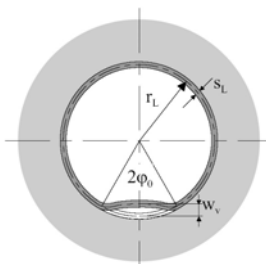


„Sandwich-Beschichtung“ für Abwasserschächte

Teil I:
Werkstoff- und Verfahrensprüfungen sowie
Grundlagen der statischen Berechnung



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

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 4.3.

1	VERANLASSUNG, ZIELSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE	1
2	SANIERUNG DES SCHACHTKÖRPERS	3
2.1	TYPISCHE SCHADENSBILDER	3
2.2	BISHERIGE LÖSUNGSANSÄTZE	7
3	WERKSTOFF- UND VERFAHRENSPRÜFUNGEN.....	10
3.1	GRUNDLAGEN	10
3.2	MATERIALAUSWAHL	12
3.3	QUERSCHNITTSGESTALTUNG	13
3.4	HERSTELLUNG ERSTER PROBEKÖRPER.....	15
3.5	MATERIALPRÜFUNGEN.....	20
3.6	ERSTER IN-SITU-BESCHICHTUNGSTEST	29
4	ENTWICKLUNG EINES BERECHNUNGSVERFAHRENS	31
4.1	VORHANDENE BERECHNUNGSVERFAHREN	31
4.2	AUSWAHL EINES GEEIGNETEN BERECHNUNGSANSATZES.....	31
4.3	NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN	31
4.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN	31
5	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	31
6	FAZIT UND AUSBLICK.....	31
7	LITERATUR.....	31

1 Veranlassung, Zielstellung und Vorgehensweise

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 Instandsetzungsmaßnahmen vorzunehmen.

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.

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 „Sand-

„Sandwich-Beschichtung“ für Abwasserschächte“ (Aktenzeichen IV-9-041 105 0160), dessen erste Ergebnisse in diesem Teilbericht dargestellt sind.

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.

2 Sanierung des Schachtkörpers

Gemäß der Vornorm DIN V 4034-1 [7] wird der Schacht als ein Bauwerk für einen erdverlegten Abwasserkanal oder eine erdverlegte Abwasserleitung definiert. Er dient zur Be- und Entlüftung, Kontrolle, Wartung und Reinigung, der Zusammenführung sowie Richtungs-, Neigungs- und Querschnittsveränderungen von Kanälen und Leitungen. Nach einer Sanierung muss der Schacht gemäß DIN EN 752, Teil 5 [8] alle Leistungsanforderungen erfüllen, die an einen neu erstellten Schacht gestellt werden.

2.1 Typische Schadensbilder

Schäden an Abwasserschächten können durch plan- und unplanmäßige Belastungen bei Neu-erstellung sowie während des Betriebs eines Abwasserschachtes entstehen. Hier sind vor allem mechanische sowie chemisch-biologische Belastungen sowie die Alterung der Materialien zu nennen. Die Schadensarten Undichtigkeit und Korrosion stellen sowohl in Mauerwerks- als auch in Betonschächten typische Schadensbilder dar. Tabelle 1 und Tabelle 2 geben in Anlehnung an DWA-M 143, Teil 2 [9] eine Übersicht über mögliche Schäden am Schachtkörper bzw. an den Einbindungsbereichen in Abwasserschächten aus Betonfertigteilen und Mauerwerk.

Tabelle 1: Schäden an Abwasserschächten aus Betonfertigteilen, Beispiele

<p>Schachtring- verbindung undicht</p>		
<p>Korrosion der Schachtwan- dung und Steigeisen</p>		

Tabelle 1 (Forts.): Schäden an Abwasserschächten aus Betonfertigteilen, Beispiele

<p>Risse in der Schachtwandung</p>		
<p>Sichtbare Undichtigkeiten im Anschluss an den Schacht (Rohreinbindung undicht)</p>		
<p>Abplatzungen im Muffenbereich / an der Schachtwandung</p>		
<p>Gerinne und Bankette defekt</p>		

Tabelle 2: Schäden an Abwasserschächten aus Mauerwerk, Beispiele

<p>Schachtwandung undicht</p>		
<p>Korrosion der Klinker und des Fugenmörtels</p>		
<p>Fehlende Klinker</p>		
<p>Sichtbare Undichtigkeiten im Anschluss an den Schacht (Rohreinbindung undicht)</p>		

Tabelle 2 (Forts.): Schäden an Abwasserschächten aus Mauerwerk, Beispiele

<p>Auswaschungen in der Schachtwandung / in den Einbindungsbereichen</p>		
<p>Gerinne und Bankette defekt</p>		

2.2 Bisherige Lösungsansätze

Je nach Schadensbild des Schachtes können Reparatur-, Renovierungs- bzw. Erneuerungsverfahren zum Einsatz kommen. Nach DIN EN 752, Teil 5 [10] sind unter dem Begriff **Reparatur** Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden zu verstehen. Unter dem Begriff **Renovierung** werden Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Schächten unter vollständiger Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz gefasst. Die **Erneuerung**, das heißt die Herstellung eines neuen Schachtes an der gleichen Position, erfolgt ausschließlich in offener Bauweise (nach [11]). In Abb. 1 ist eine Übersicht über die Verfahrenshauptgruppen zur baulichen Sanierung von Schächten gegeben.

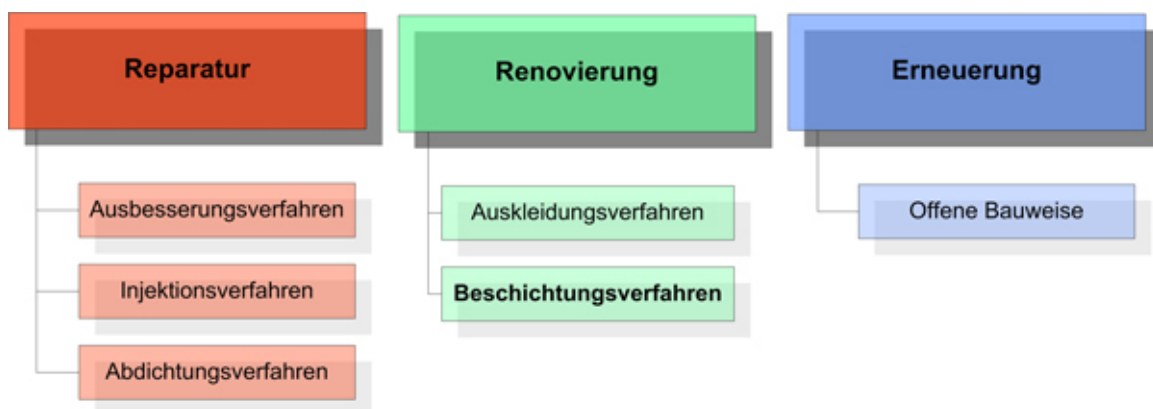


Abb. 1: Übersicht über die Verfahrenshauptgruppen zur baulichen Sanierung von Schächten (nach [2])

Einen Schwerpunkt der **Reparaturverfahren** bildet der Ersatz korrodierter oder zerstörter Steighilfen oder Sicherheitstritte. Darüber hinaus zählen die Ausbesserung von örtlich begrenzten Fehlstellen in Schächten (bei Mauerwerks- und Betonschächten meist mit Reparaturmörteln) und das Einbringen von Injektionsmitteln unter Druck in Risse und Hohlräume zu den dort einsetzbaren Reparaturverfahren. Diese Maßnahmen werden häufig im Vorfeld von **Renovierungsmaßnahmen** durchgeführt, bei denen der gesamte Schachtkörper instand gesetzt wird. Hierzu können Auskleidungs- und Beschichtungsverfahren eingesetzt werden.

Bei den **Auskleidungsverfahren** wird eine geschlossene Schicht auf die gesamte Schachtingenwandung in Form vorgefertigter, örtlich hergestellter und erhärtender Rohre oder auch mit Hilfe vorgefertigter Bauteile und Ortslaminaten aufgebracht [11]. Der Vorteil dieser Systeme besteht darin, dass die einzelnen Auskleidungselemente wie Schachtboden und Wandauskleidung i.d.R. wasserdicht miteinander verschweißt und anschließend mit einfachen Mitteln geprüft werden können. Der Netzbetreiber hat somit eine hohe Sicherheit bezüglich der Dichtigkeit des sanierten Schachtes. Allerdings sind die aufgetragenen korrosionsbeständigen Schichten bei den derzeit üblichen Verfahren i.d.R. nicht selbst tragfähig, sondern müssen durch eine Mörtel hinterfüllung oder durch den Einsatz von Schrauben mit der Schachtwandung verankert werden. So wird z.B. bei der Auskleidung mit PE-Noppenbahnen eine geschlossene, kor-

rosionsbeständige Fläche aus Polyethylen im gesamten Schacht hergestellt. Der Hohlraum zwischen den PE-Elementen und der Schachtwandung wird mit Mörtel verfüllt, in dem sich die PE-Elemente mit Noppen verkrallen (vgl. Abb. 2). Erst durch diese Kombination wird eine Tragfähigkeit und insbesondere eine Beulsicherheit gegen Außenwasserdruck erreicht. Allerdings existieren für die Bewertung der langfristigen Funktionalität der im Mörtel über Noppen verankerten PE-Bahn noch keine zuverlässigen Nachweisverfahren.

**A****B**

Abb. 2: Auskleidung mit PE-Noppenbahnen. A: Einbringen der PE-Noppenbahnen in den Schacht. B: Verfüllen des Ringspalts zwischen PE-Elementen und Schachtwandung mit Mörtel

Bei den **Beschichtungsverfahren** werden spezielle Beschichtungsmaterialien auf die Schachtinnenwandung aufgetragen und erhärten dort zu einer in sich zusammenhängenden Schicht. Eindringendes Wasser ist in jedem Fall vor der Ausführung, z.B. durch Injektionen, zu stoppen. In Schächten der Ortsentwässerung dient die Beschichtung insbesondere dazu, die Wasserdichtheit und das Widerstandsvermögen gegenüber biogener Schwefelsäurekorrosion wiederherzustellen. In einigen Fällen wird auch die statische Tragfähigkeit des Schachtbauwerkes durch eine Beschichtung mit mineralischem Mörtel wiederhergestellt (vgl. Abb. 3). Dies ist insbesondere bei Schächten aus korrodiertem Mauerwerk der Fall, wo bereits durch das Verfüllen der Fugen und der fehlenden Klinker mit Beschichtungsmörtel die Tragfähigkeit des Schachtes erhöht wird. Daneben werden seit einigen Jahren auch vermehrt organische filmbildende Beschichtungen aus Polyurethan eingesetzt, die nicht zur statischen Tragfähigkeit beitragen.

Wesentlichste Voraussetzung für eine funktionsfähige und dauerhafte Beschichtung ist der feste und dauerhafte Verbund zwischen der ausgehärteten Beschichtung und dem Untergrund (Schachtinnenwand). Damit sich der Verbund auf den verschmutzten, feuchten und ggf. korrodierten Schachtinnenwänden mit ausreichender Sicherheit einstellt, ist eine intensive Untergrundvorbereitung mit Wasserhochdruckstrahlen oder eine Sandstrahlung des Untergrundes

und in Abhängigkeit der eingesetzten Materialien ein Trocknen der Wände vor dem Auftragen des Beschichtungsmaterials erforderlich. Im Forschungsprojekt „Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten“ [5] wurden in situ ausgeführte Beschichtungsmaßnahmen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass in vielen Fällen die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinien an den Haftverbund zwischen Beschichtung und Untergrund nicht erfüllt wurden.

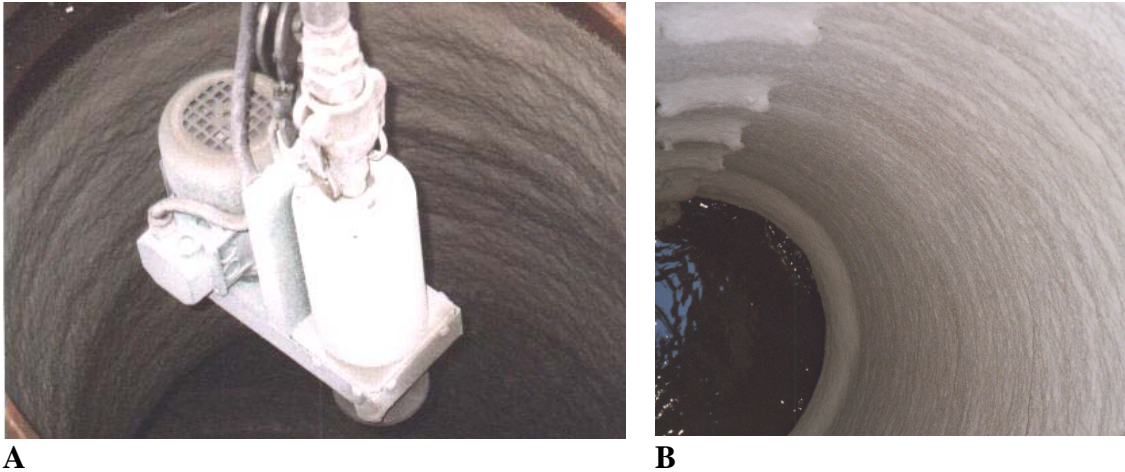


Abb. 3: *Mörtelbeschichtung im Anschleuderverfahren. A: Anschleudermaschine für Schachtbeschichtungen. B: Beschichteter Schacht [12].*

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.

3 Werkstoff- und Verfahrensprüfungen

3.1 Grundlagen

Grundgedanke für die Herstellung einer selbsttragenden, korrosionsbeständigen Sandwich-Beschichtung 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 Schachtwandung aufgetragen, anschließend der Polyurethanhartschaum (PUR-Hartschaum) zur Ausbildung eines tragfähigen Kerns in einer Dicke von mehreren Zentimetern aufgebracht und zuletzt erneut das Polyurethan in einer dünnen Schicht auf den erhärteten Polyurethanschaum aufgetragen.

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. In Abb. 4 ist ein möglicher Wandaufbau eines Polyurethan-Sandwich-Querschnitts dargestellt.



Abb. 4: Aufbau einer Polyurethan-Sandwich-Beschichtung

Die derzeit bei der **Polyurethanbeschichtung** eingesetzten Systeme bestehen aus den beiden Rohstoffkomponenten Polyisocyanaten und Polyolen. Sie können bei Raumtemperatur auf Niederdruck- oder Hochdruckspritzmaschinen verarbeitet werden, wobei die hohe Thixotropie der Reaktionsmischung ein Abfließen des Polyurethans unmittelbar nach dem Aufspritzen

verhindert. Bereits 30 Minuten nach dem Auftrag der Beschichtung kann diese begangen werden, nach 4 Stunden (bei 10°C) ist die Beschichtung vollkommen ausgehärtet. [13]

Das Polyurethan wird i.d.R. im Anspritz- oder im Sprüh-Schleuderverfahren auf die Schachtwandung gebracht (vgl. Abb. 5). Beim **Anspritzverfahren** wird das Polyurethanmaterial mit einem Druck von ca. 4,5 bar händisch auf den Untergrund gesprüht. In einem Arbeitsgang können Schichtdicken von ca. 0,5 mm aufgebracht werden, ohne dass das Material stark verläuft [14]. Beim **Sprüh – Schleuderverfahren** wird das flüssige Polyurethan auf einen rotierenden Teller gespritzt und durch die Rotation auf die Schachtwand geschleudert. Da das Sprüh- Schleuderverfahren nur für die Schachtwände angewendet werden kann, muss die Beschichtung bzw. Reprofilierung im Bereich der Schachtsohle von Hand ausgeführt werden. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass die Steigeisen der Schächte zur Vermeidung von Spritzschatten in diesen Bereichen vor der Beschichtung entfernt werden. Bei beiden Verfahren bildet die Beschichtung ohne weitere Maßnahmen zum Untergrundaussgleich die Struktur der Schachtwand ab.

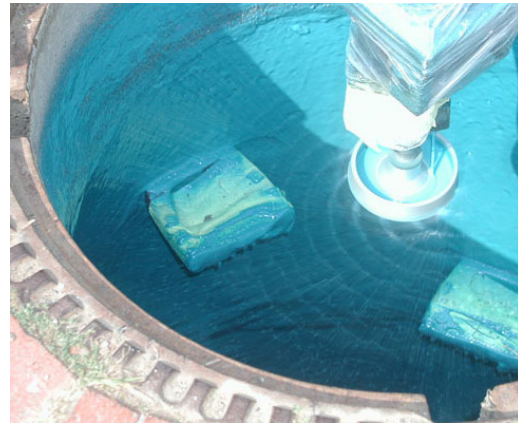
**A****B**

Abb. 5: Beschichtung mit Polyurethan. A: Anspritzen des Polyurethans. B: Polyurethanbeschichtung mittels Sprüh-Schleudertechnik.

Polyurethanbeschichtungen besitzen einen hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand und eine hohe Wasserundurchlässigkeit. Darüber hinaus besitzen sie i.d.R. eine gute Haftung auf Beton und sind beständig gegen saure und basische Medien (vgl. [5], [15], [16]). Da reine Polyurethanbeschichtungen üblicherweise in einer Schichtdicke von 2 bis 6 mm aufgetragen werden, können sie jedoch keinen Beitrag zur statischen Tragfähigkeit des Schachtes leisten (vgl. [5]).

Polyurethanschäume werden speziell für den jeweiligen Anwendungsfall (z.B. Verpackungen, Isolierung bei statischer Belastung, Herstellung von Fahrzeuginnenraumverkleidungen) formuliert und können, entsprechend eingestellt, auch einen Beitrag zur statischen Tragfähigkeit eines Bauwerks leisten. Durch die Formulierung der Topfzeit von 1 Sek. bis 1 Std. kann das Polyurethan an die notwendige Produktionstechnik angepasst werden. Somit kann Polyurethanschäum im Hoch- oder Niederdruckverfahren gegossen, gesprüht und geschleudert werden.

3.2 Materialauswahl

Für die Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens wurden zunächst grundsätzlich geeignete Materialien unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen im vorliegenden Anwendungsfall ausgewählt.

Für die Außenschichten des Polyurethan-Sandwichs wurde das Produkt **OLDODUR WS 56** der Firma Loos PUR Technik e.k., Neuenrade verwendet. Dieses Produkt besitzt eine vergleichsweise geringe Reaktionsfähigkeit mit Wasser, sodass es i.d.R. auch bei einem Auftrag auf feuchte Untergründe nicht zu einem Aufschäumen und einer Blasenbildung kommt (vgl. [5]). Für die Verarbeitung und den Auftrag von Oldodur WS 56 steht eine spezielle Maschinenteknik zur Verfügung. Die Einzelkomponenten können mit einer Niederdruck-Anlage (vgl. Abb. 6-B) verarbeitet und das aufbereitete Material mit einer Mischpistole (vgl. Abb. 6-C) auf die Wandung aufgespritzt bzw. mit einer mobilen Schleudereinrichtung (vgl. Abb. 6-D) auf die Schachtwandung aufgeschleudert werden.

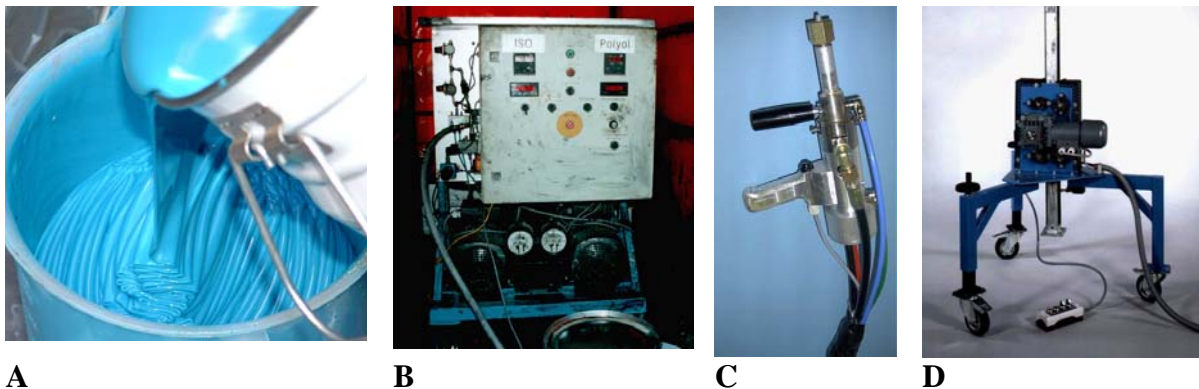


Abb. 6: Polyurethan Produkt Oldodur WS 56 und zugehörige Maschinenteknik. A: Stamm-Komponente Oldodur WS 56. B: Auf einem PKW-Anhänger montierte Verarbeitungsmaschine MPS 20 für 2-Komponenten Polyurethansysteme [16]. C: Mischpistole HPL 5.3.3 E [16]. D: Mobile Schleuder – Scheibe MSS 1500 [16].

Für die Ausbildung des tragenden Sandwich-Kerns wurde das Produkt **BÜFATHERM 44-13**, ein geschlossenzelliger Polyurethanhartschaum (PUR-Hartschaum) der Firma BÜFA Polyurethane GmbH & Co. KG, Oldenburg ausgewählt. Dieses Produkt hat laut Herstellerangaben eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit und eignet sich für die Hohlräumeausschäumung, Isolierungen und ähnliche Anwendungen. Es wird aus den beiden Rohstoffkomponenten BÜFATHERM 44-13 (Polyol) und BÜFAPUR B 1000 (Isocyanant) hergestellt und kann sowohl auf Hoch- und Niederdruckmaschinen als auch von Hand gemischt und verarbeitet werden. Die Abbindezeit bei Handvermischung und einer Umgebungstemperatur von ca. 25° C beträgt 105 ± 20 sec. (vgl. [17], [18])



A



B

Abb. 7: Roh-Komponenten des ausgewählten Polyurethanschaums. A: Polyol BÜFATHERM 44-13. B: Isocyanat BÜFAPUR B 1000.

3.3 Querschnittsgestaltung

Abwasserschächte werden im Regelfall mit einem Innendurchmesser von 1.000 bis 1.500 mm ausgebildet (vgl. [19], [20]). Nach DWA-A 157 [21] bzw. DWA-A 241 [22] sollte die lichte Mindestweite bzw. der Mindestdurchmesser bei viereckigen und runden Schächten 1,0 m betragen. Grundsätzlich muss der Schacht so geräumig sein und die Einstiegsöffnung so angeordnet werden, dass das Reinigen der Kanäle vom Schacht aus einwandfrei möglich ist.

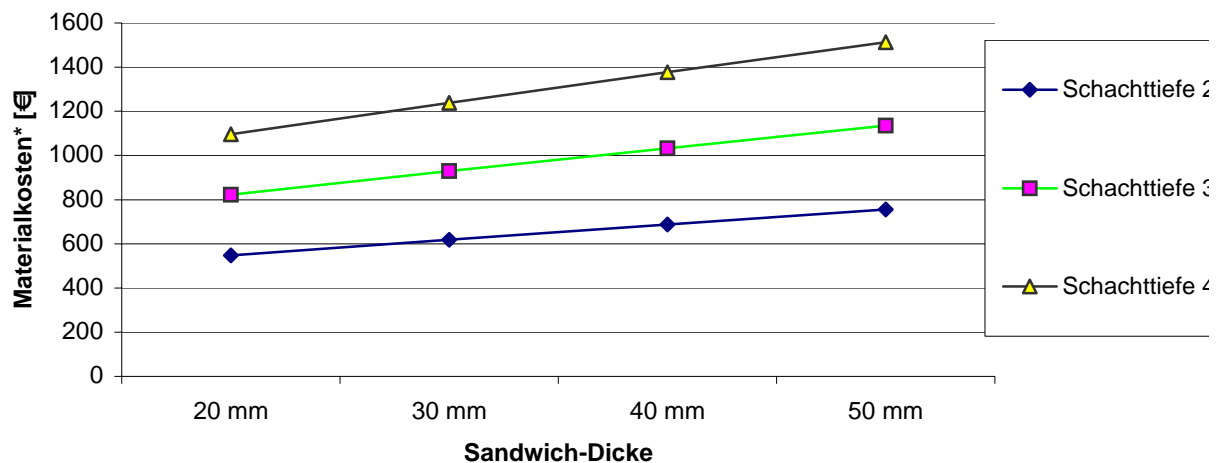
Aus diesem Grunde ist es notwendig, die Wandstärke der Sandwich-Beschichtung möglichst gering zu halten. Bei einer Wandstärke des Sandwich-Querschnitts von 5 Zentimetern wird der Innendurchmesser üblicher Abwasserschächte DN 1000 auf ca. 900 mm verringert. Erfahrungen, unter anderem auch aus [5] und [6], zeigen, dass der Einstieg und das Reinigen der Kanäle bei diesem Durchmesser i.d.R. noch einwandfrei möglich ist. Bei deutlich geringeren Durchmessern, z.B. 800 mm, ist dagegen die Bewegungsfreiheit eingeschränkt.

In [5] wurden an 16 in situ ausgeführten Polyurethanschachtbeschichtungen durchschnittliche Schichtstärken von ca. 4 mm gemessen, wobei die geringsten gemessenen Schichtdicken ca. 2 mm betragen. Unter Berücksichtigung einer notwendigen Mindeststärke für den Polyurethanschaumkern (vor allem aus verarbeitungstechnischen Gründen) ergeben sich somit die in Abb. 8 dargestellten sinnvollen Querschnittsgestaltungen der Sandwich-Beschichtung.



Abb. 8: Bau- und betriebstechnisch sinnvolle Querschnitte der Sandwich-Beschichtung

Auch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist eine möglichst geringe Schichtdicke anzustreben. Bei einem Preis von ca. 14,00 € pro Kilogramm Oldodur WS 56 und unter Annahme eines Kilopreises der Polyurethan-Hartschaum-Komponenten von ca. 3,50 € ergeben sich bei unterschiedlichen Schachttiefen und Wandstärken die in Abb. 9 dargestellten Materialkosten.



* Materialkosten unter Annahme einer Polyurethan-Schichtdicke von jeweils 2 mm Stärke und einem Preis von 3,50 € pro Kg der Polyurethan-Hartschaum-Komponenten sowie einem Preis von 14,00 € pro Kg des eingesetzten Polyurethanprodukts.

Abb. 9: Abschätzung der Materialkosten für eine Sandwich-Beschichtung in Abhängigkeit der Wandstärke und Schachttiefe

Demnach liegen die reinen Materialkosten bei der Beschichtung eines zwei Meter tiefen Schachtes mit einer 20 mm starken Sandwich-Beschichtung 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 Materialkos-

ten für eine 20 mm starke Mörtelbeschichtung eines zwei Meter tiefen Schachtes (ca. 275 €^a) bzw. den 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.

3.4 Herstellung erster Probekörper

Im Rahmen des Projektes wurden erste Probekörper hergestellt, um Anhaltswerte bzgl. des Verhaltens der einzelnen Materialien sowie des Sandwich-Querschnitts gewinnen zu können. Für die Prüfungen zur Bestimmung der Festigkeiten und der Elastizitätsmoduln der Materialien und des Gesamtquerschnittes sowie zur Beurteilung des Verbundverhaltens zwischen Polyurethan und PUR-Hartschaum wurden Platten unterschiedlicher Schichtdicke gefertigt. Darüber hinaus wurde ein Ringabschnitt Durchmesser DN 1000 im Sandwich-Aufbau hergestellt, um auch die Ringsteifigkeit überprüfen zu können und einen ersten Anhaltswert bzgl. des anzusetzenden Abminderungsfaktors für die Ermittlung der Langzeit-E-Moduln zu erhalten.

Abb. 10 zeigt die Herstellung einer Sandwich-Platte. Dabei wurde zunächst eine Folie mit Oldodur WS 56 in einer Schichtdicke von ca. 2 mm besprüht (vgl. Abb. 10-A). Anschließend wurden die für die gewünschte Schichtdicke notwendigen Mengen der Einzelkomponenten des PUR-Hartschaums abgewogen und diese mit einem Handrührgerät vermischt (vgl. Abb. 10-B/C). Auf die mittlerweile erhärtete Schicht aus Oldodur WS 56 wurde eine Schalung gestellt und die vollständig durchmischten Rohkomponenten des PUR-Hartschaums eingegossen (vgl. Abb. 10-D). Nach weniger als einer Minute begann der Schaum unter deutlich wahrnehmbarer Volumenzunahme und Wärmeentwicklung zu erhärten (vgl. Abb. 10-E). Nach ca. 10 min war der PUR-Hartschaum komplett ausgehärtet (vgl. Abb. 10-F). Im nächsten Schritt wurde das überstehende Polyurethan abgeschnitten und die andere Seite der Platte in einer Schichtdicke von ca. 2 mm mit Oldodur WS 56 besprüht (vgl. Abb. 10-G/H)

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])

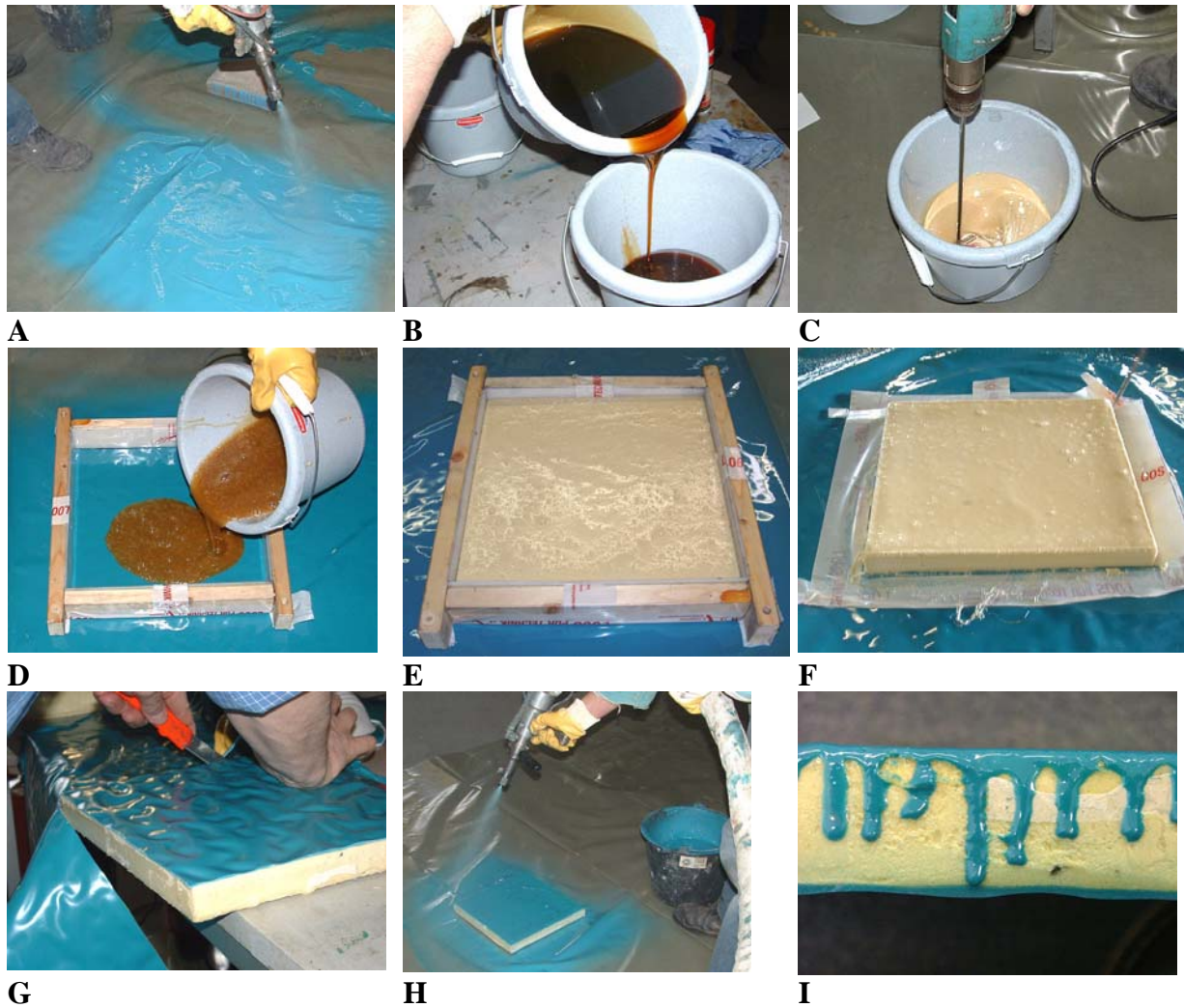


Abb. 10: Herstellung eines Sandwich- Probekörpers. A: Aufspritzen des Polyurethans auf eine Folie. B: Zusammengießen der Roh-Komponenten des PUR-Hartschaums. C: Vermischen der Roh-Komponenten. D: Eingießen des PUR-Hartschaum-Gemisches. E: Erhärtender PUR-Hartschaum. F: Erhärtete und entschaltete Hartschaum-Schicht. G: Abschneiden des seitlich überstehenden Polyurethans. H: Aufspritzen der zweiten Polyurethan-Schicht. I: Fertiggestellter Probekörper in Seitansicht.

In Abb. 11 ist die Herstellung eines Sandwich-Ringabschnittes dargestellt. Dafür wurde zunächst das Oldodur WS 56 in einer Schichtstärke von ca. 2 mm auf die Innenseite einer Schalung aus Holz- und PE-Elementen im Sprüh-Schleuderverfahren aufgetragen (vgl. Abb. 11-A/B). Anschließend wurde eine Kreisschalung aus drei PUR-Hartschaum-Elementen in den Innenraum der Holz- und PE-Schalung gestellt und der fertig vermischte PUR-Hartschaum in den Zwischenraum der beiden Schalungen gefüllt (vgl. Abb. 11-C/D). Der PUR-Hartschaum verband sich mit der Innenschalung aus dem gleichen Material, so dass diese Schalungselemente als Teil der Sandwich-Konstruktion im Kreisring belassen wurden. Um die Voraussetzungen für einen guten Verbund mit der nächsten Polyurethan-Schicht zu verbessern, wurde die Innenseite des PUR-Hartschaums aufgeraut (vgl. Abb. 11-E). Nachdem die innere Schicht

aus Oldodur WS 56 aufgetragen und ausgehärtet war, konnten der Sandwich-Kreisring entschalt und überstehende Grate entfernt werden (vgl. Abb. 11-F/G/H).

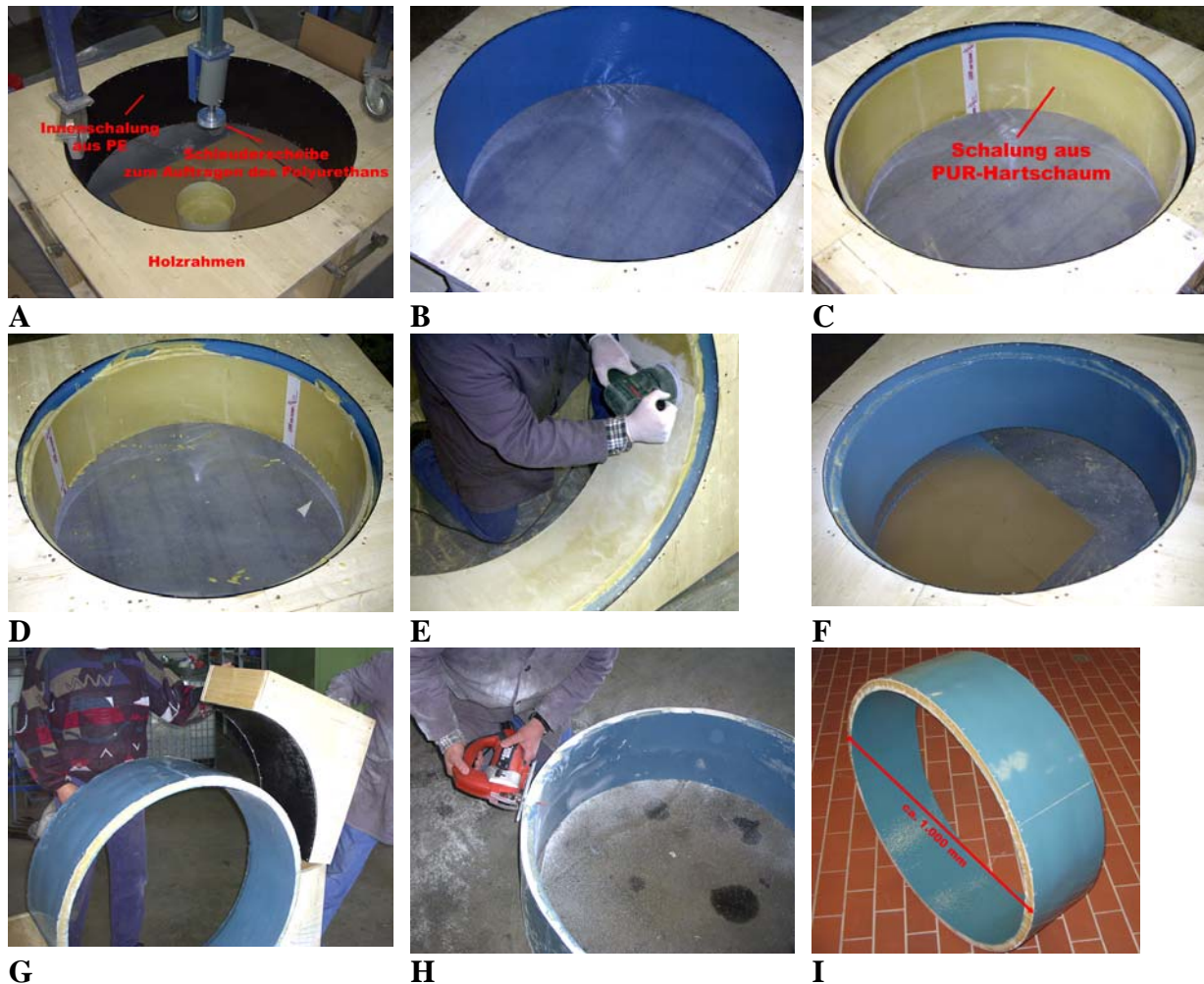


Abb. 11: Herstellung eines Sandwich-Ringabschnitts zur Prüfung der Ringsteifigkeit. A: Außenliegende Schalung aus Holz und PE-Elementen. B: Mit Polyurethan beschichtete Außenschalung. C: Innere Schalung zum Verfüllen des PUR-Hartschaums. D: Nach Verfüllung und Erhärtung des PUR-Hartschaums. E: Anrauen der Oberfläche des PUR-Hartschaums. F: Sandwich-Körper nach zweiter Polyurethanbeschichtung. G: Entschalen des Kreisrings. H: Entfernen von überstehenden Graten. I: Fertiger Sandwich-Rohrabschnitt.

Um auch die Materialkennwerte der Einzelkomponenten des Sandwich-Querschnitts abschätzen zu können, wurden zusätzlich Probekörper aus Polyurethan und dem PUR-Hartschaum hergestellt. Dazu wurden Schalungen aus PE-HD verwendet, in die das Polyurethan eingespritzt bzw. der PUR-Hartschaum eingegossen wurde. Abb. 12 zeigt die Herstellung von Polyurethan-Platten im Aufspritzverfahren sowie die erhärteten und entschalteten Polyurethan- und PUR-Hartschaum- Probekörper. In Abb. 13 sind einige der für die Materialprüfungen vorbereiteten Probekörper dargestellt.



Abb. 12: Ausgangs-Probekörper für die Überprüfung der Materialkennwerte der Einzelkomponenten des Sandwich-Querschnitts. A: Herstellung von Polyurethan-Platten im Aufspritzverfahren. B: Erhärtete und entschaltete Polyurethan-Platte. C: Erhärtete und entschaltete PUR-Hartschaum-Platte.

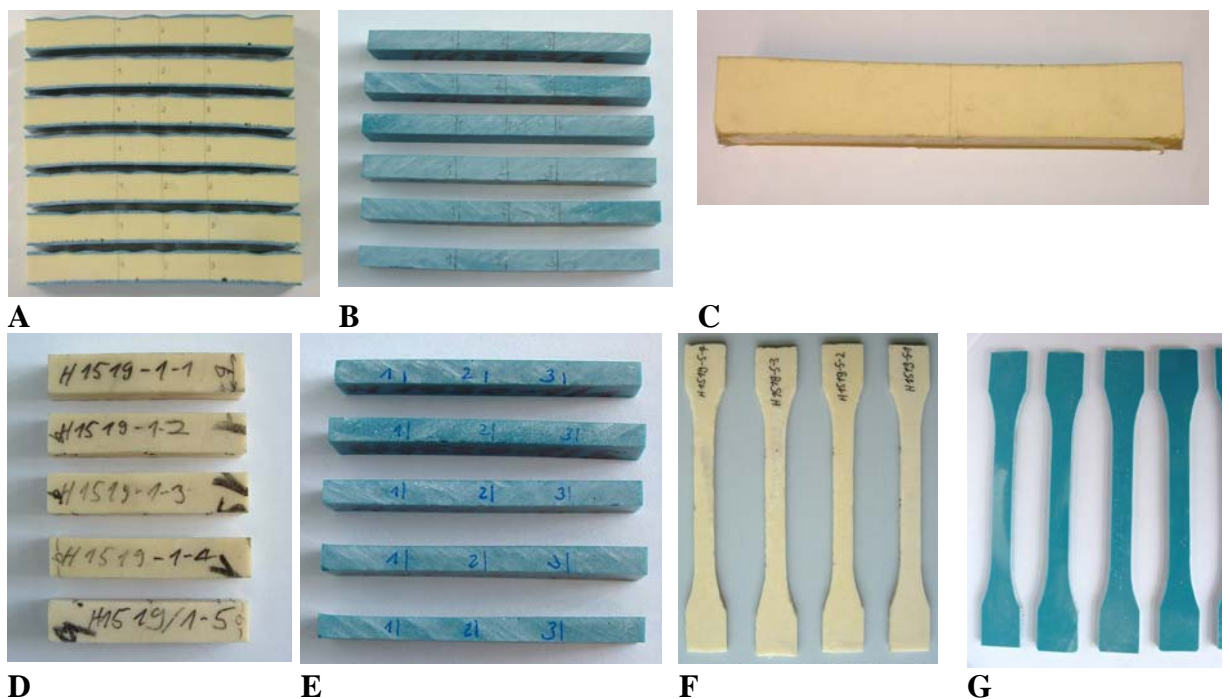


Abb. 13: Für die Materialprüfungen vorbereitete Probekörper. A: Sandwich-Probekörper zur Bestimmung des äquivalenten Biegemoduls. B: Polyurethan-Probekörper zur Bestimmung des Biegemoduls. C: PUR-Hartschaum-Probekörper zur Bestimmung des Biegemoduls. D: PUR-Hartschaum- Probekörper zur Bestimmung des Druckmoduls. E: Polyurethan- Probekörper zur Bestimmung des Druckmoduls. F: PUR-Hartschaum- Probekörper zur Bestimmung des Zugmoduls. G: Polyurethan- Probekörper zur Bestimmung des Zugmoduls.

Bei der Herstellung der Probekörper konnten die folgenden **Erkenntnisse / Schlussfolgerungen** gewonnen werden:

- Der Mischvorgang bei der Herstellung des PUR-Hartschaums ist sehr sensibel. Beim Vermischen der Rohkomponenten mit einem Handrührgerät ist 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-Hartschaum kann 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 Oldodor 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.

3.5 Materialprüfungen

An den Sandwich-, Polyurethan- und Hartschaum-Probekörpern (vgl. Abb. 13) wurde die 3-Punkt-Biegezugfestigkeit sowie der Biege-Modul in Anlehnung an EN ISO 178 [23] bestimmt. Darüber hinaus wurden bei den Polyurethan- und den Hartschaum-Probekörpern die Zugfestigkeit und der Zugmodul in Anlehnung an EN ISO 527 – 2 [24] sowie die Druckfestigkeit und der Druckmodul in Anlehnung an EN ISO 604 [25] ermittelt. Der Sandwich-Ringabschnitt (vgl. Abb. 11) wurde in Anlehnung an DIN EN 1228 [26] geprüft, um erste Anhaltswerte bzgl. der Ringsteifigkeit der Sandwich-Beschichtung zu erhalten und das Langzeit-Verhalten der Sandwich-Beschichtung abschätzen zu können.

Die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführte Materialprüfungen sind in Abb. 14 dargestellt. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Materialprüfungen. In Tabelle 4 bis Tabelle 11 sind die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen detailliert aufgeführt. In Tabelle 12 sind sämtliche Ergebnisse der Materialprüfungen in einer Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 3: Im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Materialprüfungen

	Zugfestigkeit / Zug-Modul in Anlehnung an EN ISO 527 –2 [24]	Druckfestigkeit / Druck-Modul in Anlehnung an EN ISO 604 [25]	Biegezugfestigkeit / Biege-Modul in Anlehnung an EN ISO 178 [23]	Ringsteifigkeit in Anlehnung an DIN EN 1228 [26]
Sandwich- Querschnitt	-	-	14 Probekörper	1 Probekörper
Polyurethan	11 Probekörper	9 Probekörper	10 Probekörper	-
PUR- Hartschaum	9 Probekörper	8 Probekörper	9 Probekörper	-

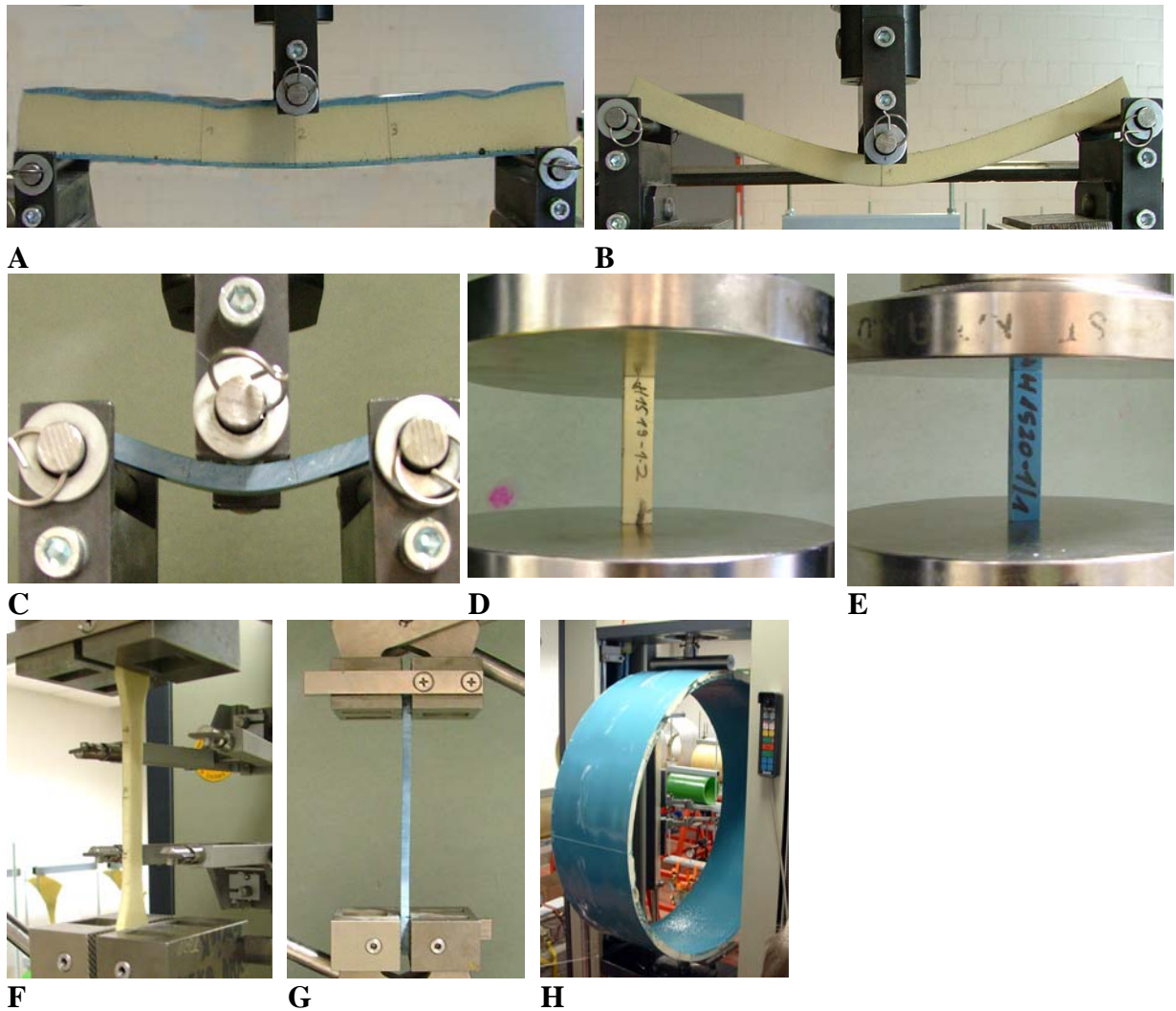



Abb. 14: Bestimmung der Materialeigenschaften. A: Äquivalenter Biegemodul des Sandwich-Querschnitts. B: Biegemodul des PUR-Hartschaums. C: Biegemodul des Polyurethan. D: Druckmodul des PUR-Hartschaum. E: Druckmodul des Polyurethan. F: Zugmodul des PUR-Hartschaum. G: Zugmodul des Polyurethan. H: Ringsteifigkeit und Kriechfaktor des Sandwich-Rohrabschnittes.

Tabelle 4: Ergebnisübersicht über die Biegezugfestigkeiten und die äquivalenten Biege-Moduln der untersuchten Sandwich-Proben*


		Biegezugfestigkeit							äquivalenter Biege-Modul						
Einzelwerte [N/mm ²]	d = 25 mm ¹⁾	12,2	13,1	13,0	13,6	12,0	11,2	12,2	419,9	376,1	367,7	358,8	357,5	360,2	371,2
	d = 30 mm ²⁾	10,6	10,2	12,0	13,5	12,7	12,1	11,1	349,3	359,5	350,4	382,5	353,3	327,6	324,3
Mittelwert μ		12,1 N/mm ²							361,3 N/mm ²						
Standardabweichung σ		1,04 N/mm ²							23,37 N/mm ²						
Variationskoeffizient v		8,6 %							6,5 %						
Mittlerer Fehler des Mittelwertes m(μ)		0,28 N/mm ²							6,25 N/mm ²						

* Prüfung in Anlehnung an EN ISO 178 [23]

1) Gesamtprobekörperdicke 25 mm, Polyurethanschichten jeweils 2 mm

2) Gesamtprobekörperdicke 30 mm, Polyurethanschichten jeweils 2 mm

Tabelle 5: Ergebnisübersicht über die Biegezugfestigkeiten und Biege-Moduln der untersuchten PUR-Hartschaum-Proben*


		Biegezugfestigkeit					Biege-Modul				
Einzelwerte [N/mm ²]	d = 15 mm ¹⁾	9,5	9,7	8,8	8,7	9,0	332,1	366,6	348,4	313,5	327,0
	d = 40 mm ²⁾	8,8	9,8	9,7	9,8		350,8	242,7	249,1	248,5	
Mittelwert μ		9,3 N/mm ²					308,7 N/mm ²				
Standardabweichung σ		0,48 N/mm ²					48,91 N/mm ²				
Variationskoeffizient v		5,1 %					15,8 %				
Mittlerer Fehler des Mittelwertes m(μ)		0,16 N/mm ²					16,30 N/mm ²				

* Prüfung in Anlehnung an EN ISO 178 [23]

1) Probekörperdicke 15 mm


2) Probekörperdicke 40 mm

Tabelle 6: Ergebnisübersicht über die Biegezugfestigkeiten und Biege-Moduln der untersuchten Polyurethan-Proben*

		Biegezugfestigkeit					Biege-Modul				
Einzelwerte [N/mm ²]		19,9	22,4	21,8	20,7	21,0	594,1	642,3	654,5	640,0	648,2
		21,3	22,7	22,4	21,5	21,4	619,1	622,3	645,8	634,8	643,3
Mittelwert μ		21,5 N/mm ²					634,4 N/mm ²				
Standardabweichung σ		0,86 N/mm ²					17,96 N/mm ²				
Variationskoeffizient v		4,0 %					2,8 %				
Mittlerer Fehler des Mittelwertes m(μ)		0,27 N/mm ²					5,68 N/mm ²				


* Prüfung in Anlehnung an EN ISO 178 [23]

Tabelle 7: Ergebnisübersicht über die Zugfestigkeiten und Zug-Moduln der untersuchten PUR-Hartschaum-Proben*

	Zugfestigkeit					Zug-Modul				
	Einzelwerte [N/mm ²]	8,8	8,4	8,8	9,6	8,6	458,1	355,5	433,3	572,2
	8,7	8,7	9,7	9,3		348,8	419,0	536,4	489,8	
Mittelwert μ	9,0 N/mm ²					449,1 N/mm ²				
Standardabweichung σ	0,46 N/mm ²					74,91 N/mm ²				
Variationskoeffizient v	5,2 %					16,7 %				
Mittlerer Fehler des Mittelwertes $m(\mu)$	0,15 N/mm ²					24,97 N/mm ²				


* Prüfung in Anlehnung an EN ISO 527 - 2 [24]

Tabelle 8: Ergebnisübersicht über die Zugfestigkeiten und Zug-Moduln der untersuchten Polyurethan-Proben*

	Zugfestigkeit						Zug-Modul					
	Einzelwerte [N/mm ²]	14,3	13,8	14,0	13,5	13,9	13,6	176,0	166,1	165,3	184,8	124,4
	13,7	13,4	13,1	13,1	13,1		156,7	152,8	157,4	164,9	163,2	
Mittelwert μ	13,6 N/mm ²						160,6 N/mm ²					
Standardabweichung σ	0,40 N/mm ²						15,27 N/mm ²					
Variationskoeffizient v	2,9 %						9,5 %					
Mittlerer Fehler des Mittelwertes $m(\mu)$	0,12 N/mm ²						4,6 N/mm ²					

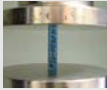
* Prüfung in Anlehnung an EN ISO 527 - 2 [24], Prüfungen durchgeführt im Rahmen von [5]

Tabelle 9: Ergebnisübersicht über die Druckfestigkeiten und Druck-Moduln der untersuchten PUR-Hartschaum-Proben*

	Druckfestigkeit				Druck-Modul			
	Einzelwerte [N/mm ²]	6,8	6,8	6,8	7,1	340,6	323,7	336,0
	7,0	7,6	7,7	7,5	344,2	364,6	347,2	342,5
Mittelwert μ	7,2 N/mm ²				341,1 N/mm ²			
Standardabweichung σ	0,38 N/mm ²				12,31 N/mm ²			
Variationskoeffizient v	5,3 %				3,6 %			
Mittlerer Fehler des Mittelwertes $m(\mu)$	0,13 N/mm ²				4,35 N/mm ²			


* Prüfung in Anlehnung an EN ISO 604 [25]

Tabelle 10: Ergebnisübersicht über die Druckfestigkeiten und Druck-Moduln der untersuchten Polyurethan-Proben*

	Druckfestigkeit					Druck-Modul				
	Einzelwerte [N/mm ²]	13,2	7,2	12,1	8,5	9,6	684,6	603,9	736,9	643,4
	8,9	9,8	8,28	8,0		550,6	652,3	623,4	543,4	
Mittelwert μ	9,5 N/mm ²					633,4 N/mm ²				
Standardabweichung σ	1,97 N/mm ²					61,77 N/mm ²				
Variationskoeffizient v	20,7 %					9,8 %				
Mittlerer Fehler des Mittelwertes $m(\mu)$	0,66 N/mm ²					20,59 N/mm ²				

* Prüfung in Anlehnung an EN ISO 604 [25]

Tabelle 11: Ergebnisübersicht über die Prüfung der Ringsteifigkeit des untersuchten Sandwich-Rohrabschnittes*

	Ringsteifigkeit S_0 [N/mm ²]	äquivalenter E-Modul [N/mm ²]
	Nach 3 min	$1,352 \cdot 10^{-3}$
Nach 1 h	$1,143 \cdot 10^{-3}$	571
Nach 24 h	$0,954 \cdot 10^{-3}$	477
Kriechneigung nach 24 h	16,55 %	

* Prüfung in Anlehnung an DIN EN 1228 [26]

Tabelle 12: 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.

Folgende **Erkenntnisse / Schlussfolgerungen** können aus den Materialprüfungen gezogen werden:

- Die ermittelten **Kurzzeit-Festigkeiten und -Elastizitätsmoduln der Sandwich-Werkstoffe** sind im Vergleich zu den üblicherweise bei der Sanierung von Schachtbauwerken im Auskleidungsverfahren eingesetzten Werkstoffe (PE-HD bzw. GFK) **relativ gering**. Während bei den Sandwich-Werkstoffen Zugfestigkeiten von ca. 9 – 13 N/mm² und Elastizitätsmoduln von ca. 160 – 450 N/mm² ermittelt wurden, liegen die Orientierungswerte der Zugfestigkeiten von GFK-Werkstoffen bei ca. 120 – 350 N/mm² bzw. bei ca. 8.000 – 20.000 N/mm² für den Elastizitätsmodul (vgl. [27]). Bedingt vergleichbar sind die Werkstoffeigenschaften von PE-HD. Hier werden in der Fachliteratur bzw. von den Herstellern (vgl. [27], [28], [29], [30]) Orientierungswerte für die zu erwartenden Zugfestigkeiten von ca. 17 – 29 N/mm² bzw. von ca. 900 – 1.200 N/mm² für den Elastizitätsmodul gegeben.
- Bzgl. der **Langzeit-Festigkeiten und -Elastizitätsmoduln** können derzeit noch **keine gesicherten Aussagen** getroffen werden. Eine erste, grobe Abschätzung erlaubt die Untersuchung der 24-h-Kriechneigung des Sandwich-Rohrabschnitts. Bei einer Extrapolation der dabei ermittelten E-Moduln unter Verwendung von potentiellen bzw. linearen Regressionslinien ergibt sich ein Abminderungsfaktor (50 Jahre) im Bereich von $2,5 \leq A \leq 4,5$ (vgl. Abb. 17).
- Wie die Last-Dehnungsdiagramme (vgl. Abb. 15) der durchgeführten Materialuntersuchungen zeigen, sind sowohl das verwendete Polyurethan als auch der PUR-Hartschaum vor dem Erreichen der Bruchfestigkeit durch ein z.T. **nichtlineares, vermutlich anelastisches Materialverhalten** gekennzeichnet [31] (vgl. auch [32], [33]). Da die Materialien bei geringen Spannungen ein annähernd lineares Materialverhalten aufweisen, wurden zusätzlich zu den Bruchfestigkeiten auch die elastischen Grenzspannungen^a ermittelt.
- 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. 15-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.

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

- Bei der Prüfung des Verbundquerschnitts gab es **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. 16).

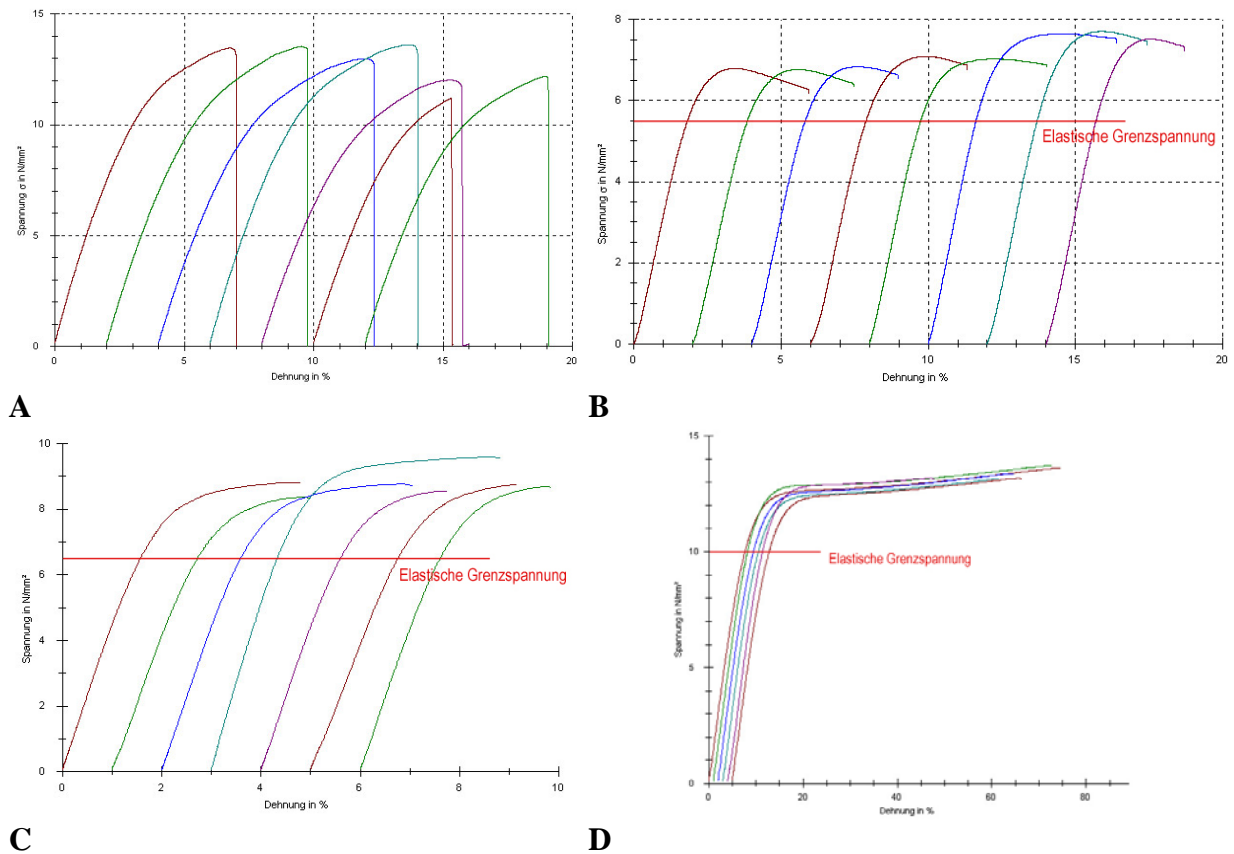


Abb. 15: Auszüge aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen der Materialprüfungen. A: Gesamtquerschnitt, Biegung. B: PUR-Hartschaum, Druck. C: PUR-Hartschaum, Zug. D: Polyurethan, Zug.

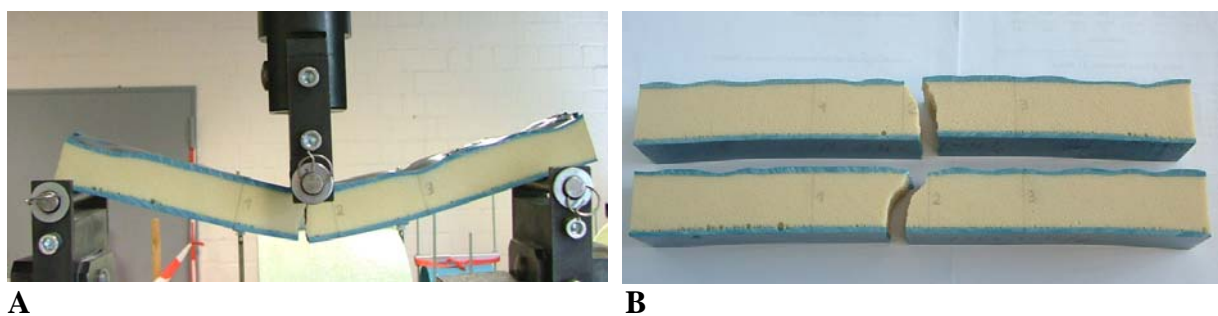
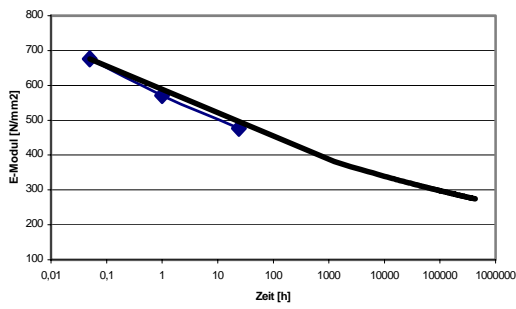
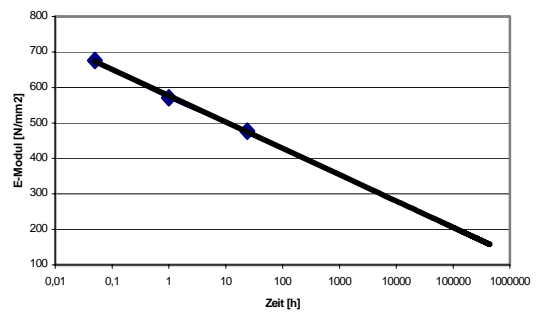


Abb. 16: Bruchverhalten des Sandwich-Querschnitts. A: Während des Bruchversagens. B: Probekörper B 1403-4/3 und B 1403-4/6 nach Bruch.



A



B

Abb. 17: Extrapolation der bei der Untersuchung der Anfangs-Ringsteifigkeit ermittelten *E*-Moduln zur ersten Abschätzung des 50-Jahre-Abminderungsfaktors für die Langzeit-Steifigkeiten bzw. -*E*-Moduln. A: Regression unter Verwendung einer Regressionskurve der Form $y = c \cdot [\ln(x)]^b$. B: Regression unter Verwendung einer Regressionsgerade der Form $y = a \cdot \ln(x) + b$.

3.6 Erster In-situ-Beschichtungstest

Um die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens zu prüfen und bereits in diesem Stadium der Entwicklung grundlegende Verbesserungspotentiale des Verfahrens identifizieren und ggf. geeignete Verfahrensvarianten ableiten zu können, wurde ein in Betrieb befindlicher Abwasserschacht, bei dem eine starke Korrosion der Betonwandung von stellenweise mehreren Zentimetern vorlag (vgl. Abb. 18), im Rahmen des Vorhabens erstmalig mit einer Sandwich-Beschichtung saniert. Nachfolgend werden der Verfahrensablauf sowie die erkannten Verbesserungspotentiale beschrieben.



Abb. 18: Ausgangssituation: Korrodierter Abwasserschacht aus Betonfertigteilen. A: Blick in den Schacht. B: defektes Gerinne und defekte Berme. C: Korrosion der Schachtwandung.

3.6.1 Instandsetzung des Gerinnes und der Berme

In einem ersten Schritt wurde der Schacht mit Wasserhochdruck gereinigt. Anschließend wurden das defekte Gerinne sowie die Berme instand gesetzt. Dazu wurden die im Gerinne befindlichen Steinzeughalbschalen an passender Stelle abgetrennt, eine KG-Halbschale bündig in das Gerinne eingesetzt, diese mit mineralischem Mörtel an das bestehende Gerinne sowie die Berme angebunden und die Berme großflächig mit mineralischem Mörtel ausgebessert. Abb. 19 zeigt die Instandsetzung des Gerinnes und der Berme. Auf Grundlage der Beobachtungen konnten die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ⇒ Die o.a. Vorarbeiten werden bei entsprechenden Schadensbildern ebenfalls im Vorfeld von marktüblichen Schachsanierungen im Beschichtungsverfahren durchgeführt. Es ergaben sich **keine Schwierigkeiten** bei der Ausführung der Arbeiten, der gesamte Arbeitsprozess inklusive der Reinigung des Schachtes dauerte **ca. 70 min**. Die weiteren **Arbeiten wurden am nächsten Tag fortgesetzt**, da der mineralische Mörtel aushärten musste.
- ⇒ Für die zukünftige Ausführung bietet 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 an die Sandwich-Beschichtung der Schachtwandung angebunden und der Arbeitsablauf optimiert werden, da die Erhärtungsdauern des PUR-Hartschaumes und des Polyurethans wesentlich geringer als die eines mineralischen Mörtels sind.



Abb. 19: Instandsetzung des Gerinnes und der Berme. A: Einsetzen einer Halbschale in das Gerinne. B: Ausbessern der Berme mit mineralischem Mörtel. C: Instandgesetztes Gerinne und Berme.

3.6.2 Auftragen der ersten Schicht und Anbindung der Zu- und Abläufe

Im nächsten Schritt wurden die erste Schicht der Sandwich-Beschichtung aufgetragen sowie die Zu- und Abläufe mittels Kurzlinern aus einem Polyurethanharz und einem Glasfaser-Gewebe abgedichtet und an die Beschichtung angebunden. Dazu wurde die Polyurethanbeschichtung in einer Stärke von ca. 2-3 mm im Aufspritzen großflächig auf den oberen Teil der Schachtwandung gespritzt (vgl. Abb. 20-A). Die Zu- und Abläufe wurden mit Absperrblasen abgedichtet und der untere Teil unter Einsatz eines Heißluftgebläses getrocknet. Anschließend wurden die Berme und das Gerinne - ebenfalls im Aufspritzenverfahren - mit Polyurethan beschichtet. Zwei Glasfaser-Gewebe wurden mit einem Polyurethanharz getränkt, auf Packer aufgewickelt, in die Zu- und Abläufe gesetzt und dort mit der Rohrwandung verklebt (vgl. Abb. 20-B/C). Noch während der Aushärtung der Kurzliner wurden der untere Teil der Schachtwandung im Aufspritzenverfahren mit Polyurethan beschichtet und somit die Kurzliner an die Beschichtung angebunden (vgl. Abb. 20-D). Auf Grundlage der Beobachtungen konnten die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ⇒ Das Vorgehen entspricht dem einer marktüblichen Beschichtung mit Polyurethan. Es ergaben sich **keine Schwierigkeiten** bei der Ausführung der Arbeiten, der gesamte Arbeitsprozess dauerte **ca. 180 min** (davon Trocknung der Berme und des Gerinnes: ca. 20 min, Beschichtung des Gerinnes und der Berme: ca. 10 min, Aushärtezeit der Kurzliner: ca. 30 min).

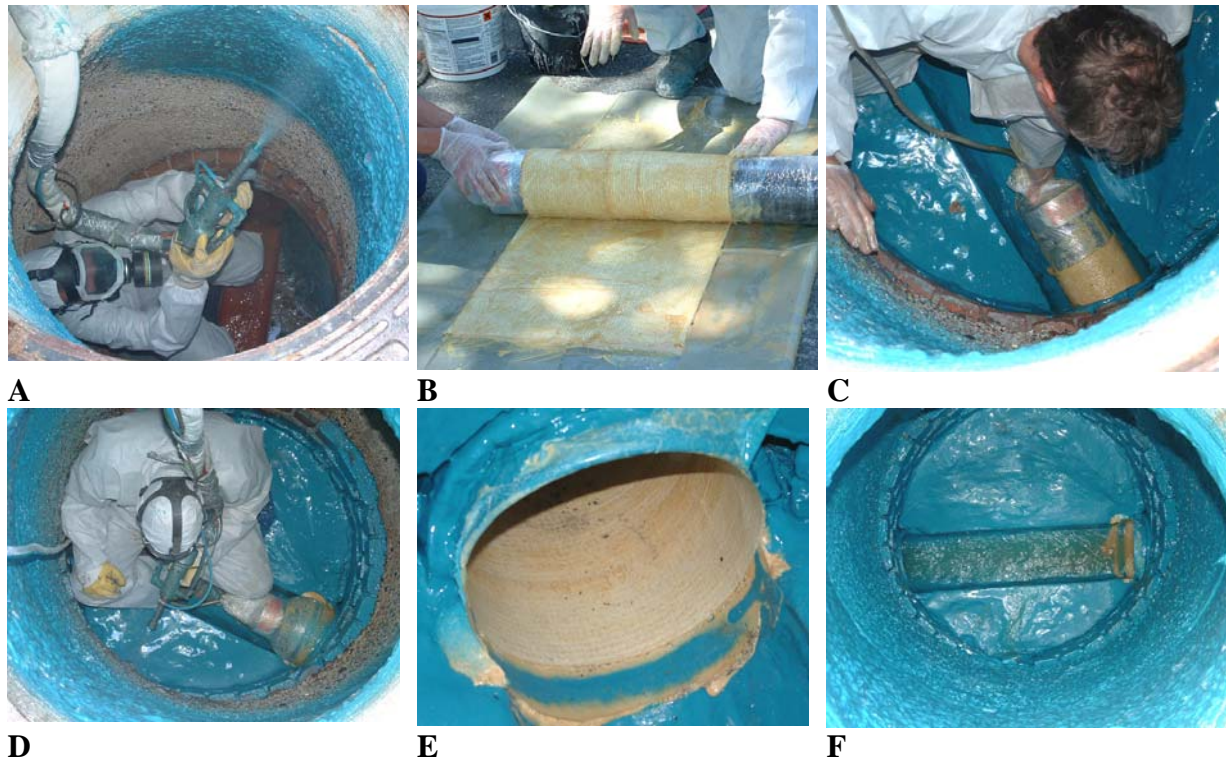


Abb. 20: Beschichtung des Schachtes mit Polyurethan und Einbindung der Zu- und Abläufe.

A: Beschichtung der Schachtwandung mit Polyurethan im Aufspritzverfahren. B: Tränkung eines Glasfaser-Gewebes mit Polyurethanharz. C: Einbringen des Kurzliners in den Ablauf des Schachtes. D: Beschichtung des unteren Teil des Schachtes mit Polyurethan, Anbindung des Kurzliners. E: Ausgehärteter und an die Polyurethanbeschichtung angebundener Kurzliner. F: Fertig beschichteter Schacht.

3.6.3 Einbau der PUR-Hartschaum-Schicht

Um die zweite Schicht des Sandwich-Querschnitts (PUR-Hartschaum) in den Schacht einbringen zu können, war im Vorfeld von der Firma LOOS PUR Technik e.k. eine flexible, runde Schalung aus PE-HD und Metall mit einem Außendurchmesser von 980 mm hergestellt worden, in die der Schaum vergossen werden konnte. Diese Art der Einbringung wurde aus kosten- und verfahrenstechnischen Gründen gegenüber einem Aufschleudern des Schaums bevorzugt. Nachteilig ist beim Aufschleudern des Schaums, dass eine weitere Verarbeitungsmaschine für diese Arbeiten benötigt wird, wodurch die Kosten für die Sanierungsmaßnahme deutlich erhöht werden. Darüber hinaus wird sich bei einem Aufschleudern des Schaums voraussichtlich eine unregelmäßige Wandungsfläche bilden, die anschließend nachzubearbeiten wäre.

Die Einzelemente der Schalung wurden nacheinander in den Schacht gesetzt und oberhalb der Zu- und Abläufe mit Nägeln im Schacht fixiert (vgl. Abb. 21-A/B). Anschließend wurden die Hohlräume am unteren Rand der Schalung mit Papier verschlossen (vgl. Abb. 21-C). Auf Grundlage der Beobachtungen konnten die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ⇒ Der Einbau der vorliegenden Schalung war recht umständlich. Eine **flexible Anpassung** auf die Verhältnisse im Schacht war **nur bedingt möglich**.
- ⇒ Nach dem Einbau der Schalung zeigte sich, dass der Durchmesser der **Schalung zu groß gewählt** worden war, da der Zwischenraum zwischen Schalung und Schachtwandung nur ca. 0,5 – 1,0 cm betrug. Erst nachdem die Einzelelemente der Schalung verkürzt worden waren, ergab sich ein ausreichender Zwischenraum von ca. 2 – 3 cm.
- ⇒ Auch nachdem die Schalung verkürzt worden war, konnte diese zunächst nicht richtig positioniert werden, da an verschiedenen Stellen das **freiliegende Zuschlagskorn der Betonschachtwandung** zu weit in den Schachtinnenraum hineinragte. Erst nachdem diese Vorsprünge abgeschlagen worden waren, konnte die Schalung komplett eingesetzt werden

**A****B****C**

Abb. 21: Einbau der Schalung für den PUR-Hartschaum-Kern. A: Einbringen der Einzelelemente der Schalung in den Schacht. B: Eingebaute Schalung. C: Verschließen der Hohlräume am unteren Rand der Schalung.

In insgesamt drei Arbeitsgängen wurden die erforderlichen Gewichtsanteile der Rohkomponenten des PUR-Hartschaums ausgewogen, mit einem Handrührgerät vermischt (vgl. Abb. 22-A) und in die Schalung eingefüllt (vgl. Abb. 22-B). Ca. 10 min nach der letzten Befüllung war der Schaum erhärtet, sodass die Schalung entfernt werden konnte. Anschließend wurde die Schalung auf der Oberkante der PUR-Hartschaum-Schicht fixiert und zwei weitere Schaumlagen in gleicher Weise aufgebaut (vgl. Abb. 22-E). Der Einbau des Schaums mit dieser Vorgehensweise war zwar grundsätzlich möglich, es zeigten sich allerdings die folgenden Schwierigkeiten:

- ⇒ Das **Abdichtung der ersten Schalung** an der Unterkante zur Berme stellte sich mit den vorhandenen Mitteln als **schwierig** heraus, einige Liter des Schaumgemischs traten aus und flossen auf die Berme bzw. in den Abwasserstrom. Zukünftig sollte z.B. durch eine entsprechende konstruktive Anpassung der ersten Schalung ein Abfließen des Schaumgemischs vermieden werden. Auch sollte, z.B. durch eine entsprechende Abdeckung des Schachtbodens, sichergestellt werden, dass das Schaumgemisch nicht ins Abwasser gelangt.

- ⇒ Der erhärtete Schaum haftete sehr stark an den Verbindungselementen aus Metall, dadurch war das **Abtrennen der Schalungselemente sehr mühsam**.
- ⇒ Insgesamt konnte die **Schaumschicht** mit dem gewählten Vorgehen recht **schnell aufgebaut** werden, nur der Aufbau der untersten Lage dauerte ein wenig länger (Arbeitsdauer insgesamt: ca. 2 h, davon unterste Lage ca. 1 h)
- ⇒ Grundsätzlich ist ein **Auftragen der Schaumschicht** mit diesem Vorgehen und unter Einsatz der gewählten Schalung **nur bis zur Unterkante des Schachtkonus** möglich. Die sich am oberen Rand der Schaumschicht ergebende Kante sollte zur besseren Anbindung an den Konus angeschrägt werden.
- ⇒ Bei der Herstellung des PUR-Hartschaums mit einem Handrührgerät sind Fehler möglich. So war in einem Fall der Mischvorgang zu lang, sodass der Erstarrungsprozess des Schaums bereits eingesetzt hatte und das Gemisch nicht verwendet werden konnte. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass zuviel Luft in das Gemisch eingetragen wird und sich in der Folge die Festigkeit des Schaums verringert. Um diese Nachteile zu vermeiden, ist zukünftig eine **automatisierte, maschinelle Mischung der Schaum-Komponenten** anzustreben.

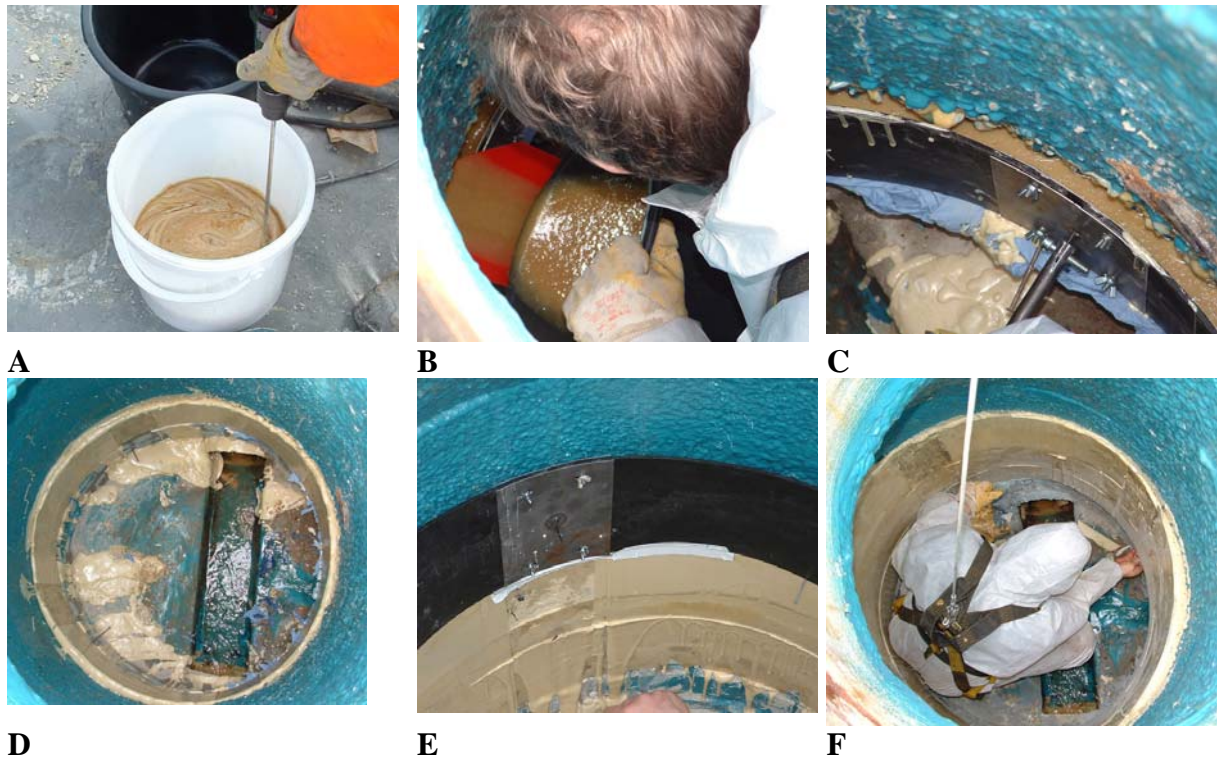


Abb. 22: Aufbau der PUR-Hartschaum-Schicht. A: Mischen der Einzelkomponenten des PUR-Hartschaums. B: Einfüllen des Schaums in die Schalung. C: Aushärten des Schaums in der Schalung. D: Erste Schichtlage nach Ausbau der Schalung. E: Schalung in dritter Lage eingebaut. F: Fertig erstellte PUR-Hartschaum-Schicht.

Nach ca. 2 Stunden war der Aufbau der PUR-Hartschaum-Schicht bis zur Unterkante des Konus abgeschlossen. Im Anschluss wurden die Kanten der Schicht mit einem Trennschleifgerät abgeschrägt, die Oberfläche angeraut (vgl. Abb. 23-A) und der Wandungsbereich unterhalb der PUR-Hartschaum-Schicht mit Oldodor WS 56 Handmasse mittels eines Spachtels im Niveau angepasst (vgl. Abb. 23-C). Nachdem der Schacht 10 min mit einem Heißluftgerät getrocknet worden war, wurde zunächst im unteren Bereich des Schachtes die innere Schicht Polyurethan im Aufspritzverfahren aufgetragen (vgl. Abb. 23-D). Der komplette Auftrag der äußeren Schicht des Polyurethans erfolgte abschließend unter Einsatz der Sprüh-Schleudertechnik (vgl. Abb. 23-E). Auf Grundlage der Beobachtungen konnten die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ⇒ Das **Aufrauen der Schaumschicht** stellte sich als recht **arbeitsaufwändig** heraus, für diese Arbeit ist aufgrund der starken Staubentwicklung unbedingt eine Staubmaske erforderlich. Zu überprüfen wäre, ob der Verbund zwischen Schaumschicht und Polyurethan auch ohne ein Aufrauen der Schaumschicht sichergestellt ist, so dass dieser Arbeitsschritt zukünftig entfallen kann.

- ⇒ Der **Angleich des Wandungsbereichs unterhalb der Schaumschicht** konnte mit der Oldodur - Handmasse schnell und optisch einwandfrei ausgeführt werden (Dauer: ca. 25 min).
- ⇒ Das Vorgehen beim Auftrag der inneren Polyurethanschicht entsprach dem einer marktüblichen Beschichtung mit Polyurethan. Es ergaben sich **keine Schwierigkeiten** bei der Ausführung der Arbeiten. Der gesamte Arbeitsprozess dauerte **ca. 30 min**.

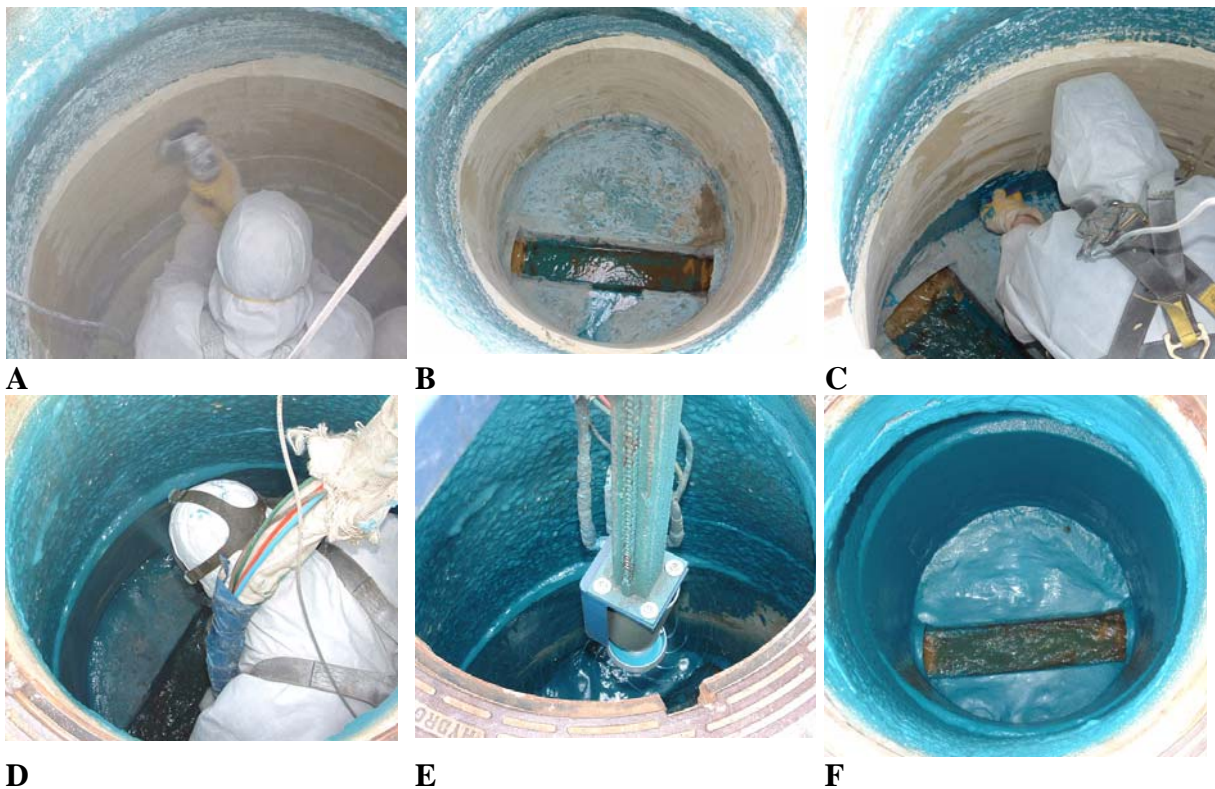


Abb. 23: Nachbearbeitung der PUR-Hartschaum-Schicht und Aufbringen der inneren Polyurethan-Schicht. A: Nachbearbeiten/Anrauen des PUR-Hartschaums. B: PUR-Hartschaum-Schicht nach Bearbeitung. C: Anpassen der Übergänge mit Oldodur WS 56 Handmasse. D: Beschichtung des unteren Teils des Schachtes mit Oldodur WS 56 im Aufspritzverfahren. E: Beschichtung der restlichen Schachtwandung mit Oldodur WS 56 im Anschleuderverfahren. F: Fertige Sandwich-Beschichtung.

Auf Basis des ersten Verfahrenseinsatzes in situ lassen sich die folgenden grundlegenden **Erkenntnisse / Schlussfolgerungen** bzgl. einer Optimierung des Verfahrens ziehen:

- Bei dem Auftrag der inneren und äußeren **Polyurethan-Schichten** konnten **keine Verbesserungspotentiale** erkannt werden.
- Für die **zukünftige Ausführung** 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 an die Sandwich-Beschichtung der Schachtwand angebunden und der Arbeitsablauf optimiert werden, da die Erhärtungsdauern des PUR-Hartschaumes und des Polyurethan wesentlich geringer als die eines mineralischen Mörtels sind.
- Es ergaben sich Schwierigkeiten mit der für die Schaumschicht verwendeten Schalung. 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 (vgl. Abb. 24). In weiteren Versuchen wäre zu überprüfen, ob der Verbund zwischen Schalung und vor Ort hergestelltem Schaum für den vorliegenden Anwendungsfall ausreicht.

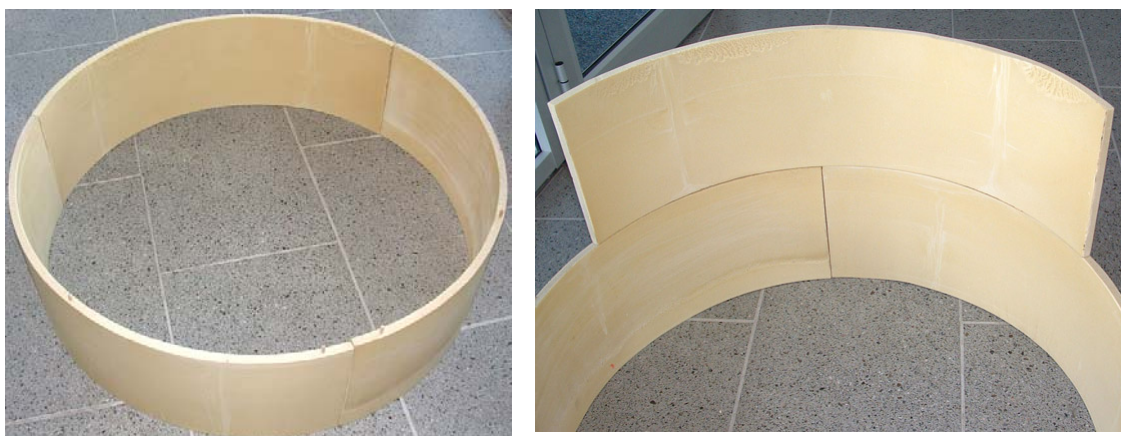


Abb. 24: Schalungselemente aus PUR-Hartschaum.

- Grundsätzlich sollte sichergestellt werden, dass das Schaumgemisch nicht ins Abwasser gelangt (z.B. durch eine entsprechende **Abdeckung des Schachtbodens während der Sanierung**)
- Da sich das **Aufrauen der Schaumschicht** vor dem Auftrag der inneren Polyurethanschicht als recht **arbeitsaufwändig** herausstellte, 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.

4 Entwicklung eines Berechnungsverfahrens

Als Basis für die 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.

4.1 Vorhandene Berechnungsverfahren

Erdgebettete Rohre werden in Deutschland nach dem **DWA-Arbeitsblatt 127** [34] berechnet, in dem von einem elastisch gebetteten Kreisring ausgegangen wird. Auch Schachtbauwerke werden in Anlehnung an dieses Arbeitsblatt statisch nachgewiesen (vgl. [7]). Standsicherheitsnachweise für selbsttragende Inliner werden in Deutschland nach dem **DWA-Merkblatt 127, Teil 2** [35] geführt, mit dem die Besonderheiten der statischen Berechnung von Inlinern (z.B. Imperfektionen bei der Bettung des Liners im Altrohr, Kontaktdruckproblem und nicht-lineare Berechnung) berücksichtigt werden können. Darüber hinaus existieren mehrere Ansätze zur **Berechnung des kritischen Beuldrucks kreisrunder Rohre** unter allseitigem Wasserdruck, z.B. von Thimoshenko [36], Glock [37] oder Chicurel [38]. Im Folgenden werden die wesentlichen Grundzüge der o.a. Berechnungsverfahren kurz dargestellt.

4.1.1 DWA-Arbeitsblatt 127

Das DWA-Arbeitsblatt 127 gilt für die statische Berechnung von erdverlegten Abwasserkanälen und –leitungen und kann sinngemäß für andere erdverlegte Rohre angewendet werden. Der statische Nachweis bei einem Neubau von Schachtbauwerken wird nach [7] ebenfalls in Anlehnung an dieses Arbeitsblatt geführt. In die statischen Berechnungen können u.a. die Steifigkeiten der Rohre sowie die verschiedenen Bettungs- und Überschüttungsbedingungen berücksichtigt werden.

Bei der Bemessung von biegesteifen^a Rohren ist ein Spannungsnachweis zu führen. Soll ein biegeweiches^b Rohr bemessen werden, sind zusätzlich zum Spannungsnachweis ein Verformungsnachweis sowie ein Stabilitätsnachweis zu führen.

Beim **Spannungsnachweis** werden die Schnittkräfte getrennt nach den maßgeblichen Lastfällen ermittelt, wobei Momenten- und Normalkraftbeiwerte in Abhängigkeit vom Lagerungsfall des Rohres bestimmt werden. Es wird eine elastische Bettung im Boden angenommen. Mit

a Belastung ruft keine wesentlichen Verformungen hervor

b Belastung und Druckverteilung werden durch die Verformung des Rohres wesentlich beeinflusst

den ermittelten Schnittkräften werden die Spannungen berechnet und dem Rechenwert des verwendeten Rohrwerkstoffes gegenüber gestellt.

Bei dem **Verformungsnachweis** wird die vertikale Durchmesseränderung den zulässigen Verformungen (i.d.R. 6 % bzw. 2 % unter Eisenbahngleisen) gegenübergestellt. Für Verformungen, die in begründeten Einzelfällen die Grenze von 6 % im Langzeitnachweis überschreiten, ist ein zusätzlicher Nachweis unter Einbeziehung der vertikalen Gesamtlast und des äußeren Wasserdrucks zu führen. Die maximal zulässige Verformung beträgt 9 %.

Der **Stabilitätsnachweis** dient dazu, den Sicherheitsabstand zwischen kritischer Last und tatsächlich vorhandener Belastung zu ermitteln. Er kann als „klassischer Nachweis“ mit Beul- bzw. Durchschlaglasten und alternativ auch als nichtlinearer Stabilitätsnachweis geführt werden, bei dem die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung ermittelt und anschließend ein Spannungsnachweis durchgeführt wird. Falls die relativen vertikalen Verformungen größer als 6 % sind, ist der nichtlineare Nachweis in jedem Fall anzuwenden. Grundsätzlich sind Vorverformungen (Imperfektionen) anzusetzen, welche der maßgebenden Beulform möglichst gut anzunähern sind. Abhängig von der Systemsteifigkeit V_{RB} ist die maßgebende Beulform einwellig oder zweiwellig anzusetzen. Dabei kann auch eine Kombination aus beiden Imperfektionsarten gewählt werden. Bei dem „klassischen Nachweis“ ergibt sich der kritische Beuldruck bei äußerem Wasserdruck für den ebenen Spannungszustand für ein im Boden gebettetes Rohr zu:

$$P_{krit} = \kappa_a \cdot \alpha_D \cdot \frac{2}{3} \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^3 \quad (\text{Gleichung 1})$$

mit

κ_a = Abminderungsfaktor für Vorverformungen, kann aus Diagrammen für verschiedene Vorverformungen entnommen werden

α_D = Durchschlagbeiwert in Abhängigkeit der Systemsteifigkeit und des Radius/Wanddickenverhältnisses

E = Elastizitätsmodul,

t = Wanddicke und

D_m = Rohrdurchmesser

Für die **Bemessung eines profilierten Rohres** (auch dieses wird als Verbundquerschnitt behandelt) finden sich ergänzende Hinweise in dem DWA-Arbeitsblatt 127. So ist die Verwendung einer äquivalenten Wanddicke bei profilierten Rohren nur für die Ermittlung der Rohrsteifigkeit und der Biegeverformungen zulässig, nicht jedoch für die Spannungs- und Stabilitätsnachweise. Bei dem Spannungsnachweis müssen u.a. die Widerstandsmomente der einzelnen Randfasern einzeln betrachtet werden. Auch müssen die Zug- und Druckspannungen getrennt nachgewiesen und die maximalen Schubspannungen des Querschnitts ermittelt werden. Beim Stabilitätsnachweis wird vor allem die Normalkraftverformung profilierter Rohre berücksichtigt, indem bei der Ermittlung des Durchschlagbeiwertes α_D anstelle des Radius/Wanddickenverhältnisses das Verhältnis des Querschnitts zum Trägheitsmoment eingeht.

4.1.2 DWA-Merkblatt 127, Teil 2

Das DWA-Merkblatt 127-2 wurde für die Bemessung von Linern im Bau- und Betriebszustand entworfen. Besonderheiten, die speziell für die Bemessung von Linern von Bedeutung sind, wie

- Imperfektionen bei der Bettung des Liners im Altrohr,
- Langzeit-Spannungsnachweise für den langfristig wirkenden äußeren Wasserdruck und
- Kontaktdruck

sind in diesem Merkblatt berücksichtigt worden. Grundsätzlich wird von einem linear-elastischen Materialverhalten der Liner ausgegangen. Da das Verhalten des Systems aus Altrohr und umgebendem Boden einen erheblichen Einfluss auf die Belastungsart und -größe einer selbsttragenden Auskleidung hat, wird zwischen drei statisch relevanten Altrohrzuständen unterschieden:

Altrohrzustand I

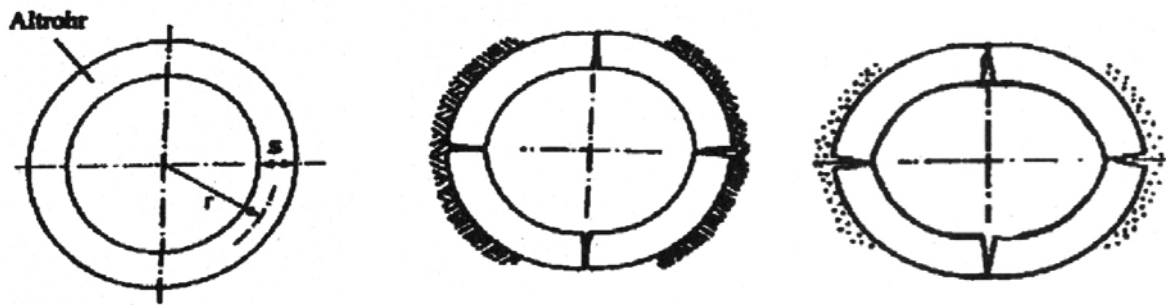
Der **Kanal** ist im Wesentlichen *rissefrei und voll tragfähig*. Eine Sanierung ist z.B. zur Herstellung der Wasserdichtheit erforderlich. Lediglich der *äußere und/oder innere Wasserdruck* sind vom Inliner aufzunehmen. *Örtliche Vorverformungen* von mindestens 2 % des Linerradius sind anzunehmen, wenn durch Inspektion nachgewiesen werden kann, dass keine größeren Werte vorliegen. Zusätzlich ist eine *Spaltbildung* zwischen Liner und Altrohr von mindestens 0,5 % des Linerradius anzusetzen.

Altrohrzustand II

Der **Kanal** hat einen oder mehrere durchgehende Längsrisse und ist *allein nicht mehr tragfähig*. Aufgrund einer ausreichenden Bettungswirkung des Bodens in der Leitungszone ist er jedoch weiterhin als *Rohr-Boden-System standsicher*. Wie im Lastfall I ist im allgemeinen die Herstellung der Wasserdichtheit erforderlich, so dass der Inliner gegen *äußeren und/oder inneren Wasserdruck* bemessen werden muss. Neben den *örtlichen Vorverformungen und der Spaltbildung* wie bei Altrohrzustand I sind zusätzlich *Ovalisierungen* von mindestens 3 % des Linerradius anzunehmen, wenn durch Inspektion nachgewiesen werden kann, dass keine größeren Werte vorliegen.

Altrohrzustand III

Das **Rohr-Boden-System ist nicht mehr tragfähig**. Eine Sanierung ist zur Wiederherstellung der Trag- und Dichtfunktion erforderlich. Der Liner muss neben dem auf die Lineroberfläche wirkenden *Wasseraußendruck* auch *Erd- und Verkehrslasten*, die auf die Altrohroberfläche wirken, aufnehmen. Es sind die *gleichen Imperfektionen wie bei Altrohrzustand II* anzunehmen.



A: Altrohrzustand I

B: Altrohrzustand II

C: Altrohrzustand III

Abb. 25: Zustand der Altleitung aus statischer Sicht 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 [35])

Unabhängig vom Altrohrzustand sind grundsätzlich Spannungs-, Verformungs- und Stabilitätsnachweise für den Liner zu führen. Dabei darf zur Berechnungsvereinfachung die dreidimensionale Struktur (Schale) auf eine zweidimensionale Struktur (ebener Verzerrungszustand, Scheibe) reduziert werden. Als weitere Vereinfachung kann der Liner als Stabwerk berechnet werden, das im Altrohr gebettet ist.

Für die Altrohrzustände II und III ist zusätzlich die **Standsicherheit des Altrohr-Bodensystems** nachzuweisen. Dazu werden für das Altrohr ein Viergelenkring angenommen (vgl. Abb. 26), die kritischen Belastungen dieses Systems unter Zuhilfenahme von Last-Verschiebungskurven ermittelt (in Abhängigkeit der horizontalen Bettungssteifigkeit S_{Bh} , der Exzentrizität e_G der Gelenke sowie der Vorverformung $w_{GR,v}$) und das Altrohr in Abhängigkeit der sich ergebenden Sicherheiten dem Zustand II oder III zugeordnet.

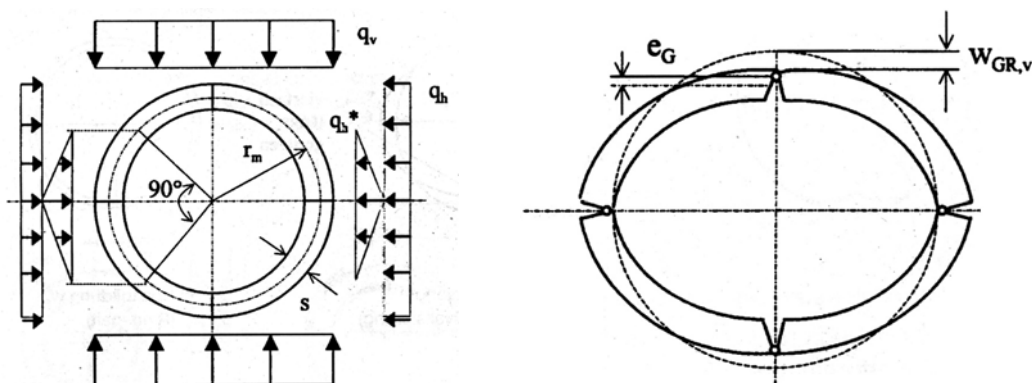


Abb. 26: System und Belastung des Altrohr-Bodensystems aus Erd- und Verkehrslasten. A: Unverformtes System. B: Verformtes System. (aus [35])

Bei dem **Spannungsnachweis des Liners** werden die Normal- und Momentenschnittkräfte mit Beiwerten multipliziert. Diese Beiwerte sind für die jeweiligen Anwendungsfälle (Außenwasserstand über der Sohle, Wanddicke des Liners, Zustand und Durchmesser des Altröhres, E-Modul des Liners) aus Tabellen im Anhang des DWA-M 127-2 zu entnehmen. Weichen die Eingangsgrößen von den vorgegebenen Tabellen ab, so sind die Schnittkraftbeiwerte neu als Kontaktdruckproblem nach Theorie II. Ordnung zu ermitteln. Mit den ermittelten Schnittkräften werden die Spannungen berechnet und dem Rechenwert des verwendeten Linerwerkstoffs gegenüber gestellt:

$$\frac{\sigma_{bZ}}{\sigma} \geq erf\gamma \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sigma_{bD}}{\sigma} \geq erf\gamma \quad (\text{Gleichung 2})$$

mit

σ_{bZ} = Biegezugfestigkeit

σ_{bD} = Biegedruckfestigkeit

σ = maßgebliche maximale Randspannung, kann mit Hilfe von Diagrammen für unterschiedliche Abmessungen und Drücke unter Berücksichtigung von Imperfektionen ermittelt werden

$erf\gamma$ = erforderliche Sicherheit gegenüber dem Erreichen der Biegezug- bzw. Biegedruckfestigkeit, wird für Kunststoffe mit 2,0 angegeben.

Die elastischen Verformungen für den **Verformungsnachweis** müssen, ähnlich wie bei den Schnittkraftbeiwerten im Zuge des Spannungsnachweises, für den jeweiligen Anwendungsfall aus Diagrammen entnommen werden. Wenn die Eingangsgrößen von den Vorgaben in den Diagrammen abweichen, sind die Verformungen ebenfalls als Kontaktdruckproblem nach Theorie II. Ordnung zu berechnen. Die so ermittelten Verformungen sind mit der zulässigen Verformung zu vergleichen:

$$\delta_{v,el}(erf\gamma \cdot p_a) + \left(\frac{w_v}{2} + w_{GR,v} \right) \cdot \frac{100\%}{r_L} \leq zul\delta_v \quad (\text{Gleichung 3})$$

mit

$zul\delta_v \leq 10\%$

p_a = äußerer Wasserdruck

w_v = örtlich begrenzte Vorverformung

$w_{GR,v}$ = Gelenkringvorverformung (Ovalisierung)

r_L = mittlerer Radius des Liners

Der **Stabilitätsnachweis** dient zur Ermittlung des Sicherheitsabstandes zwischen der elastischen Durchschlagslast des Liners und der vorhandenen Belastung. Der kritische Beuldruck bei äußerem Wasserdruck für den ebenen Spannungszustand ergibt sich zu:

$$P_{krit} = \kappa_v \cdot \kappa_{GR,v} \cdot \kappa_s \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m} \right)^{2,2} \quad (\text{Gleichung 4})$$

mit

κ_v = Abminderungsfaktor für örtliche Vorverformungen, kann aus Diagrammen für verschiedene Vorverformungen entnommen werden

- $\kappa_{GR,v}$ = Abminderungsfaktor für Ovalisierung, kann aus Diagrammen für verschiedene Ovalisierungsgrade entnommen werden
- κ_S = Abminderungsfaktor für Spaltbildung, kann aus Diagrammen für verschiedene Spaltstärken entnommen werden
- E = Elastizitätsmodul
- t = Wanddicke
- D_m = Rohrdurchmesser

Dieser kritische Beuldruck wird anschließend den tatsächlich vorhandenen Drücken gegenübergestellt:

$$\frac{P_{krit}}{p} \geq erf\gamma \quad (\text{Gleichung 5})$$

mit:

$erf\gamma$ = erforderliche Sicherheit gegenüber dem Erreichen der Beullast, wird für Kunststoffe mit 2,0 angegeben.

Für den **Stabilitätsnachweis profilierter Liner** werden dem Nutzer – ähnlich wie in DWA-A 127 - entsprechende Formeln zur Verfügung gestellt, mit denen die Besonderheiten von Verbundquerschnitten berücksichtigt werden können.

4.1.3 Weitere Ansätze zur Berechnung des kritischen Beuldrucks kreisrunder Rohre unter allseitigem Wasserdruck

Neben den o.a. Berechnungsverfahren existieren zur Berechnung des kritischen Beuldrucks kreisrunder Rohre unter allseitigem Außendruck weitere Ansätze. Unter Vernachlässigung des Querdehnungseinflusses lassen sich alle Ansätze in eine Gleichung der Form

$$P_{krit} = C \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^b$$

überführen. Sie unterscheiden sich lediglich in der Größe des Vorfaktors C und des Exponenten b . Die Vorfaktoren sind das Ergebnis sowohl analytischer als auch empirischer Untersuchungen. Alle Ansätze vernachlässigen i.a. die Reibung zwischen Altrohr und Auskleidung und setzen eine homogene Rohrwandung voraus [2]. Tabelle 13 gibt eine Übersicht über die vorhandenen Berechnungsansätze.

Tabelle 13: Berechnungsformeln des kritischen Beuldrucks für den ebenen Spannungszustand, Beispiele (nach [2] und [39])

Autor	Ansatz	Beiwerte	Bemerkung
Timoshenko [36]	$P_{krit} = 2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^3$		Beulverhalten eines freien, dünnen Rohres unter konstantem Außendruck und ohne Vorverformungen, Ausgangspunkt aller weiteren Berechnungsansätze, Berechnungsverfahren analytisch.
Gaube [40]	$P_{krit} = f_s \cdot f_a \cdot 2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^3$	f_s – empirisch f_a – analytisch	Halb-empirischer Ansatz zum Standsicherheitsnachweis gebetteter Rohre mit ovaler Vorverformung aus Kunststoff, ausgehend von Versuchen an freien und eingeedeten PE-HD-Rohren unter Außenwasserdruck.
Glock [37]	$P_{krit} = 1,0 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^{2,2}$		Formel ermittelt in Untersuchungen der Stabilität eines starr ummantelten, linear elastischen Kreisrohres bei allseitigem Außendruck ohne Vorverformungen unter Verwendung geometrisch nichtlinearer Verformungsbeziehungen nach der Energiemethode.
Chicurel [38]	$P_{krit} = 2,76 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^{2,2}$		Beulverhalten eines dünnen, elastischen Rings, der von einem äußeren Ring umschlossen ist und infolge einer Durchmesserverkürzung durch Schwinden Druck auf den inneren Ring ausübt. Ermittelt in Anlehnung an die Stabilitätstheorie des Bogenträgers. Der äußere Druck wird nach dem ersten Beulen des inneren Rings nicht mehr berücksichtigt.
Cheney [41]	$P_{krit} = 2,55 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^{2,2}$		Beulverhalten eines von einem steifen Außenring umschlossenen Rings bei gleichmäßig aufgebrachtem Außendruck unter Voraussetzung eines linear-elastischen Werkstoffverhaltens und ohne Vorverformungen; ausgehend von Analysen in Anlehnung an die Stabilitätstheorie des Bogenträgers.
Lo / Zhang [42]	$P_{krit} = (k^2 - 1) \cdot \frac{2}{3} \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_p}\right)^3$	k – analytisch D_p – analytisch	Beulverhalten eines Inliners unter Annahme eines kleinen Ringspalts zwischen Liner und Altrrohr, ermittelt in Anlehnung an Stabilitätstheorie des Bogenträgers.
ASTM ¹⁾ [43]	$P_{krit} = K \cdot f_a \cdot 2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D_m}\right)^3$	f_a – analytisch K – empirisch	Formel zur Berechnung der Beullast eines Rohr-im-Rohr-Systems mit ovaler Vorverformung , ermittelt in Versuchen an Schlauchlinern in Stahlrohren und unter Verwendung der Formel für das Beulverhalten eines freien Rohres nach Timoshenko.
Wagner [44]	$P_{krit} = C \cdot E \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^b$	w_s – Spaltweite $C (r/w_s)$ – empirisch $b (r/w_s)$ – empirisch	Formel zur Berechnung der Beullast eines Rohr-im-Rohr-Systems mit Ringspalt , ermittelt in Versuchen an Schlauchlinern in Stahlrohren.

1) American Society for Testing and Materials

4.2 Auswahl eines geeigneten Berechnungsansatzes

Für den vorliegenden Anwendungsfall ist das Berechnungsverfahren des **DWA-Merkblatt 127, Teil 2** [35] grundsätzlich geeignet, 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 allerdings auf Verbundquerschnitte nur rudimentär eingegangen wird, muss das Nachweiskonzept unter diesem Aspekt für den vorliegenden Anwendungsfall überprüft werden. Darüber hinaus bedarf die Übertragbarkeit einiger Annahmen bzw. Rechenhilfen des DWA-Merkblatt 127-2 auf den vorliegenden Anwendungsfall einer Überprüfung und ggf. einer Anpassung einzelner Punkte. Dies betrifft vor allem die:

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

Altrohrzustände

Die Altrohrzustände des 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 (vgl. Abb. 25-B/C in Abschnitt 4.1.2). 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 der Altrohrzustand I und nur ggf. der Altrohrzustand II angesetzt werden sollten. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wird daher in einem ersten Schritt angestrebt, das Bemessungsverfahren für den Altrohrzustand I auf die Sandwich-Beschichtung zu übertragen. Dementsprechend wird eine örtliche Vorverformung $w_v = 2 \%$ und eine Spaltbildung $w_s = 1 \%$ (z.B. aus einem Versagen des Haftverbundes zwischen Polyurethan und Schachtwandung) angesetzt.

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, wahrscheinlich anelastisches Materialverhalten (vgl. [31] und Abb. 15 in Kapitel 3.5).

Schnittkraft-Beiwerte

Die Gültigkeit der Schnittkraft-Beiwert-Diagramme in Anhang IV des DWA-Merkblatt 127-2 ist auf Elastizitätsmoduln im Bereich von $1500 \text{ N/mm}^2 \leq E_L \leq 3000 \text{ N/mm}^2$ beschränkt. Da die Elastizitätsmoduln für die in der Sandwichbeschichtung verwendeten PUR-Materialien im Bereich von ca. 160 - 630 N/mm^2 liegen (vgl. Tabelle 12 in Kapitel 3.5), 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^a, 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 nicht-linearen Werkstoffverhaltens der Polyurethan-Materialien für den vorliegenden Anwendungsfall zu überprüfen.

4.3 Numerische Untersuchungen

Um die Eignung der Bemessungsformeln und -diagramme des DWA-Merkblatt 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. [31]). Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen sind nachfolgend zusammengefasst.

4.3.1 Grundlagen der numerischen Untersuchungen

In Übereinstimmung mit dem DWA-Merkblatt 127-2 wurden die Untersuchungen auf **zwei-dimensionale 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 Aus-

^a Vgl. DWA-Merkblatt M 127, Teil 2 [35], Seiten 24 und 25.

wirkungen einer örtlichen Vorverformung und einer Spaltbildung zwischen Sandwich-Beschichtung und Altschacht untersucht (vgl. Abb. 27).

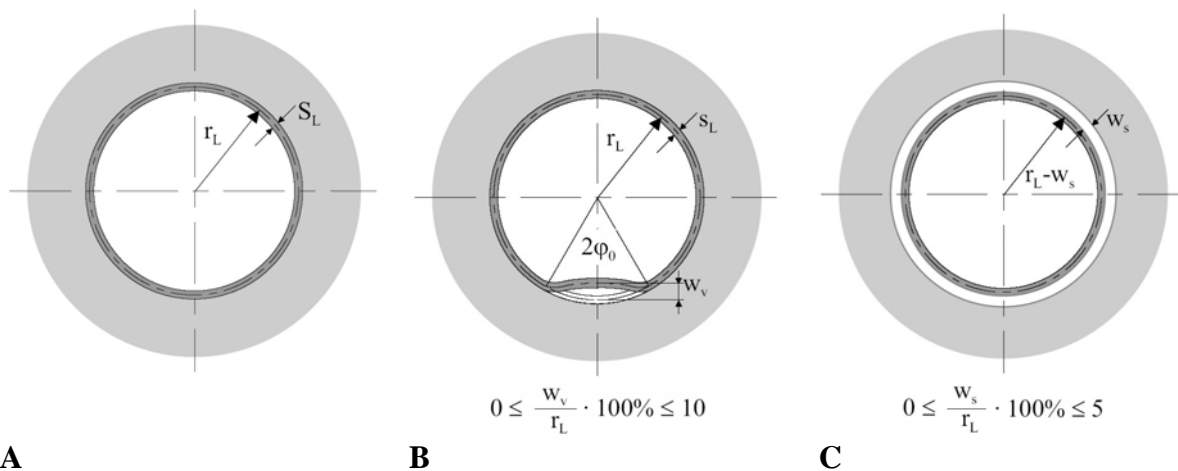


Abb. 27: Ausgangsgeometrien für die numerischen Analysen. A: Perfekte Ausgangsgeometrie. B: Örtliche Vorverformung w_v . C: Spaltbildung zwischen Sandwich-Beschichtung und Altschacht. (alle Abbildungen aus [31])

Die **verwendeten Materialparameter** basieren auf den im Abschnitt 3.5 durchgeführten Kurzzeit-Materialprüfungen an den Sandwich-Werkstoffen. Dort zeigten die Werkstoffe z.T. ein nichtlineares 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 (vgl. Abb. 15 in Abschnitt 3.5) 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 \mathbf{S} und dem Green-Lagrange'schen Verzerrungstensor \mathbf{E} ausgeht (vgl. [46]). Eine Übersicht über die verwendeten Materialparameter gibt Tabelle 14.

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

Tabelle 14: 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. [45]) 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. [46]). Sämtlichen Berechnungen liegt in Übereinstimmung mit DWA-M 127-2 die Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes zugrunde. Die Kontaktbedingungen zwischen dem Sandwich-Element und dem Betonalt-schacht 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 nichtlinearen Stabilitätsproblems laufend aktualisiert. Für die Untersuchung imperfekter Ausgangsgeomet-

-
- a Die experimentellen 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.

rien (vgl. Abb. 27-B/C) wurde das Bogenlängenverfahren^a verwendet, um den gesamten Vor- und Nachbeulpfad erfassen zu können.

Bei den untersuchten Sandwich-Querschnitten handelt es sich um Verbundquerschnitte, die aus unterschiedlichen Materialien mit abweichenden Eigenschaften bestehen. Daher ist es für die Anwendung klassischer baustatischer Berechnungsverfahren, für die Erstellung von praxisorientierten Berechnungsvorschriften und letztlich für die Übertragbarkeit der Beiwerte κ_v und κ_s des DWA-Merkblatt 127-2 für den Stabilitätsnachweis zielführend, mit sogenannten „ideellen“ Querschnittswerten und einem homogenen „Ersatzquerschnitt“ zu rechnen.

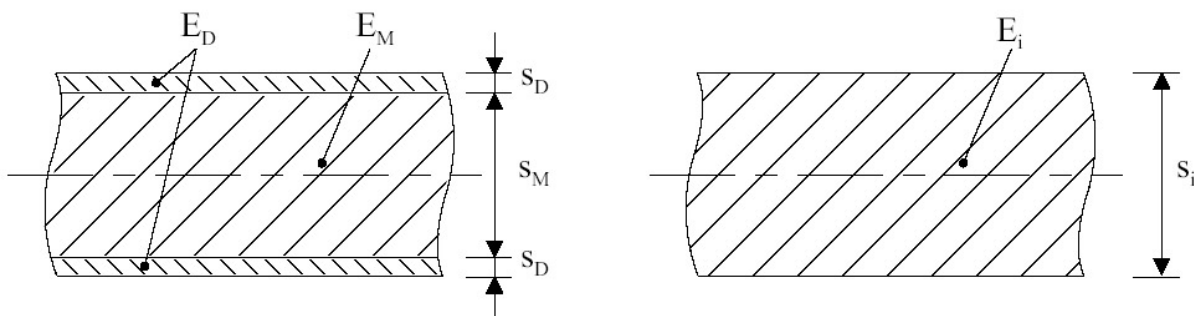


Abb. 28: Querschnittswerte des inhomogenen Sandwich-Querschnitts (links) und des ideellen Querschnitts (rechts); aus [31].

Der homogene „ideelle“ Ersatzquerschnitt (vgl. Abb. 28-A) ist durch die Schichtdicke s_i und den Elastizitätsmodul E_i gekennzeichnet. Diese Werte ergeben sich aus den Querschnittswerten des inhomogenen Querschnitts (vgl. Abb. 28-B) zu (vgl. [31])

$$s_i = s_D \left(\frac{f_I}{f_A} \right)^{1/2} \quad \text{bzw.} \quad E_i = E_D \frac{(f_A)^{3/2}}{(f_I)^{1/2}} \quad (\text{Gleichung 6})$$

mit

$$f_I = \left(\frac{E_M}{E_D} \right) \cdot \left(\frac{s_M}{s_D} \right)^3 + 2 + 6 \left(1 + \frac{s_M}{s_D} \right)^2 \quad f_A = 2 + \left(\frac{E_M}{E_D} \right) \cdot \left(\frac{s_M}{s_D} \right) \quad (\text{Gleichung 7})$$

4.3.2 Abgleich der Genauigkeit des verwendeten Schalenmodells

Zum Abgleich der Genauigkeit des verwendeten Schalenmodells und des Lösungsalgorithmus wurden zunächst ein perfektes Rohr unter hydrostatischem Außendruck ohne Berücksichtigung von Kontaktbedingungen unter Verwendung des inhomogenen und des ideellen Quer-

^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 [46]).

schnitts numerisch untersucht und die Ergebnisse mit der analytischen Lösung nach Timoshenko [36] (vgl. auch Tabelle 13 in Abschnitt 4.1.3) verglichen. Die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden stimmten fast exakt überein, sodass die Brauchbarkeit des verwendeten Schalenmodells und die Zuverlässigkeit der Verwendung von Ersatzquerschnitten gemäß (Gleichung 6) bestätigt werden konnte.^a Tabelle 15 zeigt eine Übersicht über die bei den Berechnungen verwendeten Parameter und die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden.

Tabelle 15: Übersicht über die verwendeten Parameter und Vergleich der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen unter Verwendung des tatsächlichen und eines Ersatzquerschnittes mit den Ergebnissen der analytischen Lösung nach Timoshenko [36]

Verwendete Parameter								Kritische Beullast (p_{krit})		
E_D	E_M	ν	s_D	s_M	r_L	s_i	E_i			
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
								analytisch	FEM / Ersatzquerschnitt	FEM / realer Querschnitt
403	250	0,3	2	20	240	25,64	257,84	0,0863	0,0864	0,0864
403	250	0,3	2	30	240	35,84	254,18	0,2326	0,2294	0,2294

4.3.3 Ermittlung von Stabilitätsgrenzen

Zur Überprüfung der Brauchbarkeit der in den Diagrammen D1 und D3 des DWA-Merkblatt 127-2 enthaltenen Abminderungsfaktoren für den Stabilitätsnachweis wurden unterschiedliche Verhältnisse r_L/s_i von Radius r_L und der ideellen Verbund-Schichtdicke s_i des Ersatzquerschnitts (vgl. Abb. 28) sowie unterschiedliche Werte w_v/r_L und w_s/r_L für das Verhältnis der örtlichen Vorverformung w_v bzw. der Spaltgröße w_s (vgl. Abb. 27-B/C) und dem Sandwich-Radius r_L untersucht. Die Auswertung der numerischen Ergebnisse erfolgte in Anlehnung an die Formel zur Berechnung des kritischen Wasserdrucks im DWA-Merkblatt 127-2. Dort wird die Beziehung für die Beullast p_{krit} für profilierte Liner mit

$$p_{krit} = \kappa_v \cdot \kappa_s \cdot 2,62 \cdot \left(\frac{r_L}{s_i}\right)^{0,8} \cdot \frac{E_i I_i}{r_L^3} \quad (\text{Gleichung 8})$$

^a Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Spannungsverlauf über die Schalendicke für die Berechnungen mit Mehrschichtenaufbau und mit Ersatzquerschnitt nicht direkt vergleichbar sind. Der Spannungsverlauf des Sandwichquerschnitts ergibt sich aus den Analysen mit Ersatzquerschnitt durch schichtenweise Rückrechnung entsprechend den unterschiedlichen Steifigkeiten von Deck- und Mittelschicht aufgrund des berechneten Verzerrungsverlaufs.

angegeben, wobei κ_v und κ_s Abminderungsfaktoren für eine örtliche Vorverformung bzw. für eine Spaltbildung zwischen Liner und Altrohr sind. Für $\kappa_v = 1$ und $\kappa_s = 1$ entspricht Gleichung 8 der analytischen Lösung für den perfekten Kreisring nach Glock (vgl. Tabelle 13 in Abschnitt 4.1.3).

Die numerisch erhaltenen Werte für die kritischen Beullasten bei unterschiedlichen örtlichen Vorverformungen und Spaltbildungen wurden dazu verwendet, um unter Zuhilfenahme von Gleichung 8 die Beiwerte κ_v und κ_s für den vorliegenden Fall zu berechnen und mit den in dem DWA-Merkblatt 127-2 enthaltenen Diagrammen D1 und D3 zu vergleichen^a. Abb. 29 und Abb. 30 zeigen eine Übersicht über die numerischen Ergebnisse für unterschiedliche Größen der örtlichen Vorverformung bzw. Spaltbildung. Einige der Analysen wurden sowohl für homogene (ideelle) Ersatzquerschnitte als auch für den tatsächlichen schichtweisen Aufbau des Sandwich-Querschnitts durchgeführt. In Abb. 31 ist exemplarisch das Last-Verschiebungsdiagramm einer numerischen Analyse des Rohr-im-Rohr-Systems für $w_v/r_L = 10\%$, $r_L/s_i = 10$ und $r_L = 360$ mm dargestellt.

a Da die Beullasten im DWA-Merkblatt mit Hilfe eines Stabwerk-Statik-Programms ermittelt wurden, das auf der Annahme eines einachsialen Spannungszustandes beruht, in den vorliegenden numerischen Analysen aber von einem ebenen Verzerrungszustand ausgegangen wird, ist eine Umrechnung der in dem DWA-Merkblatt enthaltenen Werte mit dem Faktor $(1 - \nu^2)$, mit ν als Querdehnzahl, erforderlich. Diese Umrechnung ist aufgrund der Annahme eines elastischen Materialverhaltens sowohl im DWA-Merkblatt als auch in den vorliegenden numerischen Analysen möglich.

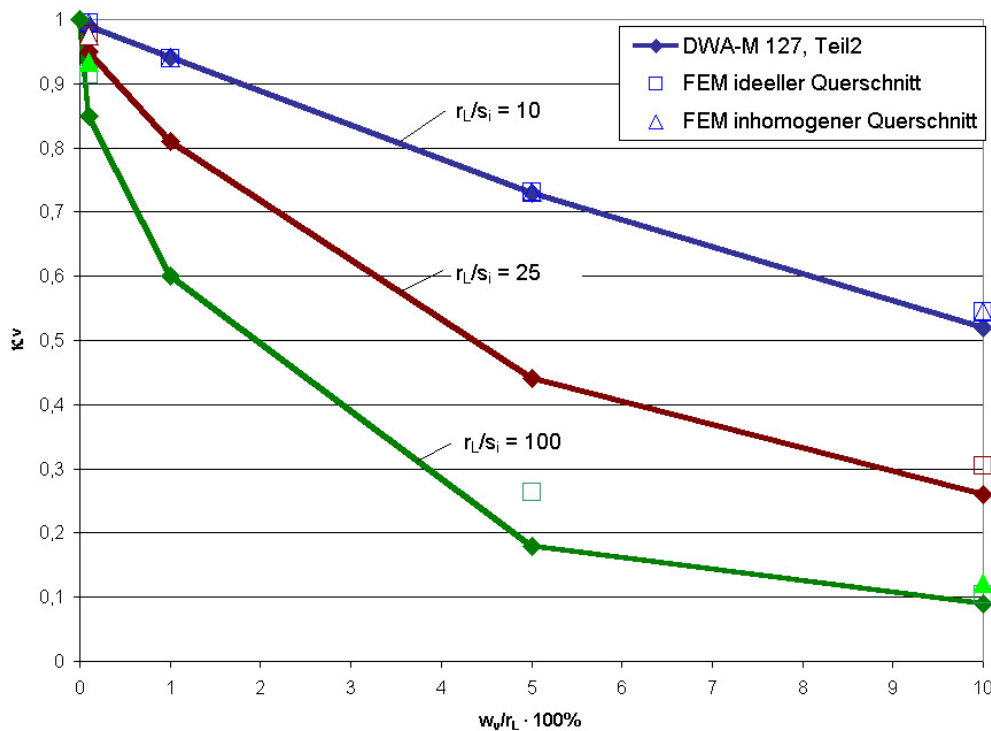


Abb. 29: Abminderungsfaktoren κ_v für örtliche Vorverformungen: Gegenüberstellung der numerisch erhaltenen Werte mit den Werten aus Diagramm D1 des DWA-M 127-2; aus [31].

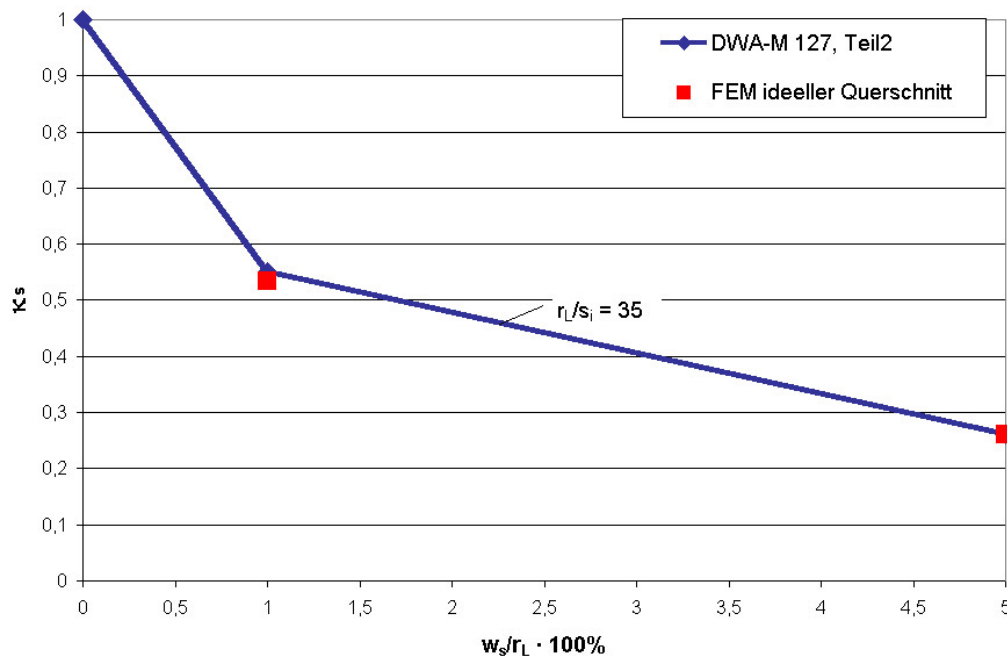


Abb. 30: Abminderungsfaktoren κ_s für Spaltbildung zwischen Auskleidung und Altrohr: Gegenüberstellung der numerisch erhaltenen Werte mit den Werten aus Diagramm D3 des DWA-M 127- 2; aus [31].

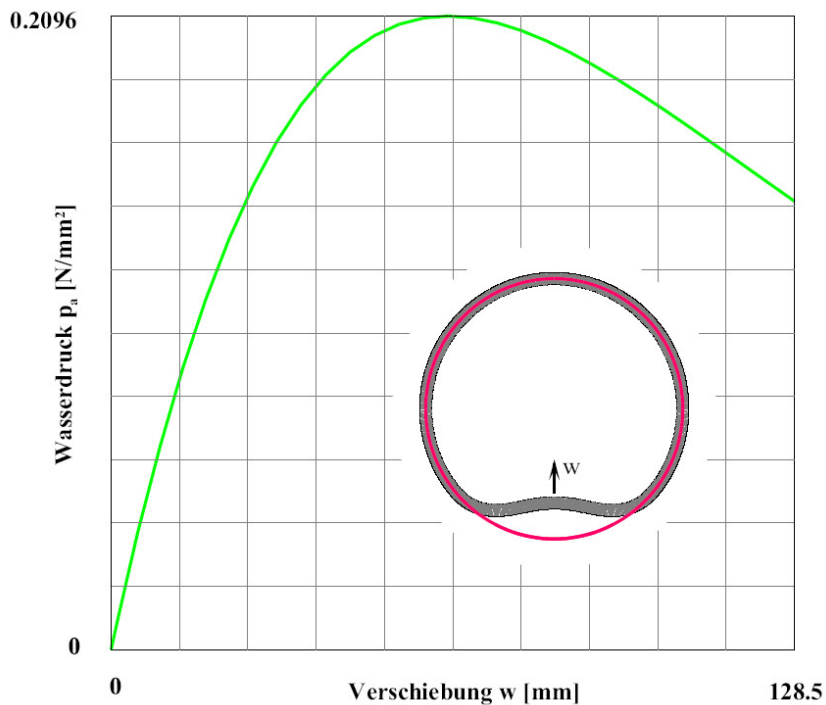


Abb. 31: Repräsentatives Last-Verschiebungsdiagramm einer numerischen Analyse des Rohr-im-Rohr-Systems unter Berücksichtigung einer örtlichen Vorverformung (mit $w_v/r_L = 10\%$, $r_L/s_i = 10$ und $r_L = 360$ mm); aus [31].

Wie aus Abb. 29 und Abb. 30 hervorgeht, stimmen die aus den numerischen Analysen erhaltenen Beiwerte für den homogenen Ersatzquerschnitt und die Beiwerte des DWA-Merkblatt 127-2 relativ gut überein. Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass die Empfindlichkeit der numerischen Analysen bezüglich des gewählten Öffnungswinkels der lokalen Vorverformung mit steigendem Verhältnis r_L/s_i zunimmt. Die Abweichungen bei den Abminderungsfaktoren für Spaltbildung sind so gering, dass diese vernachlässigt werden können. Die Abminderungsfaktoren des DWA-Merkblatt für örtliche Vorverformungen liegen für alle berechneten Fälle auf der sicheren Seite.

4.3.4 Ermittlung von maximalen Spannungen und Verformungen im Sandwich-Querschnitt für den Spannungs- und Verformungsnachweis

Die bemessungsrelevanten maximalen Spannungen bzw. Verformungen werden im DWA-Merkblatt 127-2 mit Hilfe von Schnittkraft-Beiwerten berechnet, deren Gültigkeitsbereich auf Elastizitätsmoduln von $1.500 \text{ N/mm}^2 - 3.000 \text{ N/mm}^2$ eingeschränkt ist (vgl. auch Abschnitt 4.2).

Um dennoch Anhaltspunkte für die auftretenden maximalen und minimalen Spannungen geben zu können, wurden numerische Berechnungen für jeweils drei Schichtdicken der Mittelschicht der Sandwich-Beschichtung (20 mm, 30 mm und 45 mm) unter Ansatz der jeweils minimalen und maximalen Werte für die Steifigkeiten von Deck- und Mittelschicht (vgl. Tabelle 14) und einem Altschachtdurchmesser von 1,0 m durchgeführt. Bei allen Berechnungen wurde in Anlehnung an DWA-M 127-2 eine örtliche Vorverformung $w_v = 2 \%$ sowie eine Spaltbildung $w_s = 1 \%$ angesetzt. Tabelle 16 gibt eine Übersicht über die verwendeten Material- und Geometriedaten sowie die gewählten Imperfektionen.

Tabelle 16: Zusammenstellung der verwendeten Parameter für die durchgeführten numerischen Berechnungen zur Ermittlung der Spannungsverläufe

Material- und Geometriedaten								Imperfektionen		
E_D	E_M	ν	s_D	s_M	r_L	s_i	E_i	φ_0	w_v/r_L	w_s/r_L
[N/mm ²]		[-]	[mm]				[N/mm ²]	[°]	[%]	
160	300	0,3	2	20	488	22,40	296,42	30	2	1
630	450	0,3	2	20	488	25,12	458,60	30	2	1
160	300	0,3	2	30	483	32,32	298,28	30	2	1
630	450	0,3	2	30	483	35,25	454,52	30	2	1
160	300	0,3	2	45	475,5	47,26	299,20	45	2	1
630	450	0,3	2	45	475,5	50,35	452,27	45	2	1

In Abb. 32 bis Abb. 35 sind die Verläufe der minimalen und maximalen Cauchy-Spannungen für die untersuchten Fälle bei unterschiedlichen Grundwasserdrücken (dargestellt durch die Höhe h_w des Grundwasserspiegels) bis zum Erreichen der Stabilitätsgrenze dargestellt. In den Abbildungen sind die jeweiligen elastischen Grenzspannungen für Deck- und Mittelschicht für Zug- und Druckbeanspruchungen $\sigma_{e,D,Zug}$, $\sigma_{e,M,Zug}$, $\sigma_{e,D,Druck}$, $\sigma_{e,M,Druck}$ (vgl. Tabelle 14) abgebildet. Ebenfalls sind die maßgeblichen Bemessungsgrenzen $h_{w,e}$, die Stabilitätsgrenzen $h_{w,krit}$ und die um die gemäß DWA-Merkblatt 127-2 erforderlichen Sicherheiten $erf_y = 2,0$ abgeminderten Bemessungsgrenzen $h_{w,e}/erf_y$ eingetragen.

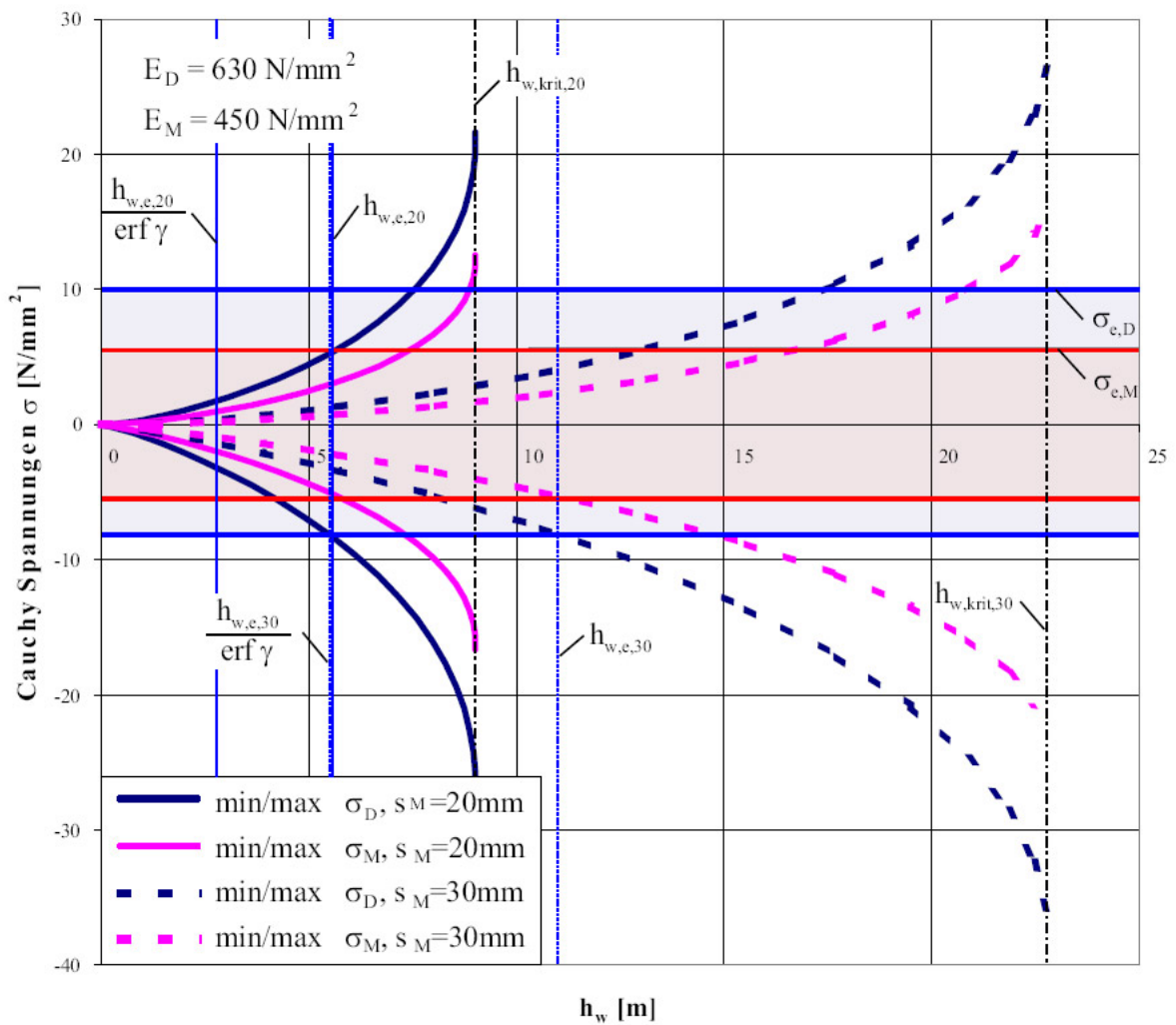


Abb. 32: Minimal- bzw. Maximalwerte für die Cauchy-Spannungen in Deck- und Mittelschicht für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und Dicken der Mittelschicht von $s_m = 20$ und $s_m = 30$ mm. Weitere Parameter: Dicke der Deckschichten $s_D = 2$ mm, maximaler Elastizitätsmodul Deckschicht $E_D = 630 \text{ N/mm}^2$, maximaler Elastizitätsmodul Mittelschicht $E_M = 450 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 14); aus [31].

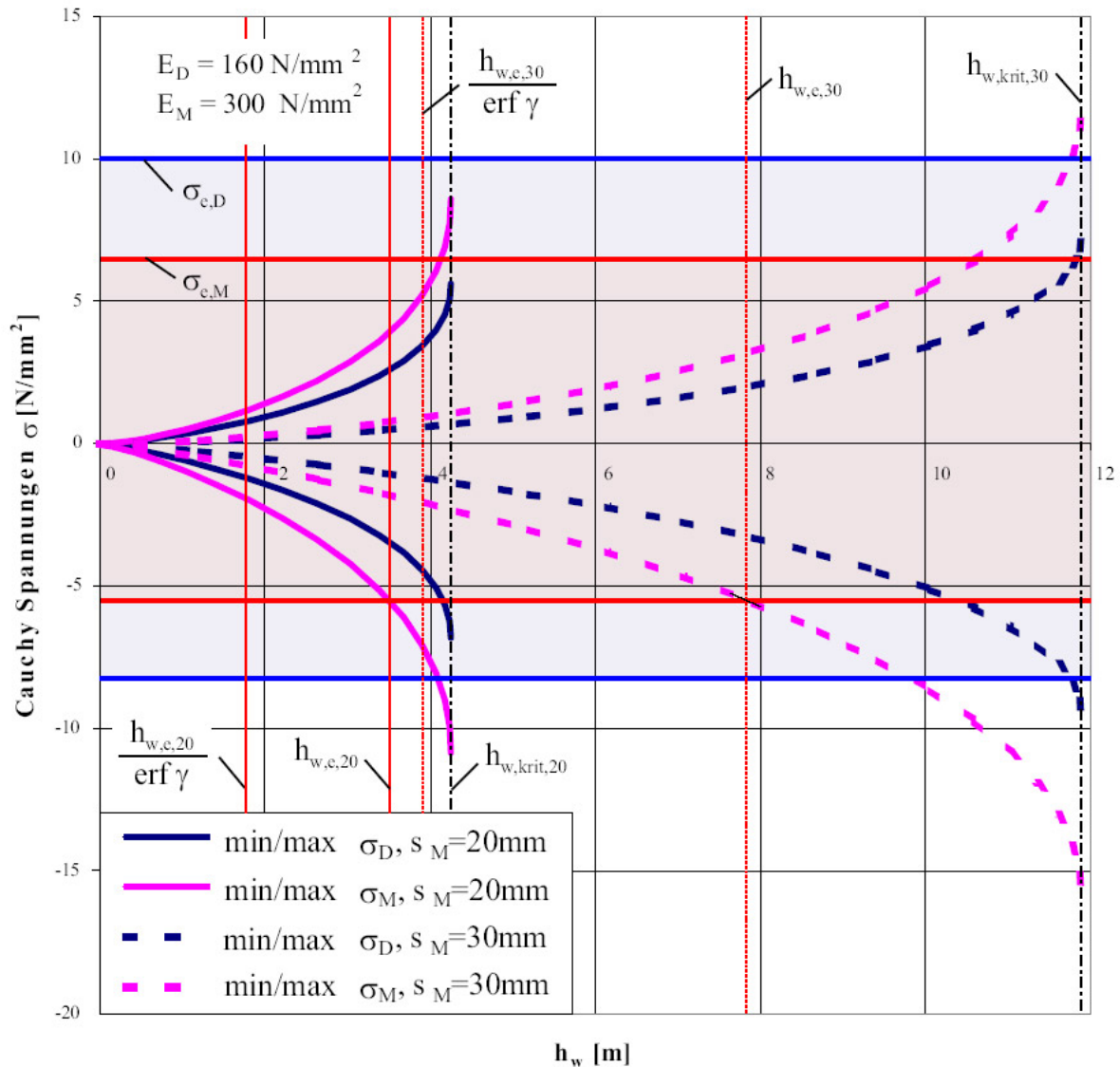


Abb. 33: Minimal- bzw. Maximalwerte für die Cauchy-Spannungen in Deck- und Mittelschicht für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und Dicken der Mittelschicht von $s_m = 20$ und $s_m = 30$ mm. Weitere Parameter: Dicke der Deckschichten $s_D = 2$ mm, minimaler Elastizitätsmodul Deckschicht $E_D = 160 \text{ N/mm}^2$, minimaler Elastizitätsmodul Mittelschicht $E_M = 300 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 14); aus [31]

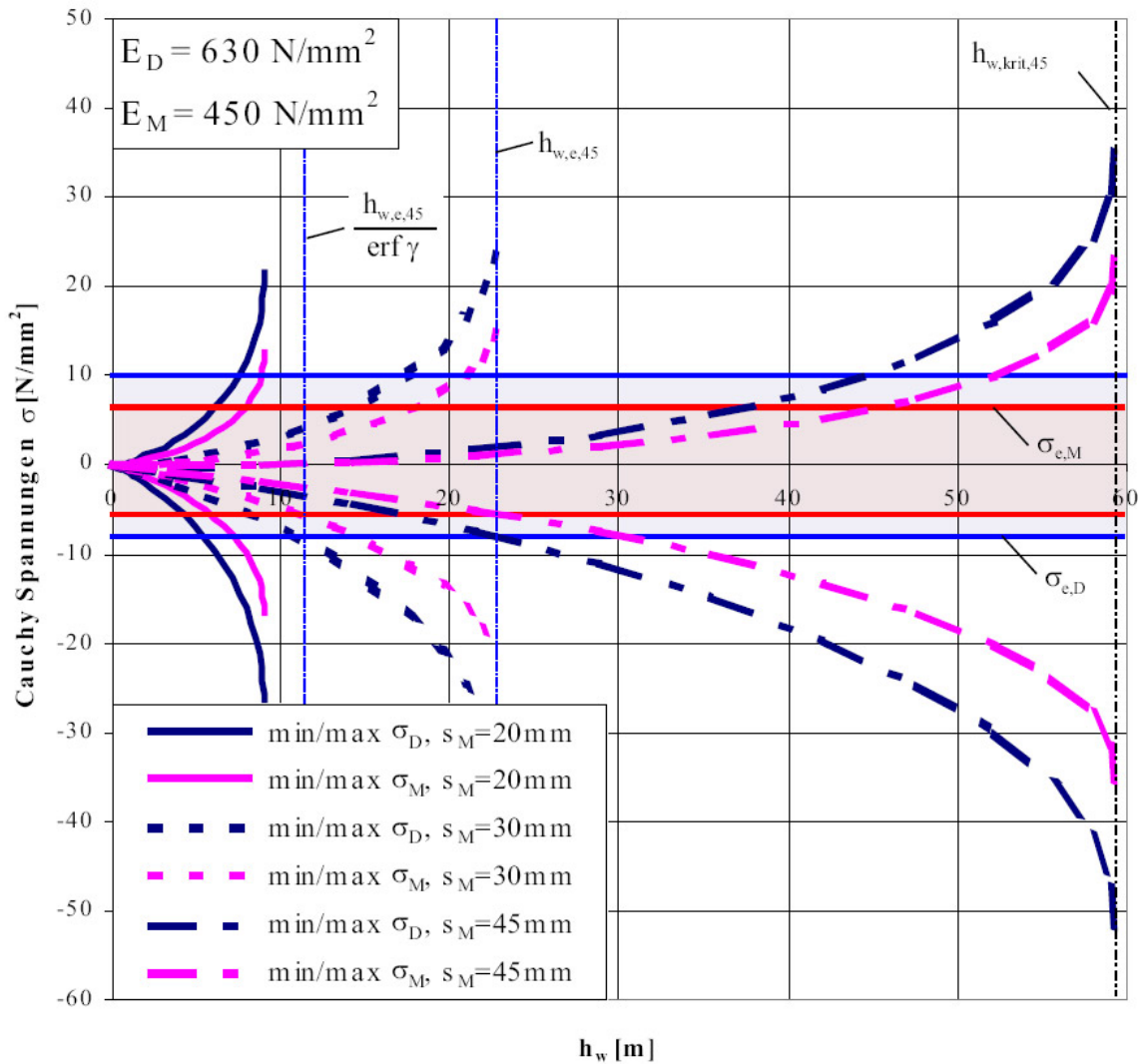


Abb. 34: Minimal- bzw. Maximalwerte für die Cauchy-Spannungen in Deck- und Mittelschicht für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und Dicken der Mittelschicht von $s_m = 20$, $s_m = 30 \text{ mm}$ und $s_m = 45 \text{ mm}$. Weitere Parameter: Dicke der Deckschichten $s_D = 2 \text{ mm}$, maximaler Elastizitätsmodul Deckschicht $E_D = 630 \text{ N/mm}^2$, maximaler Elastizitätsmodul Mittelschicht $E_M = 450 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 14); aus [31].

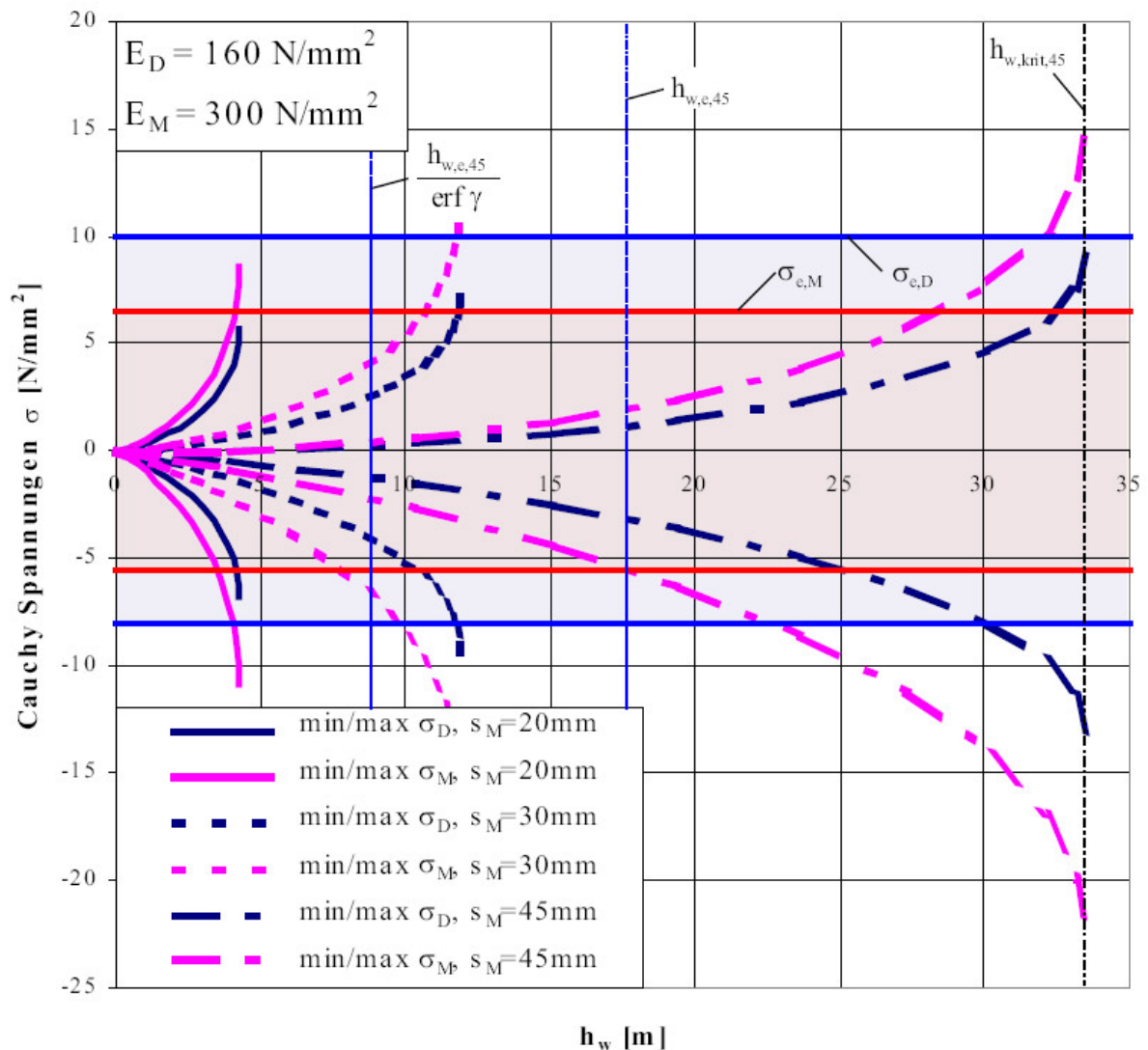


Abb. 35: Minimal- bzw. Maximalwerte für die Cauchy-Spannungen in Deck- und Mittelschicht für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und Dicken der Mittelschicht von $s_m = 20$, $s_m = 30$ mm und $s_m = 45$ mm. Weitere Parameter: Dicke der Deckschichten $s_D = 2$ mm, **minimaler Elastizitätsmodul Deckschicht** $E_D = 160$ N/mm², **minimaler Elastizitätsmodul Mittelschicht** $E_M = 300$ N/mm² (vgl. Tabelle 14); aus [31].

Abb. 32 bis Abb. 35 kann entnommen werden, dass in den untersuchten Fällen der **Spannungsnachweis** und nicht der Stabilitätsnachweis für die Bemessung der Sandwich-Beschichtung **maßgeblich** ist. Bei sämtlichen untersuchten Schichtdicken ist für die Berechnung unter Ansatz der jeweils minimalen Steifigkeiten für Deck- und Mittelschichten der Spannungsnachweis für die Deckschicht und unter Ansatz der jeweils maximalen Steifigkeiten der Spannungsnachweis für die Mittelschicht maßgebend. Bei einem Ansatz der Kurzzeit-Materialkennwerte sowie der geringeren Steifigkeiten von Deck- und Mittelschicht (ungünstiger Fall) konnte für die PUR-Hartschaum-Schichtdicken 20, 30 und 45 mm bei 2 mm Deck-

schicht eine **statische Kurzzeit-Sicherheit gegen einen Druck aus ca. 1,7 m, 3,9 m bzw. 8,8 m Wassersäule** nachgewiesen werden.

In Abb. 36 und Abb. 37 sind die Verläufe der maximalen elastischen Durchmesseränderungen $\delta_{v,el}$ gemäß Gleichung 3 für die verschiedenen Szenarien und für unterschiedliche Grundwasserdrücke (dargestellt durch die Höhe h_w des Grundwasserspiegels) bis zum Erreichen der Stabilitätsgrenze abgebildet. In den Abbildungen sind die zulässige Durchmesseränderung (10%), die um den Anteil der örtlichen Vorverformung w_v reduziert wurde, sowie die maßgebliche Bemessungsgrenze $h_{w,\delta}$ eingetragen. Für die Schichtdicken $d_m = 20$ mm und $d_m = 30$ mm tritt ein Stabilitätsversagen ein, bevor die elastischen Verformungen den zulässigen Wert erreichen. Für eine Schichtdicke von $s_m = 45$ mm überschreiten die zulässigen Verformungen den zulässigen Bereich bevor ein Stabilitätsversagen eintritt. Wird für den Verformungsnachweis ein Sicherheitsbeiwert von $\text{erf}_\gamma = 1,0$ angesetzt, bleibt in allen untersuchten Fällen der Spannungsnachweis maßgebend.

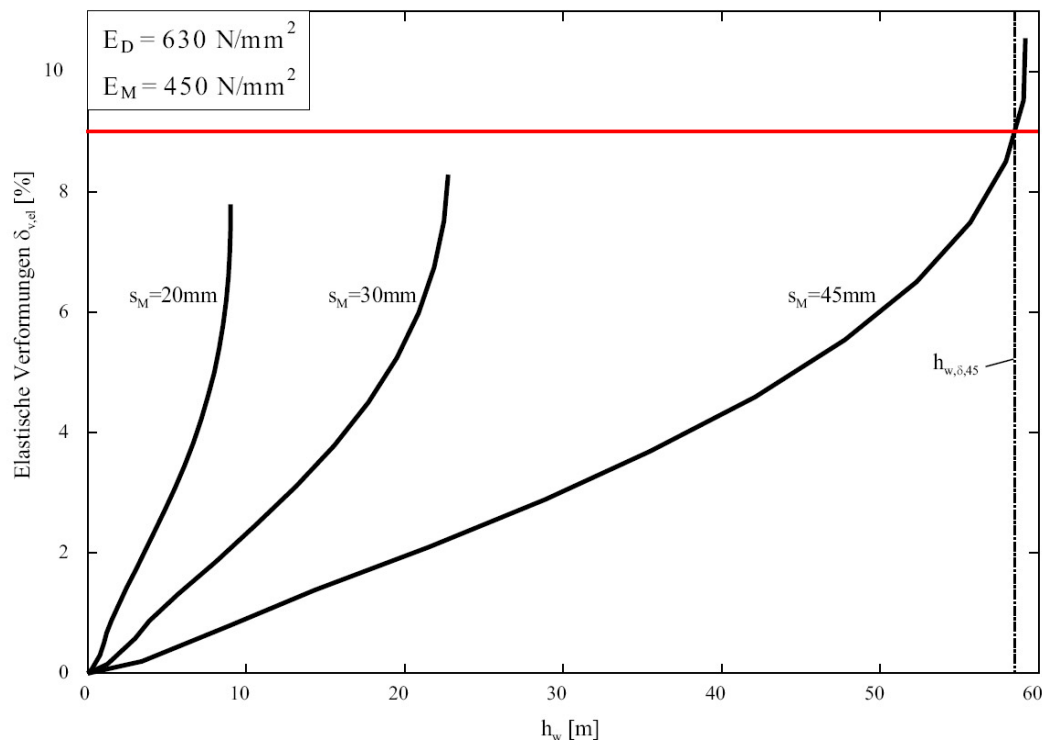


Abb. 36: **Elastische Verformungen $\delta_{v,el}$ und maßgebliche Bemessungsgrenze $h_{w,\delta,45}$ für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w , Dicken der Mittelschicht $s_m = 20$ mm, $s_m = 30$ mm und $s_m = 45$ mm, sowie für die maximalen Elastizitätsmoduln von Deck- und Mittelschicht $E_D = 630 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_M = 450 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 14); aus [31].**

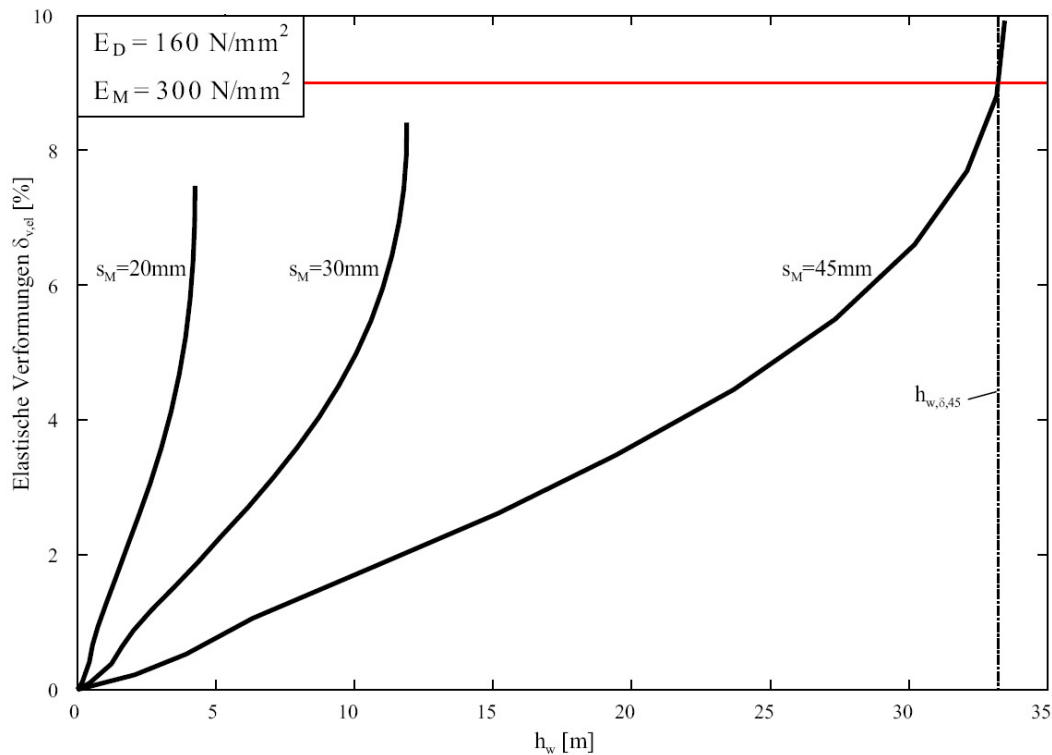
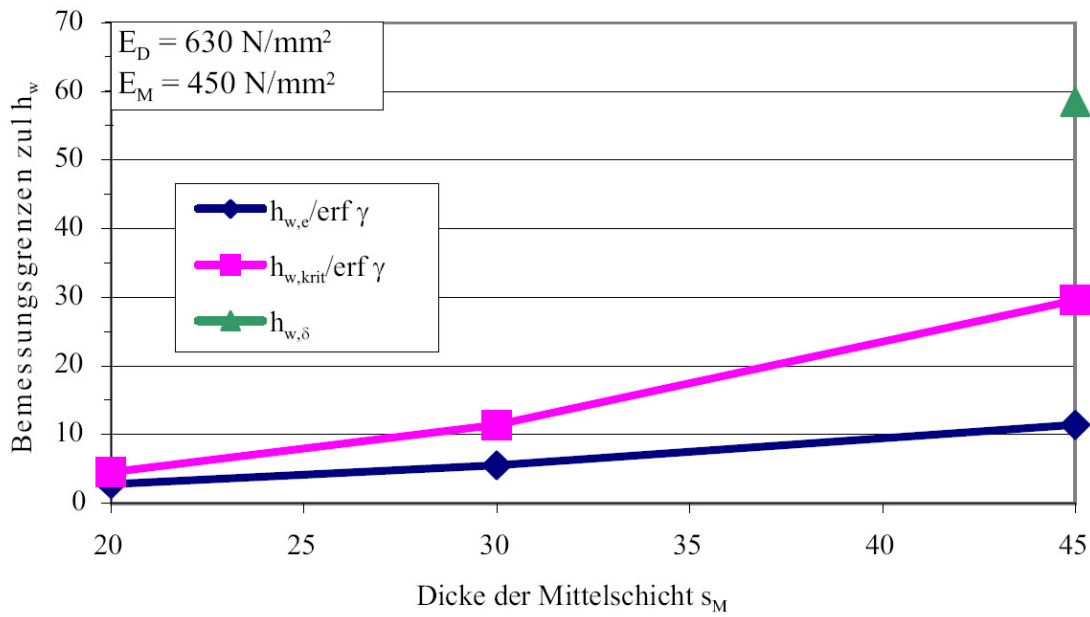
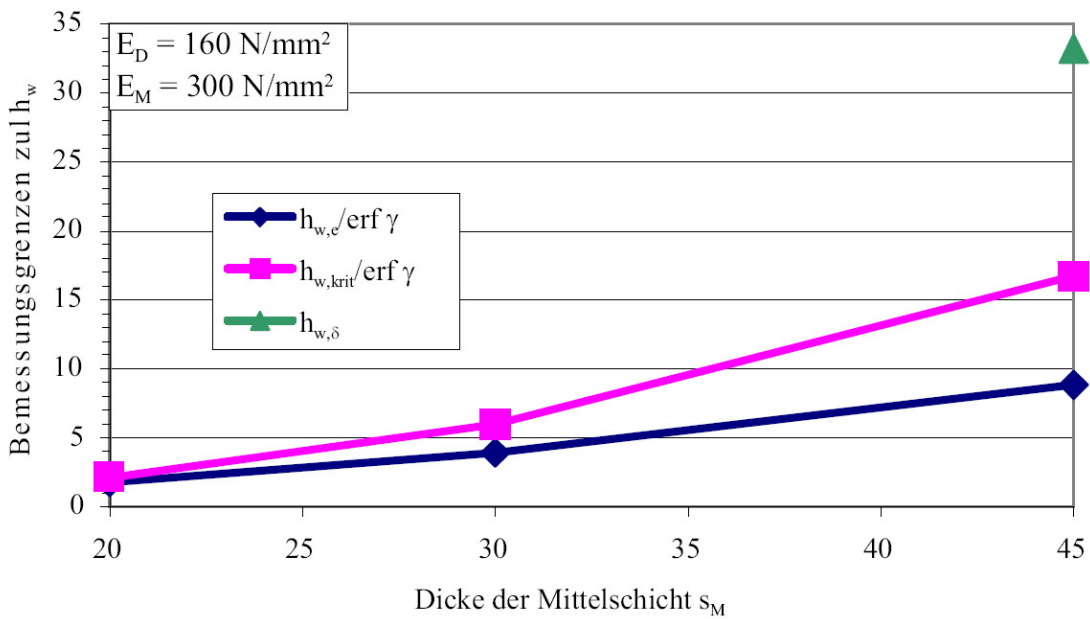


Abb. 37: **Elastische Verformungen** $\delta_{v,el}$ und maßgebliche Bemessungsgrenzen $h_{w,\delta,45}$ für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w , Dicken der Mittelschicht $s_m = 20\text{ mm}$, $s_m = 30\text{ mm}$ und $s_m = 45\text{ mm}$, sowie für die **minimalen Elastizitätsmoduln** von Deck- und Mittelschicht $E_D = 160\text{ N/mm}^2$ bzw. $E_M = 300\text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 14); aus [31].

Um einen ersten Anhaltswert für die Abhängigkeit zwischen Wanddicke des Sandwichs und aufnehmbarem Kurzzeit-Wasserdruck zu erhalten, sind in Abb. 38 die zulässigen Bemessungshöhen zur h_w aus den Stabilitäts-, Spannungs- und Verformungsnachweisen für drei Dicken der Mittelschicht ($s_m = 20\text{ mm}$, $s_m = 30\text{ mm}$ und $s_m = 45\text{ mm}$) zusammengestellt. Der Zusammenhang zwischen h_w und s_M ist nichtlinear. Daher wäre eine lineare Interpolation mit Unsicherheiten behaftet und könnte zu einer Bemessung auf der „unsicheren Seite“ führen.



A



B

Abb. 38: Bemessungswerte für die zulässige Höhe des Wasserspiegels zu h_w für unterschiedliche Dicken der Mittelschicht $s_m = 20 \text{ mm}$, $s_m = 30 \text{ mm}$ und $s_m = 45 \text{ mm}$, Sandwich-Radius $r_L = 500 \text{ mm}$ ($h_{w,e}$: Grenzhöhe bis Erreichen der elastischen Grenzspannung, $h_{w,krit}$: Grenzhöhe bis Erreichen der Stabilitätsgrenze, $h_{w,\delta}$: Grenzhöhe bis Erreichen der maximal zulässigen Verformung). A: Unter Ansatz der maximalen Elastizitätsmoduln von Deck- und Mittelschicht $E_D = 630 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_M = 450 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 14). B: Unter Ansatz der minimalen Elastizitätsmoduln von Deck- und Mittelschicht $E_D = 160 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_M = 300 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Tabelle 14); alle Abbildungen aus [31].

Um die o.a. Unsicherheiten bei einer Interpolation zu berücksichtigen, wurden die maßgeblichen Kurzzeit-Bemessungsgrenzen h_w mit einem Sicherheitsfaktor $\gamma_{int} = 1,25$ abgemindert und die Grundsteifigkeit der PU-Deckschichten (bei $s_m = 0$) in der Interpolation vernachlässigt (vgl. Abb. 39). Auf dieser Basis wird – für eine äußere und innere PU-Deckschicht von 2 mm - folgende erste Abschätzung für die Beziehung zwischen Hartschaumdicke und aufnehmbarem Wasserdruck bei Ansatz der Kurzzeit-Materialkennwerte vorgeschlagen:

$$h_w = \frac{1}{3} \cdot s_m^2 \quad (\text{Gleichung 9})$$

mit:

h_w = Höhe des aufnehmbaren Kurzzeit-Wasserdrucks [m]

s_m = Dicke der PUR-Hartschaum- Schicht [cm]

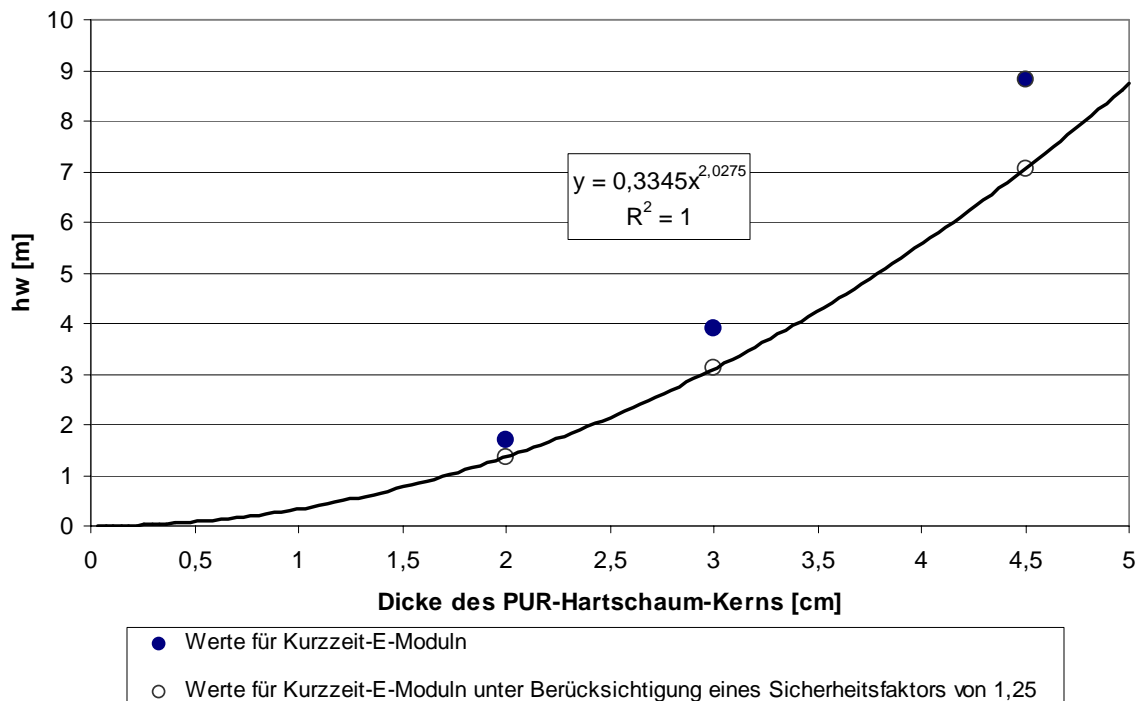


Abb. 39: Erste Abschätzung des Zusammenhangs zwischen der Schichtdicken des PUR-Hartschaum-Kerns und dem aufnehmbarem Wasserdruck h_w (Höhe des Wasserspiegels) für eine äußere und innere PU-Deckschicht von 2 mm; auf Grundlage einer Interpolation der um den Faktor $\gamma_{int} = 1,25$ abgeminderten Kurzzeit-Bemessungsgrenzen h_w aus Abb. 33 und Abb. 35 (bei Ansatz der minimalen E-Moduln von Deckschicht bzw. Mittelschicht $E_D = 160 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_M = 300 \text{ N/mm}^2$)

4.3.5 Erste Abschätzung der Langzeit-Bemessungsgrenzen

Um auch eine erste, grobe Abschätzung hinsichtlich der Langzeit-Bemessungsgrenzen vorzunehmen, wurden für die numerischen Untersuchungen sämtliche Werkstoffkennwerte um die Abminderungsfaktoren 2,5 bzw. 4,5 (vgl. Abschnitt 3.5) abgemindert und beispielhaft Vergleichsberechnungen für eine Schichtdicke der Mittelschicht der Sandwich-Beschichtung von $s_m = 45$ mm durchgeführt. Tabelle 17 gibt eine Übersicht über die verwendeten Materialdaten.

Tabelle 17: Zusammenstellung der verwendeten Parameter für die durchgeführten numerischen Berechnungen zur Ermittlung der Spannungsverläufe unter Ansatz der in Abschnitt 3.5 abgeschätzten Abminderungsfaktoren

Fall	Kurzzeit-E-Modul (min / max)	Verwendeter Abminderungs- faktor ^{a)}	Verwendete Werkstoffkennwerte					
			$\sigma_{e,D}$ (Zug)	$\sigma_{e,D}$ (Druck)	$\sigma_{e,M}$ (Zug)	$\sigma_{e,M}$ (Druck)	E_D	E_M
	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]					
Langzeit – 1	max $E_D = 630$ $E_M = 450$	2,5	4,0	3,2	2,6	2,2	252	180
Langzeit – 2	min $E_D = 160$ $E_M = 300$	2,5	4,0	3,2	2,6	2,2	64	120
Langzeit – 3	max $E_D = 630$ $E_M = 450$	4,5	2,2	1,8	1,4	1,2	140	100
Langzeit – 4	min $E_D = 160$ $E_M = 300$	4,5	2,2	1,8	1,4	1,2	35,56	66,67

a) Ermittelt durch Extrapolation des 24-h-Kriechneigungsversuches (vgl. Abschnitt 3.5, Abb. 17)

In Abb. 40 und Abb. 41 sind die resultierenden Verläufe der minimalen und maximalen Cauchy-Spannungen bei unterschiedlichen Grundwasserdrücken (dargestellt durch die Höhe h_w des Grundwasserspiegels) bis zum Erreichen der Stabilitätsgrenze dargestellt. In den Abbildungen sind die jeweils um den entsprechenden Abminderungsfaktor verringerten elastischen Grenzspannungen für Deck- und Mittelschicht für Zug- und Druckbeanspruchungen $\sigma_{e,D,Zug}$, $\sigma_{e,M,Zug}$, $\sigma_{e,D,Druck}$, $\sigma_{e,M,Druck}$ (vgl. Tabelle 17) abgebildet. Abb. 42 zeigt die Verläufe der maximalen elastischen Durchmesseränderungen $\delta_{v,el}$ gemäß Gleichung 3 für unterschiedliche Grundwasserdrücke (dargestellt durch die Höhe h_w des Grundwasserspiegels) bis zum Erreichen der Stabilitätsgrenze.

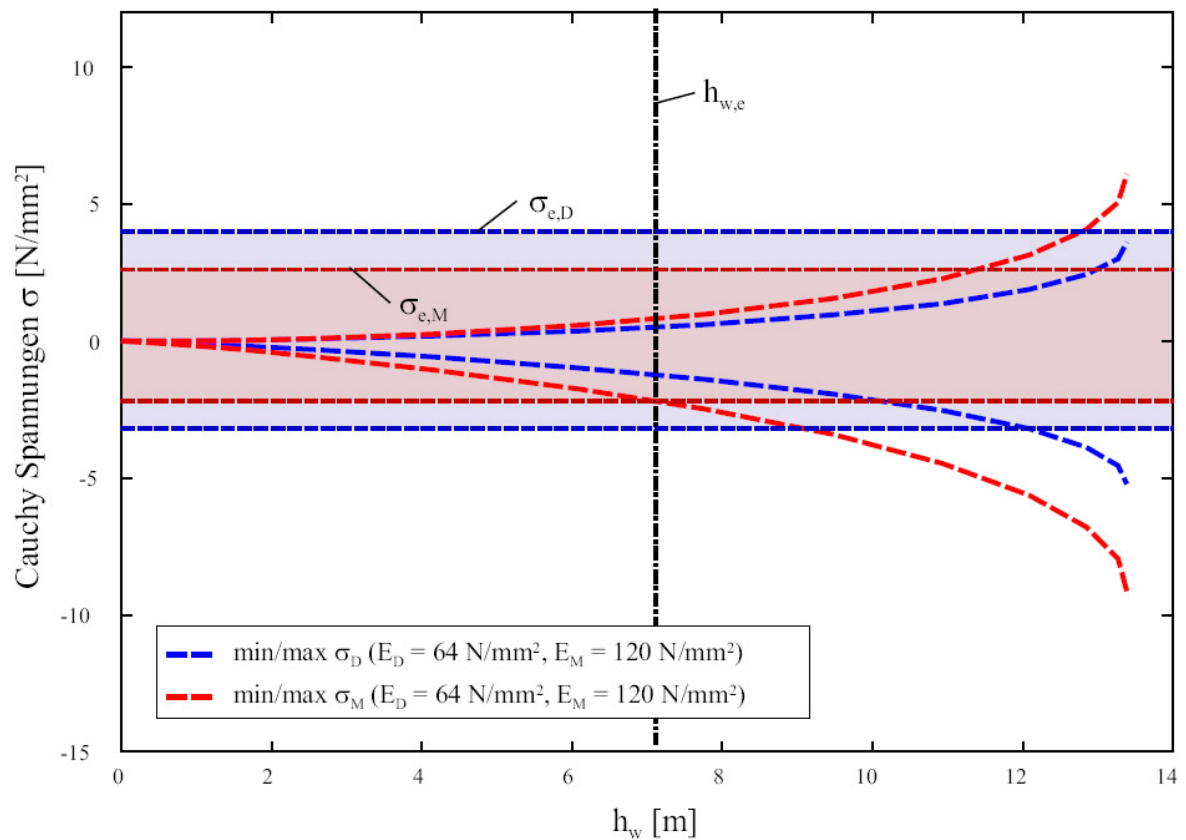


Abb. 40: Abschätzung einer Langzeit-Bemessung durch Abminderung sämtlicher Werkstoffkennwerte um Faktor $A=2,5$ (**Fall Langzeit 2**, vgl. Tabelle 17): Maximal- bzw. Minimalwerte für die Cauchy-Spannungen in Deck- und Mittelschicht für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und eine Dicke der Mittelschicht von $s_m = 45$ mm; aus [31].

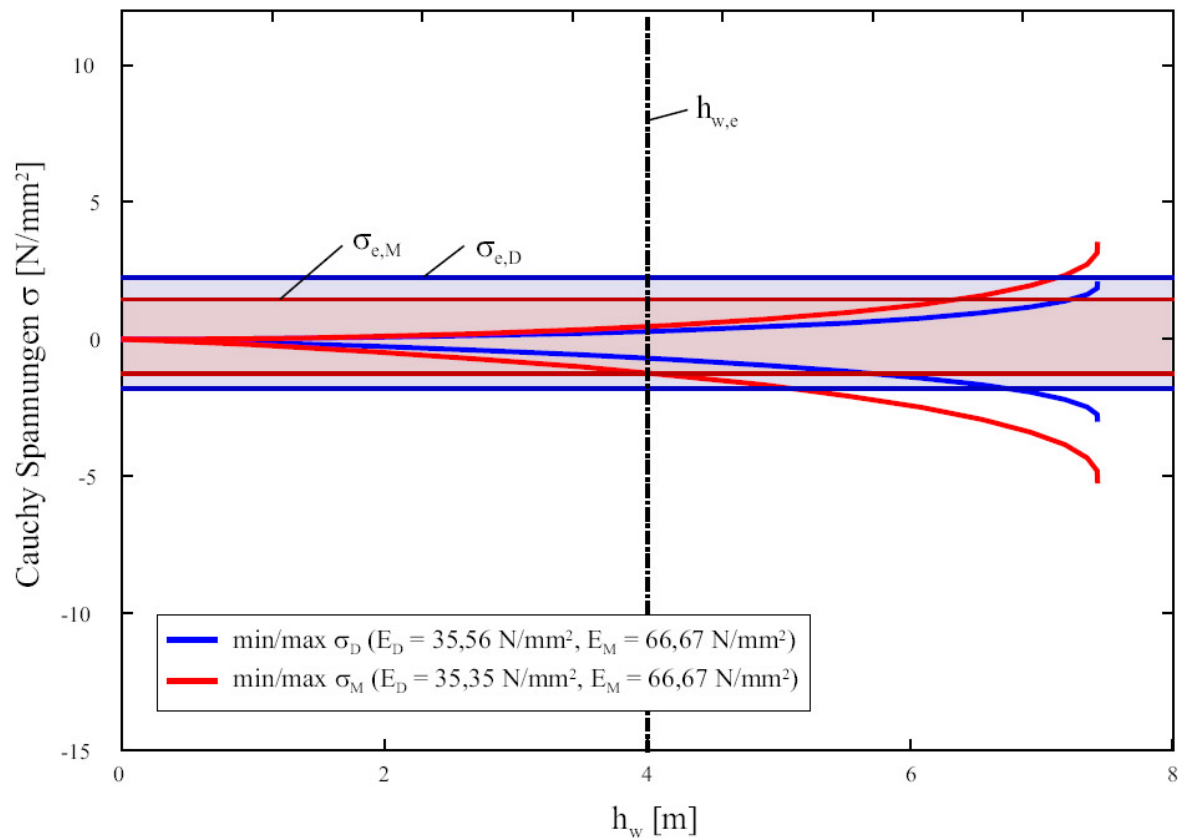


Abb. 41: Abschätzung einer Langzeit-Bemessung durch Abminderung sämtlicher Werkstoffkennwerte um Faktor $A=4,5$ (**Fall Langzeit 4**, vgl. Tabelle 17): Maximal- bzw. Minimalwerte für die Cauchy-Spannungen in Deck- und Mittelschicht für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und eine Dicke der Mittelschicht von $s_m = 45$ mm; aus [31].

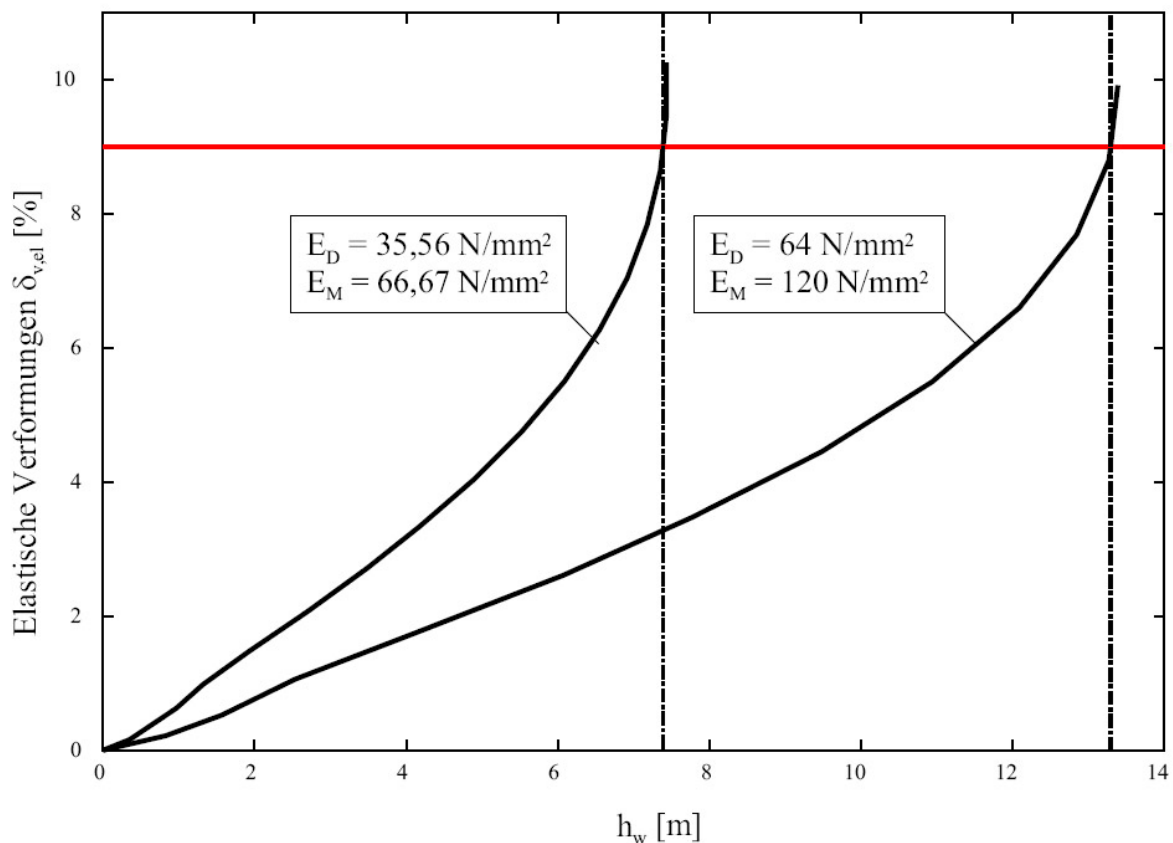


Abb. 42: Abschätzung einer Langzeit-Bemessung durch Abminderung sämtlicher Werkstoffkennwerte um die Abminderungsfaktoren $A = 2,5$ bzw. $A = 4,5$ (Fall **Langzeit 2** bzw. **Langzeit 4**, vgl. Tabelle 17): **Elastische Verformungen $\delta_{v,el}$** für unterschiedliche Höhenlagen des Wasserspiegels h_w und eine Dicke der Mittelschicht von $s_m = 45$ mm; aus [31].

Wie bei der Kurzzeit-Bemessung ist auch hier in allen untersuchten Fällen der Spannungsnachweis und nicht der Stabilitäts- bzw. Verformungsnachweis für die Bemessung maßgebend. Bei einem Ansatz der **geringeren Steifigkeiten von Deck- und Mittelschicht** (ungünstiger Fall) und einem **Abminderungsfaktor von 2,5 bzw. 4,5** (vgl. Abschnitt 3.5) konnte für eine PUR-Hartschaumschichtdicke von 45 mm bei 2 mm innerer und äußerer Deckschicht eine **statische Sicherheit gegen einen Druck aus 3,6 m bzw. 2,0 m Wassersäule** nachgewiesen werden (vgl. auch Tabelle 18).

Tabelle 18: Zusammenstellung der Bemessungshöhen zur h_w für Dicke der Mittelschicht $s_m = 45 \text{ mm}$ und für die um die Abminderungsfaktoren 2,5 bzw. 4,5 verringerten minimalen bzw. maximalen Steifigkeiten und Festigkeiten

Fall	Verwendete E-Moduln (min/max)		Verwendeter Abminderungsfaktor	Maßgebende Bemessungshöhen zur h_w					
	max	E _D = 252 E _M = 180		2,5	$h_{w, \text{krit}}$	$h_{w, \text{krit}} / \text{erfy}$	$h_{w, \text{e}}$	$h_{w, \text{e}} / \text{erfy}$	$h_{w, \delta}$
					[m]				
Langzeit – 1	max	E _D = 252 E _M = 180	2,5	23,7	11,8	9,2	4,6	23,4	
Langzeit – 2	min	E _D = 64 E _M = 120	2,5	13,4	6,7	7,1	3,6	13,3	
Langzeit – 3	max	E _D = 140 E _M = 100	4,5	13,2	6,6	5,1	2,6	13,0	
Langzeit – 4	min	E _D = 35,56 E _M = 66,67	4,5	7,4	3,7	4,0	2,0	7,4	

4.4 Schlussfolgerungen

Aus den Überlegungen zur Wahl eines geeigneten Berechnungsverfahrens sowie den numerischen und analytischen Untersuchungen können die folgenden wesentlichen Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Das **Nachweiskonzept des DWA-Merkblatt 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 wird 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 Ergebnissen führen. Dies gilt insbesondere bei gleichzeitiger Anwendung eines Sicherheitsbeiwertes von $\text{erf}_y = 2,0$ 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 unter 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 $1.500 \text{ N/mm}^2 - 3.000 \text{ N/mm}^2$ 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. 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.
- In den untersuchten Fällen ist der **Spannungsnachweis** und nicht der Stabilitätsnachweis bzw. der Verformungsnachweis für die Bemessung **maßgebend**. Diese Aussage gilt nur für die untersuchten Geometrie- und Materialparameter. Für eine sehr dünnwandige Sandwich-Beschichtung mit $d < 20 \text{ mm}$ 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 $h_w = 0,33 \cdot s_m^2$ (mit h_w = Höhe des Wassersiegels [m] und s_m = Dicke der PUR-Hartschaum-Schicht [cm]) angenähert werden.
- 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 3.5, Abb. 17) 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**.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

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 Instandsetzungsmaßnahmen vorzunehmen.

Zur Wiederherstellung der Dichtheit, Funktionsfähigkeit und Standsicherheit von Abwasser-schächten werden heute fast ausschließlich Beschichtungs- und Auskleidungsverfahren eingesetzt, die in vielen Fällen eine kostengünstige Alternative zur Erneuerung der schadhafte 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

„Sandwich-Beschichtung“ für Abwasserschächte“, dessen erste Ergebnisse in diesem Teilbericht dargestellt sind.

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.

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 Polyurethanschäum zur Ausbildung eines tragfähigen Kerns in einer Dicke von mehreren Zentimetern aufgebracht, und dann erneut eine dünne Schicht Polyurethan aufgetragen.

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.

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 Maschinenteknik 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 Hohlraum ausschäumung, 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 Kern aus PUR-Hartschaums **sinnvolle Schichtdicken** abgeschätzt. Die sich unter diesen Gesichtspunkten ergebende sinnvolle Gesamtdicke des Sandwich-Querschnitts konnte mit 20 mm bis 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.

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 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.

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 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

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])

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.

Im Rahmen der **Materialprüfungen** wurden an den Sandwich-, Polyurethan- und Hartschaum-Probekörpern die 3-Punkt-Biegezugfestigkeit sowie der Biege-Modul in Anlehnung an EN ISO 178 bestimmt. Darüber hinaus wurden bei den Polyurethan- und den Hartschaum-Probekörpern die Zugfestigkeit und der Zugmodul in Anlehnung an EN ISO 527–2 sowie die Druckfestigkeit und der Druckmodul in Anlehnung an EN ISO 604 ermittelt. Der Sandwich-Ringabschnitt wurde in Anlehnung an DIN EN 1228 geprüft, um erste Anhaltswerte bzgl. der Ringsteifigkeit der Sandwich-Beschichtung zu erhalten und das Langzeit-Verhalten der Sandwich-Beschichtung abschätzen zu können.

Bei den Materialprüfungen zeigte sich, dass die ermittelten Kurzzeit-Festigkeits- 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/mm² und Elastizitätsmoduln von ca. 160 – 450 N/mm² ermittelt wurden, liegen die Orientierungswerte der Zugfestigkeiten von GFK-Werkstoffen bei ca. 120 – 350 N/mm² bzw. bei ca. 8.000 – 20.000 N/mm² für den Elastizitätsmodul (vgl. [27]). Bedingt vergleichbar sind die Werkstoffeigenschaften von PE-HD. Hier werden in der Fachliteratur (vgl. [27], [28], [29], [30]) Orientierungswerte für die Zugfestigkeit von ca. 17 – 29 N/mm² bzw. von ca. 900 – 1.200 N/mm² für den Elastizitätsmodul gegeben.

Wie die Last-Dehnungsdiagramme der durchgeführten Materialuntersuchungen zeigten, sind sowohl das verwendete Polyurethan als auch der PUR-Hartschaum durch ein z.T. nichtlineares, vermutlich anelastisches Materialverhalten gekennzeichnet. Da die Materialien bei geringen Spannungen ein annähernd lineares Materialverhalten aufweisen, wurden zusätzlich zu den Bruchfestigkeiten auch die elastischen Grenzspannungen^a ermittelt. 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-Dehnungsdiagramme deutet auf ein Stabilitätsproblem hin. 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

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

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.

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 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.

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. 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.

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 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 Polyurethans 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

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.

Es zeigte sich, dass das Berechnungsverfahren des DWA-Merkblatt 127-2 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 allerdings auf Verbundquerschnitte nur rudimentär eingegangen wird, muss das Nachweiskonzept unter diesem Aspekt für den vorliegenden Anwendungsfall überprüft werden. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Übertragbarkeit einiger Annahmen bzw. Rechenhilfen des DWA-Merkblatts 127-2 auf den vorliegenden Anwendungsfall einer Überprüfung bedarf und ggf. einzelne Punkte angepasst werden müssen. Dies betrifft folgende Punkte:

- Altrohrzustände,
- Annahmen zum Materialverhalten,

- Schnittkraft-Beiwerte,
- Imperfektionen und
- Abminderungsfaktoren für Imperfektionen.

⇒ **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 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.

⇒ **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 $1500 \text{ N/mm}^2 \leq E_L \leq 3000 \text{ N/mm}^2$ 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.

Um die Eignung der Bemessungsformeln und -diagramme des DWA-Merkblatt 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.

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.

Die verwendeten Materialparameter basieren auf den im Kapitel 3.5 durchgeführten Kurzzeit-Materialprüfungen an den Sandwich-Werkstoffen. Dort zeigten die Werkstoffe ein z.T. nicht-lineares, 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 \mathbf{S} und dem Green-Lagrange'schen Verzerrungstensor \mathbf{E} ausgeht (vgl. [46]).

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. [45]) 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-

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

Formulierung^a berücksichtigt (vgl. [46]). Sämtlichen Berechnungen liegt in Übereinstimmung mit DWA-M 127-2 die Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes zugrunde. Die Kontaktbedingungen zwischen dem Sandwich-Element und dem Betonalterschacht 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 nichtlinearen Stabilitätsproblems laufend aktualisiert. Für die Untersuchung imperfekter Ausgangsgeometrien wurde das Bogenlängenverfahren^b 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-Merkblatt 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 wird 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

a 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.

b 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 [46]).

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 einhergehender mikrostruktureller 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 Ergebnissen führen. Dies gilt insbesondere bei gleichzeitiger Anwendung eines Sicherheitsbeiwertes von $\text{erf}_y = 2,0$ 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 unter 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 $1.500 \text{ N/mm}^2 - 3.000 \text{ N/mm}^2$ 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. 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.
- 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 $d < 20 \text{ mm}$ 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 **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 $h_w = 0,33 \cdot sm^2$ (mit h_w = Höhe des Wassersiegels [m] und sm = Dicke der PUR-Hartschaum-Schicht [cm]) angenähert werden.
- 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 3.5, Abb. 17) 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**.

6 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 Mindestschachtdurchmesser (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

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 erfüllt** 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-**) **probabilistischen 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.

- 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.

7 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] 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.
- [8] DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 5: Sanierung; Beuth Verlag, Berlin, November 1997.
- [9] DWA M 143: Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und –leitungen; Teil 2: Optische Inspektion; DWA-Merkblatt, April 1999.
- [10] DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 5: Sanierung; Beuth Verlag, Berlin, November 1997.

-
- [11] Stein, D.: Sanierung von Schächten; in: bi UmweltBau 3/03.
 - [12] Firmeninformation der Fa. Rainer Hermes GmbH & Co KG, Schwerte.
 - [13] Vorläufige Verarbeitungsrichtlinie Oldodur WS 56 Beschichtung, Flüssigkunststoff-Beschichtungssystem für Kanal- Schachtsanierung; Relius Coatings GmbH & Co., Oldenburg, Juli 2001.
 - [14] Gespräch mit Herrn Loos (Loos PUR Technik e.K., Neuenrhade) am 03.Oktober 2003.
 - [15] Baytec RT - Das Hochreaktive Polyurethan-Spritzsystem; Firmeninformation der Bayer AG, Leverkusen.
 - [16] Firmeninformation der Fa. Loos PUR Technik e.K., Neuenrade.
 - [17] Technisches Merkblatt Büfatherm 44-13. Firmeninformation der Fa. BÜFA Polyurethane GmbH & Co KG, Oldenburg, Januar 2004.
 - [18] Technisches Merkblatt Büfapur B 1000. Firmeninformation der Fa. BÜFA Polyurethane GmbH & Co KG, Oldenburg, Januar 2004.
 - [19] DIN V 4034: Schächte aus Beton-, Stahlfaserbeton- und Stahlbetonfertigteilen für Abwasserleitungen und -kanäle - Typ 1 und Typ 2 -, Teil 1: Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität, hier Anhang K: Lastannahmen für die statische Berechnung von Einstieg- und Kontrollschächten in Abwasserleitungen und -kanälen, Beuth-Verlag, April 2003.
 - [20] DIN EN 1917: Einstieg- und Kontrollschächte aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton; Beuth Verlag, Berlin, April 2003.
 - [21] DWA-A 157: Bauwerke der Kanalisation; ATV-DVWK-Regelwerk, November 2000.
 - [22] DWA-A 241: Bauwerke in der Kanalisation; ATV-Regelwerk, Mai 1998.
 - [23] EN ISO 178: Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften, Beuth Verlag, Berlin, Februar 1997.
 - [24] EN ISO 527-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, Beuth Verlag, Berlin, Juli 1996.
 - [25] EN ISO 604: Kunststoffe – Bestimmung von Druckeigenschaften, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2003.

-
- [26] DIN EN 1228: Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) - Ermittlung der spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit; Beuth Verlag, Berlin, August 1996.
- [27] Kunststoffrohrverband e.V. Bonn (Hrsg.): Kunststoffrohr Handbuch – Rohrleitungssysteme für die Ver- und Entsorgung sowie weitere Anwendungsgebiete, 3. Auflage, Vulkan Verlag, Essen, 1997.
- [28] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 4. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [29] Franck, A.: Kunststoff-Kompendium – Herstellung, Aufbau, Verarbeitung, Anwendung, Umweltverhalten und Eigenschaften der Thermoplaste, Polymerlegierungen, Elastomere und Duroplaste, 5. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg, 2000.
- [30] Carbofix[®]-Betonschutzplatten aus PEHD, Anwendungsbeispiel Auskleidung eines Abwasserkanals; Firmeninformation der Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG, Reinbek, Mai 2000.
- [31] 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.
- [32] Ledworuski, S.; Ell, M.; Kühn, H-J.: Den Elastizitätsmodul sicher bestimmen - Voraussetzungen für die Kraft-Dehnungsmessung im Zugversuch, in: MP Materialprüfung S. 109-113, Jahrgang 42 (2000) 4, Carl Hanser Verlag, München.
- [33] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 1: Grundlagen – Baustoffkenngrößen, Mess- und Prüftechnik, Statistik und Qualitätssicherung, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1996.
- [34] DWA-A127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen, August 2000.
- [35] DWA-M127, Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und –leitungen mit Lining- und Montageverfahren, Januar 2000.
- [36] Timoshenko, S.P.; Gere, J.M.: Theory of elastic stability, McGraw-Hill, 1961.
- [37] 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.

-
- [38] Chicurel, R.: Shrink buckling of thin circular rings, Journal of Applied Mechanics, ASME 35, 1968.
- [39] Weith, C.: Vergleichende Untersuchung zur Bemessung von mittels Relining-Verfahren sanierten Abwasserleitungen, Diplomarbeit, Arbeitsgruppe Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität-Bochum, Juni 1997.
- [40] Gaube, E.: Bemessen von Kanalrohren aus PE hart und PVC hart, Kunststoffe H. 6, 1977.
- [41] Cheney, J.A.: Pressure buckling of ring encased in cavity, in: Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1971.
- [42] Lo, K.H.; Zhang, J.Q.: Collapse resistance modeling of encased pipes, Buried Plastic Pipe Technology 2nd Volume, ASTM, 1994.
- [43] ASTM F 1216-93: Rehabilitation of existing pipelines and conduits by the inversion and curing of a resin-impregnated tube, 1993.
- [44] Wagner, V.: Beulnachweis bei der Sanierung von nichtbegehbaren, undichten Abwasserkanälen mit dem Schlauchverfahren, Dissertation, Technische Universität Berlin, 1992.
- [45] Basar, Y.; Krätzig, W.B.: Mechanik der Flächentragwerke, Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1985.
- [46] Wriggers, P.: Nichtlineare Finite-Elemente-Methoden, Springer Verlag, Berlin, 2001.