

Bericht Nr. 420_4236
der Forschungsvereinigung Fernwärme

Substitution von Natursanden bei der Verlegung von
erdverlegten (kaltgehenden) Rohren durch Recycling-Material

Forschungsvorhaben 9930 B
der
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke e.V.“
gefördert aus Mitteln vom
Bundesminister für Wirtschaft

Forschungsvereinigung Fernwärme:
Prof. Dr.-Ing. M. Gietzelt

Forschungsstelle 1:
FITR, Projektleiter
Prof. Dr.-Ing. D. Werner

Forschungsstelle 2:
FFI, Projektleiter
Dipl.-Ing. Th. Grage

Der Bericht enthält 34 Seiten.
Dezember 1995

Inhalt

1 Zusammenfassung.....	4
2 Einleitung	5
3 Anforderungen an Kunststoff-Recyclate bei Verwendung als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen	6
4 Ableitung der Aufgabenstellung	9
5 Auswahl der zu untersuchenden Kunststoff-Recyclate	13
6 Durchführung der Kunststoff-Recyclat-Untersuchungen	14
7 Ergebnisse der Untersuchungen	16
7.1 Korngrößenanalyse	16
7.2 Schüttdichte der Kunststoff-Recyclate	17
7.3 Kompressionsversuche	19
7.4 Proctordichte	21
7.5 Plattendruckversuche.....	21
7.6 Umweltverträglichkeit	22
7.7 Zusammenstellung weiterer Untersuchungsergebnisse.....	24
7.8 Wirtschaftlichkeit	25
8 Schlußfolgerungen.....	26
9 Literatur.....	28
10 Anlage	30

1 Zusammenfassung

Der Preisanstieg für Natursande aufgrund reduzierter Vorkommen sowie der rasante Anstieg von Kunststoffabfällen und die daraus resultierenden ökologischen und ökonomischen Belastungen führten zu der Fragestellung, ob es Möglichkeiten für eine Substitution von Natursanden durch Kunststoff-Recyclate als Bettungsmaterial für erdverlegte und zunächst kaltgehende Rohrleitungen gibt. Die Forschungsstellen Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau Weimar e.V. (FITR) und Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V. (FFI) haben festgestellt, daß Kunststoff-Recyclate als Bettungsmaterial betriebsbedingte, umweltbedingte, lagebedingte, kopplungsbedingte, kommunikationsbedingte, technologiebedingte sowie antizipative Anforderungen erfüllen müssen. Durch theoretische und experimentelle Untersuchungen wurde eine Auswahl von 15 Kunststoff-Recyclaten getroffen, die einen Einsatz als Bettungsmaterial erwarten lassen. Für diese Materialien wurden durch Analysen und Kompressionsversuche die relevanten Werkstoffkenndaten ermittelt und nach einer weiteren Auswahl an 5 Recyclaten Plattendruckversuche durchgeführt und mit dem konventionellen Bettungsmaterial verglichen. Die Ergebnisse haben ergeben, daß es Recyclate gibt, die den Anforderungen hinsichtlich der Interaktion mit dem Rohrmaterial genügen können, aber gleichzeitig die Anforderungen hinsichtlich der Verdichtbarkeit und Steifigkeit (Setzungen) sowie hinsichtlich der Umweltverträglichkeit (Überschreitung der Grenzwerte für Phenol und AOX) nicht erfüllen. Obgleich damit als Ergebnis festzuhalten ist, daß aufgrund der aktuellen Umwelt- und Bettungsanforderungen derzeit kein Kunststoff-Recyclat zur Substitution von Natursanden bei der Verlegung erdverlegter Rohre gefunden werden konnte, wurde das Forschungsziel erreicht. Bei der Sondierung von Möglichkeiten zur Sandsubstitution muß zukünftig die Aufmerksamkeit auf den Einsatz von Baumaterial-Recyclaten gerichtet werden, die in sehr großen Mengen anfallen und deren Deponierung gerade im Bereich von Korngrößen bis 5 mm in zunehmendem Maße Probleme bereitet.

2 Einleitung

Mit dem Forschungsvorhaben wurde das Ziel verfolgt, Möglichkeiten einer Substitution von Natursanden durch Kunststoff-Recyclate als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen zu prüfen. Die Anregung zur Bearbeitung des Forschungsthemas ergab sich zum einen aus der Tatsache, daß die Preise für Natursande auf Grund beschränkter Vorkommen und der Forderungen des Umweltschutzes im Steigen begriffen sind, und daß andererseits die Menge an Kunststoffabfällen ansteigt und ihr Deponieren zunehmend schwieriger wird. Die allgemeinen Bemühungen um eine sinnvolle Wiederverwendung von Kunststoffabfällen in verschiedensten Bereichen der Wirtschaft gaben die Anregung zur Untersuchung ihrer Verwendbarkeit als Bettungsmaterial bei der Erdverlegung von Rohrleitungen. Dabei sollten hauptsächlich solche Kunststoff-Recyclate getestet werden, für die es bisher noch keine sinnvolle Wiederverwendung gibt und die deshalb auf Deponien mit zunehmendem Kostenaufwand entsorgt werden müssen.

Auf Grund der großen volkswirtschaftlichen Bedeutung erfuhr das Forschungsvorhaben eine 100%-ige Förderung durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi). An der Lösung der Forschungsaufgabe waren das Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e.V. (FFI) als Erstmittelempfänger und das Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau Weimar e.V. (FITR) als Letztmittelempfänger hauptsächlich beteiligt. Darüber hinaus wurden das Thüringer Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK) Rudolstadt-Schwarza und das Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover zur Mitarbeit herangezogen.

Der Bearbeitungszeitraum erstreckte sich von Oktober 1994 bis September 1995.

3 Anforderungen an Kunststoff-Recyclate bei Verwendung als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen

Die Erfüllung der nachfolgend aufgelisteten Anforderungen, die in 7 Gruppen gegliedert sind, ist das entscheidende Kriterium für die technische und wirtschaftliche Eignung von Kunststoff-Recyclaten als Bettungsmaterial.

Betriebsbedingte Anforderungen:

- Das Bettungsmaterial muß in der Lage sein, die Eigenlast des Rohres, die Auflast der Überdeckung, die hydrostatische Last des Strömungsmediums und Verkehrslasten aufzunehmen. Die erforderliche Druckfestigkeit der Bettung liegt in der Größenordnung von $0,02 \dots 0,1 \text{ N/mm}^2$, wobei der Maximalwert bei Abwasserkanälen und -leitungen größeren Durchmessers und Überdeckungen bis zu 4 m vorliegt, während der Minimalwert für Kunststoff-Gasleitungen mit geringer Überdeckung zutrifft. Der Nachweis für die Erfüllung dieser Forderung kann durch Kompressions-, Plattendruck- und Bettungsversuche geführt werden.
- Das Bettungsmaterial muß beim Einsatz unter Verkehrswegen eine ausreichende Stabilität gegenüber dynamischen Verkehrslasten aufweisen. Der Nachweis kann durch Bettungsversuche erfolgen.
- Die Lebensdauer des Bettungsmaterials muß mindestens 50 Jahre betragen. In dieser Zeit dürfen keine Alterungsprozesse ablaufen, die die Bettungseigenschaften beeinträchtigen können. Zur Beurteilung der Lebensdauer sind die vorliegenden Erfahrungen aus dem Bereich der Kunststoff-Technologie heranzuziehen.

Umweltbedingte Anforderungen:

- Die als Bettungsmaterial verwendbaren Kunststoff-Recyclate müssen chemisch und biologisch neutral sein. Sie dürfen nicht zu einer Kontaminierung des Baugrundes führen. Der Einsatz für eine Rohrbettung in Trinkwasserschutzzonen muß möglich sein. Biologisch abbaubare Kunststoff-Recyclate sind als Bettungsmaterial ungeeignet. Der Nachweis für die Erfüllung dieser Forderungen und

damit verbunden der Umweltverträglichkeit muß durch chemisch-biologische Analysen von seiten der Recyclat-Lieferanten geführt werden.

- Die Kunststoff-Recyclate dürfen nicht brennbar sein.
- Hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen Rohrwerkstoff und Bettungsmaterial sollten die Recyclate korrosionshemmend wirken.

Lagebedingte Anforderungen:

- Kunststoff-Recyclate müssen beim Einsatz als Bettungsmaterial eine ausreichende Stabilität (Steifigkeit, Tragfähigkeit) bei Dauerbelastung besitzen. Im Falle einer Bettungstechnologie mit Recyclat-Granulaten muß eine entsprechende Verdichtung möglich sein. Im Falle anderer Bettungstechnologien (z. B. selbsterhärtende Suspensionen, geschlossenzellige Schäume, Rohrummantelung mit Halbschalen aus Kunststoff-Recyclaten) muß eine solche Aushärtung gewährleistet sein, daß eine genügend hohe Festigkeit erreicht wird, die eine stabile Rohrbettung garantiert. Der Nachweis hierfür kann durch Kompressions-, Plattendruck- und Bettungsversuche geführt werden.

Kopplungsbedingte Anforderungen:

- Die Wechselwirkungen zwischen Rohrwerkstoff, Bettungsmaterial, Überschüttung und angrenzendem Baugrund muß bei Einsatz von Kunststoff-Recyclaten beherrschbar bleiben. Die Nachweisführung hierfür ist erst in einem Feldversuch oder in der späteren Praxis möglich.
- Es muß sichergestellt sein, daß eine Kopplung von Recyclat- und Natursandbettung möglich ist. D.h., die Eigenschaften beider Bettungsarten müssen aufeinander abgestimmt sein.

Kommunikationsbedingte Anforderungen:

- Der Zustand der Bettung bzw. der Bettungskonstruktion in Abhängigkeit von der Belastungszeit muß bei Recyclat-Einsatz kontrollierbar sein. Zum Nachweis

können Erddruckmessungen in der Leitungszone sowie Messungen der Rohrverlagerung dienen.

Technologiebedingte Anforderungen:

- Der Einsatz von Kunststoff-Recyclaten als Bettungsmaterial kann nur dann erfolgen, wenn ein ausreichendes und flächendeckendes Potential an verwertbaren Kunststoffabfällen vorhanden ist, das für eine anderweitige Wiederverwendung nicht geeignet ist.
- Kunststoff-Recyclate haben nur dann als Bettungsmaterialien eine Chance, wenn sie billiger als Natursande sind bzw. ihr Einsatz volkswirtschaftlich und ökologisch sinnvoller ist als der von Natursand.
- Beim Einsatz von Kunststoff-Recyclaten als Bettungsmaterial muß eine Verbesserung der Bettungstechnik durch eine Verringerung der Streubreite der granulometrischen und rheologischen Eigenschaften der Recyclate erreichbar sein.
- Der Einbau der Kunststoff-Recyclate in den Rohrgraben muß möglichst einfach und mit leicht handhabbarer Technik erfolgen.
- Recyclate sollten hemmend auf den Wurzelbewuchs wirken.
- Die Herstellung und Verarbeitung der Recyclate sollte möglichst ohne eine sortenreine Sortierung der Kunststoffabfälle erfolgen. Die Eigenschaften der Recyclate sollten bei ihrer Herstellung und Verarbeitung verfahrenstechnisch beeinflussbar sein.
- Die Recyclate müssen ohne Beeinträchtigung ihrer Eigenschaften transportier- und lagerbar sein. Im Falle des Einsatzes der Recyclate in Form von Granalien sind gute schüttguttechnische Eigenschaften erwünscht. Eine Staubentwicklung soll bei der Handhabung der Recyclate vermieden werden. Im Falle des Einsatzes der Recyclate als Suspensionen darf es nicht zu Sedimentationser-

scheinungen kommen. Im Falle des Einsatzes in Form von Schäumen muß eine möglichst schnelle Schaumaushärtung gewährleistet sein.

- Recyclate müssen auf der Baustelle möglichst witterungsunabhängig verarbeitbar sein. Es darf keine Qualitätsminderung infolge von Witterungseinflüssen eintreten.
- Es muß ein kontinuierlicher Einbau der Recyclate (im Sinne einer Fließfertigung) im Rohrgraben möglich sein.
- Recyclate müssen Bettungsvorschriften und -normen für Wasser-, Abwasser- und Gasleitungen erfüllen, insbesondere das ATV-Arbeitsblatt A 127 /1/, das ATV-Arbeitsblatt A 139 /2/, das Merkblatt für das Verfüllen von Leitungsgräben /3/ sowie im Bereich von Verkehrsflächen die ZTV A-StB 89 /4/ und die ZTV E-StB 94 /5/.
- Die Anforderungen an die erforderliche Baufeldfläche für Maschinen, Geräte, Vorrichtungen usw. sollten minimal sein.

Antizipative Anforderungen:

- Kunststoff-Recyclate müssen bei ihrem Einsatz als Bettungsmaterialien die Anwendung von Rechenmodellen zur statischen Rohrleitungsberechnung ermöglichen. Gegebenenfalls ist dazu eine Modifizierung des ATV-Arbeitsblattes A 127 /1/ erforderlich.

4 Ableitung der Aufgabenstellung

Die Erfüllung der umfangreichen Anforderungen an Kunststoff-Recyclate als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen macht sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen erforderlich.

Theoretische Untersuchungen:

Bezüglich der **Recyclate** sind folgende Untersuchungen erforderlich:

- Zusammenstellung von Kunststoff-Abfällen, für die gegenwärtig noch keine nutzbringende Wiederverwendung möglich ist, so daß sie deponiert werden müssen und damit die Umwelt belasten.
- Untersuchung der Beeinflußbarkeit der Zusammensetzung sowie der stofflichen, granulometrischen und rheologischen Eigenschaften von Kunststoff-Recyclaten durch die Produktion und die Aufbereitungstechnik.
- Ableitung notwendiger Eigenschaften der Recyclate aus den dargestellten Anforderungen an die Bettung beim gegenwärtigen Stand der Bettungstechnik.
- Ableitung notwendiger Eigenschaften der Recyclate für unkonventionelle, neuartige Bettungskonstruktionen (z. B. verdichtungsloses Einbringen von Recyclaten durch Verschäumen oder in Form selbsterhärtender Suspensionen oder Rohrummantelung mit Halbschalen aus Kunststoff-Recyclaten).
- Ausblick auf zukünftige Möglichkeiten der Entwicklung von Recyclaten für die Bettungstechnik von erdverlegten Rohrleitungen.

Hinsichtlich der **Verfügbarkeit der Kunststoffabfälle** ist folgendes zu prüfen:

- Verfügbares Potential an verwertbaren Kunststoff-Abfällen und dessen territoriale Verteilung.
- Vor- und Nachteile des Recyclat-Einsatzes als Bettungsmaterial für Rohrleitungen gegenüber anderweitigen Möglichkeiten der Stoffverwertung.
- Grad der Entlastung des tatsächlichen Müllaufkommens in der gesamten Wirtschaft.

Zur **Aufbereitungs- und Bettungstechnik** sind folgende Überlegungen anzustellen:

- Anforderungen an die Sortierung von Kunststoff-Abfällen.
- Notwendige Veränderungen an der Aufbereitungstechnik für die Recyclate.
- Transportmöglichkeiten und -probleme für die Recyclate.
- Sondierung von Möglichkeiten der Entwicklung neuartiger Bettungskonstruktionen.

Von großer Bedeutung ist auch ein Kostenvergleich zwischen Natursanden und Kunststoff-Recyclaten:

- Vergleich der Kosten für die Herstellung der Recyclate mit den Kosten für die Gewinnung von Natursanden.
- Vergleich der Transportkosten.
- Eventuelle Auswirkungen auf die erforderlichen Arbeitsplätze.

Desweiteren interessieren auch die möglichen Auswirkungen der Sandsubstitution auf den Umweltschutz und die Volkswirtschaft. Es muß auch geprüft werden, ob und unter welchen Bedingungen eine Erweiterung des Anwendungsbereiches der Kunststoff-Recyclate auf andere Anwendungsbereiche denkbar ist.

Experimentelle Untersuchungen:

Zunächst sollten Recyclat-Granulate untersucht werden. Dabei sind folgende Laboruntersuchungen zur Klärung der Recyclat-Eigenschaften und der Bettungseigenschaften notwendig:

- Siebanalysen.
- Ermittlung der Schüttdichten der aufbereiteten Kunststoff-Recyclate (Naßaufbereitung) im Schwimm-Sink-Verfahren, im trockenen Zustand sowie nach längerer Freiluftlagerung.
- Untersuchung des Lastsetzungs- bzw. Zeitsetzungsverhaltens ausgewählter Recyclate durch Kompressionsversuche mit mehreren Laststufen je Versuch und bei verschiedenen Einbauzuständen; Ermittlung der Steifemoduli.
- Bestimmung der Proctordichte.
- Ermittlung der Wasseraufnahmefähigkeit der Recyclate durch den Enslin-Versuch.
- Plattendruckversuche zur Bestimmung der Verformungsmoduli.
- Untersuchung der Umweltverträglichkeit von Kunststoff-Mahlgütern.
- Versuche zur Beurteilung der allgemeinen Toxizität der Kunststoff-Recyclate.

Für den Fall, daß durch diese Versuche als Bettungsmaterial brauchbare Kunststoff-Recyclate gefunden werden, waren Technikumsversuche in Form von Mini-Bettungsversuchen mit einem Modellrohr mit Erfassung der Bettungsdrücke bei Querverschiebung, der Schwankungsbreite der Recyclat-Eigenschaften sowie gegebenenfalls des Einflusses dynamischer Auflasten vorgesehen.

5 Auswahl der zu untersuchenden Kunststoff-Recyclate

In Zusammenarbeit mit dem Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (TITK) wurden für die Untersuchungen die in Tabelle 1 aufgelisteten 15 Kunststoff-Recyclate ausgewählt, bei deren Einsatz als Bettungsmaterial erwartet werden konnte, daß die unter Punkt 2. dargestellten Anforderungen am aussichtsreichsten erfüllt werden können. Es handelt sich um Recyclate, die in großen Mengen zur Verfügung stehen und für die noch keine anderweitige Verwendung möglich ist.

Tabelle 1: Bezeichnung und Kurzbeschreibung der Kunststoff-Abfälle nach /6/

Bezeichnung	Kurzbeschreibung
E1	Repräsentatives Kunststoff-Recyclat eines Elektronikschrott-Entsorgers, wie es derzeit bei der Entsorgung von elektronischen Geräten in großen Mengen anfällt. Das Recyclat wurde vom Entsorger aufbereitet und zerkleinert.
E2	Ein zweites repräsentatives Recyclat-Gemisch eines Elektronikschrott-Entsorgers. Aufbereitung und Zerkleinerung ebenfalls durch den Entsorger.
E3	Dieses Kunststoff-Recyclat wurde im TITK aus angelieferten Teilen eines Entsorgers für Elektro und Elektronikschrott aufbereitet. Nach der Metallseparierung wurden die Teile geschreddert und mit einer Schneidmühle (Siebgrößen 20 mm x 20 mm und 10 mm x 10 mm) zerkleinert.
E4	Das Kunststoff-Recyclat E3 wurde nochmals mit einer Schneidmühle (Siebgröße 5 mm Rundloch) zerkleinert.
E5	Gemisch von Kunststoff-Recyclaten aus Elektronikschrott der Chargen E1, E2 und E4.
E6	Recyclat aus ausgewählten Gehäuseteilen des Elektronikschrottes, geschreddert und gemahlen mit den Siebgrößen 20 mm x 20 mm, 10 mm x 10 mm und 2 x mit 5 mm Rundloch.
E7	Das Mahlgut E6 wurde nochmals mit einer Schneidmühle (3 mm Rundloch) zerkleinert.
E8	Gemisch aus den Mahlgütern E6 und E7 in einem Verhältnis von 1 : 2.
PU1	Sortenreines Recyclat aus lackierten Gehäuseteilen aus Polyurethan-Hartschaum. Die Gehäuseteile wurden von Metallteilen befreit, geschreddert und mit einer Schneidmühle (Siebgröße 10 mm x 10 mm) zerkleinert.
PU2	Zerkleinerung der Charge PU1 mit der Schneidmühle (Siebgröße 5 mm).
PU3	Mahlgut von PU1 in einer Schlagmühle zerkleinert.
PO1	DSD-Rückstand aus der Schwimm-Sink-Fraktion einer kommerziellen Kunststoff-Aufbereitungsanlage (DSD = Duales System Deutschland; Hausmüll).
PO2	Zerkleinerter DSD-Rückstand PO1, mit Schneidmühle (Siebgröße 5 mm Rundloch) zerkleinert.
PO3	Gemisch aus Kunststoff-Recyclaten des DSD-Aufkommens und der Automobilentsorgung. Die grob zerkleinerten Recyclate wurden von den Metallteilen getrennt und mit der Schneidmühle (Siebgröße 10 mm x 10 mm) zerkleinert.
PO4	Charge PO3, zerkleinert mit der Schneidmühle (Siebgröße 5 mm Rundloch).

Auf Grund der unter 2. formulierten Anforderungen an Kunststoff-Recyclate scheiden viele andere Stoffe als Bettungsmaterialien aus, so Kunststoff-Faser-Abfälle, Weichschäume (Polystyrol und Polypropylen) und Elastomere (z. B. Gummi). Ebenso kommt der Einsatz von voluminösen Recyclaten (z. B. Folienabfälle) nicht in Frage. Auch Recyclate aus der Werkstoffgruppe der Thermoplaste und Duromere sind nur stark begrenzt einsetzbar, da sie in der Regel im innerbetrieblichen Materialkreislauf wiederverwendet werden /6/.

6 Durchführung der Kunststoff-Recyclat-Untersuchungen

Für alle in Tabelle 1 aufgeführten Recyclate wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Siebanalysen nach DIN 53477 mit einem Laborsiebgerät KS 1 der Firma Retsch. Die Siebe entsprachen der DIN 4188. Bestimmung der Ungleichförmigkeitszahl U der einzelnen Mahlgüter nach DIN 18196.
- Bestimmung der Schüttdichte der einzelnen Mahlgüter nach dem Einlaufverfahren der DIN 53110-A mit dem Einlaufgerät (Bauart Bohne) nach DIN 1060 Teil 3. Ermittlung der feuchten Dichte nach 300 h Freiluftlagerung.
- Untersuchung der Umweltverträglichkeit der Kunststoff-Recyclate in Anlehnung an die Kunststoff-Trinkwasser-Empfehlung (Bundesgesundheitsblatt 20 Nr. 1, Januar 1977) und nach DIN EN 71, Teil 3 (Sicherheit von Spielzeug) und Vergleich der Ergebnisse mit den Grenzwerten der Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe 1990, BGB 1 I Seite 2612.
- Versuche zur Beurteilung der allgemeinen Toxizität mit Hilfe des Wasserorganismustests nach DIN 38412.

Weiterhin wurden für die Kunststoff-Recyclate PO2, PO4, E5, E8 und PU2 (siehe Tabelle 1) im folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der Kornverteilung für die Recyclate E5, PU2 und E8.
- Ermittlung der Proctor-Kurve für die Recyclate E5, PU2 und E8.
- Ermittlung des Lastsetzungs- bzw. Zeitsetzungsverhaltens mit Hilfe von Kompressionsversuchen mit den jeweiligen Laststufen 10 - 30 - 0 - 30 - 80 - 120 kN/m² für die Recyclate PO2, PO4, PU2, E5 und E8. Dabei wurden folgende Einbauzustände untersucht:
 - verdichtet unter Wasser: PO2, PO4, PU2, E5 und E8
 - verdichtet ohne Wasser (trocken): PU2, E5 und E8
 - locker gelagert unter Wasser: PU2 und E5
 - locker gelagert ohne Wasser (trocken): PU2 und E5

Der ursprünglich geplante Enslin-Versuch für das Recyclat PU2 zur Ermittlung der Wasseraufnahmefähigkeit konnte nicht durchgeführt werden, da dieses Recyclat auf Grund seiner geringen Wichte im Versuchszylinder „aufschwimmt“.

Die Plattendruckversuche mit den Recyclaten PO2, PO4, E5, E8 und PU2 wurden im FFI durchgeführt.

7 Ergebnisse der Untersuchungen

7.1 Korngrößenanalyse

Im Ergebnis der durchgeführten Korngrößenanalysen kann für die gemahlene Kunststoff-Recyclate E1 bis E7, PO1 bis PO4 sowie PU2 und PU3 die Feststellung getroffen werden, daß die Körnungslinien eng gestuft sind, so daß man von vornherein mit Schwierigkeiten beim Verdichten rechnen muß. Als typisches Beispiel können die Blätter A1 und A2 im Anhang dienen, auf denen die Ergebnisse der Siebanalyse sowie die Körnungslinie für das Recyclat E4 angegeben sind.

Die kompletten Ergebnisse aller Siebanalysen für die untersuchten Recyclate ergeben, daß aus bautechnischer Sicht die Kunststoffe der Elektronikschrottaufbereitung als Bettungsmaterial in Frage kommen könnten. Ein Beleg für die

schlechte Massenverteilung der einzelnen Kornklassen sind die Ungleichförmigkeitszahlen U der einzelnen Mahlgüter, wie sie in Tabelle 2 aufgeführt sind.

Tabelle 2: Ungleichförmigkeitszahlen der Kunststoff-Recyclate und Vergleichswerte einiger Erdstoffe nach /6/

Kunststoff-Recyclat	Ungleichförmigkeitszahl U
E1	2,10
E2	2,12
E3	2,70
E4	2,98
E5	2,30
E6	3,92
E7	1,77
E8	3,43
PU1	7,00
PU2	2,46
PU3	0,02
PO1	2,30
PO2	2,57
PO3	2,48
PO4	2,10
Grober Sand	7
Grob-Mittelsand	5
Feinsand	2

Um ein breiteres Korngemisch herzustellen, wurde durch Modifizierung der Mahlverfahren und Herstellung von Mahlgutmischungen mit verschiedenen Siebgrößen versucht, aus den Recyclaten E6 und E7 ein breiteres Korngemisch (E8) zu gewinnen. Wie aus der Körnungslinie für E8 auf Blatt A3 des Anhangs hervorgeht, ist jedoch die Kornverteilung nach wie vor als enggestuft zu bezeichnen /8/.

7.2 Schüttdichte der Kunststoff-Recyclate

Im Gegensatz zu Sand, für den die Schüttdichte in der Größenordnung von $1,8 \text{ g/cm}^3$ liegt, ergaben sich für die untersuchten Recyclate wesentlich geringere Dichten. In Tabelle 3 sind die ermittelten Schüttdichten sowohl für trockenes als auch für feuchtes Gut nach 300 h Freiluftlagerung sowie die Größenordnung der Rohdichten zusammengestellt worden.

Tabelle 3: Schüttdichten und Größenordnung der Rohdichten der untersuchten Kunststoff-Recyclate

Recyclat- Bezeichnung	Schüttdichte (trocken) in g/cm^3	Schüttdichte (feucht) in g/cm^3	Größenordnung der Rohdichte in g/cm^3
E1	0,51	0,61	>1 >1,0
E2	0,52	0,63	
E3	0,56	0,60	
E4	0,54	0,65	
E5	0,52	0,62	
E6	0,52	0,65	
E7	0,54	0,62	
E8	0,53	0,63	
PU1	0,42	0,55	
PU2	0,39	0,68	
PU3	0,39	0,71	≈1,0
PO1	0,07	0,27	
PO2	0,15	0,30	
PO3	0,25	0,23	
PO4	0,32	0,35	

Bei den meisten Recyclaten hat sich die Schüttdichte nach Freiluftlagerung gegenüber dem trockenen Zustand nur geringfügig erhöht. Ausnahmen sind die Recyclate PU3, PO1 und PO2. Bei den Recyclaten PO1 und PO2 ist die erhöhte Wasseraufnahme hauptsächlich auf den relativ hohen Papiergehalt von ca. 17 %

zurückzuführen. Auf Grund dieses hohen Papiergehaltes und der damit verbundenen Setzungsgefahr bei Verrottung des Papiers sind diese Recyclate nicht als Bettungsmaterialien geeignet.

Bei den Recyclaten PO3 und PO4 liegt die Rohdichte unter der von Wasser, so daß bei Vorhandensein von Grundwasser Auftriebsprobleme entstehen können. Aus diesem Grunde sind diese Recyclate als Bettungsmaterialien ebenfalls nicht geeignet.

7.3 Kompressionsversuche

Kompressionsversuche dienen zur Beurteilung des Setzungsverhaltens sowie zur Ermittlung des Steifemoduls der Recyclate. Zur Untersuchung wurden die Recyclate E5, E8, PU2, PO2 und PO4 ausgewählt. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen für die bereits in Kapitel 6 aufgeführten Einbauzustände ergeben, daß sehr variable bodentechnische Kenndaten für die Recyclate existieren. So sind die Materialien E5, E8 und PU2 als enggestuft zu bezeichnen. Böden mit enggestuften Körnungslinien gelten generell als schwer verdichtbar. Die Wassergehalte der Materialien sind mit rd. 30...45,5 % bei Erreichen von 100 % Proctordichte im Vergleich zu natürlichen Böden sehr hoch und sogar ungewöhnlich. Die Wichten und Steifemoduli sind im Vergleich zu natürlichen Böden sehr gering. Die Kunststoff-Recyclate könnten aber unter Umständen bei der Aufbereitung bzw. bei der Veredlung mit natürlichen Böden eingesetzt werden, um bestimmten Anforderungen als Grabenverfüllmaterial zu entsprechen.

Zusammenfassend ist darauf zu verweisen, daß die Beurteilung der Recyclate nach bodenmechanischen Gesichtspunkten problematisch ist, weil die Geräte der Bodenmechanik zur Untersuchung der Eigenschaften natürlicher Böden entwickelt worden sind, die Recyclate jedoch zwangsläufig nicht die Eigenschaften natürlicher Böden besitzen.

Eine weitere Problematik ist in der Elastizität der Recyclat-Teilchen zu sehen. So kommt es bei Belastung der Recyclate zu einer elastischen Verformung der einzelnen Teilchen, die bei natürlichen Böden kaum in Erscheinung tritt. Bei

natürlichen Böden ändert sich bei Kompression hauptsächlich das Porenvolumen. Dies ist im Falle wassergesättigter Böden gleichzeitig mit einer Abnahme des Wassergehaltes verbunden.

Bei den PU-Recyclaten war zu vermuten, daß es bei mechanischen Beanspruchungen durch Sieben und Verdichten eher zu einem Kornabrieb als zu einer plastischen Verformung der Teilchen kommt, wodurch eine Veränderung der Körnungslinie zu erwarten ist. Die Untersuchung von PU2 zeigte jedoch, daß diese Vermutung nicht begründet war. Die einzelnen Teilchen von PU2 erfuhren durch die Beanspruchung eine plastische Verformung, wodurch sich lediglich die Kornform, nicht aber die Kornverteilung änderte.

Typisch für alle untersuchten Recyclate ist, daß eine relativ große Sofortsetzung direkt nach Lastaufbringung festzustellen ist. Die zeitliche Setzung bei konstanter Last (Kriechen) ist dagegen eher als gering anzusehen /9/. Auf Blatt A4 (siehe Anhang) sind die Druck- und Zeitsetzungslinien für das Recyclat PO2 (Einbauzustand: gut verdichtet unter Wasser) beispielhaft dargestellt.

Charakteristisch für alle untersuchten Recyclate ist, daß die Steifemoduli E_S gegenüber denen von natürlichen Böden sehr gering sind. Wie aus Blatt A4 ersichtlich ist, liegen die Steifemoduli im Falle des Recyclats PO2 nach /10/ im Bereich

$$E_S = 0,05 \dots 0,44 \text{ MN/m}^2 \quad (\text{MN/m}^2 \equiv \text{N/mm}^2)$$

Nach Kézdi /11/, Band 1, Seite 213, liegt der Steifemodul für verdichteten Sand im Bereich von

$$E_S = 500 \dots 800 \text{ kp/cm}^2 \cong 50 \dots 80 \text{ N/mm}^2$$

Der Steifemodul des Recyclats PO2 liegt also mehr als zwei Zehnerpotenzen niedriger als der von verdichtetem Sand. Größenordnungsmäßig gilt dies auch für die anderen untersuchten Recyclate. Diese sehr kleinen Steifemoduli sind ein schwerwiegender Hinderungsgrund für den Einsatz der untersuchten Recyclate als Bettungsmaterial.

Weiterhin ist für die untersuchten Recyclate charakteristisch, daß neben dem Einbauzustand der Wassergehalt einen deutlichen Einfluß auf das Setzungsverhalten ausübt. Am stärksten ist dieser Einfluß bei den Recyclaten E5 und E8 ausgeprägt.

7.4 Proctordichte

Die Proctor-Kurven für die Recyclate E5, E8 und PU2 wurden gemäß DIN 18127 ermittelt. Die Proctor-Kurve für das Recyclat E5 auf Blatt A5 (siehe Anhang) zeigt einen deutlichen Einfluß des Wassergehaltes. Eine Proctordichte von 100 % ist bei diesem Material bei einem hohen Wassergehalt von 30 % zu erreichen. Dieser Wassergehalt liegt im Vergleich zu natürlichen Böden ungewöhnlich hoch. Im Falle des Recyclats PU2 wird die maximale Proctordichte sogar erst bei einem Wassergehalt von etwa 45 % erreicht /7/.

Dagegen hat der Wassergehalt beim Recyclat E8 keinen bedeutenden Einfluß auf die Proctordichte, wie Blatt A6 zu entnehmen ist.

7.5 Plattendruckversuche

Die Recyclate, die für den Einsatz als Bettungsmaterial am besten geeignet erscheinen, werden in Plattendruckversuchen in Anlehnung an DIN 18134 näher untersucht und mit einem identischen Plattendruckversuch für konventionelles Bettungsmaterial (Sand) in Relation gesetzt. Dies gilt für die Recyclate E5, E8, PU2, PO2 und PO4.

Das zu untersuchende Material befindet sich mit einer Schütthöhe von 200 mm in einem einseitig geschlossenen Stahlrohr DN 400. Das Material ist lose geschüttet. Der Druckstempel mit einem Durchmesser von 150 mm wird vor Versuchsdurchführung 30 s lang mit einer Kraft von 175 N belastet. Die auf das Untersuchungsmaterial wirkende Vorspannung beträgt 0,01 MPa. Danach wird die Kraft kontinuierlich erhöht, bis eine Spannung von 0,50 MPa oder ein Setzungsweg von 50 mm erreicht wird. Nach einer kurzzeitigen Entlastung erfolgen weitere analoge Belastungen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 wiedergegeben.

Das Recyclat PU2 erfüllt die Setzungseigenschaften eines konventionellen Bettungsmaterials (Sand) am besten. Auch E5 erreicht nach 28 mm die 0,50 MPa Marke, während PO2 und PO4 wesentlich zu weich sind und daher für eine erdverlegte Rohrverlegung nicht geeignet sind.

Tabelle 4: Ergebnisse der Plattendruckversuche

Recyclat- Bezeichnung	Erste Belastung		Entlastung mm	Wiederholte Belastung		Entlastung mm
	MPa	mm		MPa	mm	
Sand	0,50	16	12	0,50	17	13
E5	0,50	28	18	0,50	32	20
E8	0,50	36	31	0,50	38	34
PU2	0,50	22	14	0,50	24	16
PO2	0,06	50	30	0,05	50	33
PO4	0,15	50	36	0,15	50	41

Die Setzung von PU2 ist bei gleicher Belastung um ca. 30 % und von E5 um ca. 70 % größer als die von Sand. Ein Einsatz dieser Recyclate als Bettungsmaterial könnte hinsichtlich der Mindestbettungsspannungen im Einzelfall erfolgen, insbesondere im Verkehrsbereich darf das Material jedoch nicht eingesetzt werden.

7.6 Umweltverträglichkeit

Recyclate können nur dann als Bettungsmaterialien für Rohrleitungen zum Einsatz kommen, wenn sie umweltverträglich sind. Dies gilt insbesondere für die Verlegung von Rohrleitungen in Trinkwasser-Schutzzonen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Umweltverträglichkeitsuntersuchungen der Recyclate E2, E3, E8, PO1 und PO4 ergeben, daß eine Separierung und Aufbereitung notwendig ist. In Tabelle 5 sind Angaben zur Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte gemäß Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe 1990, BGB 1 I Seite 2612 zusammengestellt worden.

Tabelle 5: Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen an gemahlene
Kunststoff-Recyclaten

Schadstoff	E2	E3	E8	PO1	PO4	Grenzwert in mg/l
Pb	-	-	-	-	+	0,04
Cd	-	+	+	-	-	0,005
Cr	-	-	-	-	-	0,05
Ni	-	-	+	-	-	0,05
Cu	-	-	-	-	-	3
Zn	-	-	-	-	-	5
As	-	-	-	-	-	0,01
Hg	-	-	-	-	-	0,001
Phenol	+	+	+	+	+	0,0005
AOX ¹⁾	+	+	+	+	+	0,01
PCB ²⁾	-	-	-	-	-	0,0005
Σ PAK ³⁾	-	-	-	-	+	0,0002

Zeichenerklärung:

- Grenzwert eingehalten

+ Grenzwert überschritten

1) Halogene + organische Kohlenwasserstoffe

2) Polychlorierte Biphenyle

3) Polyaromatische Kohlenwasserstoffe

Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, daß alle untersuchten Kunststoff-Recyclate die Grenzwerte für Phenol und AOX überschreiten. Sogar das Recyclat PO1, bei dem es sich um reines Verpackungsmaterial aus dem DSD (Sinkfraktion) handelt, überschritt teilweise die Grenzwerte. Auch wenn berücksichtigt wird, daß die Grenzwerte gemäß der vorgenannten Verordnung sehr gering bemessen sind, muß der Einsatz dieser Recyclate als Bettungsmaterial sicherheitshalber unterbleiben.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit wurde auf die Elektronikschrott-Recyclate gelegt. Dabei zeigte es sich, daß die Beeinflussung der Umweltverträglichkeit durch gezielte Auswahl der Recyclate schlecht steuerbar ist /6/.

Die Beurteilung der Toxizität der Recyclate mit Hilfe des Wasserorganismenstestes nach DIN 38 412 (Fischtest) ergab bei den Elektronikschrott-Recyclaten eine große Streubreite der Ergebnisse. So schwanken die Ergebnisse von „nicht fischtoxisch“ für E3 bis zu „stark fischtoxisch“ für E2. Erwartungsgemäß ist die Sinkfraktion PO1 „nicht fischtoxisch“, während die Kunststoff-Recyclate aus Automobilschrott (PO4) „mäßig fischtoxisch“ sind /6/.

7.7 Zusammenstellung weiterer Untersuchungsergebnisse

Ausgehend von den Anforderungen an Kunststoff-Recyclate bei Verwendung als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen wurden weitere Untersuchungen zur Klärung der Erfüllbarkeit dieser Anforderungen angestellt, deren Ergebnisse wie folgt dargelegt werden:

- Fließverhalten (Rieselfähigkeit):

Die Rieselfähigkeit der Kunststoff-Recyclate E1 bis E8 sowie PU1 bis PU3 ist sowohl vor als auch nach der Freiluftlagerung als gut zu bezeichnen. Dagegen ist die Rieselfähigkeit der Recyclate PO2 bis PO4 nur mäßig. Das Recyclat PO1 als DSD-Rückstand aus der Schwimm-Sink-Fraktion ist nicht fließfähig. Ein Verschleiß der Recyclat-Teilchen bei ihrer Handhabung ist nicht zu erwarten.

- Beständigkeit gegen biologischen Abbau:

Die meisten Kunststoff-Recyclate sind biologisch beständig. Die Zerstörung der Recyclate durch Bakterien, Pilze und Kleinlebewesen ist so gut wie ausgeschlossen. Eine Ausnahme stellen Recyclate mit Papierbestandteilen dar (PO1 und PO2). Die Papierbestandteile in der Größenordnung von bis zu 17 % unterliegen im Lauf der Zeit einem biologischen Verrottungsprozeß, wobei beim Einsatz als Bettungs-

material Setzungserscheinungen zu erwarten sind. Aus diesem Grunde sind die Recyclate PO1 und PO2 als Bettungsmaterialien ungeeignet.

- Wurzelhemmende Wirkung:

Eine wurzelhemmende Wirkung weisen die untersuchten Kunststoff-Recyclate ebenso wie Natursand nicht auf.

- Brennbarkeit:

Die meisten Kunststoff-Recyclate sind gut brennbar. Eine Ausnahme bilden lediglich die PU-Recyclate, die eine sehr schlechte Brennbarkeit aufweisen. Es ist allerdings möglich, die brennbaren Recyclate durch den Einsatz von phosphorhaltigen Flammenschutzmitteln flammfest zu machen. Damit sind jedoch zwei Nachteile verbunden: Zusätzliche Kosten und Beeinträchtigung der Umweltverträglichkeit, so daß eine solche Maßnahmen für Bettungsmaterialien nicht in Frage kommt.

7.8 Wirtschaftlichkeit

Eine entscheidende Voraussetzung für die Substitution von Natursanden durch Kunststoff-Recyclate ist, daß Recyclate kostengünstiger sind bzw. daß diese Forderung in absehbarer Zeit erfüllt werden kann. Wie durch die nachfolgenden Zahlen belegt wird, ist diese Voraussetzung zur Zeit nicht gegeben.

Nach umfangreichen Recherchen betragen gegenwärtig die Kosten für die Mahlung von Kunststoff-Abfällen **800.....1500 DM/t**. Für feines Mahlgut (PU3) liegen die industriellen Mahlkosten bei Kleinserien von Gehäuseteilen mit Metallseparierung und Transport bei etwa **1500 DM/t**. Mit einer weiteren Erhöhung der Kosten kann bei der Herstellung von Recyclat-Granulaten mit optimaler Korngrößenverteilung (hierfür sind mehrere verschiedene Mahlungen durchzuführen) oder/und bei einer eventuell notwendigen Reinigung der Kunststoff-Recyclate zum Erreichen einer ökologischen Unbedenklichkeit gerechnet werden.

Diese Kosten, die sicher im Laufe der weiteren Entwicklung zumindest bei großtechnischen Anlagen noch verringert werden können, liegen sehr viel höher als die Kosten für Bettungssand. Bezogen auf Thüringen liegen die Preise für gewaschenen Sand (0.....4 mm) ab Grube im Bereich von **8,50.....20,00 DM/t** bzw. von **15,30.....36,00 DM/m³** (bei einer mittleren Schüttdichte von $\rho = 1,8 \text{ t/m}^3$). Die Richtwerte für den Sandtransport von der Grube zur Baustelle liegen bei einer Transportentfernung in der Größenordnung von 50 km im Bereich von **0,30.....0,40 DM/(m³ km)**.

Eine Kostenersparnis ist in der Form zu berücksichtigen, daß die als Bettungsmaterial eingesetzten Kunststoff-Recyclate nicht mehr deponiert werden müssen. Die Kosten für die Entsorgung von Kunststoff-Abfällen auf einer Deponie liegen gegenwärtig in Deutschland im Bereich von **200.....850 DM/t**. Selbst wenn man den Maximalwert der eingesparten Deponiekosten zugrundelegt, übersteigen die Kosten für die Aufbereitung der Kunststoff-Abfälle die Sandpreise in Thüringen erheblich, so daß der Einsatz von Kunststoff-Recyclaten als Bettungsmaterial unter den gegenwärtigen Gegebenheiten wirtschaftlich noch nicht vertretbar ist.

8 Schlußfolgerungen

Die umfangreichen Untersuchungen von Kunststoff-Recyclaten haben gezeigt, daß ihr Einsatz als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen anstelle von Natursand aus technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist. Diese vorwiegend aus Laboruntersuchungen gewonnene Erkenntnis führte dazu, daß die ursprünglich geplanten Bettungsversuche mit einem geeigneten Kunststoff-Recyclat im Erdkasten des FFI nicht für sinnvoll gehalten wurden.

Aus den durchgeführten Untersuchungen ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

- Im Falle weiterer Bemühungen um eine Substitution von Natursanden durch Kunststoff-Recyclate, für die noch keine Möglichkeit für eine anderweitige sinnvolle Wiederverwendung existiert, kann von den Elektronikschrott-Recyclaten ausgegangen werden, für die noch am ehesten eine technische Lösung denkbar ist. Allerdings ist es notwendig, vertretbare Anforderungen an die Umweltverträglichkeit dieser Recyclate zu formulieren. Die Heranziehung der Schadstoffgrenzwerte gemäß Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit der Recyclate ist hinsichtlich einer Überforderung kritisch in Frage zu stellen. Da es zur Zeit noch keine Zulassungsstelle und damit verbunden auch keine Zulassungsbedingungen für Kunststoff-Recyclate als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen gibt, sind in Zusammenarbeit von Kunststoff-Industrie und Bauwesen vernünftige Festlegungen vor allem hinsichtlich der Anforderungen an die Umweltverträglichkeit der Recyclate zu treffen, die allerdings weitere systematische Untersuchungen erforderlich machen werden.
- Es muß in Zusammenarbeit der Kunststoff-Industrie mit den zuständigen Gremien erreicht werden, daß in den einschlägigen Regelwerken und Vorschriften für die Bettung von Rohrleitungen und Erdarbeiten, vor allem / 1 , 2, 3, 4 und 5/, auch der Einsatz von Kunststoff-Recyclaten geregelt wird.
- Eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz von Kunststoff-Recyclaten als Bettungsmaterial für erdverlegte Rohrleitungen ist ihre Wirtschaftlichkeit gegenüber Natursanden. Es kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, daß sich die Preise für Natursand auf Grund begrenzter Ressourcen sowie im Interesse des Naturschutzes im Laufe der nächsten Jahre erhöhen werden. Gleichzeitig wird die Menge der zu deponierenden Kunststoff-Abfälle anwachsen, wodurch auch die Deponierungskosten ansteigen werden. Diese Entwicklung wird sich günstig auf den Einsatz von Recyclaten als Bettungsmaterial auswirken. Beschleunigt werden könnte dieser Prozeß durch geeignete staatliche Fördermaßnahmen.

- Es sind Überlegungen zum Einsatz von Kunststoff-Recyclaten zur Herstellung von extrudierten oder intrudierten dickwandiger Rohrhalschalen anzustellen, mit denen Rohre ummantelt werden können, so daß dann die Grabenverfüllung mit Aushubmaterial erfolgen kann. Für die Herstellung solcher Rohrhalschalen können eventuell Mischfraktionen der Kunststoff-Abfälle aus dem Hausmüll (Mixed Plastics; verunreinigte thermoplastische Materialmischungen aus DSD-Sammlungen) genutzt werden. Für die Herstellung der Halbschalen kann auf technologische Erfahrungen aus angrenzenden Produktionsbereichen aufgebaut werden.
- Bei der Sondierung von Möglichkeiten zur Sandsubstitution muß zukünftig die Aufmerksamkeit auch auf den Einsatz von Baumaterial-Recyclaten gerichtet werden, die in sehr großen Mengen anfallen und deren Deponierung in zunehmendem Maße Probleme bereitet. Ein kombinierter Einsatz von Baumaterial- und Kunststoff-Recyclaten könnte zu neuartigen Bettungstechniken für Rohrleitungen führen. Systematische Untersuchungen hierzu erscheinen notwendig und sinnvoll.

9 Literatur

- / 1 / ATV-Arbeitsblatt A 127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen. 2. Auflage 1988.
- / 2 / ATV-Arbeitsblatt A 139: Richtlinie für die Herstellung von Entwässerungskanälen und -leitungen. Oktober 1988.
- / 3 / Merkblatt für das Verfüllen von Leitungsräben. Ausgabe 1979. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln.
- / 4 / ZTV A-StB 89: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln.

- / 5 / ZTV E-StB 94: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln.
- / 6 / Abschlußbericht „Substitution von Natursanden bei der Verlegung von erdverlegten (kalten) Rohren durch Recyclingmaterial“ des Thüringischen Institutes für Textil- und Kunststoff-Forschung e. V., Rudolstadt, 1995.
- / 7 / Ergebnisbericht „Untersuchung von Kunststoff-Recyclatmaterialien als „Grabenverfüllmaterial“ im Rohrleitungsbau“ des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover vom 05.04.1995.
- / 8 / Ergebnisbericht „Untersuchung von Kunststoff-Recyclatmaterialien als „Grabenverfüllmaterial“ im Rohrleitungsbau“ des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover vom 31.08.1995.
- / 9 / Zwischenbericht „Substitution von Natursanden bei der Verlegung von erdverlegten (kalten) Rohren durch Recyclingmaterial“ des Thüringischen Institutes für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V., Rudolstadt vom 13.02.1995.
- / 10 / Bericht „Untersuchung von Kunststoff-Recyclingmaterialien als „Grabenverfüllmaterial“ im Rohrleitungsbau (Vorabinformation über Laboruntersuchung)“ des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover vom 21.02.1995.
- / 11 / Kézdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik, Band 1: Bodenphysik. VEB Verlag für Bauwesen Berlin und Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest 1968.

10 Anlage

Blatt

A1: Ergebnis der Siebanalyse für das Recyclat E4

A2: Körnungslinie für das Recyclat E4

A3: Körnungslinien für das Recyclat E8

A4: Druck- und Zeitsetzungslinien für das Recyclat PO2

A5: Proctor-Kurve für das Recyclat E5

A6: Proctor-Kurve für das Recyclat E8

Anlage A1

R E T S C H - S I E B A N A L Y S E

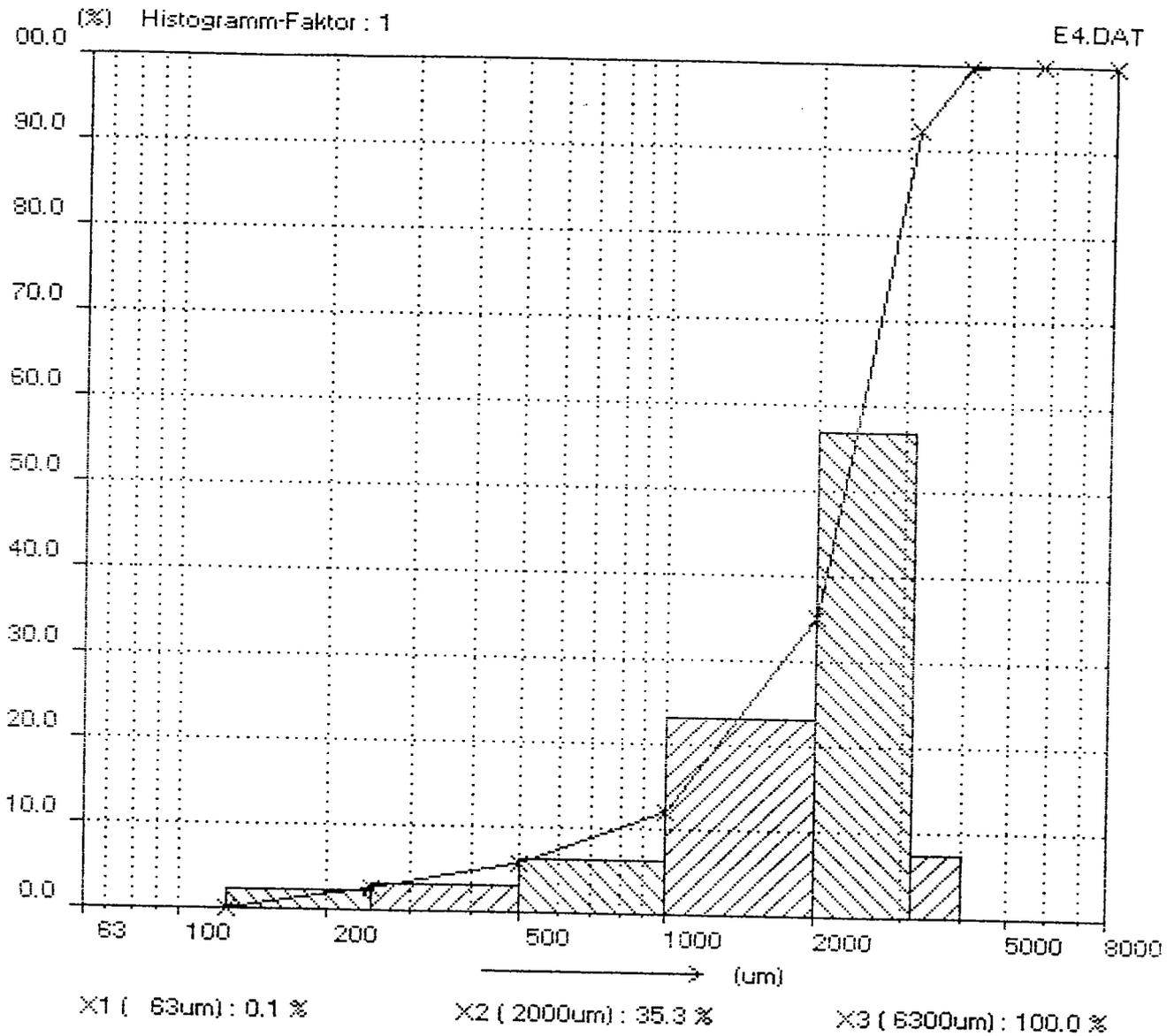
E4.DAT

Firma	: TITK	Datum	: 01/30/95
Bearbeiter	: Hermann M.	Laufnummer	: 0000014
Material	: E 4		
Kommentar	: Kunststoffrecyclat aus Elektronikschrott minimale Siebgröße der Schneidmühle: 5mm Rundloch Materialherkunft: Elektronikschrottsorger		
Siebmaschine:	Retsch	Einstellung:	80
Art der Siebbewegung:	kreisförmig	Nass-Siebung	: N
Siebdurchmesser (mm)	: 200	Höhe (mm)	: 20
		Siebanzahl	: 9
Norm-Hauptnummer der Siebe	: DIN 4188		
Einwaage	: 300.00 g	Siebdauer (min)	: 10
Siebhilfe	: Keine		

Kornklasse (µm)	Massenanteil		Häufigkeitsdichte q3 (%/µm)	Kumulativ (%)	
	(g)	(%)		Q3(D)	1-Q3(R)
< 63	0.21	0.1	0.001	0.1	99.9
63 - 125	0.24	0.1	0.001	0.2	99.8
125 - 250	7.21	2.4	0.019	2.6	97.4
250 - 500	9.65	3.2	0.013	5.8	94.2
500 - 1000	18.70	6.2	0.012	12.0	88.0
1000 - 2000	69.91	23.3	0.023	35.3	64.7
2000 - 3150	171.32	57.1	0.050	92.4	7.6
3150 - 4000	22.19	7.4	0.009	99.8	0.2
4000 - 5600	0.52	0.2	0.000	100.0	0.0
5600 - 8000	0.00	0.0	0.000	100.0	0.0

Rueckwaage : 299.95 g Siebverlust : 0.05 g ==> 0.0 %

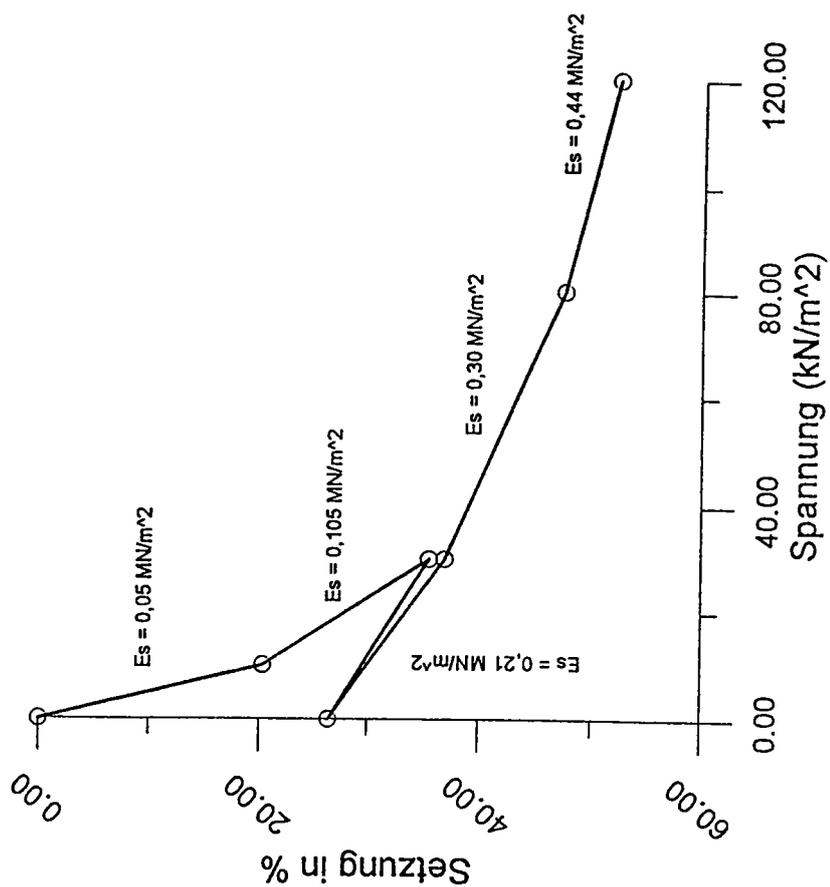
Anlage A2



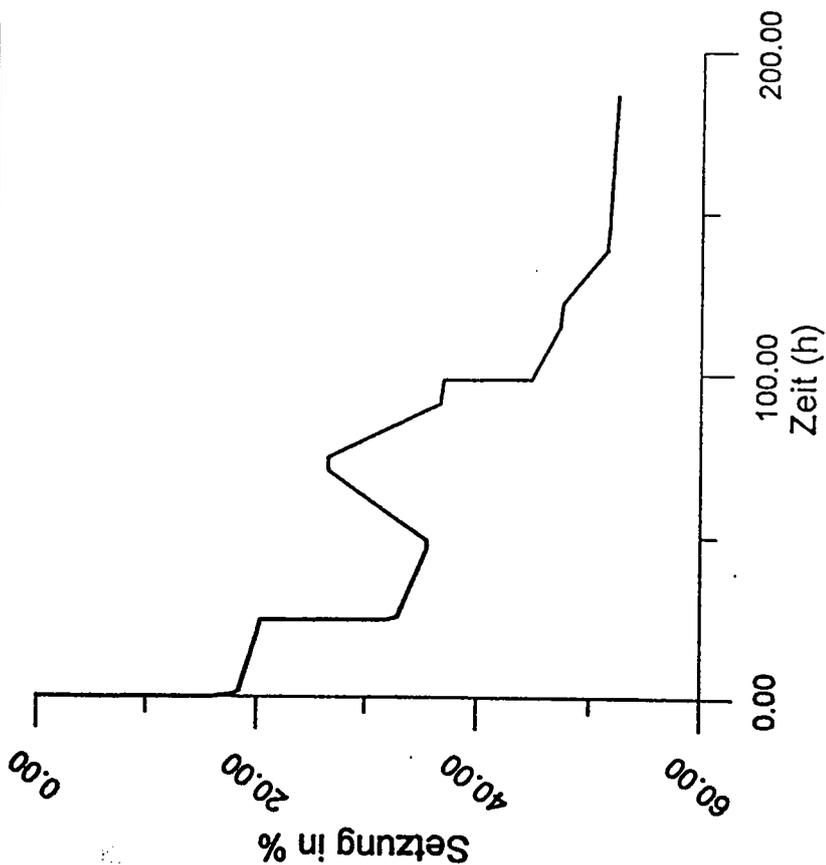
Ungleichförmigkeitszahl $U = 2,98$

Anlage A4

Kompressionsversuch
Pos. 1 Material: PO2



Einbauzustand
— gut verdichtet unter Wasser

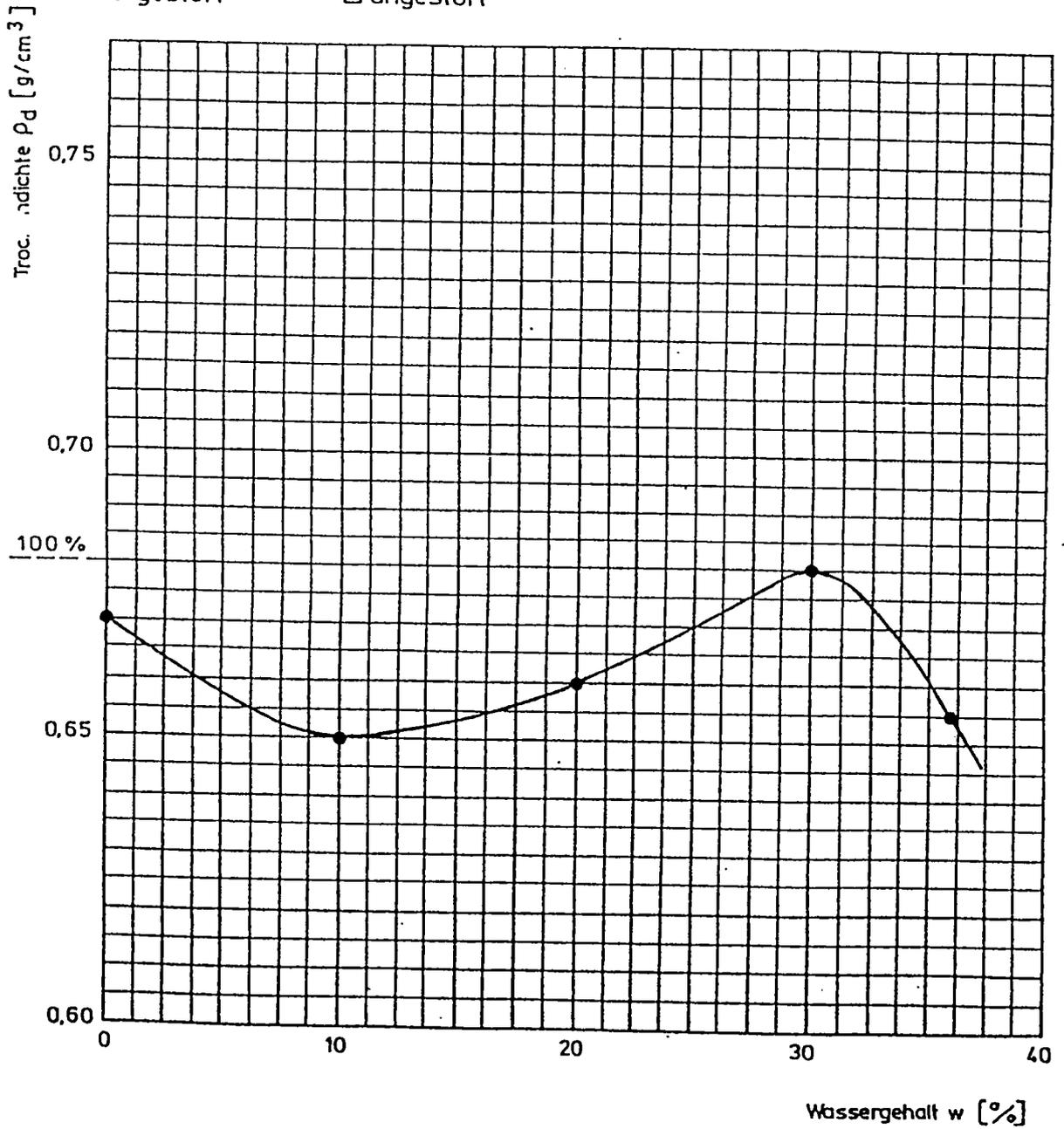


Anlage A5

Laboruntersuchungen mit Kunststoffrecyclaten

Proctorkurve

Proben Nr.: — Bohrung: — Tiefe: —
Bodenart: E 5
☒ gestört ☐ ungestört



100 % der Proctordichte : $\rho_{PT} = 0,68$ [g/cm³] optimaler Wassergehalt : $w_{PT} = 30$ [%] ☒
 % der Proctordichte : $\rho_d =$ [g/cm³] min./max. Wassergehalt : / [%] ☒
 % der Proctordichte : $\rho_d =$ [g/cm³] min./max. Wassergehalt : / [%] ☒

Anlage A6

Kunststoffrecyclate

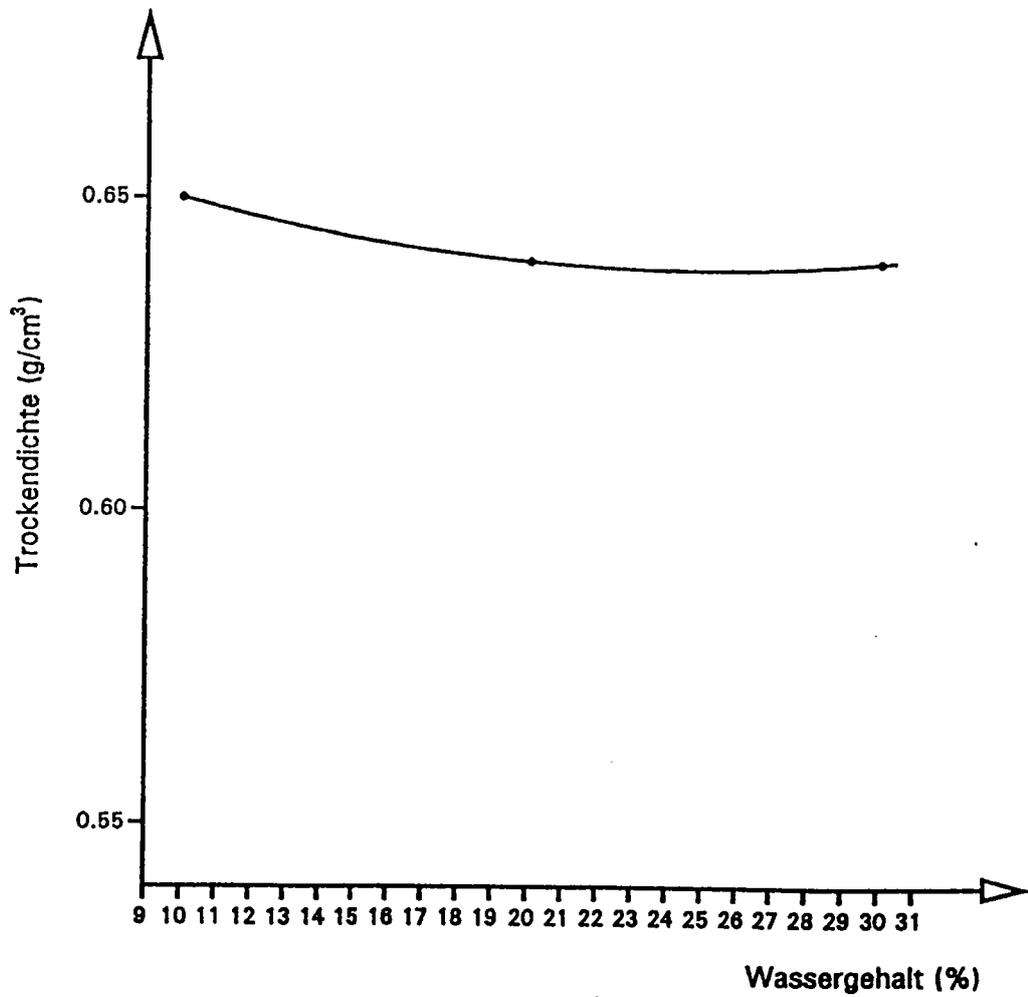
Proctorkurve

Entnahmestelle:

Art der Entnahme: gestört

Tiefe:

Bodenart: E8



100% der Proctordichte = 0.65 g/cm³ Optimaler Wassergehalt = 26.1 %

97% der Proctordichte = 0.63 g/cm³ min/max Wassergehalt = 10.3% / 28.9 %