeit erweitert.“

Dazu wird eine entsprechende Langzeitstabilisierung vorausgesetzt! Hierzu gibt der OIT- (Oxidations-Induktions-Time)Wert nach DIN EN 728 Hinweise. Leider wird in der DIN 8075 auch zur Stabilisierung keine Prüfung gefordert.

Das DIBt schreibt in den Zulassungsgrundsätzen einen OIT-Mindestwert **> 30 Minuten (200°C) bzw. > 15 Minuten (210°C)** vor. Bei gängigen Rohrqualitäten wird in der Regel ein OIT > 50 Minuten (200°C) erreicht. Bei unstabilierten PEHD-Typen liegt der an Rohren gemessene OIT-Wert unter 1 Minute. Für einen solchen – nicht ausreichend stabilisierten – Werkstoff sind bei entsprechender Belastung 50 Jahre Gebrauchsfähigkeit in Frage zu stellen.

Die Anforderungen an PE-Rohre in Deponien sind ebenso für Schachtbauwerke vorauszusetzen.

Für Rohre und Schächte außerhalb der Deponie sollte bei einer Sandbettung zumindest eine DIBt-Zulassung für Formmasse, Rohre, Wickelrohre (Schachtmäntel) und Halbzeuge vorausgesetzt werden.

Die Bezeichnung PEHD darf es einfach bei hochbelasteten Rohrsystemen nicht mehr geben!

Quellenverzeichnis

- [1] Fleissner, M.: Kunststoffe 77 (1987)
- [2] Hessel, J. und Mauer, E.: Materialprüfung 36 (1994)
- [3] Hessel, J.: Mindestdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandeinbettung, Teil 1+2, 3 R International (2001)
- [4] Hessel Ingenieurtechnik GmbH, Prüfbericht R 04 04 953: Zeitstandzugprüfungen an Proben aus einem Sickerwasserrohr zur Bestimmung des Widerstandes gegenüber langsamem Rissfortschritt im Full Notch Creep Test (FNCT), (2004)
- [5] ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner, Archivfotos: Abbildung 2, 3 und 4