

# Schäden in PE-HD-Sickerrohren und Möglichkeiten der Sanierung

Dipl.-Ing. Gerd Burkhardt, Dipl.-Ing. Wolfgang Edenberger<sup>1</sup>

## 1 EINLEITUNG

Seit mehr als 20 Jahren haben sich Rohre PE-HD als diejenigen herausgestellt, welche den Anforderungen an Sickerrohre in (Hausmüll-) Deponien am meisten entsprechen. Sie sind resistent gegenüber allen möglichen Inhaltsstoffen im Deponiesickerwasser und können bei entsprechender Dimensionierung auch hohe Auflasten durch die Überdeckung mit Abfall überstehen. Eventuellen Verformungen des Untergrunds (Setzungen durch Auflast etc.) können Sie flexibel folgen.

Trotzdem werden bei der jährlichen TV-Inspektion von Entwässerungssystemen in Deponien immer häufiger auch Schäden an PE-HD-Sickerrohren festgestellt. In diesem Beitrag sollen in einer Art Bestandsaufnahme Schäden bzw. Schadensbilder hinsichtlich deren Relevanz für eine dauerhafte Entwässerung der Deponie beleuchtet und deren häufigste Ursachen benannt werden. Des Weiteren sollen neue Erkenntnisse bei der Erkennung und Interpretation der Schäden sowie der technische Stand von Sanierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

## 2 SCHÄDEN AN SICKERROHRLEITUNGEN VON DEPONIE

Zunächst soll kurz eine Übersicht über häufig vorkommende Schäden in Deponien gegeben werden. Folgende Schäden können sich an Leitungen in Deponien generell ergeben:

- Senken / Versackungen (meist verbunden mit Wasseraufstau)
- Unzulässige Verformungen ( $\delta_v \geq 6$  bzw. 9 %)
- Risse (Risse sind eigentlich ein untypischer Schaden für biegeeweiche PE-HD-Leitungen, treten jedoch in letzter Zeit immer häufiger auf)

---

<sup>1</sup> ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH, Karlsruhe / Urbach

- Schäden oder Mängel durch Mängel beim Verlegen und Verschweißen (z. B. Verdrehungen der Rohre, Muffenspalte, Muffenversatz, falsche oder ungenügende Bettung)

### **3 SENKEN**

Senken (Versackungen) stellen sich durch örtliche Verformung des Untergrunds oder Rohraufagers ein. Ursache hierfür können örtlich schlechterer Baugrund (z. B. ungenügend verdichtetes Auflager oder schlecht verdichtete mineralische Abdichtung) oder örtlich erhöhte Lasten (z. B. Überfahrten) sein. Der Rohrquerschnitt bleibt in der Regel - abhängig vom Biegeradius - weitgehend erhalten.

Im Bereich von Senken ergibt sich, abhängig vom Längsgefälle der Leitung, häufig ein Aufstau von Sickerwasser auf der Basisabdichtung. Da eine Behebung des Schadens in der Regel nur durch großräumiges Freilegen möglich ist, werden geringe Senken in entsprechend überschütteten Deponien in der Regel hingenommen.

Ursache für diese Senken ist oft auch ein ungenügend verdichtetes oder nachträglich wieder aufgeweichtes bzw. falsches Rohrauflagermaterial. In Süddeutschland wurde häufig gefordert, dass das Rohrauflager aus bindigem Material (z. B. mineralischem Dichtungsmaterial, fertigen Mischungen aus Sand und Bentonit etc.) ausgebildet wird. Teilweise wurde dies sogar in Genehmigungsunterlagen als Auflage formuliert. Mit bindigen Materialien lassen sich jedoch in der Regel nur ungenügende Bettungsmodule erreichen. Zudem besteht während der Bauzeit oder zu Beginn des Deponiebetriebs die Gefahr, dass das Material durch Niederschlagswasser wieder aufgeweicht wird.

Es kann daher nur empfohlen werden, das Rohrauflager aus nicht bindigen Materialien (Sand, Splitt) auszubilden. Zwar besteht auch hier die Gefahr, dass das Material während der Bauausführung durch Niederschläge erodiert wird. Doch ist eine Behebung solcher Schäden einfach möglich.

### **4 VERFORMUNGEN DES ROHRQUERSCHNITTES**

Verformungen des Rohrquerschnittes ohne Risse treten nur bei sogenannten biegeweichen Rohren (Kunststoffrohren) auf. Ursache hierfür sind zu hohe Lasten (bzw. eine fehlende oder fehlerhafte Rohrstatik nach dem Stand der Technik), unsachgemäße Auflagerung (Rohrbettung), starke Senken (Versackungen) oder zu hohe Temperaturen. In

Deponien wurden Temperaturen bis zu 80 °C festgestellt /11/. Noch höhere Temperaturen können in Schlackendeponien oder bei Deponiebränden auftreten.

Leider wird heute noch die Dimensionierung der Rohre hinsichtlich der Auflasten oft erst in der Bauausführung vorgenommen. Die Erstellung der Rohrstatik wird häufig als Bauleistung mit ausgeschrieben. Hierzu ist zu sagen, dass die Erstellung einer Rohrstatik sicherlich zu den Aufgaben des Planers gehört, wenn sie auch als Sonderleistung separat zu honorieren ist. Eine Dimensionierung in der Bauphase ist für die Planung von Details zu spät bzw. verschiebt Planungsleistungen auf die Baufirma.

Für biegeweiche Rohre ist eine vertikale Durchmesseränderung  $\delta_v$  im Langzeitnachweis von 6 % zulässig. (Berechnung  $\delta_v$  siehe ATV A 127 /1/ und ATV M 127 /2/). Wird die Standsicherheit nach dem Ansatz der Theorie 2. Ordnung gemäß den Bemessungsgrundsätzen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) nachgewiesen, ist unter gewissen Voraussetzungen eine Verformung von bis zu  $\delta_v = 9$  % zulässig. LARJOMAA /9/ gibt den in Tabelle 2 aufgeführten Klassifizierungsvorschlag zur Beurteilung verformter relativ dünnwandiger Kanalrohre:

**Tabelle 1:** Schwedischer Klassifizierungsvorschlag zur Beurteilung der Verformung biegeweicher Kanalrohre /9/

Klasse	Querschnittsveränderungen	Beurteilung
I	$\delta_v < 8$ %	Tauglich
II	$8$ % < $\delta_v < 12$ %	Tauglich mit Vorbehalten
III	$12$ % < $\delta_v < 16$ %	Tauglich mit Bedenken
IV	$\delta_v > 16$ %	Untauglich

Ein vollständiges Beulen (Zusammenfallen des Rohrquerschnittes) bei Kanalrohren aus PE-HD tritt nach LAUER und BRÖMSTRUP /4, 10/ bei etwa 35 bis 40 % Verformung ein. Der Entwurf der GDA-Empfehlung A 4-16 gibt für Sickerrohre aus PE-HD in Deponien folgende Hinweise /6/:

Überschreiten die sich einstellenden Verformungen ( $\delta_v$ ) 9 %, so ist die betreffende Haltung auf eine Verstärkung des Schadensbildes über die Zeit hin zu beobachten. Bei

Verformungen über etwa 15 % ist die Kamerabefahrung und Beobachtung zu intensivieren. Bei Verformungen ab etwa 25 bis 30 % sind wegen des drohenden Kollabierens geeignete Sanierungsmaßnahmen einzuleiten. Für PVC-Rohre gelten diese Empfehlungen nicht.

Diese Empfehlungen können Tabelle 2 nochmals zusammengefasst entnommen werden.

**Tabelle 2:** Handlungsempfehlungen des Arbeitskreises 6.1 „Geotechnik der Deponien“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) /6/

Querschnittsveränderungen	Beurteilung / Handlungsempfehlung
$\delta_V \leq 9 \%$	Verformungen unbedenklich
$> 9 \% < \delta_V \leq 15 \%$	tauglich mit Vorbehalten, Verformung ist zu beobachten
$> 15 \% < \delta_V < 30 \%$	Verstärkte Beobachtung des verformten Bereichs
$\delta_V \geq 30 \%$	Sanierungsmaßnahmen sind einzuleiten, da totales Versagen droht

Bei der Beurteilung von Querschnittsverformungen ist des weiteren von Belang, ob das betreffende Rohr zukünftig durch zusätzliche Aufschüttung (durch Abfall oder Profilierungsmaterial) höhere Lasten erfährt, oder ob das Rohr nicht mehr zusätzlich belastet wird. In letzterem Falle kann sich eine stabile Situation einstellen, da sich das Rohr durch die Verformung zumindest teilweise der Last entzieht.

Erfahrungen aus der Praxis haben gezeigt, dass der Zustand verformter Rohre durchaus stagnieren kann (zumindest über Beobachtungszeiten von bis zu einer Dekade). Hier kann auf Sanierungsmaßnahmen verzichtet werden oder sie können zumindest verschoben werden. In diesem Fall ist die Verformung allerdings weiterhin sorgfältig zu beobachten.

Des weiteren sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Grad der Verformung über das Kamerabild oft nicht exakt gemessen werden kann. Daher sind Abweichungen

von mehrern Prozent als Fehler durchaus möglich. Eine exaktere Messung der Verformungen kann z. B. über eine spezielle Software vorgenommen werden. Hierzu muss die TV-Befahrung jedoch über ein entsprechend ausgerüstetes Fachbüro ausgewertet werden.

Typische Verformungen von PE-HD-Rohren weisen in ihrer Entwicklung verschiedene Stadien auf (Bild 1 bis 3), die erfahrungsgemäß auch noch in extremen Ausprägungen zum Stillstand kommen können. Stagnieren die Verformungen jedoch nicht, führt dies zum Kollabieren und damit dem völligen Versagen der Leitung.



Bild 1 bis 3: Entwicklungsstadien bei der Verformung von PE-HD-Sickerrohren

## 5 RISSE

Risse treten normaler Weise nur bei sogenannten biegesteifen Rohren (wie z.B. Steinzeug) auf. Sie werden nach ATV M 143 /3/ unterschieden in:

- Längsrisse
- Querrisse
- Risse von einem Punkt ausgehend

Längsrisse in biegesteifen Rohren z. B. im Bereich der Kämpfer, der Sohle und des Rohrscheitels müssen nicht zwangsweise zum völligen Versagen einer Rohrleitung führen. Sie sind jedoch bei den Kamerabefahrungen sorgfältig zu beobachten. Dasselbe gilt für reine Querrisse /5/.

Sich verzweigende Risse (längs und quer) führen zu einer Scherbenbildung und letztlich zu Rohrbruch (als Rohrbruch wird das Fehlen mehr oder weniger großer Stücke der Rohrwandung bezeichnet) sowie im Extremfall zum Einsturz der Leitung.

Bei beginnender Scherbenbildung besteht die Gefahr, dass durch Spülarbeiten im Rohr erste Scherben aus der Rohrwandung herausgelöst werden (durch den Hochdruckstrahl oder einen schlagenden Spülkopf).

Bei den in diesem Beitrag betrachteten Leitungen handelt es sich jedoch um biegeeweiche Rohre (PE - HD). Ein derartiges Schadensbild ist für biegeeweiche Rohre eigentlich atypisch. Es traten jedoch in den letzten Jahren immer häufiger auch Risse in PE-HD-Rohren auf, wobei diese Schäden aufgrund des Materials nach erstmaligem Auftreten ständig weiter fortschreiten.

Auffällig ist, dass die Schäden verstärkt bei Deponien auftraten, bei welchen die PE-Leitungen auf einer Zwischenabdichtung verlegt wurden. Hier wurden, wahrscheinlich aufgrund der Wärmebildung ober- und unterhalb der Dichtung sehr hohe Temperaturen von dauerhaft über 50 °C erreicht.

Als Ursache für eine Rissbildungen in PE-HD-Rohren können eventuell ungeeignete PE-HD-Formmassen oder dauerhaft hohe Temperaturen (s. o.) und eine dadurch stark beschleunigte Versprödung des Rohrmaterials vermutet werden.

Eine zusätzliche Beanspruchung der Rohre besteht in der Lochung bzw. Schlitzung. Durch die Lochung und insbesondere die Schlitzte wird eine Kerbwirkung mit einer

Spannungsüberhöhung an bestimmten Stellen verursacht, die zu einer Rissbildung führen kann (siehe hierzu Bild 4). Eingehendere Bearbeitungen zu dieser Problematik sind derzeit im Gange.



Bild 4: Risse, ausgehend von einem Schlitz

Ebenso wie in geschlitzten Rohren treten auch in gelochten Rohren derartige Rissbilder auf (Bild 5).



Bild 5: Typischer Längsriss beginnend an einem Drainageloch

Immer häufiger wird festgestellt, dass diese Art der Risse nicht unbedingt mit einer vorherigen größeren Verformung der Leitung einhergeht. Es wurden durchaus Rissbildungen an Rohren beobachtet, welche unterhalb der zulässigen Grenzen verformt waren (s. o.).

Haben sich im Bereich der Lochung oder Schlitzung erst einmal Risse gebildet, schreiten diese immer weiter fort. In aller Regel geschieht dies von Loch zu Loch (Bild 6) oder über die Ecken der einzelnen Drainageschlitzte.

Derartige Strukturen können sich über mehrere Meter fortsetzen. Anders als bei den im Steinzeugrohr verwendeten Steckmuffen, an denen in aller Regel Streckenrisse unterbrochen werden und sich dadurch verlieren, springen die Risse in den formschlüssigen Schweißverbindungen der PE-HD Rohre in den nächsten Rohrstrang über.



Bild 6: Sich fortsetzender Riss von Loch zu Loch

Als besonders problematisch erscheint jedoch die Tatsache, dass sich Risse nicht nur an den Schwachstellen (Loch oder Schlitz) einstellen, sondern auch in der Rohrsohle oder im Rohrscheitel (Bild 7). Prägnanterweise zeigen sich derartige Risse oftmals ohne vorherige Verformung der Leitung.



Bild 7: Riss in der Rohrsohle einer PE-HD Leitung

Kommt es zu einer Überlagerung der verschiedenen Längsrisse mit Querrissen, kann dies zu einem Einsturz der PE-HD-Leitung führen, wie er ansonsten nur von den biegesteifen Steinzeugleitungen bekannt ist (Bilder 8 und 9).



Bilder 8 und 9: Einsturz einer gelochten und einer geschlitzten PE-HD Leitung

## 6 SCHÄDEN UND MÄNGEL DURCH FALSCHER VERLEGUNG ODER SCHWEISSUNG

### 6.1 Verdrehungen des Rohres

In manchen Fällen wurde beobachtet, dass Rohre verdreht verlegt wurden. In diesen Fällen wurde oft nicht auf die Ausbildung der Fließbettsohle geachtet, so dass die Lochung oder Schlitzung nach unten oder seitlich verlegt wurde. Hier hat nicht nur die Baufirma fehlerhaft verlegt, sondern auch die örtliche Bauüberwachung versagt. Die Rohre hätten so niemals abgenommen werden dürfen.

Bei dünnwandigeren Rohren (z. B. bis PN 10) besteht in diesen Fällen die Gefahr, dass beim Reinigen mittels Hochdruckspülung Bettungsmaterial ausgespült wird und so die Bettung des Rohres verschlechtert wird.

Um solche Mängel zu vermeiden, sollte die Abnahme der Leitung durch eine Kamerafahrt nach der Verlegung erfolgen.

### 6.2 Muffenspalte und Muffenversatz

Muffenspalte ergeben sich durch unsachgemäße Rohrverlegung, zu großen Abwinkelungen und bei PE-HD-Rohren insbesondere durch Nichtbeachtung des Temperaturdehnungsverhaltens (große Ausdehnung bei Erwärmung). Muffenspalte in Sickerrohrlei-

tungen mit Überschiebmuffen sind ohne Belang solange sie Spülarbeiten und die TV-Befahrung der Rohre nicht beeinträchtigen sowie kein Ausspülen von Bettungsmaterial auch im Hinblick auf die Standsicherheit bzw. kein Einbrechen des Flächenfilters zu befürchten ist. Dies gilt im Wesentlichen auch für Muffenversätze.

Muffenspalten bzw. -versätze bei ungelochten Kanalrohren außerhalb der Ablagerungsfläche deuten auf Undichtigkeiten hin. Sie sind in jedem Fall zu prüfen und gegebenenfalls zu Sanieren.

Muffenspalte und -versätze ergeben sich durch unsachgemäße Verlegung. Hier kann durch eine eingehende Überwachung während der Verlegung sowie durch eine TV-Inspektion vor der Abnahme der Leitungen entgegengewirkt werden.

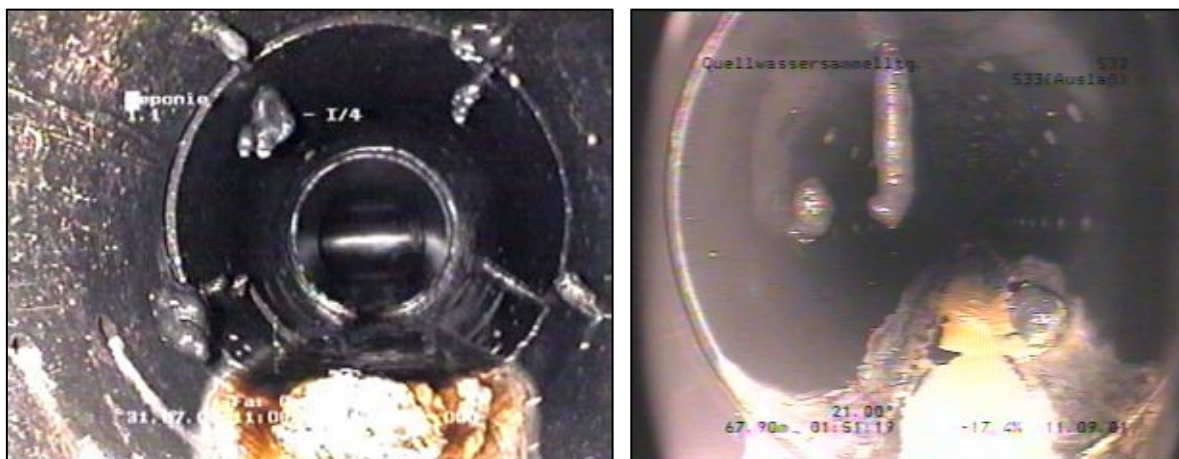
### **6.3 Zu große Schweißwulste**

Schweißwulste entstehen bei jeder Spiegel-Stumpfschweißung. Dies ist unvermeidbar und stellt bei fachgerechter Schweißung auch kein Problem für die TV-Inspektion oder die Reinigung dar. Durch zu hohen Anpressdruck, durch zu langes Anpressen oder zu hohe Schweißtemperaturen entstehen jedoch zu große Schweißwulste, die im späteren Betrieb zu Schwierigkeiten führen

Diese Mängel müssen spätestens bei der TV-Inspektion zur Abnahme erkannt und im Rahmen der Gewährleistung behoben werden.

### **6.4 Fehlerhafte Verschweißung mittels Elektroschweißmuffen.**

Bei der Verschweißung mittels Elektroschweißmuffen ist darauf zu achten, dass sich keine Lochung oder Schlitzung im Schweißbereich befindet, da das durch den Schweißvorgang verflüssigte PE-HD-Material ansonsten in das Rohrinne gelangen kann. Siehe hierzu Bilder 10 und 11.



Bilder 10 und 11: Eingedrungenes PE-Material durch Schweißung mittels E-Muffe im gelochten Bereich

## 7 STAND DER SCHADENSANALYSE UND SANIERUNGSMÖGLICHKEITEN

Insbesondere durch die immer häufiger feststellbaren Rissbildungen sowie die schon seit längerem bekannten Verformungsbilder in PE-HD-Leitungen wollte ICP zwei zentrale Projekte zu Sanierungstechniken durchführen.

1. Antrag zur Durchführung eines Forschungsvorhabens bei der Bundesstiftung Umwelt durch ICP mit dem Ziel der Ursachenfindung für die aufgezeigten Rissbilder sowie der Übertragung der Erkenntnisse auf die Ausbildung der Formmassen zur Herstellung von PE-HD Rohren. Gleichzeitig sollte eine Handlungsempfehlung zur rechtzeitigen bedarfsgerechten Sanierung bestimmter Schadensstadien erarbeitet werden.
2. Pilotprojekt zur Rückverformung und Stabilisierung von PE-HD Sickerwasserleitungen.

Das Vorhaben Nr. 1 wurde mit der Begründung abgelehnt, dass End-of-Pipe-Technologien grundsätzlich nicht gefördert werden.

Das mehr als 3 Jahre laufende Pilotprojekt zur Rückverformung und Stabilisierung von PE-HD Leitungen wurde ohne ein endgültiges Resultat eingestellt.

Nach wie vor stellen das statische, das dynamische und das statisch-dynamische Berstverfahren (Rohrcracking) die derzeit umsetzbaren Techniken zur Sanierung von verformten PE-HD Leitungen dar, welche den größten Erfolg versprechen. Unter günstigen Randbedingungen werden Einzugsängen bis über 50 m erreicht.

Hierbei wird die bestehende Leitung mit einem Schneidkopf (Bild 12) aufgetrennt und im Nachgang eine neue PE-HD Leitung eingezogen. Der Einzug der neuen Leitung erfolgt in der Regel über tiefe Baugruben wie z.B. Tandemschächte (Bild 13) oder kreisrunde Gruben mit Spritzbeton-Verbau.



Bilder 12 und 13: Schneidkopf und Baugrube für die Durchführung des PE-HD-Berstverfahrens

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

PE-HD-Rohre sind die nach derzeitiger Kenntnis die am Besten geeigneten Sickerrohre für den Einsatz in Hausmülldeponien. Sofern Fehler bei der Wahl des PE-Ausgangsmaterials, bei der Dimensionierung (Rohrstatik nach dem Stand der Technik!), bei der Bettung und beim Einbau vermieden werden, kann von einer langen Standzeit der Rohre ausgegangen werden.

Es ist jedoch aufgrund der hohen Temperaturbeanspruchung bei gleichzeitigem Angriff chemischer Substanzen (Deponiesickerwasser) darauf zu achten, dass nur hochwertige PE-Formmassen zur Fertigung der Rohre zum Einsatz kommen. Dabei reicht ein Verweis auf die einschlägigen DIN-Normen („z. B: DIN 8075 Rohre aus Polyethylen... 1999“) in der Ausschreibung nicht aus. Es müssen zusätzliche Anforderungen an die Formmasse der Rohre gestellt werden.

In der DIN 8075 (Stand August 1999) /7/ 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, aber es werden keine spezifischen Werte vorgegeben. Dabei gäber der OIT- (Oxidation-Induction-Time) Wert nach DIN EN 728 Hinweise hierfür.

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 unstabilisierten 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 /8/.

Das bei Punktlasten im Kiesfilter wichtige Verhalten gegen langsames Risswachstum wird zum Beispiel nach DVS 2203 Teil 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/mm<sup>2</sup> - bezogen auf den ungekerbten Restquerschnitt – belastet. Das Ergebnis dieses Full Notch Creep Tests ist der FNCT – Wert in Stunden.

Als Mindestforderungen an PEHD-Sickerrohre in Deponien, die in Ausschreibungen mindestens gefordert werden sollten, seien daher genannt:

- der OIT-Wert, welcher mindestens 30 Minuten (bei 200 °C) bzw. 15 Minuten (bei 210 °C) betragen sollte und
- der FNCT-Wert, welcher bei 80 °C eine Standzeit von mindestens 500 (besser 1000) Stunden ergeben sollte.

In der Regel werden diese Werte (zumindest die unteren der genannten Werte) bei PE 100 eingehalten.

## 9 QUELLENVERZEICHNIS

- /1/ Abwassertechnische Vereinigung (ATV): ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 127 „Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen“, August 2000
- /2/ Abwassertechnische Vereinigung (ATV): ATV- Merkblatt M 127 1, Teil: „Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungsleitungen für Sickerwasser aus Deponien – Ergänzung zum Arbeitsblatt A 127, März 1996
- /3/ Abwassertechnische Vereinigung (ATV): Merkblatt M 143, Teile 1 bis 3, Inspektion, Instandsetzung Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und Leitungen, Dez. 1989
- /4/ Brömstrup, H. (1983): Das Tragverhalten biegeweicher Rohre, Vortrag im Rahmen des Seminars „Wechselwirkung zwischen Statik und Bauausführung erdverlegter Abwasserkanäle“, Hamburg 15./16.03.1983
- /5/ Burkhardt, Edenberger, Egloffstein und Schneider (1996): Schäden an Entwässerungsleitungen und mögliche Sanierungen, Müllhandbuch Kennziffer 4596, E-rich Schmidt Verlag, 1996
- /6/ Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT, ): Empfehlung A 4-16 (Entwurf)
- /7/ Deutsches Institut für Normung DIN 8075 (1999): Rohre aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) – Allgemeine Güteanforderungen, Beuth Verlag Berlin
- /8/ Frank, Ph. (2005): Vortrag anlässlich der 21. Fachtagung „Die sichere Deponie“, 11./12. Februar 2005, SKZ/AK GWS, Würzburg
- /9/ Larjomaa, I. (1980): Ergebnisse der Überprüfung erdverlegter Kanalisationsrohre, Straßen und Tiefbau, s + t, 1980
- /10/ Lauer, H. (1978): Statische Berechnung von erdverlegten Entwässerungskanälen aus PVC-Hart und PE-hart, 3R International 17 (1978), Heft 2
- /11/ Müllner, B. (1993): Temperaturmessungen in Hausmülldeponien, Vortrag anlässlich des 9. Nürnberger Deponieseminars, LGA Nürnberg, 1993