

neutral  
unabhängig  
gemeinnützig



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur  
Institute for Underground Infrastructure

## EPS-Bettungskissen in der offenen Bauweise



Liebscher, M.; Diburg, B.  
Gelsenkirchen, August 2007

**Endbericht zum Forschungsprojekt:**

Einsatzgrenzen von EPS-Bettungskissen in der offenen Bauweise  
AZ: IV-9-041 105 0290

**Auftraggeber:**



Ministerium für  
Umwelt und Naturschutz,  
Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
des Landes NRW

**Beteiligte:**



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur  
Exterbruch 1  
45886 Gelsenkirchen



WR – Ingenieurbüro für Bauwesen  
Wertherstraße 67  
49326 Melle



Gemeinde Rödinghausen, Kreis Herford

**Wissenschaftliche Leitung:**

Dr.-Ing. Bert Bosseler

**Projektleitung und Bearbeitung:**

Dipl.-Ing. Martin Liebscher

Dipl.-Ing. Bianca Diburg

Dipl.-Ing. Andreas Downar

Wir danken

Herrn Dipl.-Ing. W. Röper, WR-Ingenieurbüro für Bauwesen (Melle),  
Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Falter, Herrn Dipl.-Ing. F. Holthoff (FH-Münster),  
Herrn H.-W. Sikorski, Maincor-Anger Abwassertechnik GmbH (Marl) und  
Herrn D. Brakemann, Jet Schaumstoff Formteile GmbH (Hüllhorst)  
für die wertvollen Informationen sowie die Unterstützung bei der Durchführung des Projektes und der Erstellung des Endberichtes.

**Inhaltsverzeichnis**

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1   | Veranlassung und Problemstellung .....                | 4   |
| 2   | Zielstellung und Vorgehensweise .....                 | 6   |
| 3   | Stand der Technik .....                               | 7   |
| 3.1 | Bettung von Kanälen .....                             | 7   |
| 3.2 | Einsatz von EPS im Straßen- und Tiefbau .....         | 13  |
| 4   | Expandierbares Polystyrol (EPS) .....                 | 15  |
| 4.1 | Herstellung von expandierbarem Polystyrol (EPS) ..... | 15  |
| 4.2 | Qualitätssicherung .....                              | 17  |
| 4.3 | Mechanische Eigenschaften .....                       | 19  |
| 4.4 | Fazit .....   | 34  |
| 5   | Laborversuche .....                                   | 35  |
| 5.1 | Kurzzeit-Laborversuche .....                          | 35  |
| 5.2 | Langzeit Laborversuche .....                          | 36  |
| 5.3 | Scheiteldruckversuche .....                           | 39  |
| 5.4 | Sandkastenversuche .....                              | 47  |
| 5.5 | Fazit .....   | 59  |
| 6   | Baumaßnahmen .....                                    | 61  |
| 6.1 | Hintergrund .....                                     | 61  |
| 6.2 | Einbau .....  | 61  |
| 6.3 | Rammsondierungen .....                                | 67  |
| 6.4 | Setzungsmessungen .....                               | 70  |
| 6.5 | Aufgrabung und Rohraustausch .....                    | 70  |
| 6.6 | Fazit .....   | 74  |
| 7   | Dauerhaftigkeit und Beständigkeit .....               | 75  |
| 7.1 | Einflussfaktoren .....                                | 75  |
| 7.2 | Einwirkung durch Wasser .....                         | 77  |
| 7.3 | Einwirkung von Chemikalien .....                      | 78  |
| 7.4 | Biologische Belastung .....                           | 81  |
| 7.5 | Atmosphärische Strahlung .....                        | 81  |
| 7.6 | Temperatureinwirkung .....                            | 81  |
| 7.7 | Fazit .....   | 82  |
| 8   | Statische Untersuchungen .....                        | 83  |
| 8.1 | Allgemeines .....                                     | 83  |
| 8.2 | Grundlagen der statischen Berechnung .....            | 83  |
| 8.3 | Finite Element Modell .....                           | 86  |
| 8.4 | Ergebnisse der FE-Berechnungen .....                  | 87  |
| 8.5 | Berechnungen zu den Sandkastenversuchen .....         | 98  |
| 8.6 | Auftriebssicherheit .....                             | 102 |
| 8.7 | Kriecheinflüsse .....                                 | 103 |
| 8.8 | Fazit .....   | 104 |
| 9   | Bewertung und Praxishinweise .....                    | 106 |
| 9.1 | Statische Nachweise .....                             | 106 |
| 9.2 | Verlegung .....                                       | 108 |
| 9.3 | Dauerhaftigkeit .....                                 | 109 |
| 9.4 | Qualitätssicherung .....                              | 109 |
| 10  | Zusammenfassung .....                                 | 110 |
| 11  | Literatur .....                                       | 113 |

## 1 Veranlassung und Problemstellung

Die Aufwendungen der Netzbetreiber für den Neubau und die Erneuerung von Abwasserleitungen und -kanälen sind zurzeit und auch zukünftig beachtlich. Die erforderlichen Investitionen für den Neubau der Kanalisation in NRW, also den erstmaligen Bau ohne Erneuerungsmaßnahmen im Rahmen der Sanierung, wurden in einer Studie des IKT [1] überschlägig ermittelt und für den Zeitraum von 2002 bis 2006 mit jährlich ca. 560 Millionen € beziffert. Grundlage der Hochrechnung war die Auswertung der im Jahr 2002 aktuellen Abwasserbeseitigungskonzepte (ABK) aller Kommunen in NRW mit mehr als 20.000 Einwohnern.

Diese Zahl verdeutlicht, dass in Zukunft mit hohen jährlichen Investitionen für Kanalschließungsmaßnahmen zu rechnen ist. Damit unmittelbar verbunden ergibt sich ein entsprechend hohes Einsparungspotential bei den Netzbetreibern, sofern innovative, kostengünstige und umweltfreundliche Kanalbautechniken angewendet werden.

Bei der Herstellung von Abwasserkanälen werden jedoch vielfach Schäden durch ungeeignete Bauverfahren und nicht fachgerechte Bauausführungen verursacht. Diese sogenannten Anfangsschäden haben oftmals erhebliche negative wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen, da sie Undichtigkeiten oder Einstürze zur Folge haben können. Undichtigkeiten führen entweder zur Infiltration von Grundwasser in die Kanalisation oder zur Exfiltration von Abwasser. Maßgebend sind die jeweiligen geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse und hier insbesondere die Lage des jeweiligen Leitungsabschnittes zum Grundwasserspiegel. Die Exfiltration, aber auch die Infiltration bilden in jedem Fall Ausgangspunkte für mögliche weitere Folgeschäden und Schadensfolgen [2].

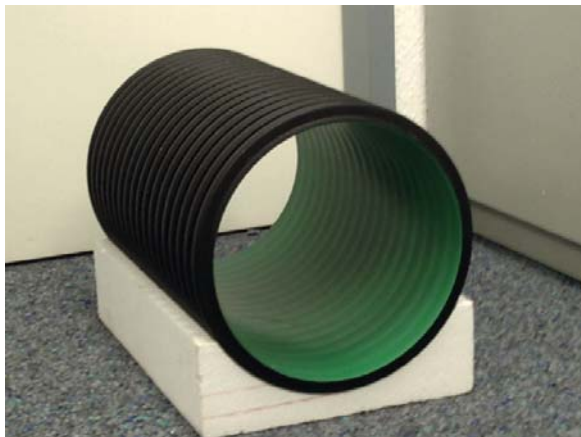
Demgegenüber stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren und Bettungsmittel für die Neuverlegung von Abwasserkanälen und –leitungen und deren Einbettung in den Baugrund zur Verfügung. Gerade die Ausführung der Einbettung wirkt sich dabei wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit einer Kanalbaumaßnahme, das Tragverhalten der verlegten Rohre, ihre Wechselwirkung mit dem umgebenden Baugrund und die zu erwartende Nutzungsdauer aus.

In der Baupraxis gibt es allerdings auch viele negative Beispiele für eine unzureichende Verdichtung in der Leitungszone infolge einer nicht fachgerechten Bauausführung. Dies wird nicht zuletzt dadurch verschärft, dass im innerstädtischen Bereich durch Platzmangel infolge der Vielzahl im Untergrund liegender Leitungen eine regelgerechte Verdichtung häufig technisch nicht möglich oder aufgrund des hohen Zeitaufwandes nicht wirtschaftlich ist. Die Folgen sind Schäden an den neu verlegten Abwasserkanälen aber auch an bestehenden Versorgungs- und Entsorgungsleitungen in Form von Rissen, Rohrbrüchen, Verformungen und Lageabweichungen.

Einzelne Netzbetreiber nahmen dies bereits zum Anlass, verschiedene innovative Bettungsmittel einzusetzen, mit dem vorrangigen Ziel eine einfache und sichere Handhabbarkeit zu gewährleisten und die geforderte Einbauqualität zuverlässig zu erreichen [3].

Eine weitere, kostengünstige Alternative zur konventionellen Bettung in offener Bauweise können auch speziell geformte Bettungskissen aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) nach DIN EN 13163 [4] bieten. Diese auf den jeweiligen Rohrdurchmesser zugeschnittenen bzw. als Formteil hergestellten Hartschaumplatten sollen das Verfüllmaterial im Zwickelbereich des Rohres ersetzen und somit eine optimale Bettung gewährleisten (Bild 1a).

Hierdurch sollen Schäden durch unzureichende Verdichtung des Zwickelbereiches vermieden werden. Zudem besteht die Möglichkeit, zwei Rohre übereinander einzubauen und hierdurch den erforderlichen Bodenaushub zu minimieren (Bild 1b, vgl. auch Abschnitt 3). Durch das geringe Gewicht der EPS-Bettungskissen können sich auch erhebliche Vorteile beim Handling auf der Baustelle ergeben.



a) Verlegung von Einzelrohren



b) Verlegung von 2 Rohren übereinander

**Bild 1** EPS-Bettungskissen mit eingelegtem Kanalrohr  
(hier beispielhaft mit Kunststoffrohren)

Der Werkstoff EPS hat sich bereits im Straßen- und Erdbau bei schwierigen Bodenverhältnissen als Leichtbaustoff aufgrund des geringen Gewichtes und der hohen Druckfestigkeit bewährt [5].

Für den hier vorliegenden Anwendungsfall als Bettungsmaterial im Kanalbau lagen jedoch noch keine gesicherten Erkenntnisse vor. Es existierten keine Aussagen zur statischen Berechnung, Bemessung und Bewertung des Langzeitverhaltens. Derartige Angaben sind jedoch für Planung und Bau sowie die Bestimmung der Baukosten und Abschreibungszeiträume und somit für die Gebührenkalkulation von großer Bedeutung. Zudem gab es noch keine Erfahrungen hinsichtlich der Verlegung auf der Baustelle.



## 2 Zielstellung und Vorgehensweise

Ziel des Forschungsprojektes war es, offenen Fragestellungen bezüglich des Einsatzes von EPS-Bettungskissen im Leitungsbau zu klären. Hierzu wurde zunächst der Stand der Technik gesichtet (s. Abschnitt 3), um anschließend die bekannten mechanischen Werkstoffeigenschaften zusammenzustellen und bezüglich ihrer Verwendbarkeit für den vorliegenden Anwendungsfall zu analysieren (s. Abschnitt 4). Auf dieser Basis wurden zusätzlich erforderliche Prüfungen und Versuche konzipiert, durchgeführt und ausgewertet (s. Abschnitte 5.1, 5.2, 5.3 und 5.4). Zur Beurteilung des praktischen Einsatzes der Bettungskissen wurden verschiedene Baumaßnahmen begleitet und wesentliche Bauphasen dokumentiert (s. Abschnitt 6). Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit und der Beständigkeit gegenüber anwendungsspezifischen Einflüssen wurden diesbezügliche Herstellerangaben und Literaturquellen recherchiert und analysiert (s. Abschnitt 7). Auf Basis der ermittelten Daten wurden statische Berechnungen für unterschiedliche Randbedingungen durchgeführt (s. Abschnitt 8). Abschließend wurden die gewonnenen Erkenntnisse bewertet und Hinweise zur Verlegung der Kissen zusammengestellt (s. Abschnitt 9).

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Bettung von Kanälen

Die Herstellung von Kanalisationen in der offenen Bauweise erfolgt in der Regel durch Ausheben eines Grabens, Verlegen der Leitung im Schutze einer Böschung oder eines Verbaus und anschließendes lagenweises Verfüllen des Grabens und sorgfältiges Verdichten des eingefüllten Materials. Die wichtigste Norm für den Bau von Kanälen in offener Bauweise ist die DIN EN 1610 [6].

Bei dieser Bauweise ergeben sich unterschiedliche Baugrundzonen (Bild 2).

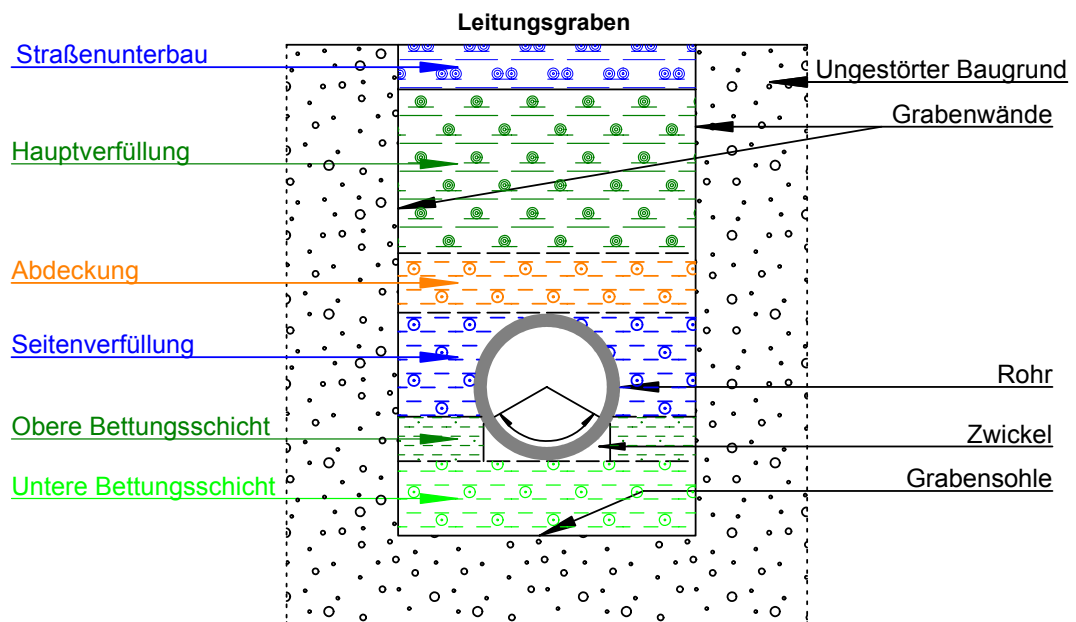


Bild 2 Baugrundzonen nach DIN EN 1610 [6]

Diese werden als ungestörter Baugrund und als Leitungsgraben bezeichnet. Im Leitungsgraben unterscheidet man zwischen oberer und unterer Bettungsschicht, Seitenverfüllung, Abdeckung und Hauptverfüllung.

Die Bettungsschichten umfassen den Bereich zwischen Grabensohle und der durch den Auflagerwinkel  $\alpha$  gegebenen Höhe am Rohrumfang. Bei direkter Auflagerung auf gewachsenen Boden gehört auch dieser zur Bettung.

Die Abdeckung stellt den Bereich im Leitungsgraben unmittelbar über dem Rohrscheitel dar. Ihre Mindestmaße sind 150 mm über dem Rohrschaft bzw. 100 mm über der Rohrverbindung. Die Seitenverfüllung ist gemäß [6] der Bereich zwischen Bettung und Abdeckung. Der Bereich oberhalb der Abdeckung bis zu einer gegebenenfalls vorhandenen Straßen- oder Gleiskonstruktion wird als Hauptverfüllung bezeichnet.

Je nach Erfordernis sind unterschiedliche Grabenquerschnitte vom geböschten Graben bis hin zu Gräben mit senkrechten Wänden möglich. Die Mindestbreite von Rohrgräben ist in DIN EN 1610 [6] festgelegt.

Die untere Bettungsschicht soll eine gleichmäßige Druckverteilung sicherstellen und muss daher in Anpassung an die Werkstoff- und Verbindungsart der einzelnen Rohre ausgebildet sein.

Als Voraussetzung für alle weiteren Arbeitsgänge wird zunächst die untere Bettungsschicht als stabile und feste Unterlage zur Aufbringung der Rohrleitung hergestellt, um spätere Bodensetzungen und Rohrverschiebungen zu vermeiden. Wird die Grabensohle als untere Bettungsschicht verwendet, so soll sie nicht aufgelockert sein, oder muss ihre ursprüngliche Lagerungsdichte (Tragfähigkeit) durch besondere Maßnahmen (Verfestigung, Bodenaustausch) wieder erhalten. Anschließend ist die obere Bettungsschicht und die Seitenverfüllung herzustellen. Dabei muss die eingebaute Rohrleitung mit Bodenmaterial umgeben sein, dessen Zusammensetzung (z.B. Größtkorn 20 mm; kein Brechsand oder Splitt > 11 mm) im Hinblick auf die mechanische Widerstandsfähigkeit der Rohre und der Rohrumhüllung geeignet ist [6]. Wenn die Rohre mit einer werkseitigen Schutzumhüllung umgeben sind oder wenn der Rohrwerkstoff keine Rohrumhüllung erfordert (z.B. Betonrohre), können besondere Vereinbarungen über die Anforderungen an das Material getroffen werden. Hierbei ist zu beachten, dass keine negativen Einflüsse hinsichtlich folgender Gesichtspunkte auftreten:

- aktiver und passiver Korrosionsschutz,
- Dränagewirkung im Rohrgraben,
- Standfestigkeit der Bettung gegenüber dem umliegenden Boden.

In Verkehrsflächen ist nach [7] für den Bereich der Leitungszone, also untere/obere Bettungsschicht, Seitenverfüllung und Abdeckung, ein gut verdichtbarer Füllboden einzubringen, sofern nicht besondere Vereinbarungen oder Anforderungen vorliegen. Dieser ist lagenweise einzubauen und ausreichend zu verdichten. Bei Außendurchmessern der Rohre von mehr als 400 mm muss die Leitungszone in mehr als zwei Arbeitsgängen verfüllt und verdichtet werden. Bereiche der Leitungszone, die sich nicht einwandfrei verfüllen und verdichten lassen (z.B. obere Bettungsschicht unter beengten Verhältnissen), sind mit Beton, Porenleichtbeton oder einem Boden-Bindemittel-Gemisch zu verfüllen [8].

Die Sicherheit einer Rohrleitung hängt wesentlich von der Gestaltung und Ausführung der Bettungsschichten und der Seitenverfüllung ab [8]. Nur durch eine fachgerechte Ausführung können Risse, Verformungen, Punktlagerungen usw. vermieden werden, die ansonsten zu Undichtigkeiten, Nutzungseinschränkungen, Sanierungsbedarf oder gar zur Unbrauchbarkeit führen. Die entscheidenden Problemzonen stellen dabei die schwer zugänglichen Zwickel (vgl. Bild 2) dar.



Die Zwickel bringen besonders in schmalen Rohrleitungsgräben durch eine eingeschränkte Erreichbarkeit erhebliche Schwierigkeiten bei der Unterstopfung und Verdichtung mit sich.

Im Bild 3 werden die beengten Platzverhältnisse in einem Rohrleitungsgraben und der Versuch der Verdichtung des Zwickelbereiches in der Praxis gezeigt.



*Bild 3 Darstellungen des Rohrgrabens und der Verdichtung des Zwickelbereiches in der Praxis [Güteschutz Kanalbau]*

Für den fachgerechten Einbau der Rohrleitung ist für die obere Bettungsschicht eine Lagerungsdichte herzustellen, die mindestens der Lagerungsdichte der unteren Bettungsschicht entspricht. Hierbei ist das Beistopfen im Bereich der seitlichen Rohrzwickel mit besonderer Sorgfalt durchzuführen. Der Einsatz von schmalen, dem Rohrlängsdurchmesser angepassten Handstampfern ist in der Regel hier unumgänglich [9]. Die im Norm- und Regelwerk geforderten Werte für die Verdichtung werden dabei in der Regel nicht erreicht. Eine unzureichende Verdichtung dieses Zwickelbereichs hat zur Folge, dass der in der Bemessung des Rohres vorgesehene Auflagerwinkel oftmals nicht eingestellt werden kann.

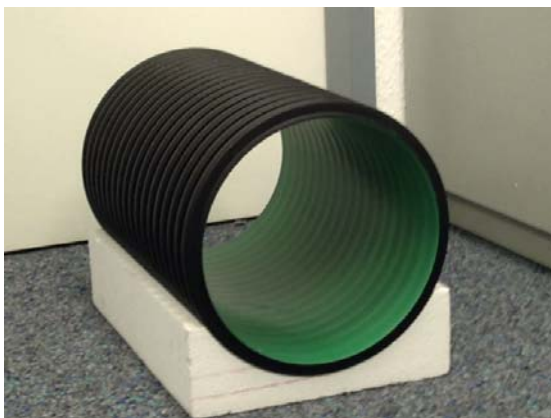
Die bestehenden Schwierigkeiten bei der Verdichtung des Zwickelbereichs haben in der Praxis dazu geführt, dass häufig das einzubauende Bodenmaterial bis auf Höhe des Kämpfers geschüttet und anschließend verdichtet wird (Bild 4) [10].



**Bild 4**      *Anschüttung bis zur Höhe des Kämpfers und anschließende Verdichtung*

Dies geschieht in der Hoffnung, dass die Bodenverdichtung bis in den Zwickelbereich hineinreicht. Es wird deutlich, dass eine solche Verdichtungsart oftmals nicht den Forderungen des Normen- und Regelwerkes nach einem definierten Verdichtungsgrad im Zwickelbereich, der dem des Bodens unterhalb des Rohres entspricht, gerecht wird [10].

Genau diese Verdichtungsprobleme im Zwickelbereich der oberen Bettungsschicht sollen mit vorgeformten EPS-Bettungskissen gelöst werden. Das Rohr wird hierbei in Halbschalen gelegt, welche auf den Außendurchmesser des Rohres abgestimmt sind (Bild 5). Hierbei besteht einerseits die Möglichkeit aus Blöcken entsprechende Elemente auszusägen und andererseits kann das Material in entsprechende Formen eingeschäumt werden. Besonders vorteilhaft kann sich bei der Verlegung das geringe Gewicht der vorgeformten Elemente auswirken.



**Bild 5**      *EPS-Bettungskissen mit eingelegtem Kanalrohr*

Nach der Verlegung der Kissen auf das Planum der unteren Bettungsschicht im Rohrgraben und Einlegen der Rohre ist lediglich die gut zugängliche Seitenverfüllung einzubringen und der Rohrgraben mit konventionellen Methoden zu verfüllen.

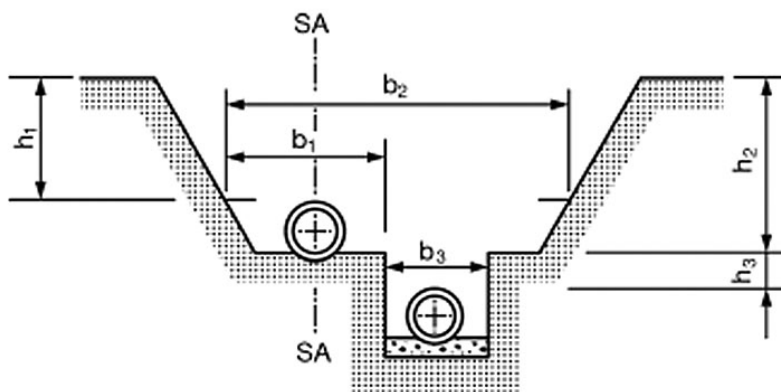
In Kombination mit diesem System können unterschiedliche Rohrtypen aus verschiedenen Werkstoffen, wie Beton, Kunststoff und Steinzeug eingesetzt werden.

Außerdem bietet sich unter bestimmten Randbedingungen, z.B. bei Entwässerungen im Trennsystem, mit besonders geformten Zwischenelementen die Möglichkeit, Schmutzwasser- und Regenwasserkanäle übereinander in einem Graben zu verlegen (Bild 6).



**Bild 6** EPS-Bettungskissen zur Verlegung von zwei Rohren übereinander

Diese Zwischenelemente liegen ebenfalls in auf den Rohraußendurchmesser des oberen und unteren Rohres angepassten Abmessungen vor. Die Grabenbreite kann durch die Verlegung übereinander im Vergleich zur konventionellen Verlegung, beispielsweise in einem Stufengraben (Bild 7), deutlich reduziert werden.



**Bild 7** Stufengraben nach ATV-DVWK-A 127 [11]

Auch im Zusammenhang mit besonderen Schachtbauwerken ist die Verlegung von Rohren übereinander bekannt:

- MONO<sup>®</sup>-System-Schacht (siehe [www.monosystem.de](http://www.monosystem.de))
- RSS<sup>®</sup>-Schacht-System (siehe [www.basco.de](http://www.basco.de))
- MULTRO<sup>®</sup>-Schacht-System (siehe [www.multro.com](http://www.multro.com))

Alle genannten Systeme versuchen durch einen geringeren Achsabstand der Rohre im Trennsystem die Kosten bei den Erdarbeiten gegenüber der bisherigen Baupraxis – Verlegung im Stufengraben (vgl. Bild 7) bzw. gemäß DIN 1998 [12] - zu reduzieren.

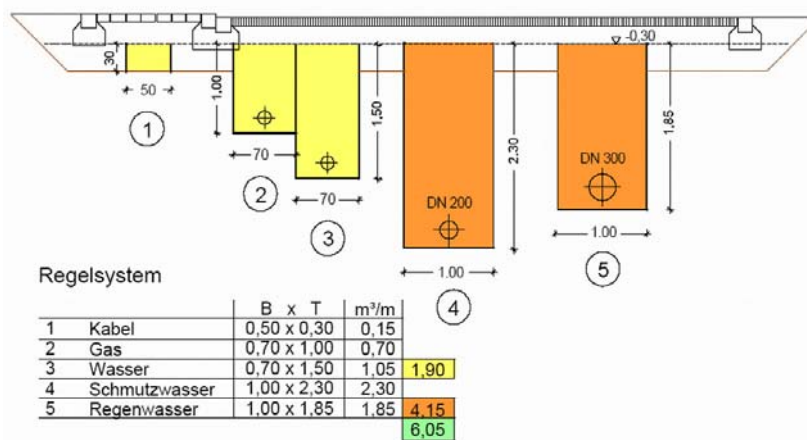


Bild 8 Exemplarische Aushubberechnung bei einer Kabel- bzw. Rohrverlegung gemäß DIN 1998 [12] nach [13]

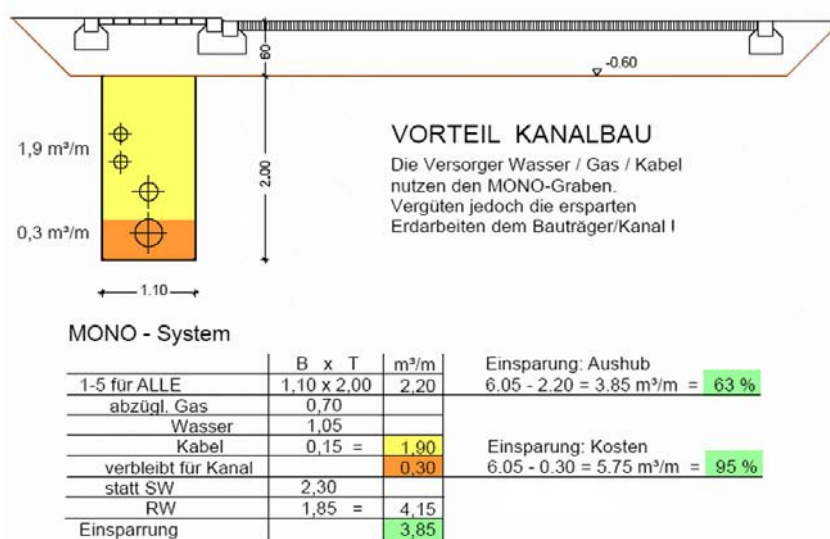


Bild 9 Exemplarische Aushubberechnung bei einer Kabel- bzw. Rohrverlegung in einem gemeinsamen Graben unter Verwendung des Mono<sup>®</sup>-Systems [13]



Neu ist im hier vorliegenden Anwendungsfall der Einsatz von Bettungs- und Auflagerkissen aus EPS. Vorteilhaft wirken sich bei den EPS-Bettungskissen das geringe Gewicht, die einfache Verlegung und eine damit verbundene mögliche Kostenersparnis aus.

### 3.2 Einsatz von EPS im Straßen- und Tiefbau

Der Werkstoff EPS (**e**xpandierbares **P**olystyrol) ist ein geschlossenzelliger Polystyrolhartschaum von geringer Dichte, der sich bereits im Straßen- und Erdbau bei schwierigen Bodenverhältnissen als Leichtbaustoff aufgrund des geringen Gewichtes und der hohen Druckfestigkeit bewährt hat ([5], [14], [15], [16]).

Diesbezügliche Einsatzfälle sind beispielsweise der Ausgleich von Höhenunterschieden im Erdbau, der Bau von Lärmschutzwällen oder die Reduzierung von Setzungen bei wenig tragfähigen Böden [16].



*Bild 10 EPS für den Ausgleich von Höhenunterschieden im Erdbau [16]*



*a) EPS für den Bau von Lärmschutzwällen*



*b) EPS für die Reduzierung von Setzungen*

*Bild 11 EPS – Weitere Einsatzgebiete [16]*

Im Rohrleitungsbau wird EPS als Deformationsschicht über dem Rohr eingesetzt. Rohre mit großer Steifigkeit bilden bei Einbettung in einem verformungsfähigen Kontinuum einen mehr oder weniger festen Einschluss, der den Kraftfluss stört und die Spann-

gen auf das Rohr konzentriert. Das heißt, steife Rohre behindern die Setzungen infolge der mit der Überschüttung anwachsenden Belastung. Sie ziehen die Lasten auf sich und entlasten den umgebenden Boden [43].

Durch die Anordnung einer Deformationsschicht über dem Rohr wird eine Umlagerung der Spannungstrajektorien um die Rohrleitung erreicht. Die in der Deformationsschicht eintretenden Stauchungen mobilisieren die inneren Schubkräfte des überlagernden Bodens und bewirken damit eine Lastverlagerung auf die Seiten und eine Entlastung des Rohres (Bild 13).

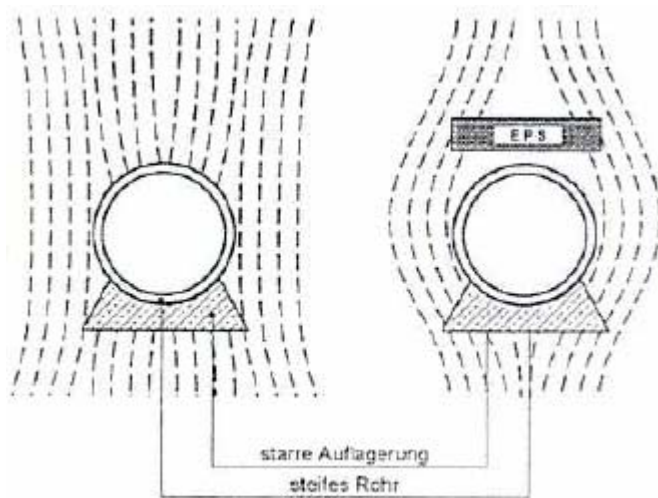


Bild 12 Spannungsumlagerungen infolge Deformationsschicht [43]

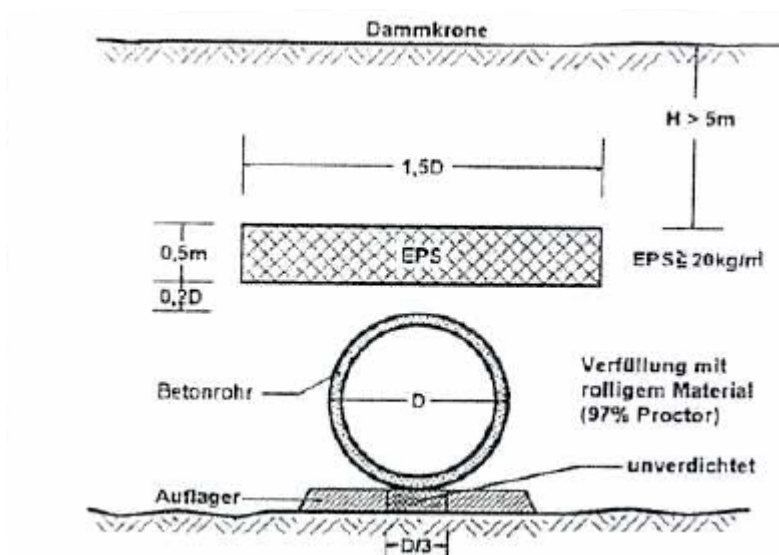


Bild 13 Anordnung einer Deformationsschicht über Rohrleitungen [43]



## 4 Expandierbares Polystyrol (EPS)

Als Quelle für die folgenden Ausführungen zum Werkstoff EPS wurden insbesondere die „Technischen Informationen“ [34] zum Werkstoff EPS der BASF, Ludwigshafen herangezogen. Als führender Hersteller von EPS fasst die BASF dort firmeneigene Veröffentlichungen und weitere Untersuchungsergebnisse zum Werkstoff EPS zusammen. Detailliert werden die Herstellung und Qualitätssicherung sowie die unterschiedlichen Anwendungsfälle für EPS beschrieben und die jeweiligen korrespondierenden Materialeigenschaften beleuchtet. Darüber hinaus wurde auch weitere Informationen der Projektbeteiligten sowie von Industrieverbänden und aus ergänzender Literatur ausgewertet (vgl. [17], [19], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [40]).

### 4.1 Herstellung von expandierbarem Polystyrol (EPS)

EPS ist die Kurzbezeichnung für treibmittelhaltiges, expandierbares Polystyrol. Polystyrol ist ein amorpher, transparenter Thermoplast der Strukturformel  $(C_8H_8)_n$ . Polystyrol liegt in festem Aggregatzustand vor und weist eine Dichte von  $1050 \text{ kg/m}^3$  auf. Zur Herstellung von EPS werden nach [34] Styrol und ein niedrig siedender Kohlenwasserstoff als Treibmittel (z.B. Pentan) sowie gegebenenfalls noch bestimmte Additive zur Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften eingesetzt. Expandierbares Polystyrol entsteht üblicherweise durch Polymerisation von Monostyrol unter Zusatz von Pentan. Unter dem eingetragenen Warenzeichen Styropor® wird von der BASF, Ludwigshafen ein treibmittelhaltiges und dadurch expandierbares Polystyrol hergestellt. Es wird in Form von rundlichen, glasigen Perlen mit einem Durchmesser von 0,2 bis 3,0 mm an die verschiedenen Hersteller von Schaumstoffen aus Styropor® geliefert. Styropor® wurde vor über 50 Jahren von der BASF erfunden und wird seitdem weltweit in zahlreichen Anwendungen von der Verpackung bis zum Baustoff eingesetzt. Zwar konnte bereits 1930 Polystyrol industriell produziert werden, die Herstellung von Polystyrol als Schaumstoff gelang allerdings erst 20 Jahre später.

Um die blähfähigen Perlen zu Schaumstoff verarbeiten zu können, wird Wärmeenergie benötigt. Diese kann aus heißem Wasser, heißer Luft oder Wasserdampf gewonnen werden. In der Praxis hat sich die Schäumethode mit Wasserdampf als die wirtschaftlichste durchgesetzt. Die Herstellung von Schaumstoffen mit Wasserdampf lässt sich in die drei Phasen Vorschäumen, Zwischenlagern und Ausschäumen unterteilen (vgl. Bild 14).

Im ersten Verarbeitungsschritt des Vorschäumens wird der Rohstoff in ein Vorschäumgerät eingebracht, in dem die Rohstoffperlen unter gleichzeitiger Zuführung von Wasserdampf innerhalb von 2-5 Minuten bei einer Temperatur von ca.  $100^\circ\text{C}$  expandieren. Als Treibmittel wird der Kohlenwasserstoff Pentan eingesetzt. Durch die Temperatureinwirkung plastifizieren die Perlen und vergrößern dabei ihr Volumen um das bis zu 60fache. Dabei bilden sich kleine Zellen. Die Schüttdichte der Partikel wird durch die

Dampfmenge und die Verweilzeit eingestellt, so dass bereits in der Phase des Vorschäumens die spätere Rohdichte des EPS festgelegt wird.

Bei der Zwischenlagerung kühlen die vorgeschäumten Partikel ab. Durch Kondensation des restlichen Treibmittels entsteht in den einzelnen Zellen ein Unterdruck, der durch das Eindiffundieren von Luft ausgeglichen wird. Dadurch werden die Perlen stabilisiert und für die weitere Verarbeitung optimiert.

Beim Ausschäumen werden die vorgeschäumten und stabilisierten Partikel in spezielle Metallformen gefüllt und bedampft. Ähnlich wie beim Vorschäumen werden die Partikel noch mal aufgebläht, wobei die Dosierung so gewählt wird, dass in diesem Arbeitsschritt auch die Hohlräume zwischen den Perlen voll ausgefüllt werden. Aufgrund ihres plastischen und klebrigen Zustandes und des verbleibenden Drucks durch das Treibmittel verschweißen die Partikel zu einem homogenen Schaumstoffblock.

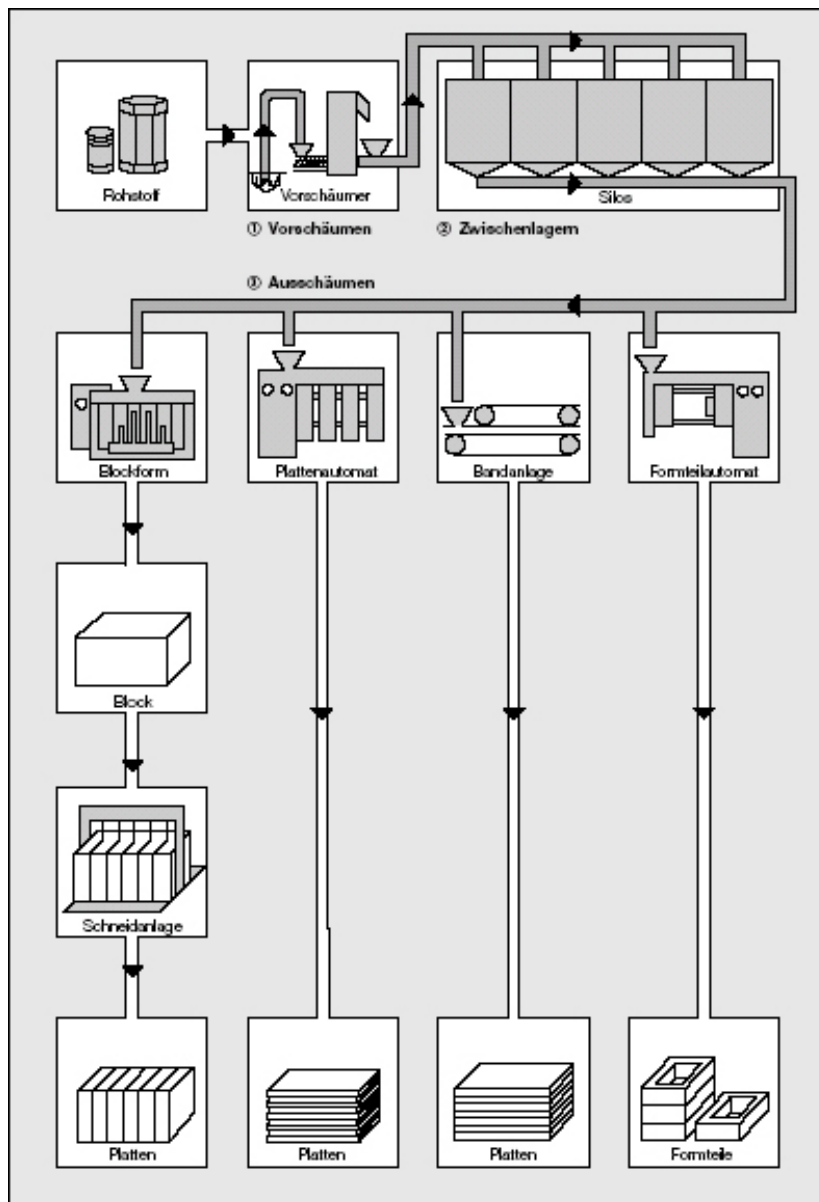


Bild 14 Verarbeiten von Styropor® [17]

Nach einer kurzen Abkühlungszeit werden die Schaumstoffblöcke der Form entnommen und vor der Weiterverarbeitung zur Stabilisierung abgelagert. Dabei vollziehen sich ähnliche physikalische Vorgänge wie bei der Zwischenlagerung. Danach werden die Schaumstoffblöcke in die gewünschte Form gesägt oder thermisch geschnitten. Durch Ausschäumen in bestimmten Formen lassen sich beliebige Schaumstoffkörper, so genannte Formteile herstellen.

Bettungskissen aus EPS werden sowohl als Formteile als auch als geschnittene Blockware hergestellt. Die Produktion von Bettungskissen für die Verlegung von profilierten Kunststoffrohren der Firma maincor-anger wird mit Hilfe von Formteilautomaten durchgeführt. Für alle anderen Rohrwerkstoffe werden die Kissen mit Hilfe von vollautomatischen, computergesteuerten bzw. handgesteuerten, semi-automatischen Schneidanlagen aus Schaumstoffblöcken gefertigt.

## 4.2 Qualitätssicherung

### 4.2.1 Kontrolle des Rohstoffs

Nach [34] sind die gelieferten Rohstoffe vor Beginn der Schaumstoffproduktion zu kontrollieren. Sofort nach Anlieferung der Gebinde ist sicherzustellen, dass die gelieferten Rohstoffe auch der bestellten Ware entsprechen. Auf den Lieferbehältern ist neben der Produktbezeichnung zusätzlich eine sechsstellige Ablieferungsnummer vermerkt. Weiterhin sind Beschädigungen durch Inaugenscheinnahme auszuschließen.

### 4.2.2 Fertigungskontrolle

In allen Phasen der Fertigung wird die Qualität der Zwischen- und Endprodukte überprüft.

Nach dem Arbeitsschritt des Vorschäumens wird laut [34] die geforderte Schüttdichte durch permanente Gewichtsüberprüfung kontrolliert. Dies erfolgt durch spezielle, automatisch arbeitende Schüttdichtemess- und Regeleinrichtungen oder auch durch Messung von Hand durch Bestimmung des Gewichts eines bestimmten Volumens von vorgeschäumtem Styropor®, z.B. in einem 10-Liter-Messgefäß. Bild 15 zeigt beispielhaft ein Formblatt zur Kontrolle des Rohstoffeingangs und der Vorschäumprozesses.

| Rohstoff            |          |          |  | 1. Vorschäumen |                       |                      |   |          | 2. Vorschäumen                     |                      |          | Silo                               |  |
|---------------------|----------|----------|--|----------------|-----------------------|----------------------|---|----------|------------------------------------|----------------------|----------|------------------------------------|--|
| Produkt und Datum   | Abl.-Nr. | Gew. (t) | Zustand, wie in Ordnung, Verschmutzung, Feuchtigkeit | Datum          | Uhrzeit Beginn – Ende | Schüttdichte (kg/m³) | Besondere Vorkommnisse, wie Rieselfähigkeit, Verklebung | Silo Nr. | Abtransport aus Silo Datum/Uhrzeit | Schüttdichte (kg/m³) | Silo Nr. | Abtransport aus Silo Datum/Uhrzeit | Schüttdichte (kg/m³) vor dem Ausschäumen |
| Styropor P          | 42-8164  | 6        | in Ordnung   | 28.3.          | 6.30 – 12.00          | 15 – 16              | keine   | 3 + 8    | –                                  | –                    | –        | 29.3.<br>6.30 – 20.00              | 15                                       |
| Styropor P<br>27.3. | 45-8173  | 3        | in Ordnung   | 29.3.          | 14.00 – 16.25         | 15.5                 |   |          |                                    |                      |          | 30.3.<br>20.00 – 4.00              |  |
| Styropor P<br>4.4.  | 67-8245  | 9        | in Ordnung   | 4.4.           | 6.30 – 16.40          | 21                   | keine   | 2 + 4    | 5.4.<br>6.30 – 12.00               | 14                   | 5 + 9    | 6.4./7.4.<br>12.00 – 16.00         | 14                                       |

Bild 15 Beispiel für die Anlage eines Kontrollblattes „Rohstoffeingang und Vorschäumen“ [34]

Die Einhaltung bestimmter Zwischenlagerungszeiten ist für die weitere Verarbeitung und die späteren Schaumstoffeigenschaften von entscheidender Bedeutung. Deshalb werden sowohl die Lagerungszeiten als auch die Schüttdichte des zwischengelagerten Materials vor dem Ausschäumen messtechnisch erfasst bzw. kontrolliert und dokumentiert.

Nach dem Arbeitsschritt des Ausschäumens werden die Blöcke oder Formteile abschließend kontrolliert, bevor sie an die weiterverarbeitenden Betriebe ausgeliefert werden. Die Überprüfung der Blockfertigung beinhaltet in der Regel die Sichtkontrolle des Endproduktes mit Begutachtung der Ecken, Kanten und Oberflächen des Blockes. Dabei ist insbesondere auf ein eventuelles Einfallen oder Verziehen der Blöcke zu achten. Ergänzend wird nochmals das Gewicht sofort nach der Entformung und vor der Weiterverarbeitung frühestens nach 24 Stunden kontrolliert. Dies gibt Aufschluss über die Rohdichte und den Wassergehalt des Blockes.

Beispiel für die Anlage eines Kontrollblattes „Block- und Plattenherstellung“

| Produkt    | Datum Anlieferung | Abl.-Nr. | Schüttdichte (kg/m³) | Blockform Nr. | Gewicht des Blockes nach der Entformung (kg) | Äußerliche Beurteilung des Blockes nach 24 Std. | Beurteilung der geschnittenen Platten |                   |                           |                          |
|------------|-------------------|----------|----------------------|---------------|--|---|---------------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|
|            |                   |          |                      |               |  |   | Oberfläche                            | Rohdichte (kg/m³) | Verschleißung Stichproben | Abmessung                |
| Styropor F | 4.4.              | 42-8562  | 16                   | 5             | 16,5   | formgetreu                                      | glatt                                 | 15,5–17,3         | ausreichend               | in zulässigen Toleranzen |

Bild 16 Beispiel für die Anlage eines Kontrollblattes „Block- und Plattenherstellung“ [34]

Bei der Formteilmfertigung wird nach [34] üblicherweise die Qualität der Schaumstoffe mit Hilfe von Betriebsüberwachungssystemen kontrolliert. Dabei wird die Stückzahl der produzierten Formteile einschließlich der Ausschussware mit Hilfe eines Zählwerks erfasst. Die Ursachen des Ausschusses sind zu ermitteln und die fehlerhaften Teile auszusortieren. Für die Kontrolle der Fertigungsprozesse von Block- bzw. Formteilware kommen Formblätter, wie in Bild 16 und Bild 17 dargestellt, zum Einsatz.

| Produkt: Styropor                                 | Ablieferungs-Nr.:    |                         | Schüttdichte: 24 kg/m³ |      |      | Zwischenlagerung: 9 Std. |                  |         |
|---|----------------------|-------------------------|------------------------|------|------|--------------------------|------------------|---------|
| Formteil  | Transistorverpackung |                         | Telefonverpackung      |      |      | Sägeblattverpackung      | Lampenverpackung |         |
| Nr. des Automaten                                 | 3<br>4fach           | 4<br>6fach              | 1                      | 2    | 9    | 5                        | 6                | 7       |
| Datum   | 6.4.                 | 6.4.                    | 6.4.                   | 6.4. | 6.4. | 7.4.                     | 6.–7.4.          | 6.–7.4. |
| Zahl der Zyklen/Schicht                           | 203                  | 182                     |                        |      |      |                          |                  |         |
| Zahl der einwandfreien Formteile/Schicht          | 806                  | 970                     |                        |      |      |                          |                  |         |
| Zahl der aussortierten Teile                      | 6                    | 122                     |                        |      |      |                          |                  |         |
| Beschädigungen (oder Ursache)                     | –                    | Bruch (durch Auswerfer) |                        |      |      |                          |                  |         |
| Verschleißung Oberfläche                          | gut                  | gut                     |                        |      |      |                          |                  |         |
| Abmessungen                                       | in Ordnung           | in Ordnung              |                        |      |      |                          |                  |         |
| Gewicht nach Entformung g/Stck.                   | 34                   | 37                      |                        |      |      |                          |                  |         |
| Gewicht trocken g/Stck.                           | 28                   | 28                      |                        |      |      |                          |                  |         |
| Feuchtigkeitsgehalt % (gew.-bez.) vor dem Versand |                      |                         |                        |      |      |                          |                  |         |
| Verschleißung nach 24 Std.                        | ausreichend          | gut                     |                        |      |      |                          |                  |         |
| Sonstiges   |                      |                         |                        |      |      |                          |                  |         |

Bild 17 Beispiel für die Anlage eines Kontrollblattes „Formteilmfertigung“ [34]

### 4.2.3 Endkontrolle oder Eingangskontrolle beim Verwender

Abschließend werden die Schaumstoffprodukte durch Sichtkontrolle, Überprüfung der Rohdichte und der Verschweißung sowie ggf. der Maßhaltigkeit abgenommen. Die Schaumstoffprodukte werden dazu unmittelbar nach ihrer Herstellung bzw. vor der Verwendung optisch auf einwandfreie Beschaffenheit überprüft. Fehler, wie Beschädigungen an Oberflächen, Ecken und Kanten müssen durch Sichtkontrolle ausgeschlossen werden. Bei Produkten, wie Deckenplatten und Verpackungen, für die bestimmte Toleranzen einzuhalten sind, ist eine stichprobenweise Prüfung der Maßhaltigkeit vorzunehmen. Aussagen über die Verschweißgüte des Schaumstoffs liefert das Bruchbild. Am durchgebrochenen Schaumstoffteil wird der Anteil der gerissenen gegenüber den unbeschädigten Teilchen abgeschätzt und in Prozent angegeben. Bild 18 zeigt das Bruchbild eines EPS 25 (Rohdichte von  $25 \text{ kg/m}^3$ ) im Vergleich zu einem EPS 35 (Rohdichte von  $35 \text{ kg/m}^3$ ). Deutlich ist der Unterschied zwischen den beiden Materialien zu erkennen. Je höher die Dichte desto feiner die sichtbare Struktur an der Bruchfläche. Die Kontrolle der Rohdichte wird zweckmäßigerweise jedoch durch Bestimmung des Gewichtes von getrockneten Formteilen durchgeführt.

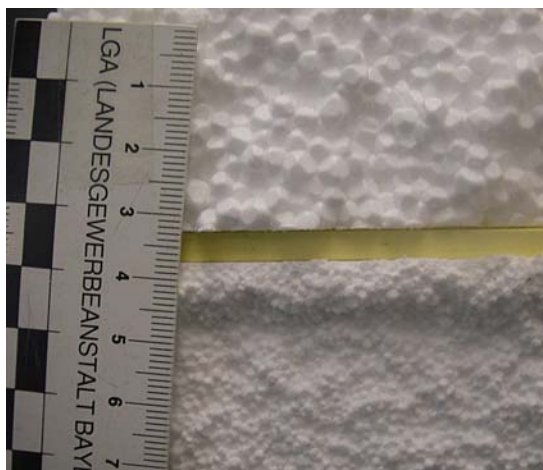


Bild 18 Bruchbild eines EPS 25 (oben) im Vergleich zu einem EPS 35 (unten)

## 4.3 Mechanische Eigenschaften

### 4.3.1 Einfluss der Rohdichte

EPS wird in unterschiedlichen Rohdichten hergestellt. Diese reichen von  $10 \text{ kg/m}^3$  bis über  $50 \text{ kg/m}^3$ . Mit steigender Rohdichte weist der Werkstoff EPS höhere Festigkeiten auf (vgl. Bild 19). Für die Anwendung als Bettungskissen im Tiefbau kommen üblicherweise Rohdichten von  $30$  und  $35 \text{ kg/m}^3$  zum Einsatz.

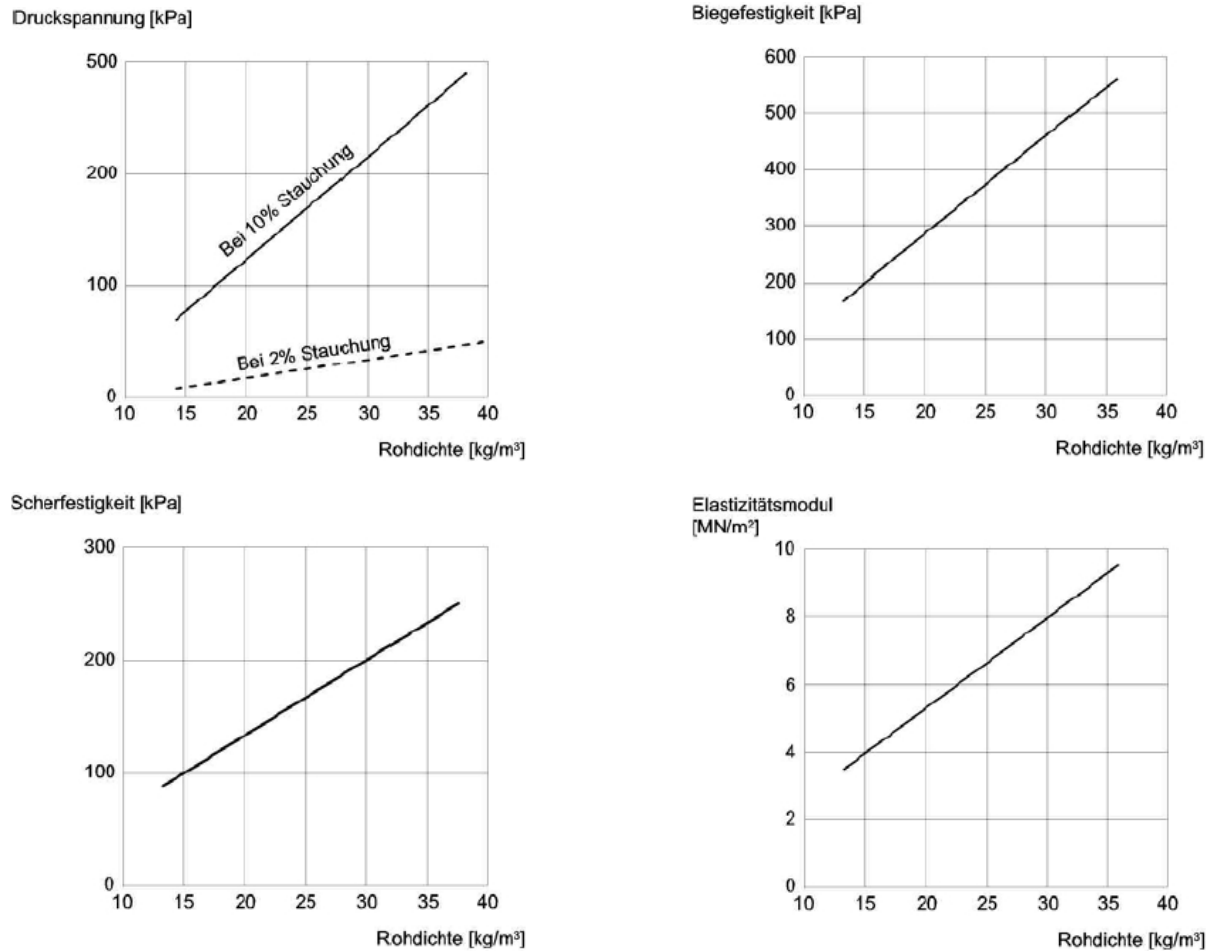


Bild 19 Festigkeiten und Elastizität von expandiertem Polystyrol [18]

Die Biegefestigkeit für einen EPS 30 beträgt nach [34] zwischen 430 und 490 kPa bzw. kN/m<sup>2</sup>. Die Werte für die Zug- und die Scherfestigkeit eines EPS der Rohdichte 30 kg/m<sup>3</sup> liegen zwischen 380 - 480 kPa bzw. kN/m<sup>2</sup> und 210 – 260 kPa bzw. kN/m<sup>2</sup> (vgl. Bild 20).



| Eigenschaften <sup>1</sup>   | Prüfung nach           | Einheit           | Prüfergebnisse          |                         |                         |
|--|------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Güteschutztypen  | GSH-Gütebedingungen    |                   | PS 15 SE                | PS 20 SE                | PS 30 SE                |
| Anwendungstypen  | DIN 18 164, Teil 1     |                   | W                       | WD                      | WD + WS                 |
| Mindestrohddichte  | DIN-EN 1602            | kg/m <sup>3</sup> | 15                      | 20                      | 30                      |
| Baustoffklasse (Prod.-Typ Styropor F)  | DIN 4102               |                   | B 1, schwer entflammbar | B 1, schwer entflammbar | B 1, schwer entflammbar |
| Wärmeleitfähigkeit   |                        |                   |                         |                         |                         |
| Messwert bei + 10 °C   | DIN 52 612             | W/(m · K)         | 36–38                   | 33–35                   | 31–34                   |
| Rechenwert   | DIN 4108               | W/(m · K)         | 40                      | 40                      | 35                      |
| Druckspannung bei 10% Stauchung  | DIN-EN 826             | kPa               | 65–100                  | 110–140                 | 200–250                 |
| Dauerdruckbelastbarkeit bei Stauchung 1,5–2,0% nach 50 Jahren  | DIN-EN 1606            | kPa               | 20–30                   | 35–50                   | 70–90                   |
| Biegefestigkeit (ohne Schäumhaut)  | DIN-EN 12089           | kPa               | 150–230                 | 250–310                 | 430–490                 |
| Scherfestigkeit  | DIN-EN 12090           | kPa               | 80–130                  | 120–170                 | 210–260                 |
| Zugfestigkeit  | DIN-EN 1608            | kPa               | 160–260                 | 230–330                 | 380–480                 |
| E-Modul (Druckprüfung)   | DIN-EN 826             | MPa               | 1,0–4,0                 | 3,5–6,5                 | 7,5–11,0                |
| Wärmeformbeständigkeit, kurzfristig  | DIN 53424 <sup>2</sup> | °C                | 100                     | 100                     | 100                     |
| Wärmeformbeständigkeit, langfristig bei 20 kPa   | DIN 18164 T 1          | °C                | 75                      | 80                      | 80                      |
| Thermischer Längenänderungskoeffizient   | DIN 53752 <sup>2</sup> | 1/K               | 5–7 · 10 <sup>-5</sup>  | 5–7 · 10 <sup>-5</sup>  | 5–7 · 10 <sup>-5</sup>  |
| Spezifische Wärmekapazität   | DIN 53765              | J/(kg · K)        | 1210                    | 1210                    | 1210                    |
| Wasseraufnahme bei Unterwasserlagerung nach 7 Tagen  | DIN-EN 12087           | Vol.-%            | 0,5–1,5                 | 0,5–1,5                 | 0,5–1,5                 |
| nach 28 Tagen  | DIN-EN 12087           | Vol.-%            | 1,0–3,0                 | 1,0–3,0                 | 1,0–3,0                 |
| Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl Rechenwert nach DIN 4108 Teil 4 (günstigster und ungünstigster Zahlenwert) | DIN-EN 12086           | 1                 | 20/50                   | 30/70                   | 40/100                  |

<sup>1</sup> Werte sind in der DIN 55471, Teil 2 festgelegt

<sup>2</sup> Anlehnung an Prüfnorm

\* 1 N/mm<sup>2</sup> = 1000 kN/m<sup>2</sup> = 1MPa = 1000 kPa

Bild 20 Eigenschaften von Schaumstoffen aus Styropor® für Bauanwendungen [34]

Die Druckfestigkeit von EPS hängt in erster Linie von der Rohddichte ab. Je niedriger diese ist, umso geringer ist auch die Druckfestigkeit. Weitere Einflussfaktoren auf die Druckfestigkeit sind die Zellform, die Temperatur sowie das Alter des Schaumstoffs. Bild 21 zeigt den Druckspannungs-Verformungsverlauf eines Druckversuchs nach EN 826 an Styropor® -Würfeln der Kantenlänge 50 mm mit unterschiedlichen Rohddichten.

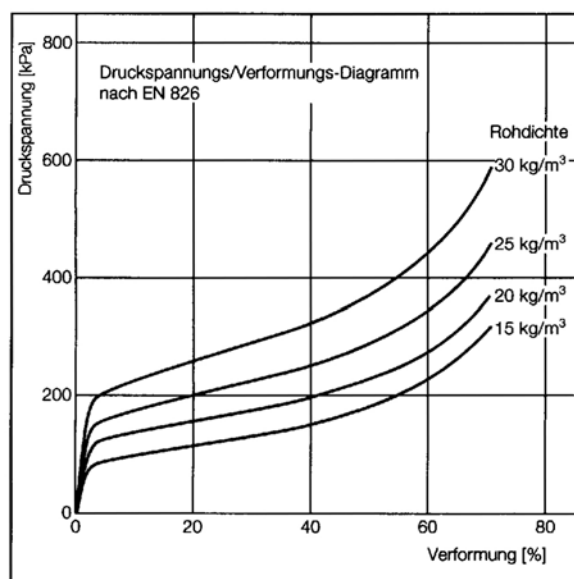


Bild 21 Druckspannungs-Verformungsverhalten von Schaumstoffen aus Styropor® [34]

In Bild 21 ist zu erkennen, dass EPS mit größeren Rohdichten einen erhöhten Verformungswiderstand aufweisen. Ursache hierfür sind die dickeren Zellwände des Schaumstoffs, die entsprechend höhere Druckspannungen aufnehmen können. Zu Beginn nimmt die zur Aufbringung einer bestimmten Verformung erforderliche Kraft proportional zu. Ab einer Verformung von 1,0 – 2,0 % wird dann die Elastizitätsgrenze überschritten. Oberhalb der Elastizitätsgrenze erfolgt kein plötzlicher Bruch des Zellgefüges, sondern die Zellstruktur wird stetig und zum größten Teil irreversibel deformiert. Der Elastizitätsmodul nimmt demzufolge für EPS mit höheren Dichten zu und liegt nach [34] für eine Rohdichte von 30 kg/m<sup>3</sup> zwischen 7,5 – 11,0 MPa bzw. N/mm<sup>2</sup>.

Um das Werkstoffverhalten von Schaumstoffen aus Styropor® bei Druckbeanspruchung zu beschreiben, wird üblicherweise die Druckspannung bei 10 % Stauchung nach EN 826 angegeben. Bild 22 stellt den Einfluss der Rohdichte auf die Druckspannung bei 10 % Stauchung dar.

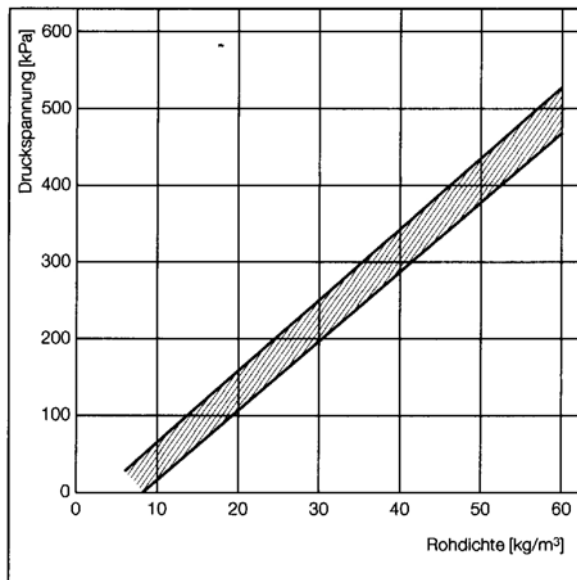


Bild 22 Rohdichteeinfluss auf die Druckspannung bei 10 % Stauchung [34]

#### 4.3.2 Einfluss der Zellform und -orientierung

Beim Ausschäumen von EPS können in der Randzone des Schaumstoffs Bereiche unterschiedlicher Rohdichte entstehen. Damit verbundene Abweichungen in Form und Orientierung der Zellstruktur des EPS bewirken eine mechanische Anisotropie des Materials. Das heißt, die Druckfestigkeit des Werkstoffs hängt wesentlich von der Prüfrichtung ab. Stimmt die Prüfrichtung mit der Längsrichtung der Zellen überein, sind höhere Festigkeitswerte zu erwarten als in Querrichtung der Zellstruktur. Die Druckfestigkeit von EPS ist somit in hohem Maße von den Ausschäum- und Herstellungsbedingungen abhängig. Je niedriger der Ausschäumdruck, um so weniger sind Anisotropien im Materialgefüge zu erwarten. Die Festigkeiten von mit niedrigem Druck ausgeschäumten EPS-Formteilen liegen dann nach [34] nahezu im Bereich der Werte von geschnittenen EPS-Bauteilen.

### 4.3.3 Temperatureinfluss

Die Druckfestigkeit von EPS ist abhängig von der Temperatur. Die Druckfestigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab. Die Referenzwerte werden bei 20 °C ermittelt. Die Temperaturen für den vorliegenden Anwendungsfall liegen im Betriebszustand deutlich unter diesem Wert. Daher werden voraussichtlich eher höhere Druckfestigkeiten im Betriebszustand erreicht. Bild 23 stellt den Einfluss der Temperatur auf die Druckfestigkeit von EPS dar.

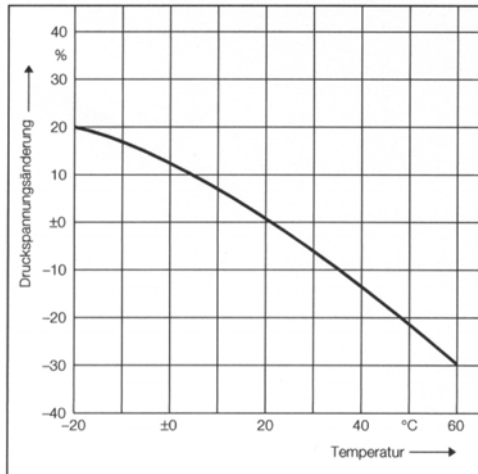


Bild 23 Temperatureinfluss auf die Druckspannung [34]

### 4.3.4 Einfluss des Schaumstoffalters

Frisch hergestellte Schaumstoffe weisen in den ersten Stunden eine erheblich geringere Druckfestigkeit auf. Dies ist begründet durch den Ausgleich des Unterdrucks in den Zellen und die damit verbundene Luftaufnahme. Auch nach Abschluss der Luftaufnahme steigert sich die Druckfestigkeit nach [34] noch um ca. 10 % bis zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit. Diese Festigkeitszunahme wird verursacht durch die Abgabe von noch vorhandenem restlichem Treibmittel, das eine gewisse weich machende Wirkung hat. Die Abgabe des Treibmittels und der damit verbundene „Erhärtungsprozess“ sind erst nach ca. 4 bis 8 Wochen abgeschlossen. Diese Druckempfindlichkeit entsprechend junger Schaumstoffe ist beim Einsatz zu berücksichtigen.

### 4.3.5 Einfluss langzeitiger Druckbeanspruchungen

Erhöhte Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz führten dazu, dass auch in dauerdruckbeanspruchten Bereichen gedämmt werden muss. In diesem Zusammenhang ergab sich die Notwendigkeit, auch für EPS-Hartschaumstoffe abgesicherte Langzeitkennwerte über das Kriechverhalten unter Dauerlast zu ermitteln. Die Untersuchungsergebnisse von Krollman [19] werden hier zusammengefasst und zeigen dass das Kriechen von EPS-Hartschaumstoffen sehr gut beschrieben und auf weit über 50 Jahre hinaus extrapoliert werden kann. Dies ist auch für den Einsatz von EPS als Bet-

tungskissen von großer Bedeutung, da auch im Kanalbau eine Lebensdauer von über 50 Jahren erreicht werden soll.

#### 4.3.5.1 Hintergrund

EPS-Hartschaumstoffe (**E**xpandierbares **P**olystyrol) haben sich seit ihrer Einführung vor 50 Jahren einen festen Platz im Bausektor weltweit erworben. Sie werden als Dämm- und Konstruktionsmaterial für zeitgemäßes und energiesparendes Bauen eingesetzt. In den skandinavischen Ländern mit strengen Wintern und tiefen Bodenfrösten werden EPS-Hartschaumstoffe im Rohdichtebereich von 40 bis 60 kg/m<sup>3</sup> mit Druckfestigkeiten von 200 bis 400 kPa bereits seit langem als lastabtragende Wärmedämmung unter Gebäudegründungen verwendet.

In Deutschland ist für diese wirtschaftliche und energiesparende Gründungskonstruktion eine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin, notwendig. In diesem Zusammenhang ergab sich die Notwendigkeit, abgesicherte Langzeitkennwerte über das Kriechverhalten von EPS-Hartschaumstoffen unter Dauerlast zu ermitteln, um dem Planer einfache Bemessungskennwerte an die Hand zu geben. Die Europäische Norm DIN EN 1606 „Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung [20] legt ein entsprechendes Prüf- und Berechnungsverfahren mit Extrapolationsansatz fest.

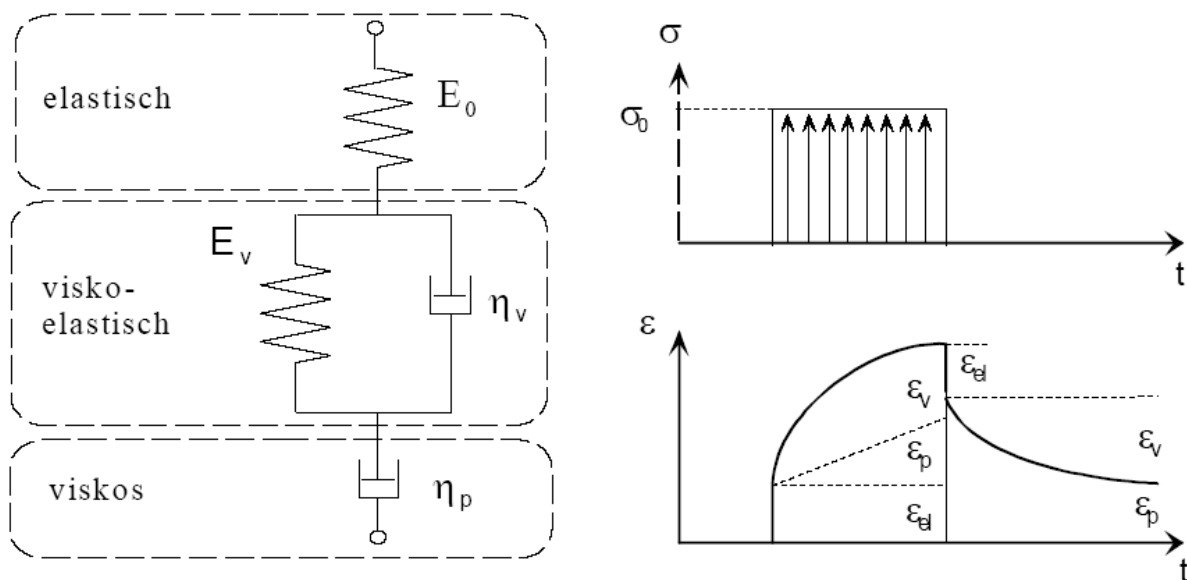
#### 4.3.5.2 Grundlagen zum Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten von polymeren Hartschaumstoffen ist in hohem Maße abhängig vom zeitlichen Belastungsablauf und dem Belastungsniveau. Dies ist zum einen in der Zellmorphologie und zum anderen im Aufbau der Polymermatrix aus einzelnen fadenförmigen Makromolekülen begründet. Während bei Kurzzeitbelastungen mit stetig steigender Beanspruchung (z.B. Druckversuch nach DIN EN 826, [21]) der Zellaufbau und der Matrixwerkstoff – und hier im wesentlichen die chemischen Bindungen im Makromolekül (Hauptvalenzbindung) – das Verformungsverhalten charakterisieren, wird das Verformungsverhalten bei Langzeitbelastung durch die zwischen den verschlauften Makromolekülen vorliegenden physikalischen Bindungen (van der Waalssche Bindung) geprägt. Eine schematische Darstellung des Kurzzeit-Verformungsverhaltens ist im Bild 24 dargestellt.



**Bild 24** Deformation von Schaumstoffzellen unter zunehmender Druckbelastung - Schematische Darstellung [22]

Das für das Kriechen unter Langzeitbelastung maßgebende nichtlinear-viskoelastische Verhalten von Polymerwerkstoffen, wird in Bild 25 anhand eines Feder-Dämpfer-Modells veranschaulicht. Die sich bei Langzeitbelastung einstellende Gesamtverformung setzt sich aus dem elastischen  $\epsilon_{el}$ , dem viskoelastischen  $\epsilon_v$  und dem viskosen bzw. plastischen  $\epsilon_p$  Verformungsanteil zusammen.



**Bild 25** Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Polymerwerkstoffen [19]

Die elastische Verformung stellt sich spontan, vergleichbar mit einer Feder, bei Aufbringung der Last ein. Sie bleibt über die gesamte Zeit konstant und stellt sich bei Entlastung spontan zurück. Die mit der Zeit zunehmende viskoelastische Verformung, gekennzeichnet durch Parallelschaltung von Feder und Dämpfer, und die viskose Verformung kennzeichnen das Kriechen. Bei Entlastung stellt sich nur der viskoelastische Anteil wieder vollständig zurück, aber entsprechend zeitverzögert.

Beim Kriechen selbst unterscheidet man zwischen drei charakteristischen Bereichen (Bild 26). Im relativ kurzen Primärbereich nimmt die Kriechgeschwindigkeit ab. Der dominierende sekundäre Kriechbereich (Abgleiten der Polymerketten) ist gekennzeichnet durch eine konstante Kriechgeschwindigkeit, wohingegen im tertiären Kriechbereich, mit

verstärkt plastischen Verformungen aufgrund der Entschlaufungsprozesse der Makromoleküle, die Kriechgeschwindigkeit ansteigt [22].

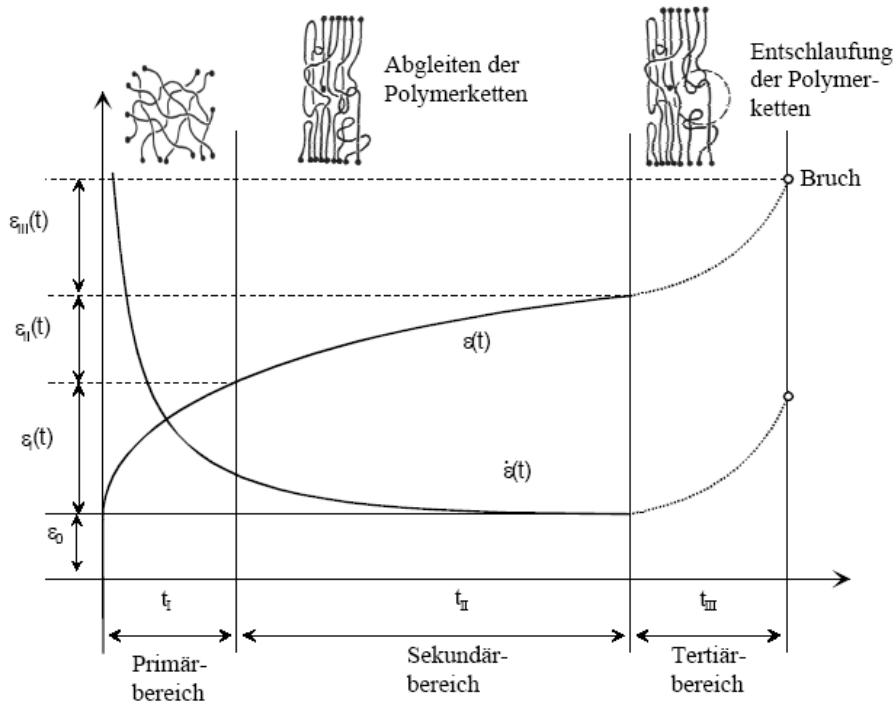


Bild 26 Schematische Darstellung von Kriechdeformation und Deformationsgeschwindigkeit [19]

Diese Phänomene führen dazu, dass Polystyrol-Probekörper im Kurzzeitzugversuch mit Bruchdehnungen von ca. 2 % versagen, die gleichen Proben aber im Zeitstandzugversuch um mehr als zweifach höhere Dehnungen erreichen ohne zu brechen (Bild 27).

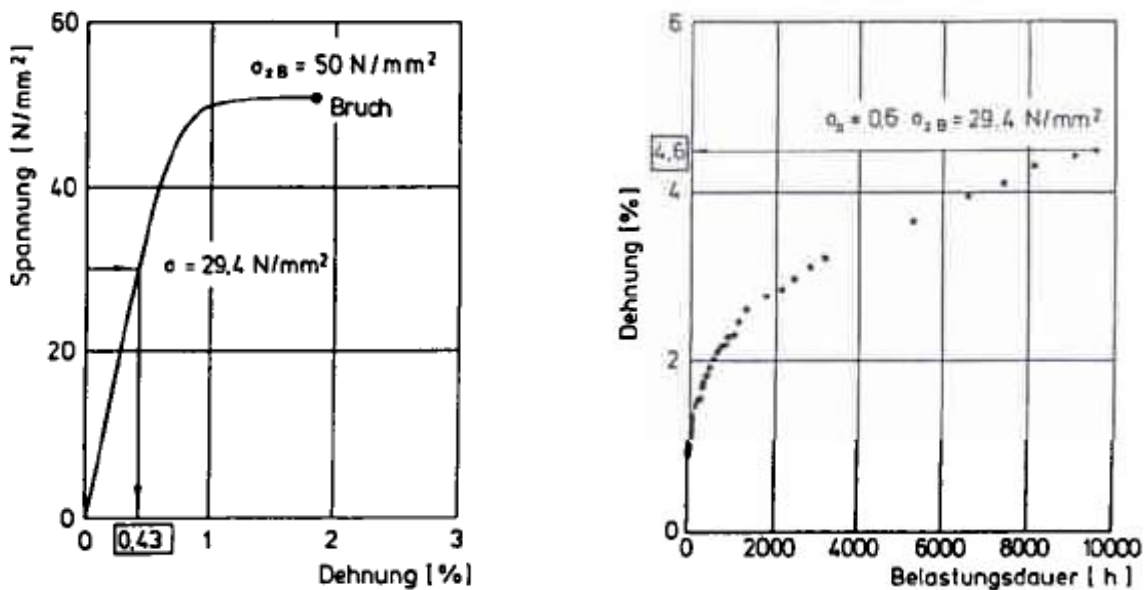


Bild 27 Unterschiedliche Bruchdehnung im Kurz- und Langzeitversuch bei Polystyrol 168N, T=23°C, relative Feuchte 50 %, E0 = 3.500 MPa [23]



Hieraus ist abzuleiten, dass für die Dimensionierung von Konstruktionen, bei denen EPS-Hartschaumstoffe einer Langzeitdruckbelastung unterworfen sind, nicht die Druckfestigkeiten aus dem Kurzzeitversuch herangezogen werden dürfen, sondern stets mit in Zeitstandversuchen ermittelten Verformungs- und Steifigkeitskennwerten gerechnet werden muss.

#### 4.3.5.3 Versuchsergebnisse

Seit Beginn der 1980er Jahre wurden zahlreiche Zeitstanduntersuchungen durchgeführt, welche das Leistungsspektrum der verschiedenen EPS-Produkte verdeutlichen. Die Durchführung der Versuche erfolgte im Normalklima ( $23 \pm 2$ ) °C und ( $50 \pm 5$ ) % rel. Luftfeuchte und in den 1980er Jahren im Wesentlichen so, wie später in DIN EN 1606 [20] beschrieben. Bei der Auswertung wird eine über DIN EN 1606 [20] hinausgehende spannungsabhängige Betrachtung durchgeführt, d.h., dass die aufgrund des nichtlinear-viskoelastischen Verhaltens der Polystyrolmatrix vorhandene Abhängigkeit des Kriechverhaltens von der Prüfdauer und der Prüfspannung durch mathematische Funktionen beschrieben wird [24, 25, 26].

Im Bild 28 bis Bild 34 sind exemplarisch für unterschiedliche EPS-Produkte die Stauungen als Funktion der Zeit für die geprüften Druckspannungen dargestellt. Hierbei kennzeichnen die Symbole die tatsächlich gemessenen Werte, die Kurvenzüge beruhen auf der Berechnung mittels Findley-Ansatz:

$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + m(\sigma) t^{b(\sigma)}$ , mit  $m$  und  $b$  als spannungsniveauabhängige Findley-Parameter.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen Versuchen das Kriechverhalten durch den Findley-Ansatz gut beschrieben und extrapoliert werden kann. Auf die einzelnen Kriechkurven soll hier nicht näher eingegangen werden. Vielmehr wird nachfolgend am Beispiel der Versuche an Peripor<sup>®</sup> (Nr. 99-2 und 99-3) beschrieben, welchen Einfluss die Prüfdauer auf die Anpassungs- und die Extrapolationsgüte hat und wie durch statistisch abgesicherte Auswertungen relevante Aspekte hinsichtlich der Tragsicherheit berücksichtigt werden. Bei Peripor<sup>®</sup> handelt es sich um ein wasserabweisend eingestelltes EPS.

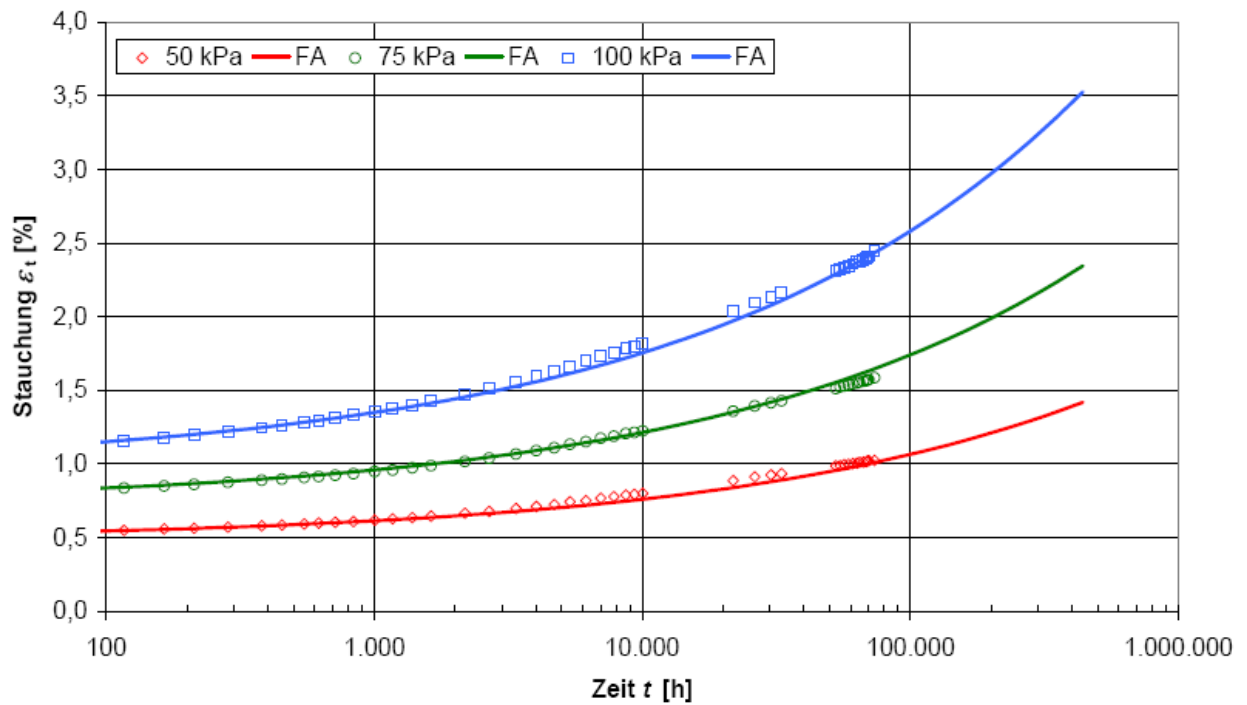


Bild 28 Kriechkurven von Styropor®, RD = 34,0 kg/m<sup>3</sup>, Versuch Nr. 93-1 [19]

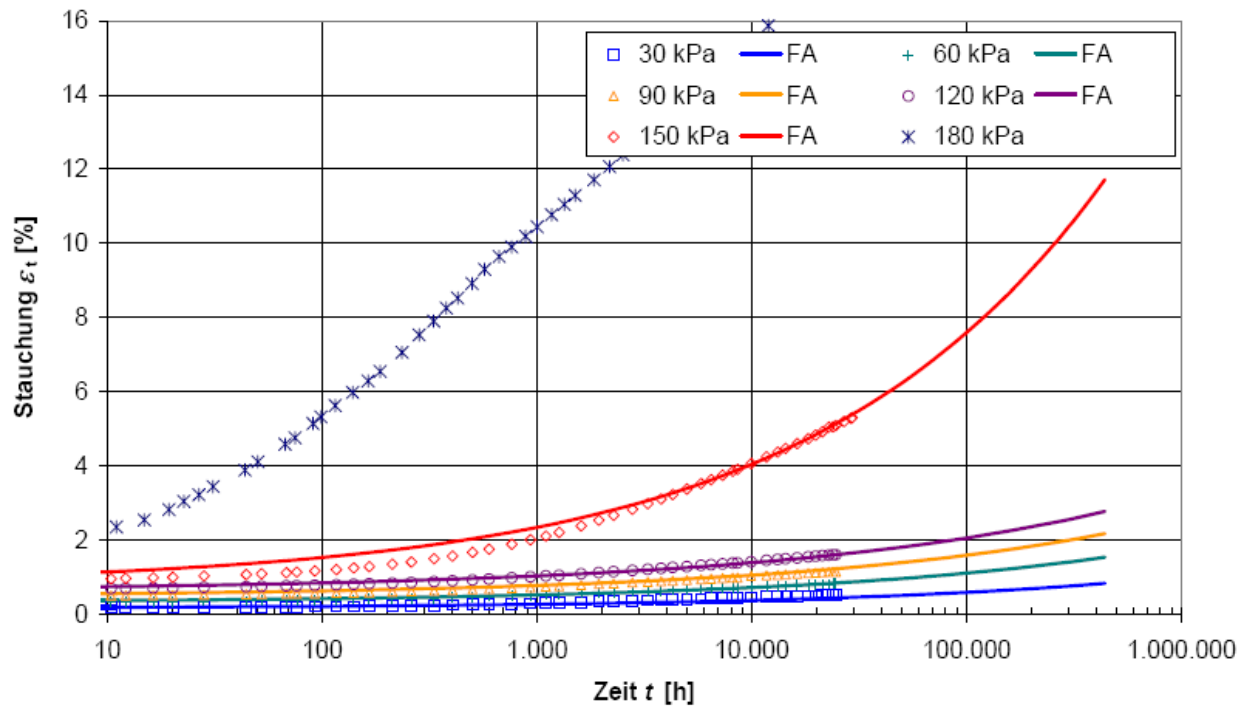


Bild 29 Kriechkurven von Peripor® SF40, RD = 41,5 kg/m<sup>3</sup>, Versuch Nr. 99-2 [19]

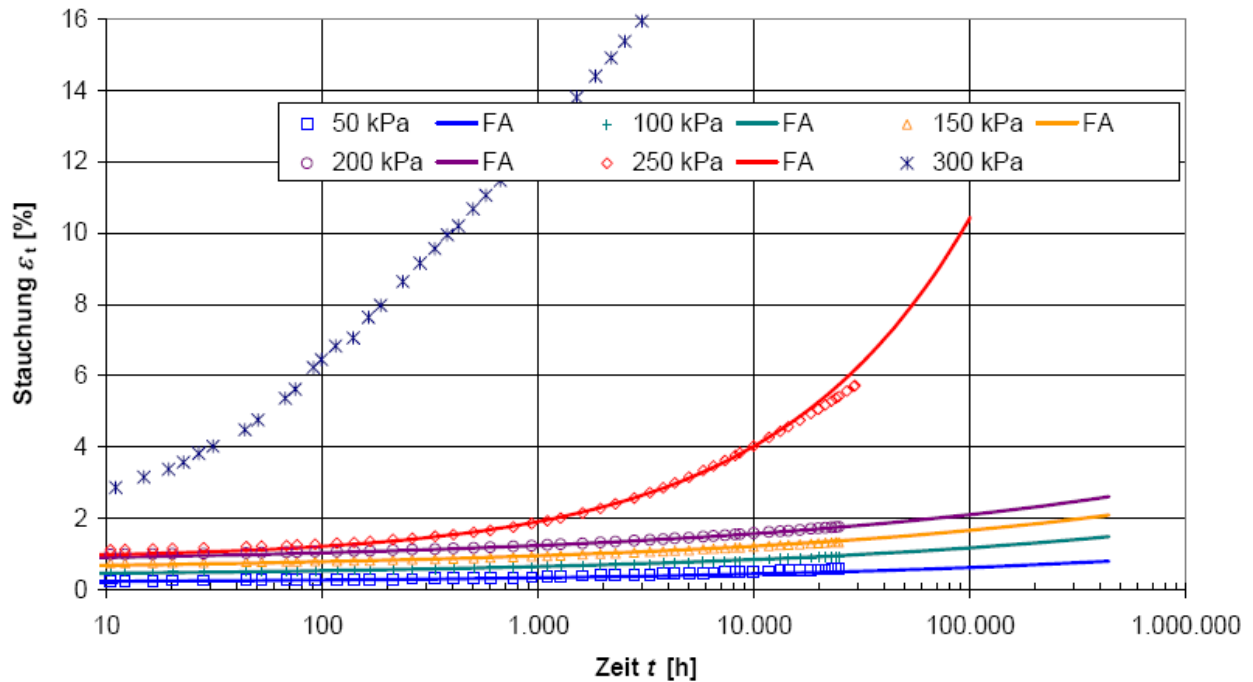


Bild 30 Kriechkurven von Peripor®, RD = 52,8 kg/m<sup>3</sup>, Versuch Nr. 99-3 [19]

#### 4.3.5.4 Einfluss der Prüfdauer auf die Extrapolationsgüte

Nach DIN EN 1606 [20] ist für die Beschreibung des Kriechverhaltens eines Produktes mindestens eine Prüfdauer von 92 Tagen (2.160 h) zu Grunde zu legen. Allerdings richtet sich die erforderliche Prüfdauer nach der erlaubten Extrapolationszeit, d.h. sollen Aussagen zum Kriechverhalten bis zu 50 Jahren (438.000 h) gemacht werden, dann ist eine Prüfdauer von ca. 2 Jahren (17.500 h) erforderlich. Da diese Dauer bei der Beurteilung und der Zulassung neuer Produkte unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als zu lang bewertet wird, stellt sich häufig die Frage, mit welcher Sicherheit Aussagen schon nach kürzeren Prüfdauern getroffen werden können. Nachfolgend wird gezeigt, dass der Findley-Ansatz bei polymeren Hartschaumstoffen mit Polystyrolmatrix auch bei kürzeren Prüfdauern das Kriechverhalten gut beschreibt und – falls Abweichungen auftreten – dies eher zu einer konservativen Beurteilung des Langzeitverhaltens führt, d.h. dass eine auf kürzeren Prüfdauern abgestützte Berechnung des Kriechverhaltens keine unter den tatsächlich gemessenen Werten liegende Extrapolation liefert.

Dies zeigen die Beispiele, in denen für die Versuche 99-2 und 99-3 bei Prüfspannungen von 60 und 120 kPa bzw. 100 und 200 kPa eine Auswertung basierend auf den Messwerten bis 5.000 h durchgeführt und mit der Extrapolation basierend auf der Gesamtprüfdauer von 24.650 h verglichen wird (Bild 31 und Bild 32). Hieraus ergeben sich für eine Belastungsdauer von 50 Jahren die in Tabelle 1 dargestellten Stauchungswerte.

Tabelle 1 Vergleichswerte der Stauchung nach 50 Jahren bei unterschiedlicher Berechnungsbasis für Peripor® [19]

| Versuch Nr. / Spannung [kPa] | Stauchung über 50 Jahren (extrapoliert) [%] |                           |
|------------------------------|---|---------------------------|
|                              | Berechnungsbasis 5.000 h                    | Berechnungsbasis 24.650 h |
| 99-2 / 60                    | 3,4   | 1,5                       |
| 99-2 / 120                   | 4,4   | 2,8                       |
| 99-3 / 10                    | 1,5   | 1,5                       |
| 99-3 / 200                   | 2,6   | 2,6                       |

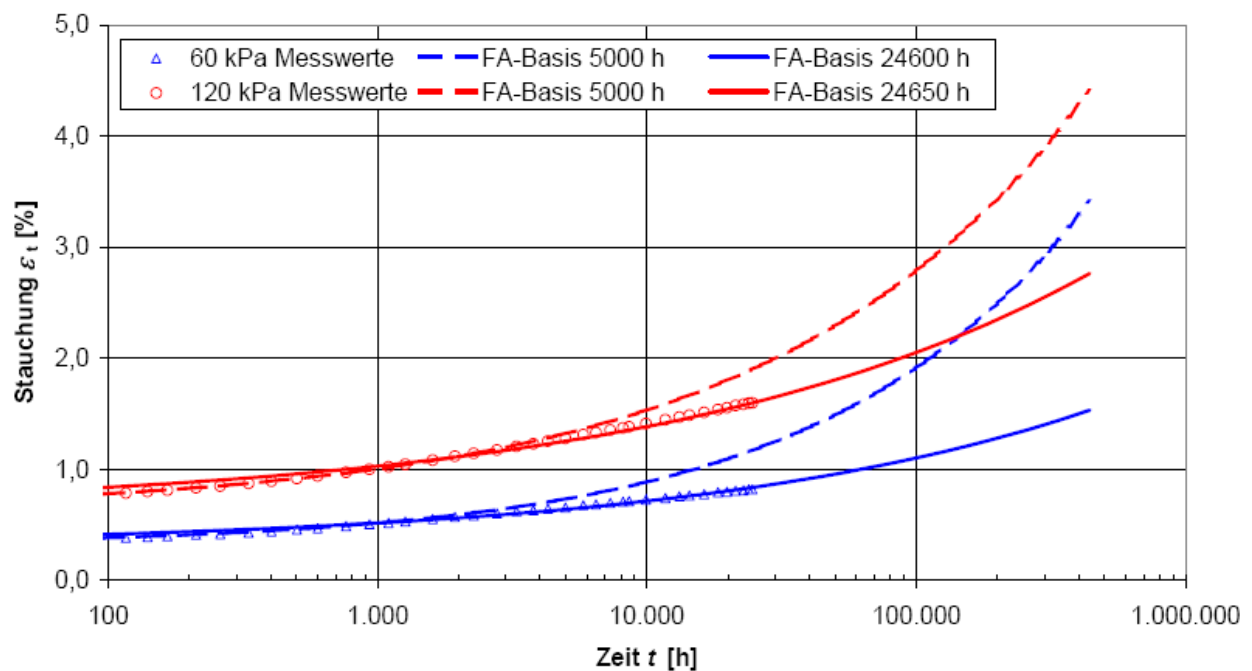


Bild 31 Vergleich der Extrapolationsgüte bei unterschiedlichen Prüfdauern am Produkt Peripor®, Versuch Nr. 99-2 [19]

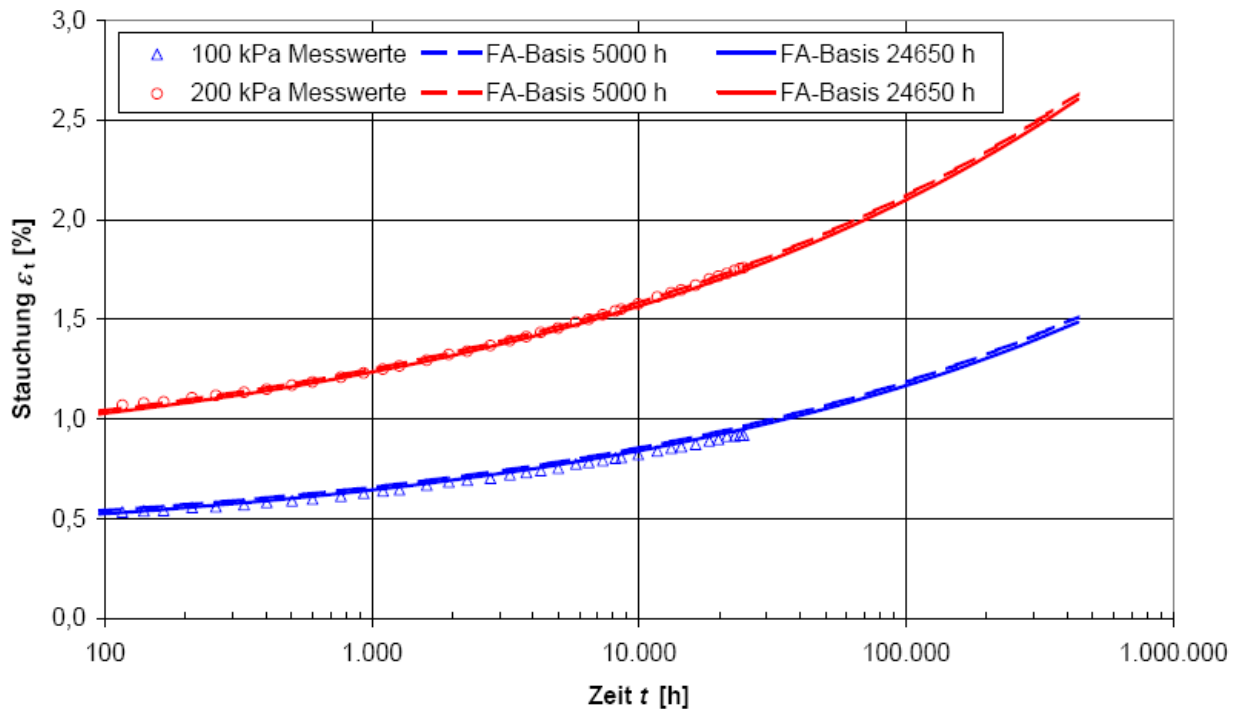


Bild 32 Vergleich der Extrapolationsgüte bei unterschiedlichen Prüfdauern am Produkt Peripor<sup>®</sup>, Versuch Nr. 99-3 [19]

#### 4.3.5.5 Statistische Absicherung des Langzeitverhaltens

Die Herleitung einer Dimensionierungskenngröße bei mechanischer Belastung basiert üblicherweise auf einem Grenzzustand, der entweder als Versagen durch Bruch oder Überschreiten eines bestimmten Verformungswertes definiert wird. Ein sicherer Zustand ist dadurch charakterisiert, dass ein genügend großer Abstand vom Grenzzustand eingehalten wird.

Da bei EPS-Hartschaumstoffen kein Bruchversagen auftritt, sondern sich nur eine zeit- und belastungsabhängige Verformung einstellt, wird als Grenzzustand ein Verformungswert festgelegt. Dieser Verformungswert ist nicht gleichbedeutend mit einem Versagenswert, er ist lediglich als Grenzzustand definiert.

Basierend auf Langzeiterfahrungen wird als Grenzwert für EPS-Hartschaum ebenso wie für XPS-Hartschaum [22] eine Verformung  $\epsilon_{zul}$  von 10 % festgelegt. Im Bild 29 und Bild 30 ist eindeutig zu erkennen, dass selbst bei Stauchungen von weit über 15 % kein Bruchversagen des Produktes auftritt und sich die Proben noch nicht im Zustand des tertiären Kriechens befinden. Auch zeigen Druckversuche an den Proben 99-2/150 kPa und 99-3/250 kPa, die im Zeitstandversuch nach einer Prüfdauer von 24.650 h Stauchungen von mehr als 5 % aufwiesen, dass durch die Zeitstandbeanspruchung keine Vorschädigung hinsichtlich der mechanischen Integrität hervorgerufen wird (Bild 33).

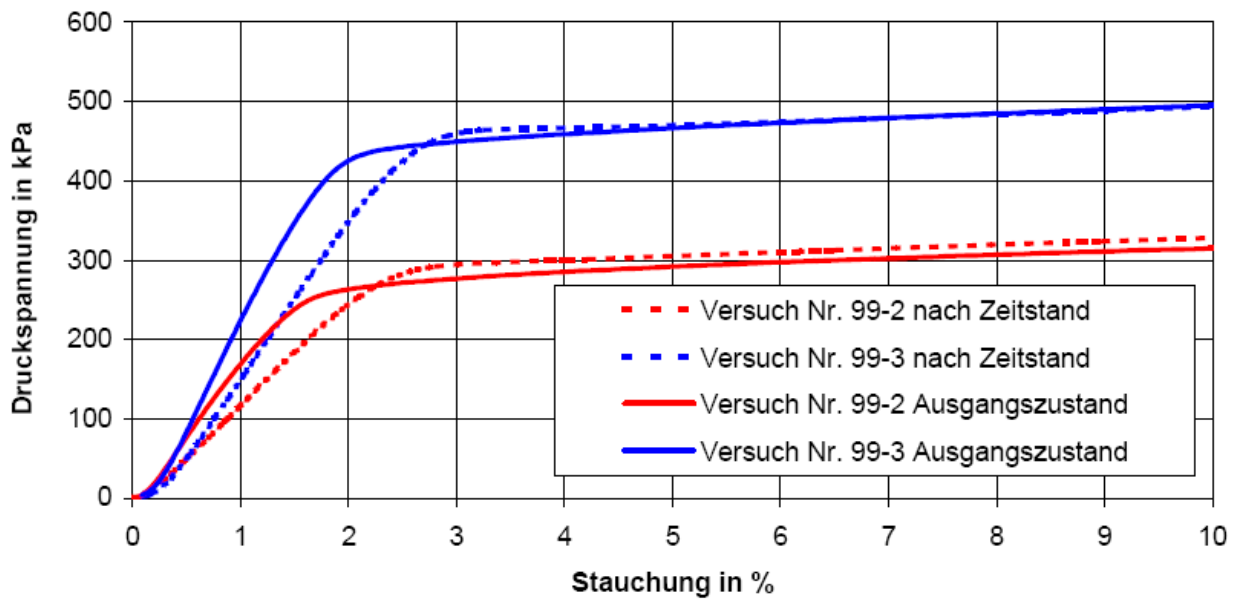


Bild 33 Vergleich der Druckfestigkeit im Ausgangszustand und nach Zeitstandbeanspruchung [19]

Die Verformungskurven dieser Proben im Druckversuch nach DIN 826 unterscheiden sich nicht signifikant von den Kurven, die im Ausgangszustand gemessen wurden. An den nach dem Zeitstandversuch gemessenen Proben ist zwar der E-Modul etwas geringer, was auf eine viskoelastische Verformung während der 24.650 h zurückzuführen ist, dagegen werden aber für die  $\sigma_{10}$ -Werte (Druckfestigkeit nach DIN EN 826 [21] bei 10 %-Stauchung) sogar etwas höhere Werte als im Ausgangszustand ermittelt.

Basierend auf diesen Betrachtungen wird entsprechend einer gutachterlichen Stellungnahme [27] für die sicherheitstechnischen Abschätzung der Stauchung im Grenzzustand bei langzeitiger Druckbelastung wie folgt vorgegangen:

Das Kriechverhalten wird mit dem Ansatz nach DIN EN 1606 [20] beschrieben, wobei  $\epsilon_t$  als Stauchung im Gebrauchszustand definiert ist:

$$\epsilon_t = \epsilon_0 + m(\sigma) \cdot t^{b(\sigma)} \tag{1}$$

mit:

- t Belastungsdauer [h]
- b, m mittels Findley-Anpassung berechnete werkstoffspezifische Parameter

Der Spontananteil der Stauchung  $\epsilon_0$  wird hier wie folgt berechnet:

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma}{E} \tag{2}$$

mit:

- E Elastizitätsmodul nach DIN EN 826 [kPa]
- $\sigma$  Druckspannung [kPa]



Im Rahmen der sicherheitstechnischen Betrachtung wird eine Verformung im Grenzzustand  $\varepsilon_{ty}$  definiert und gefordert, dass  $\varepsilon_{ty} \leq \varepsilon_{zul}$  ist. Hierbei wird wie oben beschrieben  $\varepsilon_{zul} = 10 \%$  vorgegeben.

Für die statische Nachweisgleichung werden nach [27] folgende Sicherheitsbeiwerte festgelegt:

- $\gamma_s = 1,4$  Teilsicherheitsbeiwert für die Last,
- $\gamma_T = 1,0$  Teilsicherheitsbeiwert für die Lebensdauer bei ausreichend langer Prüfzeit für die Extrapolation bis 50 Jahre,
- $\gamma_M = 1,3$  Teilsicherheitsbeiwert für materialspezifische und extrapolationsstatistische Unsicherheiten

Zum Teilsicherheitsbeiwert für die Lebensdauer ist anzumerken, dass dieser bei den nicht der Extrapolationsdauer entsprechenden, kurzen Prüfzeiten im Bereich  $1,0 < \gamma_T \leq 1,5$  angesetzt werden sollte, auch wenn der Findley-Ansatz i.d.R. eine konservative Anpassung liefert.

Dementsprechend lautet die Nachweisgleichung wie folgt:

$$\varepsilon_{ty} = \frac{\gamma_s \cdot \sigma}{E} + \gamma_M \cdot m(\gamma_s \cdot \sigma) \cdot (\gamma_T \cdot t)^{b(\gamma_s \cdot \sigma)} \leq \varepsilon_{zul} \quad (3)$$

Für die Versuche an Peripor® sind in Tabelle 2 für die Prüfspannungen 120 bzw. 200 kPa die jeweiligen Stauchungen im Gebrauchszustand nach Gl. (1) und im Grenzzustand nach Gl. (3) für Zeiten von 20 und 50 Jahren berechnet.

**Tabelle 2** Auswerteparameter sowie Stauchungswerte im Gebrauchs- und Grenzzustand [19]

| Versuch Nr.   |                      | 99-1         | 99-2         | 99-3         | 99-4         |
|---|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Produkt   |                      | Peripor SF40 | Peripor SF40 | Peripor SF50 | Peripor SF50 |
| Dicke [mm]  |                      | 50           | 120          | 50           | 120          |
| E-Modul [kPa]   |                      | 20800        | 19300        | 28900        | 26400        |
| Dauerdruckspannung [kPa]  |                      | 120          | 120          | 200          | 200          |
| Grenzspannung der Tragfähigkeit $\sigma_\gamma = \gamma_s \cdot \sigma$ [kPa] |                      | 168          | 168          | 280          | 280          |
| Spontanstauchung $e_0 = \sigma / E$ [%]                                       |                      | 0,58         | 0,62         | 0,69         | 0,76         |
| Spontanstauchung Grenzwert $\varepsilon_{0\gamma} = \sigma_\gamma / E$ [%]    |                      | 0,81         | 0,87         | 0,97         | 1,06         |
| Findley-Parameter   | m( $\sigma$ )        | 0,000216     | 0,000622     | 0,001298     | 0,000154     |
|   | m( $\sigma_\gamma$ ) | 0,000342     | 0,001003     | 0,001817     | 0,000443     |
|   | b( $\sigma$ )        | 0,3360       | 0,2724       | 0,2070       | 0,4005       |
|   | b( $\sigma_\gamma$ ) | 0,3305       | 0,2565       | 0,1962       | 0,3792       |
| Stauchung im Gebrauchszustand (%)   | 20 Jahre             | 1,8          | 2,3          | 2,3          | 2,7          |
|   | 50 Jahre             | 2,3          | 2,8          | 2,6          | 3,6          |
| Stauchung im Grenzzustand (%)   | 20 Jahre             | 3,2          | 3,8          | 3,5          | 6,7          |
|   | 50 Jahre             | 4,1          | 4,5          | 4,0          | 9,0          |

Für diese Spannungen liegen die Werte im Grenzzustand unterhalb von 10 %, d.h. unter Ansatz von in der Tragwerksplanung üblichen Teilsicherheitsbeiwerten ist ein „Versagen“ im Sinne der Definition der Grenzverformung nicht zu befürchten. Die oben betrachteten Produkte aus Peripor® können somit in der Praxis für lastabtragende Anwendungen zugelassen werden. Hinsichtlich der wärmeschutztechnischen Auslegung kann die Stauchung im Gebrauchszustand für die Festlegung der relevanten Dämmstoffdicke herangezogen werden.

#### 4.4 Fazit

EPS-Hartschaumstoffe zeigen im Kurzzeit-Druckversuch selbst bei Stauchungen von über 90 % kein Versagen hinsichtlich der Strukturintegrität, d.h. es tritt kein Bruch auf. Auch Proben, die über 2,8 Jahre einer Zeitstandsbeanspruchung unterworfen waren und dabei eine Stauchung von über 5 % erreicht hatten, zeigen in einem danach durchgeführten Druckversuch noch nahezu das gleiche Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten, wie Proben im Ausgangszustand. Hieraus lässt sich ableiten, dass durch eine Langzeitbeanspruchung keine die Integrität des Hartschaums beeinträchtigenden Schädigungen hervorgerufen werden. Das Kriechverhalten der EPS-Hartschaumstoffe wurde in einer Reihe von Versuchen mit Prüfdauern von derzeit mehr als 8 Jahren untersucht. Dabei zeigt sich, dass das Kriechen mit dem in DIN EN 1606 [20] beschriebenen Findley-Ansatz sehr gut beschrieben und auf weit über 50 Jahre hinaus extrapoliert werden kann. Eine auf die Kurzzeitdruckfestigkeit gestützte Berechnung des Langzeitverhaltens ist nicht möglich, allenfalls kann dies für eine erste Abschätzung für die in Langzeitversuchen festzulegenden Prüfspannungen herangezogen werden.

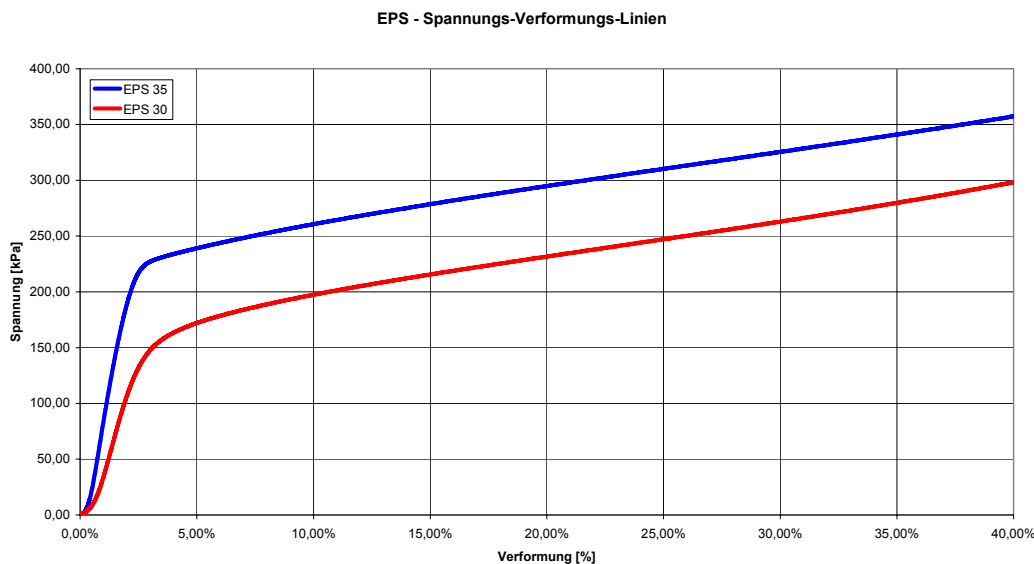
Anhand einer sicherheitstechnischen Betrachtung wurde gezeigt, wie basierend auf Langzeituntersuchungen und unter Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten eine Stauchung im Grenzzustand für 50 Jahre ermittelt werden kann. Dabei ist von Bedeutung, dass bei EPS-Hartschaum nicht von einem Versagen im Sinne von Bruch ausgegangen werden darf, sondern als Grenzzustand eine zulässige Verformung von 10 % bei Langzeitbeanspruchung definiert wird. Die nach DIN EN 1606 [20] auf 50 Jahre extrapolierte Stauchung im Gebrauchszustand wird aus *wärmeschutztechnischen* Gründen auf 5 % begrenzt. Ein elastisches Verhalten im Kurzzeitversuch kann grundsätzlich für  $\varepsilon < 1,5 \%$  angenommen werden.

Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich ein ähnlicher Nachweis für das Beanspruchungsverhalten der EPS-Bettungskissen unter der Rohrsohle. Zu Beginn der zu erwartenden vertikalen Gesamtbelastung sollten die Kissen nur im elastischen Bereich beansprucht werden, d.h. mit  $\varepsilon < 1,5 \%$ . Über die Nutzungsdauer sind die maximalen Verformungen dann nach o.a. Sicherheitsansatz auf 10 % zu beschränken.

## 5 Laborversuche

### 5.1 Kurzzeit-Laborversuche

Zurzeit werden seitens des Herstellers unterschiedliche EPS-Qualitäten als Werkstoff für Bettungskissen angeboten. Für die bisher betrachteten Rohre aus Steinzeug und PVC kommen Kissen aus EPS 30 zum Einsatz, während für so genannte Ultra-Rib II und U-Plus Rohre EPS 35 Verwendung findet. Diese Materialien unterscheiden sich in erster Linie durch die Dichte und das damit verbundene Druckspannungs-Stauchungsverhalten. An zahlreichen Proben unterschiedlicher Dichten wurden Kurzzeit-Druckversuche durchgeführt, um das prinzipielle Verhalten zu ermitteln. Exemplarisch sind die Ergebnisse für die hier zunächst relevanten EPS-Qualitäten 30 und 35 im Bild 34 dargestellt.



**Bild 34** EPS: Druckspannungs-Stauchungs-Linien

Die Ergebnisse wurden insbesondere für die in Abschnitt 8 durchgeführten statischen Untersuchungen verwendet. Prinzipiell wird deutlich, dass bei EPS 35 geringere Verformungen bei vergleichbaren Spannungen auftreten als bei EPS 30. Bei im Leitungsbau in einer Tiefe von etwa 4 m durchaus üblichen vertikalen Bodenspannungen von  $120 \text{ kN/m}^2$  weist EPS 30 eine Verformung von ca. 2,3 % auf, während bei EPS 35 lediglich ca. 1,3 % zu erwarten sind. Zu beachten ist die rasche Zunahme der Verformung ab  $150 \text{ kN/m}^2$  bei EPS 30, welche die Verwendung in diesen Spannungsbereichen problematisch erscheinen lässt. Bei EPS 35 liegen die zu erwartenden Verformungen im elastischen Bereich, welcher nach Abschnitt 4.3.1 zwischen 1 und 2 % Verformung liegt.

## 5.2 Langzeit Laborversuche

Ein wesentliches Kriterium für den Einsatz von EPS im Kanalbau ist das Verformungs- und Kriechverhalten des Gesamtsystems unter ständiger Belastung. In den Abschnitten 4.3.5 und 5.1 wurden insbesondere die Werkstoffeigenschaften unter idealer Druckbelastung von Probewürfeln ausführlich beschrieben. Einflüsse aus der besonderen Geometrie von Bettungskissen wurden allerdings nicht untersucht. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes unterschiedliche Systemkombinationen im Maßstab 1:1 über einen Zeitraum von 10 Monaten untersucht. Hierbei wurden Rohrwerkstoffe, EPS-Qualitäten, Auflasten und Systemgeometrien variiert. In Tabelle 3 sind die Versuchsgruppen zusammengestellt.

Tabelle 3 Durchgeführte Langzeitversuche (10 Monate)

| Versuchsgruppe | Anzahl Versuche | Rohrwerkstoff | Rohr-nennweiten*) | EPS-Qualität | Auflast [kg/m] | Seitliche Führungen |
|----------------|-----------------|---------------|-------------------|--------------|----------------|---------------------|
| 1              | 2               | Ultra-Rib II  | DN300             | EPS 35       | 356            | Nein                |
| 2              | 1               | Ultra-Rib II  | DN300             | EPS 35       | 356            | Ja                  |
| 3              | 2               | Steinzeug     | DN300             | EPS 20       | 356            | Nein                |
| 4              | 1               | Steinzeug     | DN300             | EPS 20       | 356            | Ja                  |
| 5              | 2               | PVC           | DN300             | EPS 25       | 190            | Nein                |
| 6              | 1               | PVC           | DN300             | EPS 25       | 190            | Ja                  |
| 7              | 3               | Steinzeug     | DN300/DN200       | EPS 20       | 285            | Ja                  |
| 8              | 3               | PVC           | DN300/DN200       | EPS 25       | 95             | Ja                  |
| 9              | 3               | Ultra-Rib II  | DN300/DN200       | EPS 35       | 285            | Ja                  |
| 10             | 1               | Steinzeug     | DN300             | EPS 30       | 698            | Nein                |
| 11             | 1               | PVC           | DN300             | EPS 30       | 492            | Nein                |
| 12             | 1               | Ultra-Rib II  | DN300             | EPS 30       | 698            | Nein                |
| 13             | 1               | Steinzeug     | DN300/DN200       | EPS 30       | 546            | Nein                |
| 14             | 1               | PVC           | DN300/DN200       | EPS 30       | 266            | Nein                |
| 15             | 1               | Ultra-Rib II  | DN300/DN200       | EPS 30       | 546            | Nein                |

\*) Bei 2 Nennweiten wurden die Rohre übereinander angeordnet. Unten befand sich hierbei die größere Nennweite

Als Rohrwerkstoffe kamen biegeeweiche Kunststoffrohre (PVC, Ultra-Rib II) und biege-steife Steinzeugrohre zum Einsatz. Die Auflasten auf die Rohrsysteme wurden in weiteren Vorversuchen ermittelt. Zu einen wurden die Kunststoffrohre zwischen zwei parallel ausgerichteten Platten liniengelagert und bis zu einer Verformung von 3% des Innendurchmessers belastet (vgl. [28]). Zum anderen wurde das Gesamtsystem inkl. Bettungskissen bis zu einer 3%-Verformung des Innendurchmessers belastet.

Die so ermittelten Kräfte wurden als Prüfkräfte im Rahmen der Langzeitversuche mit Kunststoffrohren angesetzt. Für die Steinzeugrohre wurden die Prüfkräfte der Ultra-Rib II Rohre verwendet (vgl. Tabelle 3). Für die übereinander angeordneten Rohre waren jeweils die geringeren Prüfkräfte des oben liegenden Rohres der Nennweite DN 200 maßgebend.



a) Steinzeug



b) PVC und PP

**Bild 35 Versuchsaufbau Langzeituntersuchungen: Gesamtkonzept**



a) Mit seitlichen Führungen



b) Ohne seitliche Führungen

**Bild 36 Versuchsaufbau Langzeituntersuchungen: Ausführungsdetails**

In den Langzeit-Versuchen wurden zur Abschätzung des Einflusses einer seitlichen Stützung durch die eingesetzte Versuchseinrichtung sowohl Versuche mit als auch ohne seitliche Führung durchgeführt (vgl. Bild 36). Im Ergebnis konnten keine Unterschiede zwischen den beiden Lagerungsarten festgestellt werden.

Bild 37 zeigt die Auswertung der Langzeitversuche in Form der Messwerte von Rohrsohle bis Grundplatte. Bei Steinzeug mit einer Belastung von 698 kg/m ist nach einer Anfangsstauchung von etwa -0,6 mm keine signifikante Zunahme mehr festzustellen. Der auf 100 Jahre extrapolierte Wert liegt noch unter 1 mm.



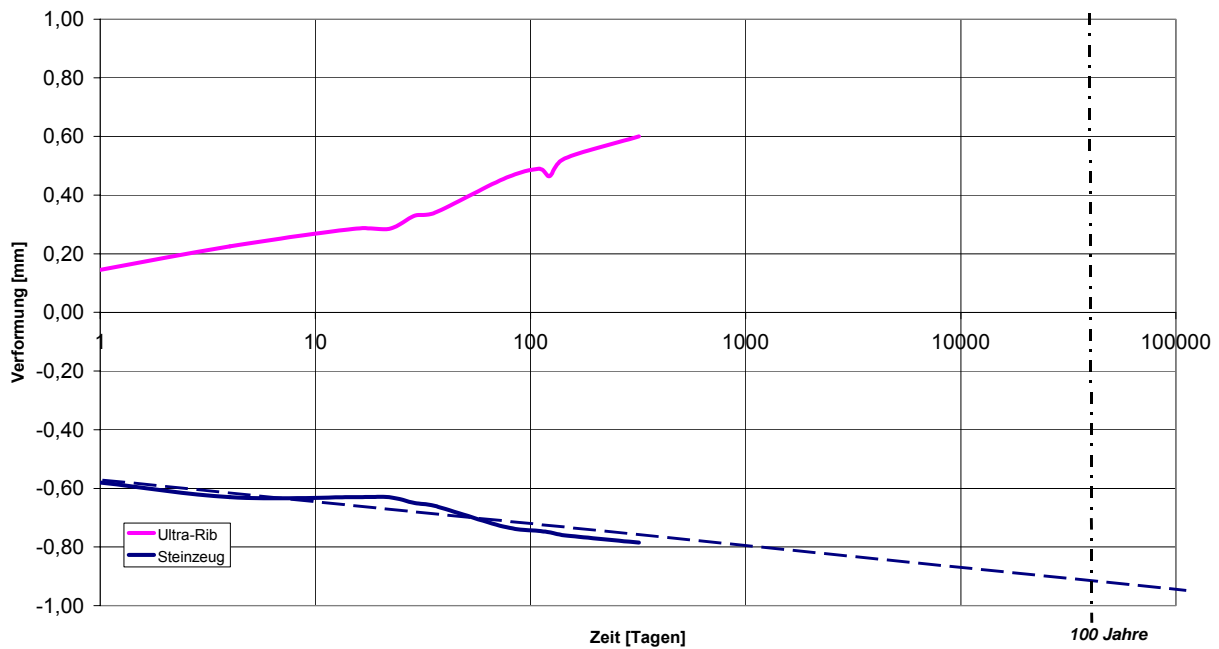


Bild 37 Auswertung Langzeituntersuchungen (Versuchsgruppen 10, 12)

Auffällig waren die Messwerte für die Kunststoffrohre. Hier kam es nicht zu einer Kompression des Bettungskissens in der Sohle, sondern zu positiven Verformungen. Diese lassen sich durch ein Abheben des Rohres im Versuch infolge der Ovalisierung erklären. Dies hat dann ein Eindringen des Rohres im Kämpferbereich zur Folge (Bild 38). Ein solches Verhalten ist bei seitlicher Verfüllung der Leitungszone allerdings kaum zu erwarten. Auf eine Extrapolation der Messwerte wurde daher verzichtet.



Bild 38 Entlastung des Sohlbereiches infolge Ovalisierung – Ultra-Rib II, DN 200

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die untersuchten Systeme und Belastungen keine sichtbaren Schädigungen an den Kissen hervorgerufen haben. Ein Zugversagen oder auffällige Deformationen konnten nicht festgestellt werden. Lediglich bei den gerippten Rohren konnten im Kämpferbereich punktuell geringfügige Eindrückungen (< 1 mm) beobachtet werden. Detaillierte Spannungsverteilungen für im Boden gebettete EPS-Kissen und Rohre werden im Abschnitt 8 rechnerisch ermittelt.



### 5.3 Scheiteldruckversuche

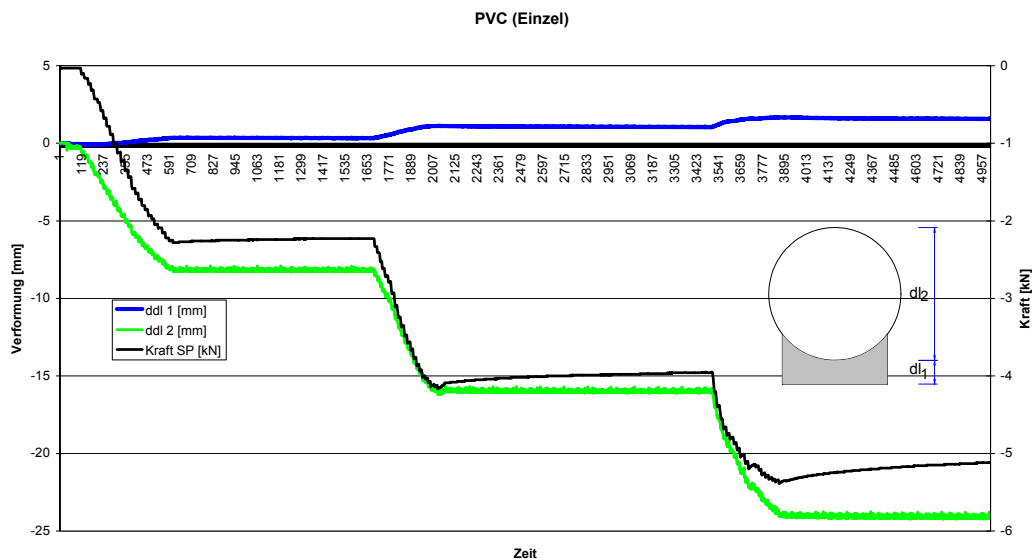
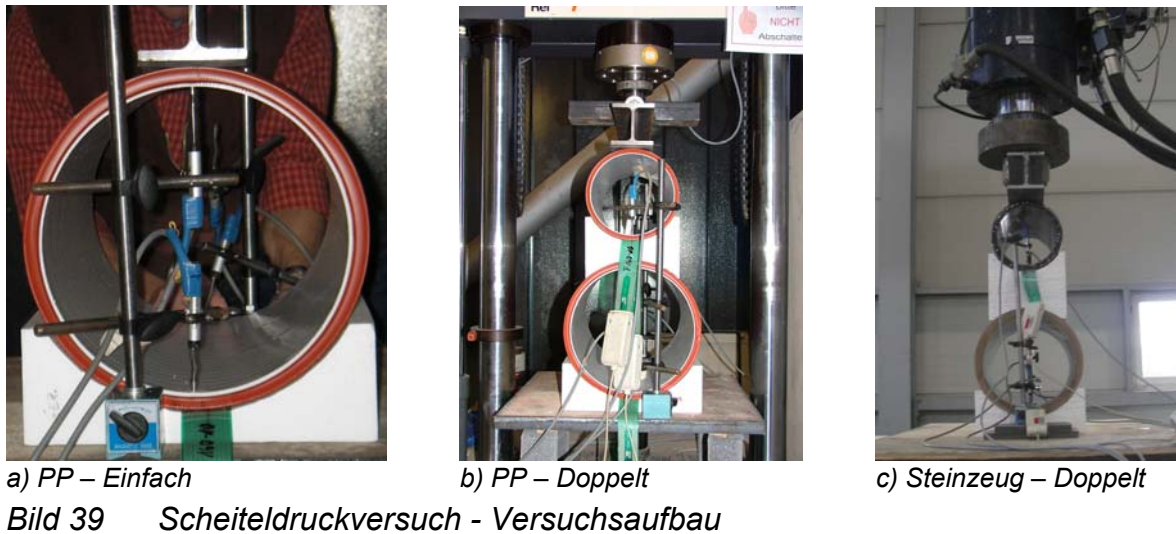
Zur Beurteilung der Spannungsverteilung im Auflagerbereich der Bettungskissen wurden Scheiteldruckversuche durchgeführt. Bei diesen Kurzzeit-Belastungsversuchen wurden die Verformungen von Rohr und Bettungskissen unter Belastung ermittelt und die Spannungen mit speziellen Folien visualisiert. Verwendet wurden biegeweiche, gerippte und glattwandige Kunststoffrohre sowie biegesteife Steinzeugrohre. Jeder Rohrtyp wurde einfach und doppelt, d.h. zwei Rohre übereinander, geprüft. Die Randbedingungen der Versuche sind in Tabelle 4 festgehalten.

*Tabelle 4 Durchgeführte Kurzzeit-Scheiteldruckversuche*

| Versuchsgruppe | Anzahl Versuche | Rohrwerkstoff | Rohr-nennweiten*) | EPS-Qualität |
|----------------|-----------------|---------------|-------------------|--------------|
| 1              | 3               | PVC           | DN300             | EPS 25       |
| 2              | 3               | Ultra-Rib II  | DN300             | EPS 35       |
| 3              | 3               | Steinzeug     | DN300             | EPS 20       |
| 4              | 3               | PVC           | DN300/DN200       | EPS 25       |
| 5              | 3               | Ultra-Rib II  | DN300/DN200       | EPS 35       |
| 6              | 3               | Steinzeug     | DN300/DN200       | EPS 20       |

*\*) Bei 2 Nennweiten wurden die Rohre übereinander angeordnet. Unten befand sich hierbei die größere Nennweite*

Im Bild 39 ist der Versuchsaufbau exemplarisch dargestellt. Zu erkennen ist hier auch die verwendete Messtechnik. Wegaufnehmer wurden an einem Stativ montiert, um von einem festen Bezugspunkt aus die Verformungen der Rohre und Bettungskissen zu erfassen. Bei den Steinzeugrohren wurde auf eine Messung der Rohrverformung verzichtet. Die Spannungsmessfolien wurden jeweils unter die Rohre auf die Bettungskissen gelegt. Bei den übereinander liegenden Kunststoffrohren wurde zusätzlich eine Folie direkt auf das untere Rohr positioniert. Die Folien deckten die gesamte Auflagerbreite des EPS-Bettungskissens ab. Die Rohr- bzw. Kissenlänge betrug bei allen Versuchen 0,5 m. Zunächst wird im Folgenden auf die Versuche an Einzelrohren eingegangen.



**Bild 40**      **Scheiteldruckversuch Ergebnis PVC DN 300 (Einzel)**  
(ddl1 = Änderung dl1, ddl2 = Änderung dl2)

Bild 40 zeigt die aufgebrachte Verformung mit den resultierenden Zylinderkräften beim PCV-Rohr. Die positive Verformung dl 1 verdeutlicht wiederum den bereits bei den Langzeitversuchen festgestellten Abhebeeffekt infolge der Ovalisierung des Rohres.

Ein Vergleich der hier erzielten Scheiteldrucklasten mit den Belastungen aus dem *Parallel Plate Loading Test* – PPLT – (vgl. Abschnitt 5.2) zeigt deutlich eine Versteifung des PVC-Rohres durch die Bettungskissen. Dort war eine Kraft von 1,9 kN/m für eine Verformung der Rohres um 3 % erforderlich. Der entsprechende Wert bei den hier durchgeführten Versuchen liegt bei 4,92 kN/m, etwa das 2,5-fache des „ungebetteten“ Rohres. Bild 41 zeigt den qualitativen Verlauf der Bettungsspannungen im Auflager, welcher die Ursache für diese Lasterhöhung verdeutlicht. Im Kontaktbereich Kissen-Rohr konzentrieren sich die Bettungsspannungen in den Randbereichen des Kissens, während die Sohle über das gesamte Verformungsspektrum kontaktspannungsfrei

bleibt. Also kann selbst ohne seitliche Stützung durch Erdreich die Belastungsfähigkeit des Rohres durch die Verwendung der Kissen im Kurzzeitversuch deutlich erhöht werden. Die Kontaktfläche Kissen-Rohr wird bei Belastungszunahme nur geringfügig größer. Das Langzeitverhalten wurde nicht untersucht.

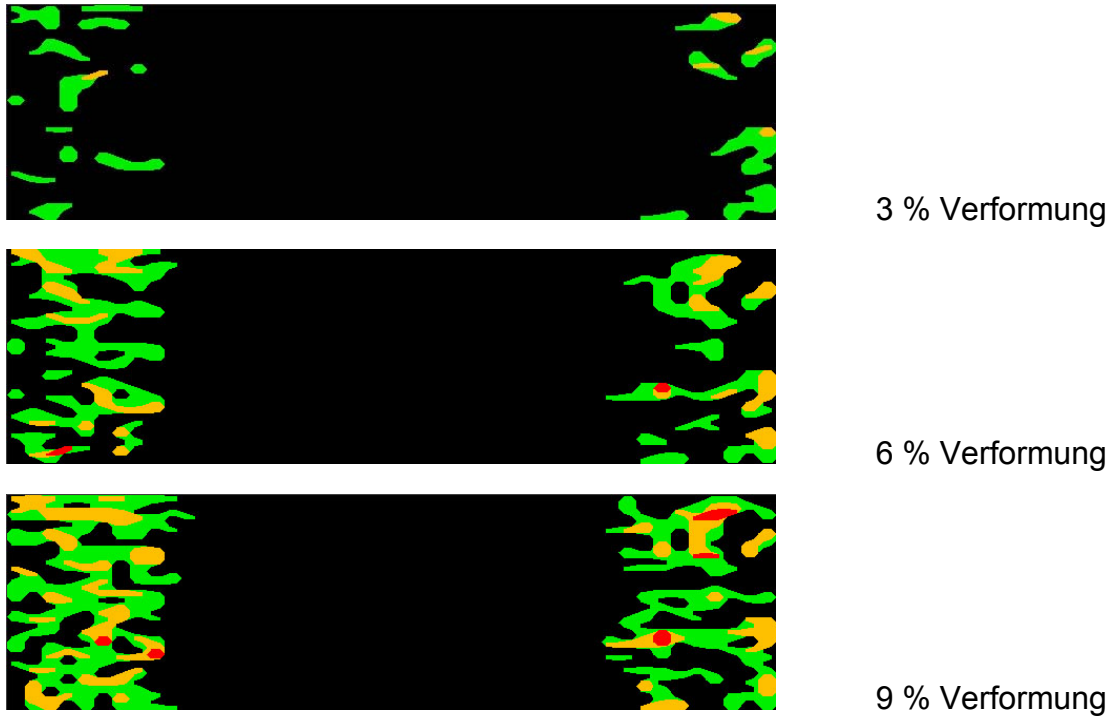


Bild 41 Druckfolienmessung – PVC DN 300 (Einzel)

Im Bild 42 sind die entsprechenden Ergebnisse für das Ultra-Rib II Rohr dargestellt.

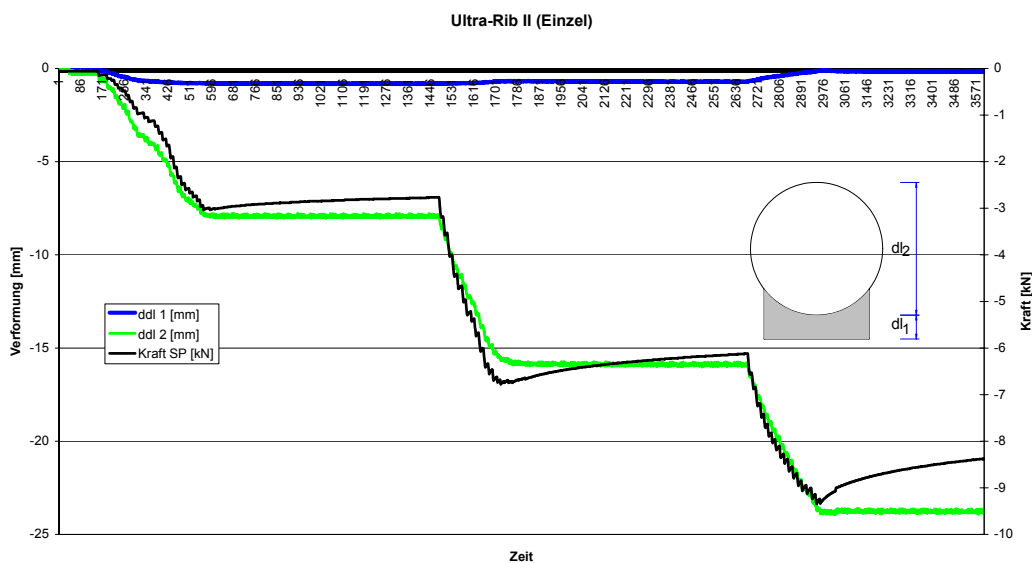


Bild 42 Scheiteldruckversuch Ergebnis Ultra-Rib II DN 300 (Einzel)  
(ddl1 = Änderung dl1, ddl2 = Änderung dl2)

Auch hier stellt sich wie bei PVC eine Erhöhung der Scheiteldruckkraft ein. Im *Parallel Plate Loading Test* war eine Belastung von 3,56 kN/m erforderlich um eine Verformung von 3 % zu erzielen (vgl. Abschnitt 5.2). Mit Kissen beträgt der korrespondierende Kraftwert 6,98 kN/m, d.h. fast das Doppelte. Infolge der höheren Rohrsteifigkeit fällt die Lasterhöhung im Vergleich zum PVC-Rohr etwas niedriger aus.

Im Bild 43 sind deutlich die Spannungsspitzen infolge der gerippen Rohraußenfläche zu erkennen. Auch hier bildet sich ein kontaktspannungsfreier Sohlbereich aus, welcher über die unterschiedlichen Last- und Verformungsstufen nahezu konstant bleibt. Dies wird auch durch den Abdruck des Rohres auf dem Kissen nach Versuchsende deutlich (Bild 44).

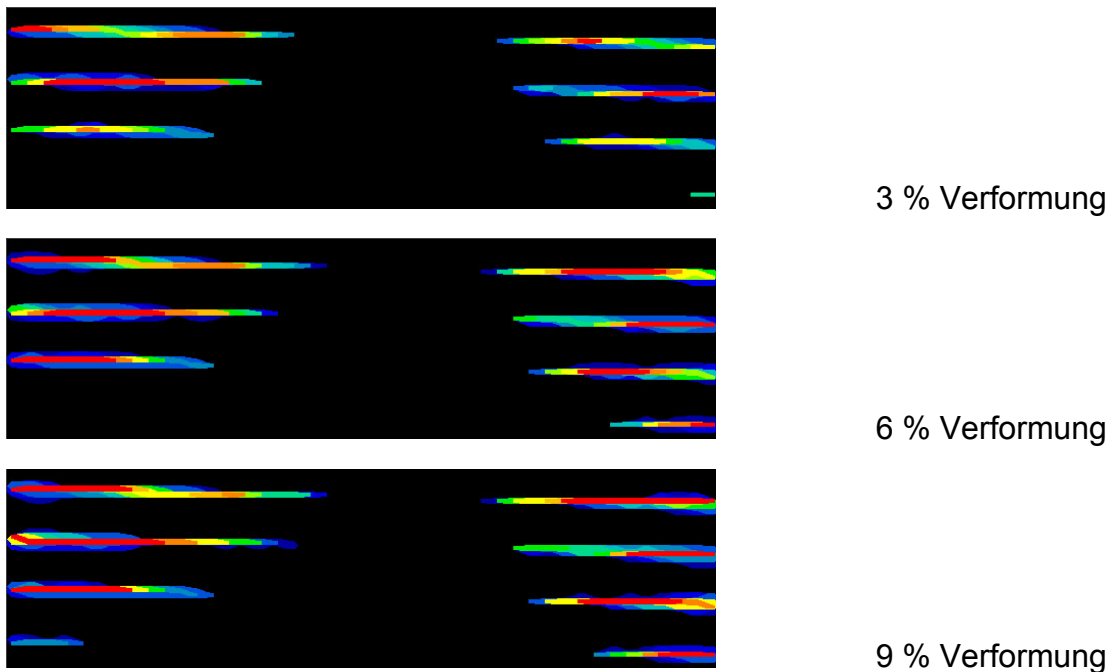


Bild 43 Druckfolienmessung – Ultra-Rib II DN 300 (Einzel)

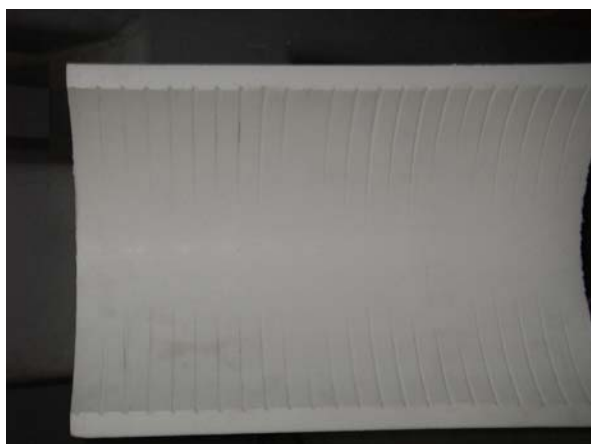


Bild 44 EPS-Bettungskissen nach dem Versuch – Ultra-Rib II, DN 300 (Einzel)

Bild 45 zeigt die Versuchsergebnisse für das Steinzeugrohr. Bei diesem Versuch wurde - abweichend von den Kunststoffrohren - die Last bis zum Bruch gesteigert.

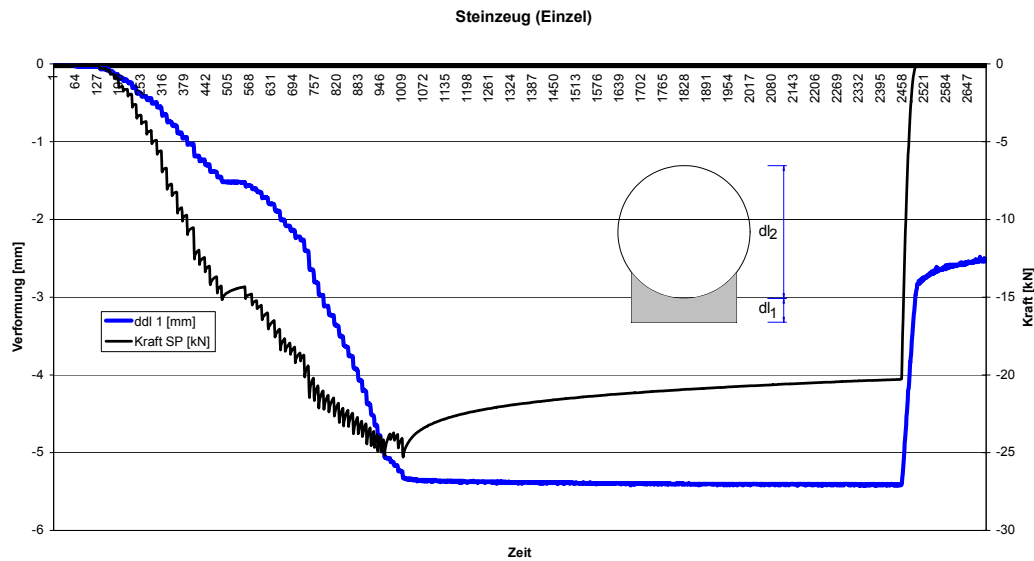
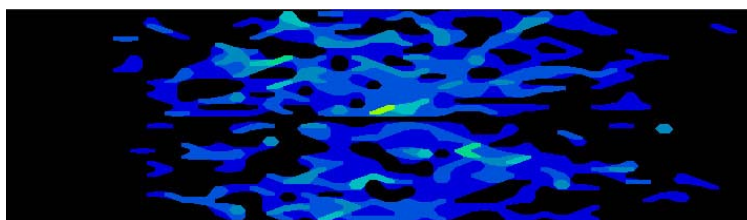
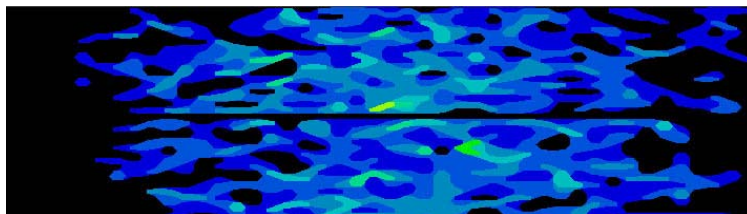


Bild 45 Scheiteldruckversuch Ergebnis Steinzeug DN 300 (Einzel)  
( $ddl_1$  = Änderung  $d_1$ )

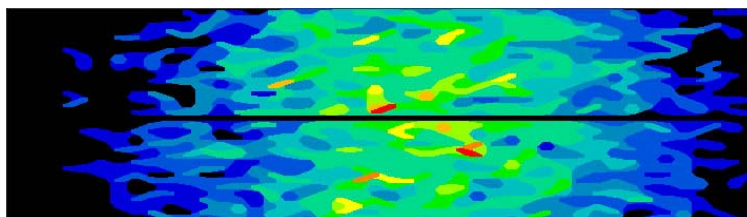
Die Bruchlast von 50 kN/m lag nur unwesentlich über der Scheiteldruckkraft von 48 kN/m. D.h., dass die Bettung in den EPS-Bettungskissen mit einer Lagerung beim Scheiteldruckversuch nach DIN EN 295 [29] vergleichbar ist. Im Bild 46 sind deutlich die gleichmäßigen Kontaktspannungsverteilungen auch bei Laststeigerung zu erkennen. Die Kraft verteilt sich dabei nahezu über das gesamte Bettungskissen. In den Randbereichen sinken die Kissen Spannungen allerdings deutlich ab. Zur Aktivierung des Auflagerwinkels ist offensichtlich eine seitliche Abstützung der Kissen im verdichteten Boden erforderlich.



5 kN Belastung



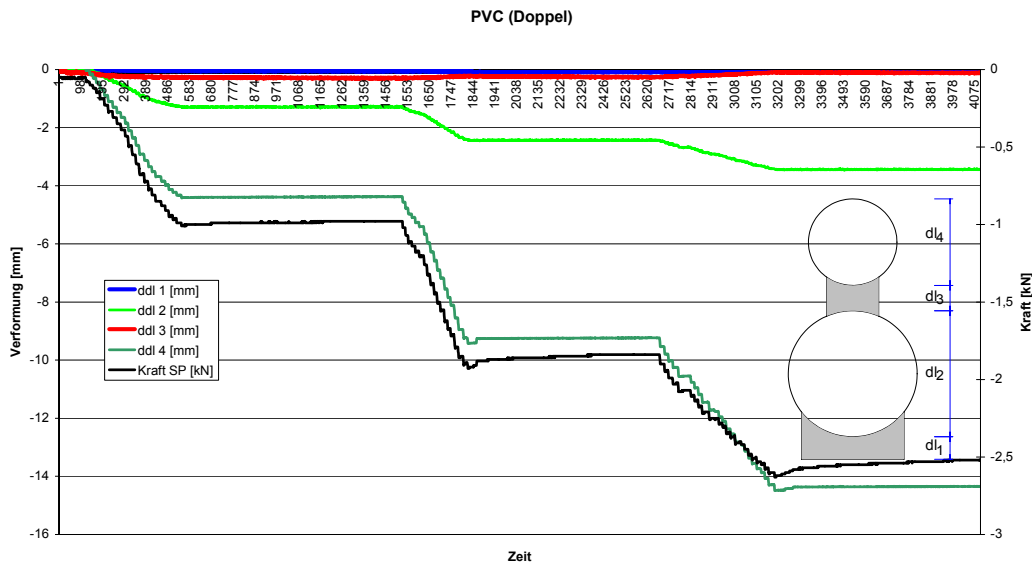
15 kN Belastung



25 kN Belastung

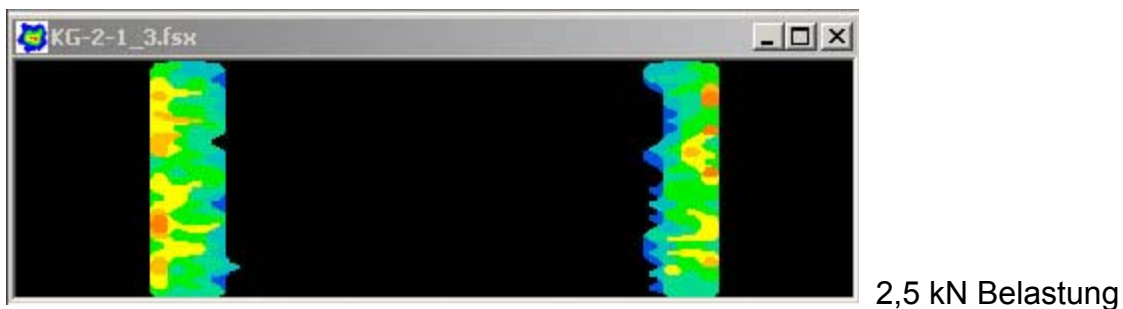
Bild 46 Druckfolienmessung – Steinzeug DN 300 (Einzel)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche mit übereinander angeordneten Rohren (Doppeldecker) ausgewertet. Bild 47 zeigt die Auswertung für den Doppeldecker aus PVC-Rohren. Auch hier konnte, wie beim Einzelrohr, eine Erhöhung der Kraft für eine 3 % Verformung im oberen Rohr (DN 200) um das 2,5-fache gegenüber der Last aus einem PPL-Test festgestellt werden (0,95 kN/m  $\Rightarrow$  2,66 kN/m).



**Bild 47** Scheiteldruckversuch Ergebnis PVC DN 200/DN 300 (Doppel)  
 (ddl1 = Änderung dl1, ddl2 = Änderung dl2, ddl3 = Änderung dl3, ddl4 = Änderung dl4)

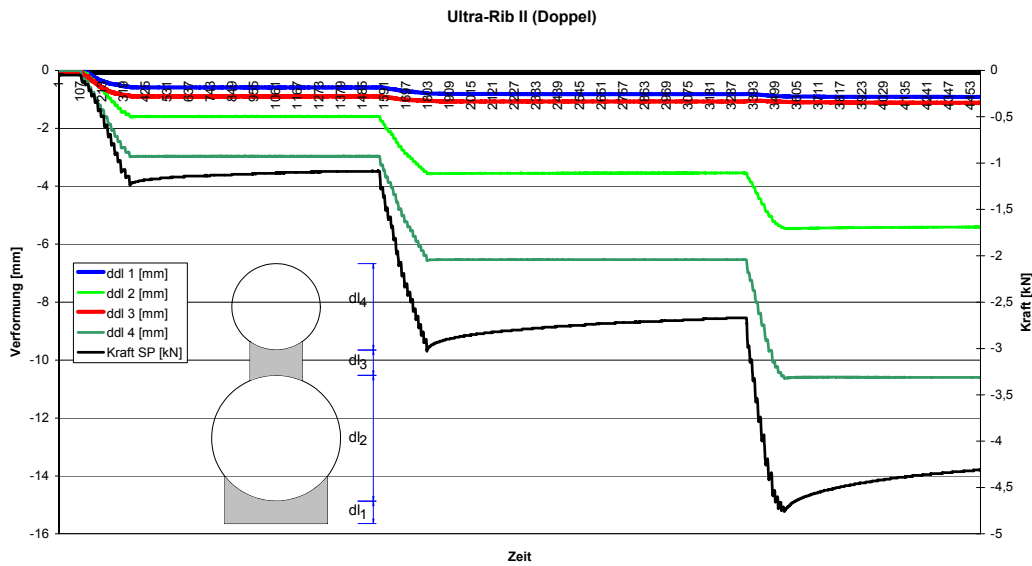
Die Auswertung der Spannungsmessfolien ergab wiederum, dass insbesondere die Randbereiche zur Stützung herangezogen wurden (Bild 48). In den Folien am unteren Rohr lagen die Spannungen unterhalb der messbaren Werte.



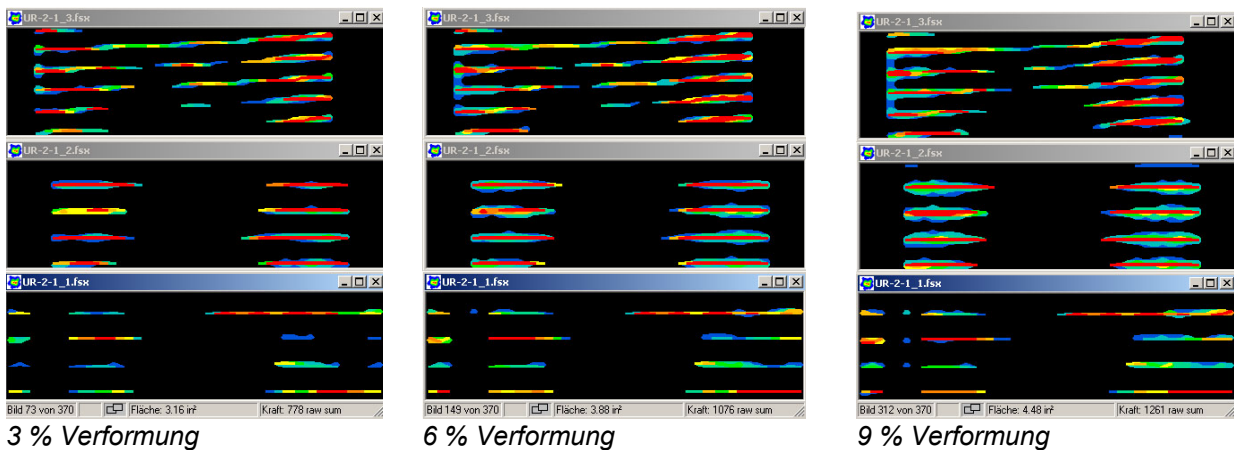
**Bild 48** Druckfolienmessung – PVC DN 200/DN 300 (Oberes Rohr)

Im Bild 49 sind die Ergebnisse der Versuche mit Ultra-Rib II Rohren dargestellt. Wie bei den Versuchen mit dem Einzelrohr, konnte auch hier eine Erhöhung der Scheiteldruckkraft für eine 3 % Verformung am oberen Rohr um fast das Doppelte gemessen werden (2,85 kN/m  $\Rightarrow$  5,46 kN/m). Deutlich waren auch hier die typischen Kontaktspannungsverteilungen zu erkennen (Bild 50).



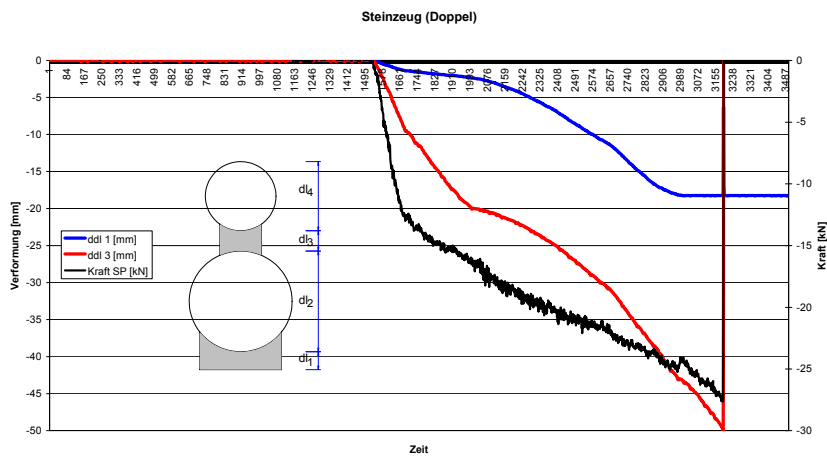


**Bild 49** Scheiteldruckversuch Ergebnis Ultra-Rib II DN 200/DN 300 (Doppel)  
 (ddl1 = Änderung dl1, ddl2 = Änderung dl2, ddl3 = Änderung dl3, ddl4 = Änderung dl4)

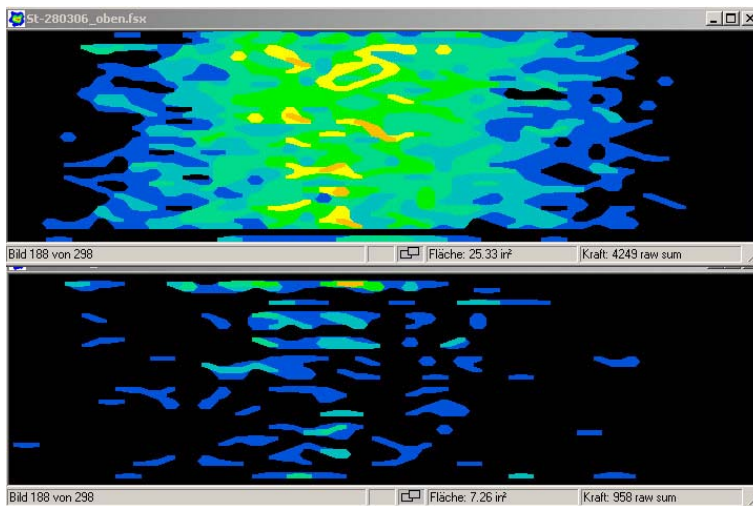


**Bild 50** Druckfolienmessung Ultra-Rib II DN 200/DN 300  
 (v.o. Sohle DN 200, Lasteinleitung DN 300, Sohle DN 300)

Bild 51 zeigt die Versuchsergebnisse der Steinzeug-Doppeldecker. Die Scheiteldruckkraft für das obere Rohr (DN 200) lag bei ca. 50 kN/m und war damit deutlich größer als die erforderliche Last nach DIN EN 295 [29], welche 32 kN/m beträgt. Im Gegensatz zum Einzelversuch DN 300 kam es also zu einer Krafterhöhung bezogen auf die kleinere Nennweite. Auf eine weitergehende Analyse wird hier verzichtet, da in jedem dieser 3 Versuche das Gesamtsystem seitlich aufgrund fehlender Bettung auswich (vgl. Bild 51). Insitu ist jedoch in der Regel von einer ausreichenden Bettung auszugehen.



**Bild 51** Scheiteldruckversuch Ergebnis Steinzeug DN 200/DN 300 (Doppel)  
(ddl1 = Änderung dl1, ddl3 = Änderung dl3)



10 kN Belastung

**Bild 52** Druckfolienmessung Steinzeug DN 200/DN 300  
(v.o. Sohle DN 200, Sohle DN 300)

Zusammenfassend konnten bei allen Rohrwerkstoffen und EPS-Qualitäten Kontaktspannungen über den geometrisch vom Bettungskissen vorgegebenen Auflagerwinkel beobachtet werden. Bei den biegesteifen Rohren war eine Konzentration der Spannungen in der Sohle festzustellen, während es bei den biegeweichen Rohren infolge der Ovalisierung zu einer Entlastung im Sohlbereich und seitlichen Stützung durch das Bettungskissen kam. Im Falle der gerippten Rohre zeigten sich deutlich Spannungsspitzen im Kontaktbereich der Profilrippen.

## 5.4 Sandkastenversuche

### 5.4.1 Zielstellung und Vorgehensweise

Ziel dieser Untersuchungen war zum einen die Ermittlung der Belastung des Systems unter extremen In-situ-Bedingungen, wie beispielsweise einer geringen Verdichtung der Leitungszone. Hier sollten unterschiedliche Kombinationen von Kissen und Rohren untersucht werden. Zum anderen sollten für die unterschiedlichen Systemkonstellationen die Horizontalverschiebungen durch Bodeneinbau und –verdichtung in der Leitungszone beobachtet und bewertet werden.

Es wurde ein Versuchsstand mit den Abmessungen  $B \times H \times L = 2,0 \times 1,6 \times 4,3$  m eingesetzt. Vor Versuchsbeginn wurde in diesen Versuchsstand ein Flüssigboden eingebracht, um den anstehenden Boden realitätsnah zu simulieren. Unter Verwendung einer gegen Auftrieb gesicherten Schalung wurde dabei ein Rohrgraben nach den Anforderungen der DIN EN 1610 [6] für die Nennweite DN 300 erzeugt. Der Rohrgraben hatte die Abmessungen  $B \times H \times L = 800 \times 1000 \times 4300$  mm (Bild 53).



*Bild 53: Versuchsstand mit eingebautem Flüssigboden und Rohrgraben*

In diesen vorbereiteten Versuchsgraben wurden dann unterschiedliche Rohr-Kissen-Kombinationen in zwei Abschnitten eingebaut. Zur Grabenverfüllung wurde ein Kies-Sand-Gemisch 0-8 verwendet. Im Rahmen der Belastungsversuche wurden nach dem Einbau Lastplatten auf der Bodenoberkante positioniert und über einen Lastverteilungs-träger Kräfte in beide Abschnitte eingeleitet (Bild 54).

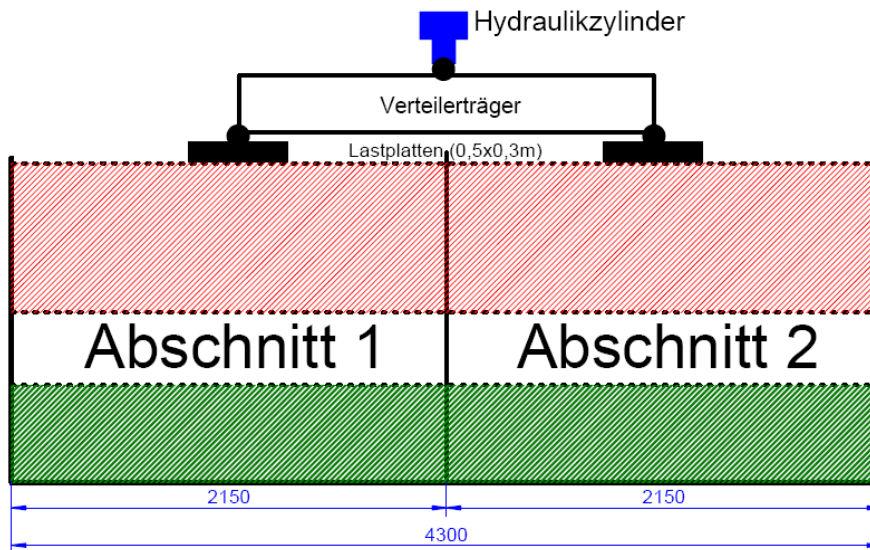


Bild 54 Versuchsaufbau - Längsschnitt

Neben der Verlegung eines einzelnen Rohres sollte auch das Verlegen von Rohren übereinander mit den EPS-Bettungskissen in den einzelnen Abschnitten realisiert werden (Bild 55).

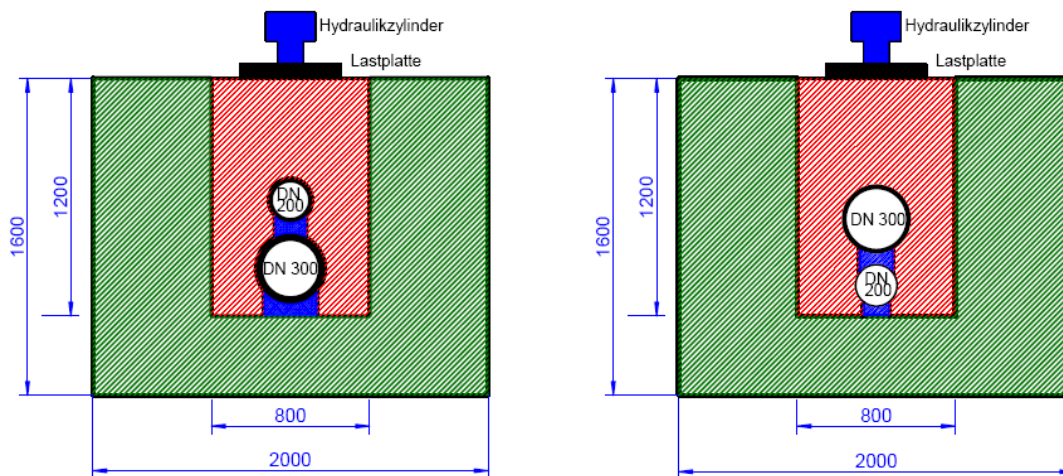


Bild 55 Versuchsaufbau – Querschnitt, Variationsmöglichkeiten

### 5.4.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Bei der ersten Versuchsreihe wurde lediglich ein Rohr eingebaut, während bei der zweiten Versuchsreihe zwei Rohre übereinander angeordnet wurden. Die Randbedingungen der Versuche sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



Tabelle 5: Randbedingungen der Sandkastenversuche

| Versuch Nr.                          | Abschnitt 1   | Abschnitt 2   |
|--------------------------------------|---|---|
| 1.1 gute Verdichtung (ohne Auflast)  | DN 300 Steinzeug                                    | DN 300 Ultra-Rib II                                 |
| 1.2 mäßige Verdichtung (mit Auflast) | DN 300 Steinzeug                                    | DN 300 Ultra-Rib II                                 |
| 2.1 gute Verdichtung (ohne Auflast)  | DN 300 U-Plus (Unten)<br>DN 200 Ultra-Rib II (Oben) | DN 200 Ultra-Rib II (Unten)<br>DN 300 U-Plus (Oben) |
| 2.2 mäßige Verdichtung (mit Auflast) | DN 300 U-Plus (Unten)<br>DN 200 Ultra-Rib II (Oben) | DN 200 Ultra-Rib II (Unten)<br>DN 300 U-Plus (Oben) |

**Versuchsreihe 1 (Versuche Nr. 1.1 und 1.2)**

Nach dem Auslegen der EPS-Bettungskissen wurden im Abschnitt 1 ein Steinzeugrohr DN 300 und im Abschnitt 2 ein Ultra-Rib II DN 300 Rohr verlegt (Bild 56).



**Bild 56** Einlagiger Rohrstrang auf EPS-Kissen mit Druckmessfolieneinsatz, Abschnitt 1 Steinzeug und Abschnitt 2 UltraRib II

Anschließend wurde rechts und links des Rohres die erste Bettungsschicht, bestehend aus einem Kies- Sand-Gemisch der Körnung 0/8, manuell eingebracht. Die Schichthöhe betrug dabei im unverdichteten Zustand maximal 30 cm (Bild 57a).



a) Eingebaute Bettungsschicht



b) Rammsondierung

**Bild 57 Rohrbettung und Verdichtungskontrolle**

Bei dem Versuch 1.1 wurde eine gute Verdichtung der Bettungsschichten angestrebt und es wurde nach den Verfüllarbeiten keine Oberflächenlast aufgebracht da hier lediglich die resultierenden Horizontalverschiebungen ermittelt werden sollten. Die Verdichtung erfolgte in den einzelnen Schichten nach DIN EN 1610 [6] mit einem leichten Verdichtungsgerät (Vibrationsstamper, Gewicht ~ 25kg). Für eine gute Verdichtung waren dabei jeweils 3 Übergänge nötig. Der Verdichtungsgrad wurde anschließend mit einer Rammsondierung an vier unterschiedlichen Punkten entlang des Rohrstranges überprüft (Bild 57b).

Bei dem Versuch 1.2 (nach Tabelle 5) wurde eine mäßige Verdichtung der Bettungsschichten angestrebt, d.h. es fand jeweils nur ein Verdichtungsübergang statt. Auch hier wurde der erzielte Verdichtungsgrad durch eine Rammsondierung überprüft. Nach dem Verfüllen des Bodens bis zur Oberkante des Rohrgrabens und einer flächenhaften Verdichtung wurde eine Oberflächenlast aufgebracht. Die Belastung wurde kontinuierlich kraftgeregelt bis zu einer Maximallast von 400 kN gesteigert. Der Einfluss der Belastung wurde mittels Druckmessfolien zwischen Kissen und Rohr als Bettungsdruck aufgezeichnet. In den biegeweichen Rohren wurde die Deformation über Wegaufnehmer im Rohr gemessen. Für die Erfassung der auftretenden Spannungen in der Rohrwand wurden Dehnungsmessstreifen in den Rohren appliziert. Beim Aufbringen der Oberflächenlast (Bild 58) zeigte sich, dass die Oberflächenverdichtung mit dem leichten Verdichter unzureichend war. Der Hydraulikzylinder musste ganz ausgefahren werden, weil die Lasteinleitungsplatten auf der Bodenoberfläche zu tief in den Boden eingedrückt wurden. Aus diesem Grund musste der Versuch zunächst abgebrochen und die Oberfläche nachverdichtet werden.





*Bild 58 Einleitung der Oberflächenlast bis 400 kN*

### **Versuchsreihe 2 (Versuche Nr. 2.1 und 2.2)**

Die Versuche 2.1 und 2.2 unterscheiden sich von den Versuchen 1.1 und 1.2 durch den zweilagigen Aufbau des Rohrstrangs. Die Versuchsdurchführung erfolgte hierbei analog zu den Versuchen 1.1 und 1.2 (Tabelle 5). Auch hier wurde die Bodenoberfläche vor dem Belastungsversuch 2.1 (Tabelle 5) nachverdichtet.



*a) Ansicht*

*Bild 59 Zweilagiger Rohraufbau*



*b) Abschnitt 1 und Abschnitt 2 im Versuchsstand*

### **Lagevermessung**

Nach dem Einlegen und Ausrichten des Rohrstrangs im Versuchsstand wurde zunächst die Nulllage der Rohre gemessen, um eine Bezugsgröße für die nachfolgenden Lagevermessungen gegenüber der Ausgangslage zu erhalten. Der anschließende Bodeneinbau wurde bei allen Versuchen schichtweise entsprechend DIN EN 1610 [6] durchgeführt. Um die horizontale Lageänderung infolge Bodeneinbau und Verdichtungsarbei-

ten messen zu können, wurde jeweils nach dem Einbringen der Bodenschicht und nach jeder seitlichen Bodenverdichtung eine Lagevermessung durchgeführt. Für die Messungen wurde ein Nivelliergerät verwendet, mit dem an festgelegten Punkten im Rohr eine Zieltafel mit Millimeterskalierung anvisiert wurde (Bild 60). Durch diese Vermessung konnte die Lageänderung des gesamten Rohrstrangs überprüft werden, indem das Messergebnis zu der zuvor gemessenen Nulllage in Relation gesetzt wurde. Die Messwerte waren bei dieser Vorgehensweise auf  $\pm 1,0$  mm reproduzierbar. Die Ergebnisse wurden anschließend für jeden Untersuchungsschritt graphisch dargestellt.



a) Nivelliergerät auf Rohrachshöhe  
Bild 60 Rohrvermessung



b) Zieltafel im Rohr

Das gesamte Versuchsprogramm für die beiden Versuchsreihen ist in Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 6: Versuchsprogramm für einlagigen Rohrstrang (Versuchsreihe 1)**

| <b>Versuchsdurchführung</b>   | <b>Versuch 1.1 (Tabelle 5),<br/>gute Verdichtung</b> | <b>Versuch 1.2 (Tabelle 5),<br/>mäßige Verdichtung</b> |
|---|--|--|
| ohne Bettung,<br>(Nullmessung)  | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| beidseitig locker einge-<br>brachte Bettung<br>bis 30 cm, unverdichtet                | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| einseitig verdichtete Bet-<br>tung  | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| beidseitig verdichtete Bet-<br>tung   | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| zweite Bettungsschicht,<br>beidseitig verdichtet                                      | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Bettung bis 30 cm über<br>Rohrscheitel,<br>beidseitig verdichtet                      | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Rammsondierung  | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Boden bis OK- Flüssig-<br>boden, unbelastet,<br>(Nullmessung)                         | --   | <b>X</b>   |
| Belastung, Boden<br>schlecht verdichtet, Hyd-<br>raulik bis zum Ende aus-<br>gefahren | --   | <b>X</b>   |
| Nachverdichtung der<br>Oberfläche   | --   | <b>X</b>   |
| Belastung bis 400 kN  | --   | <b>X</b>   |

**Tabelle 7: Versuchsprogramm für zweilagigen Rohrstrang (Versuchsreihe 2)**

| <b>Versuchsdurchführung</b>   | <b>Versuch 2.1 (Tabelle 5),<br/>gute Verdichtung</b> | <b>Versuch 2.2 (Tabelle 5),<br/>mäßige Verdichtung</b> |
|---|--|--|
| Lage unten ausgerichtet,<br>ohne Bettung,<br>(Nullmessung)  | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Lage unten, untere Bo-<br>denschicht (30 cm) beid-<br>seitig eingebracht,<br>einseitig verdichtet | <b>X</b>   | --   |
| Lage unten, untere Bo-<br>denschicht (30 cm)<br>beidseitig verdichtet                             | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Lage unten, Boden bis<br>Scheitel,<br>beidseitig verdichtet                                       | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Lage oben ausgerichtet,<br>(Nullmessung)  | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Lage oben, Boden bis<br>Scheitel,<br>einseitig verdichtet   | <b>X</b>   | --   |
| Lage oben, Boden bis<br>Scheitel,<br>beidseitig verdichtet  | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Lage oben, Boden bis 30<br>cm über Scheitel,<br>flächig verdichtet                                | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Lage unten, Boden bis 30<br>cm über Scheitel obere<br>Lage, flächig verdichtet                    | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Rammsondierung  | <b>X</b>   | <b>X</b>   |
| Lage unten, Auffüllen und<br>Verdichten bis OK-<br>Flüssigboden,<br>Belastung bis 400 kN          | --   | <b>X</b>   |
| Lage oben, Auffüllen und<br>Verdichten bis OK-<br>Flüssigboden,<br>Belastung 400 kN               | --   | <b>X</b>   |

### 5.4.3 Versuchsergebnisse

#### 5.4.3.1 Lagevermessung

In der Tabelle 8 sind die Maximalverschiebungswerte für die Versuche 1.1 und 1.2 während des Einbauzustandes zusammengefasst und vergleichend gegenübergestellt. Alle gemessenen Verschiebungen lagen unter 10 mm. Beim Steinzeugrohr wurden während des Einbaus bei guter Verdichtung in der unteren Bettungsschicht geringere Verschiebungen gemessen als bei einer mäßigen Verdichtung. Beim Kunststoffrohr zeigten sich bei guter Verdichtung größere Verschiebungen. Aufgrund der insgesamt sehr geringen Verschiebungen ist jedoch eher von zufälligen Effekten als von Gesetzmäßigkeiten auszugehen.

Tabelle 8: Maximale Horizontalverschiebungen Versuch 1.1 / 1.2

| Versuch 1.1 / 1.2 (gem. Tabelle 5) Horizontalverschiebungen [mm]  |                  |                    |                     |                    |
|---|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Rohrstrang  | Abschnitt 1      |                    | Abschnitt 2         |                    |
|   | DN 300 Steinzeug |                    | DN 300 Ultra Rib II |                    |
| Versuchsschritte  | gute Verdichtung | mäßige Verdichtung | gute Verdichtung    | mäßige Verdichtung |
| Verschiebungen durch beidseitig eingebrachte Bettung bis 30 cm, unverdichtet                                  | -0,5             | -2,5               | +1,0                | -0,5               |
| Verschiebungen durch beidseitig eingebrachte Bettung bis 30 cm, rechts verdichtet                             | +0,5             | -10,0              | -4,0                | -2,0               |
| Verschiebungen durch beidseitig eingebrachte Bettung bis 30 cm, beidseitig verdichtet                         | +1,0             | -1,0               | +3,0                | +1,5               |
| Verschiebungen durch beidseitig eingebrachte zweite Bettungsschicht (bis Rohrscheitel), beidseitig verdichtet | +1,5             | -0,5               | +2,0                | -1,0               |
| Verschiebungen durch Bettung bis 30 cm über Rohrscheitel, flächig verdichtet                                  | +3,0             | +1,0               | +2,5                | +1,0               |
| Gesamtverschiebungen gegenüber der Ausgangslage durch Bodeneinbau bis 30 cm über Rohrscheitel und verdichten  | +9,0             | -9,0               | +4,0                | -2,0               |

In Tabelle 9 sind die Maximalverschiebungswerte für die Versuche 2.1 und 2.2 während des Einbauzustandes zusammengefasst und vergleichend gegenübergestellt. Bei dem zweilagigen Rohrstrang wirkte sich der Einfluss einer mäßigen Verdichtung nachteilig auf die Horizontalverschiebungen des oberen Rohrstrangs aus, dabei war es ohne Bedeutung ob es sich bei dem Querschnitt im oberen Rohrstrang um ein DN 300 U-Plus oder DN 200 Ultra Rib II handelte. Bei den Verschiebungen im unteren Rohrstrang wirkte sich der Unterschied zwischen guter und mäßiger Verdichtung kaum aus, auch hier war die Größe des Querschnitts von nachrangiger Bedeutung. Dieser Zusammenhang

wurde durch die Betrachtung der resultierenden Gesamtverschiebungen für die obere bzw. untere Lage bestätigt.

*Tabelle 9: Maximale Horizontalverschiebungen Versuch 2.1 / 2.2*

| <b>Versuch 2.1 / 2.2 (gem. Tabelle 5) Horizontalverschiebungen [mm]</b>                            |            |                            |                           |                            |                           |
|--|------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| <b>Rohrstrang</b>  |            | <b>Abschnitt 1</b>         |                           | <b>Abschnitt 2</b>         |                           |
| <b>Lage unten</b>  |            | <b>DN 300 U-Plus</b>       |                           | <b>DN 200 Ultra Rib II</b> |                           |
| <b>Lage oben</b>   |            | <b>DN 200 Ultra Rib II</b> |                           | <b>DN 300 U-Plus</b>       |                           |
| <b>Versuchsschritte</b>  |            | <b>gute Verdichtung</b>    | <b>mäßige Verdichtung</b> | <b>gute Verdichtung</b>    | <b>mäßige Verdichtung</b> |
| Verschiebungen Lage unten, untere Bodenschicht (30 cm) beidseitig verdichtet                       |            | +2,0                       | +1,7                      | +1,0                       | -1,3                      |
| Verschiebungen Lage unten, Boden bis Scheitel der unteren Lage, beidseitig verdichtet              |            | -1,3                       | +2,0                      | -2,0                       | +0,3                      |
| Verschiebungen Boden bis Scheitel der oberen Lage, beidseitig verdichtet                           | Lage unten | -1,0                       | 2,0                       | -2,0                       | 0,7                       |
|  | Lage oben  | -1,5                       | +4,5                      | +2,5                       | +4,0                      |
| Verschiebungen Boden bis 30 cm über Rohrscheitel der oberen Lage, flächig verdichtet               | Lage unten | -2,3                       | -2,0                      | -2,0                       | 0,0                       |
|  | Lage oben  | -0,5                       | +1,5                      | -2,0                       | -2,5                      |
| Gesamtverschiebungen gegenüber der Ausgangslage, Boden bis 30 cm über Rohrscheitel der oberen Lage | Lage unten | -3,0                       | +3,0                      | -2,5                       | -1,0                      |
|  | Lage oben  | -1,0                       | +3,7                      | +1,0                       | +3,5                      |

Zusammenfassend bleibt festhalten, dass die Absolutwerte der Verschiebungen sowohl bei Einzelrohrverlegung als auch Verlegung in zwei Lagen übereinander mit Werten vergleichbar sind, die auch im Rahmen eines Forschungsvorhabens der RWTH-Aachen [30] an Kunststoffrohren DN 300 in Sandbettung ermittelt wurden.

#### **5.4.3.2 Belastungsversuche**

Nach dem Einbau der Rohre, dem Verfüllen des Rohrgrabens und dem Abschluss der Messungen der horizontalen Rohrverschiebungen wurden die Lastplatten auf der Bodenoberkante platziert und anschließend über den Hydraulikzylinder Kräfte auf der Bodenoberkante aufgebracht, die größere Tiefenlagen bzw. Verkehrsbelastungen statisch simulierten (Bild 58). Die Verformungen der biegeweichen Rohre und die Dehnungen der biegesteifen und biegeweichen Rohre während der Versuchsdurchführung wurden



messtechnisch erfasst. Die Randbedingungen der Belastungsversuche sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10 Belastungsversuche, Auszug aus Tabelle 5

| Versuch Nr. | Abschnitt 1   | Abschnitt 2   |
|-------------|---|---|
| 1.2         | DN 300 Steinzeug                                    | DN 300 Ultra-Rib II                                 |
| 2.2         | DN 300 U-Plus (Unten)<br>DN 200 Ultra-Rib II (Oben) | DN 200 Ultra-Rib II (Unten)<br>DN 300 U-Plus (Oben) |

Beim Versuch Nr. 1.2 lag eine Überdeckungshöhe von 0,8 m vor. Bei dieser Überdeckung und einer angenommenen Verkehrsbelastung durch einen SLW60 muss bei einer Größe der Lasteinleitungsplatte von 0,3 x 0,5 m eine Pressenkraft von ca. 400kN eingeleitet werden, um eine vergleichbare vertikale Bodenspannung direkt über dem Rohr zu erzielen (s.a. [11]). Daher wird bei beiden Versuchen eine Pressenkraft von 400 kN aufgebracht.

Zunächst wird auf die Ergebnisse des einlagigen Versuchs Nr. 1.2 eingegangen. Bild 61 zeigt die im Verhältnis zur aufgebrachten Kraft zunehmende Verformung des Kunststoffrohres. Im Maximum wurden etwa 1 % des Nenndurchmessers gemessen. Eine Vergleichsrechnung zu diesem Versuch mit der FE-Methode ergab Verformungen von etwa 2 % (vgl. Abschnitt 8.5).

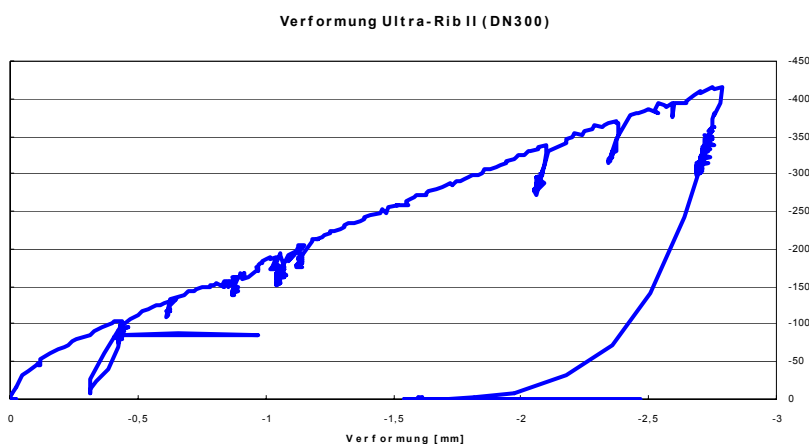


Bild 61 Versuch Nr. 1.2 – Rohrverformung Ultra-Rib II (DN 300)

Bild 62 zeigt die Messwerte der Dehnungsmessstreifen in Scheitel, Kämpfer und Sohle des Kunststoffrohres. Deutlich ist die gleichmäßige Stauchung an den Innenseiten der beiden Rohrkämpfer zu erkennen. Im Maximum lagen die Stauchungen bei -0,39%, während die Dehnungen maximal +0,24% betragen. Die o.a. Vergleichsrechnung nach der FE-Methode zeigte mit -0,64% und +0,19% gute Übereinstimmungen mit den

Messergebnissen (vgl. Abschnitt 8.5, Tabelle 21). Eine Berechnung der EPS-Bettungskissen scheint also mit dieser Methode möglich zu sein.

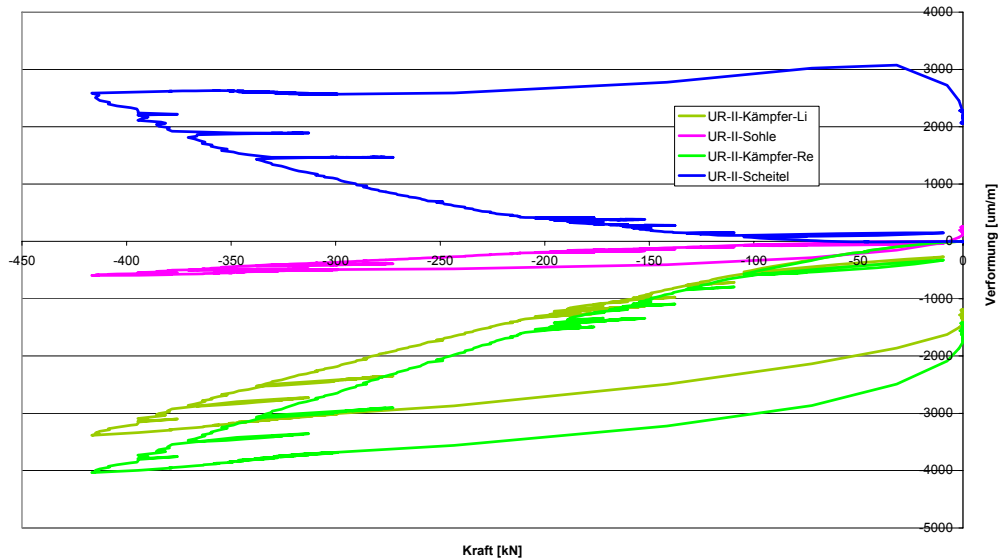


Bild 62 Versuch Nr. 1.2 – Dehnungen Ultra-Rib II (DN 300)

Unter Berücksichtigung eines Kurzzeit E-Moduls für PP von  $1250 \text{ N/mm}^2$  (nach [11]), ergibt sich eine maximale Spannung von  $5 \text{ N/mm}^2$ . Diese liegt im Bereich der berechneten Rohrspannungen für den entsprechenden Einbaufall (vgl. Abschnitt 8.5, Tabelle 14).

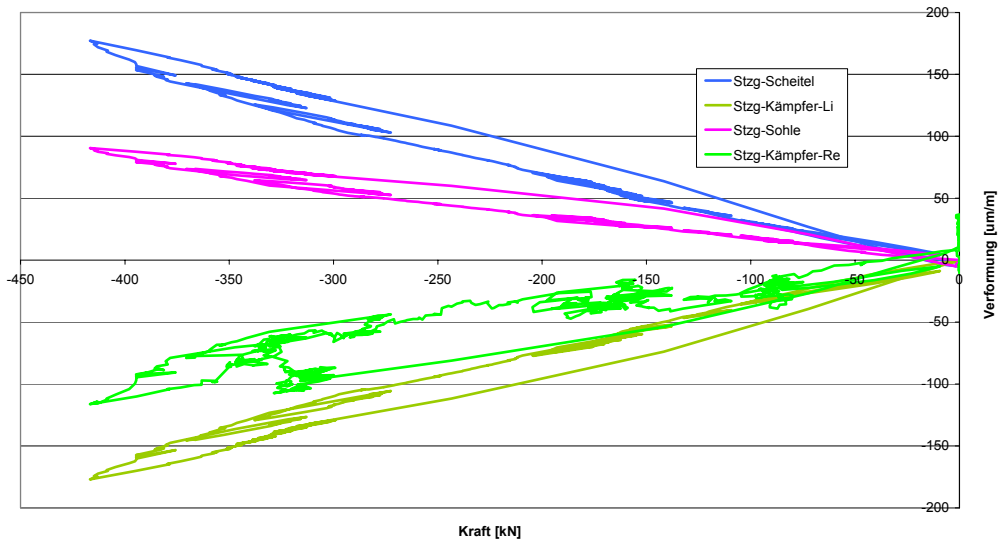


Bild 63 Versuch Nr. 1.2 – Dehnungen Steinzeug (DN 300)

Die im Steinzeugrohr gemessenen Dehnungen sind im Bild 63 dargestellt. Mit einem Elastizitätsmodul für Steinzeug von  $50000 \text{ N/mm}^2$  und einer zulässigen Spannung von  $15\text{-}40 \text{ N/mm}^2$  (nach [11]) ergibt sich eine maximale Spannung von  $\pm 10 \text{ N/mm}^2$ . Da diese Rohr-Kissen Kombination nicht mit der FE-Methode nachgerechnet wurde, können

diese Werte lediglich mit den Berechnungsergebnissen für einen Normeinbau mit 0,5 m Überdeckungshöhe verglichen werden. Erwartungsgemäß liegen die gemessenen Werte aufgrund der fehlenden Verdichtung der Seitenverfüllung über den berechneten Werten für den Normeinbau (vgl. Abschnitt 8.5, Tabelle 14). Jedoch liegt die gemessene Rohrspannung unterhalb des unteren zulässigen Spannungswertes.

Beim Versuch mit den übereinander angeordneten Kunststoffrohren der Nennweiten DN 200 und DN 300 wurden die Durchmesseränderungen nach Bild 64 gemessen. Deutlich zeigte sich, dass das jeweils oben liegende Rohr das untere Rohr von der Belastung abschirmt. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei dem oben liegenden Kunststoffrohr DN 300. Die Verformungen der oberen Rohre lagen bei beiden Nennweiten bei etwa 1,5 %

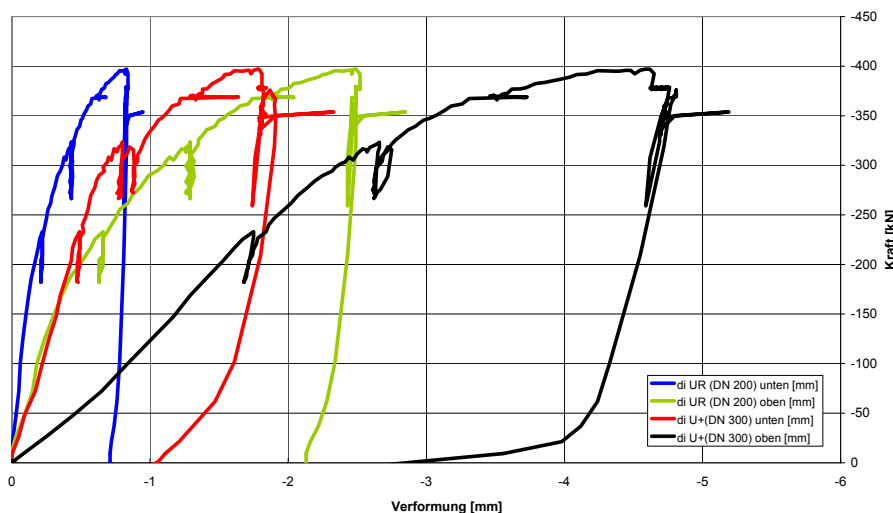


Bild 64 Versuch Nr. 2.2 – Rohrverformungen Kunststoffrohre

Dehnungen von bis zu 4000  $\mu\text{m}/\text{m}$  im oberen Rohr haben mit einem E-Modul für PP von  $1250 \text{ N}/\text{mm}^2$  (nach [11]) Spannungen von etwa  $6 \text{ N}/\text{mm}^2$  zur Folge. Diese liegen deutlich über den im Abschnitt 8.4.2 berechneten Werten für den Normeinbau ( $2,87 \text{ N}/\text{mm}^2$ ). Beim Einbau der Rohre übereinander scheint sich also eine schlechte Verdichtung der Leitungszone negativer auf die Rohrbelastung auszuwirken als beim normalen Einbau, wo vergleichbare Spannungen bei schlechter Verdichtung und Normeinbau ermittelt wurden.

## 5.5 Fazit

Zunächst wurden Druckversuche an würfelförmigen Proben unterschiedlicher EPS-Qualitäten durchgeführt, um deren Eigenschaften im Kurzzeitversuch zu quantifizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass - ausgehend von der reinen Druckbelastung - für den vorliegenden Anwendungsfall mindestens ein EPS 35 aufgrund des Druck-Verformungsverhaltens verwendet werden sollte.

Zur weiterführenden Analyse wurden Langzeitversuche mit einer Dauer von 10 Monaten durchgeführt. Hier wurden Komplettsysteme aus Rohren und Bettungskissen unterschiedlicher Werkstoffe bzw. Qualitäten untersucht. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die untersuchten Systeme unter den aufgetragenen Belastungen keine sichtbaren Schädigungen an den Kissen davongetragen haben. Ein Zugversagen oder auffällige Deformationen konnten nicht festgestellt werden. Lediglich bei den gerippten Rohren konnten im Kämpferbereich punktuell geringfügige Eindrückungen ( $< 1$  mm) beobachtet werden.

Außerdem wurden Kurzzeit-Scheiteldruckversuche an einzelnen und übereinander angeordneten Rohren durchgeführt. Hierbei wurden wiederum Rohrwerkstoffe, EPS-Qualitäten und Belastungen variiert. Zusammenfassend konnten bei allen Rohrwerkstoffen und EPS-Qualitäten Kontaktspannungen über den geometrisch vom Bettungskissen vorgegebenen Auflagerwinkel beobachtet werden. Bei den biegesteifen Rohren war eine Konzentration der Spannungen in der Sohle festzustellen, während es bei den biegeweichen Rohren infolge der Ovalisierung zu einer Entlastung im Sohlbereich und einer Erhöhung der Spannungen im Randbereich kam. Im Falle gerippter Rohre zeigten sich deutlich Spannungsspitzen im Kontaktbereich der Profilrippen.

Schließlich wurden Versuche im Maßstab 1:1 mit Sandbettung durchgeführt. Die Rohre wurden derart eingebaut, dass zunächst auf beiden Seiten die Seitenverfüllung eingebracht und erst dann verdichtet wurde. Hierbei wurde der Boden bei einer Versuchsreihe normal nach DIN EN 1610 [6] verdichtet und bei einer zweiten Serie lediglich locker eingefüllt und nur einen halben Meter über dem Rohr verdichtet. Im Anschluss wurden auftretende Horizontalverschiebungen bis zur vollständigen Verfüllung des Rohrgrabens gemessen. Sowohl die Verdichtung in der Leitungszone als auch die unterschiedlichen Rohr-Kissen-Systeme hatten nur einen geringen Einfluss auf die horizontale Lagegenauigkeit der Rohre, welche auch bei der Verwendung des Kissensystems in üblichen Bereichen lag.

Nach dem Einbau der Lastplatten auf der Bodenoberkante wurden über den Hydraulikzylinder Kräfte aufgebracht, die größere Tiefenlagen bzw. Verkehrsbelastungen statisch simulierten. Die Verformungen der biegeweichen Rohre und die Dehnungen der biegesteifen Rohre während der Versuchsdurchführung wurden messtechnisch erfasst. Trotz schlechter Verdichtung im Versuch zeigten sich bei Einzelrohrverlegung lediglich Beanspruchungen wie in den FEM-Berechnungen nach Abschnitt 8 bei angenommener guter Verdichtung. Beim Einbau der Rohre übereinander liegen die Vergleichswerte aus FEM-Berechnung bei guter Verdichtung demgegenüber deutlich unter den gemessenen Werten bei schlechter Verdichtung.

## 6 Baumaßnahmen

### 6.1 Hintergrund

Um die Eignung von EPS-Bettungskissen zur Rohrbettung bei der Verlegung von Abwasserrohren zu untersuchen wurde der Einsatz dieser Kissen unter In-situ-Bedingungen auf der Baustelle als Ergänzung zu den Laborversuchen begleitet.

Auf unterschiedlichen Baustellen wurden im Rahmen dieses Vorhabens die Vorgehensweise bei der Verlegung von Kanalsystemen mit EPS-Kissen erfasst und das Handling der EPS-Kissen insitu beobachtet und bewertet. Folgende Baustellen zu Neu- baumaßnahmen mit Einsatz von EPS-Bettungskissen wurden im Laufe der Projektbe- arbeitung begleitet:

- Bielefeld - Altenhagen
- Rödinghausen - In der Flage
- Rheda-Wiedenbrück - Hans-Schmitz-Straße
- Borgholzhausen- Bienenfeld
- Rödinghausen – Heidestraße

Nachfolgend werden die auf diesen Baustellen gewonnenen Erkenntnisse zu Lagerung, Einbau, Handling und Rohraustausch zusammengefasst.

### 6.2 Einbau

#### 6.2.1 Transport und Lagerung

Die EPS-Kissen wurden zu größeren Blöcken gebündelt und auf handelsüblichen Euro-Paletten auf die Baustellen angeliefert (vgl. Bild 65). Aufgrund des geringen Eigenge- wichtes von expandiertem Polystyrol sind die Bettungskissen leicht und die Paletten daher mit auf der Baustelle üblicherweise vorhandenem Gerät, wie Radlader, Bagger o.ä. zu heben bzw. zu transportieren. Bei Anlieferung waren die EPS-Kissen durch eine Kunststoffolie gegen unmittelbaren Witterungseinfluss geschützt. Die Paletten mit den Bettungskissen bzw. die einzelnen Bettungskissen wurden auf der jeweiligen Baustelle im Freien gelagert.





*Bild 65 Lagerung von EPS-Bettungskissen auf der Baustelle*

Bei längerer Lagerung der EPS-Kissen mit unmittelbarem Witterungseinfluss durch Sonneneinstrahlung, Kälte, Hitze, Niederschlag o.ä. sind mögliche Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit und die Beständigkeit des Materials durch Alterungserscheinungen (vgl. Abschnitt 7) zu beachten.

### **6.2.2 Bodenaushub**

Im Vergleich zur Ausführung einer üblichen Baugrube für die Verlegung von Schmutz- und Regenwasserkanälen nebeneinander im Trennsystem kann für den Einbau der Rohre übereinander unter Einsatz von EPS-Bettungskissen im „Doppeldeckersystem“ eine wesentlich schmalere Baugrube genutzt werden. Hierdurch kann die Menge des zu bewegenden Bodens und somit der Zeit- und Kostenaufwand für den Bodenaushub erheblich reduziert werden (vgl. Abschnitt 3). Das Ausheben der Baugruben wurde wie allgemein üblich mit Hilfe von Baggern durchgeführt. In Abhängigkeit von der Tiefe der Baugrube wurden die Grabenwände gegebenenfalls durch Verbauelemente gesichert (vgl. Bild 66).



a) mit Baugrubensicherung



b) ohne Baugrubensicherung

Bild 66 Baugrube zur Verlegung von Rohren mit EPS-Bettungskissen

### 6.2.3 Handling und Einbau

Durch ihr geringes Eigengewicht sind die EPS-Bettungskissen auf der Baustelle leicht handhabbar. Der Transport zur und das Einbringen der Kissen in die Baugrube konnte ohne den Einsatz von Hub- und Transportgeräten von Hand bewerkstelligt werden (vgl. Bild 67). Das Ablängen der Kissen war mit einer handelsüblichen Handsäge schnell und einfach möglich (vgl. Bild 68). Die Kissen konnte mit geringem Aufwand von einem einzelnen Arbeiter von Hand verlegt werden (vgl. Bild 69). Als besonders vorteilhaft erwies sich der Einbau von EPS-Bettungskissen in Kombination mit Kunststoffrohren. Wie die Kissen konnten die Kunststoffrohre ebenfalls von Hand in die Baugrube eingebracht und verlegt werden (vgl. Bild 70).





*Bild 67 Transport und Einbringen der EPS-Kissen in die Baugrube*



*Bild 68 Zuschneiden der EPS-Kissen auf der Baustelle*





Bild 69 Verlegung der EPS-Kissen auf der Baustelle



Bild 70 Handhabung von Kunststoffrohren auf der Baustelle

#### 6.2.4 Verfüllung und Verdichtung

Durch die Bettung der Rohre mit Hilfe von EPS-Bettungskissen vereinfacht sich die Verdichtung des Bodens in der Leitungszone. Insbesondere entfällt die Zwickelverdichtung. Der Hohlraum im Zwickelbereich der Rohre wird durch die Bettungskissen ausgefüllt, so dass keine Verfüllung mit Boden und Verdichtung dieses Bereiches mehr erforder-

derlich ist. Es muss lediglich der Bereich über und seitlich der Kissen und Rohre verfüllt und verdichtet werden.

Auf den begleiteten Baustellen konnten unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Verfüllung und Verdichtung festgestellt werden. Zum einen wurde – wie vom Hersteller gefordert – zuerst der Rohrgraben bis zur Rohrachse des unteren Rohres verfüllt und verdichtet, bevor mit der Verlegung der oberen Kissen und Rohre begonnen wurde. Zum anderen wurde das komplette System aus EPS-Bettungskissen und Regen- und Schmutzwasserkanal aufgebaut und abschließend die Leitungszone in einem Arbeitsgang verfüllt und verdichtet.

Das Bodenmaterial zur Verfüllung des Rohrgrabens wurde unter Einsatz von Baggern in den Rohrgraben eingebracht und mit Schaufeln händisch in der Leitungszone verteilt. Die Verdichtung des Bodens in der unmittelbaren Umgebung der Rohre und Kissen wurde mit Hilfe von Hand- oder Motorstampfern durchgeführt (vgl. Bild 71a und b). Der Boden im übrigen Rohrgraben wurde mittels Rüttelplatten (vgl. Bild 72) verdichtet.



a) Verteilen des Bodens mittels Schaufel



b) Verdichtung mittels Motorstampfer

**Bild 71** Verfüllung und Verdichtung der Leitungszone





*Bild 72 Eingesetztes Verdichtungsgerät: Rüttelplatte*

Aufgrund der Reduzierung des Bodenaushubs und des Wegfalls der Zwickelverdichtung konnte durch den Einsatz von EPS-Bettungskissen eine erhebliche Zeit- und Kostenersparnis bei der Verlegung von Schmutz- und Regenwasserkanälen im Trennsystem erzielt werden. Nach Auskunft der Baufirma Kremer, Melle, welche die Kanalbaumaßnahme im Baugebiet Bienenfeld in Rödinghausen durchgeführt hat, ist im Vergleich zum Bau eines Trennsystems mit Stufengraben eine Reduzierung des zeitlichen Aufwandes um durchschnittlich 40% zu erwarten.

### 6.3 Rammsondierungen

Im Zuge der Kanalbaumaßnahme im Baugebiet „In der Flage“ in Rödinghausen-Bieren wurden zur Kontrolle der Verdichtungsqualität der Grabenverfüllung und des Planums acht Rammsondierungen nach DIN 4094-2 [31] und zwei Plattendruckversuche nach DIN 18134 [32] durchgeführt. Die Hauptverfüllung des Grabens bestand dabei aus Füllsand, die Seitenverfüllung aus Vorabsiebung der Körnung 0/8.

Die Rammsondierungen wurden nach [33] am 20.05. bzw. 23.05.2005 neben der Leitungstrasse bis zu 2,00 m unter der Oberkante des Planums bzw. bis in die Seitenverfüllung ausgeführt. Die Lage der Prüfpunkte ist Bild 73 und die graphische Darstellung der Rammogramme Bild 74 zu entnehmen. Die Rammsondierungen bzw. die daraus abzuleitenden Verdichtungsleistungen werden auf der Grundlage der in Tabelle 11 angegebenden Rammkriterien für die leichte Rammsonde (DIN 4094-2, DPL<sub>10</sub>) für nichtbindige Böden (Verdichtbarkeitsklasse V 1, Schluff und Ton < 15 Gew.-%) unter Berücksichtigung der Wasserführung beurteilt.

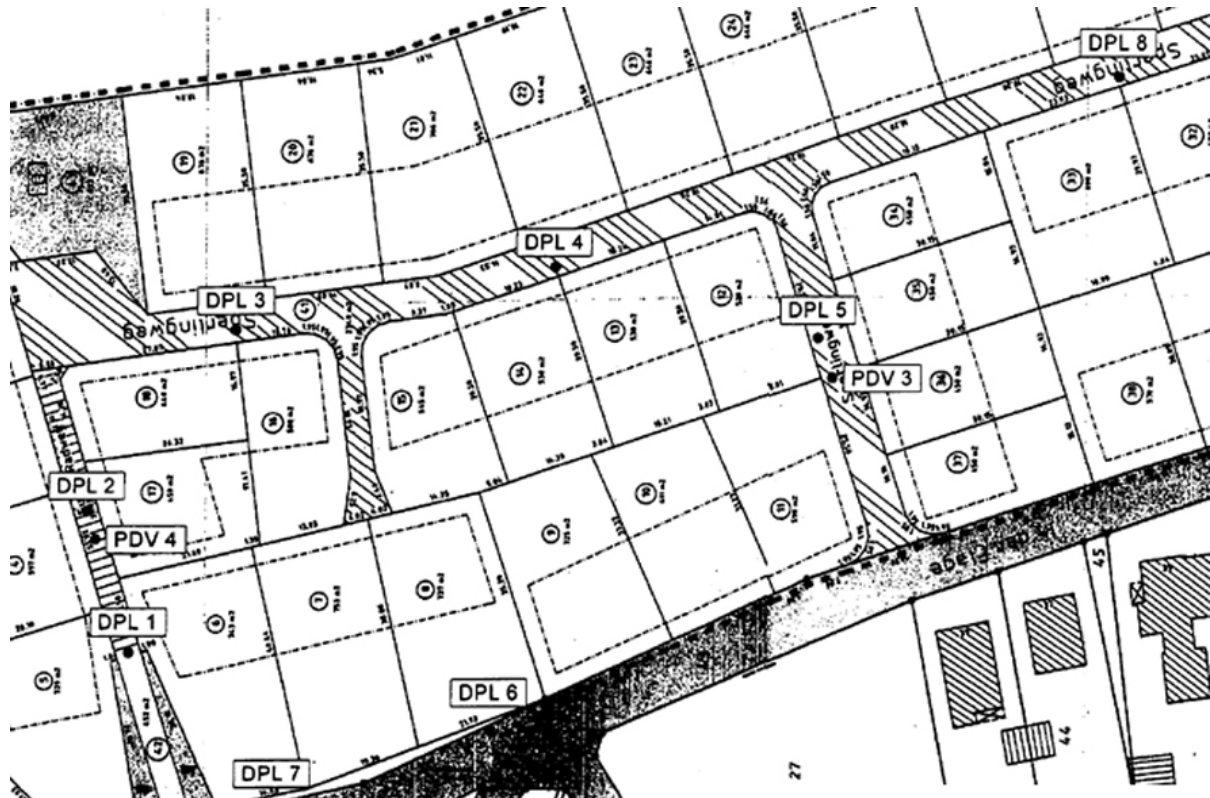


Bild 73 Lage der Prüfpunkte DPL 1-8 und PDV 3-4 im Untersuchungsgebiet [33]

Tabelle 11: Rammkriterien zur Beurteilung der Verdichtungsleistung [33]

| Schlagzahlen DPL <sub>10</sub> | $N_{10} \leq 2 - 3$ | $N_{10} = 4 - 6$ | $N_{10} = 7 - 9$ | $N_{10} \geq 10$ | $N_{10} \geq 20$ |
|--------------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Erdfeuchte Böden</b>        | ungenügend          | mangelhaft       | ausreichend      | gut              | sehr gut         |
| <b>Nasse Böden</b>             | mangelhaft          | ausreichend      | gut              | sehr gut         | sehr gut         |

Die Rammsondierungen zeigen eine überwiegend ausreichende bis gute Verdichtungsqualität der Grabenverfüllung. Vereinzelt Lockerzonen in Schichtstärken von maximal 0,2 m in der unteren Haupt- bzw. in der Seitenverfüllung können aufgrund der ansonsten guten Gesamtverdichtung insgesamt toleriert werden.

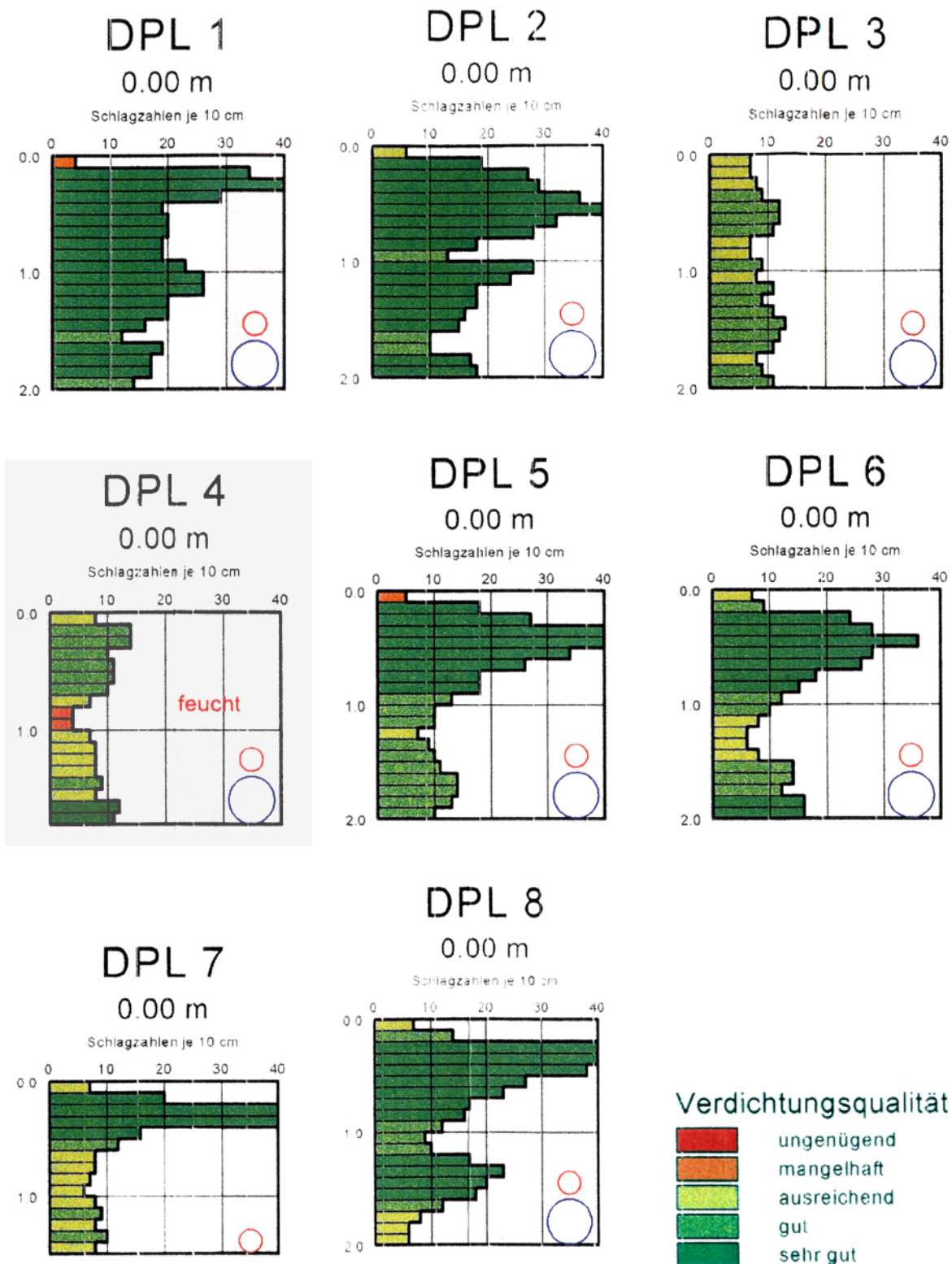


Bild 74 Graphische Ergebnisdarstellung in Rammdigrammen [33]

Zur weiteren Prüfung der Verdichtung und der Tragfähigkeit des Untergrundes wurden am 23.05.2005 zwei Plattendruckversuche (PDV, DIN 18134-300) auf der Oberkante der Tragschicht ausgeführt. Auskunftsgemäß fehlen zur endgültigen Ausbauhöhe der Tragschicht noch etwa 10 cm. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

**Tabelle 12: Ergebnisse der Plattendruckversuche [33]**

| PDV   | Messstelle | Bodenart    | $E_{V1}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{V2}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | $E_{V2}/E_{V1}$<br>[Soll: ≤ 2,5] | $E_{V2Soll}$<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Bewertung |
|-------|------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| PDV 3 | bei DPL 5  | Tragschicht | 76,6                             | 122,5                            | 1,60                             | ≥ 120                                | +         |
| PDV 4 | bei DPL 2  | Tragschicht | 107,1                            | 185,6                            | 1,73                             | ≥ 120                                | ++        |

++ sehr gut, + gut, +/- ausreichend, – ungenügend

Auskunftsgemäß und in Anlehnung an die "Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen" (RStO 01) ist auf der Oberkante der Tragschicht ein Verformungsmodul von  $E_{V2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$  nachzuweisen, wobei ein  $E_{V2}/E_{V1}$ -Verhältnis von  $\leq 2,5$  einzuhalten ist. Dementsprechend ist festzustellen, dass die zu erwartenden Qualitätsmerkmale an den beiden Prüfpunkten PDV 3 und PDV 4 erfüllt sind. Zusammenfassend kann also nach [33] von einer sach- und fachgerechten Verdichtung der Kanalgrabenverfüllung und der Tragschicht ausgegangen werden.

## 6.4 Setzungsmessungen

Ursprünglich war geplant, mögliche Setzungserscheinungen im Verlauf des Rohrgrabens über einen Zeitraum von mindestens 6 Monaten messtechnisch zu erfassen. Die dazu erforderlichen Setzungsmessungen an der Geländeoberkante konnten allerdings nicht wie geplant durchgeführt werden. Ursache hierfür ist, dass nicht wie vorgesehen bereits während der Projektlaufzeit die endgültige Straße entlang der vorgesehenen Messtrasse sondern lediglich eine vorläufige Baustraße angelegt wurde. Vor dem Hintergrund einer hinreichenden Betrachtung des Langzeitverhaltens der EPS-Bettungskissen sind die fehlenden Setzungsmessungen insitu allerdings als unkritisch zu bewerten. Die Ergebnisse der Langzeit-Laborversuche unter realitätsnahen Verkehrs- und Erdlasten (vgl. Abschnitt 5.2) zeigten, dass keine durch die Kissen verursachten Setzungserscheinungen zu erwarten sind. Während der Versuchsdauer von 10 Monaten konnten bei vergleichbaren Auflasten lediglich geringe Verformungen der Kissen festgestellt werden. Gegebenenfalls daraus resultierende Setzungserscheinungen sind vernachlässigbar. Darüber hinaus untermauern die Ergebnisse der Rammsondierung mit durchweg ausreichender bis guter Verdichtungsqualität des Bodens in der Leitungszone (vgl. Abschnitt 6.3) die oben angestellten Überlegungen.

## 6.5 Aufgrabung und Rohraustausch

### 6.5.1 Ausführung

Für die Bewertung eines langfristigen Einsatzes von EPS-Bettungskissen sind auch die Instandhaltungs- bzw. Erneuerungsmöglichkeiten des Kanalsystems aus Rohren und



zugehörigen EPS-Kissen unter den speziellen Randbedingungen (Bettungskissen, Lage der Rohre übereinander) zu untersuchen. Daher wurde am 09.05.2006 im Baugebiet „In der Flage“ in Rödinghausen der Austausch eines Rohres an einem 12 Monate alten Kanalabschnitt erprobt. Der betrachtete Kanalabschnitt bestand aus einem „Doppeldeckersystem“ mit unten liegendem Regenwasserkanal „Uponal Plus“ der Nennweite DN 400 und einem oben liegenden Schmutzwasserkanal „Ultra Rib 2“ der Nennweite DN 200. Die Bettung der Kunststoffrohre war mit Hilfe von EPS-Auflager- und Zwischenkissen ausgeführt worden (vgl. Bild 75a).

Zur Vorbereitung des Rohraustausches wurde der anstehende Boden händisch entfernt und der ausgewählte Kanalabschnitt freigelegt. Anschließend wurden der auszutauschende Rohrabschnitt des Schmutzwasserkanals sowie die anliegenden EPS-Zwischenkissen durch Sägen aus dem Rohrstrang herausgetrennt und das neue Rohrsegment mit Hilfe von zwei Überschiebmuffen in den vorhandenen Rohrstrang eingebaut. Die links und rechts an das neue Rohrelement angrenzenden EPS-Zwischenkissen wurden im Vorfeld so gekürzt, dass ausreichend Platz für den Einbau der Überschiebmuffen vorhanden war. Zur Bettung des neuen Rohrabschnittes zwischen den Überschiebmuffen wurde ein weiteres EPS-Zwischenkissen passgenau abgelängt und vor Einbau des neuen Rohrpasstückes in den Bettungshohlraum zwischen Schmutz- und Regenwasserkanal eingesetzt. Zum Heraustrennen und Kürzen der Rohre und EPS-Bettungskissen wurde als Werkzeug eine handelsüblicher Handsäge benutzt. Die wichtigsten Arbeitsschritte beim Austausch eines mit Hilfe von EPS-Bettungskissen verlegten, oben liegenden Schmutzwasserrohres werden in der Bildserie in Bild 75 detailliert dargestellt.





a) Freigelegter Rohrabschnitt



b) Heraustrennen des Rohrabschnittes



c) Heraustrennen der EPS-Kissen



d) Vorbereiteter Rohrabschnitt



e) Kürzen der vorhandenen EPS-Kissen



f) Zuschneiden des neuen EPS-Kisses



g) Fertiggestellter Rohrabschnitt



h) Detail: Zwischenkissen

**Bild 75** Austausch eines auf EPS-Kissen gebetteten, oben liegenden Schmutzwasserrohres

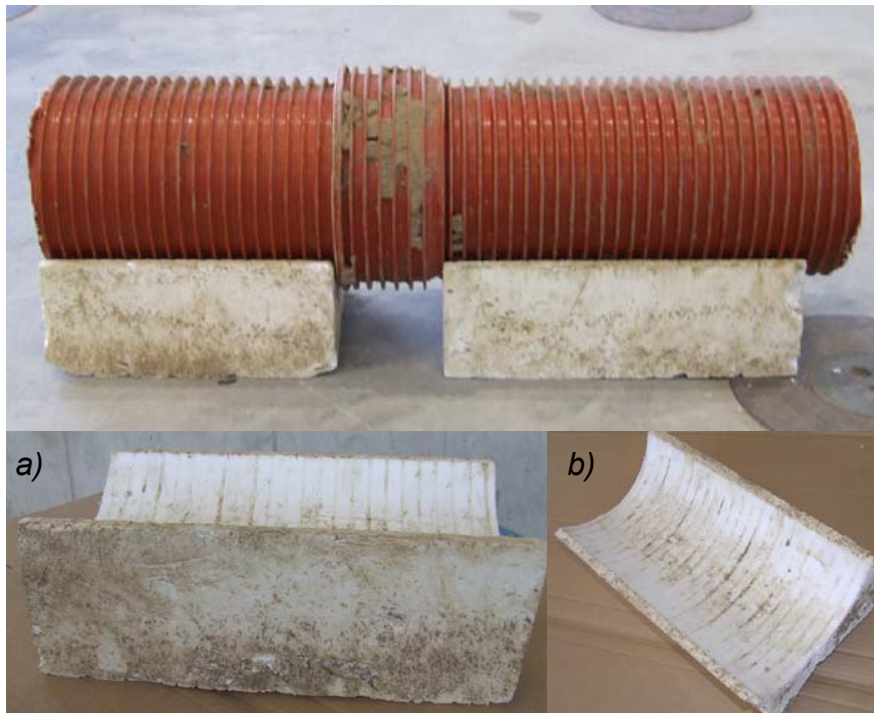
### 6.5.2 Aufwand

Der zeitliche Aufwand für den Rohraustausch ohne vorherigen Bodenaushub betrug ca. 7 Minuten. Die erforderlichen Arbeitsschritte konnten problemlos von einem einzelnen Arbeiter durchgeführt werden. Der größte zeitliche Aufwand beim Rohraustausch lag im Heraustrennen des zu ersetzenden Rohrabschnittes. Je nach eingesetztem Rohrwerkstoff, wie z.B. Steinzeug oder Beton kann dies mit entsprechendem Mehraufwand für Geräte- und Personaleinsatz verbunden sein. Es ist davon auszugehen, dass der Austausch des unten liegenden Regenwasserkanals aufwändiger ist als der des oben liegenden Schmutzwasserkanals. Aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit des unteren Rohres dürften sich das Heraustrennen des auszutauschenden Rohrabschnittes sowie der EPS-Auflagerkissen und das Einsetzen des neuen Rohrsegmentes schwieriger gestalten als im erprobten Anwendungsfall. Um die Zugänglichkeit zum unten liegenden, auszutauschenden Rohr sicherzustellen, ist gegebenenfalls auch das oben liegende, intakte Rohr herauszutrennen und der komplette Rohrabschnitt neu zu erstellen. Bei der anschließenden Wieder-Verfüllung der Leitungszone ist auf eine sorgfältige Verdichtung der nicht durch die EPS-Kissen gebetteten Muffenbereiche zu achten, um Längsbiegeeffekte möglichst auszuschließen (vgl. Markierung Bild 75h).

### 6.5.3 Zustand des Bettungskissens

Im Zuge des Rohraustausches konnte ergänzend der Zustand des gebetteten Systems aus unten liegendem Regenwasser- sowie einem oben liegendem Schmutzwasserkanal aus profiliertem Kunststoff dokumentiert und beurteilt bzw. die Verlegequalität überprüft werden. Der Zustand der EPS-Kissen war nach optischer Kontrolle mängelfrei. Es konnten weder Auflösungs- noch Zersetzungserscheinungen festgestellt werden. Die EPS-Kissen wiesen auch keine erkennbaren Gesamtverformungen auf. Bei der Inaugenscheinnahme war lediglich eine Verschmutzung der Kissen durch den umgebenden Bodenkörper und eine leichte Beschädigung in Form von Ausbrüchen einzelner EPS-Partikel an der Außenseite der Kissen zu erkennen (vgl. Bild 76). Diese sind vermutlich auf den händischen Bodenaushub mit Schaufel und Spaten zurückzuführen. Von einer Beeinträchtigung des Systems durch die Veränderungen der Kissenoberfläche ist nicht auszugehen. Das Eindringen der Rippen des Ultra Rip-Rohres an der Kissenoberfläche ist deutlich zu erkennen. Die Eindringtiefe der Rippen bewegt sich im Bereich von wenigen Zehntel-Millimetern (vgl. Abschnitt 5.2). Der Hohlraum zwischen den Rippen und den EPS-Kissen war frei von Bodenmaterial und sonstigen Verschmutzungen.





a) Gesamter Rohrabschnitt mit Kissen

b) Seiten- und Draufsicht Kissen

Bild 76 Entnommener Rohr- und Kissenabschnitt beim Rohraustausch

## 6.6 Fazit

Bettungskissen aus expandierbarem Polystyrol (EPS) sind unter In-situ-Bedingungen auf der Baustelle einfach zu handhaben. In allen Einbauschritten von der Lagerung und dem Transport über den Bodenaushub, den Einbau, die Verfüllung und Verdichtung des Bodens bis zum Austausch eines defekten Rohrabschnittes ist der Einsatz der EPS-Kissen leicht und ohne zusätzlichen Aufwand in die üblichen Bauabläufe zu integrieren. Die Nutzung von EPS-Bettungskissen stellt insbesondere bei der Herstellung von definierten, gleich bleibenden Bettungsbedingungen eine signifikante Vereinfachung dar. Die oft schwierige Verdichtung des Zwickelbereichs entfällt völlig. Ein Zusammenwirken von Bettungskissen und umgebendem, verdichtetem Boden konnte durch die Ergebnisse der Rammsondierungen bestätigt werden.

Im Vergleich zur gängigen Vorgehensweise bei der Herstellung der Rohrbettung konnte auf den begleiteten Baustellen beim Einsatz der EPS-Bettungskissen zum Teil eine deutliche Verringerung des Zeit- und Kostenaufwandes verzeichnet werden. Unter diesem Gesichtspunkt als besonders vorteilhaft erwies sich der Einsatz von Bettungskissen im „Doppeldeckersystem“ beim Kanalbau im Trennsystem. Aufgrund der Reduzierung des Bodenaushubs und des Wegfalls der Zwickelverdichtung wurde im Gegensatz zum sonst eingesetzten Stufengraben durch die ausführende Baufirma die Reduzierung des zeitlichen Aufwandes auf bis zu 40 % abgeschätzt. Weiterführende Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind geeignet, zusätzliche Einsparpotentiale beim Einsatz von EPS-Bettungskissen im Detail zu beschreiben.

## 7 Dauerhaftigkeit und Beständigkeit

Bettungskissen aus EPS unterliegen während des Einsatzes im Rohrleitungsbau zahlreichen mechanischen Beanspruchungen aus Erd- und Verkehrslasten sowie unterschiedlichen weiteren Einwirkungen aufgrund der vorliegenden Umgebungsbedingungen. Die kurz- und langfristigen mechanischen Beanspruchungen von EPS-Bettungskissen werden ausführlich in den Kapiteln „Laborversuche“ und „Statische Berechnungen“ behandelt. In den folgenden Abschnitten wird ausschließlich der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die **Dauerhaftigkeit** und die Beständigkeit von EPS-Kissen betrachtet. Grundlage der Untersuchung sind Recherchen in der Fachliteratur. Eigene versuchstechnische Überprüfungen des Materialverhaltens wurden **nicht** durchgeführt.

Als Hauptquelle wurden die „Technischen Informationen“ [34] zum Werkstoff EPS der BASF, Ludwigshafen herangezogen. Diese Informationssammlung des Herstellers enthält eine umfassende Zusammenstellung firmeneigener Veröffentlichungen, Erkenntnisse, Untersuchungen und Ergebnisse zum Werkstoff EPS sowie die Auswertung weiterführender Literatur zur o.g. Thematik. Detailliert werden die unterschiedlichen Anwendungsfälle für EPS beschrieben und die jeweiligen korrespondierenden Materialeigenschaften beleuchtet.

### 7.1 Einflussfaktoren

Expandierbares Polystyrol (EPS) zählt aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung und seines Herstellungsverfahrens zu den Kunststoffprodukten. Wie alle Kunststoffe unterliegen auch EPS-Kissen in Abhängigkeit von den vorliegenden Umgebungsbedingungen den typischen Alterungsvorgängen und -ursachen. Nach DIN 50035-1 [35] bezeichnet Alterung im Allgemeinen jede – im Prinzip sowohl negative als auch positive – irreversibel ablaufende chemische und physikalische Änderung des Eigenschaftsbildes. Zu den physikalischen Alterungsvorgängen gehören nach [36] die Nachkristallisation, die Relaxation von Orientierungen und der Abbau von Eigenspannungen. Unter die chemischen Alterungsvorgänge fallen die Änderung des molekularen Aufbaus, die Bildung funktioneller Gruppen z.B. durch Oxidation und die Abspaltung niedermolekularer Bestandteile.

Als Ursache für den Alterungsprozess können innere und äußere Alterungsursachen unterschieden werden. Die Alterungsvorgänge durch innere Alterungsursachen beruhen nach [36] auf Veränderungen bzw. Schwachstellen hinsichtlich des Materials, der Materialzusammensetzung und der Verarbeitung und sind somit unabhängig vom Einsatzgebiet der jeweiligen Kunststoffe. Die äußeren Alterungsursachen hingegen werden stark durch die Umgebung und das Einsatzgebiet des jeweiligen Kunststoffproduktes beeinflusst.

Im Gegensatz zu Rohren sind EPS-Bettungskissen vorrangig den unterschiedlichen Einflussfaktoren des umgebenden Boden- und Grundwasserkörpers ausgesetzt. Lediglich im Leckagefall der gebetteten Rohre ist auch ein Kontakt der Kissen mit Abwasser bzw. Abwasserinhaltsstoffen möglich. Aufgrund dieser Tatsache sind für EPS-Bettungskissen grundsätzlich andere Anforderungen für den Einsatz im Rohrleitungsbau als an Rohre zu formulieren. In Anlehnung an [36] werden in Tabelle 13 mögliche Ursachen und Einflussfaktoren auf das Alterungsverhalten von Kunststoffen im Allgemeinen aufgelistet und unter Berücksichtigung des Einsatzfeldes von EPS-Kissen bewertet.

*Tabelle 13: Mögliche Einflussfaktoren und Alterungsursachen für EPS-Bettungskissen im Rohrleitungsbau*

| Alterungsursachen und Einflussfaktoren von Kunststoffen                              | Auftreten bei Einsatz von EPS-Bettungskissen im Rohrleitungsbau      | Bewertung der Relevanz                            |
|--|--|---|
| Temperatur   | bei Durchfluss warmen oder heißen Abwassers durch das gebettete Rohr | + möglich   |
|  | Erwärmung durch Sonneneinstrahlung bei der Lagerung                  | + möglich<br>aber Kontaktzeit in der Regel gering |
| Sauerstoffkonzentration  | durch erhöhten Sauerstoffgehalt/-konzentration im Boden              | - unwahrscheinlich                                |
| Atmosphärische Belastungen<br>- UV-Licht<br>- Luftfeuchtigkeit<br>- Verunreinigungen | bei Lagerung im Freien vor dem Einbau                                | + möglich<br>aber Kontaktzeit in der Regel gering |
| (Ionisierende) Strahlung<br>- Wellenlänge<br>- Intensität                            | -  | -- nahezu ausgeschlossen                          |
| Medien<br>- Wasser<br>- Chemikalien  | durch anstehendes Grundwasser  | ++ wahrscheinlich                                 |
|  | durch austretendes Abwasser oder Abwasserinhaltsstoffe               | + möglich<br>(nur im Schadensfall)                |
| Biologische Belastungen<br>- mikrobiologisch<br>- makrobiologisch                    | durch Mikroorganismen im Boden, wie Pilze, Bakterien o.ä.            | + möglich   |
|  | durch Makroorganismen, wie Ratten, Maulwürfe, Regenwürmer o.ä.       | + möglich   |
| ++ wahrscheinlich + möglich – unwahrscheinlich -- nahezu ausgeschlossen              |  |   |

Aufgrund der Anwendung im Rohrleitungsbau ergeben sich für EPS-Kissen Alterungsursachen mit unterschiedlich hoher Relevanz. Es kann mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass EPS-Bettungskissen während ihrer Einsatzdauer zeitweise oder auch permanent dem Medium Wasser, z.B. in Gebieten mit hohen



oder schwankenden Grundwasserständen ausgesetzt sind. Ebenso scheint es möglich, dass Chemikalien, biologische Belastungen sowie atmosphärische Strahlung eine Materialalterung beschleunigen. Eine chemische Beanspruchung der EPS-Kissen ist beispielsweise durch exfiltrierendes Abwasser bzw. enthaltene Abwasserinhaltsstoffe möglich. Eine Einwirkung durch atmosphärische Belastungen, wie UV-Licht, Luftfeuchtigkeit und -verunreinigungen wird insbesondere dann relevant, wenn die EPS-Kissen ungeschützt über einen längeren Zeitraum im Freien gelagert werden. Ein mikro- bzw. makrobiologischer Einfluss durch Bakterien bzw. Maulwürfe, Regenwürmer oder Ratten ist ebenfalls nicht auszuschließen. Als eher unwahrscheinlich ist hingegen eine Alterung von EPS durch Temperatur- bzw. Sauerstoffeinfluss einzuschätzen. Von einer dauerhaften Beanspruchung des EPS durch hoch temperierte Abwässer ist nur im Einzelfall und bei Rohrwerkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit auszugehen. Allerdings ist je nach Tiefenlage der EPS-Bettungskissen und den klimatischen Bedingungen im Winter mit einer Frostbeanspruchung zu rechnen. Auch ist die Sauerstoffkonzentration im Boden üblicherweise so gering, dass diese nicht als Alterungsursache anzunehmen ist. Eine Materialveränderung durch ionisierende Strahlung ist für den betrachteten Anwendungsfall nahezu auszuschließen.

Unter Berücksichtigung der für die Dauerhaftigkeit und die Beständigkeit von EPS als relevant einzuschätzenden Fälle (++ wahrscheinlich und + möglich) wurden die denkbaren Alterungsursachen und Einflussfaktoren aus Tabelle 13 beleuchtet und mit den vorliegenden Informationen zum Werkstoff EPS aus [34] abgeglichen. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung sind in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

## 7.2 Einwirkung durch Wasser

Nach [34] sind Schaumstoffe aus Styropor® im Gegensatz zu vielen anderen Stoffen nicht hygroskopisch, das heißt, sie besitzen nicht die Eigenschaft, Feuchtigkeit aus der Umgebung, z.B. in Form von Wasserdampf aus der Luftfeuchtigkeit, zu binden. Auch unter Wasser nehmen sie nur eine geringe Feuchtigkeitsmenge auf. Da die Zellwände für Wasser undurchlässig sind, kann es nur in Kanäle zwischen den verschweißten Perlen eindringen. Das bedeutet, dass die aufgenommene Wassermenge sowohl vom Verarbeitungsverhalten des EPS-Rohstoffs als auch von den Verarbeitungsbedingungen, insbesondere vom Ausschäumen, abhängt. Wie aus Bild 77 zu entnehmen ist, ist die Wasseraufnahme praktisch unabhängig von der Rohdichte. Sie beträgt nach 28 Tagen bis ca. 3 Volumen-%. Da Polystyrol ein Kohlenwasserstoff ist, kann Wasser keine Veränderungen, wie etwa Hydrolyse oder Quellung bewirken. Auch enthält EPS keine mit Wasser extrahierbaren Bestandteile, deren Extraktion einen Einfluss auf die Eigenschaften des Materials haben.

Bei der Verlegung von EPS-Kissen im Boden ist ein Kontakt mit Grundwasser sehr wahrscheinlich. Eine Alterung von EPS durch Einwirkung von Wasser in Form der Hydrolyse oder aufgrund von Spannungen durch abwechselndes Schrumpfen und Quellen

ist allerdings nicht zu erwarten. Die Dauerhaftigkeit und die Beständigkeit von EPS bleiben also durch das Einwirken von Wasser unbeeinflusst. Ein möglicher Abtrag der Schaumstoffoberfläche (Erosion) ist nach [34] nur in Kombination aus Strahlungs- und Witterungseinflüssen möglich (vgl. Abschnitt 7.5).

| Eigenschaften <sup>1</sup>   | Prüfung nach             | Einheit           | Prüfergebnisse          |                         |                         |
|--|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Güteschutztypen  | GSH-Gütebedingungen      |                   | PS 15 SE                | PS 20 SE                | PS 30 SE                |
| Anwendungstypen  | DIN 18 164, Teil 1       |                   | W                       | WD                      | WD + WS                 |
| Mindestrohddichte  | DIN-EN 1602              | kg/m <sup>3</sup> | 15                      | 20                      | 30                      |
| Baustoffklasse (Prod.-Typ Styropor F)  | DIN 4102                 |                   | B 1, schwer entflammbar | B 1, schwer entflammbar | B 1, schwer entflammbar |
| Wärmeleitfähigkeit<br>Messwert bei + 10 °C   | DIN 52 612               | W/(m · K)         | 36–38                   | 33–35                   | 31–34                   |
| Rechenwert   | DIN 4108                 | W/(m · K)         | 40                      | 40                      | 35                      |
| Druckspannung bei 10% Stauchung  | DIN-EN 826               | kPa               | 65–100                  | 110–140                 | 200–250                 |
| Dauerdruckbelastbarkeit bei Stauchung 1,5–2,0% nach 50 Jahren  | DIN-EN 1606              | kPa               | 20–30                   | 35–50                   | 70–90                   |
| Biegefestigkeit (ohne Schäumhaut)  | DIN-EN 12089             | kPa               | 150–230                 | 250–310                 | 430–490                 |
| Scherfestigkeit  | DIN-EN 12090             | kPa               | 80–130                  | 120–170                 | 210–260                 |
| Zugfestigkeit  | DIN-EN 1608              | kPa               | 160–260                 | 230–330                 | 380–480                 |
| E-Modul (Druckprüfung)   | DIN-EN 826               | MPa               | 1,0–4,0                 | 3,5–6,5                 | 7,5–11,0                |
| Wärmeformbeständigkeit, kurzfristig  | DIN 53 4242 <sup>2</sup> | °C                | 100                     | 100                     | 100                     |
| Wärmeformbeständigkeit, langfristig bei 20 kPa   | DIN 18164 T 1            | °C                | 75                      | 80                      | 80                      |
| Thermischer Längenänderungskoeffizient   | DIN 53752 <sup>2</sup>   | 1/K               | 5–7 · 10 <sup>-5</sup>  | 5–7 · 10 <sup>-5</sup>  | 5–7 · 10 <sup>-5</sup>  |
| Spezifische Wärmekapazität   | DIN 53 765               | J/(kg · K)        | 1210                    | 1210                    | 1210                    |
| Wasseraufnahme bei Unterwasserlagerung<br>nach 7 Tagen   | DIN-EN 12087             | Vol.-%            | 0,5–1,5                 | 0,5–1,5                 | 0,5–1,5                 |
| nach 28 Tagen  | DIN-EN 12087             | Vol.-%            | 1,0–3,0                 | 1,0–3,0                 | 1,0–3,0                 |
| Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl<br>Rechenwert nach DIN 4108 Teil 4<br>(günstigster und ungünstigster Zahlenwert) | DIN-EN 12086             | 1                 | 20/50                   | 30/70                   | 40/100                  |

<sup>1</sup> Werte sind in der DIN 55 471, Teil 2 festgelegt  
<sup>2</sup> Anlehnung an Prüfnorm  
 \* 1 N/mm<sup>2</sup> = 1000 kN/m<sup>2</sup> = 1MPa = 1000 kPa

Bild 77 Eigenschaften von Schaumstoffen aus Styropor® für Bauanwendungen [34]

### 7.3 Einwirkung von Chemikalien

Schaumstoffe aus Styropor® (EPS) sind beständig gegenüber vielen chemischen Substanzen. Bei Verwendung von Klebstoffen, Anstrichen, Lösemitteln und konzentrierten Dämpfen dieser Stoffe ist jedoch mit einer Schädigung zu rechnen. Wegen der durch die Zellstruktur bedingten vergrößerten Oberfläche von EPS erfolgen Schädigungen jedoch schneller oder wirken sich stärker aus als bei dem kompakten Grundstoff Polystyrol. Schaumstoffe mit niedriger Rohddichte werden daher auch rascher bzw. stärker als solche mit höherer Rohddichte angegriffen. In Bild 78 und Bild 79 ist das Verhalten von Schaumstoffen aus Styropor® gegenüber den wichtigsten chemischen Substanzen dargestellt. Bei Kontakt des EPS mit entsprechend schädigenden Chemikalien ist von einem zum Teil erheblichen Einfluss auf das Alterungsverhalten bzw. die Dauerhaftig-

keit und die Beständigkeit des Werkstoffs auszugehen. Als kritisch ist die Empfindlichkeit von EPS gegen Dieselkraftstoff, Heizöl und Benzin einzuschätzen. Im Bereich von Tankstellen und Heizöllagern ist der Einsatz von EPS besonders zu prüfen.

| Einwirkendes Agens   | Styropor P + F   |  |
|--|--|--|
| Salzlösungen (Meerwasser)  | +  |  |
| Seifen und Netzmittellösungen  | +  |  |
| Bleichlaugen, wie Hypochlorit, Chlorwasser, Wasserstoffperoxidlösungen   | +  |  |
| Verdünnte Säuren   | +  |  |
| Salzsäure 35%ig, Salpetersäure bis 50%ig   | +  |  |
| Wasserfreie Säuren, z. B. rauchende Schwefelsäure, 100%ige Ameisensäure  | -  |  |
| Natronlauge, Kalilauge, Ammoniakwasser   | +  |  |
| <b>Organische Lösemittel,</b><br>wie Aceton, Essigsäureester, Benzol, Xylol, Lackverdünnung, Trichlorethylen   | -  |  |
| Gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe, Wundbenzin, Testbenzin   | -  |  |
| Paraffinöle, Vaseline  | + -  |  |
| Dieselöl   | -  |  |
| Vergaserkraftstoff (Normal- und Superbenzin)   | -  |  |
| Alkohole, z. B. Methanol, Ethanol  | + -  |  |
| Siliconöl  | +  |  |
| <p>+ <i>Beständig: Der Schaumstoff wird auch bei längerer Einwirkung nicht zerstört.</i><br/>           + - <i>Bedingt beständig: Der Schaumstoff kann bei längerer Einwirkung schrumpfen oder oberflächlich angegriffen werden.</i><br/>           - <i>Unbeständig: Der Schaumstoff schrumpft mehr oder weniger schnell oder wird aufgelöst.</i></p> |  |  |
| Im Produktsortiment befindet sich mit Styropor FH ein Produkt, aus dem sich Schaumstoffe mit einer gegenüber Schaumstoffen aus   | anderen Styropor Marken erhöhten Beständigkeit gegen aromatenfreie Kohlenwasserstoffe herstellen lassen. Die Eignung dieses Produkts | für bestimmte Anwendungen sollte in jedem Einzelfall überprüft werden. |

**Bild 78** Beständigkeit von Schaumstoffen aus Styropor® gegen Chemikalien [34]

| Substanz   | Schaumstoffe aus Styropor P, F | Substanz   | Schaumstoffe aus Styropor P, F | Substanz  | Schaumstoffe aus Styropor P, F |
|--|--------------------------------|--|--------------------------------|---|--------------------------------|
| Wasser   | +                              | <b>Verflüssigte Gase:</b>                        |                                | <b>Anorganische Baustoffe:</b>  |                                |
| Meerwasser                                       | +                              | a) anorganisch                                   |                                | Anhydrit  | +                              |
| <b>Laugen:</b>                                   |                                | Ammoniak   | +                              | Gips  | +                              |
| Ammoniakwasser                                   | +                              | Edelgase   | +                              | Kalk  | +                              |
| Bleichlaugen (Hypochlorit, Wasserstoffsuperoxid) | +                              | Sauerstoff (Explosionsgefahr)                    | +                              | Sand  | +                              |
| Kalilauge  | +                              | Schwefeldioxid                                   | -                              | Zement  | +                              |
| Kalkwasser                                       | +                              | Stickstoff                                       | +                              | <b>Organische Baustoffe:</b>  |                                |
| Natronlauge                                      | +                              | Wasserstoff                                      | +                              | Bitumen   | +                              |
| Seifenlösungen                                   | +                              | b) organisch                                     |                                | Kaltbitumen und Bitumenspachtelmasse auf wässriger Basis                | +                              |
| <b>Verdünnte Säuren:</b>                         |                                | Methan   | +                              | Kaltbitumen und Bitumenspachtelmasse auf Lösemittelbasis (aromatenfrei) | -                              |
| Ameisensäure, 50 %                               | +                              | Ethan  | +                              | <b>Aromaten:</b>  |                                |
| Essigsäure, 50 %                                 | +                              | Ethenoxid  | -                              | Benzol  | -                              |
| Flusssäure, 4 %                                  | +                              | Ethin  | -                              | Cumol   | -                              |
| Flusssäure, 40 %                                 | +                              | Propan   | -                              | Ethylbenzol   | -                              |
| Phosphorsäure, 7 %                               | +                              | Propen   | -                              | Phenol, wässr. Lsg. 1 %   | +                              |
| Phosphorsäure, 50 %                              | +                              | Propenoxid                                       | -                              | Phenol, wässr. Lsg. 33 %  | -                              |
| Salpetersäure, 13 %                              | +                              | Butan  | -                              | Styrol  | -                              |
| Salpetersäure, 50 %                              | +                              | Buten  | -                              | Toluol  | -                              |
| Salzsäure, 7 %                                   | +                              | Butadien   | -                              | Xylol   | -                              |
| Salzsäure, 18 %                                  | +                              | Erdgas   | +                              | <b>Dämpfe von:</b>  |                                |
| Schwefelsäure, 10 %                              | +                              | <b>Aliphatische Kohlenwasserstoffe:</b>          |                                | Kampfer   | -                              |
| Schwefelsäure, 50 %                              | +                              | Cyclohexan                                       | -                              | Naphtalin   | -                              |
| <b>Konzentrierte Säuren:</b>                     |                                | Diesel-Kraftstoff, Heizöl EL                     | -                              |   |                                |
| Ameisensäure, 99 %                               | +                              | Heptan   | -                              |   |                                |
| Essigsäure, 96 %                                 | +                              | Hexan  | -                              |   |                                |
| Propionsäure, 99 %                               | -                              | Paraffinöl                                       | +/-                            |   |                                |
| Salpetersäure, 65 %                              | +                              | Testbenzin 55-95 °C                              | -                              |   |                                |
| Salzsäure, 36 %                                  | +                              | Testbenzin 155-185 °C                            | -                              |   |                                |
| Schwefelsäure, 98 %                              | +                              | Vaseline   | +                              |   |                                |
| <b>Rauchende Säuren:</b>                         |                                | Vergaser-Kraftstoff mit Benzol (Normal u. Super) | -                              |   |                                |
| Salpetersäure                                    | -                              | <b>Alkohole:</b>                                 |                                |   |                                |
| Schwefelsäure                                    | -                              | Methanol   | +/-                            |   |                                |
| <b>Anhydride:</b>                                |                                | Ethanol  | +/-                            |   |                                |
| Essigsäureanhydrid                               | -                              | Ethylenglykol                                    | +                              |   |                                |
| Kohlendioxid, fest                               | +                              | Diethylenglykol                                  | +                              |   |                                |
| Schwefeltrioxid                                  | -                              | iso-Propanol                                     | +                              |   |                                |
| <b>Schwache Säuren:</b>                          |                                | Butanol  | +/-                            |   |                                |
| Humussäure                                       | +                              | Cyclohexanol                                     | +                              |   |                                |
| Kohlensäure                                      | +                              | Glycerin   | +                              |   |                                |
| Milchsäure                                       | +                              | Kokosfettalkohol                                 | +                              |   |                                |
| Weinsäure  | +                              | <b>Amine:</b>                                    |                                |   |                                |
| Zitronensäure                                    | +                              | Anilin   | -                              |   |                                |
| <b>Gase:</b>                                     |                                | Diethylamin                                      | -                              |   |                                |
| a) anorganisch                                   |                                | Ethylamin  | +                              |   |                                |
| Ammoniak   | -                              | Triethylamin                                     | -                              |   |                                |
| Brom   | -                              | <b>Sonstige organische Substanzen:</b>           |                                |   |                                |
| Chlor  | -                              | Aceton   | -                              |   |                                |
| Schwefeldioxid                                   | -                              | Acetonitril                                      | -                              |   |                                |
| b) organisch                                     |                                | Acrylnitril                                      | -                              |   |                                |
| Butadien   | -                              | Dimethylformamid                                 | -                              |   |                                |
| Butan  | -                              | Ester  | -                              |   |                                |
| Buten  | -                              | Ether  | -                              |   |                                |
| Erdgas   | +                              | Halogenkohlenwasserstoffe                        | -                              |   |                                |
| Ethan  | +                              | Ketone   | -                              |   |                                |
| Ethen  | +                              | Lackverdünner                                    | -                              |   |                                |
| Ethin  | +                              | Olivenöl   | +                              |   |                                |
| Methan   | +                              | Tetrahydrofuran                                  | -                              |   |                                |
| Propan   | +                              |  |                                |   |                                |
| Propen   | +                              |  |                                |   |                                |
| Propenoxid                                       | -                              |  |                                |   |                                |

+ nicht verändert = beständig

+/- gering verändert = bedingt beständig

- sehr stark verändert = unbeständig

**Bild 79 Verhalten von Schaumstoffen aus Styropor® gegenüber chemischen Substanzen [34]**

## 7.4 Biologische Belastung

Aufgrund seiner Struktur ist es nach [34] nicht auszuschließen, dass im Boden lebende Insekten oder Nagetiere die Kissen aus EPS beschädigen können. So zum Beispiel ist es denkbar, dass Insektenarten, wie Grabwespen oder Ameisen, Gänge und Höhlen zur Ablage ihrer Eier bzw. zum Anlegen von Futtermitteln für den schlüpfenden Nachwuchs in den Schaumstoff bohren. Mikroorganismen haben nach [34] keinen Einfluss auf Schaumstoffe aus Styropor®. Das Material bietet ihnen keinen Nährboden; es fault, schimmelt und verrottet nicht. Auch wenn sich bei starker Verschmutzung und unter besonderen Bedingungen Mikroorganismen auf dem Schaumstoff ansiedeln, so dient er lediglich als Träger und ist am biologischen Vorgang nicht beteiligt. In Abhängigkeit von Bodenart, Verdichtung, Tiefenlage und Grundwasserstand ist gegebenenfalls mit einer Alterung durch Makroorganismen mit entsprechendem Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und die Beständigkeit von EPS auszugehen.

## 7.5 Atmosphärische Strahlung

Nach [34] führt die direkte Einwirkung von Sonnenlicht aufgrund des hohen UV-Anteils nach einigen Wochen zu einer Vergilbung und Versprödung der oberen Schaumstoffschichten. In Kombination mit Wind und Regen kann dies zur Erosion der Schaumstoffoberfläche führen. Die Empfindlichkeit des EPS gegen Witterungseinflüsse hängt stark von der Rohdichte des Materials ab. EPS mit geringer Dichte ist anfälliger für das Auftreten von Erosionserscheinungen. Die bei der Herstellung von Formteilen entstehende Oberflächenhaut schützt den Schaumstoff bis zu einem gewissen Grad. Es ließ sich nach [34] beobachten, dass die Erosion bei Schaumstoffen aus feinkörnigem Rohmaterial langsamer fortschreitet als bei grobkörnigem. Bei langer Lagerung über mehrere Wochen von EPS-Bettungskissen im Freien ohne Schutz vor Lichteinwirkung und Witterungseinflüssen ist von einer erhöhten Alterung des Materials auszugehen. Ein negativer Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und die Beständigkeit ist nicht auszuschließen.

## 7.6 Temperatureinwirkung

Schaumstoffe aus Styropor® bestehen nach [34] bei den üblichen Rohdichten zu 1–5% (volumenbezogen) aus Polystyrol, einem thermoplastischen Kunststoff, der unterhalb seines Erweichungsbereichs (90–100 °C) in amorphem Zustand vorliegt und der auch bei extrem niedrigen Temperaturen keinerlei Strukturumwandlungen – z. B. Kristallisation – erfährt. Für die Anwendung von Schaumstoffen aus Styropor® gibt es deshalb keine Temperaturgrenze nach unten; es sei denn, dass konstruktive Gegebenheiten im Hinblick auf die mit der Abkühlung verbundene Volumenkontraktion (linearer Ausdehnungskoeffizient  $6 \times 10^{-5}/K$ ) es erfordern. Setzt man Schaumstoffe aus Styropor® höherer Temperatur aus, so hängt die Anwendungsgrenztemperatur von der Dauer der Temperatureinwirkung und von der mechanischen Belastung des Schaumstoffs ab. Liegt keine mechanische Belastung vor, so kann man Schaumstoffe aus Styropor®



kurzfristig einer Temperatur bis etwa 90 °C aussetzen. Über längere Zeit bzw. unter Druck ist der Schaumstoff bis ca. 80 °C wärmeformbeständig. Oberhalb 100 °C ist zunächst ein starkes Schrumpfen des Schaumstoffs festzustellen. Steigt die Temperatur über 300 °C, so depolymerisiert sich die Polystyrolschmelze wieder zu Styrol.

Eine Anwendung von EPS-Kissen im Frostbereich ist hinsichtlich des Alterungsverhaltens als unkritisch zu bewerten. Auch bei Ableitung von heißen Abwässern durch Rohre aus Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit, ist voraussichtlich kein Einfluss auf das Alterungsverhalten von EPS zu erwarten. Aufgrund der Abkühlung des Abwasserstroms während der Ableitung sowie der Wärme isolierenden Wirkung des Abwasserrohrs ist anzunehmen, dass keine Temperaturen über 80 °C langfristig auf die Kissen einwirken. Sollen hoch temperierte Abwässer dauerhaft abgeleitet werden, ist dieser Sachverhalt im Vorfeld zu klären und ein Einfluss der Abwassertemperatur auf die Dauerhaftigkeit des EPS durch eigene Versuche auszuschließen. Ebenso ist auch ein Temperaturanstieg auf über 90 °C bei der Lagerung der EPS-Bettungskissen bei starker Sonneneinstrahlung und somit ein Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und die Beständigkeit von EPS-Bettungskissen auszuschließen und unter normalen Bedingungen unwahrscheinlich.

## 7.7 Fazit

Ein Verrotten des Materials im unbelasteten Boden und Grundwasser kann aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche ausgeschlossen werden. Kritisch sollten jedoch Verunreinigungen von Boden oder Grundwasser betrachtet werden. Diesbezüglich ist von Fall zu Fall anhand der Stoffe zu entscheiden, ob eine Beeinträchtigung vorliegt. Entsprechende Tabellen mit Informationen zu materialangreifenden Stoffen können beim Hersteller bezogen werden. Eine Temperatureinwirkung durch Ableitung hoch temperierter Abwässer ist bei Bedarf durch weiterführende Untersuchungen zu klären. Zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der Dauerhaftigkeit und Beständigkeit von EPS ist der Einfluss von Strahlung und Witterung durch entsprechende Schutzmaßnahmen, wie z.B. UV-beständige Verpackungen, bei Lagerung und Einbau zu minimieren.

## 8 Statische Untersuchungen

### 8.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden von der Fachhochschule Münster statische Berechnungen mit der Finite-Element-Methode durchgeführt. Hierbei wurden die auftretenden Rohrspannungen bei einer Rohrbettung im Boden und der Bettung mit EPS-Kissen gegenübergestellt. Zusätzlich wurden die in den Bettungskissen auftretenden Dehnungen ermittelt. Da der Einsatz von EPS-Bettungskissen auch die Ausführung von übereinander liegenden Rohrleitungen ermöglicht, wurde auch diese Einbauanordnung untersucht. Die Ergebnisse der in [37] detailliert dargestellten Berechnungen werden im Folgenden zusammengefasst.

### 8.2 Grundlagen der statischen Berechnung

#### Rohre

Es werden drei Rohrtypen untersucht: Steinzeugrohre, PVC-KG-Rohre sowie profilierte Rohre aus PP (Ultra Rib II). Die Berechnungen werden für die Nennweiten DN 200 und DN 300 durchgeführt. Folgende Kennwerte werden zugrunde gelegt:

|                   |                       |                              |                              |                                   |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Außendurchmesser  | A: PVC-KG:            | DN 200                       | $d_a = 200 \text{ mm}$       |                                   |
|                   |                       | DN 300                       | $d_a = 315 \text{ mm}$       |                                   |
|                   | B: Steinzeug:         | DN 200                       | $d_a = 238 \text{ mm}$       |                                   |
|                   |                       | DN 300                       | $d_a = 350 \text{ mm}$       |                                   |
|                   | C: PP (Ultra Rib II): | DN 200                       | $d_a = 225 \text{ mm}$       |                                   |
|                   |                       | DN 300                       | $d_a = 335 \text{ mm}$       |                                   |
| Wanddicken        | A: PVC-KG:            | DN 200:                      | $s = 5 \text{ mm}$           |                                   |
|                   |                       | DN 300                       | $s = 9 \text{ mm}$           |                                   |
|                   | B: Steinzeug:         | DN 200:                      | $s = 22 \text{ mm}$          |                                   |
|                   |                       | DN 300:                      | $s = 29 \text{ mm}$          |                                   |
| Profilierung      | C: PP (Ultra Rib II): | DN 200:                      | A                            | $= 5,42 \text{ mm}^2/\text{mm}$   |
|                   |                       |                              | I                            | $= 56,76 \text{ mm}^4/\text{mm}$  |
|                   |                       |                              | $z_s$                        | $= 3,58 \text{ mm}$               |
|                   |                       | DN 300:                      | A                            | $= 8,56 \text{ mm}^2/\text{mm}$   |
|                   |                       |                              | I                            | $= 191,04 \text{ mm}^4/\text{mm}$ |
|                   |                       |                              | $z_s$                        | $= 5,10 \text{ mm}$               |
| Materialkennwerte | A: PVC-KG:            | Kurzzeit:                    | $E_K = 3.000 \text{ N/mm}^2$ |                                   |
|                   |                       | Langzeit                     | $E_L = 1.500 \text{ N/mm}^2$ | vgl. [11]                         |
|                   |                       | $\mu = 0,35$                 |                              |                                   |
|                   | B: Steinzeug:         | E = 50.000 N/mm <sup>2</sup> | vgl. [127]                   |                                   |
|                   |                       | $\mu = 0,2$                  |                              |                                   |
|                   | C: PP (Ultra Rib II): | Kurzzeit:                    | $E_K = 1.250 \text{ N/mm}^2$ |                                   |
| Langzeit          |                       | $E_L = 312 \text{ N/mm}^2$   | vgl. [11]                    |                                   |
| $\mu = 0,35$      |                       |                              |                              |                                   |

Die Berechnungen werden mit den Langzeit-E-Moduln der Kunststoffrohre durchgeführt. Da die Sandkastenversuche (vgl. Abschnitt 5.4) als Kurzzeit-Versuche erfolgen, werden im Abschnitt 8.5 ergänzende Kurzzeituntersuchungen durchgeführt.

**Boden**

Es wird ein schwach bindiger Boden der Bodengruppe 2 mit einem Verdichtungsgrad  $D_{Pr} = 95 \%$  angenommen.

Bettungsmodul  $E_B = 8 \text{ N/mm}^2$  vgl. [11]  
 Querdehnzahl  $\mu = 0,2$  vgl. [39]

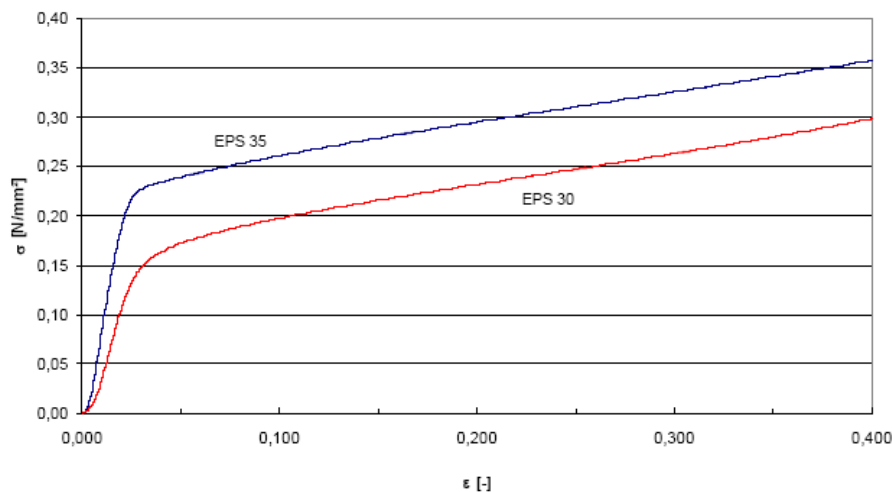
Für die Berechnungen mit der Finite Element Methode wird der Bettungsmodul  $E_B$  in den Elastizitätsmodul  $E$  umgerechnet, vgl. [39].

$$E = E_B \cdot (1 - \mu^2) = 8 \cdot (1 - 0,2^2) = 7,68 \text{ N/mm}^2$$

Wichte  $\gamma_B = 20 \text{ kN/m}^3$

**Bettungsmaterial**

Die mechanischen Eigenschaften von EPS-Bettungskissen sind von der Rohdichte abhängig. Im vorliegenden Fall kommen Werkstoffe mit einer Rohdichte von 30 und 35  $\text{kg/m}^3$  zur Anwendung. Das Verformungsverhalten wird anhand von Druckproben bestimmt (Bild 80).



*Bild 80 Last-Verschiebungskurven der EPS-Hartschaumstoffe (vgl. Abschnitt 5.1)*

Nach [40] liegt bis zu Dehnungen von 1,5 % ein elastisches Verformungsverhalten vor. Bei Einhaltung dieser Dehnungsbegrenzung sind langfristig keine Kriech- bzw. plastischen Verformungen zu erwarten. Unter dieser Annahme ( $\epsilon \leq 1,5 \%$ ) wird für die Berechnungen ein elastisch-plastisches Werkstoffgesetz zugrunde gelegt. Das Material-

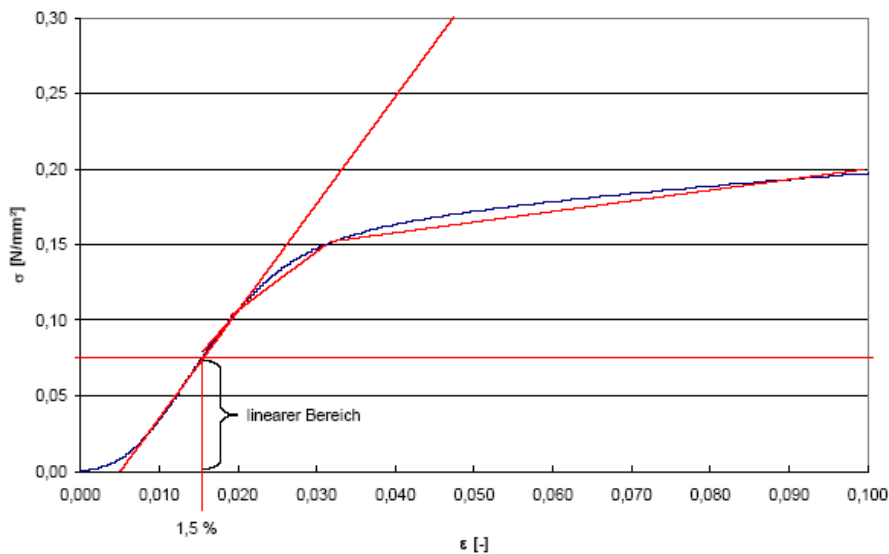
verhalten wird aus den Last-Verschiebungskurven der Versuche bestimmt, vgl. Bild 81 und Bild 82.

EPS 30  $E = 7,4 \text{ N/mm}^2$

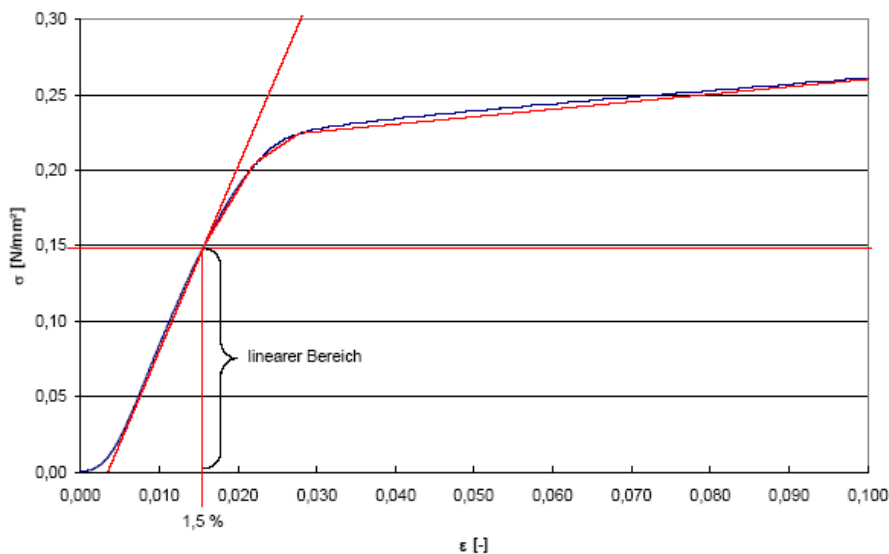
EPS 35  $E = 12,1 \text{ N/mm}^2$

Bei den Versuchen konnte keine Dehnung quer zur Lastrichtung festgestellt werden. Für die Berechnungen wird jedoch eine geringe rechnerische Querdehnung angesetzt:

$\mu = 0,1$



**Bild 81** Lastverschiebungskurve des EPS 30-Hartschaumstoffs mit idealisiertem Materialgesetz [37]



**Bild 82** Lastverschiebungskurve des EPS 35-Hartschaumstoffs mit idealisiertem Materialgesetz [37]

## Einbau

Es werden folgende drei Einbaufälle untersucht:

Einbaufall I: DN 300 Einzelrohr

Einbaufall II: DN 200 über DN 300 eingebaut

Einbaufall III: DN 300 über DN 200 eingebaut

Für alle Einbauvariationen werden die beiden Bettungsmaterialien EPS-Kissen und Boden (Kies-Sand-Gemisch) betrachtet.

## Lasten

In den Berechnungen werden zwei Überdeckungshöhen sowie eine Verkehrslast aus dem Lastbild des SLW 60 berücksichtigt.

min h = 0,5m

max h = 3,5 m

## **8.3 Finite Element Modell**

Die Spannungen und Verformungen des Bettungsmaterials und der Rohre werden mit dem Programmsystem ABAQUS [41] ermittelt. Für die Berechnungen der glattwandigen Rohre werden zweidimensionale, für die profilierten Rohre dreidimensionale Modelle erstellt. Die dreidimensionale Berechnung für die profilierten Rohre dient der Erfassung des Spitzendrucks an den Kontaktstellen zwischen Rohrrippe und EPS-Kissen. Aus Symmetriegründen wird nur eine Rohrhälfte mit den zugehörigen Lagerungsbedingungen modelliert. Für die 2D-Modelle erfolgt die Diskretisierung durch Schalenelemente CPE4R mit vier Knoten, für die 3D-Modelle durch Volumenelemente C3D8R mit acht Knoten. An Stellen mit erwarteten Spannungskonzentrationen an Rohr und Kissen wird die Vernetzung auf Elementgrößen bis ca. 10 mm verfeinert. Am Übergang zwischen Rohr und Boden bzw. Kissen werden Kontaktelemente angebracht. Die Belastung erfolgt durch die Eigenlast des Bodens und eine Verkehrslast aus dem Lastbild des SLW 60. Bild 83 zeigt exemplarisch das 2D-FE-Modell für den Einbaufall II mit 0,5 m Überdeckung.

Bei den folgenden Berechnungen wird eine Übereinstimmung der Geometrie von Rohr und Bettungskissen vorausgesetzt. Die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen der Bettungskissen und Anfangsverformungen der Rohre, z.B. durch Maßtoleranzen, Transport- und Wärmeeinwirkung, werden nicht untersucht.



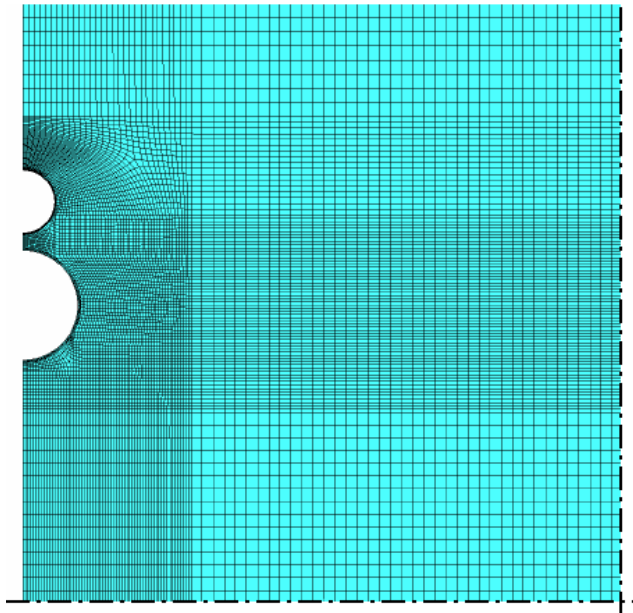


Bild 83 2D-FE-Modell für den Einbaufall II mit 0,5 m Überdeckung [37]

## 8.4 Ergebnisse der FE-Berechnungen

### 8.4.1 EPS-Bettungskissen

Im Weiteren werden die in den Bettungskissen auftretenden Dehnungen ausgewertet, die Rohrspannungen folgen in Abschnitt 8.4.2. Es werden die Berechnungen mit einer Überdeckungshöhe von 0,5 m näher betrachtet.

#### EPS-Bettungskissen zur Auflagerung von PVC-Rohren

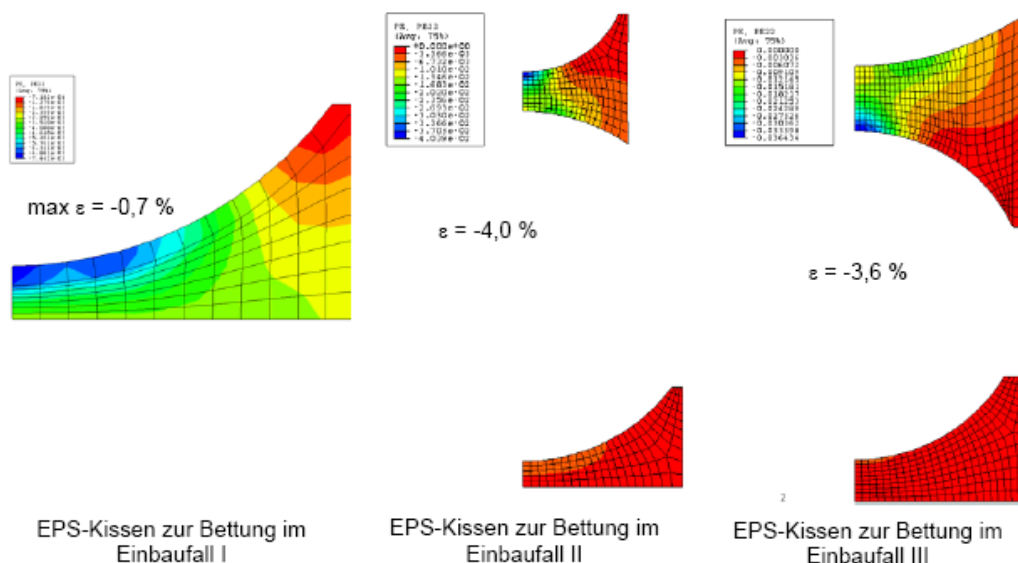


Bild 84 Plastische Dehnungen der EPS-Bettungskissen in vertikaler Richtung zur Auflagerung von PVC-Rohren (im roten Bereich sind die plastischen Dehnungen gleich Null)

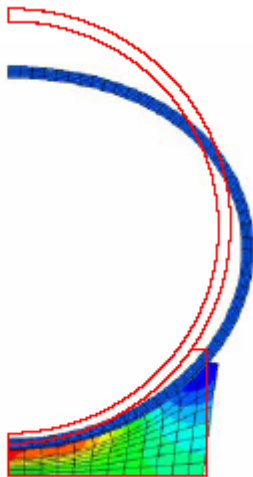


Bild 85 Ovalisierung des PVC-Rohres und zugehörige Verformung des EPS-Kissens (Darstellung 7-fach überhöht)

### EPS-Bettungskissen zur Auflagerung von Steinzeugrohren

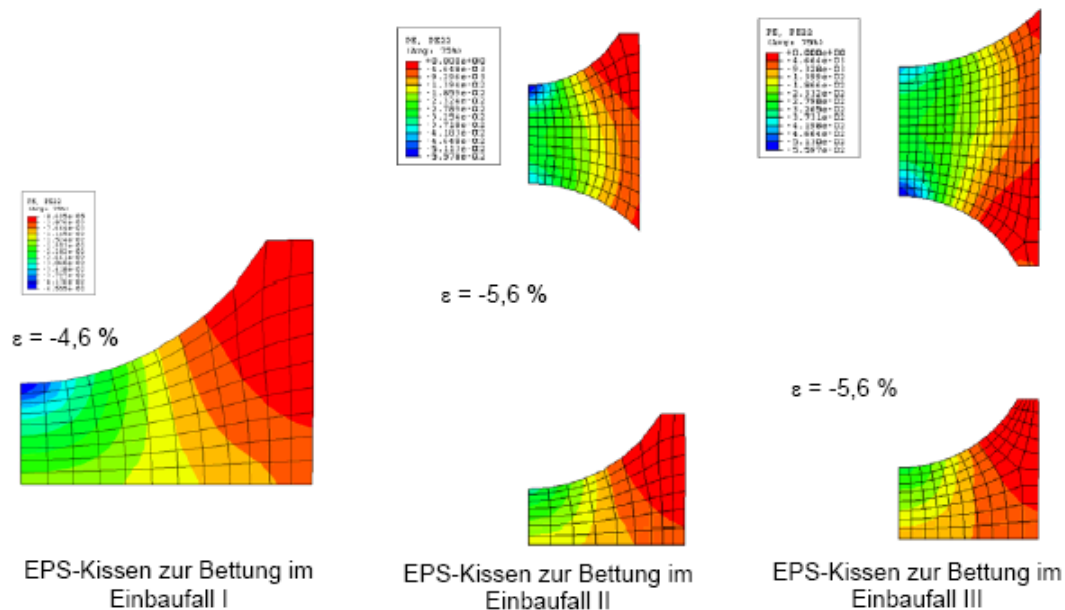
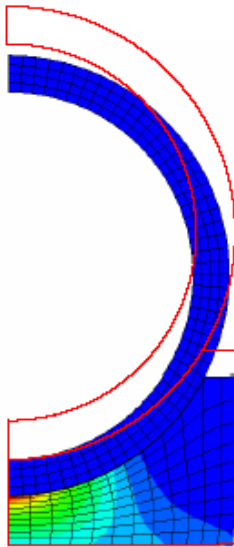
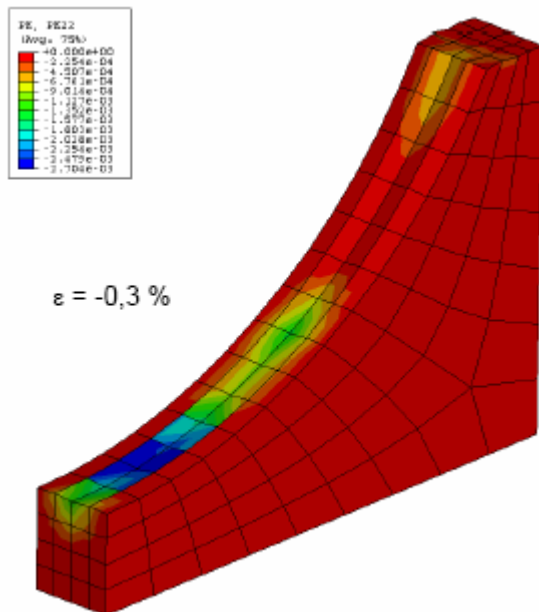


Bild 86 Plastische Dehnungen in vertikaler Richtung der EPS-Bettungskissen zur Auflagerung von Steinzeug-Rohren (im roten Bereich sind die plastischen Dehnungen gleich Null)

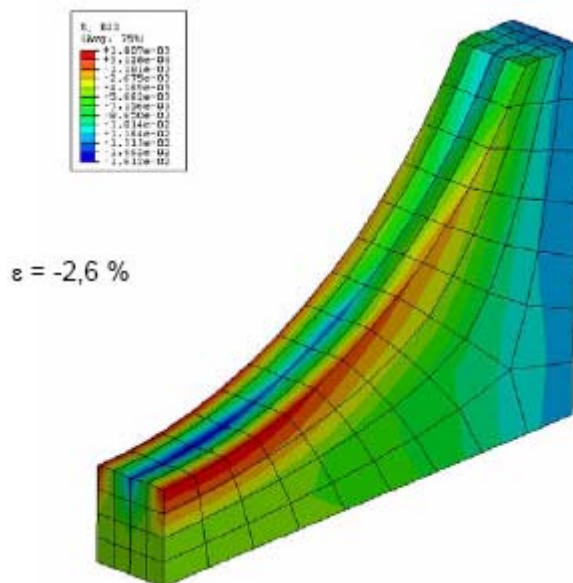


**Bild 87** Translation eines Steinzeugrohres und zugehörige Verformung des EPS-Kissens (Darstellung 7-fach überhöht)

**EPS-Bettungskissen zur Auflagerung von PP-Rohren (Ultra Rib II)**



**Bild 88** Plastische Dehnungen der EPS-Bettungskissen in vertikaler Richtung



**Bild 89** Dehnung in vertikaler Richtung durch Lasteinleitung an den Rippen

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass bei allen drei Rohrwerkstoffen (PVC, Steinzeug, PP) und den Einbauvarianten I, II und III plastische Dehnungen in den Bettungskissen auftreten. Die in [40] empfohlene Dehnungsbegrenzung von 1,5 % zur Vermeidung von Kriech- bzw. plastische Verformungen wird überschritten. Bei biegeweichen Rohren führt die im Bild 85 dargestellte Ovalisierung des Rohres zu einer erhöhten Biegebeanspruchung der Kissen. Diese Beanspruchungen nehmen mit der Höhe des EPS-Kissens zu. Diese „Aufbiegung“ des Kissens tritt bei einem biegesteifen Rohr nicht auf, vgl. Bild 87. Bei profilierten Rohren führt die konzentrierte Lasteinleitung an den Rippen zu einem starken Anstieg der Stauchungen in vertikaler Richtung, vgl. Bild 89.

#### 8.4.2 Rohrspannungen

Zum Vergleich der Rohrbettung im EPS-Kissen und im Boden werden in den Tabellen 5 bis 11 die Spannungen in Scheitel, Kämpfer und Sohle verglichen. Als Referenzwerte werden in den Tabellen 5 bis 8 Ergebnisse für ein einzeln verlegtes Rohr DN 300 nach ATV-A127 [11] angegeben.

**Einbaufall I (Einzelrohr DN 300)**
**Tabelle 14 Rohrspannungen für den Einbaufall I,  $h = 0,5$  m, SLW 60, *Kurzzeit***

| Rohr<br>I             | Bettungs-<br>material | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|                       |                       | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| h = 0,5 m             |                       | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>A</b><br>PVC       | EPS                   | 1,89                       | -7,21             | -0,89             | -6,83                      | 1,75              | -4,21             |
|                       | Boden                 | 1,95                       | -7,02             | -0,25             | -6,75                      | 1,77              | -4,67             |
|                       | A 127 (A3)            | 10,29                      | -6,71             | 14,12             | -13,16                     | 1,72              | -17,10            |
| <b>B</b><br>Steinzeug | EPS                   | 5,65                       | -7,10             | 5,45              | -6,12                      | 4,78              | -5,90             |
|                       | Boden                 | 6,33                       | -8,23             | 7,13              | -6,89                      | 5,57              | -7,50             |
|                       | A 127 (A6)            | 6,46                       | -7,33             | 6,80              | -5,76                      | 5,10              | -6,13             |
| <b>C</b><br>PP        | EPS                   | 1,61                       | -2,22             | 0,38              | -7,68                      | 4,51              | -5,55             |
|                       | Boden                 | 1,61                       | -1,73             | 0,61              | -7,55                      | 4,29              | -5,84             |
| <b>Ultra Rib II</b>   | A 127 (A9)            | 3,56                       | -5,23             | 4,61              | -15,62                     | 6,01              | 19,09             |

**Tabelle 15 Rohrspannungen für den Einbaufall I,  $h = 0,5$  m, SLW 60, *Langzeit***

| Rohr<br>I             | Bettungs-<br>material | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|                       |                       | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| h = 0,5 m             |                       | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>A</b><br>PVC       | EPS                   | -0,03                      | -4,74             | -0,97             | -4,56                      | -0,18             | -3,69             |
|                       | Boden                 | -0,07                      | -4,82             | -1,33             | -4,62                      | -0,21             | -3,45             |
|                       | A 127 (A3)            | 6,82                       | -2,84             | -10,63            | -9,97                      | -2,01             | -13,91            |
| <b>B</b><br>Steinzeug | EPS                   | (Kurzzeit = Langzeit)      |                   |                   |                            |                   |                   |
|                       | Boden                 |                            |                   |                   |                            |                   |                   |
|                       | A 127 (A6)            |                            |                   |                   |                            |                   |                   |
| <b>C</b><br>PP        | EPS                   | -0,47                      | -2,26             | -1,14             | -3,18                      | 0,39              | -2,03             |
|                       | Boden                 | -0,43                      | -2,42             | -1,01             | -3,13                      | 0,36              | -2,13             |
| <b>Ultra Rib II</b>   | A 127 (A9)            | 1,66                       | -3,22             | 2,71              | -10,78                     | 0,34              | -14,23            |



Tabelle 16 Rohrspannungen für den Einbaufall I,  $h = 3,5\text{ m}$ , SLW 60, Langzeit

| Rohr I         | Bettungs-material | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|----------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|                |                   | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| h = 3,5 m      |                   | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| A<br>PVC       | EPS               | -0,05                      | -3,19             | -0,79             | -3,03                      | -0,10             | -2,34             |
|                | Boden             | -0,06                      | -3,22             | -0,90             | -3,05                      | -0,06             | -2,26             |
|                | A127 (A12)        | 2,14                       | -1,55             | 4,32              | -4,26                      | -1,22             | -6,52             |
| B<br>Steinzeug | EPS               | 4,12                       | -5,17             | 3,98              | -4,45                      | 3,50              | -4,28             |
|                | Boden             | 4,63                       | -5,93             | 5,16              | -4,99                      | 4,04              | -5,39             |
|                | A127 (A15)        | 5,23                       | -6,17             | 5,55              | -4,86                      | 4,12              | -5,23             |
| C<br>PP        | EPS               | -0,33                      | -1,65             | -0,77             | -2,06                      | 0,26              | -1,34             |
|                | Boden             | -0,31                      | -1,57             | -0,67             | -2,00                      | 0,23              | -1,41             |
|                | A127 (A18)        | 0,33                       | -1,77             | 0,91              | -4,75                      | 0,16              | -6,66             |

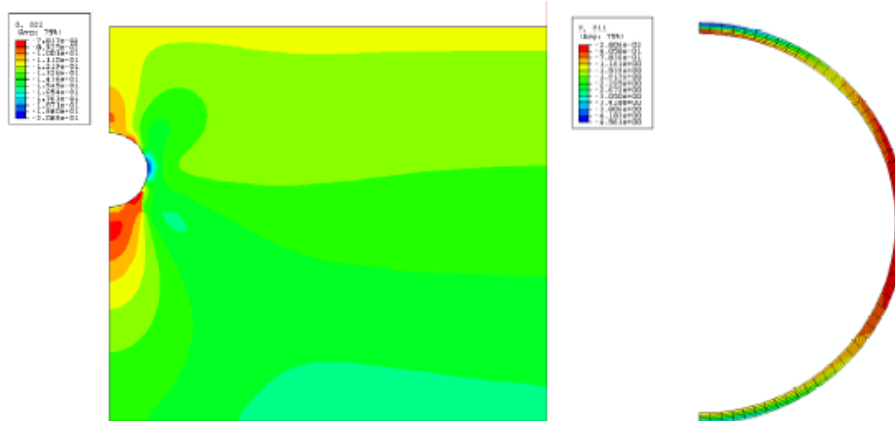


Bild 90 Spannungen in Boden und Rohr, PVC, Einbaufall I,  $h = 0,5\text{ m}$

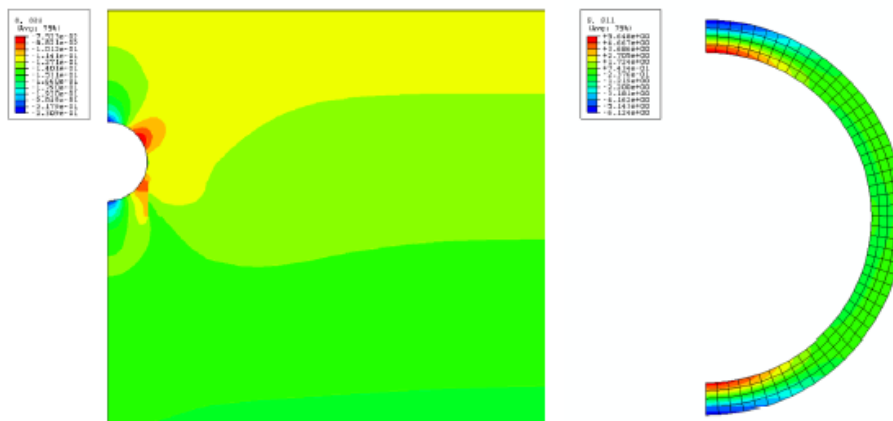


Bild 91 Spannungen in Boden und Rohr, Steinzeug, Einbaufall I,  $h = 0,5\text{ m}$

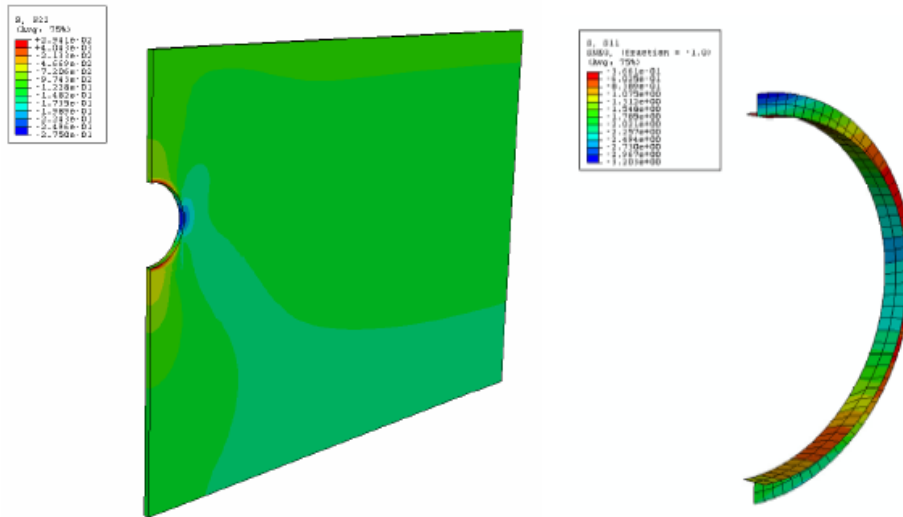


Bild 92 Spannungen in Boden und Rohr, PP, Einbaufall I, h = 0,5 m

**Einbaufall II (DN 200 über DN 300)**

Tabelle 17 Rohrspannungen für den Einbaufall II, h = 0,5 m, Langzeit

| Rohr II        | Nennweite | Bettungs-material | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|----------------|-----------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|                |           |                   | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| h = 0,5 m      | mm        |                   | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| A<br>PVC       | 200       | EPS               | 0,61                       | -3,72             | 1,30              | -3,59                      | 0,31              | -4,23             |
|                |           | Boden             | 0,46                       | -4,05             | 1,18              | -3,78                      | 0,25              | -4,45             |
|                | 300       | EPS               | -2,00                      | -4,24             | -1,04             | -2,03                      | -0,13             | -2,95             |
|                |           | Boden             | -1,69                      | -4,44             | -1,36             | -2,62                      | -0,13             | -2,95             |
| B<br>Steinzeug | 200       | EPS               | 4,49                       | -5,33             | 4,23              | -4,67                      | 3,44              | -4,43             |
|                |           | Boden             | 5,70                       | -7,34             | 6,64              | -6,03                      | 4,72              | -6,78             |
|                | 300       | EPS               | 5,02                       | -6,74             | 5,33              | -5,47                      | 4,52              | -5,66             |
|                |           | Boden             | 8,03                       | -9,60             | 8,25              | -8,51                      | 6,47              | -5,57             |
| C<br>PP        | 200       | EPS               | -0,49                      | -2,14             | -0,91             | -3,07                      | 0,39              | -2,21             |
|                |           | Boden             | -0,54                      | -1,98             | -0,86             | -2,96                      | 0,30              | -2,34             |
|                | 300       | EPS               | -1,02                      | -2,53             | -0,68             | -2,13                      | 0,67              | -2,78             |
|                |           | Boden             | -0,94                      | -2,35             | -0,37             | -2,04                      | 0,71              | -3,13             |

Tabelle 18 Rohrspannungen für den Einbaufall II,  $h = 3,5\text{ m}$ , **Langzeit**

| Rohr II        | Nennweite | Bettungs-material | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|----------------|-----------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|                |           |                   | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| h = 3,5 m      | mm        |                   | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| A<br>PVC       | 200       | EPS               | 0,35                       | -2,50             | 1,13              | -2,40                      | 0,19              | -3,10             |
|                |           | Boden             | 0,30                       | -2,63             | 0,89              | -2,46                      | 0,19              | -3,00             |
|                | 300       | EPS               | -1,33                      | 2,91              | -0,81             | -1,49                      | -0,05             | -1,99             |
|                |           | Boden             | -1,23                      | -2,97             | -0,91             | -1,69                      | -0,09             | -2,00             |
| B<br>Steinzeug | 200       | EPS               | 3,23                       | -3,84             | 3,07              | -3,35                      | 2,48              | -3,21             |
|                |           | Boden             | 4,13                       | -5,23             | 4,78              | -4,34                      | 3,38              | -4,86             |
|                | 300       | EPS               | 3,70                       | -5,03             | 3,96              | -4,04                      | 3,37              | -4,20             |
|                |           | Boden             | 5,82                       | -6,89             | 5,99              | -6,14                      | 4,69              | -6,19             |
| C<br>PP        | 200       | EPS               | nicht berechnet            |                   |                   |                            |                   |                   |
|                |           | Boden             |                            |                   |                   |                            |                   |                   |
|                | 300       | EPS               |                            |                   |                   |                            |                   |                   |
|                |           | Boden             |                            |                   |                   |                            |                   |                   |



Bild 93 Spannungen in Boden und Rohr, PVC, Einbaufall II,  $h = 0,5\text{ m}$

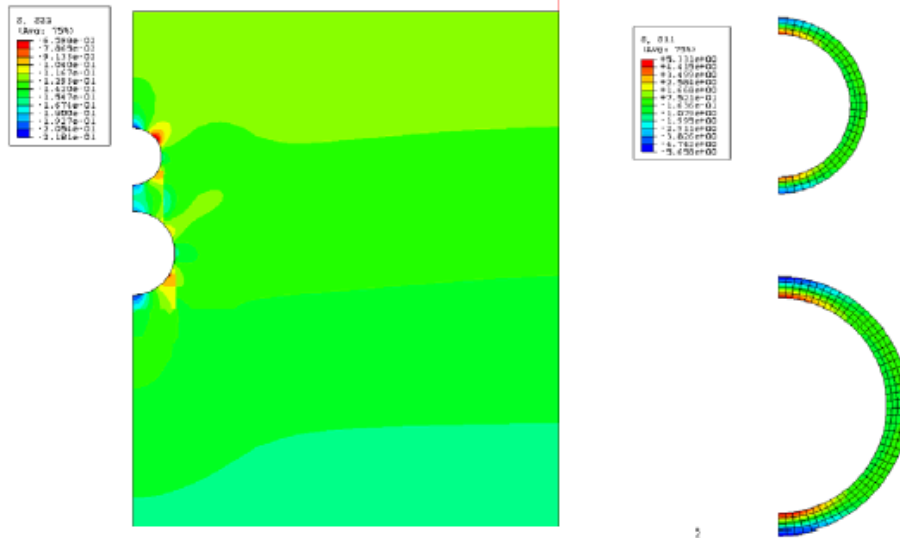


Bild 94 Spannungen in Boden und Rohr, Steinzeug, Einbaufall II,  $h = 0,5\text{ m}$

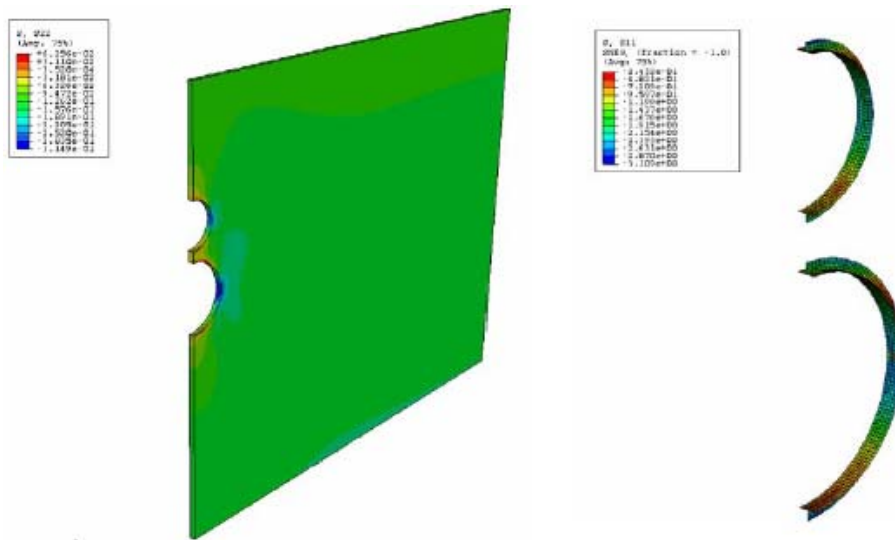


Bild 95 Spannungen in Boden und Rohr, PP, Einbaufall II,  $h = 0,5\text{ m}$

**Einbaufall III (DN 300 über DN 200)**
**Tabelle 19 Rohrspannungen für den Einbaufall III,  $h = 0,5\text{ m}$ , Langzeit**

| Rohr III              | Nennweite | Bettungs-material | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|-----------------------|-----------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|                       |           |                   | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| $h = 0,5\text{ m}$    | mm        |                   | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>A</b><br>PVC       | 300       | EPS               | 0,04                       | -4,46             | -2,17             | -4,02                      | 0,07              | -2,00             |
|                       |           | Boden             | -0,07                      | -4,57             | -1,66             | -4,14                      | -0,06             | -2,70             |
|                       | 200       | EPS               | 1,17                       | -3,14             | -0,76             | -3,95                      | -0,08             | -2,20             |
|                       |           | Boden             | 0,97                       | -3,54             | -1,00             | -4,13                      | -0,11             | -2,35             |
| <b>B</b><br>Steinzeug | 300       | EPS               | 5,62                       | -6,92             | 4,85              | -5,99                      | 4,65              | -5,30             |
|                       |           | Boden             | 6,66                       | -6,85             | 7,75              | -7,16                      | 5,84              | -8,01             |
|                       | 200       | EPS               | 3,23                       | -4,64             | 3,39              | -3,47                      | 2,86              | -3,85             |
|                       |           | Boden             | 6,04                       | -7,87             | 6,24              | -6,30                      | 4,93              | -6,88             |
| <b>C</b><br>PP        | 300       | EPS               | -0,43                      | -2,31             | -1,02             | -2,87                      | 0,33              | -2,03             |
|                       |           | Boden             | -0,39                      | -2,25             | -1,02             | -3,09                      | 0,39              | -1,88             |
|                       | 200       | EPS               | -0,96                      | -2,02             | -1,05             | -2,00                      | 0,14              | -1,87             |
|                       |           | Boden             | -0,70                      | -1,90             | -0,88             | -2,10                      | 0,03              | -1,81             |

**Tabelle 20 Rohrspannungen für den Einbaufall III,  $h = 3,5\text{ m}$ , Langzeit**

| Rohr III              | Nennweite | Bettungs-material | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|-----------------------|-----------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|                       |           |                   | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| $h = 3,5\text{ m}$    | mm        |                   | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>A</b><br>PVC       | 300       | EPS               | -0,70                      | -2,95             | -1,25             | -2,68                      | -0,06             | -1,55             |
|                       |           | Boden             | -0,10                      | -2,99             | -1,09             | -2,72                      | -0,05             | -1,79             |
|                       | 200       | EPS               | 0,83                       | -2,22             | -0,62             | -2,85                      | -0,11             | -1,54             |
|                       |           | Boden             | 0,61                       | -2,38             | -0,71             | -2,77                      | -0,09             | -1,57             |
| <b>B</b><br>Steinzeug | 300       | EPS               | 4,10                       | -5,08             | 3,67              | -4,37                      | 3,42              | -3,97             |
|                       |           | Boden             | 4,89                       | -6,27             | 5,61              | -5,23                      | 4,25              | -5,79             |
|                       | 200       | EPS               | 2,45                       | -3,56             | 2,60              | -2,67                      | 2,19              | -2,96             |
|                       |           | Boden             | 4,33                       | -5,64             | 4,49              | -4,54                      | 3,52              | -4,94             |
| <b>C</b><br>PP        | 300       | EPS               | nicht berechnet            |                   |                   |                            |                   |                   |
|                       |           | Boden             |                            |                   |                   |                            |                   |                   |
|                       | 200       | EPS               |                            |                   |                   |                            |                   |                   |
|                       |           | Boden             |                            |                   |                   |                            |                   |                   |



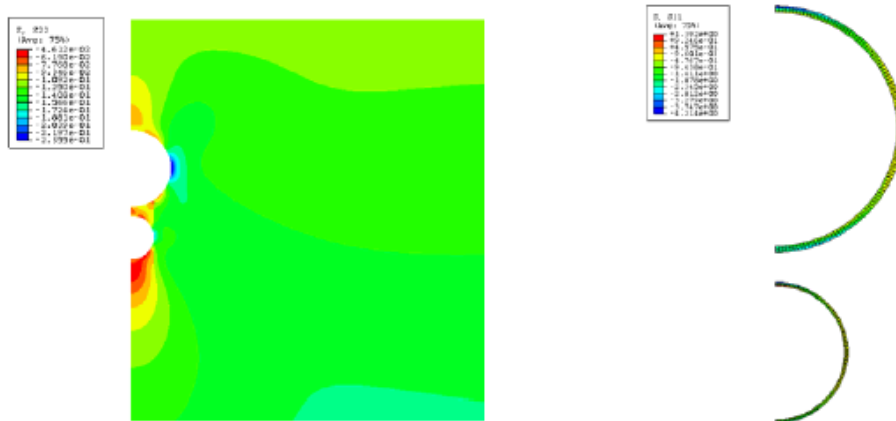


Bild 96 Spannungen in Boden und Rohr, PVC, Einbaufall III,  $h = 0,5 \text{ m}$

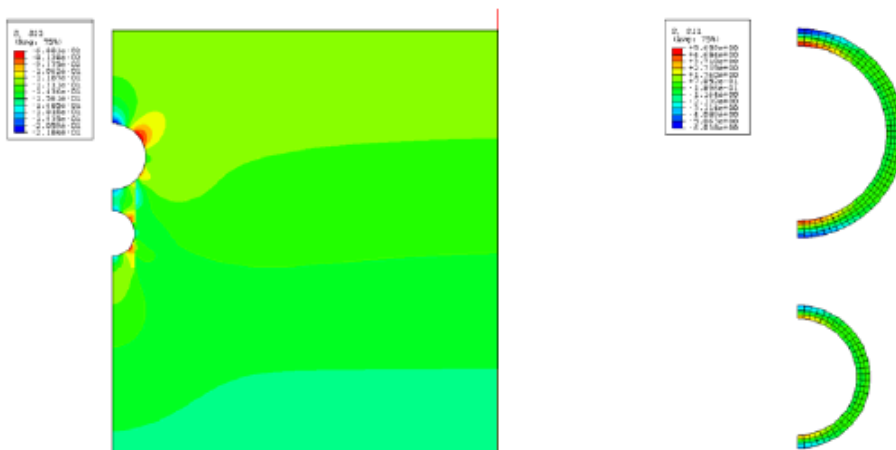


Bild 97 Spannungen in Boden und Rohr, Steinzeug, Einbaufall III,  $h = 0,5 \text{ m}$

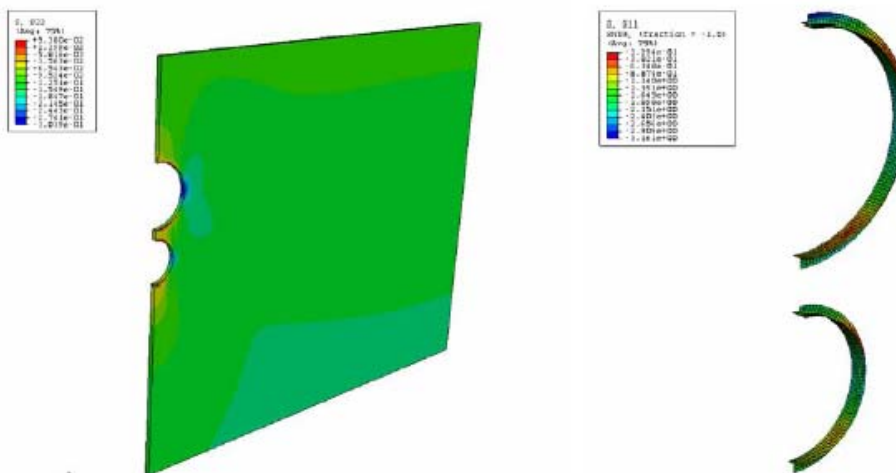
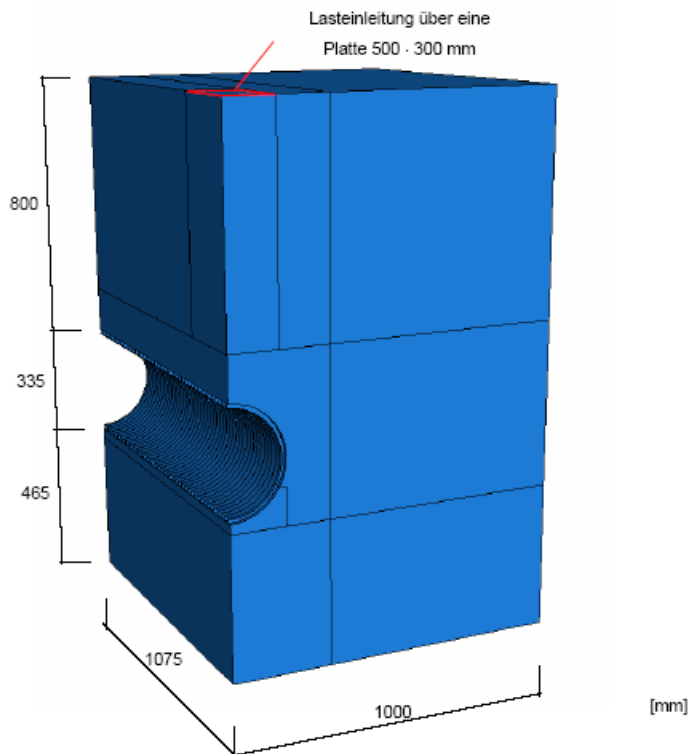


Bild 98 Spannungen in Boden und Rohr, PP, Einbaufall III,  $h = 0,5 \text{ m}$

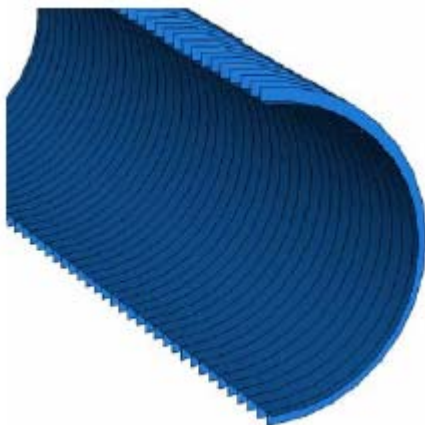
## 8.5 Berechnungen zu den Sandkastenversuchen

Für die im Abschnitt 5.4 beschriebene Versuchssituation wird ein zugehöriges FE-Modell mit einem Rohr DN 300 Ultra-Rib II auf einem EPS-Bettungskissen und 0,8 m Überdeckungshöhe entwickelt.



*Bild 99 Finite Element Modell des IKT-Versuchsstandes*

Zur Reduktion des Rechenaufwandes werden die Symmetriebedingungen des Systems genutzt. Das Rohr wird durch ein Faltnetz modelliert.



*Bild 100 Profiliertes Rohr, Faltnetzmodell*

Für den Boden und den Rohrwerkstoff wurden folgende Materialkennwerte angesetzt:

Boden: Für die Berechnung wird ein Boden der Bodengruppe 1 mit einer Verdichtung von  $D_{Pr} = 97 \%$  angenommen.

$$E = 23 \text{ N/mm}^2$$

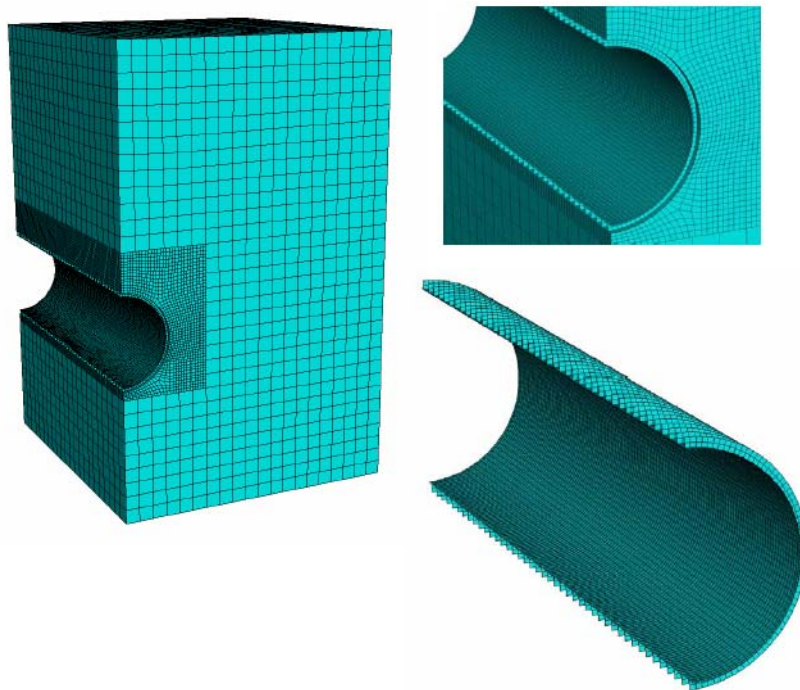
$$\mu = 0,2$$

Rohr: Für die Berechnung wird der Kurzzeit-E-Modul für PP angenommen.

$$E = 1.250 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu = 0,35$$

Im Bild 101 ist das vernetzte FE-Modell dargestellt.



*Bild 101 Vernetztes FE-Modell*

Bei 0,8 m Überdeckung und einer Verkehrsbelastung durch einen SLW60 muss bei einer Größe der Lasteinleitungsplatte von 0,3 x 0,5 m eine Pressenkraft von ca. 400kN eingeleitet werden, um eine vergleichbare vertikale Bodenspannung direkt über dem Rohr zu erzielen. Die Ergebnisse der Berechnungen sind im Bild 102 bis Bild 105 dargestellt.

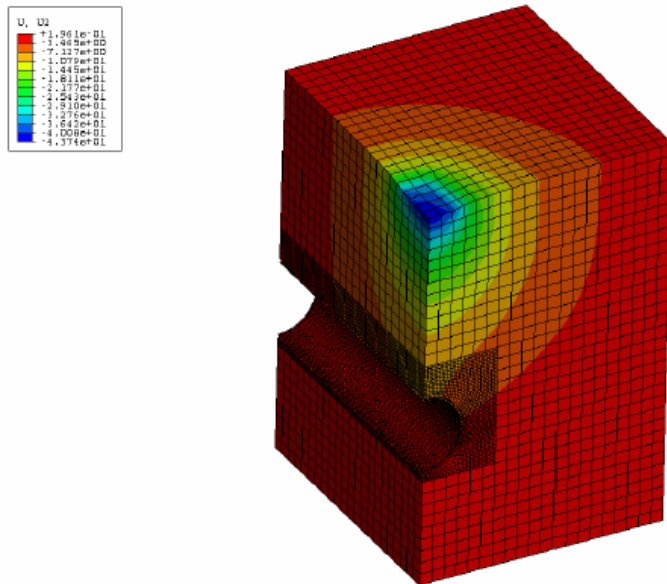


Bild 102 Vertikale Verformungen am gesamten Modell

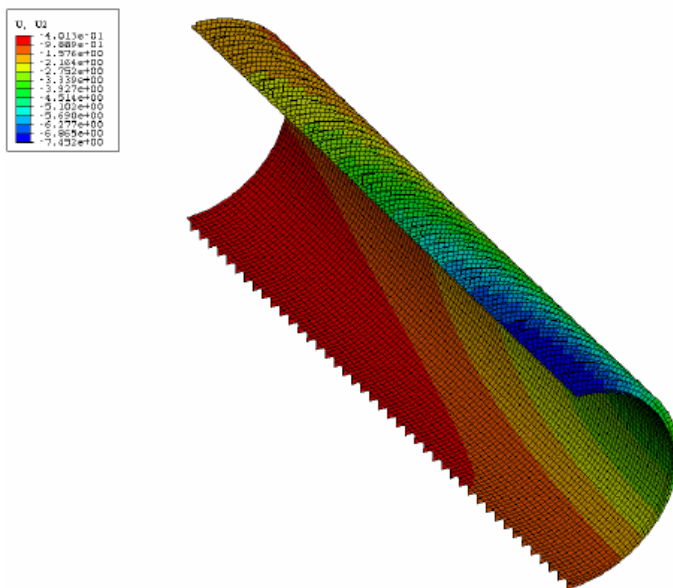


Bild 103 Vertikale Verformungen im Rohr

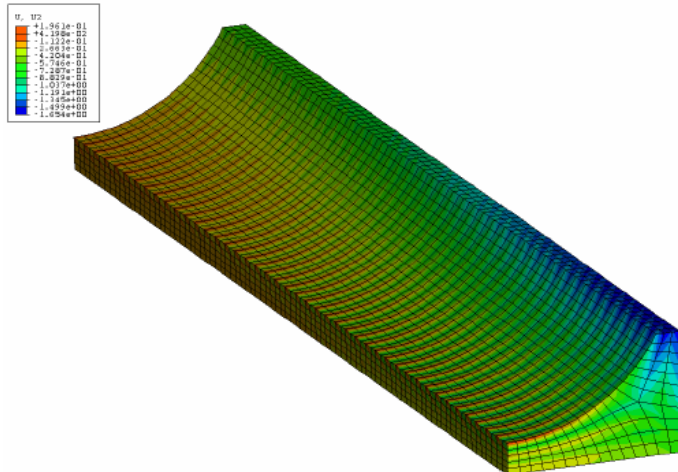


Bild 104 Verformungen im EPS-Kissen

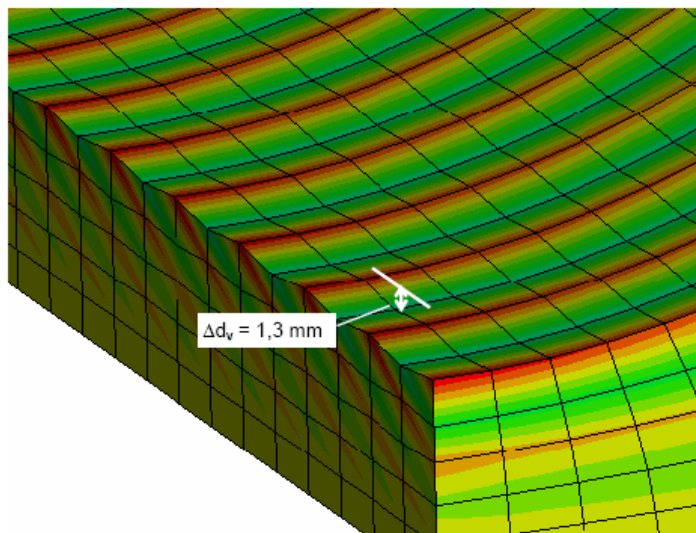


Bild 105 Verformung des EPS-Kissens durch die Rohrrippen

Tabelle 21 Vergleich der Verformungen und Dehnungen (FEM - Versuche nach Abschnitt 5.4)

|           | Prüflast | Vertikale Verformung im Rohr | Dehnung im Scheitel | Dehnung im Kämpfer | Dehnung in der Sohle |
|-----------|----------|------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| C, I, EPS |          | $\Delta d_v$                 | $\epsilon$          | $\epsilon$         | $\epsilon$           |
|           | kN       | mm                           | %                   | %                  | %                    |
| FEM       | 400      | 6,3                          | +0,19               | -0,64              | -0,33                |
| Versuch   |          | 3,1                          | +0,24               | -0,39              | -0,06                |

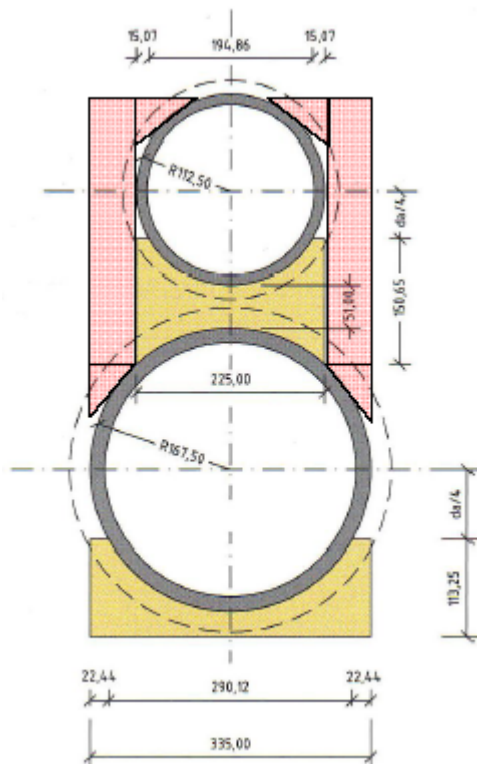
Die Berechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchen (Tabelle 21). Ursache für die beobachteten Abweichungen sind vermutlich die geringeren Verfor-



mungen in den Versuchen, welche aus den Einbau- und Belastungsbedingungen resultieren können. Diese konnten in den Berechnungen nicht 1:1 nachgebildet werden.

## 8.6 Auftriebssicherheit

Aufgrund des geringen Gewichtes der EPS-Bettungskissen und der möglichen Anordnung von zwei übereinander liegenden Rohren wird die Auftriebssicherheit bei einer Überdeckungshöhe von  $h = 0,5$  m berechnet.



**Bild 106** Querschnitt von zwei übereinander verlegten Rohren mit EPS-Kissen (Einbaufall II, Ultra Rib II)

Für die Berechnung wird die im Bild 106 dargestellte Kombination aus zwei Rohren und zwei Bettungskissen untersucht. Die Eigenlast der Rohre und der Kissen wird vernachlässigt.

Die wirksamen Querschnittsflächen ergeben sich zu:

|                 |                     |   |                        |
|-----------------|---------------------|---|------------------------|
| DN 200:         | A                   | = | 0,03976 m <sup>2</sup> |
| DN 300:         | A                   | = | 0,08814 m <sup>2</sup> |
| oberes Kissen:  | A                   | = | 0,01942 m <sup>2</sup> |
| unteres Kissen: | A                   | = | 0,02107 m <sup>2</sup> |
|                 | A <sub>gesamt</sub> | = | 0,1684 m <sup>2</sup>  |

Daraus ergibt sich eine Auftriebskraft von  $F_{\text{Auftrieb}} = 1,684$  kN/m.

Für die Berechnung der erforderlichen Auflast wird nur die Erdüberschüttung über dem oberen Rohr mit einer Breite von  $b = 0,335 \text{ m}$  angesetzt. Zusätzlich gelten als Auflast die in Bild 45 rot dargestellten Bereiche ( $A_{\text{Seitlich}} = 0,042 \text{ m}^2$ ).

Bei einer Bodenwichte von  $\gamma_B = 10 \text{ kN/m}^3$  (Bodenwichte unter Auftrieb) ergibt sich bei einer Überdeckung von  $0,5 \text{ m}$  eine dem Auftrieb entgegenwirkende Auflast von:

$$F_{\text{Auflast}} = (b \cdot h + A_{\text{Seitlich}}) \cdot \gamma_B = (0,335 \cdot 0,5 + 0,042) \cdot 10 = 2,1 \text{ kN/m}$$

Damit folgt der Nachweis für die Auftriebsicherheit mit einem erforderlichen Sicherheitsbeiwert von  $\gamma = 1,1$ .

$$\frac{F_{\text{Auflast}}}{F_{\text{Auftrieb}}} = \frac{2,1}{1,68} = 1,25 > 1,1 \quad \text{Nachweis erfüllt}$$

## 8.7 Kriecheinflüsse

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die in [40] empfohlene Dehnungsbegrenzung auf  $1,5 \%$  zur Vermeidung von Kriech- bzw. plastischen Verformungen überschritten wird. Daher wird im folgenden der Einfluss von Kriechverformungen im EPS-Kissen auf die Spannungen in der Rohrwand beispielhaft untersucht.

Mit den Angaben in [34] wird in das Finite Element Modell ein viskoelastisches Materialgesetz aufgenommen.

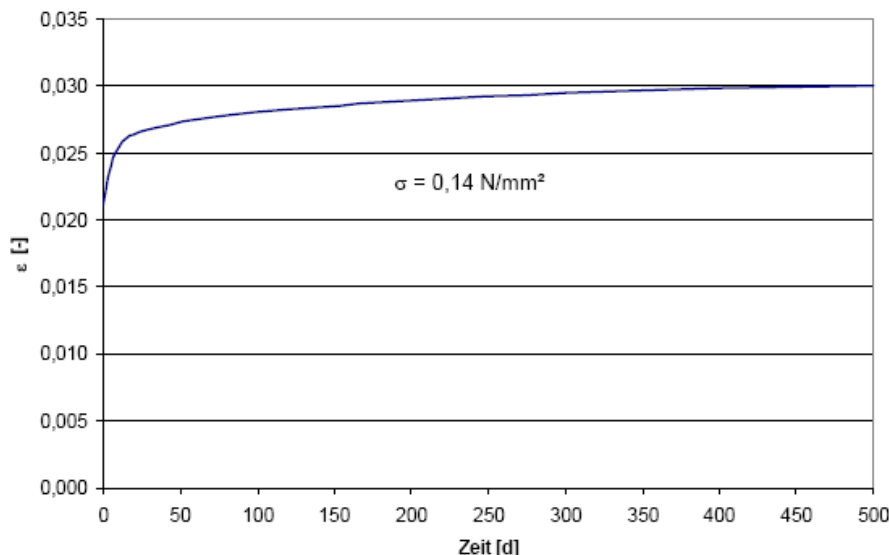
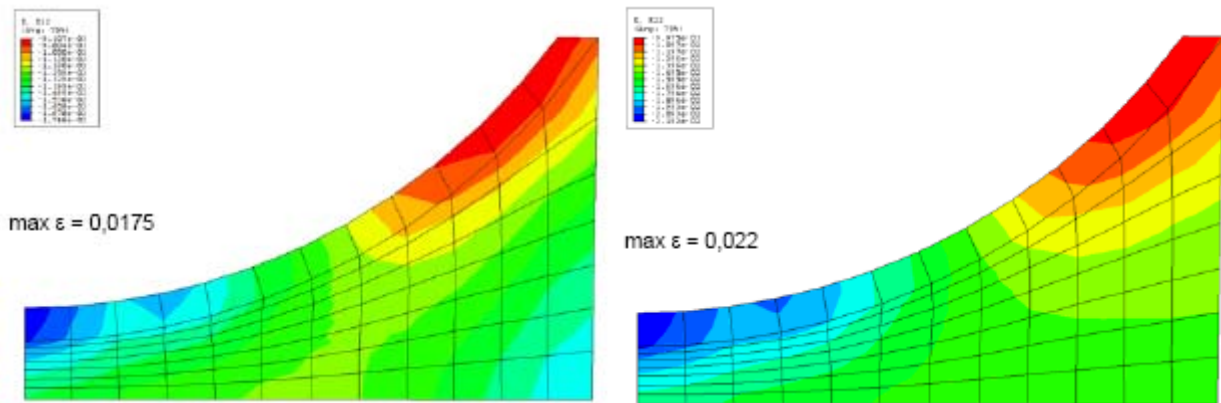


Bild 107 Zeitabhängiges Dehnungsverhalten von EPS 30 unter konstanter Belastung [34]

Die Berechnung wird beispielhaft für ein PVC-Rohr DN 300, Einbaufall I und  $0,5 \text{ m}$  Überdeckungshöhe durchgeführt. Es wird entsprechend den zur Verfügung stehenden Zeitstandkurven in [34] eine Belastungszeit von  $500 \text{ Tagen}$  zugrunde gelegt.



a) bei  $t \approx 0,1 h$

b) bei  $t = 500 d$

**Bild 108 Vertikale Dehnung im EPS-Bettungskissen**

Wie im Bild 108 zu erkennen ist, nehmen die vertikalen Dehnungen bei einem viskoelastischen Werkstoffgesetz um ca. 25 % zu. Die Auswirkungen der Dehnungszunahme im EPS-Kissen auf die Rohrspannungen sind in Tabelle 22 angegeben.

**Tabelle 22 Ergebnisse für die Rohrspannungen, Einbaufall I,  $h = 0,5 m$**

| Rohr<br>I | Bettungs-<br>material | Zeit | Spannung an der Innenseite |                   |                   | Spannung an der Außenseite |                   |                   |
|-----------|-----------------------|------|----------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
|           |                       |      | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             | Scheitel                   | Kämpfer           | Sohle             |
| h = 0,5 m |                       | d    | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>          | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| A<br>PVC  | EPS                   | 0    | -0,03                      | -4,74             | -0,97             | -4,56                      | -0,18             | -3,69             |
|           | EPS                   | 500  | -0,04                      | -4,74             | -1,03             | -4,57                      | -0,19             | -3,65             |
|           | Boden                 | 0    | -0,07                      | -4,82             | -1,33             | -4,62                      | -0,21             | -3,45             |

Die beispielhafte Berechnung mit einem zeitabhängigen Werkstoffgesetz zeigte, dass die zusätzlichen Verformungen im EPS-Kissen nur wenig Einfluss auf die Spannungen in der Rohrwand haben.

### 8.8 Fazit

Es wurden die Bettungseigenschaften von EPS-Kissen durch Berechnungen mit der Finite Element Methode untersucht.

In den Berechnungen wurden drei verschiedene Rohrtypen berücksichtigt:

- A: Glattwandige PVC-Rohre
- B: Glattwandige Steinzeugrohre
- C: Profilierte PP-Rohre (Ultra Rib II)

Für alle Rohrtypen wurden jeweils drei verschiedene Einbaufälle betrachtet:

- Einbaufall I: DN 300 Einzelrohr
- Einbaufall II: DN 200 über DN 300 eingebaut
- Einbaufall III: DN 300 über DN 200 eingebaut

Für alle Rohrtypen wurden die Bettungsarten

- EPS-Kissen
- Boden

und die Überdeckungshöhen

- min  $h = 0,5$  m
- max  $h = 3,5$  m

variiert.

Obwohl das Verformungsverhalten der EPS-Kissen und des Bodens unterschiedlich ist, sind die Rohrbeanspruchungen vergleichbar. Durch den Einsatz eines EPS-Kissens werden die Vertikalverschiebungen der Rohrleitung (Setzungen) insbesondere bei biegesteifen Rohren geringfügig vergrößert.

Die Dehnungen der EPS-Kissen überschreiten örtlich in allen untersuchten Fällen den in [40] empfohlenen Maximalwert von 1,5 %. Die linienförmige Auflagerung auf den Rippen profilierter Rohre führt beispielsweise zu einer örtlichen Stauchung von 2,6 % im EPS-Kissen. Beim Einsatz der EPS-Kissen zur Bettung von Ultra-Rib-Rohren muss daher mit lokalen plastischen Verformungen und Kriechverformungen gerechnet werden.

Die Berechnung in Abschnitt 8.7 mit einem viskoelastischen Werkstoffgesetz zeigt, dass die zeitabhängigen Kriechverformungen im EPS-Kissen nur einen geringen Einfluss auf die Spannungen in der Rohrwand haben. Die Materialkennwerte in [34] und [40] beziehen sich auf einen einaxialen Spannungszustand, so dass für Aussagen zum Langzeitverhalten von EPS-Kissen bei mehraxialer Belastung noch ergänzende Versuche erforderlich sind.

Die Ergebnisse der statischen Berechnungen gelten nur für die beschriebenen Randbedingungen. Stellen sich durch Produktumstellungen oder bei bekannt werden anderer Lastzustände andere Werte heraus, so sind erneute Berechnungen durchzuführen. Hierzu gehören auch größere Toleranzen zwischen den Radien der Rohre und dem Bettungskissen.

## 9 Bewertung und Praxishinweise

Im Forschungsprojekt wurde die grundsätzliche Eignung von EPS-Bettungskissen für den Einsatz im Leitungsbau überprüft. Hierzu wurden Literaturrecherchen angestellt, Kurz- und Langzeit-Laborprüfungen sowie FE-Berechnungen durchgeführt und In-situ-Einsätze auf Baustellen begleitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes bezogen auf folgende Aspekte in Form von Empfehlungen zusammengefasst:

- ⇒ **Statische Nachweise,**
- ⇒ **Verlegung,**
- ⇒ **Dauerhaftigkeit.**
- ⇒ **Qualitätssicherung,**

### 9.1 Statische Nachweise

Die Bettungskissen nehmen im Leitungsgraben zwei Aufgaben wahr (vgl. Bild 109):



Rohraufleger  
Tragschicht

*Bild 109 Aufgaben der Bettungskissen im Leitungsgraben*

Zum einen bilden sie im Sinne des **Rohrauflegers** unmittelbar am Rohr den vorgesehenen Auflagerwinkel nach. Das Rohr wird auch im Zwickelbereich gleichförmig abgestützt und eine Auflockerung des Bodens in diesem häufig unzureichend verdichteten Bereich wird vermieden.

Unter der Rohrsohle wirkt das Bettungskissen als gleichförmige **Tragschicht**, über die die vertikalen Lasten - wie im Erdbau mit EPS-Platten üblich - in den Boden abgetragen werden.

**Der statische Nachweis wird für beide Systemanforderungen getrennt geführt.** Ergänzend wird für das Gesamtsystem auf den Lastfall Auftrieb und den Nachweis bei zweilagiger Verlegung eingegangen.

#### Tragschicht:

Zu Beginn der zu erwartenden vertikalen Gesamtbelastung sollten die Kissen in der Tragschicht unter der Rohrsohle nur im elastischen Bereich beansprucht werden, d.h.



mit  $\varepsilon < 1,5 \%$ . Über die Nutzungsdauer sind die maximalen Verformungen dann unter der Berücksichtigung eines EPS-typischen Sicherheitsansatzes auf 10 % zu beschränken.

Der **Nachweis der elastischen Anfangsverformung** wird z.B. für den Werkstoff EPS 35 mit  $E = 12,1 \text{ N/mm}^2$  bei maximal 4 m Überdeckung einschließlich Verkehrslast ( $\approx 0,12 \text{ MPa}$ ) über folgende Beziehung geführt:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_{EPS35}} \cdot \gamma_A = \frac{0,12}{12,1} \cdot 1,5 = 1,49\% < \varepsilon_{el} = 1,5\%$$

Bis zum Vorliegen weiterer praktischer Erfahrungen für den jeweiligen Anwendungsfall wird als pauschaler Sicherheitsbeiwert  $\gamma_A = 1,5$  vorgeschlagen.

Die **Langzeitverformungen** der Tragschicht sind dem nachfolgenden Sicherheitskonzept entsprechend auf Basis der Materialparameter des EPS-Herstellers zu beschränken. Beispielhaft wird der Nachweis hier wiederum für den Werkstoff EPS 35 bei einer Vertikalspannung von 0,12 MPa für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren geführt. Die Nachweisgleichung beruht auf dem empirischen Finley-Ansatz (vgl. [19]):

$$\varepsilon_{ty} = \frac{\gamma_S \cdot \sigma}{E} + \gamma_m \cdot m(\gamma_S \cdot \sigma) \cdot (\gamma_T \cdot t)^{b(\gamma_S \cdot \sigma)} \leq \varepsilon_{zul}$$

|      |                                |   |                       |
|------|--------------------------------|---|-----------------------|
| mit: | $\sigma = 0,12 \text{ N/mm}^2$ | Vertikale Bodenspannung auf Verlegeplanum   | vgl. Abschnitt 5.1    |
|      | $E = 12,1 \text{ N/mm}^2$      | Elastizitätsmodul (Kurzzeit) für EPS 35   | vgl. Abschnitt 8.2    |
|      | $t = 50 \text{ Jahre}$         | = 438000 Tage   | Betrachtungszeitpunkt |
|      | $\gamma_S = 1,4$               | Teilsicherheitsbeiwert für die Last   | nach [19]             |
|      | $\gamma_T = 1,5$               | Teilsicherheitsbeiwert für die Lebensdauer  | nach [19]             |
|      | $\gamma_m = 1,3$               | Teilsicherheitsbeiwert für materialspezifische und<br>extrapolationsstatistische Unsicherheiten | nach [19]             |
|      | $m = 0,00075$                  | werkstoffspezifische (Finley) Parameter   | nach [42]             |
|      | $b = 0,25$                     | werkstoffspezifische (Finley) Parameter   | nach [42]             |

Hieraus ergibt sich im Beispiel eine Stauchung nach 50 Jahren von 6,13 %, welche unterhalb des üblicherweise für diese Materialien zulässigen Grenzwerts von 10 % liegt (vgl. [19]). Im vorliegenden Fall würde ein 10 cm dickes Bettungskissen um 0,6 mm gestaucht. Entsprechende Setzungen sind somit vernachlässigbar.

#### Rohraufleger:

Im Rohraufleger müssen die Vertikalkräfte vom Rohr in das Bettungskissen übertragen werden, ohne dessen Druckfestigkeit zu überschreiten. Auch dürfen keine übermäßigen Verformungen auftreten, die zu einer Verringerung des Auflagerwinkels führen. Die durchgeführten Versuche und Berechnungen zeigen für die eingesetzten Produkte, dass eine Vergleichmäßigung lokaler Spannungsspitzen möglich ist, so dass es lediglich im unmittelbaren Kontaktbereich – insbesondere bei Profilrohren – zu plastischen Verformungen kommt. Der gesamte Auflagerbereich verhält sich dann im Mittel ausreichend elastisch, um den angestrebten Auflagerwinkel zu erzeugen.

Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, den statischen Nachweis des Rohrauflegers für die geprüften Produkte in Anlehnung an ATV DVWK A 127 [11] zu führen. Voraussetzung ist die Verwendung einer EPS-Güte von mindestens EPS35 mit einem E-Modul von  $12,1 \text{ N/mm}^2$ . Mit Blick auf die zu erwartenden Lastumlagerungen im Kontaktbereich ist dieser E-Modul mit einer Sicherheit  $\gamma_E = 1,5$  abzumindern. Für die Berechnung kann in diesem Beispiel also ein abgeminderter E-Modul von  $12,1/1,5 \text{ N/mm}^2 = 8 \text{ N/mm}^2$  angesetzt werden. Dieser Wert entspricht nach [11], Tabelle 1 einem Boden der Gruppe G2 mit einer Proktordichte von maximal 95 %, so dass eine fachgerechte Ausführung der Seitenverfüllung zu homogenen Bettungsbedingungen entsprechend ATV DVWK A 127 führt. Damit können die geforderten Einzelnachweise für das Rohr geführt werden.

### Auftrieb

Prinzipiell sollte aufgrund der geringen Dichte des EPS bei geringen Überdeckungen und wirksamem Grundwasser ein **Auftriebsnachweis** entsprechend Abschnitt 8.6 geführt werden. Im Beispiel des Abschnittes 8.6 ist bei einer Überdeckung von mind. 0,5 m die erforderliche Auftriebssicherheit gegeben.

### Zweilagige Verlegung („Doppeldecker“)

Die o.a. vereinfachten Nachweise gelten **nicht** für **übereinander verlegte Rohrleitungen**. Insbesondere lassen sich keine zuverlässigen Parallelen zu den Nachweisen nach ATV-DVWK A 127 ziehen. Im Projekt zeigte sich aber, dass die gewählten Geometrien und Werkstoffeigenschaften einer Berechnung mit der FE-Methode (hier Programmsystem ABAQUS) zugänglich sind. Es wird daher vorgeschlagen, bei dieser Verlegeform grundsätzlich auf einen FE-Ansatz zum Nachweis der jeweils gewählten Struktur zurückzugreifen.

## 9.2 Verlegung

Nach [43] sollten bei der Verlegung von Polsterschichten im Straßenbau die EPS-Blöcke auf einer **Ausgleichsschicht aus Sand** mit einer Ebenflächigkeit von  $\pm 1 \text{ cm}$  auf 4 m verlegt werden. Es wird empfohlen, diese Anforderungen auf den Leitungsbau zu übertragen.

Vor der **Verdichtung** sind die Einzellagen der **Seitenverfüllung** möglichst auf beiden Seiten des Rohrstrangs lose geschüttet einzubauen, um Horizontalverschiebungen der Bettungskissen zu verringern. Im Zuge der Verdichtung ist dann auch auf die Verdichtung der in der Rohrsohle ausgesparten **Rohrverbindungsgebiete** zu achten.

Der **Zuschnitt** der EPS-Bettungskissen kann auf der Baustelle mit einer **Säge** oder mit einem speziellen **Heizdraht** ausgeführt werden.

Für den Fall, dass bei übereinander verlegten Rohren lose EPS-Blöcke aufeinander liegen, können zur **Lagesicherung** z.B. Krallendübel (s. Bild 110) verwendet werden.

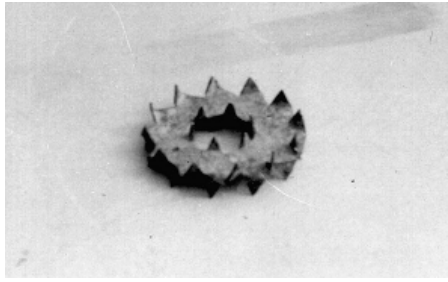


Bild 110 Krallendübel zur Verzahnung aufeinanderliegender EPS-Blöcke [34]

### 9.3 Dauerhaftigkeit

Ein Verrotten des EPS-Materials im unbelasteten Boden und Grundwasser kann aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche ausgeschlossen werden. Kritisch sollten jedoch Verunreinigungen von Boden oder Grundwasser betrachtet werden. Diesbezüglich ist von Fall zu Fall anhand der Stoffe zu entscheiden, ob eine Beeinträchtigung vorliegt. Entsprechende Tabellen mit Informationen zu materialangreifenden Stoffen können beim Hersteller bezogen werden. Eine Temperatureinwirkung durch Ableitung hoch temperierter Abwässer ist bei Bedarf durch weiterführende Untersuchungen zu klären. Zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der Dauerhaftigkeit und Beständigkeit von EPS ist der Einfluss von Strahlung und Witterung durch entsprechende Schutzmaßnahmen, wie z.B. UV-beständige Verpackungen, bei Lagerung und Einbau zu minimieren. **Eine ungeschützte Lagerung ist unbedingt zu vermeiden.**

### 9.4 Qualitätssicherung

Grundsätzlich sollte für den Leitungsbau mindestens die **Qualität EPS 35** eingesetzt werden. Vorzugsweise werden die Kissen geometrien bereits **in Form geschäumt**, um die Rohrkontur im Auflager exakt nachzubilden. Die Auswirkung von Maßtoleranzen wurde im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht, ein Einfluss größerer Abweichungen auf die Tragsicherheit ist aber zu vermuten. Darüber hinaus können so bereits bei der Fertigung qualitätssichernde Informationen für die Verlegung eingeprägt werden. Hier empfehlen sich insbesondere Angaben zur EPS-Qualität (z. B. EPS 35), dem Gewicht je laufenden Meter sowie der einbaubaren Produkte und Nennweiten.

Um das Erkennen abweichender EPS-Qualitäten auf der **Baustelle** zu erleichtern, sollten von den gängigen Werkstoffen vor Ort **Materialmuster** zur vergleichenden Inaugenscheinnahme vorgehalten werden.

Die **Qualität** der gelieferten EPS-Bettungskissen sollte regelmäßig im Rahmen von Produktprüfungen **kontrolliert** werden. Es wird empfohlen z.B. je 100 lfd. m an einem Kissen die Beschriftung, das Gewicht und die Abmessungen sowie die gelieferte Materialqualität stichprobenweise zu überprüfen. Insbesondere die Druckfestigkeit von EPS ist in hohem Maße von den Ausschäum- und Herstellungsbedingungen abhängig. Zur Materialkontrolle bieten sich die Dichtermittlung und Kurzzeit-Druckversuche als kostengünstige Untersuchungen an.

## 10 Zusammenfassung

Derzeit stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren und Bettungsmittel für die Neuverlegung von Abwasserkanälen und –leitungen und deren Einbettung in den Baugrund zur Verfügung. Gerade die Ausführung der Einbettung wirkt sich dabei wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit einer Kanalbaumaßnahme, das Tragverhalten der verlegten Rohre, ihre Wechselwirkung mit dem umgebenden Baugrund und die zu erwartende Nutzungsdauer aus. Eine neuartige, kostengünstige Alternative zur konventionellen Bettung in offener Bauweise bieten speziell geformte Bettungskissen aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS). Diese auf den jeweiligen Rohrdurchmesser angepassten Formteile ersetzen das Verfüllmaterial insbesondere im Zwickel- und Auflagerbereich des Rohres. Ziel des Forschungsprojektes war es, offene Fragestellungen bezüglich des Einsatzes von EPS-Bettungskissen im Leitungsbau zu klären.

Hierzu wurde zunächst der Stand der Technik zusammengetragen (vgl. Abschnitt 3), um anschließend die bekannten mechanischen Eigenschaften zusammenzustellen und bezüglich ihrer Verwendbarkeit für den vorliegenden Anwendungsfall zu analysieren (vgl. Abschnitt 4). Da das Material bereits im Straßen- und Erdbau für lastabtragende Elemente genutzt wird, liegen mit Blick auf das Langzeitverhalten bereits umfangreiche Erfahrungen vor. Vor diesem Hintergrund wurden Prüfungen und Versuche für den vorliegenden Anwendungsfall konzipiert, durchgeführt und ausgewertet.

Zunächst wurden Druckversuche an würfelförmigen Proben unterschiedlicher EPS-Qualitäten durchgeführt, um deren Eigenschaften im Kurzzeitversuch zu quantifizieren (vgl. Abschnitt 5.1). Zur weiterführenden Analyse wurden Langzeitversuche mit einer Dauer von 10 Monaten durchgeführt. Hier wurden Komplettsysteme aus Rohren und Bettungskissen unterschiedlicher Werkstoffe bzw. Qualitäten untersucht (vgl. Abschnitt 5.2).

Außerdem wurden Kurzzeit-Scheiteldruckversuche an einzelnen und übereinander angeordneten Rohren durchgeführt. Hierbei wurden wiederum Rohrwerkstoffe, EPS-Qualitäten und Belastungen variiert. Zusammenfassend konnten bei allen Rohrwerkstoffen und EPS-Qualitäten Kontaktspannungen über den geometrisch vom Bettungskissen vorgegebenen Auflagerwinkel beobachtet werden. Bei den biegesteifen Rohren war eine Konzentration der Spannungen in der Sohle festzustellen, während es bei den biegeweichen Rohren infolge der Ovalisierung der Rohre zu einer Entlastung im Sohlbereich und einer Erhöhung der Spannungen im Randbereich kam. Im Falle außen gerippter Rohre zeigten sich deutlich Spannungsspitzen im Kontaktbereich der Profilrippen (vgl. Abschnitt 5.3).

Schließlich wurden Versuche im Maßstab 1:1 mit Sandbettung durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.4). Hierbei wurde der Boden bei einer Versuchsserie nach DIN EN 1610 [6] verdichtet. Bei einer zweiten Serie wurde der Boden lediglich locker eingefüllt und nach einer Überschüttung von 0,5 m über dem Rohr verdichtet. Im Anschluss wurden auftre-

tende Horizontalverschiebungen bis zur vollständigen Verfüllung des Rohrgrabens gemessen. Sowohl die Verdichtung in der Leitungszone als auch die unterschiedlichen Rohr-Kissen-Systeme hatten nur einen geringen Einfluss auf die horizontale Lagegenauigkeit der Rohre. Nach dem Einbau der Lastplatten auf der Bodenoberfläche wurden über den Hydraulikzylinder Kräfte aufgebracht, die größere Tiefenlagen bzw. Verkehrsbelastungen statisch simulierten. Die Verformungen der biegeweichen Rohre und die Dehnungen der biegesteifen Rohre während der Versuchsdurchführung wurden messtechnisch erfasst.

Zur Beurteilung des praktischen Einsatzes der Bettungskissen wurden verschiedene Baumaßnahmen begleitet und wesentliche Bauphasen dokumentiert (vgl. Abschnitt 6). Bettungskissen aus expandierbarem Polystyrol (EPS) sind unter In-situ-Bedingungen auf der Baustelle einfach zu handhaben. In allen Einbausritten von der Lagerung und dem Transport über den Bodenaushub, den Einbau, die Verfüllung und Verdichtung des Bodens bis zum Austausch eines defekten Rohrabschnittes ist der Einsatz der EPS-Kissen leicht und ohne zusätzlichen Aufwand in die üblichen Bauabläufe zu integrieren. Die Nutzung von EPS-Bettungskissen stellt insbesondere bei der Herstellung von definierten, gleich bleibenden Bettungsbedingungen eine signifikante Vereinfachung dar. Die oft schwierige Verdichtung des Zwickelbereichs entfällt völlig. Im Vergleich zur gängigen Vorgehensweise bei der Herstellung der Rohrbettung konnte auf den begleiteten Baustellen durch den Einsatz der EPS-Bettungskissen zum Teil eine deutliche Verringerung des Zeit- und Kostenaufwandes verzeichnet werden.

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit und der Beständigkeit gegenüber anwendungsspezifischen Einflüssen wurden diesbezügliche Herstellerangaben und Literaturquellen recherchiert und analysiert (vgl. Abschnitt 7). Ein Verrotten des Materials im unbelasteten Boden und Grundwasser kann aufgrund der Ergebnisse der Literaturrecherche ausgeschlossen werden. Kritisch sollten jedoch Verunreinigungen von Boden oder Grundwasser betrachtet werden. Diesbezüglich ist von Fall zu Fall anhand der Stoffe zu entscheiden, ob eine Beeinträchtigung vorliegt. Entsprechende Tabellen mit Informationen zu materialangreifenden Stoffen können beim Hersteller bezogen werden. Eine Temperatureinwirkung durch Ableitung hoch temperierter Abwässer ist bei Bedarf durch weiterführende Untersuchungen zu klären. Zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der Dauerhaftigkeit und Beständigkeit von EPS ist der Einfluss von Strahlung und Witterung durch entsprechende Schutzmaßnahmen bei Lagerung und Einbau zu minimieren.

Auf Basis der ermittelten Daten wurden FE-Berechnungen unter unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. (vgl. Abschnitt 8). Die Ergebnisse wurden mit Berechnungen nach ATV DVWK A 127 unter Annahme einer Kies-Sand Bettung mit dem aus der Kissenometrie resultierenden Auflagerwinkel verglichen. Im Ergebnis entsprechen die Ergebnisse aus der Berechnung von Rohren, welche mit EPS-Bettungskissen verlegt wurden, denen nach ATV DVWK A 127 für eine Kies-Sand-Bettung, sofern der Auflagerwinkel der Kissenometrie entsprechend gewählt wird. Beispielhafte Auftriebsberechnungen ergaben, dass für Rohre DN 300 auch bei zweilagiger Verlegung



bereits eine Bodenüberdeckung von etwa 50 cm zum Ausgleich des Auftriebs ausreichen kann. Während des Rohreinbaus oder bei Aufgrabungen in der unmittelbaren Nähe muss der Rohrgraben allerdings wasserfrei gehalten werden.

Abschließend wurden die gewonnenen Erkenntnisse bewertet und entsprechende Praxishinweise zur statischen Berechnung, Verlegung, Dauerhaftigkeit und Qualitätssicherung zusammengefasst (vgl. Abschnitt 9).

## 11 Literatur

- [1] Bosseler, B.; Birkner, T.; Sokoll, O.; Brüggemann, T.: Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) bei den kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in NRW"; im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen; Dezember 2003.
- [2] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 1999.
- [3] Triantafyllidis, Th.; Bosseler, B.; Arsic, I.; Liebscher, M.: Ausführungsrisiken beim Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau. Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, 2006. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW.
- [4] DIN EN 13163: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) – Spezifikation; Deutsche Fassung. 2001.
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau: Merkblatt für die Verwendung von EPS-Hautschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen. Ausgabe 1995.
- [6] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen. 10/1997.
- [7] ZTVE StB 94: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Fassung 1997.
- [8] Köhler, R.: Tiefbauarbeiten für Rohrleitungen. 6. Aufl., Verlagsgesellschaft Rolf Müller, 1997.
- [9] Stecha, H.: Bettung der Rohre, Verfüllung, Verdichtung. In Köhler, R. (Hrsg.); Tiefbaupraxis für Abwasserkanäle, Vulkan-Verlag Essen, 2000.
- [10] Stein, D.: Entwicklung neuartiger Konzeptionen für Rohre aus Beton. Schlussbericht, Bundesminister für Forschung und Technologie, 1992.

- [11] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen. 3. Auflage, Hennef 8/2000
- [12] DIN 1998: Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen; Richtlinien für die Planung. 5/1978.
- [13] Information der Fa. Mono-Systeme, Ruhstorf a. d. Rott.
- [14] Technische Information TI T-801 d: Fahrbahnbau / Dämmung und sonstige Bauverwendung. BASF 11/1998
- [15] Tepper, H.: EPS im Straßenbau, eine expandierte Anwendung. Fachtagung „EPS-Partikelschaum“. Würzburg 4/2004.
- [16] Schwenk Dämmtechnik „Geo-Blöcke“. [www.schwenk.de](http://www.schwenk.de).
- [17] Internetseite des IVH Industrieverbands Hartschaum e.V. und des IK Industrieverband Kunststoffverpackungen e.V. <http://www.styropor-verpackungen.de>
- [18] Internetseite der Firma Saint Gobain & Rigips; <http://www.rigips.de>. Stand 8/2006.
- [19] Krollmann, N.: Verhalten von EPS-Hartschaumstoffen unter langzeitiger Druckbeanspruchung. Bauphysik 28 (2006), Heft 3. Berlin 2006.
- [20] DIN EN 1606:1997-01: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung. Berlin: Beuth-Verlag, 1997.
- [21] DIN EN 826:1996-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung. Berlin: Beuth-Verlag, 1996.
- [22] Krollmann, N.; Kerth, S.: Verhalten von Polystyrol-Extruderschaumstoff unter Langzeit-Druckbeanspruchung. Technischer Bericht FPX Nr. 5/1998, Fachvereinigung Polystyrol-Extruderschaumstoff FPX, Frankfurt 1998.
- [23] Sarabi, B.: Das Anstrengungsverhalten von Polymerwerkstoffen infolge ein- und zweiachsigen Kriechens – Ermittlung von Langzeitkennwerten. Technisch – wissenschaftlicher Bericht des Instituts für Werkstofftechnik, Universität Kassel, 1994.
- [24] Becker, G.; Braun, D.: Polystyrol Kunststoff Handbuch Band 4. München: Carl Hanser Verlag, 1996, S. 219-229.
- [25] Müller, D.; Schmitt, D.; Schneider, W.: Untersuchung des Verhaltens von Kunststoffen bei langzeitiger statischer Beanspruchung. Materialprüfung 23 (1981) Nr. 12.

- [26] Krollmann, N.: Langzeitverhalten von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum bei konstanter und zyklisch wechselnder Druckbeanspruchung. Bauphysik 17 (1995) H. 1, S. 11-16-
- [27] Rackwitz, R.: Gutachterliche Stellungnahmen zum Sicherheitskonzept für die Anwendung von Polystyrol-Extruderschaumstoff unter lastabtragenden Gründungsplatten. Technische Universität München, Institut für Tragwerksbau, 10.08.1998 und 01.02.1999.
- [28] DIN EN ISO 9969: Thermoplastische Rohre – Bestimmung der Ringsteifigkeit. Berlin, 8/1995.
- [29] DIN EN 295: Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und –kanäle. 1991.
- [30] Osebold, R.; Kelleter, M.: Verbesserung der Verlegequalität von Abwasserrohren aus Kunststoff insbesondere unter den Aspekten Langzeitverhalten und Wirtschaftlichkeit. RWTH Aachen, Januar 2006.
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4094-2: Baugrund, Felduntersuchungen, Teil 2: Bohrlochrammsondierung; Ausgabe Mai 2003, Beuth Verlag, Berlin.
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18134: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch; Ausgabe September 2001, Beuth Verlag, Berlin.
- [33] Untersuchungsbericht zu Verdichtungskontrollen im Baugebiet „In der Flage“, Rödinghausen-Bieren vom 24.05.2005; GeoAnalytik, Dr. Loh, Beratende Geologen + Ingenieure, Stewede.
- [34] BASF: Styropor – Technische Informationen; Edition 2001 auf CD-Rom.
- [35] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 50035-1: Alterung – Grundbegriffe, Ausgabe März 1989; Beuth Verlag; Berlin.
- [36] Seminarunterlagen zum Weiterbildungsseminar „Langzeit- und Alterungsverhalten von Kunststoffen“
- [37] Falter, B.; Holthoff, F.: Statische Berechnungen zu Rohrbettungssystemen mit EPS-Kissen. Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen. Münster 11/2006.

- [38] Schneider, Bautabellen für Ingenieure, 17. Auflage. Werner Verlag 2006.
- [39] Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, 15. Auflage, Ernst & Sohn 1995
- [40] Merkblatt für die Verwendung von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen (1995), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [41] ABAQUS/Standard; Version 6.5; Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.; Handbuch; 2005
- [42] Informationen der BASF, Ludwigshafen 2007.
- [43] Beinbrech, G.; Hohwiller, F.: Hartschaum aus Styropor<sup>®</sup> als Deformations- und Polsterschicht. Tiefbau, Heft 6/1998.