

## **Forschungsvorhaben**

### **Bemessung von Rohren beim Berstliningverfahren in Deponien**

**Untersuchung im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU)**

**Auftrag:** Bemessung von Rohren beim Berstliningverfahren in Deponien

**Auftraggeber:** Freistaat Bayern  
vertreten durch das  
Bayerische Landesamt für Umweltschutz  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

**Sachbearbeitung:** Landesgewerbeanstalt Bayern (LGA)  
Tillystraße 2  
90431 Nürnberg  
Hr. Dr. Hoch / Hr. Stegner      Tel. 09 11 / 6 55 -48 43  
Fax 09 11 / 6 55 - 48 99

Wölfel  
Beratende Ingenieure GmbH & Co.  
Max-Planck-Straße 15  
97294 Höchberg  
Hr.Dr.Henkel / Hr. Reuchlein      Tel. 09 31 / 4 97 08 - 3 10  
Fax 09 31 / 4 97 08 - 1 50

Nürnberg, den **06.09.2000**

# Inhalt

- 1. Aufgabenstellung**
- 2. Literatur und Unterlagen**
  - 2.1 Verwendete Literatur
  - 2.2 Wissenschaftliche Auswertung
- 3. Voraussetzungen unter denen die Arbeit durchgeführt wird**
- 4. Planung und Ablauf der Arbeit**
  - 4.1 Vorarbeiten
  - 4.2 Praktische Untersuchungen auf Baustellen
  - 4.3 Theoretische Untersuchungen
  - 4.4 Ergebnis /Auswertung
- 5. Gesamtproblematik / bisheriger Stand der Technik**
  - 5.1 Gesamtproblematik
  - 5.2 Stand der Technik
  - 5.3 Diskussion der vorhandenen Daten
- 6. Fortschritte beim Berstliningverfahren durch Untersuchungen anderer Institute oder Firmen während des Zeitraumes dieser Arbeit**
- 7. Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden**
  - 7.1 Deponie Schwaiganger
  - 7.2 Deponie Kahlenberg
  - 7.3 Materialuntersuchungen
  - 7.4 Bodenuntersuchungen
  - 7.5 Statische Berechnungen mit der FE-Methode
- 8 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse und ihre praktische Anwendbarkeit**
  - 8.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse
    - 8.1.1 Material
    - 8.1.2 Baugrunduntersuchungen / Rohreinbau
    - 8.1.3 Einwirkungen während des Einziehvorganges
      - 8.1.3.1 Versuch auf der Deponie Schwaiganger
      - 8.1.3.2 Auswertung eines Rohrabrisses auf der Deponie Kahlenberg

- 8.1.4 Statische Berechnungen / Finite Elemente-Berechnung mit Parameterstudien
- 8.2 Bewertung und praktische Anwendung der erzielten Ergebnisse
  - 8.2.1 Material
  - 8.2.2 Einbau
  - 8.2.3 Statische Berechnungen
    - 8.2.3.1 Vorbemessung
    - 8.2.3.2 Zusammenfassende Bewertung der FE-Berechnungen

## **9. Zusammenfassung**

## **10. Leitfaden der erforderlichen Maßnahmen beim Einsatz des Berstliningverfahrens auf Deponien**

- 10.1 Ausschreibungs- und Planungsphase
- 10.2 Material
- 10.3 Kontrollen während der Bauausführung
- 10.4 Statische Berechnungen
  - 10.4.1 Vorbemessung
  - 10.4.2 Endgültige statische Berechnung
- 10.5 Nachfolgearbeiten

## **11. Datenblätter**

- 11.1 Vorstatik
- 11.2 Endgültige statische Berechnung

## 1. Aufgabenstellung

Sickerwasserrohre auf der Sohle von Deponien dienen der kontrollierten Ableitung von schadstoffbelastetem Wasser. Ihre Funktionstüchtigkeit ist eine wesentliche Voraussetzung für die gefahrlose Ablagerung von Abfallstoffen.

Schadhafte Sickerwasserleitungen bilden eine Gefährdung für die Betriebssicherheit einer Deponie. Das Berstlining Verfahren stellt eine kostengünstige und umweltschonende Methode zur Sanierung solcher Rohrsysteme dar. Eine Berstrakete durchfährt das vorhandene defekte Altrohr, zerstört dieses dabei und verdrängt die Restteile in die Leitungszone. Gleichzeitig wird die Rohrleitungszone aufgeweitet und ein an der Rakete befestigtes Neurohr, dessen Durchmesser auch größer als der des Altrohres sein kann, wird eingezogen. Es wird zwischen statischem und dynamischem Berstlining unterschieden. Beim dynamischen Bersten, das zum Zeitpunkt dieses Berichtes in Deponien hauptsächlich zum Einsatz kam und das daher im Folgenden vornehmlich behandelt wird, wird die Berstrakete mittels Schlagenergie, die durch einen im Kopf der Rakete befindlichen Kolben, der bei einer Masse von mehr als 200 kg mit einer Frequenz von 270-300 Schlägen pro Minute schlägt, aufgebracht. Zusätzlich wird die Rakete mittels eines Zugseiles geführt. Je nach Ausbildung des Rohraufagers, der vorhandenen Einbettungszone und der Überdeckungshöhe werden sehr unterschiedliche Vortriebsgeschwindigkeiten erreicht.

Der Aufwand an Aufgrabungen und Müllumlagerungen in Deponien und die damit verbundenen Emissionen werden so im Vergleich zu herkömmlichen offenen Verlegetechniken wesentlich gesenkt. Eventuell vorhandene Oberflächenabdichtungssysteme müssen nicht oder nur lokal begrenzt rückgebaut werden. Im Allgemeinen stimmen dabei der Außendurchmesser von Alt- und Neurohr nicht überein, so daß eine eindeutige Einbettungssituation in ein passgenaues Auflager und die exakte seitliche Bettung verfahrensbedingt nicht vorausgesetzt werden kann. Der Einziehvorgang kann ebenfalls Auswirkungen auf die Lage und Einbettung des Neurohres haben und führt zu zusätzlichen Einwirkungen auf die Rohre.

Eine übliche rohrstatische Berechnung nach den anerkannten Regelwerken (z.B. ATV A/M127 /1/ bzw. /7/, /2/) setzt definierte Einbauverhältnisse voraus und kann deshalb bei den im Berstverfahren verlegten Leitungen nicht angewendet werden.

Um eine dauerhafte Funktion der neuen Leitungen zu gewährleisten, sind zur Erstellung einer zutreffenden statischen Berechnung weitergehende Untersuchungen von Rohrwerkstoff, Baugrund und Einbau erforderlich.

Im Folgenden wird ein Leitfaden zur Dimensionierung der neuen Sickerwasserleitungen erarbeitet, nach dem Standsicherheitsnachweise für die mit dieser Sanierungsmethode eingebauten Sickerwasserrohre mit abgesicherten Parametern und zutreffenden Lastfällen erstellt werden können.

## 2. Literatur und Unterlagen

### 2.1 Verwendete Literatur

- /1/ ATV-Regelwerk-Abwasser-Abfall, Arbeitsblatt A 127, Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen, 2. Auflage 1988
- /2/ ATV Merkblatt M 127 Teil 1, Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungsleitungen für Sickerwasser aus Deponien, März 1996
- /3/ G. Sonntag: Die Stabilität dünnwandiger Rohre im kohäsionslosen Kontinuum, Felsmechanik und Ingenieurgeologie Vol. 4/3, 1966 Springer Verlag
- /4/ Vorläufige Bemessungsgrundsätze für Bauteile in Deponien - Rohrleitungen aus PE-HD für Basisentwässerungssysteme - Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin 11/95
- /5/ Berechnung von Kunststoffrohren aus Hostalen für die Sanierung von Rohrleitungsnetzen durch Relining, Technische Dokumentation der Firma Hoechst
- /6/ Beanspruchung eines Relining-Rohrstranges beim Einziehvorgang, H.Zimmermann, 3R international 30(1991) Heft 9 Seiten 524- 531
- /7/ ATV-Regelwerk-Abwasser-Abfall, Arbeitsblatt A 127, Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen, Entwurf der 3. Auflage Okt. 1997
- /8/ Hoch, A.: Statische Überlegungen und Berechnungen bei der Erneuerung und Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen, Vortragsmanuskripte für das SKZ in Würzburg zur Fachtagungsreihe "Umweltschutz durch Kunststoffrohrsysteme in der Abwasserentsorgung für Neuverlegung und Sanierung" in den Jahren von 1990 - 1995.
- /9/ Hoch, A.: Probleme der Rohr- und Schachtstatik, Standsicherheitsnachweise, Abfallwirtsch. J. 4 (1992).
- /10/ Hoch, A. Lottner, U., Zanzinger, H.: Statische Berechnung von Rohrleitungen in Sickerwasserentsorgungssystemen bei Abfalldeponien, Müll und Abfall, 1 (1993).
- /11/ Doll, H., Hoch, A.: Standsicherheitsnachweise für Liner mit der Finite-Elemente-Methode, TIS 6 (1996).
- /12/ Hoch, A., Stegner, A.: Bemessung von Rohren beim Berstliningverfahren in Deponien, TIS, Tiefbau-, Ingenieurbau- und Strassenbau, Nr. 12, Dez. 1998
- /13/ Lörcher R., Stegner A.: Einsatz der Finite-Elemente-Methode bei Kanalsanierungen, TIS, Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau, Nr. 2, Februar 1996
- /14/ Instandhaltung von Deponieentwässerungsleitungen, GSTT Informationen Nr.9, 1. Auflage vom April 1999, German Society for Trenchless Technology e.V., Hamburg
- /15/ DVS Richtlinie 2205 6.87, Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten

/16/ DVS Richtlinie 2202 12.89, Fehler an Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen

/17/ Falk/Stein, Vorstellung eines bodenmechanischen Modells des dynamischen Berstverfahrens, TIS , Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau, Nr. 6, 1995

## 2.2 Wissenschaftliche Auswertung

### Übersicht

In den Unterlagen /1/-/7/ werden die aktuellen Berechnungsstandards für Rohre nach analytischen Modellen festgeschrieben. /1/ enthält einen allgemeinen analytischen Berechnungsweg zur Bemessung von Abwasserrohren, der in /2/ für Deponierohre anwendbar modifiziert wird. /4/ enthält zusätzlich Angaben zur Anwendung der 'Finiten Element Methode' (FEM) bei der Berechnung von Deponierohren. Die Berücksichtigung einer vom vorgesehenen 'üblichen' Rohreinbau (für Deponierohre z.B. nach DIN 19667) abweichenden Rohrverlegetechnik in der statischen Berechnung erfolgt in /8/-/13/. Die Unterlagen /8/-/13/ sind hier beispielhaft angegeben. Für die verschiedenen Sanierungsverfahren existieren eine sehr große Anzahl von Veröffentlichungen, die jedoch nicht den Deponiebereich betreffen. Die in Deponien angewandten Verfahren sind in /14/ unter Angabe ihrer Einsatzhäufigkeit technisch beschrieben. /15/ und /16/ enthalten material-spezifische Angaben zu thermoplastischen Kunststoffen, zusätzliche Angaben zu Materialdaten finden sich in /4/.

In/17/ wird experimentell und rechnerisch untersucht welche Einwirkungen auf ein im Berstlining-Verfahren verlegtes Rohr im Kanalbau entstehen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Deponiebau ist unseres Erachtens nicht gegeben, da die deponietypischen Merkmale der Auflagerung auf einem bindigen Auflagermaterial, der Einbettung in Kies sowie der Überdeckung mit einer federnden Müllunterfläche nicht gegeben sind, aber entscheidenden Einfluß auf den entstehenden Rohreinbau ausüben.

### Grenzzuglängen beim Einziehen

In /6/ und /7/ werden Hinweise zur Berechnung von Relining-Rohrsträngen gegeben. Im Unterschied zum Berstlining-Verfahren verbleibt beim Relining die alte Rohrleitung an Ort und Stelle quasi als Leerrohr für die neue Leitung. Vergleichbar ist jedoch die Beanspruchung während des Einziehvorganges im Bereich vor dem Alrohr. Häufig handelt es sich beim Berstlining um einen Einbau mittels Baugrube bzw. Schacht in einer größeren Tiefe, so dass zusätzlich zur Längsdehnung aus der Zugkraft infolge Reibung des hinter dem Einziehschacht ausgelegten Rohrstranges noch eine Biegebeanspruchung durch das Hinabführen des Rohrstranges in die Baugrube erfolgt. Die Zugkraft entspricht bei Vernachlässigung von Steigung oder Gefälle der Eigenlast des Rohrstranges multipliziert mit einem Reibungskoeffizienten, der nach /5/ in Abhängigkeit vom Untergrund einen Wert bis zu 0.8 erreicht. Danach ergeben sich bei einer zulässigen Längsdehnung von 2% zulässige Einziehlängen von etwa 680 m bei 20°C und 425 m bei 40°C.

Zur Reduzierung dieses Anteiles können auf der Baustelle Rollen zur Reibungsverminderung, Ausnutzung eines evtl. vorhandenen Gefälles oder Druckkraft in Rohrlängsrichtung (z. B. durch zusätzlichen Seilzug in halber Stranglänge mittels Bagger) eingesetzt werden. Beim Einziehen tritt die im Bereich des Altrohres infolge Reibung aus Erddruck größere Längsdehnung nicht an der gleichen Stelle wie die stärkste Krümmung auf. Wegen der in den Langzeitnachweisen geringeren zulässigen Spannungen und der niedrigeren Steifigkeit des Rohres, die zu größeren Verformungen führt, ist der irreversible Anteil dieser Längsdehnung eher im Lastfall Langzeit maßgebend.

Nach /15/ soll die Summe der beim Ziehen und Biegen auftretenden Einzeldehnungen die zulässige Gesamtdehnung von 3 bis 4% nicht überschreiten. In /15/ ist die Fließdehnung für PEHD mit 3% angegeben. Um aus dem Einziehvorgang im Bereich vor dem Altrohr keine bleibenden Verformungen zu erhalten, die auch im Einbauzustand mit berücksichtigt werden müssten, ist anzustreben, unter dieser Grenze zu bleiben. In /6/ wird davon ausgegangen, dass die Krümmung des Rohrstranges beim Einziehen der Biegekurve eines Kragträgers folgt, während in /5/ die Biegekurve eines Kreisbogens zugrunde gelegt wird. Da bei einem tief liegenden Altrohr der Rohrstrang z. B. mit Hilfe von Umlenkrollen in die Tiefe geführt wird und an der Berstrakete praktisch eingespannt ist, erscheint der Kreisbogen als die nahe liegende Form zur Abschätzung der Beanspruchung in diesem Fall. Für einen zulässigen Biegeanteil von 2% ergibt sich somit ein erforderlicher Krümmungsradius von  $R_{\epsilon} = D_a / (2\epsilon) = D_a / (2 \cdot 0,02) = 25 D_a$  ( $D_a$  = Außendurchmesser PE-HD Rohr). Diese Werte wurden auch mit zwei Ausnahmen bei den in Abschnitt 5.2, Tabelle 2 zusammengestellten Baustellen erreicht. Bei den Deponien Bochingen und Sinsheim lag der Wert nur bei 20  $D_a$ . Bei einem angenommenen Kreisbogen entspricht der Krümmungsradius gleich der mindestens erforderlichen Länge der Baugrube zum Einbringen der Berstrakete. Da das Einbringen der Rakete und eine vom Kreisbogen abweichende Form zusätzlichen Raum erfordern, sollte in Kombination mit einer Längsdehnung nicht unter 25  $D_a$  gegangen werden. Dieser Mindestradius ist über die gesamte Länge des Rohrstranges, also auch im Übergangsbereich zwischen Baugrube bzw. Schacht und Gelände anzustreben.

### **3. Voraussetzungen unter denen die Arbeit durchgeführt wird**

Die Landesgewerbeanstalt Bayern (LGA) begleitet regelmäßig Sanierungsmaßnahmen an Deponierohren in konstruktiver und statischer Hinsicht und stellt projektspezifische Qualitätssicherungspläne auf. Wölfel Beratende Ingenieure (WBI) und die LGA führen statische Berechnungen von Bauteilen in Deponien nach der Methode der finiten Elemente (FEM) durch. Die bereits gewonnenen Erkenntnisse werden für diese Untersuchung aufgearbeitet und ausgewertet. Neue Projekte werden zur Vervollständigung der Grundlagen und zu weiteren Untersuchungen auch in-situ einbezogen. Es werden praktische Untersuchungen im Rahmen der Arbeit an Sanierungsvorhaben auf Baustellen und theoretische Untersuchungen zur Standsicherheit in enger Zusammenarbeit mit Bauausführenden und Auftraggebern durchgeführt.

#### **4. Planung und Ablauf der Arbeit**

Die vorgesehene Vorgehensweise wird im Folgenden dargestellt :

##### 4.1 Vorarbeiten

- Literatursichtung
- Auswertung der bereits erfolgten Bearbeitungen von Deponiesanierungen

##### 4.2 Praktische Untersuchungen auf Baustellen

- Datenaufnahme (Boden, Geometrie, Riefen, Krümmungsradien), siehe Tabelle 2 Pkt. 5.2
- Aufnahme von Rohreinbausituationen
- Meßprogramm und Untersuchungen zur Feststellung der Einziehkräfte im Rohr
- Aufnahme der Zugkräfte am Steuerungsseil der Rakete

##### 4.3 Theoretische Untersuchungen

- Krümmungsradien beim Einziehen
- FEM Parameteruntersuchungen: Einbettungssituation, Vorschädigungen, Überdeckungshöhen

##### 4.4 Ergebnis /Auswertung

- Darstellung der Ergebnisse in als Leitfaden für die Planung und Qualitätssicherung benutzbarer Form

#### **5. Gesamtproblematik / bisheriger Stand der Technik**

##### 5.1 Gesamtproblematik

Die Bemessung von im Berstliningverfahren verlegten Rohren ist uneinheitlich und bisher nicht geregelt, dadurch sind unter anderem Wettbewerbsverzerrungen möglich. Unsicherheiten führen oftmals zu fehlender Akzeptanz auf Seiten potentieller Anwender.

Die Bearbeitung der Projekte ist abhängig von Auftraggeber, Auftragnehmer und Planer bzw. den bei diesen vorhandenen Kenntnissen und Erfahrungen. Augenblicklich ist kein allgemein anerkannter Stand der Technik festgeschrieben (siehe auch Punkt 2.2). Zum Teil erfolgt die Verlegung ohne statische Berechnung, das heißt die Einwirkungen können die Schädigungsgrenze des Rohrmaterials erreichen, ohne dass dies festgestellt wird.

## 5.2 Stand der Technik

Die Tabellen 1 und 2 dokumentieren die von der LGA bearbeiteten Sanierungsprojekte. Die Bearbeitung erfolgte dabei jeweils in einer Kombination von Baustellenüberwachung bzw. Aufnahme der Ist-Situation nach erfolgter Sanierung und Auswertung dieser Baustellendaten mittels FEM Berechnungen. Notwendige Kennwerte wurden z.B. durch Materialuntersuchungen und durch Laboruntersuchungen von Bodenmaterialien gewonnen.

In der Tabelle 1 werden die von der LGA betreuten Projekte im Berstliningverfahren zusammengestellt und in Tabelle 2 die dabei ermittelten Kennwerte aufgelistet.

**Tabelle 1     Projekte**

Projekt	Auftrag	Zeit	Rohrmaterialien
Deponie Im Dienstfeld, Aurach	Meßprogramm bei der Sanierung von Steinzeugrohren	1993	Bestand: Steinzeug Neu: PE-HD
Chemnitz	Dokumentation des Berstvorganges	1994	Bestand: Beton Neu: PVC-U
Deponie Bochingen	Vorversuch zum PE-HD Bersten	1994	Bestand: PE-HD Neu: PE-HD
Deponie Sinsheim	Statische Berechnung Gutachten zu einem Vortriebsstillstand	1995	Bestand: PE-HD Neu: PE-HD
Deponie Schachental	Statische Berechnung Gutachten zu einem Vortriebsstillstand	1995	Bestand: Steinzeug Neu: PE-HD
Deponie Litzlwalchen	Statische Berechnung Gutachten zu einem Vortriebsstillstand	1996	Bestand: Steinzeug Neu: PE-HD
Deponie Kaufbeuren	Statik	1997	Bestand: Steinzeug Neu: PE-HD
Deponie Pfuhl	Statik und Bauüberwachung	1997/98	Bestand: Steinzeug, PVC, PE-HD Neu: PE-HD

**Tabelle 2    Daten aus bisherigen Bearbeitungen**

	Deponie Im Dienstfeld, Aurach	Deponie Bochingen	Deponie Sinsheim	Deponie Schachenwald	Deponie Litzlwalchen	Deponie Kaufbeuren	Deponie Pfuld
Einziehradius		20 Da	20 Da	7,5 m	5,00 m (Da 180) - 10,00 m	Dep.-Rand ohne Biegung	7,50 m
Zugkraft Seil		50 kN	100 - 150 kN	50 kN	100 - 160 kN	150 - 160 kN	50 kN
Einziehlängen		ca. 20 m	ca. 80 m unterteilt	ca. 80 m	40 - 109 m	bis 250 m	bis ca. 160 m
Auflager Material E-Modul / v	Ton 4,2 N/mm <sup>2</sup> /0,4	Ton	Sand 40 N/mm <sup>2</sup> /0,22	Graben i. Ton 11,2 N/mm <sup>2</sup> /0,3	Ton (steinig) 40 N/mm <sup>2</sup> /0,33	Lehm 4 N/mm <sup>2</sup> /0,40	Sandbett i. Dichtung 7 N/mm <sup>2</sup> /0,4
Überschüttung Mat. / E / v	Kies 33 N/mm <sup>2</sup> / 0,25	Kies	Kies 40 N/mm <sup>2</sup> / 0,22	Kies 28,4 N/mm <sup>2</sup> / 0,15	Kies 40 N/mm <sup>2</sup> / 0,33	Kies 33 N/mm <sup>2</sup> /0,25	Kies 50 N/mm <sup>2</sup> /0,35
Bestand: Da / DN Material	DN 150  Stz.	  Stz. / PE-HD	Da 280 / 250  PE-HD	DN 250  Stz.	DN 150 / 250  Stz.	DN 150  Stz.	DN / Da 150 - 250  Stz. / PE / PVC
Neu: Da x s			355mm x 49 mm	280 mm x 38,7 mm	180 mm x 20 mm 280 mm x 38,7mm	225 mm x 25 mm	280 mm x 38,7 mm
berech. Spannung			4,67 N/mm <sup>2</sup>	2,25 N/mm <sup>2</sup>	2,7 N/mm <sup>2</sup>	5,3 N/mm <sup>2</sup> mit Scherbe (ohne 3,4 N/mm <sup>2</sup> )	
Auflast	536 kN/m <sup>2</sup>		600 kN/m <sup>2</sup>	300 kN/m <sup>2</sup>	380 kN/m <sup>2</sup>	500 kN/m <sup>2</sup>	439 kN/m <sup>2</sup>
Material- untersuchungen	Z (80°): B: 327 h 408 h N: > 1000 h		Z (95°): B: 320 h N: 373 h	Z (80°): alle > 170 h			
	R: gleiche Ergeb- nisse für B und N		R: gleiche Ergeb- nisse für B und N				

Tabelle 2    verwendete Abkürzungen: Materialuntersuchungen:

**B** Berstrohr / **N** Neurohr / **Z** Zeitstandsinnendruckversuch /  
**R** Ringsteifigkeitsmessung

### 5.3 Diskussion der vorhandenen Daten

An den bisher bearbeiteten Deponien zeigt sich, daß die Einziehradien den 20-fachen Außendurchmesser ( $D_a$ ) nicht unterschreiten. Dieser Radius wird von den Rohrherstellern als Mindestwert für den Biegeradius angegeben (z.B. Katalog der Firma Simona AG, Kirn). Aus statischer und konstruktiver Sicht optimal ist die Möglichkeit das Rohr vom Deponierand ohne Biegung einzuziehen, die bei der Deponie Kaufbeuren vorlag. Die aufgebrachten Zugkräfte der Winde des Führungsseiles betragen bei den Deponien Schachenwald, Pfuhl und Bochingen 50 kN und erreichten für die Deponien Sinsheim, Litzlwalchen und Kaufbeuren Maxima von bis zu 160 kN. Die Einziehlängen variierten zwischen 20 m (Bochingen, die kurze Haltung wurde nur als Versuch geberstet) und 250 m (Dep. Kaufbeuren).

Die zu sanierenden Deponierohre waren in den meisten Fällen in Auflagern aus Lehm/Ton verlegt. In Pfuhl war in die Dichtung ein Sandauflager eingebaut. Sehr feste Auflager hatten die Deponien Sinsheim (Sandauflager auf der Dichtung) und Litzlwalchen (Tonaflager mit einem E-Modul von  $40 \text{ MN/m}^2$ ). Auffällig ist, dass bei beiden Deponien Schwierigkeiten beim Bersten auftraten. Möglicherweise ist die radiale Verdrängung des Bodens im Sohlbereich bei Böden mit einem Elastizitätsmodul  $E > 40 \text{ MN/m}^2$  schwer möglich. Es besteht daher die Gefahr einer Lageabweichung der Berstrakete oder eines Ansteigens der Berstkräfte bis zum Steckenbleiben der Rakete. Alle Rohre waren mit Kies der Flächendrainage überdeckt.

Erneuert wurden mit den folgenden Ausnahmen Steinzeugrohre der Nennweiten DN 150 -DN 250: Auf der Deponie Bochingen wurde als Versuch zur Vorbereitung der Maßnahmen auf der Deponie Sinsheim, auf der Rohre aus PE-HD erneuert werden mußten, ein PE-HD Rohr ersetzt. Auf der Deponie Pfuhl wurden Steinzeug-, PVC- und PE-HD Rohre erneuert. Eingezogen wurden immer PE-HD Rohre verschiedener Durchmesser.

Die vertikalen Bodenspannungen aus Überdeckung der Rohre mit Abfall für die Berechnung des Langzeitzustandes lagen zwischen  $300 \text{ kN/m}^2$  und  $600 \text{ kN/m}^2$ . In diesen Werten sind jeweils die Müllhöhe mit einer Wichte von  $15 \text{ kN/m}^3$ , eine eventuell vorhandene Überschüttung mit Bauschutt oder anderen Bodenmaterialien (z.B. Deponie Sinsheim) mit einer mittleren Wichte von  $20 \text{ kN/m}^3$  und die Schichten der Oberflächenabdichtung der Deponie mit einer mittleren Wichte von  $20 \text{ kN/m}^3$  enthalten. Die berechneten Spannungen zeigen eine Abhängigkeit von der Überdeckungshöhe, das heißt sie steigen mit der Überdeckungshöhe an. Ein zusätzlicher Faktor ist die Berücksichtigung von bei den Untersuchungen vor Ort vorgefundenen Scherben, die zu einem Ansteigen der Spannungen führt. In Diagramm 1 zeigen die 5 Spannungswerte im Bereich der Kurve die fast lineare Abhängigkeit der berechneten Spannungen von der Auflast, der Wert über der Kurve zeigt den Einfluß der Berücksichtigung einer Scherbe auf der Deponie Kaufbeuren.

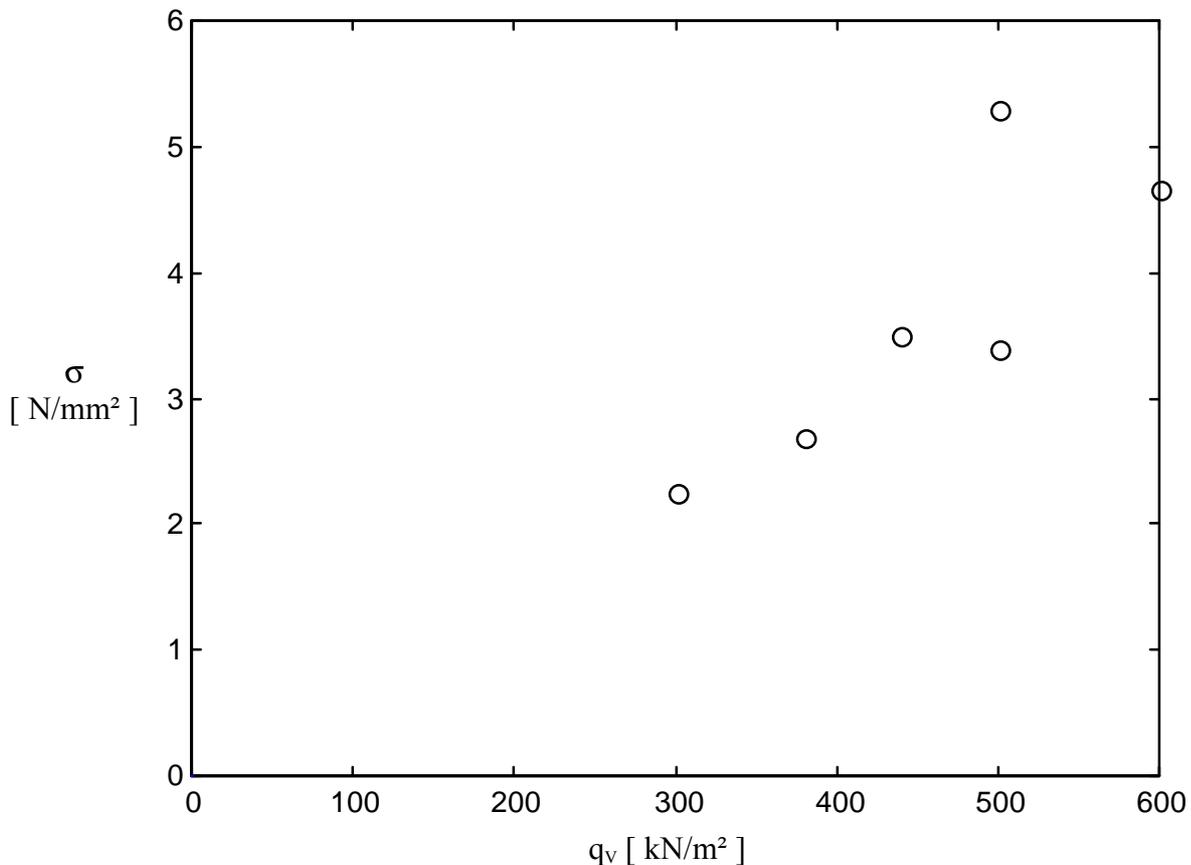


Diagramm 1: Berechnete Spannungen im Rohr  $\sigma$  in Abhängigkeit von der Auflast  $q_v$

Bei drei Baumaßnahmen wurde das Rohrmaterial untersucht. Bei allen drei Deponien (Aurach, Schachenwald und Sinsheim) wurden Zeitstandsinnendruckversuche durchgeführt, bei denen jeweils neue Rohre der selben Herstellungscharge (Rückstellproben) mit den direkt hinter der Berstrakete 'durchgezogenen' Rohrstücken vergleichend untersucht wurden. Alle Rohre erreichten die in der DIN 8075 geforderte Mindeststandzeit von 170 Stunden bei einem Temperaturniveau von 80°C. Bei den Versuchen mit den Rohren der Deponie Sinsheim wurde mit einer für die Rohre ungünstigeren Temperatur von 95° geprüft um schneller ein Ergebnis zu erhalten. Die geforderten 170 Stunden erreichten die Proben auch bei diesem Temperaturniveau. Bei Versuchen mit Rohrproben der Deponie Aurach hielten die gebrauchten Rohre 327 h / 408 h, während das neuwertige Rohr auch nach >1000 h nicht versagte. Für die Proben der Deponie Schachenwald wurde nur das Erreichen des geforderten DIN Wertes überprüft, diesen erreichten alle Proben. Bei der Deponie Sinsheim versagte das gebrauchte Rohr nach 320 h gegenüber 373 h für das neue Rohr. Da hier die Überprüfung bei 95°C erfolgte, sind die Werte mit den Werten der beiden anderen Deponien nicht direkt vergleichbar, sondern erlauben lediglich vergleichende Rückschlüsse auf die Einflüsse des Berstvorganges. Auf den Deponien Aurach und Sinsheim wurden vergleichende Ringsteifigkeitsversuche für die Rohre durchgeführt, die keine Unterschiede zwischen gebrauchtem und neuwertigem Rohr ergaben. Alle überprüften Rohre erfüllten die o.g. Anforderungen der DIN an das Material.

Eine signifikante Schwächung gegenüber einem neuwertigen Rohr trat nur im Zeitstandsinnendruckversuch bei der Deponie Aurach auf. Untersuchungen aus denen die Ursache für diese Schwächung hervorgeht liegen nicht vor. Ein Gesichtspunkt, der im Rahmen dieser Untersuchungen nicht weiter bearbeitet werden kann, ist der Einsatz weiterentwickelter PE-HD Typen in der Rohrherstellung. Die Sanierungsmaßnahmen auf der Deponie Aurach fanden 1993 - also in den Anfangsstadien des Einsatzes des Berstverfahrens auf Deponien - statt. Veröffentlichte Ergebnisse von Zeitstandsinnendruckversuchen verschiedener Materialhersteller und Anhebungen der zulässigen Spannungen für PE-HD Rohre seit diesem Zeitpunkt zeigen erhebliche Steigerungen.

## **6. Fortschritte beim Berstliningverfahren durch Untersuchungen anderer Institute oder Firmen während des Zeitraumes dieser Arbeit**

Von den ausführenden Firmen werden weiterhin Erfahrungen gesammelt, unseres Wissens nach werden sonst in Deutschland keine Maßnahmen zur Erkenntnisgewinnung auf diesem Gebiet durchgeführt.

Zwischenzeitlich wird auf Deponien zusätzlich zum hier behandelten dynamischen Bersten das Verfahren 'Statisches Bersten' angewendet. Hierbei entfällt die Schlagenergie. Vortrieb, Einziehen des Neurohres und Zerstörung des Altrohres werden durch Zugkraft, die über ein Gestänge an den Vortriebskopf übertragen wird, erreicht. Bisher konnte der durch dieses Verfahren erreichte Rohreinbau an einer Haltung der Deponie Schwaiganger aufgenommen werden. Demnach kann für Vorbemessungen ein Einbau wie im dynamischen Bersten angenommen werden. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

In Unterlage /14/ wird das Berstverfahren unter anderen als Möglichkeit einer haltungsweisen Sanierung von Deponiesickerrohren beschrieben.

## **7. Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden und Beschreibung der untersuchten Deponien**

Während der Zeitdauer in der die vorliegenden Untersuchungen erfolgten, wurden Sanierungsarbeiten mittels Berstlining auf den Deponien Schwaiganger und Kahlenberg durchgeführt. Die Bearbeitung beinhaltet im Wesentlichen Material- und Baugrunduntersuchungen sowie statische Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente (FEM).

### **7.1 Deponie Schwaiganger**

Auf der Deponie Schwaiganger wurde ein bestehendes Sickerwassersystem aus Steinzeugrohren saniert. Diese Rohre waren statisch nicht ausreichend bemessen und wiesen Schäden auf. Die Sanierung erfolgte dabei durch das dynamische Berstverfahren mit PE-HD Rohren. Auffällig an dieser Deponie ist der hohe Elastizitätsmodul der Dichtungsschicht, der durch großkörnige Einlagerungen im Ton bewirkt wird. Die Berstra-

kete konnte hier im Wesentlichen fast waagrecht angesetzt werden (ohne Schächte mit Umlenkrollen), da ausreichend Platz an mindestens einem Rohrende vorhanden war. Das während der Sanierungsmaßnahmen für den Deponiebereich anwendbar gewordene statische Berstverfahren kam einmal - ohne Erfolg - zum Einsatz. Als Hypothese wird angenommen, dass die auf das Neurohr aufgeschweißten Abstandhalter zu einer Verzahnung von Neurohr, Altrohrstreifen und Kiesrigole durch Kieskörner in den Wassereintrittsöffnungen führten. Eine genauere Untersuchung wurde nicht durchgeführt. Alle Berstvorgänge wurden beobachtet und protokolliert, in einem Fall wurde ein Messprogramm zur Ermittlung der Zugkräfte im Rohr durchgeführt.

## 7.2 Deponie Kahlenberg

Auf der Deponie Kahlenberg war ein aus PE-HD- und Steinzeugrohren bestehendes Sickerwassersystem zu sanieren. Die Überdeckungshöhen sind sehr hoch (40.00 m). Die Sanierung musste aus bis in diese Tiefe abgeteuften Baugruben durchgeführt werden. Im Wesentlichen wurde das statische Berstverfahren mit Erfolg eingesetzt. Abstandhalter wurden im Gegensatz zur Deponie Schwaiganger nicht auf die Rohre aufgeschweißt.

## 7.3 Materialuntersuchungen

Zur Feststellung von Schwächungen des Rohrmaterials durch den Einziehvorgang wurden in den Voruntersuchungen Zeitstandsinnendruckversuche nach DIN 16887 / DIN EN 921 und Messungen der Ringsteifigkeit nach DIN 53769 Teil 3 durchgeführt. Bei den Arbeiten für das Forschungsvorhaben konnte das Material nur augenscheinlich überprüft werden.

## 7.4 Bodenuntersuchungen

Der Baugrund wurde bei den Ortsterminen aufgenommen. Bodenkenngrößen für die Deponie Schwaiganger wurden durch Plattendruckversuche vor Ort nach DIN 18134 und durch die Laboruntersuchung von entnommenen Bodenproben festgestellt. Zur Ausführung kamen bei der Deponie Schwaiganger und den Feststellungen der in Tabelle 2 angegebenen Bodenkenngrößen Dichtebestimmungen nach DIN 18125 T.2, Ermittlung der Korngrößenverteilung nach DIN 18123, Bestimmung der Proctordichte nach DIN 18127 und Kompressionsversuche nach DIN 18135 (Vornorm), alle Normen in der jeweils aktuellen Fassung.

## 7.5 Statische Berechnungen mit der FE-Methode

Für statische Berechnungen mit Parametervariation nach Abschnitt 8.1.4 wird die Finite-Elemente-Methode FEM, d. h. die Methode der endlich großen Elemente, verwendet. Dies ist ein leistungsfähiges Verfahren zur numerischen Lösung von Festigkeitsproblemen aller Art im elastischen und plastischen Bereich. Es basiert auf der Lösung li-

naher Gleichungssysteme hoher Ordnung mit Hilfe von Computern. Die Gleichungssysteme werden unter Anwendung der Matrizenrechnung aufgestellt. Das zu berechnende System, auch Struktur genannt, wird in passende Elemente aufgeteilt, die über Knotenpunkte miteinander verknüpft sind.

## **8 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse und ihre praktische Anwendbarkeit**

### 8.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse

#### 8.1.1 Material

Zeitstandinnendruckversuche liegen nur wie unter Punkt 6. beschrieben vor. Weitere Untersuchungen konnten nicht durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen, daß für die eingezogenen Rohrstücke alle normativen Anforderungen an das Material eingehalten waren. Demgemäß ist eine Verschwächung der bemessungsrelevanten Parameter des Rohrmaterials nur in nicht bemessungsmaßgebender Größenordnung vorhanden.

Eine augenscheinliche Verschwächung durch den Einziehvorgang wurde bei Untersuchung von Rohrproben der Deponie Aurach festgestellt. Da für PE-HD seit diesen ersten Untersuchungen im Jahr 1993 eine Entwicklung mit signifikanter Steigerung der Qualität (Entwicklung der PE-HD Typen PE 80 und PE 100) erfolgte und sich dieser Abfall der Festigkeit in den nachfolgenden Untersuchungen nicht gezeigt hat, wird - vorbehaltlich weiterer Untersuchungen - aus dem Ergebnis der damaligen Materialuntersuchung nicht auf eine generelle Schwächung beim Einziehvorgang geschlossen.

Scheiteldruckversuche wurden bei den Maßnahmen in Aurach und in Sinsheim durchgeführt. Die Ergebnisse ergaben keine Schwächung der Rohre durch den Einziehvorgang.

Visuelle Überprüfungen des Oberflächenzustandes wurden bei allen Deponien durchgeführt. In Anlage D sind Fotos hierzu beigefügt. Für die Deponie Aurach ist eine ca. 3 cm lange, 3 mm tiefe und 3 mm breite Riefe abgebildet. Riefen wurden in verschiedenen Formen vorgefunden, wobei die größten Verschwächungen vor dem eigentlichen Einziehvorgang beim Transport des vorgefertigten Rohrstranges über die Deponieoberfläche auftraten. Durch das Einziehen entstandene Verschwächungen der Rohroberfläche waren durchwegs 0.1-0.2 mm breite, 0.1-0.2 mm tiefe sehr langgezogene Risse.

Wanddicken-/Durchmessermessungen wurden auf der Deponie Schwaiganger vor Ort an einer Rohraustrittsstelle durchgeführt. Sie ergaben soweit unter Baustellenbedingungen meßbar keine Veränderungen gegenüber einem nicht eingezogenen Rohr.

#### 8.1.2 Baugrunduntersuchungen / Rohreinbau

Bei allen Baustellenterminen wurde versucht den erreichten Rohreinbau an der Eintritts- und an der Austrittsstelle aufzunehmen. Falls Zwischenbaugruben vorhanden waren wurden die Rohre freigelegt und der Einbau aufgenommen.

Die bodenmechanischen Untersuchungen an Rohrauflagermaterial, Dichtungsmaterial und Filterkies ergaben für den Steifemodul und die Querdehnzahl (bemessungsrelevante Werte bei der Berechnung mit FEM) Werte in Größenordnungen, die auch aus der offenen Verlegung zu erwarten sind. Für die Deponie Schwaiganger ergaben sich die folgenden Werte:

Bodenkennwerte der Dichtungs- und Drainageschicht Deponie Schwaiganger

Dichtung	Steifemodul $E_s$	= 6 - 50 N/mm <sup>2</sup>
	Querdehnzahl $\nu$	= 0,4
	daraus ergibt sich ein Elastizitätsmodul von :	2.8 - 23.3 N/mm <sup>2</sup>
	Wichte $\gamma$	= 21 kN/m <sup>3</sup>
Filterkies	Steifemodul $E_s$	= 60 N/mm <sup>2</sup>
	Querdehnzahl $\nu$	= 0.25
	daraus ergibt sich ein Elastizitätsmodul von :	50 N/mm <sup>2</sup>
	Wichte $\gamma$	= 19 kN/m <sup>3</sup>

Der weite Bereich des Steifemoduls der Dichtung resultiert aus den in den verschiedenen Bauabschnitten eingesetzten unterschiedlichen Abdichtungsmaterialien.

Die wesentliche Differenz in der Berechnung der eingezogenen Rohre gegenüber in offener Bauweise verlegten Rohren liegt in der Rohrauflagerung und der Rohrbettung. Ohne Aufgrabung ist es nicht möglich ein vorhandenes Rohrauflager an ein Rohr, das einen anderen - i. Allg. größeren - Außendurchmesser als das ursprünglich verlegte Rohr hat anzupassen. Das neue Rohr liegt theoretisch liniengelagert auf dem alten Auflager. Die Verfüllung des Bereiches unter dem neuen Rohr kann mit hereinrollendem Filterkies erfolgen, da der Durchmesser des Aufweitkörpers der Berstrakete größer als der des einzuziehenden Rohres ist. Bei den untersuchten Deponien wurde Filterkies nicht nur im bestehenden alten Rohrauflager, sondern auch unter dem gesamten neuverlegten Rohr vorgefunden. Die Dicke der Kiesschicht unter dem Rohr variierte von 0, d.h. nur sehr wenig Kies im alten Auflager, bis zu einer ca. 7 cm dicken Kiesschicht unter dem neuen Rohr.

Je nach Art des Altrohres verbleiben die Reste des zerstörten Altrohres meist im Boden (eine Ausnahme bildete z.B. die Deponie Sinsheim, auf der die PE-HD Streifen des zerschnittenen Altrohres größtenteils nachträglich herausgezogen wurden). Steinzeugrohre wurden im Allgemeinen vollständig zerstört. In Einzelfällen verblieben aber auch Rohrscherben in der Leitungszone (Deponie Schwaiganger am Rohranfang des Stranges 3). Im Allgemeinen zeigte sich Steinstaub im Spülgut bei den ersten Leitungsspülungen nach dem Bersten. Die Scherben von Rohrstücken vor einem Zielschacht werden in den Schacht geschoben. Profilierte PCV und PE-HD Rohre können durch die Rakete zusammengeschoben werden (Deponie Pfuhl) und im ungünstigsten Fall ein Hindernis bilden (wie auf der hier nicht behandelten Deponie Höferänger beobachtet). Auf der Deponie Pfuhl wurden bis zu 10 Altrohrmeter zusammengeschoben und dann entweder zerschnitten (in Haltungsmittel) oder als Reststück in die Zielgrube geschoben.

### 8.1.3 Einwirkungen während des Einziehvorganges

#### 8.1.3.1 Versuch auf der Deponie Schwaiganger

Auf der Deponie Schwaiganger wurde versucht, die beim Einziehvorgang auf das Rohr wirkenden Kräfte experimentell festzustellen. Hierzu wurden Dehnungsmessstreifen in einem Rohrstück appliziert. Dieses Rohrstück wurde direkt hinter der Berstrakete mit dem nachfolgenden Rohrstrang verschweißt eingezogen. Versuchsaufbau und der Ergebnisausdruck sind im Anhang B beigefügt. Es ergaben sich anfangs plausible Messwerte, gegen Ende der Messung versagte das Messsystem - offensichtlich durch die kontinuierliche dynamische Belastung und eventuell wegen der in der Nähe der Rakete herrschenden höheren Temperaturen bei gleichzeitig ölhaltiger Atmosphäre. Die als plausibel angenommenen Ergebnisse ergeben Längsdehnungen von maximal ca. 0.5 %.

Für einen Kriechmodul von 400 - 800 N/mm<sup>2</sup> ergeben sich daraus Spannungen von 2.0 - 4.0 N/mm<sup>2</sup> und eine Zugkraft im Rohr von 58.7 kN - 117.3 kN (Rohrfläche  $(D_a^2 - D_i^2) * \pi / 4 = (280^2 - 202.6^2) * \pi / 4 = 28337 \text{ mm}^2$ ).

#### 8.1.3.2 Auswertung eines Rohrabrisses auf der Deponie Kahlenberg

Bei einem statischen Berstvorgang im Oktober 1999 auf der Deponie Kahlenberg riss das Gewinde, das Rakete und Rohrstrang verbindet, nach einer Einzugslänge von 63 m ab. Vor dem Abriss wurde mit einer gleichbleibenden Zugkraft von ca. 600 kN (60 to) ein 80 m langer Rohrstrang (Aussendurchmesser 280 mm / SDR 7.4 [PN 16]) eingezogen, nach dem Abriss des Rohrstranges wurde der Raketenkopf mit einer Zugkraft von 500 kN weitergezogen. Das Rohrgewicht eines 80 m langen Rohrstranges aus PE-HD (Wichte  $\gamma = 9.5 \text{ kN/m}^3$ ) beträgt

$$(D_a^2 - D_i^2) * \pi / 4 * 1 * \gamma = (0.28^2 - 0.2026^2) * \pi / 4 * 80 * 9.5 = 22.3 \text{ kN (2.23 to)}$$

Es verbleibt für die Mantelreibung auf das 63 m weit eingezogene Rohr ein Anteil der Zugkraft von  $600 - 500 = 100 \text{ kN}$ . Bei einer Oberfläche von  $D_a * \pi * 63 = 0.28 * \pi * 63 = 55.42 \text{ m}^2$  ergibt sich eine **Mantelreibung** von  $100 / 55.42 = 1.8 \text{ kN/m}^2$ .

#### 8.1.4 Statische Berechnungen / Finite Elemente-Berechnung mit Parameterstudien

##### Anordnung der Trümmerstücke

In den Anlagen C und D wird gezeigt, dass beim Bersten von PEHD-Altrohren die Reststücke relativ gleichmäßig um das Neurohr, teilweise mit einer Kieszwischenlage, verteilt sind.

Dort ist auch die von anderen Baustellen bekannte Tatsache festzustellen, dass bei Altrohren aus Steinzeug das Neurohr häufig voll von Kies umhüllt ist oder auf dem alten

Auflagerrand gebettet ist mit einem darunter befindlichen Hohlraum mit Kies bzw. Scherben. Die im Einzelfall tatsächlich vorhandene Umgebung des Neurohres ist nicht bekannt und willkürlich. Aus zahlreichen Berechnungen für neue Sickerwasserrohre in Deponien ist bekannt, dass sich eine Kiesumhüllung günstig auf das Tragverhalten des Systems auswirkt. Für die Berechnungen hier wird deshalb von dem ungünstigen Fall einer Lagerung auf einem halben verbliebenen Altrohr aus Steinzeug ausgegangen. Dies führt zu Spannungskonzentrationen am Übergang zwischen Steinzeug und Neurohr und erfaßt damit tendenziell auch die lokale Beanspruchung durch scharfkantige Scherben, so dass es sich dabei um einen konservativen Grenzfall handelt.

### Untersuchte Parameter

Für die Berechnungen wird von dem häufig bei der Deponiesanierung verwendeten PEHD-Rohr mit Außendurchmesser 280 mm und Wandstärke 38,7 mm auf einem verbleibenden halben Steinzeugrohr DN 150 entsprechend der Abbildung auf Seite A1 ausgegangen. PEHD ist z. Zt. mit den Materialgütern PE 63 / 80 / 100 im Handel. Am gebräuchlichsten ist PE 80. Deshalb wird in der Berechnung von diesem Material ausgegangen. Zur Überprüfung verschiedener Einflüsse werden folgende Parameter variiert:

- Bodensteifigkeit
- Steifigkeit im Auflagerbereich
- Querriefen an verschiedenen Stellen
- Längskerben mit unterschiedlicher Anzahl
- Überdeckungshöhe
- Längsdehnung

Eine Zusammenstellung der betrachteten Fälle ist auf Seite A3 enthalten. Für diese Fälle werden statische Nachweise geführt. Der Vergleich der Ergebnisse mit aus der Literatur bekannten Versagenskriterien soll generell die möglichen Grenzen des Verfahrens aufzeigen und durch den Relativvergleich den Einfluss der betrachteten Parameter erkennbar machen, um daraus Empfehlungen für zukünftige Berechnungen abzuleiten.

Bei den Bodensteifigkeiten werden als Grenzfälle minimale und maximale Erfahrungswerte angesetzt. Für die Steifigkeit im Auflagerbereich geht ein Grenzfall davon aus, dass sich im halben Steinzeugrohr ein Hohlraum bildet, im anderen Grenzfall wird dieser Raum als gefüllt mit Material entsprechend der Steinzeugsteifigkeit vorgesehen. Als mittlere Variante wird die Hälfte der Kiessteifigkeit für diese Füllung angesetzt.

Durch Baustelleneinflüsse sind Riefen und Kerben im neu eingezogenen PEHD-Rohr möglich. Deren Größe ist aus bisherigen Baustellenaufnahmen (siehe auch Anhänge C und D) näherungsweise bekannt. Die Tiefe der üblichen Beschädigungen beträgt maximal etwa 3 mm. In der Berechnung werden Querriefen im PEHD-Rohr nacheinander im Scheitel, im Kämpferbereich und in der Sohle, jeweils mit einer Breite und Tiefe von 3 mm und einer Länge von 100 mm in Umfangsrichtung, unterstellt. Längskerben in Form eines Spaltes mit einer Tiefe von 3 mm, die über die gesamte Modelllänge reichen, werden mit einer Anzahl von 5 und 7 am Halbmodell entsprechend 10 und 14 über den Gesamtumfang verteilt.

Nach unseren Erfahrungen mit bisherigen Projekten sind geringe Überdeckungen und daraus folgende Auflasten nicht maßgebend für die Beurteilung der Standsicherheit (vgl. Abschnitt 5.3). Deshalb wird bei den Betrachtungen hier von 40 m und 60 m Über-

deckung ausgegangen. Die Überdeckungshöhe ergibt sich aus der Müllhöhe und 2m Oberflächenabdichtung. Für die Wichten des Überdeckungsmaterials wird von den üblichen Größen mit 15 kN/m<sup>3</sup> für das Deponiegut in Form von Hausmüll und 20 kN/m<sup>3</sup> für die Oberflächenabdichtung ausgegangen. Da die Abfallüberschüttung nur in Form einer schlaffen Auflast berücksichtigt wird, sind dadurch auch Fälle mit geringeren Überdeckungshöhen und größeren Materialwichten erfaßt.

Während des Einziehvorganges erfährt das Neurohr eine Längsdehnung. Diese ist nach Abschnitt 2.2 auch abhängig von der Länge des Rohrstranges. Für die in Abschnitt 8.1.3 angegebenen Messungen mit relativ kurzen Einzihlängen (63 m bei Deponie Kahlenberg) ergab sich während des Einziehens eine Längsdehnung von etwa 0,5%. Ein Teil dieser Dehnung wird sich nach dem Einziehen infolge des elastischen Verhaltens des Rohres abbauen. Da die Haftreibung i. d. R. größer ist als die Gleitreibung, wird ein entsprechender Anteil der maximalen Dehnung für den hier betrachteten Langzeitfall verbleiben. Ein Teil der daraus resultierenden Spannungen baut sich bei gleichbleibender Längsdehnung durch Relaxation im Laufe der Zeit ab. Im Rahmen der hier möglichen Genauigkeit der Eingangsparameter wird dies näherungsweise dadurch berücksichtigt, dass für den Lastfall Langzeit mit dem dafür im Vergleich zur Kurzzeit wesentlich niedrigeren Kriechmodul gerechnet wird. Um den Einfluss der verbleibenden Längsdehnung zu erkunden, wird in einem Fall eine Dehnung von 1% berücksichtigt. Damit soll der generelle Einfluß dieses Parameters gezeigt werden. Einzihlängen, die wesentlich größer sind als der o. g. Wert, sind damit jedoch nicht ausreichend berücksichtigt, da sich die Reibkraft mit der Länge erhöht und mit zunehmender Einziehdauer auch die Radialbelastung auf das Rohr und damit wiederum der Reibwiderstand steigt.

## Grundlagen für den Verformungs- und Spannungsnachweis

### Rohreinbau

Die Seite A1 zeigt den angenommenen Einbauzustand des eingezogenen neuen Sickerwasserrohrs in der Deponie. Die Rohrsohle liegt auf dem halben Steinzeugrohr auf. Zwischen Steinzeugrohr und neuem PEHD-Rohr ist eine Füllung aus Kies vorgesehen. Unterhalb des Steinzeugrohres wird von der mineralischen Dichtung in Form einer Tonschicht ausgegangen, die mit einer Stärke von 750 mm abgebildet wird. Der obere Teil des PEHD-Rohres liegt eingebettet in der Dränageschicht aus Kies. Die Höhe der Dränageschicht beträgt insgesamt 400 mm.

### Rohrtypen, Querschnitte

Als Sickerwasserrohr wird von einem PEHD-Rohr mit Außendurchmesser 280 mm und Wandstärke 38,7 mm aus PE-HD entsprechend PE 80 ausgegangen. Bohrungen für den Sickerwassereintritt werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da sowohl Lochabstand als auch Lochdurchmesser stark vom Einzelfall z. B. in Abhängigkeit vom Schüttgut gewählt werden.

In einer Auslegungsberechnung wäre diese Schwächung z. B. entsprechend /4/ zu berücksichtigen.

Die Verbindung der Rohrschüsse erfolgt i. d. R. durch Heizelementstumpfschweißen.

Deshalb werden Schweißfaktoren berücksichtigt.

### Materialkenndaten Rohre

Die Materialkenndaten für PEHD-Sickerwasserrohre aus PE 80 sind entsprechend /4/ auf der Seite A5 zusammengestellt. Dort sind auch die verwendeten Daten für das Steinzeug enthalten.

Für den Lastfall "Langzeit, 50 Jahre" wird von einer Dauertemperatur des Sickerwasserrohres von 40°C ausgegangen. Ein Temperaturgradient über die Wanddicke wird nicht betrachtet. Wegen der niedrigeren zulässigen Spannungen und der nicht vollständig abgebauten Beanspruchung aus dem Einziehvorgang ist dieser Fall im Vergleich zur "Kurzzeit" von besonderer Bedeutung. Für den Einziehvorgang selbst ist außerdem noch die Beanspruchung aus der Zugkraft und der Krümmung beim Einziehen zu betrachten, die jedoch nicht zeitgleich mit der hier hauptsächlich betrachteten Erddruckbelastung auftritt.

### Rechenmodell

Für die Modellierung des Bodens und der Rohre (Schnitt von 21 mm Breite) werden Volumenelemente mit 8 bzw. 6 Knoten verwendet. Der Boden wird im Abstand von 1 mm zu den Rohren modelliert. Der Kontakt zwischen Boden- und Rohrelementen wird an den Elementknoten über Dehnstäbe hergestellt. Die Steifigkeit der Dehnstäbe ist so gewählt, daß zwischen Boden und Rohr in Radialrichtung keine Relativverschiebungen auftreten. In Umfangsrichtung kann der Boden am Rohr entlanggleiten. Die verwendeten Materialdaten für die einzelnen Bodenschichten (Elastizitätsmodul E, Querdehnzahl  $\nu$  und Wichte  $\gamma$ ) können Seite A4 entnommen werden. Sie wurden aus Erfahrungswerten abgeleitet. Die Struktur ist auf den Seiten A1 und A2 dargestellt.

An den vertikalen Modellrändern werden die Verschiebungen in horizontaler Richtung an allen Knoten gesperrt (Symmetriebedingung bzw. Bodeneinfluß abgeklungen). Am unteren Modellrand werden die Vertikalverschiebungen an allen Knoten gesperrt.

### Belastung

Das Eigengewicht der im FE-Modell enthaltenen Bodenschichten und des Rohres wird über die Definition der Erdbeschleunigung ( $10\text{m/s}^2$ ) in die vertikale Richtung berücksichtigt.

Das Gewicht der nicht im FE-Modell enthaltenen Müllüberdeckung mit Oberflächenabdichtung wird auf die oberste Elementschicht des FE-Modells als gleichmäßig verteilte Druckbelastung entsprechend der Zusammenstellung auf Seite A4 aufgebracht.

## Versagenskriterien

Allgemein müssen für den Nachweis der Standsicherheit Verformungs-, Spannungs- und Stabilitätskriterien erfüllt werden. Der Spannungsnachweis erfolgt mit Hilfe der Vergleichsspannungen nach dem Kegelkriterium. Nach /4/ sind die folgenden Versagenskriterien einzuhalten (vgl. Seite A20):

Verformungskriterium: vertikale Durchmesseränderung < 6 %

In unseren Nachbarländern sind bei neueren Vorschriften bis zu 15% zulässig. Auch nach dem neuen deutschen Regelwerk der Abwassertechnischen Vereinigung ATV /7/ sind 9% für neu eingelegte Rohre zulässig, wenn nach Theorie II. Ordnung gerechnet wird. Wegen der hier vorhandenen Streuung der Parameter und des nicht idealen Einbauzustandes wird jedoch auf der sicheren Seite liegend weiterhin von 6% als zulässige vertikale Durchmesseränderung ausgegangen.

Spannungskriterium: maßgebend wird wegen der möglichen Längsdehnung des Rohres und Berücksichtigung des Schweißfaktors

$$\text{grenz } \sigma_z \cdot f / \sigma_v \geq 2,0$$

grenz  $\sigma_z$  = Grenzzugfestigkeit unter Berücksichtigung des Medienfaktors

$\sigma_v$  = Kegelkriteriumsvergleichsspannung

f = Schweißfaktor nach /15/ für Heizelementstumpfschweißen HS  
bei Kurzzeitbelastung 0,9  
bei Langzeitbelastung 0,8

## Rechenverfahren

Alle Berechnungen werden mit dem Finite-Elemente-Programmsystem NISA II (Vers. 7.0) von EMRC (Engineering Mechanics Research Corporation, Troy, Michigan USA) durchgeführt. Es ist bekannt, dass die Eigenschaften des Rohrmaterials in Wirklichkeit von der Zeit, der Temperatur, dem Spannungsniveau und der Beanspruchungsart abhängen. Auch die Bodeneigenschaften sind in hohem Maße nichtlinear. Wegen der Praktikabilität werden diese Parameter hier primär nicht untersucht, d. h. die Berechnungen erfolgen unter Zugrundelegung linear elastischer Materialgesetze.

## Verformungs- und Spannungsnachweis, Ergebnisse

Für die betrachteten Fälle werden die Verformungen und Spannungen bestimmt. Die Ergebnisse sind auf den Seiten A6 bis A8 und A10 bis A20 dokumentiert. Seite A6 zeigt die Verformungen für den Fall 1, Seite A7 die zugehörigen Vertikalspannungen. Die Vertikalspannungen an der oberen Modellkante entsprechen der schlaffen Auflast.

Auf Seite A8 sind für den Fall 1 am PEHD-Rohr die Vergleichsspannungen nach dem

Kegelkriterium und die Radialspannungen dargestellt. Für alle übrigen Fälle folgen auf den Seiten A10 bis A19 am PEHD-Rohr die Vertikalverschiebungen und Spannungen nach dem Kegelkriterium. Auf Seite A20 sind die maßgebenden Ergebnisse tabellarisch zusammengestellt und mit zulässigen Werten verglichen.

### Verformungen PEHD-Rohr

Für die PEHD-Rohrverformungen (vergl. Seite A20) ergibt sich, daß die zulässigen Vertikalverformungen von 6% (zulässig nach /1/, /2/) in keinem der betrachteten Fälle überschritten werden. Der bei 40 m Überdeckungshöhe betrachtete Einfluss von Riefen und Kerben sowie von unterschiedlicher Steifigkeit im Auflagerbereich ist gering. Im Vergleich zum ungeschwächten Rohr ergibt sich eine Vergrößerung der relativen vertikalen Durchmesseränderung bei einer Querriefe im Scheitelbereich von 0,4% und bei einer Querriefe im Bereich der Sohle von 0,1%. Eine Querriefe im Kämpferbereich hat auf die Durchmesseränderung praktisch keinen Einfluss. Die Verformungen sind bei 7 (5) Längskerben über den halben Umfang um 1,0% (0,9%) größer als ohne Längskerben. Der Fall mit Hohlraum im Steinzeugrohr liefert deutlich kleinere Verformungen als die Fälle mit Füllung und ist deshalb nicht bemessungsrelevant. Bei steifer Füllung ergibt sich die größte relative Durchmesseränderung, die um 7,6% über dem Wert ohne Füllung liegt. Der Einfluß der Bodensteifigkeiten und der Überdeckungshöhen wird an den Fällen mit 60 m Überdeckung bei unterschiedlicher Bodensteifigkeit deutlich. Diese beiden Parameter sollten deshalb möglichst genau bekannt sein. Dies gilt auch für den Einfluß einer verbleibenden Längsdehnung, die auch abhängig von der Einziehlänge ist.

Mögliche Riefen und Kerben bis zu einer hier betrachteten Tiefe von 3 mm können im Rahmen der Gesamtgenauigkeit beim Verformungsnachweis vernachlässigt werden. Jedoch sollte auf der Baustelle darauf geachtet werden, dass keine stärkeren Beschädigungen auftreten. Dies wird z. B. durch das Führen auf Rollen statt Schleifen auf dem Boden beim Einziehen und materialschonendes Be- und Entladen erreicht. Der wesentlich größere Einfluß aus der gewählten Modellabbildung sollte von ähnlichen Randbedingungen wie hier gewählt und von einer hohen Steifigkeit im Auflagerbereich ausgehen. Über die verbleibende Längsdehnung im Rohr sind weitere Untersuchungen erforderlich.

### Spannungen PEHD-Rohr

Die zulässigen Vergleichsspannungen nach dem Kegelkriterium /4/ werden bei 60 m Überdeckungshöhe sowohl bei steifem als auch bei weichem Boden geringfügig überschritten (3/19%, vergl. Seite A20). Auch bei 40 m Überdeckung und 1% Längsdehnung liegt man um 8% über dem zulässigen Wert. Die anderen Fälle liefern Spannungen im zulässigen Bereich. Längs- und Querriefen haben praktisch keinen Einfluß auf die Ergebnisse. Auch die Steifigkeit im Auflagerbereich ist von untergeordneter Bedeutung. Allerdings liefert die Variante mit Hohlraum im Steinzeugrohr um etwa 20% größere Spannungen als die vergleichbaren Fälle.

Wie beim Verformungsnachweis können Riefen und Kerben der hier unterstellten Größe in Zukunft vernachlässigt werden.

Der Fall mit Hohlraum im Steinzeugrohr gilt als konservativer Grenzfall.

Bodensteifigkeit und Überdeckungshöhe sollten möglichst genau bekannt sein. Auch für die Spannungen erfordert die Kenntnis der verbleibenden Längsdehnung im Rohr weitere Untersuchungen.

### Stabilität

Nach den Bemessungsgrundsätzen /4/ kann der Nachweis gegen Stabilitätsversagen entweder durch eine nichtlineare FEM-Analyse nach Theorie 2. Ordnung unter 2,0-fachen Einwirkungen oder mit Hilfe des analytischen Berechnungsverfahrens nach Sonntag /3/ mit den Radialspannungen aus einer linearen FEM-Berechnung erfolgen. Für den Fall 1 aus Verformungs- und Spannungsnachweis mit 40 m Überdeckung und minimaler Bodensteifigkeit werden beide Möglichkeiten untersucht.

Beim Verfahren nach Sonntag wird das Rohr als elastisch im umgebenden Boden eingebettet betrachtet. Der Steifemodul für die Rohreinbettung wird aus dem Ton abgeleitet. Als Drucklast wird im ersten Durchgang die maximale Radialspannung auf das Rohr von außen entsprechend den Ergebnissen in der Spannungsberechnung (Seite A8) aufgebracht. Dieser große Radialdruck ist durch die steife Lagerung auf dem Steinzeug bedingt und tritt lokal sehr begrenzt auf. Wie das Ergebnis auf Seite A9 zeigt, kann der Stabilitätsnachweis mit diesen Werten nicht erbracht werden. Infolge der hohen lokalen Spannung, die für die Stabilität eigentlich nicht relevant ist, ergibt sich rein rechnerisch aus dem Verhältnis von kritischem zu vorhandenem Radialdruck auf das Rohr nur eine Beulsicherheit von 0,29. Das Verfahren geht von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung über den Umfang aus. Dies ist wegen der hier vorhandenen Spitzenspannungen nicht zutreffend. Eine mögliche Lösung des Problems besteht darin, die Spitzenspannungen für den Stabilitätsnachweis außer acht zu lassen und mit dem ungünstigsten, global auftretenden Radialdruck den Nachweis zu führen. Im vorliegenden Fall ergibt sich dabei eine Beulsicherheit von 1,94 und liegt damit knapp unter dem in /4/ geforderten Wert von 2,0.

Eine geometrisch nichtlineare Finite-Elemente-Berechnung wird mit einem ebenen 2D-Modell durchgeführt. Dabei werden PEHD- und halbes Steinzeugrohr mit Balkenelementen modelliert und im umgebenden Boden eingebettet. Der Boden wird mit ebenen Vierecks- und Dreieckselementen modelliert. Die Kopplung von Rohr und Boden erfolgt in radialer Richtung mit steifen Kontaktelementen. Als Belastung wird Auflast und Eigenlast inkrementel gesteigert. Wie das Bild auf Seite A9 unten zeigt, ist das System bis zur 1,4-fachen Last stabil. Die Bodenelemente neben der Auflagerung am Steinzeug sind jedoch stark verzerrt und die Kontaktelemente wirken in diesem Bereich nicht mehr alle radial. Bei 1,5-facher Last wird dieses System numerisch instabil. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

## 8.2 Bewertung und praktische Anwendung der erzielten Ergebnisse

Im Folgenden werden die gewonnenen Ergebnisse bewertet. Als praktische Anwendung dieser Ergebnisse wird ein Leitfaden, in dem die nach dem bisherigen Kenntnisstand erforderliche Vorgehensweise dargestellt ist, als Punkt 10 erstellt.

### 8.2.1 Material

Die Ergebnisse zeigen, daß wesentliche Materialschwächungen durch das Einziehen eines Rohres im Berstliningverfahren nicht zu erwarten sind.

### 8.2.2 Einbau

Kontrollen des Einbaus von im Berstliningverfahren verlegten Rohren ergaben eine wesentlich von einem 'normalen' Rohreinbau in offener Verlegung abweichende Leitungszone. Sie ist in den statischen Berechnungen der Rohre zu berücksichtigen.

### 8.2.3 Statische Berechnungen

#### 8.2.3.1 Vorbemessung

Die im Bereich des Altrohres infolge Reibung aus Erddruck evtl. vorhandene größere Längsdehnung trifft nicht zusammen mit der starken Krümmung beim Einziehen und ist wegen der dort geringeren zulässigen Spannungen und niedrigeren Steifigkeit des Rohres, die zu größeren Verformungen führt, eher im Lastfall Langzeit maßgebend.

Der Krümmungsradius beim Einziehen und damit die mindestens erforderliche Länge der Baugrube sollte nicht unter 25 Da des Rohres betragen. Dieser Mindestradius ist über die gesamte Länge des Rohrstranges, also auch im Übergangsbereich zwischen Baugrube (Schacht) und Gelände anzustreben.

#### 8.2.3.2 Zusammenfassende Bewertung der FE-Berechnungen

Für die Berechnungen wird von einem neuen PEHD-Rohr mit Außendurchmesser 280 mm und Wandstärke 38,7 mm auf einem verbleibenden halben Steinzeugrohr DN 150 ausgegangen. Die Berechnungen zeigen, daß Riefen und Kerben bis zu einer Tiefe von 3 mm in den Nachweisen vernachlässigt werden können. Für den Nachweis der Verformungen sollte von Resten des Steinzeugrohres ausgegangen werden, die den Bereich unter dem PEHD-Rohr aussteifen. Für den Spannungsnachweis ist dagegen die Lagerung auf einem halben Steinzeugrohr mit Hohlraum ein konservativer Grenzfall. Über die verbleibende Längsdehnung im Rohr sowie über den Nachweis der Stabilität sind weitere Untersuchungen erforderlich. Vereinfacht kann der Stabilitätsnachweis mit dem Verfahren nach Sonntag /3/ mit dem ungünstigsten, global auftretenden Radialdruck geführt werden.

## 9. Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens können wie folgt zusammengefasst werden:

### Beanspruchung beim Einziehen, Kurzzeit-Lastfall

Infolge Reibung des hinter dem Einziehschacht ausgelegten Rohrstranges ergibt sich eine Zugkraft im Bereich der Einziehbaugrube, die mit einer Biegebeanspruchung durch das Hinabführen des Rohrstranges zu überlagern ist. Da sich aufgrund der Zugkraft mit einem ungünstig angesetzten Reibungskoeffizienten nur zulässige Einziehlängen von etwa 680 m bei 20°C und 425 m bei 40°C ergeben, ist eine Reduzierung dieses Anteiles zumindest bei großen Einziehlängen auf der Baustelle durch Rollen zur Reibungsverminderung, Ausnutzung eines evtl. vorhandenen Gefälles oder Druckkraft in Rohrlängsrichtung (z. B. durch zusätzlichen Seilzug in halber Stranglänge mittels Bagger) sinnvoll. Die im Bereich des Altrohres infolge Reibung aus Erddruck evtl. vorhandene größere Längsdehnung trifft nicht zusammen mit der starken Krümmung beim Einziehen und ist wegen der dort geringeren zulässigen Spannungen und niedrigeren Steifigkeit des Rohres, die zu größeren Verformungen führt, eher im Lastfall Langzeit maßgebend.

Der Krümmungsradius beim Einziehen und damit die mindestens erforderliche Länge der Baugrube sollte nicht unter 25 Da des Rohres betragen. Dieser Mindestradius ist über die gesamte Länge des Rohrstranges, also auch im Übergangsbereich zwischen Baugrube (Schacht) und Gelände anzustreben.

### Standsicherheitsnachweise mit FEM-Berechnungen, Langzeit-Lastfall

Um Unsicherheiten und unterschiedliche Lagerungsbedingungen über die Länge des eingezogenen Rohrstranges abzudecken, ist bei den FE-Berechnungen wie in Abschnitt 8.1.4 mit konservativen Randbedingungen zu rechnen bzw. es sind Parameterstudien durchzuführen. Bohrungen für den Sickerwassereintritt sind zu berücksichtigen. Dies kann z. B. entsprechend /4/ bei ebenen Modellen durch Reduktion der Bezugslänge des Rohres geschehen. Übliche Riefen und Kerben bis zu einer Tiefe von 3 mm können in den Nachweisen vernachlässigt werden. Die verbleibende Längsdehnung im Rohr ist noch weiter zu untersuchen. Als erster Anhaltswert kann eine Dehnung von 0,8% pro 100 m Rohrstrang angesetzt werden. Dadurch wird die zulässige Einziehlänge beschränkt. Der Stabilitätsnachweis kann entweder durch eine nichtlineare FEM-Analyse nach Theorie 2. Ordnung unter 2,0-fachen Einwirkungen oder mit Hilfe des analytischen Berechnungsverfahrens nach Sonntag /3/ mit dem ungünstigsten, global auftretenden Radialdruck geführt werden.

## **10. Leitfaden der erforderlichen Maßnahmen beim Einsatz des Berstliningverfahrens auf Deponien**

### 10.1 Ausschreibungs- und Planungsphase

In der Ausschreibungs- bzw. Genehmigungsplanung müssen die nachfolgend aufgezählten Informationen bereitgestellt werden:

Beschreibung der Maßnahme incl. Altbestand mit Kamerabefahrung und Neigungsmessung

Bodenangaben/-untersuchungen mit Einbaudetails und eventuellen Einbaubesonderheiten insbesondere in der Leitungszone wie z.B. Betonfundamente

Müll-/Auflastbeschreibung

Angaben zu Gefahrstoffen wie z.B. Asbesteinlagerungen für Aufgrabungen / Arbeitsschutz

Angaben zum Sickerwasser mit Angaben zu bekannten chemischen Inhaltsstoffen und zur Temperatur des Sickerwassers (Spitzen- und Dauertemperaturen)

Angaben zum Entgasungssystem wie Lage und Verlegetiefe sowie zum Deponiegas und dessen chemischer Zusammensetzung

Angaben über Anschlüsse der Sickerwasserdrainage an vorhandene Deponiebauwerke (insbesondere an Schächte)

## 10.2 Material

Der Istzustand der vorhandenen Rohrleitungen soll unter besonderer Berücksichtigung der vorhandenen Schäden beschrieben werden. Aus dem Grad und der Art der Schädigung soll versucht werden, auf eventuelle besondere Anforderungen an das Material des Neurohres und zu erwartende Besonderheiten beim Einziehen rückzuschließen.

Zur Kontrolle des Materiales des Neurohres sind direkt hinter der Rakete 2.00 m Vollrohr anzubringen. Dieses Vollrohrstück wird mit der Rakete nach dem Berstvorgang geborgen und durch die Bauleitung visuell überprüft. Es kann gegebenenfalls zu weiteren Untersuchungen (z.B. einer Zeitstandinnendruckprüfung) verwendet werden.

## 10.3 Bauausführung

Die Lagerung der Rohre auf der Baustelle muss gemäß Vorgaben des Herstellers erfolgen (Stapelung /Witterungseinflüsse). Die Transporte zum/vom Schweißort und die Zuführung zur Rakete müssen unter Einhaltung der zulässigen Biegeradien riefen- und reibungsfrei erfolgen. Eckpunkte und Kurven sind entsprechend abzusichern.

## 10.4 Kontrollen während der Bauausführung

Für jede sanierte Haltung ist an Ein- und Austrittsstelle die Lage des Neurohres aufzunehmen (Geometrie der entstandenen Leitungszone). Soweit Baugrundkenngrößen nicht schon durch die Ausschreibungsunterlagen bekannt sind, müssen sie zur Erstellung einer statischen Berechnung ermittelt werden. Bodenmechanische Untersuchungen werden durch Probennahme mit Laboruntersuchungen der Proben durchgeführt. Vom Untersuchenden sind Elastizitätsmodul und Querdehnzahl für alle Materialien anzugeben. Es wird empfohlen, eventuelle Schwächungen der Neurohre durch den Einziehvorgang durch vergleichende Zeitstandsinnendruckversuche an dem durchgezogenen

Vollrohrstück und einer Rückstellprobe aus der gleichen Lieferung zu überprüfen. Werden die Rohre mit einem Einziehradius  $< 25 Da$  eingebaut ist die Verschwächung immer festzustellen und in der statischen Berechnung zu berücksichtigen.

Die Zugkräfte beim Einziehen sollen aufgezeichnet werden. Die Einhaltung der Biegeradien muß durch die Geometrie der Baugruben sichergestellt sein.

Vorhandene Riefen in den Rohren sind aufzunehmen. Eine Kontrolle erfolgt visuell an dem Vollrohrstück, dass direkt hinter der Berstrakete die ganze Sanierungsstrecke durchfahren hat.

## 10.5 Statische Berechnungen

### 10.5.1 Vorbemessung

Mit Hilfe der Beschreibung im LV wird eine Vorbemessung erstellt, die die folgenden Punkte berücksichtigen muß:

**Kurzzeitnachweis mit Biegeradien:** Der Mindestbiegeradius beim Einziehen beträgt  $25 Da$ . Sind deponiespezifisch kleinere Radien erforderlich ist nachzuweisen, dass keine plastischen Dehnungen auftreten. Andernfalls sind diese in der weiteren statischen Berechnung zu berücksichtigen.

**Einziehlasten:** Die maximale Zugkraft im Rohr ist für eine Dehnung von  $\epsilon = 0.8$  % festzulegen:  $\epsilon = Z / ( E * A ) \leq 0.8 \%$

mit  $Z$  Zugkraft im Rohr

$A$ : Querschnittfläche Rohr

$E$  Kurzzeitelastizitäts-/bzw.kriechmodul

$\epsilon$  Dehnung

sonst.**Abminderungen** im Einzelfall für Temperatur, Medienangriff, Einwirkungen durch Reste des Altrohres, evtl.weitere deponiespezifische Besonderheiten

**Langzeitnachweis** für die vorgesehene Überdeckungshöhe unter Berücksichtigung der Einbaumethode

### 10.5.2 Endgültige statische Berechnung

Abbildung der bei den Kontrollen vorgefundenen Geometrien und Materialien in einem FEM Modell gemäß Punkt 8.1.4 und Berechnung; im Allgemeinen sind Parameterstudien erforderlich, da kein einheitlicher Einbau vorausgesetzt werden kann und evtl. Unsicherheiten abzudecken sind (z.B. Altrohrreste, Lageabweichungen auf nicht untersuchten Streckenteilen).

Als Ergebnis ergibt sich, ob die vorgesehene Überdeckungshöhe für die Rohre und die erreichte Einbauqualität zulässig ist oder ob die Belastung eventuell reduziert werden muß.

Riefen, die tiefer als 8 % der Wanddicke sind, sind durch einen Abschlag in der Wanddicke in der Berechnung zu berücksichtigen.

## 10.6 Nachfolgearbeiten

Für eventuell notwendige spätere Arbeiten und eine ausreichende Qualitätssicherung sind die folgenden Maßnahmen und Unterlagen erforderlich :

Nach dem Bersten sind eine Kamerabefahrung und eine Neigungsmessung durchzuführen  
Erstellen von Bestandsplänen  
Geprüfte Rohrstatik  
Berstprotokoll /Unterlagen zur Qualitätssicherung

## 11. Datenblätter

Um ein einfaches Vervielfältigen zuzulassen werden die folgenden Datenblätter als Anlage beigefügt.

### 11.1 Vorstatik

Als Datenblatt 11.1 wird eine Liste beigefügt, die vom planenden Ingenieurbüro ausgefüllt werden soll. Sie dient als Grundlage für die statische Vorbemessung und die Auswahl der einzuziehenden Rohre.

### 11.2 Endgültige statische Berechnung

Als Datenblatt 11.2 wird eine Liste beigefügt, die vom bauüberwachenden Ingenieurbüro, vom Fremüberwacher und der bauausführenden Firma ausgefüllt werden soll. Sie dient als Grundlage für die endgültige statische Berechnung der Rohre.

Dr. Henkel  
WBI

Dr. Hoch  
Institut für Statik

Reuchlein  
WBI

Stegner  
Institut für Statik

## 11.1 Datenblatt Vorbemessung

Deponie: .....

### Bodenkennwerte

Bodenschicht	Material	Schichtdicke h [m]	(alternativ)		Querdehnzahl v	Wichte $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
			Verform.-mod. E <sub>v</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Steifemodul E <sub>s</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		
Oberflächen- abdichtung						
Deponiegut						
Drainageschicht						
Rohrbettung						
Mineralische Abdichtung						

### Einbauzustand des Altrohres

Standard nach DIN 19667	
Sonderfall, Skizze siehe Seite .....	

### Rohrabmessungen

Rohr	Außendurchmesser D <sub>a</sub> [mm]	Wandstärke t [mm]	Lochdurchmesser d <sub>l</sub> [mm]	Lochabstand [mm]	
				Längsri.	Umfangsri.
Neurohr					
Altrohr			=====	=====	=====

### Rohrmaterial

Neurohr	
PE63	
PE80	
PE100	
.....	

Altrohr	
Steinzeug	
PE	
PVC	
.....	

Auslegungszeitraum

50 Jahre	
.....	

Auslegungstemperatur

40°C	
30°C	
.....	

Abminderungsfaktor Medien (Chemische Angriffe / Deponiesickerwasser)

Bauschutt	1,0	
Hausmüll	0,9	
Sondermüll	.....	

Kleinster Biegeradius beim Einziehen

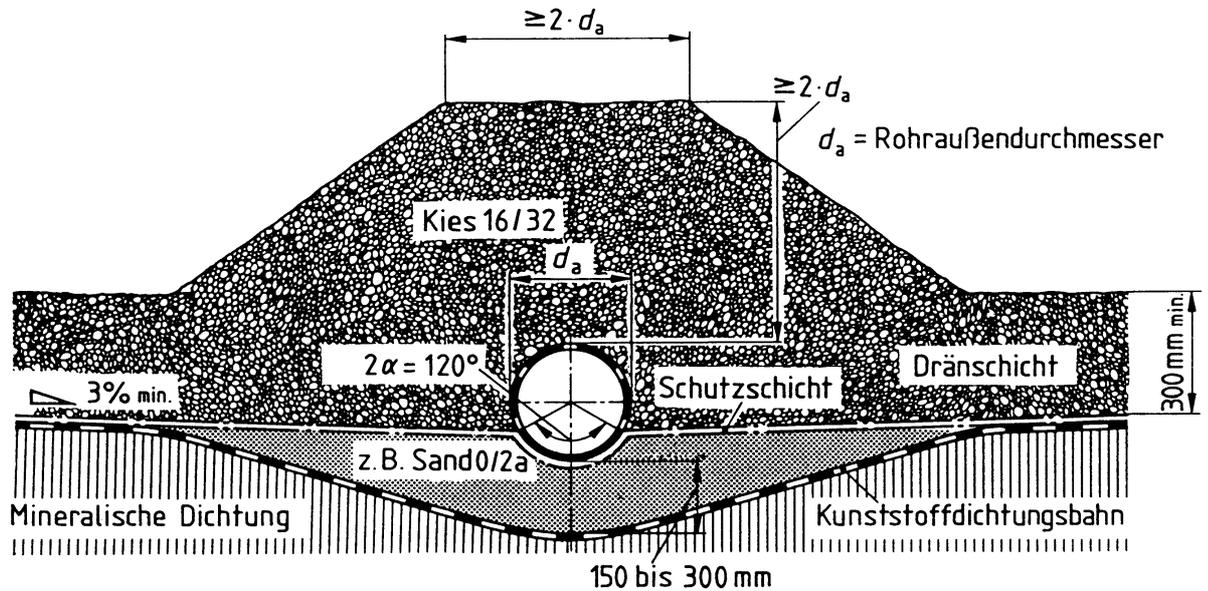
≥ 25 Da	
.....	

Einzihlänge

Lfd. Nr.	Strangbezeichnung	Einzihlänge L [m]
1	.....	
2	.....	
3	.....	
4	.....	
5	.....	

## Darstellung der Leitungszone

Ausführungsbeispiel nach DIN 19667



Skizze der vorhandenen Leitungszone (Altrohr) falls abweichend von obiger Darstellung

## 11.2 Datenblatt endgültige statische Berechnung

Geometrie der entstandenen Leitungszone / Skizze(n) des aktuellen Zustandes einfügen (z.B. Eintragen der Lage des Neurohres in eine zeichnerische Darstellung der alten Rohrleitungszone)

- falls vorhanden Fotos beifügen
- wurden Altrohrreste vorgefunden – wenn ja wie groß und wo in der Leitungszone ?

### Berstlining-Verfahren

Dynamisches Bersten	
Statisches Bersten	

### Kleinster realisierter Biegeradius beim Einziehen

.....m

### Gemessene Einzugskräfte

Lfd. Nr.	Strangbezeichnung	Max. Durchmesser Aufweitkörper [mm]	Max. Einzugskraft N [kN]
1	.....		
2	.....		
3	.....		
4	.....		
5	.....		

### Größe der Riefen und Kerben

Tiefe e [mm]	Breite b [mm]	Richtung		
		längs	Umfang	schräg

### Besonderheiten

.....

.....

.....

.....

.....