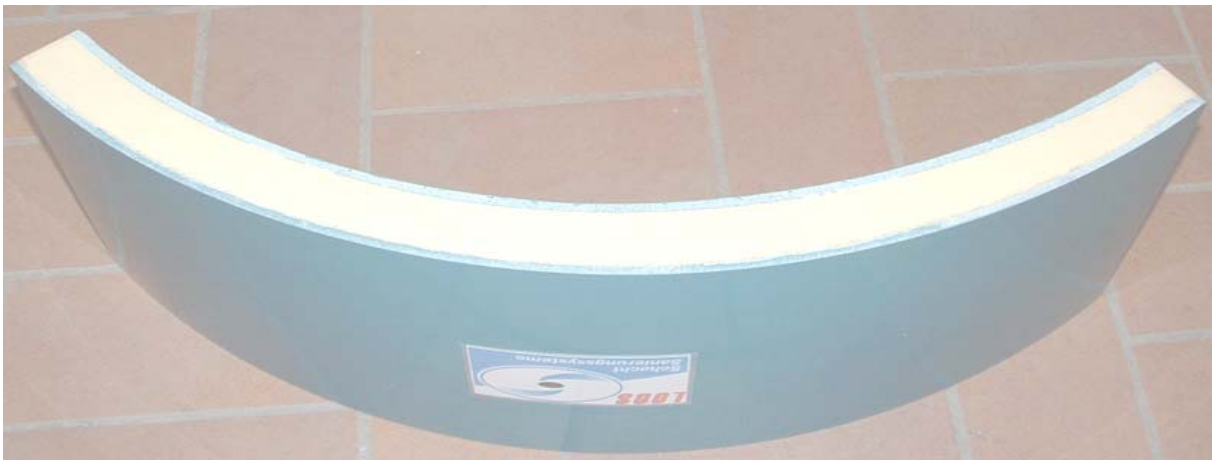
neutral
unabhängig
gemeinnützig

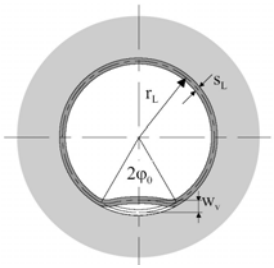
IKT-Institut für
Unterirdische Infrastruktur

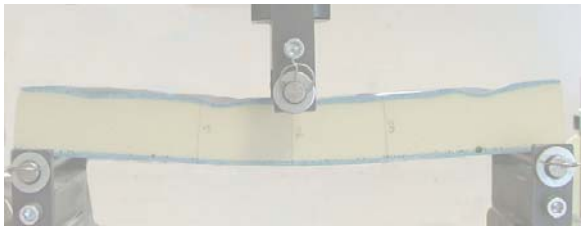
Kurzbericht

„Sandwich-Beschichtung“ für Abwasserschächte

Teil I:
Werkstoff- und Verfahrensprüfungen
sowie Grundlagen der Berechnung







Bosseler, B.; Puhl, R.
Gelsenkirchen, Juni 2005

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

Fördernde Stelle

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

Bearbeitung

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Wissenschaftliche Leitung

Dr.-Ing. Bert Bosseler

Projektleitung und Bearbeitung

Dipl.-Ing. René Puhl

Dipl.-Ing. Vladislav Koutsenok

Wir danken Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Meschke, Lehrstuhl für Statik und Dynamik der Ruhr-Universität-Bochum, für die numerischen Untersuchungen im Rahmen des Abschnitts 3.2.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

1 VERANLASSUNG, ZIELSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE 1

2 WERKSTOFF- UND VERFAHRENSPRÜFUNGEN 3

2.1 GRUNDLAGEN, MATERIALAUSWAHL UND QUERSCHNITTSGESTALTUNG 3

2.2 HERSTELLUNG ERSTER PROBEKÖRPER UND MATERIALPRÜFUNGEN 5

2.3 ERSTER IN-SITU-BESCHICHTUNGSTEST 11

3 ENTWICKLUNG EINES BERECHNUNGSVERFAHRENS 13

3.1 AUSWAHL EINES GEEIGNETEN BERECHNUNGSANSATZES 13

3.2 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN 15

4 FAZIT UND AUSBLICK 23

5 LITERATUR 26

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

1 Veranlassung, Zielstellung und Vorgehensweise

Als einziger Zugang zum Kanalisationssystem dienen Schächte der Kontrolle, Reinigung und Sanierung der Kanäle sowie der Belüftung des Abwassers. Da Schächte in der Regel im Straßenquerschnitt angeordnet sind, dürfen Sie die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer nicht beeinträchtigen. Schächte müssen daher nicht allein umweltrelevante Kriterien erfüllen, sondern darüber hinaus auch standsicher und tragfähig für die auftretenden Belastungen sein.

Die Gesamtzahl der Schächte in öffentlichen Verkehrsflächen lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland mit ca. 10 Mio. bzw. für Nordrhein-Westfalen mit ca. 2 Mio. abschätzen (vgl. [1], [2]). Ein konkreter Handlungsdruck ergibt sich für die Netzbetreiber aus der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) [3]. Diese fordert die vollständige Aufnahme des baulichen und betrieblichen Zustands des Kanalnetzes sowie der mit diesen verbundenen Bauwerken der Ortsentwässerung bis zum 31.12.2005. Werden Undichtigkeiten am Schachtkörper oder ein schadhafter Allgemeinzustand des Schachtes festgestellt, sind gemäß Runderlass [4] des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) Abdichtungs- und Instandsetzungmaßnahmen vorzunehmen.

Zur Wiederherstellung der Dichtheit, Funktionsfähigkeit und Standsicherheit von Abwasserschächten werden heute fast ausschließlich Beschichtungs- und Auskleidungsverfahren eingesetzt, die in vielen Fällen eine kostengünstige Alternative zur Erneuerung der schadhaften Schächte darstellen. Die bisher am Markt verfügbaren Beschichtungsverfahren zeigen allerdings Schwächen hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit und Verbundverhalten zum alten Beton- oder Mauerwerksschacht (Mörtelbeschichtungen) bzw. tragen aufgrund der geringen Wanddicke nicht zur Wiederherstellung oder Verbesserung der statischen Tragfähigkeit bei (Polyurethanbeschichtungen) (vgl. [5], [6]). Auskleidungen mit z.B. Kombinationssystemen aus Polyethylen (PE)-Noppenbahnen und Mörtel werden aufgrund der PE-Innenauskleidung zwar als grundsätzlich korrosionsbeständig und aufgrund der Mörtelschicht als grundsätzlich mittragend angesehen, allerdings existieren bis heute keine zuverlässigen Nachweisverfahren zur Bewertung der langfristigen Funktionalität der im Mörtel über Noppen verankerten PE-Bahn.

Die Netzbetreiber stehen damit vor der Problematik, dass derzeit am Markt keine Sanierungssysteme für Abwasserschächte verfügbar sind, die sowohl sicher korrosionsbeständig als auch nachweisbar tragfähig sind.

Vor diesem Hintergrund beauftragte das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) das IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur mit dem Forschungsprojekt „Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung und Berechnung einer selbsttragenden, korrosionsbeständigen

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

„Sandwich-Beschichtung“ für Abwasserschächte“ (Aktenzeichen IV-9-041 105 0160), dessen erste Ergebnisse in dieser Kurzfassung des Teilberichtes dargestellt sind. Die vollständige Darstellung der Ergebnisse findet sich in [7].

Ziel des ersten Teilschrittes ist es, Grundlagen für die Herstellung und den rechnerischen Nachweis einer selbsttragenden und korrosionsbeständigen Sandwich-Beschichtung für Abwasserschächte zu erarbeiten.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde die folgende **Vorgehensweise** gewählt: Zunächst wurden in Abstimmung auf die verfahrenstechnischen Möglichkeiten und unter Abwägung wirtschaftlicher und betriebstechnischer Belange erste Grundvariationen bzgl. der Geometrie und der Werkstoffzusammensetzung des Sandwich-Körpers festgelegt und grundsätzlich geeignete Materialien ausgewählt. Anschließend wurden erste Probekörper aus diesen Materialien hergestellt und die wesentlichen Materialkennwerte sowie das grundsätzliche Materialverhalten bestimmt. Zur Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für die statische Tragfähigkeit der Sandwich-Beschichtung wurden zunächst vorhandene Berechnungsverfahren zur Bestimmung des kritischen Beuldrucks von kreisrunden Rohren bzw. Zylinderschalen auf ihre grundsätzliche Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall überprüft. Im Anschluss wurde ein geeignetes Berechnungsverfahren ausgewählt. Unter Zuhilfenahme von numerische Untersuchungen wurde das ausgewählte Berechnungsverfahren für den vorliegenden Anwendungsfall angepasst. Bei einem ersten Einsatz in einem in Betrieb befindlichen Abwasserschacht konnten darüber hinaus weitere Hinweise für die Optimierung der Herstellung der Sandwich-Beschichtung gewonnen werden.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

2 Werkstoff- und Verfahrensprüfungen

In einem ersten Schritt wurden grundsätzlich geeignete Materialien für die Herstellung der Sandwichbeschichtung ausgewählt. Anschließend wurden in Abstimmung auf die verfahrenstechnischen Möglichkeiten und unter Abwägung wirtschaftlicher und betriebstechnischer Belange sinnvolle Schichtdicken festgelegt und erste Probekörper hergestellt. An diesen Probekörpern wurden dann die wesentlichen Materialkennwerte sowie das grundsätzliche Materialverhalten bestimmt.

2.1 Grundlagen, Materialauswahl und Querschnittsgestaltung

Grundgedanke für die Herstellung einer selbsttragenden, korrosionsbeständigen Sandwichbeschichtung ist es, die derzeit zur Beschichtung von Abwasserschächten übliche Polyurethanbeschichtung mit dem Einsatz von Polyurethanschäumen zu kombinieren. Dabei wird zunächst das Polyurethan in einer Schichtdicke von wenigen Millimetern auf die Wandung des Schachtes aufgetragen, anschließend der Polyurethanschaum zur Ausbildung eines tragfähigen Kerns in einer Dicke von mehreren Zentimetern aufgebracht, und dann erneut eine dünne Schicht Polyurethan aufgetragen.

Abb. 1: Aufbau einer Polyurethan-Sandwich-Beschichtung

Dieser Sandwich-Aufbau ergibt sich vor allem aus konstruktiven bzw. werkstofftechnischen und wirtschaftlichen Gründen unter Berücksichtigung der Randbedingungen in einem Abwasserschacht. Mit dem Auftrag der ersten Polyurethanschicht wird der Abwasserschacht komplett beschichtet. Dadurch wird ein trockener Untergrund für den feuchtigkeitsempfindlichen PUR-Hartschaum sowie ein Verbund zum Altschacht hergestellt. Mit dem PUR-Hartschaum ist es (anders als mit der Polyurethanbeschichtung) in kurzer Zeit möglich, größere Schichtdicken von mehreren Zentimetern Stärke aufzubauen. Auch sind die Materialkosten des PUR-Hartschaums wesentlich geringer. Der Auftrag der inneren Polyurethanschicht zum Schluss dient vor allem der Erhöhung der Abriebfestigkeit, der Ausbildung einer glatten Oberfläche und zur weiteren Sicherung der Dichtheit der Sandwich-Beschichtung.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

Für die Herstellung der Außenschichten wurde das Produkt **OLDODUR WS 56** der Firma Loos PUR Technik e.k. (Neuenrade) ausgewählt. Dieses Produkt besitzt eine vergleichsweise geringe Reaktionsfähigkeit mit Wasser. Darüber hinaus steht eine für die besonderen Bedingungen bei der Beschichtung von Schächten optimierte Maschinentechnik zur Verfügung. Für den tragenden Sandwich-Kern wurde das Produkt **BÜFATHERM 44-13**, ein geschlossenzelliger Polyurethanhartschaum (PUR-Hartschaum), der Firma BÜFA Polyurethane GmbH & Co. KG (Oldenburg) ausgewählt. Dieses Produkt besitzt laut Herstellerangaben eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit und eignet sich für die Hohlraumausschäumung, Isolierungen und ähnliche Anwendungen.

Unter Berücksichtigung geometrischer Randbedingungen und betrieblicher Erfordernisse eines Abwasserschachtes sowie verarbeitungstechnischer Erfahrungen und Zwänge bei der Verarbeitung von Polyurethan-Beschichtungen bzw. –Schäumen wurden für die Polyurethan-Außenschichten und den Kerns aus PUR-Hartschaums **sinnvolle Schichtdicken** abgeschätzt. Die sich unter diesen Gesichtspunkten ergebende sinnvolle Gesamtdicke des Sandwich-Querschnitts konnte zwischen 20 mm und 50 mm abgeschätzt werden, bei einer Dicke der Polyurethan-Außenschichten von 2 mm bis 4 mm und einer Dicke des PUR-Hartschaum-Kerns von 16 mm bis 46 mm (vgl. Abb. 2).

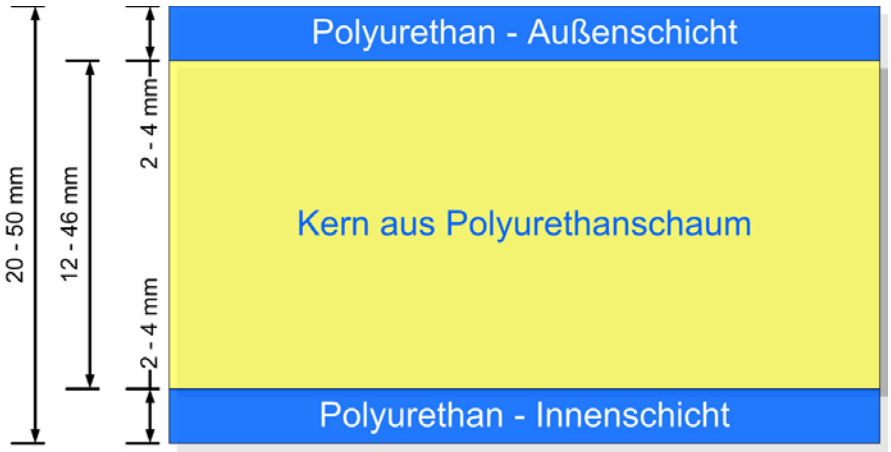


Abb. 2: Bau- und betriebstechnisch sinnvolle Querschnitte der Sandwich-Beschichtung

Die reinen **Materialkosten** bei der Beschichtung eines zwei Meter tiefen Schachtes mit einer 20 mm starken Sandwich-Beschichtung liegen bei ca. 550 €. Bei einer Beschichtung eines 4 m tiefen Schachtes in einer Schichtstärke von ca. 50 mm ergeben sich Materialkosten von ca. 1.500 €. Bei Vergleich dieser Kosten mit den durchschnittlichen Materialkosten für eine 20 mm starke Mörtelbeschichtung eines zwei Meter tiefen Schachtes (ca. 275 €[a]) bzw. den

---

a *Materialkosten unter Annahme eines Preises von 1,05 € pro Kilogramm Spezialmörtel; die durchschnittlichen Kosten einer Schachtbeschichtung mit Mörtel inkl. Baustelleneinrichtung und Vorarbeiten bei einer durchschnittlichen Schachttiefe von ca. 3,5 m liegen bei ca. 2.500 € (ermittelt auf Basis von 18 Sanierungsmaßnahmen im Rahmen von [5])*

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

Materialkosten für eine 50 mm starke Mörtelbeschichtung eines vier Meter tiefen Schachtes (ca. 1.325 €[a]) ist es denkbar, dass die Ausführung einer Sandwich-Beschichtung durchaus auch eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative zu den herkömmlichen Verfahren darstellen kann.

2.2 Herstellung erster Probekörper und Materialprüfungen

Um die Materialkennwerte und das Verhalten der einzelnen Materialien sowie des Sandwich-Querschnitts abschätzen zu können, wurden im Rahmen des Projektes erste Probekörper hergestellt und geprüft.

Bereits bei der **Herstellung der Probekörper** (vgl. Abb. 3 und Abb. 4) konnte festgestellt werden, dass der Mischvorgang bei der Herstellung des PUR-Hartschaums sehr sensibel ist. Daher ist bei einem Vermischen der Rohkomponenten mit einem Handrührgerät darauf zu achten, dass das Mischbehältnis komplett fettfrei ist, möglichst wenig Luft in die Masse eingetragen wird (Gefahr einer übermäßigen Lunkerbildung) und der Mischvorgang rechtzeitig abgeschlossen wird (Gefahr einer frühzeitigen Erhärtung). Die Schichtdicke des PUR-Hartschaums konnte über die Masse der Einzelkomponenten und die zu beschichtende Fläche abgeschätzt werden. Bereits nach weniger als einer Minute begann der PUR-Hartschaum unter deutlich wahrnehmbarer Volumenzunahme und Wärmeentwicklung zu erhärten. Nach ca. 10 min war der PUR-Hartschaum soweit erhärtet, dass eine weitere Schicht Oldodur WS 56 aufgebracht werden konnte. Es besteht ein sehr guter Verbund zwischen dem Polyurethan und dem PUR-Hartschaum. Ein Anrauen der einzelnen Schichten scheint dazu nicht notwendig zu sein.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

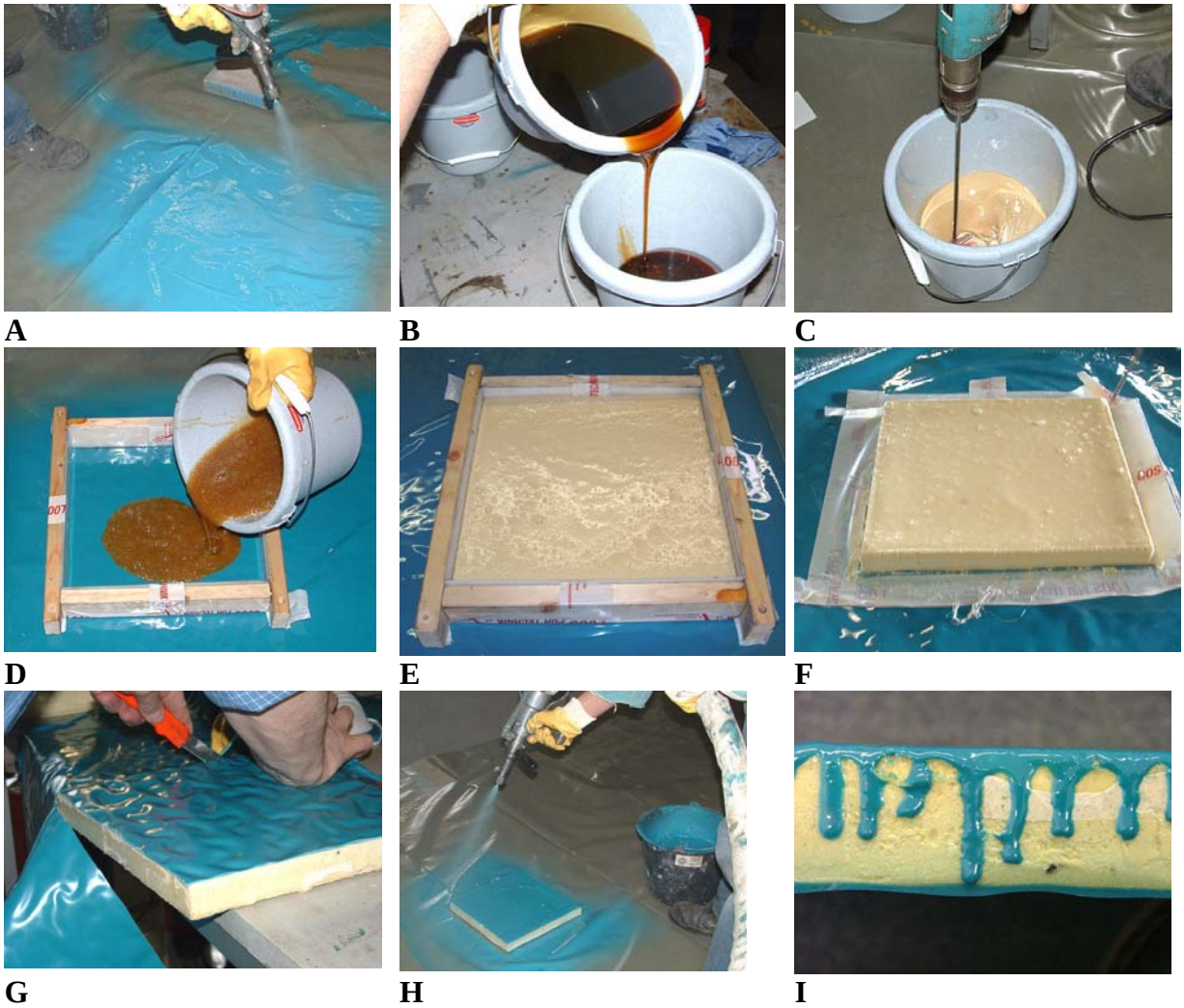
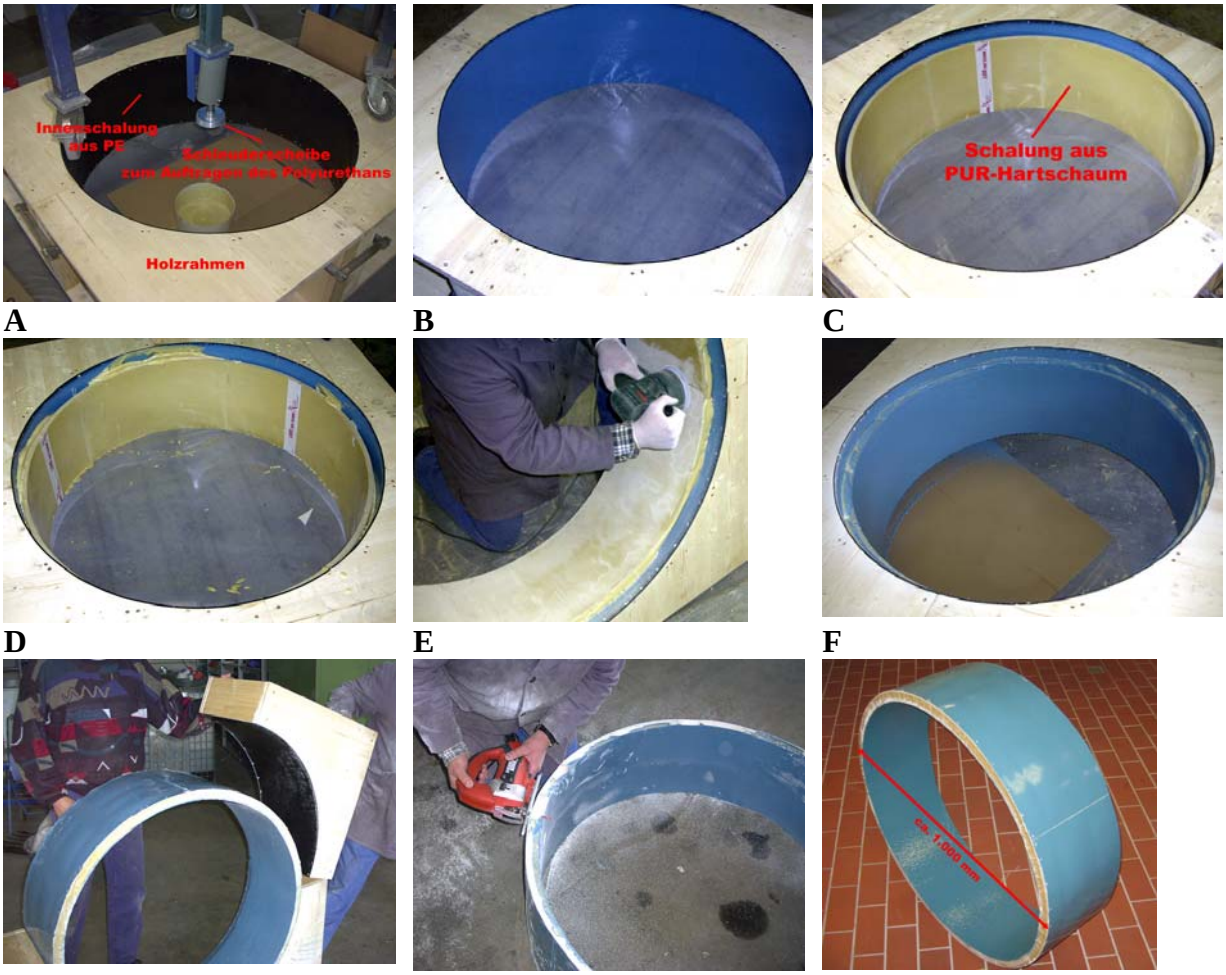


Abb. 3: Herstellung eines Sandwich- Probekörpers. A: Aufspritzen des Polyurethans auf eine Folie. B: Zusammengießen der Roh-Komponenten des PUR-Hartschaums. C: Vermischen der Roh-Komponenten. D: Eingießen des PUR-Hartschaum-Gemisches. E: Erhärtender PUR-Hartschaum. F: Erhärtete und entschalte Hartschaum-Schicht. G: Abschneiden des seitlich überstehenden Polyurethans. H: Aufspritzen der zweiten Polyurethan-Schicht. I: Fertiggestellter Probekörper in Seitansicht.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH



A B C D E F G H I

Abb. 4: Herstellung eines Sandwich-Ringabschnitts zur Prüfung der Ringsteifigkeit. A: Außenliegende Schalung aus Holz und PE-Elementen. B: Mit Polyurethan beschichtete Außenschalung. C: Innere Schalung zum Verfüllen des PUR-Hartschaums. D: Nach Verfüllung und Erhärtung des PUR-Hartschaums. E: Anrauen der Oberfläche des PUR-Hartschaums. F: Sandwich-Körper nach zweiter Polyurethanbeschichtung. G: Entschalen des Kreisrings. H: Entfernen von überstehenden Graten. I: Fertiger Sandwich-Rohrabschnitt.

Im Rahmen der **Materialprüfungen** wurden an Sandwich-, Polyurethan- und Hartschaum-Probekörpern die 3-Punkt-Biegzugfestigkeit sowie der Biege-Modul in Anlehnung an EN ISO 178 [8] bestimmt. Darüber hinaus wurden an Polyurethan- und Hartschaum-Probekörpern die Zugfestigkeit und der Zugmodul in Anlehnung an EN ISO 527 – 2 [9] sowie die Druckfestigkeit und der Druckmodul in Anlehnung an EN ISO 604 [10] ermittelt. Ein Sandwich-Ringabschnitt wurde in Anlehnung an DIN EN 1228 [11] geprüft, um erste Anhaltswerte bzgl. der Ringsteifigkeit zu erhalten und das Langzeit-Verhalten der Sandwich-Beschichtung abschätzen zu können. Abb. 5 gibt einen Überblick über die durchgeführten Materialprüfungen.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

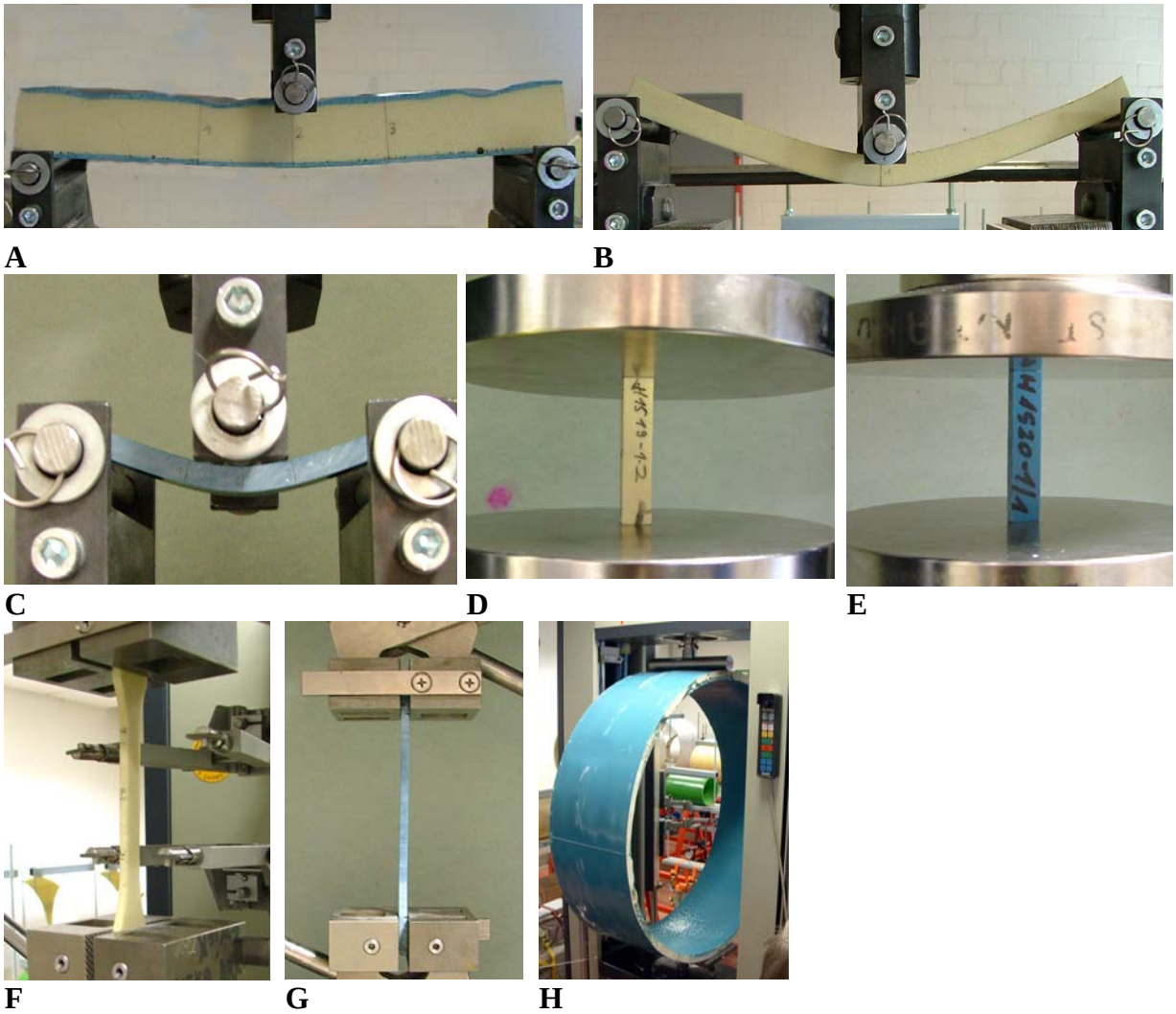


Abb. 5: Bestimmung der Materialeigenschaften. A: Äquivalenter Biegemodul des Sandwich-Querschnitts. B: Biegemodul des PUR-Hartschaums. C: Biegemodul des Polyurethan. D: Druckmodul des PUR-Hartschaum. E: Druckmodul des Polyurethan. F: Zugmodul des PUR-Hartschaum. G: Zugmodul des Polyurethan. H: Ringsteifigkeit und Kriechfaktor des Sandwich-Rohrabschnittes.

Es zeigte sich, dass die ermittelten Kurzzeit-Festigkeiten und -Elastizitätsmoduln der Sandwich-Werkstoffe im Vergleich zu den üblicherweise bei der Sanierung von Schachtbauwerken im Auskleidungsverfahren eingesetzten Werkstoffen (PE-HD bzw. GFK) relativ gering sind. Während bei den Sandwich-Werkstoffen Zugfestigkeiten von ca. 9 – 13 N/mm^2 und Elastizitätsmoduln von ca. 160 – 450 N/mm^2 ermittelt wurden, liegen die Orientierungswerte der Zugfestigkeiten von GFK-Werkstoffen bei ca. 120 – 350 N/mm^2 bzw. bei ca. 8.000 – 20.000 N/mm^2 für den Elastizitätsmodul (vgl. [12]). Bedingt vergleichbar sind die Werkstoffeigenschaften von PE-HD. Hier werden in der Fachliteratur (vgl. [12], [13], [14], [15]) Orientierungswerte für die Zugfestigkeit von ca. 17 – 29 N/mm^2 bzw. von ca. 900 – 1.200 N/mm^2 für den Elastizitätsmodul gegeben.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

Wie die Last-Dehnungsdiagramme der durchgeführten Materialuntersuchungen zeigten (vgl. Abb. 6), sind sowohl das verwendete Polyurethan als auch der PUR-Hartschaum durch ein z.T. nichtlineares, vermutlich anelastisches Materialverhalten gekennzeichnet [16]. Da die Materialien bei geringen Spannungen ein annähernd lineares Materialverhalten aufweisen, wurden zusätzlich zu den Bruchfestigkeiten auch die elastischen Grenzspannungen[a] ermittelt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über sämtliche Ergebnisse der Materialprüfungen.

Tabelle 1: Ergebniszusammenstellung der ermittelten Materialkennwerte (Kurzzeit)

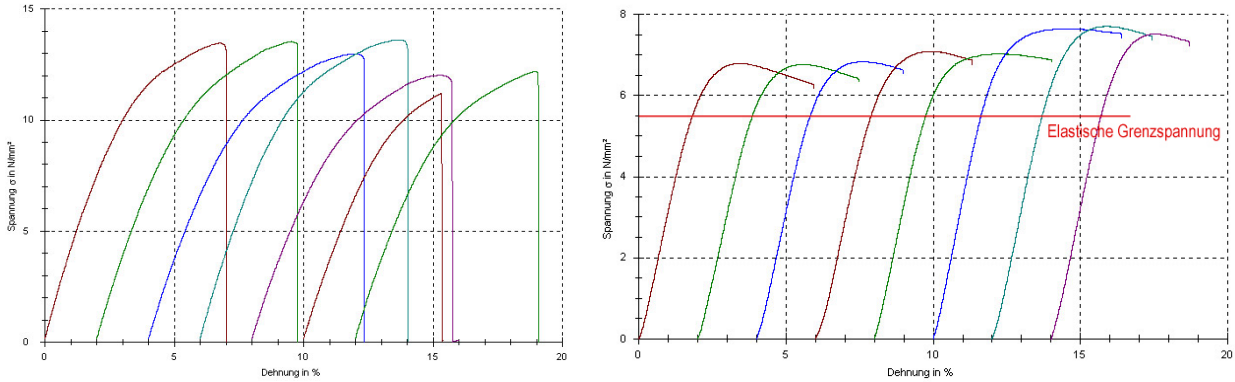
	Sandwich	**Polyurethan**	**PUR-Hartschaum**
Biegefestigkeit	ca. 12 N/mm^2	ca. 21,5 N/mm^2	ca. 9 N/mm^2
Biege-Modul	ca. 350 N/mm^2	ca. 630 N/mm^2	ca. 300 N/mm^2
Zugfestigkeit			
➢ Bruchspannung	-	ca. 13,5 N/mm^2	ca. 9 N/mm^2
➢ Elastische Grenzspannung[a)]	-	ca. 10,0 N/mm^2	ca. 6,5 N/mm^2
Zug-Modul	-	ca. 160 N/mm^2	ca. 450 N/mm^2
Druckfestigkeit			
➢ Bruchspannung	-	ca. 9,5 N/mm^2	ca. 7 N/mm^2
➢ Elastische Grenzspannung[a)]	-	ca. 8,0 N/mm^2 [b)]	ca. 5,5 N/mm^2
Druck-Modul	-	ca. 630 N/mm^2	ca. 340 N/mm^2
Anfangs-Ringsteifigkeit	ca. 1,352*10^{-3} N/mm^2	-	-
Kriechneigung nach 24 h	16,55 %	-	-

a) Spannung beim Erreichen der Grenzen des linear-elastischen Materialverhaltens bzw. des Beginns nichtlinearen elasto- (visko-) plastischen Materialverhaltens.

b) Die experimentellen Werte für $\sigma_{e,D,Druck}$ für die Polyurethan-Deckschichten weisen erhebliche Streuungen auf. Hier wurde der Mittelwert aus 9 Messungen bestimmt.

a *Spannungen beim Erreichen der Grenzen des linear-elastischen Materialverhaltens bzw. des Beginns nichtlinearen elasto- (visko-) plastischen Materialverhaltens.*

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

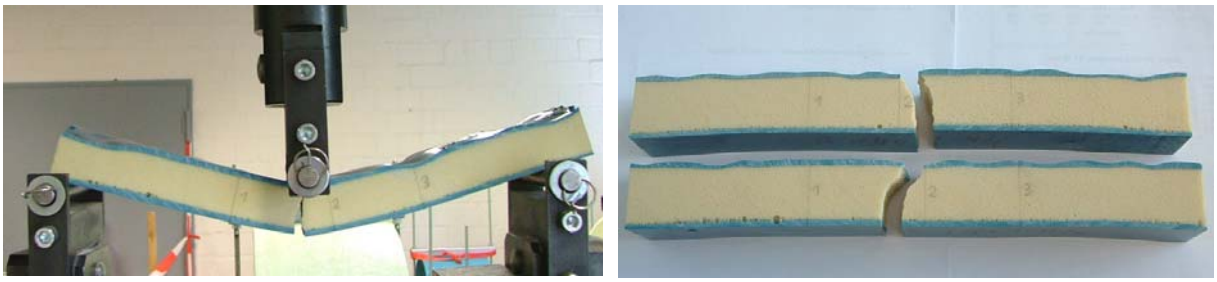


A **B**

Abb. 6: Auszüge aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen der Materialprüfungen. A: Gesamtquerschnitt, Biegung. B: PUR-Hartschaum, Druck.

Bei der Prüfung der Druckfestigkeit und des Druckmoduls wurde ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes seitliches Ausweichen der Probekörper beobachtet. Auch der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Diagramme deutet auf ein Stabilitätsproblem hin (vgl. Abb. 6-B). Bei beiden Materialien liegen die gemessenen Druckfestigkeiten unter den gemessenen Zugfestigkeiten. Vor diesem Hintergrund sollten im Rahmen des Projektteils II vergleichende Prüfungen an weniger schlanken Probekörpern durchgeführt werden, um den Einfluss eines Stabilitätsversagens sicher ausschließen bzw. berücksichtigen zu können.

Bei der Prüfung des Verbundquerschnitts ergaben sich keine optisch erkennbaren Verschiebungen zwischen den einzelnen Schichten. Wie aufgrund der ähnlichen Festigkeiten und Steifigkeiten der Materialien zu erwarten war, versagten sämtliche Probekörper im Falle eines Bruchs ähnlich einem Vollquerschnitt, in keinem Fall löste sich der Verbund (vgl. Abb. 7).



A **B**

Abb. 7: Bruchverhalten des Sandwich-Querschnitts. A: Während des Bruchversagens. B: Probekörper B 1403–4/3 und B 1403– 4/6 nach Bruch.

Das Langzeitverhalten von Innenauskleidungen aus Kunststoff wird im Langzeit-Scheiteldruckversuch unter Belastung von Probestücken untersucht. Zur Berechnung des Abminderungsfaktors ist eine Versuchsdauer von 10.000 h erforderlich. Im Rahmen der vorliegenden ersten Projektphase wurde zunächst ein qualitativer 24-h Vorversuch an einem Sandwich-Rohrabschnitt durchgeführt. Daher können bzgl. der Langzeit-Festigkeiten und –Elastizitätsmoduln zum derzeitigen Zeitpunkt noch keine gesicherten Aussagen getroffen

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

werden. Bei einer ersten, groben Abschätzung des für die Ermittlung der Langzeit-Festigkeiten und –Elastizitätsmoduln notwendigen Abminderungsfaktors wurde durch eine Extrapolation der bei der Untersuchung der 24-h-Kriechneigung gewonnenen E-Moduln unter Verwendung von potentiellen bzw. linearen Regressionslinien ein Abminderungsfaktor (50 Jahre) im Bereich von $2{,}5 \leq A \leq 4{,}5$ bestimmt.

2.3 Erster In-situ-Beschichtungstest

Im Rahmen eines ersten Praxiseinsatzes wurde ein in Betrieb befindlicher Abwasserschacht, bei dem eine starke Korrosion der Betonwandung von stellenweise mehreren Zentimetern vorlag, mit einer Sandwich-Beschichtung saniert (vgl. Abb. 8). Mitarbeiter des IKT begleiteten den gesamten Sanierungsablauf. Ziel war es, die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens zu prüfen und bereits in diesem Stadium der Entwicklung grundlegende Verbesserungspotentiale identifizieren und ggf. geeignete Verfahrensvarianten ableiten zu können.

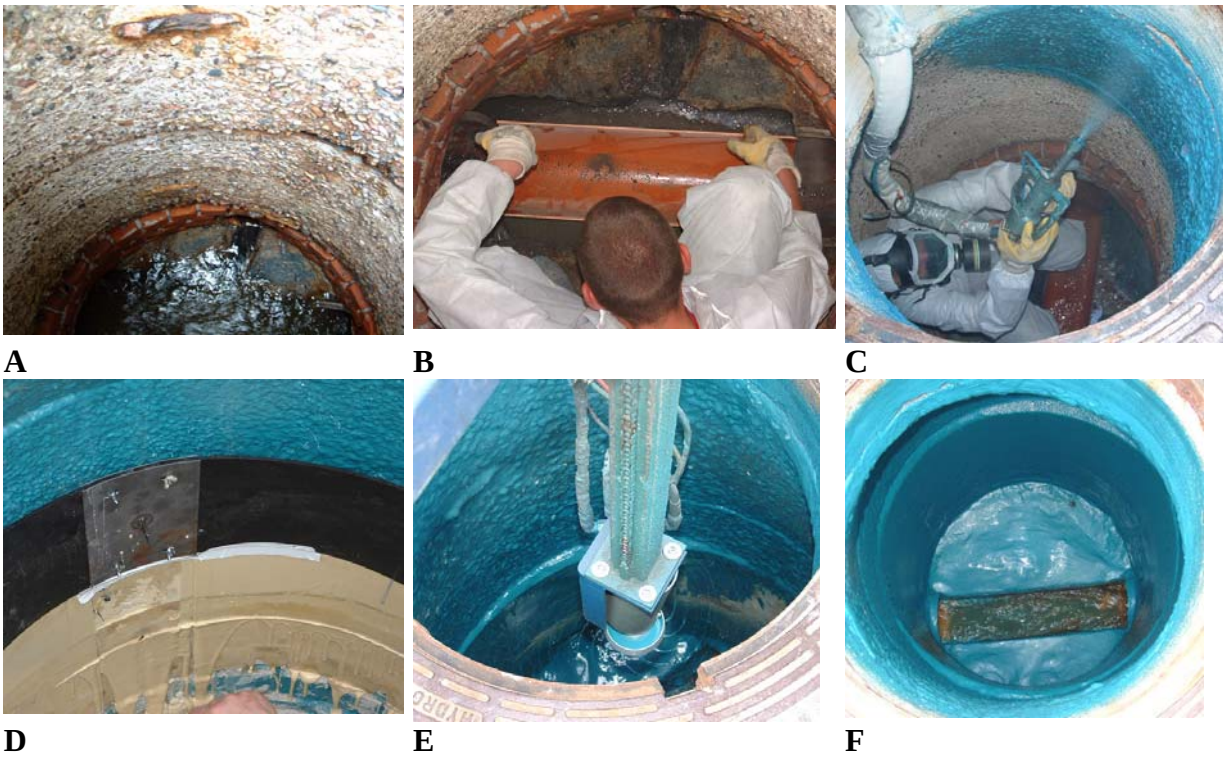


Abb. 8: Erster Praxiseinsatz der Sandwich-Beschichtung. A: Ausgangssituation, korrodierter Abwasserschacht aus Betonfertigteilen. B: Instandsetzung des Gerinnes und der Berme. C: Beschichtung der Schachtwandung mit Polyurethan im Aufspritzverfahren. D: Aufbau der PUR-Hartschaum-Schicht. E: Auftragen der inneren Polyurethanschicht im Anschleuderverfahren. C: Sanierter Schacht.

Es zeigte sich, dass die inneren und äußeren Polyurethan-Schichten ohne Schwierigkeiten aufgetragen werden konnten. Verbesserungspotentiale ergaben sich vor allem bei der Herstellung der PUR-Hartschaum-Schicht. Hier entstanden Schwierigkeiten mit der verwendeten

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

Schalung aus PE- und Stahlelementen. Diese war zu unflexibel und nur bedingt an die jeweiligen Schachtgeometrien anpassbar. Auch die Abdichtung der ersten Schalung stellte sich als schwierig heraus. Grundsätzlich war ein Auftragen der Schaumschicht nur bis zur Unterkante des Konus möglich. Darüber hinaus haftete der Schaum an den Verbindungselementen aus Metall. Vor diesem Hintergrund bietet es sich an, die Schalungselemente zukünftig ebenfalls aus PUR-Hartschaum herzustellen. Da sich der Schaum mit den Schalungselementen verbindet, könnte die Schalung nach dem Verguss des Schaums als Teil der Schaumschicht im Schacht verbleiben („verlorene Schalung“) und so individuell für jede Schachtgeometrie hergestellt werden. Ein erster Prototyp einer solchen PUR-Hartschaumschalung wurde bereits im Rahmen des bisherigen Projektverlaufes hergestellt. In weiteren Versuchen wäre zu überprüfen, ob der Verbund zwischen Schalung und vor Ort hergestelltem Schaum für den vorliegenden Anwendungsfall ausreicht.

Das Aufrauen der Schaumschicht vor dem Auftrag der inneren Polyurethanschicht stellte sich als arbeitsaufwändig heraus. Daher sollte in weiteren Versuchen überprüft werden, ob der Verbund zwischen Schaumschicht und Polyurethan auch ohne ein Aufrauen der Schaumschicht sichergestellt werden und damit dieser Arbeitsschritt zukünftig entfallen kann.

Wie bereits bei der Herstellung der Material-Probekörper beobachtet, ist der Mischvorgang bei der Herstellung des PUR-Hartschaums sehr sensibel. Da bei der Verwendung eines Handrührgerätes starke Schwankungen in der Materialqualität möglich sind (kein vollständiges Vermischen des Schaums, Einsetzen des Erstarrungsprozesses bei zu langem Mischvorgang, durch Lufteintrag verringerte Festigkeit des Schaums), ist zukünftig eine automatisierte, maschinelle Mischung der Schaum-Komponenten anzustreben.

Darüber hinaus bietet es sich an, das Gerinne und die Berme ebenfalls unter Einsatz des Sandwich-Verfahrens bzw. einer Kombination aus PUR-Hartschaum und PU-Beschichtung auszubessern. So könnte der Schachtboden besser als bisher an die Sandwich-Beschichtung der Schachtwandung angebunden und der Arbeitsablauf optimiert werden, da die Erhärtungsdauern des PUR-Hartschaumes und des Polyurethan wesentlich geringer als die eines mineralischen Mörtels sind. Auch sollte zukünftig sichergestellt werden, z.B. durch eine entsprechende Abdeckung des Schachtbodens während der Sanierung, dass das Schaumgemisch nicht ins Abwasser gelangt.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

3 Entwicklung eines Berechnungsverfahrens

Zur Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zum Nachweis der statischen Tragfähigkeit der Sandwich-Beschichtung wurden zunächst vorhandene Berechnungsverfahren zur Bestimmung des kritischen Beuldrucks von kreisrunden Rohren bzw. Zylinderschalen auf ihre grundsätzliche Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall überprüft. Anschließend wurde ein ausgewähltes Verfahren mittels numerischer Untersuchungen auf den vorliegenden Anwendungsfall angepasst.

3.1 Auswahl eines geeigneten Berechnungsansatzes

Erdgebettete Rohre werden in Deutschland nach dem **DWA-Arbeitsblatt 127** [17] berechnet, in dem von einem elastisch gebetteten Kreisring ausgegangen wird. Auch Schachtbauwerke werden in Anlehnung an dieses Arbeitsblatt statisch nachgewiesen (vgl. [18]). Standsicherheitsnachweise für selbsttragende Inliner werden in Deutschland nach dem **DWA-Merkblatt 127, Teil 2** [19] geführt, mit dem die Besonderheiten der statischen Berechnung von Inlinern (z.B. Imperfektionen bei der Bettung des Liners im Altrohr, Kontaktdruckproblem und nichtlineare Berechnung) berücksichtigt werden können. Darüber hinaus existieren mehrere Ansätze zur **Berechung des kritischen Beuldrucks kreisrunder Rohre** unter allseitigem Wasserdruck, z.B. von Thimoshenko [20], Glock [21] oder Chicurel [22].

Es zeigte sich, dass das Berechnungsverfahren des DWA-Merkblatts 127-2 [19] grundsätzlich für den vorliegenden Anwendungsfall geeignet ist, da u.a. von einem Rohr-im-Rohr-System ausgegangen wird und Imperfektionen bei der Bettung im Altrohr berücksichtigt werden können. Auch die Nachweis-Philosophie des DWA-Merkblatt 127-2, gekennzeichnet durch getrennte Stabilitäts-, Verformungs- und Spannungsnachweise, kann grundsätzlich unverändert für die Bemessung der Sandwich-Beschichtung übernommen werden.

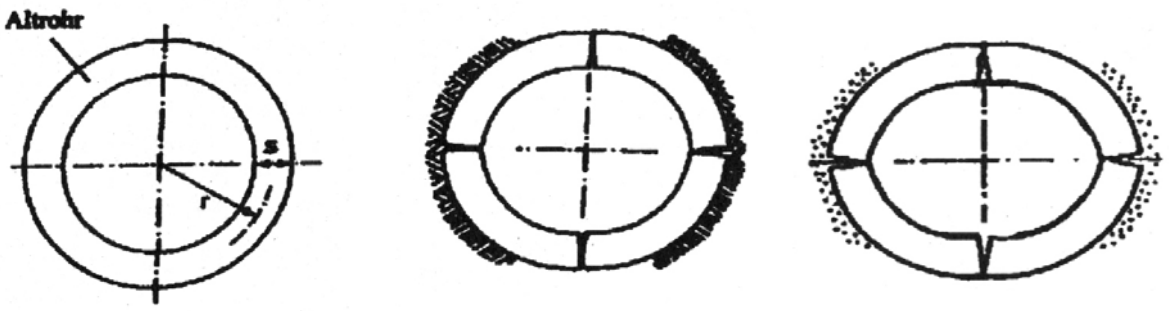
Da im DWA-Merkblatt 127-2 nur am Rande auf Verbundquerschnitte eingegangen wird und die Anwendung in horizontalen Leitungen im Vordergrund steht, wurde das Nachweiskonzept zunächst mit Blick auf die Übertragbarkeit der folgenden Punkte hinterfragt:

- Altrohrzustände,
- Annahmen zum Materialverhalten,
- Schnittkraft-Beiwerte,
- Imperfektionen und
- Abminderungsfaktoren für Imperfektionen.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

⇒ **Altrohrzustände**

Die Altrohrzustände nach DWA-M 127-2 können nur bedingt übertragen werden. Vor allem aufgrund der vertikalen Lage des Schachtkörpers im Boden und des daraus resultierenden abweichenden Belastungsbildes wird sich bei einem Schacht i.d.R. nicht der Altrohrzustand II bzw. III einstellen. Anders als bei Kanalrohren, bei denen ein Bruchversagen häufig durch Rissbildung eintritt, versagt ein Schacht i.d.R. nur bei einer großflächigen und tiefreichenden Schädigung des Betons bzw. der Mauerwerksfugen, z.B. durch Korrosionsprozesse. Auch das DWA-M 127-2 gibt vor, dass für selbsttragende Auskleidungen in Schächten nur der Altrohrzustand I und nur ggf. der Altrohrzustand II angesetzt werden sollte. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde daher in einem ersten Schritt angestrebt, das Bemessungsverfahren für den Altrohrzustand I auf die Sandwich-Beschichtung zu übertragen. Dementsprechend wurde eine örtliche Vorverformung w_v = 2 % und eine Spaltbildung w_s = 1 % (z.B. aus einem Versagen des Haftverbundes zwischen Polyurethan und Schachtwandung) angesetzt.



A: Altrohrzustand I **B: Altrohrzustand II** **C: Altrohrzustand III**

Abb. 9: Zustand der Altleitung aus statischer Sicht gemäß DWA-M 127-2 bei der Sanierung von Abwasserkanälen und –leitungen mit Lining- und Montageverfahren. A: Altrohr allein tragfähig (Altrohrzustand I). B: Rohr-Boden-System tragfähig (Altrohrzustand II). C: Rohr-Boden-System nicht alleine tragfähig (Altrohrzustand III) (aus [19])

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

⇒ **Annahmen zum Materialverhalten**

In dem DWA-Merkblatt 127-2 wird von einem linear-elastischen Werkstoffverhalten ausgegangen. Demgegenüber ergaben die Prüfungen an den Sandwich-Werkstoffen sowohl für das Oldodur WS 56 als auch für den PUR-Hartschaum ein z.T. nichtlineares, vermutlich anelastisches Materialverhalten.

⇒ **Schnittkraft-Beiwerte**

Die Gültigkeit der Schnittkraft-Beiwert-Diagramme in Anhang IV des DWA Merkblatt 127-2 ist auf Elastizitätsmoduln im Bereich von 1500 N/mm^2 $\leq E_L \leq$ 3000 N/mm^2 beschränkt. Da die Elastizitätsmoduln für die in der Sandwichbeschichtung verwendeten PUR- Materialien im Bereich von ca. 160 - 630 N/mm^2 liegen, ist eine Verwendung der Schnittkraft-Beiwert-Diagramme des DWA-Merkblatt 127-2 vermutlich nicht möglich.

⇒ **Abminderungsfaktoren für Imperfektionen**

Die Übertragbarkeit der Diagramme D1 bis D3, in denen die Abminderungsfaktoren für verschiedene Imperfektionen in Abhängigkeit des Radius und der Schichtdicke des Liners dargestellt sind, ist aufgrund des abweichenden Querschnittaufbaus und des nichtlinearen Werkstoffverhaltens der Polyurethan-Materialien für den vorliegenden Anwendungsfall zu überprüfen.

3.2 Numerische Untersuchungen

Um die Eignung der Bemessungsformeln und -diagramme des DWA-Merkblatts 127-2 für die Bemessung der Sandwich-Beschichtung zu überprüfen und ggf. entsprechende Modifikationen vornehmen zu können, wurden vom Lehrstuhl für Statik und Dynamik an der Ruhr-Universität-Bochum (Prof. Dr. Günther Meschke) numerische Untersuchungen durchgeführt (vgl. [16]).

In Übereinstimmung mit dem DWA-Merkblatt 127-2 wurden die Untersuchungen auf **zweidimensionale Analysen von kreisrunden Abwasserschächten** beschränkt. In Anlehnung an Altrohrzustand I bzw. II in DWA-M 127-2 wurde angenommen, dass Erd- und Verkehrslasten vom existierenden (geschädigten) Schacht aufgenommen werden können. Nur der Grundwasserdruck wirkt direkt auf die Sandwich-Beschichtung und muss ausschließlich von dieser aufgenommen werden. Örtliche Spannungskonzentrationen, wie sie beispielsweise in der Umgebung von Zuläufen auftreten können, wurden nicht berücksichtigt. Zusätzlich zu der Untersuchung der Versagensmechanismen bei einer perfekten Ausgangsgeometrie wurden die Auswirkungen einer örtlichen Vorverformung und einer Spaltbildung zwischen Sandwich-Beschichtung und Altschacht untersucht (vgl. Abb. 10).

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

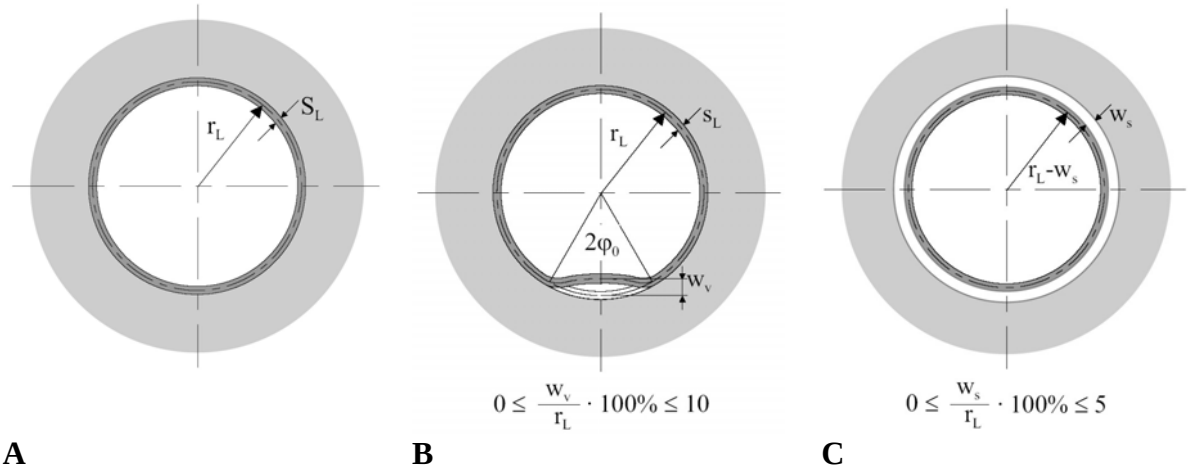


Abb. 10: Ausgangsgeometrien für die numerischen Analysen. A: Perfekte Ausgangsgeometrie. B: Örtliche Vorverformung w_v. C: Spaltbildung zwischen Sandwich-Beschichtung und Altschacht. (alle Abbildungen aus [16])

Die **verwendeten Materialparameter** basieren auf den Kurzzeit-Materialprüfungen an den Sandwich-Werkstoffen (vgl. Abschnitt 3.5 in der Langfassung des Endberichts [7]). Dort zeigten die Werkstoffe ein z.T. nichtlineares, vermutlich anelastisches Materialverhalten sowie relativ große Deformationen beim Brucheintritt. Da das Berechnungsverfahren des DWA-M 127-2 von einem linear-elastischen Materialverhalten ausgeht, würde die Berücksichtigung des tatsächlichen Materialverhaltens bis zum Bruch eine vollständige Überarbeitung sämtlicher Bemessungsdiagramme nach sich ziehen. Daher wurden in den Untersuchungen die elastischen Grenzspannungen[a] und nicht die Bruchspannungen der Materialien verwendet. Bei allen Berechnungen wurde das Materialverhalten des Polyurethans sowie des PUR-Hartschaums vereinfachend mit Hilfe des elastischen St.Venant-Modells beschrieben, das von einem linear-elastischen Zusammenhang zwischen dem 2. Piola-Kirchhoff-Spannungstensor **S** und dem Green-Lagrange´schen Verzerrungstensor **E** ausgeht (vgl. [23]). Eine Übersicht über die verwendeten Materialparameter gibt Tabelle 2.

---

a *Spannungen beim Erreichen der Grenzen des linear elastischen Materialverhaltens bzw. des Beginns nichtlinearen elasto- (visko-) plastischen Materialverhaltens.*

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Materialparameter

Materialparameter	Polyurethan-Deckschichten	PUR-Hartschaum-Kern
Kurzzeit-Elastizitätsmodul E [N/mm^2]		
➢ Zugversuch	160	450
➢ Druckversuch	630	340
➢ Biegezugversuch	630	300
Elastische Grenzspannung σ_e (Kurzzeit) [N/mm^2]		
➢ Zugversuch	10,0	6,5
➢ Druckversuch	8,0[a]	5,5
Querdehnzahl ν [–]	0,3[b]	0,3[b]

Die zweidimensionalen numerischen Untersuchungen basieren auf **geometrisch nichtlinearen Finite Elemente Analysen unter Verwendung eines Mehrschichten-Schalensystems**. Das Element verfügt über eine Mindlin-Reissner-Kinematik (vgl. [24]) und ist daher für schubweiche Sandwich-Schalen geeignet. Die Mehrschichten-Formulierung erlaubt die Berücksichtigung unterschiedlicher Materialeigenschaften in Deck- und Mittelschichten. Die geometrische Nichtlinearität des Problems wird vollständig mit Hilfe einer sogenannten Updated-Lagrange-Formulierung[c] berücksichtigt (vgl. [23]). Sämtlichen Berechnungen liegt in Übereinstimmung mit DWA-M 127-2 die Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes zugrunde. Die Kontaktbedingungen zwischen dem Sandwich-Element und dem Betonaltschacht wurden als reibungsloses Kontaktproblem zwischen dem Schalenelement und der als kreisrunder Starrkörper idealisierten Innenwandung des Schachtes formuliert. Die Kontaktbedingungen wurden im Zuge der inkrementell-iterativen Lösungsstrategie des nichlinearen Stabilitätsproblems laufend aktualisiert. Für die Untersuchung imperfekter Ausgangsgeomet-

---

a *Die experimenten Werte für $\sigma_{e,D,Druck}$ für die Polyurethan-Deckschichten weisen erhebliche Streuungen auf. Hier wurde der Mittelwert aus 9 Messungen bestimmt.*

b *Für die Querdehnzahl wurde eine sinnvolle Annahme getroffen, da Versuche zur Bestimmung dieser Kenngröße im Rahmen des bisherigen Projektverlaufes nicht durchgeführt wurden.*

c *Die Belastung wird schrittweise in einzelnen Laststufen aufgebracht und die Spannungen in Form eines Cauchy´schen-Spannungstensors in der verformten Konfiguration formuliert. Dabei wird – im Gegensatz zu den Berechnungen, die dem DWA-Merkblatt 127-2 zugrunde liegen – die geometrische Nichtlinearität des Problems vollständig berücksichtigt. Die Berechnungen des DWA-Merkblatt 127-2 beruhen dagegen auf der Theorie II. Ordnung, die zwar auf der Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen in der verformten Lage basiert, die geometrischen Beziehungen aber linearisiert. Dies stellt eine mehr oder weniger starke Vereinfachung dar.*

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

rien wurde das Bogenlängenverfahren[a] verwendet, um den gesamten Vor- und Nachbeulpfad erfassen zu können.

Aus den Überlegungen zu einem geeigneten Berechnungsverfahren sowie den numerischen und analytischen Untersuchungen konnten die folgenden **wesentlichen Schlussfolgerungen** gezogen werden:

- Das ***Nachweiskonzept des DWA-Merkblatts 127-2*** ist grundsätzlich für den vorliegenden Anwendungsfall ***geeignet***. Die Nachweis-Philosophie, gekennzeichnet durch getrennte Stabilitäts-, Verformungs- und Spannungsnachweise, kann für die Bemessung der Sandwich-Beschichtung übernommen werden.

- Für die ***Last- und Imperfektionsannahmen*** können die Altrohrzustände des DWA-M 127-2 nur bedingt übertragen werden. Anders als bei Kanalrohren, bei denen ein Bruchversagen häufig durch Rissbildung eintritt, versagt ein Schacht i.d.R. nur bei einer großflächigen und tiefreichenden Schädigung des Betons bzw. der Mauerwerksfugen, z.B. durch Korrosionsprozesse. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde daher in einem ersten Schritt versucht, das Nachweiskonzept gemäß Altrohrzustand I für die Sandwich-Beschichtung zu übertragen. Dementsprechend wurde eine örtliche Vorverformung w_v = 2 % und eine Spaltbildung w_s = 1 % (z.B. aus einem Versagen des Haftverbundes zwischen Polyurethan und Schachtwandung) angesetzt und die Sandwich-Beschichtung gegen Außenwasserdruck durch Grundwasser bemessen.

- Da derzeit noch keine vollständigen Bemessungsdiagramme vorliegen, die das nichtlineare Verhalten der Sandwich-Materialien berücksichtigen, wird vorgeschlagen, zunächst anstelle des in DWA-M 127-2 vorgesehenen Bruchfestigkeitsnachweis einen ***Nachweis gegenüber elastischen Grenzspannungen*** zu führen. Dies erlaubt die Durchführung von Strukturanalysen auf der Grundlage eines linear-elastischen Materialverhaltens sowie die Übernahme des Stabilitätsnachweises gemäß DWA-M 127-2. Bei dieser Art des Nachweises werden lediglich Sicherheiten gegenüber dem Beginn bleibender Verformungen und damit vermutlich einhergehenden mikrostrukturellen Schädigungen ermittelt. Resttragfähigkeiten des Materials werden dabei nicht ausgenutzt, es sind mehr oder weniger große Restsicherheiten gegenüber dem Erreichen der Bruchfestigkeit in einer Randfaser und dem Verlust der Tragfähigkeit vorhanden. Dieser Bemessungsvorschlag liegt daher auf der „sicheren Seite", kann aber gegenüber einer „echten" Traglastbemessung zu unwirtschaftlichen Bemessungen führen. Dies gilt insbesondere bei gleichzeitiger Anwen-

---

a Bei den Bogenlängenverfahren wird der skalare Steuerparameter als zusätzliche Unbekannte betrachtet, die durch eine entsprechend zu formulierende Nebenbedingung bei jedem Iterationsschritt neu bestimmt werden muss. Dies ermöglicht die Berechnung eines nichtlinearen Last-Verformungsverhaltens (vgl. auch [23]).

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

dung eines Sicherheitsbeiwertes von erfγ = 2,0 gemäß DWA-M 127-2 für den Spannungsnachweis.

- Für den ***Stabilitätsnachweis*** der Sandwich-Beschichtung kann der tatsächliche inhomogene Querschnitt durch einen homogenen Ersatzquerschnitt gemäß Abschnitt 4.3.1 in der Langfassung des Endberichts [7] unter der Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens ersetzt werden. Die Abminderungsfaktoren κ_v und κ_s in den Diagrammen D1 und D3 des DWA-M 127-2 zur Berücksichtigung einer örtlichen Vorverformung sowie einer Spaltbildung zwischen Sandwich und Altschacht können für den Stabilitätsnachweis unverändert herangezogen werden.

- Der ***Spannungsnachweis*** für die Sandwich-Beschichtung ist im Gegensatz zum DWA-M 127-2 getrennt für Deck- und Mittelschichten sowie getrennt für Zug- und Druckspannungen zu führen. Hier sind jeweils die Elastizitätsmoduln bzw. Dicken der einzelnen Schichten zu verwenden. Der Gültigkeitsbereich der Schnittkraft-Beiwerte des DWA-M 127-2 wird für Elastizitätsmoduln von 1.500 N/mm^2 – 3.000 N/mm^2 angegeben. Da der Elastizitätsmodul im vorliegenden Fall stets deutlich unter diesen Werten lag, wurden eigene Berechnungen unter Verwendung der Kurzzeit-Materialparameter durchgeführt und in Bemessungsdiagrammen zusammengefasst (vgl. Abb. 11). Berücksichtigt wurden die maßgebenden Spannungen bei einer Dicke der PUR-Hartschaum-Schicht von 20, 30 und 45 mm (zzgl. der beiden Polyurethan-Deckschichten von jeweils 2 mm). In ähnlicher Weise wurde auch beim ***Verformungsnachweis*** verfahren (vgl. Abb. 12).

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

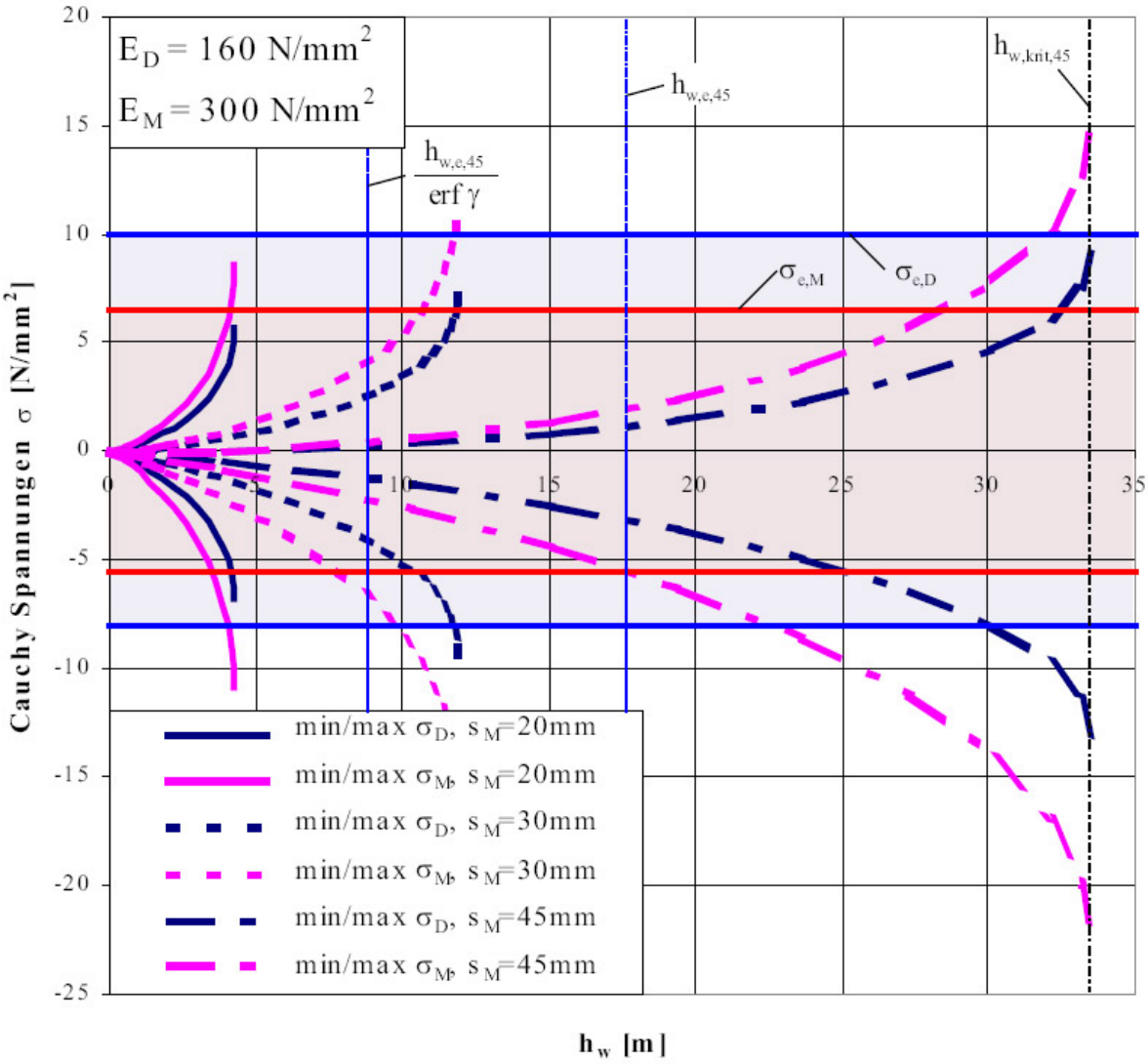


Abb. 11: Minimal- bzw. Maximalwerte für die Cauchy-Spannungen in Deck- und Mittelschicht für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und Dicken der Mittelschicht von s_m = 20, s_m = 30 mm und s_m = 45 mm . Weitere Parameter: Dicke der Deckschichten s_D = 2 mm, ***minimaler Elastizitätsmodul Deckschicht*** *E_D = 160 N/mm², **minimaler Elastizitätsmodul Mittelschicht** E_M = 300 N/mm² (vgl. Tabelle 2); aus [16].*

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

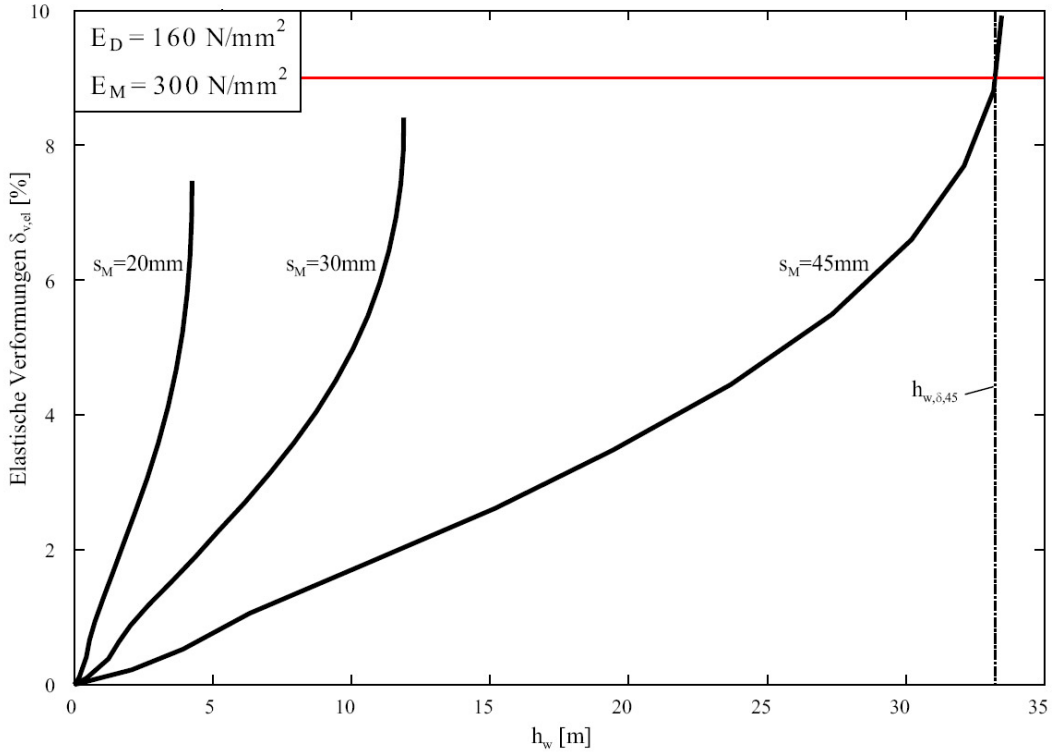


Abb. 12: ***Elastische Verformungen*** $\delta_{v,el}$ *und maßgebliche Bemessungsgrenzen* $h_{w,\delta,45}$ *für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels* h_w*, Dicken der Mittelschicht* s_m *= 20 mm,* s_m *= 30 mm und* s_m *= 45 mm, Sandwich-Radius* r_L *= 500 mm, sowie für die* ***minimalen Elastizitätsmoduln*** *von Deck- und Mittelschicht* E_D *= 160 N/mm²* *bzw.* E_M *= 300 N/mm² (vgl. Tabelle 2); aus [16]*

- In den untersuchten Fällen ist der ***Spannungsnachweis*** und nicht der Stabilitätsnachweis oder der Verformungsnachweis für die Bemessung ***maßgebend***. Diese Aussage gilt nur für die untersuchten Geometrie- und Materialparameter. Für eine sehr dünnwandige Sandwich-Beschichtung mit d < 20 mm könnte auch der Stabilitätsnachweis maßgebend werden.

- Bei den ***Kurzzeit-Nachweisen*** gegen die elastischen Grenzspannungen konnten unter Verwendung der jeweils ungünstigsten Parameter aus den Materialuntersuchungen und den Sicherheitsbeiwerten des DWA-M 127-2 ***ausreichende Sicherheiten gegenüber 1,7 m, 3,9 m bzw. 8,8 m Wassersäule*** (bei einer Schichtdicke des PUR-Hartschaum-Kern von 20, 30 bzw. 45 mm) nachgewiesen werden.

- Die ***Beziehung zwischen PUR-Hartschaum-Dicke und aufnehmbarem Wasserdruck*** bei Ansatz der ***Kurzzeit-Festigkeiten*** konnte für PU-Deckschichten von 2 mm überschlägig mit der Gleichung $\boldsymbol{h_w = 0{,}33 \cdot s_m^2}$ (mit h_w = Höhe des Wassersiegels [m] und s_m = Dicke der PUR-Hartschaum-Schicht [cm]) angenähert werden.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

- Für eine ***erste grobe Abschätzung*** der maßgebenden Außenwasserdrücke bei den ***Langzeit-Nachweisen*** wurden die Festigkeiten und Steifigkeiten der Sandwich-Materialien mit den ***Abminderungsfaktoren A = 2,5 bzw. A = 4,5*** (vgl. Abschnitt 2.1) verringert. Dabei ergaben sich für eine PUR-Hartschaum-Schichtdicke von 45 mm bei 2 mm Deckschicht unter Verwendung der jeweils ungünstigsten Parameter aus den Materialuntersuchungen und den Sicherheitsbeiwerten des DWA-M 127-2 ***ausreichende Sicherheiten gegenüber 3,6 m bzw. 2,0 m Wassersäule***.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

4 Fazit und Ausblick

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der ersten Phase des Forschungsvorhabens bleibt festzustellen, dass eine „Sandwich-Beschichtung“ aus Polyurethan **grundsätzlich geeignet** ist, um die Wasserdichtheit eines Abwasserschachtes wiederherzustellen. Im Gegensatz zu anderen Auskleidungs- und Beschichtungsverfahren ist ein **statischer Nachweis** gegen äußeren Wasserdruck **auf Basis gängiger Berechnungsansätze möglich**. Bei der Herstellung und Prüfung von ersten Probekörpern sowie einem ersten Praxiseinsatz zeigte sich die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens unter Praxisbedingungen.

Für die Verarbeitung von Polyurethan-Beschichtungen/Schäumen ergaben sich für den vorliegenden Anwendungsfall einsetzbare **Gesamtdicken** der Sandwich-Beschichtung von 20 mm bis 50 mm, insbesondere mit Blick auf den betriebsnotwendigen Mindest-Schachtdurchmesser (z.B. 900 mm).

Bei der **Kurzzeit-Bemessung** der Sandwich-Beschichtung in den o.a. Schichtdicken konnten für einen Einsatz in einem kreisrunden Schacht DN 1000 ausreichende Sicherheiten gegenüber Außenwasserdrücken von 1,7 m bis 8,8 m ermittelt werden.

Bei einer ersten, groben Abschätzung der maßgebenden **Langzeit-Bemessung** für eine Sandwich-Beschichtung mit einer Gesamtdicke von 49 mm (45 mm Hartschaum + 2 x 2 mm PU-Deckschicht) unter Ansatz der Abminderungsfaktoren 2,5 bzw. 4,5 ergaben sich nachweisbare Sicherheiten gegenüber Außenwasserdrücken von 3,6 m bzw. 2,0 m Wassersäule.

Vor diesem Hintergrund kann für das weitere Vorgehen im Rahmen des Teilprojektes II folgender **Ausblick** gegeben werden:

- Im Rahmen der vorliegenden ersten Projektphase wurde zunächst nur ein qualitativer 24-h-Vorversuch an einem Sandwich-Rohrabschnitt zur Abschätzung des Abminderungsfaktors für das Langzeitverhalten der Sandwich-Beschichtung durchgeführt. Um gesicherte Aussagen bzgl. der Langzeit-Steifigkeiten und –Festigkeiten treffen zu können, sollten entsprechende **Langzeitversuche** über einen längeren Zeitraum an mehreren Probekörpern durchgeführt werden. Die so ermittelten Langzeit-Steifigkeiten und -Festigkeiten sollten in weiteren numerischen Untersuchungen berücksichtigt werden, um Bemessungsdiagramme für den in der Praxis wichtigen **Langzeit-Nachweis** erstellen zu können.

- Bei einem ersten Praxiseinsatz der Sandwich-Beschichtung waren Verbesserungspotentiale vor allem bei der Herstellung des PUR-Hartschaum-Kerns zu erkennen. Da bei der Verwendung eines Handrührgerätes starke Schwankungen in der Materialqualität möglich sind, könnte zukünftig eine **automatisierte, maschinelle Mischung der Schaum-Komponenten** eine sinnvolle Alternative darstellen. Darüber hinaus bietet es sich an, die

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

Schalungselemente zukünftig ebenfalls **aus PUR-Hartschaum** herzustellen. Da sich der Schaum mit den Schalungselementen verbindet, könnte die Schalung nach dem Verguss des Schaums als Teil der Schaumschicht im Schacht verbleiben („verlorene Schalung“) und so individuell für jede Schachtgeometrie hergestellt werden. Dabei ist in weiteren Versuchen zu überprüfen, ob der Verbund zwischen Schalung und vor Ort hergestelltem Schaum für den vorliegenden Anwendungsfall ausreicht.

- Die bei dem Nachweiskonzept ermittelten Sicherheiten sollten in **realitätsnahen**, im Idealfall im Maßstab 1:1 durchzuführenden **Versuchen** überprüft werden. Denkbar wären hier z.B. Versuche an Sandwich-Zylindern bei kontrolliertem Außenwasserdruck oder die Simulation von Grundwasserdrücken an einem mit der Sandwich-Beschichtung sanierten, nicht mehr standsicheren Altschacht.

- Die berechneten Sicherheiten gegenüber Außenwasserdrücken könnten durch den Einsatz von Materialien mit höheren Steifigkeiten und Elastizitätsmoduln erhöht werden. Bei der Weiterentwicklung des Verfahrens sollten daher auf der Basis von entsprechend durchzuführenden **Untersuchungen zum Werkstoffverhalten** geeignete Materialien neu ausgewählt bzw. die Materialformulierung der ausgewählten Materialien angepasst werden.

- Ergänzend können auch **Lösungen für Detailfragen**, wie z.B. die zuverlässige Einbindung der seitlichen Zuläufe oder Montage der Steigeisen, entwickelt und in realitätsnahen Prüfungen untersucht werden.

- Bei dem bisher entwickelten Nachweiskonzept wird aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der eingesetzten Materialien ein **Nachweis gegenüber den elastischen Grenzspannungen** geführt. Bei diesem Nachweis werden Resttragfähigkeiten des Materials nicht ausgenutzt, es sind mehr oder weniger große Restsicherheiten gegenüber dem Erreichen der Bruchfestigkeit in einer Randfaser und dem Verlust der Tragfähigkeit vorhanden. Bei der Weiterentwicklung des Konzeptes könnten daher die erforderlichen **Sicherheiten erfγ** auf Basis auch wirklichkeitsnaher, nichtlinearer Werkstoffgesetze unter Berücksichtigung von bleibenden Verformungen bzw. von (Mikro-) Rissen optimiert werden. Auch scheint ein Übergang zu einem echten **(semi-) probalistischen Traglastkonzeptes** in Anlehnung an den EUROCODE denkbar. Da bei diesem Konzept die Sicherheiten getrennt für die Einwirkungs- und Widerstandsseite ermittelt werden, ist eine im Vergleich zum bisher entwickelten Nachweiskonzept wirtschaftlichere Bemessung möglich.

- In den vorliegenden Untersuchungen konnte nicht abschließend geklärt werden, ob die **bemessungsrelevanten Spannungen** zuerst in der Deck- oder in der Mittelschicht auftreten. Falls sich der vorliegende Befund stark unterschiedlicher Elastizitätsmoduln der Deckschicht unter Zug- und Druckbeanspruchung in weiteren Untersuchungen bestätigt, sollte dieses unterschiedliche Materialverhalten in weiteren numerischen Analysen berücksichtigt werden.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

- Auf der Grundlage der bisher durchgeführten numerischen Untersuchungen für drei Schichtdicken der Sandwich-Beschichtung konnte die Beziehung zwischen PUR-Hartschaum-Dicke und aufnehmbarem Wasserdruck bei Ansatz der Kurzzeit-Festigkeiten und -Steifigkeiten überschlägig mit einer Gleichung angenähert werden. Zur Absicherung der Gültigkeit bzw. zur Verbesserung der Genauigkeit dieser Gleichung sollte die **numerischen Untersuchungen** auch **für weitere Schichtdicken der Sandwich-Beschichtung** durchgeführt werden.
- Der Einfluss einer Spaltbildung zwischen Sandwich-Beschichtung und Altschacht sowie einer lokalen Vorverformung wurden bei den vorliegenden Untersuchungen bereits berücksichtigt. Nicht untersucht wurden bislang die **Auswirkungen einer Ovalisierung des Altschachtes** (z.B. aus ungleichmäßiger Korrosion bzw. ungleichmäßigem Abtrag der geschädigten Schachtwandung) in Anlehnung an den Altrohrzustand II des DWA-M 127-2. Hier bieten sich weitere Untersuchungen an, um die praxisrelevanten Einflüsse auf die Standfestigkeit der Sandwich-Beschichtung bei der Bemessung berücksichtigen zu können.
- Die Idealisierungen, die dem Nachweiskonzept des DWA-M 127-2 zugrunde liegen, gehen von sehr konservativen Annahmen aus und beinhalten damit implizit wahrscheinlich relativ große Sicherheitsreserven. Zusätzlich unterscheiden sich die typischen Schäden von Schächten i.d.R. von denen der Kanalrohre. Durch **3D-Simulationen des Gesamtsystems aus Altschacht und Sandwich-Beschichtung** könnte der Einfluss von typischen Schädigungsprozessen an Abwasserschächten (z.B. Korrosion der Schachtwandung) sowie weiterer Geometrie-Einflüsse (z.B. seitliche Zuläufe) wirklichkeitsgetreu berücksichtigt werden. Dies könnte letztlich auch zu einer wirtschaftlicheren Bemessung führen.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

5 Literatur

[1] Bosseler, B., Birkner, T.: Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwVKan) bei den kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in NRW; Endbericht des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, Dezember 2003.

[2] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen. 3. Auflage; Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1998.

[3] Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitung von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal - SüwV Kan). - Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen, 49 (Nr. 10): S. 64- 67; Düsseldorf 1995.

[4] Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen - RdErl. D. Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft v. 03.01.1995 - Bekanntmachung im Ministerialblatt für das Land NRW – Nr. 14 vom 10. Februar 1995.

[5] Bosseler, B.; Puhl, R.: Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten - Studie zu Qualitätseinflüssen und Einsatzgrenzen anhand von Praxis- und Laboruntersuchungen - (Langfassung); Gelsenkirchen, Februar 2005.

[6] Bosseler, B.; Homann, D.; Kaltenhäuser, G.: Bundesweite Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik mittels Beschichtungsverfahren; Gelsenkirchen, Juli 2001.

[7] Bosseler, B.; Puhl, R.: „Sandwich-Beschichtung“ für Abwasserschächte, Teil I: Werkstoff- und Verfahrensprüfungen sowie Grundlagen der statischen Berechnung (Langfassung); Gelsenkirchen, Juni 2005.

[8] EN ISO 178: Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften, Beuth Verlag, Berlin, Februar 1997.

[9] EN ISO 527-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, Beuth Verlag, Berlin, Juli 1996.

[10] EN ISO 604: Kunststoffe – Bestimmung von Druckeigenschaften, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2003.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

[11] DIN EN 1228: Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) - Ermittlung der spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit; Beuth Verlag, Berlin, August 1996.

[12] Kunststoffrohrverband e.V. Bonn (Hrsg.): Kunststoffrohr Handbuch – Rohrleitungssysteme für die Ver- und Entsorgung sowie weitere Anwendungsgebiete, 3. Auflage, Vulkan Verlag, Essen, 1997.

[13] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 4. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.

[14] Franck, A.: Kunststoff-Kompendium – Herstellung, Aufbau, Verarbeitung, Anwendung, Umweltverhalten und Eigenschaften der Thermoplaste, Polymerlegierungen, Elastomere und Duroplaste, 5. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg, 2000.

[15] Carbofix®-Betonschutzplatten aus PEHD, Anwendungsbeispiel Auskleidung eines Abwasserkanals; Firmeninformation der Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG, Reinbek, Mai 2000.

[16] Meschke, G.; Grytz, R.; Gofman, M.: Grundlagen der statischen Berechnung und Bemessung von Sandwich-Linern für die Sanierung geschädigter Abwasserschächte, Gutachten; im Auftrag des IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Bochum, Juni 2005.

[17] DWA-A127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen, August 2000.

[18] DIN V 4034-1: Schächte aus Beton-, Stahlfaserbeton- und Stahlbetonfertigteilen für Abwasserleitungen und –kanäle – Typ 1 und Typ 2; Teil 1: Anforderungen, Prüfungen und Bewertung der Konformität; Beuth Verlag, Berlin, August 2004.

[19] DWA-M127, Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und –leitungen mit Lining- und Montageverfahren, Januar 2000.

[20] Timoshenko, S.P.; Gere, J.M.: Theory of elastic stability, McGraw-Hill, 1961.

[21] Glock, D.: Überkritisches Verhalten eines starr ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von außen und Temperaturdehnung, in: Der Stahlbau S. 212-217, Ausgabe 7 / 1977, Ernst und Sohn Verlag, Berlin.

[22] Chicurel, R.: Shrink buckling of thin circular rings, Journal of Applied Mechanics, ASME 35, 1968.

[23] Wriggers, P.: Nichtlineare Finite-Elemente-Methoden, Springer Verlag, Berlin, 2001.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH

[24] Basar, Y.; Krätzig, W.B.: Mechanik der Flächentragwerke, Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1985.

© 2005 Alle Rechte vorbehalten IKT gGmbH