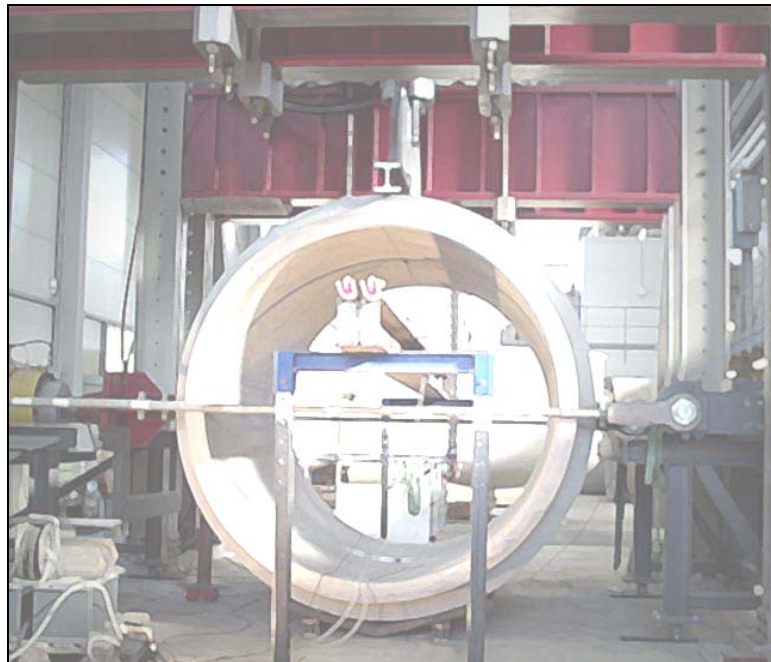


Stahlbetonrohre in offener Bauweise

*Rohrprüfungen unter
realitätsnahen Beanspruchungen*

- Kurzfassung -



- Februar 2004 -

Bosseler, B.; Redmann, A.

Forschungsprojekt
gefördert durch



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. Andreas Redmann
Dipl.-Ing. (FH) Frank Bersuck
Dr.-Ing. Sherif El Shahid

Wir danken den Projektbeteiligten für die inhaltliche Unterstützung und angeregte Diskussion im Rahmen des Forschungsprojektes:

Dipl.-Ing. Heinrich Sommerhage

Emschergenossenschaft/Lippeverband

Dipl.-Ing. Franz Schröder

Emschergenossenschaft/Lippeverband

Dr.-Ing. Bernd Schnütgen

Lehrstuhl und Institut für Stahlbeton- und
Spannbetonbau der Ruhr-Universität Bochum

Ein besonderer Dank gilt Frau cand.-Ing. Anette Jäger für die Auswertung der Versuchsdaten, Herrn cand.-Ing. Markus Gillar und Herrn Jan Shure für die Mitwirkung bei der messtechnischen Erfassung. Darüber hinaus danken wir Herrn Dr. Dirk Orłowsky, Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen, für die Unterstützung im Rahmen besonderer messtechnischer Untersuchungen sowie Herrn Dr.-Ing. Ingo Spohr, Zerna Köpper & Partner Ingenieurgesellschaft für Bautechnik, Niederlassung Köln, für die anregende fachliche Diskussion.

Inhaltsverzeichnis

1	VERANLASSUNG UND ZIELSTELLUNG	1
2	STAND DER TECHNIK.....	1
3	ANALYSE ABGESCHLOSSENER BAUMAßNAHMEN	3
4	ENTWICKLUNG EINES MODIFIZIERTEN SCHEITELDRUCKVERSUCHS	5
5	VERSUCHSERGEBNISSE	8
6	EINFLUSS DER LINIENLAGERUNG.....	10
7	FAZIT	12
8	AUSBLICK.....	13
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	14

1 Veranlassung und Zielstellung

Eine Voraussetzung für die Entwicklung und den Erhalt der modernen Industriegesellschaft ist eine funktionsfähige Infrastruktur mit zuverlässigen Ver- und Entsorgungsnetzen. Mit Blick auf den Boden- und Gewässerschutz kommt dabei dem Zustand der Kanalisation eine herausragende Bedeutung zu. In der Vergangenheit zeigte sich beim Einsatz von Großrohren aus Stahlbeton allerdings, dass in einigen Fällen unmittelbar mit der Bauausführung oder wenige Jahre danach sogenannte "Anfangsschäden" in Form unerwartet großer Risse auftraten. Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf das beachtliche Investitionsvolumen beim Umbau des Emschersystems sah sich die Emschergenossenschaft zu weitergehenden Untersuchungen zum **Trag- und Rissverhalten von Großrohren aus Stahlbeton für die offene Bauweise** veranlasst. Der vorliegende Endbericht stellt die Ergebnisse des Vorhabens „Qualitäts- und Kostensicherung beim Bau begehbare Abwasserkanäle aus Stahlbetonrohren“ zusammen. Erstmalig sollten in einem modifizierten Scheiteldruckversuch realitätsnahe Belastungen aufgebracht werden, die zu dem für eingeedete Rohre typischen Rissverhalten führen. Dieses ist durch gleichzeitige Beanspruchung aus Momenten *und* Normalkräften geprägt, während die „klassischen“ Scheiteldruckversuche lediglich eine reine Momentenbeanspruchung im Prüfquerschnitt berücksichtigten. Darüber hinaus sollten Risiken aus der Bemessung und Rohrherstellung erkannt und gegebenenfalls besondere Qualitätsstandards für künftige Baumaßnahmen abgeleitet werden.

2 Stand der Technik

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es 137 Hersteller von Beton- bzw. Stahlbetonrohren für die Verlegung in offener oder geschlossener Bauweise (Stand 2002). An die produzierten Stahlbetonrohre werden u.a. Anforderungen hinsichtlich der Beschaffenheit, Maßhaltigkeit, Festigkeit, Wasserdichtheit und Beständigkeit gegen chemische Angriffe gestellt. Dabei ist neben den Ausgangsstoffen der Formgebungs- und Verdichtungsprozess maßgebend für die Qualität der Rohre [10]. Das Herstellungsverfahren und der Grad der Mechanisierung des Herstellungsprozesses kann sich von Rohrhersteller zu Rohrhersteller unterscheiden. Bei der Herstellung von Beton- und Stahlbetonrohren wird grundsätzlich zwischen Verfahren mit Sofortentschalung und Verfahren mit Erhärtung in der Schalung (Formerhärtung) unterschieden.

Hinsichtlich der Bemessung von Stahlbetonrohren ist von besonderer Bedeutung, dass entgegen der üblichen Praxis des Stahlbetonbaus bisher auf die Forderung einer Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite verzichtet wird (vgl. DIN 4035 [3]). Seit April 2003 gilt allerdings für die Bemessung von Rohren aus Stahlbeton mit einer Nennweite < DN 1750 auch die DIN EN 1916 [9]. Sie ersetzt spätestens ab Oktober 2004 die deutsche Norm DIN 4035 [3] und fordert auch für Rohre aus Stahlbeton der betrachteten Nennweite eine Mindestbewehrung. Rohre der Nennweite > DN 1750 werden bisher lediglich in der nationalen Vornorm DIN V 1201 [6] erfasst, so dass derzeit für großformatige Stahlbetonrohre noch keine verbindliche Regel zur Wahl einer Mindestbewehrung existiert.

Im Rahmen der Qualitätssicherung von Stahlbetonrohren wird bisher der „klassische“ Scheiteldruckversuch nach DIN 4035 [3] eingesetzt. Dieser geht auf ein Prüfverfahren zurück, dass vor mehr als 100 Jahren zur Prüfung von Betonrohren entwickelt wurde (vgl. *Abbildung 1*).

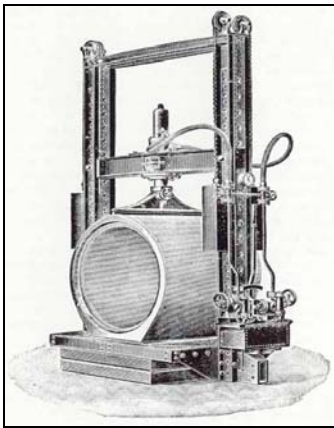


Abbildung 1:
Hydraulische Rohrprüfpresse
System „Koenen“ [4]

Ziel dieser Versuche war es ursprünglich, die Ringbiegezugfestigkeit eines Betonquerschnitts und somit das Tragverhalten des Betons zu untersuchen. Die rissverteilenden Eigenschaften des Werkstoffes Stahlbeton finden dabei grundsätzlich keine Berücksichtigung, so dass dieses Prüfverfahren für Stahlbetonrohre an seine Grenzen stößt. So ist insbesondere der für die Rissbildung im Versuch maßgebende Querschnittsbereich im Scheitel „normalkraftfrei“, obwohl das eingebettete Rohr stets auch unter Normalkrafteinfluss steht. In anderen Bereichen des unterirdischen Bauens, wie z.B. bei der Prüfung von stahlfaserbewehrten Tübbingungen, haben sich dagegen Versuche mit gleichzeitiger Momenten- und Normalkraft-Beanspruchung bewährt (vgl. [17]).

3 Analyse abgeschlossener Baumaßnahmen

Vor dem Hintergrund der o.a. Unsicherheiten in der Interpretation der Versuchsergebnisse und in der Wahl der Bewehrung wurden **Praxisbeispiele vergangener Baumaßnahmen** mit Blick auf die dort gewählten Bemessungsansätze untersucht.

Ziel der Analyse abgeschlossener Baumaßnahmen war es, zu überprüfen, inwieweit die bisherige Bemessung von Großrohren hinsichtlich des zu erwartenden Rissverhaltens der Rohre nennenswerte Risiken aufweist. Ggf. sollten erste Empfehlungen zur Risikominimierung bei zukünftigen Baumaßnahmen abgeleitet werden. Darüber hinaus waren charakteristische Randbedingungen für die im Rahmen des Projektes zu prüfenden Rohre auszuwählen. Zur Erfassung und Bewertung von Rissrisiken wurden beispielhaft Planungs- und Bemessungsunterlagen von 10 Baumaßnahmen in offener Bauweise hinsichtlich der Bemessung und Ausführung von Stahlbetonrohren großer Nennweiten analysiert. In die Betrachtung wurden dabei 33 Rohrquerschnitte verschiedener Lose einbezogen. Die Verteilung der betrachteten Nennweiten ist in *Abbildung 2* dargestellt.

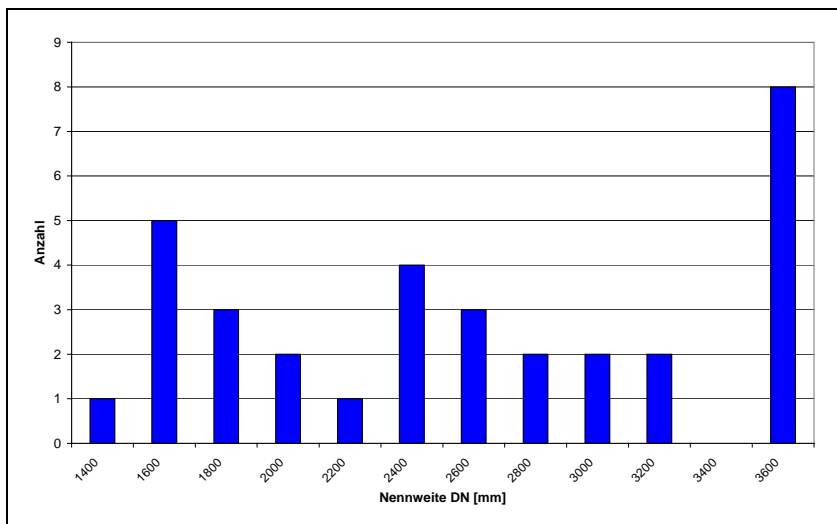


Abbildung 2:
Praxisbeispiele vergangener Baumaßnahmen, Verteilung der betrachteten Nennweiten

In sämtlichen Bemessungsfällen wurde – im Einklang mit der geltenden Richtlinie DIN 4035 [3] – auf den Nachweis einer Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite verzichtet. Dennoch zeigten Vergleichsrechnungen, dass die für die Baumaßnahmen gewählte innere Bewehrungslage aufgrund der Bemessungsbeanspruchung meist den Mindestbewehrungsgrad, wie er z.B. in der ÖNORM B 5071 [8] gefordert wird, überschritt. In 2 von 33 Fällen wurde eine deutliche Unterschreitung der Mindestbewehrung festgestellt. Die äußere Bewehrungslage war demgegenüber allerdings deutlich schwächer ausgebildet. Der Mindestbewehrungsgrad nach ÖNORM B 5071 [8] wurde hier in ca. der Hälfte der Fälle deutlich unterschritten. Ergänzend wurde für einige Baumaßnahmen auch die Mindestbewehrung nach DIN 1045 [2] ermittelt. Hier zeigten sich für die innere Bewehrungslage in vielen Fällen geringere als die geforderten Bewehrungsgrade. Für die äußere Bewehrungslage ergab sich sogar in allen betrachteten Fällen eine Unterschreitung des Mindestbewehrungsgrades, mit

Minderungen um bis zu 86 %. Berechnungen nach DIN V 1201 [6] bestätigten diese Beobachtungen.

Offen bleibt, in welchem Maße das Risiko für die Entstehung großer Risse durch Verzicht auf eine Mindestbewehrung tatsächlich erhöht wird. Es liegt aber bereits vor dem o.a. Hintergrund nahe, den Mindestbewehrungsgrad mindestens entsprechend der Vorgaben der ÖNORM B 5071 [8] oder der DIN V 1201 [6] festzulegen. Insbesondere an der Rohraußen-seite ist sonst von einer erheblichen Unsicherheit bei der Rissbreitenentwicklung auszugehen, da die derzeitigen Bewehrungsgrade der untersuchten Baumaßnahmen die ÖNORM-Vorgabe in einigen Fälle beträchtlich unterschreiten und dann eine Rissbreitenbeschränkung aufgrund der verbleibenden Bewehrungsanteile kaum noch zu erwarten ist. In der Konsequenz müsste bei der Hälfte der betrachteten Rohre der Bewehrungsgrad der äußeren Bewehrung um den Faktor 2 – 3 erhöht werden. Dies erscheint um so mehr vertretbar, als es sich um ohnehin geringe absolute Bewehrungsstahlmengen handelt und somit von vernachlässigbaren Mehrkosten bei der Rohrherstellung ausgegangen werden kann.

Die Analyse der abgeschlossenen Baumaßnahmen mit Großrohren zeigte darüber hinaus, dass in der Regel keine Angaben zu den tatsächlichen Bedingungen bei der Bauausführung mehr vorlagen. Um u.a. den Forderungen gemäß ATV-DVWK – A 139 [11] nach Sicherstellung der Lastannahmen nachzukommen, empfiehlt sich die Vorgabe von Qualitätsstandards für die Dokumentation der Bauausführung. Besonders sollte dabei auf die Faktoren eingegangen werden, welche die in der statischen Berechnung angesetzten Lastannahmen maßgeblich beeinflussen.

Abschließend seien zwei besondere Einzelfälle erwähnt, die die Bandbreite der bei den untersuchten Baumaßnahmen angesetzten Sicherheiten widerspiegelt:

- Die Vergleichsrechnungen für eine Baumaßnahme haben gezeigt, dass hier selbst ein unbewehrtes Betonrohr mit einer geringeren Wanddicke als das ausgeführte Stahlbetonrohr die statischen Erfordernisse erfüllt hätte.
- Die Betrachtung einer anderen Baumaßnahme zeigte, dass hier die Bemessungsspielräume vollständig ausgenutzt wurden und so bereits eine geringe Abweichung von den geplanten Baustellenrandbedingungen zu einer Überschreitung der zulässigen Rohr-Vergleichsspannung hätte führen können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für die Mehrzahl der betrachteten Baumaßnahmen die Rohre entsprechend den a.a.R.d.T. bemessen wurden und daher ein aus statischer Sicht tragfähiges Bauwerk zu erwarten ist. Voraussetzung ist dabei allerdings, dass die bei der Bemessung angesetzten Randbedingungen auch auf der Baustelle umgesetzt wurden. In zahlreichen Fällen wurden jedoch die im Stahlbetonbau sonst üblichen Mindestbewehrungsgrade deutlich unterschritten. Von entsprechenden Risiken in der Rissbreitenentwicklung ist auszugehen.

4 Entwicklung eines modifizierten Scheiteldruckversuchs

In der Folge sollte das Rissverhalten von Stahlbetonrohren unter Beanspruchungen untersucht werden, wie sie auch bei erdüberdeckten Rohren tatsächlich auftreten. Hierzu wurde eine **neuartiges Prüfverfahren zur Simulation realitätsnaher Beanspruchungen** entwickelt, das auf den Erfahrungen aus dem "klassischen" Scheiteldruckversuch aufbaut.

Der klassische Scheiteldruckversuch nach DIN 4035 [3] basiert auf einer Prüfung, die ursprünglich zur Tragfähigkeitsuntersuchung an Rohren aus Beton konzipiert wurde. Geprüft wird unter welchen Randfaserspannungen ein Riss im Betongefüge entsteht und wie sich die Breite dieses Risses bei Steigerung der Beanspruchungen entwickelt. Das besondere Trag- und Rissverhalten von Stahlbeton findet dabei keine Berücksichtigung. So werden die Wechselwirkungen zwischen Stahl- und Betonbeanspruchung (Verbund) ebensowenig berücksichtigt wie der Einfluss des Normalkraft-/Momentenverhältnisses auf die Rissentwicklung.

Bereits im Rahmen der Vorstudie [1] wurde festgestellt, dass durch Wahl einer modifizierten Versuchsanordnung die Spannungsverteilung in der Rohrwandung maßgeblich beeinflusst und auf die tatsächlichen Beanspruchungsbedingungen abgestimmt werden kann. Im Rahmen der weiteren Verfolgung der Thematik (vgl. [5]) wurde der in *Abbildung 3* dargestellte grundsätzliche Versuchsaufbau als „modifizierter Scheiteldruckversuch“ vorgeschlagen. Durch die Einleitung von Horizontalkräften im Bereich des Kämpfers wächst insbesondere der Normalkraftanteil im Rohrscheitel, so dass dieser maßgebliche Prüfquerschnitt realitätsnahe Beanspruchungen erfahren kann.

Offen blieb in diesem Zusammenhang allerdings, wie die Belastungsverhältnisse aus Vertikal- und Horizontalkraft im Einzelfall zur wirklichkeitsnahen Versuchsdurchführung zu ermitteln sind und wie die Versuchseinrichtung zu konstruieren und messtechnisch auszurüsten ist. Die für die Auswertung maßgebenden Rissbereiche wurden vor Konstruktion und Bau der Versuchseinrichtung anhand von Finite-Element Berechnungen abgeschätzt, so dass die gesamte Versuchsgestaltung und insbesondere die Anordnung der Messtechnik auf das spätere Rissverhalten ausgerichtet werden konnte.

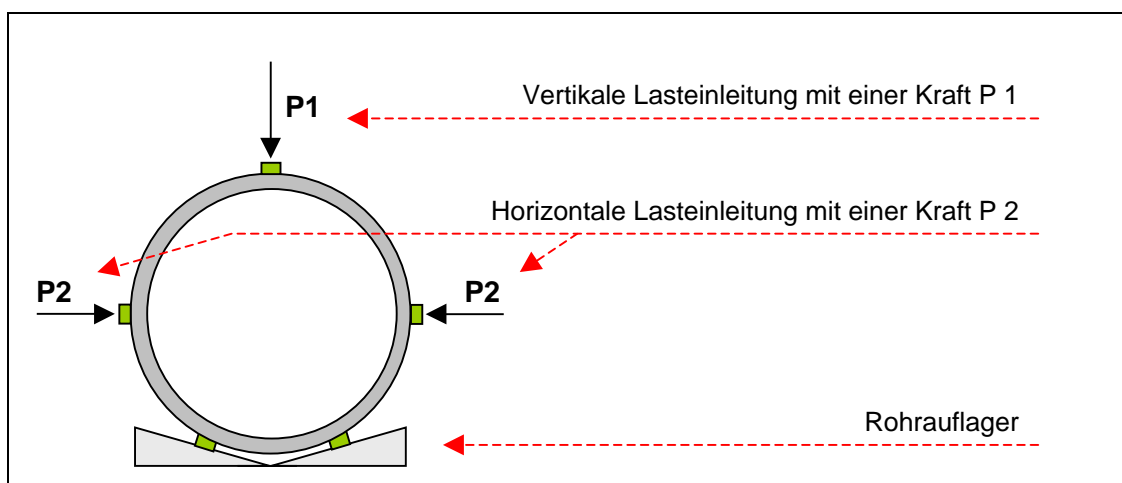


Abbildung 3:
Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Lasteinleitung

Die eigentlichen Versuchsparmeter werden grundsätzlich in Anlehnung an den jeweils zu untersuchenden, konkreten Bemessungsfall festgelegt. Im Versuch werden so die tatsächlich zu erwartenden Beanspruchungen im betrachteten Messquerschnitt erzeugt. Beispielhaft wurde im Rahmen des Vorhabens das Seitendruckverhältnis $\beta = P_2/P_1$ so gewählt, dass der in *Abbildung 4* dargestellte Beanspruchungszustand versuchstechnisch nachempfunden wurde.

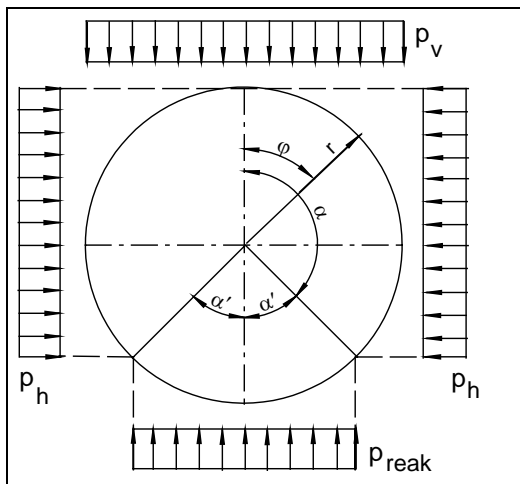


Abbildung 4:
In-situ-Belastung, Beispiel [7]

Grundsätzlich wird das dem In-situ-Lastfall entsprechende Verhältnis β aus Vertikalkraft und horizontaler Stützkraft sowie die maßgebende Scheiteldruckkraft wie folgt ermittelt:

1. Bestimmung der maximalen Exzentrizität für die In-situ-Beanspruchung:

Die In-situ-Beanspruchung (N/M-Verteilung) ergibt sich aus den im Einbaufall vorliegenden Belastungsverhältnissen, z.B. durch Schnittgrößenberechnungen am Kreisringmodell. Für diese In-situ-Beanspruchung wird die Exzentrizität ($e = M/N$) in Abhängigkeit des Umfangswinkels berechnet. Maßgebend ist der maximale Betrag der Exzentrizität über den Rohrumfang.

2. Ermittlung des Belastungsverhältnisses β :

Das Belastungsverhältnis β im Scheiteldruckversuch gibt das Verhältnis zwischen horizontaler Stützkraft und vertikaler Scheiteldruckkraft an. Für den Lastfall „Scheiteldruckversuch“ wird das Belastungsverhältnis β so gewählt, dass die maximale Exzentrizität im Versuch dem maximalen Wert unter In-situ-Beanspruchung entspricht. Im Falle einer Innenrissbetrachtung liegt der maßgebliche Querschnittsbereich im Scheitel, bei einer Außenrissbetrachtung im Kämpferbereich. Die *Abbildung 5* zeigt beispielhaft die Exzentrizitätsverteilung für eine beliebig gewählte In-situ-Beanspruchung und die Exzentrizitätsverteilung für den gewählten β -Wert im Scheiteldruckversuch mit seitlicher Stützung bei Innenrissbetrachtung. Die Exzentrizität bei 0° im Scheiteldruckversuch entspricht in diesem Fall dem 180° -Wert in-situ (Sohle maßgebend). Die Exzentrizität der äußeren Rissbereiche wird aufgrund des stets großen Normalkraftanteils im Kämpferbereich weniger stark durch die Wahl der Stützkraft beeinflusst.

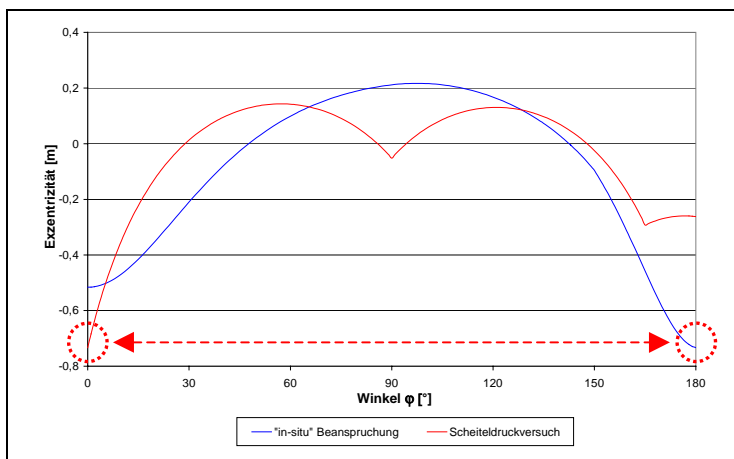


Abbildung 5:
Bestimmung des Belastungsverhältnisses β

3. Bestimmung der maßgebenden Spannungsgröße aus In-situ-Beanspruchung:

Maßgebend ist die maximale Zugspannung an der Rohrrinnen- bzw. Rohraußenseite.

4. Ermittlung der maßgebenden Scheiteldruckkraft:

Die Größe der Scheiteldruckkraft, mit der eine den tatsächlichen Belastungen entsprechende Beanspruchung im Versuch erzeugt werden kann, wird für den gewählten β -Wert nach 2. und das Spannungsniveau nach 3. ermittelt. Die *Abbildung 6* zeigt beispielhaft die Spannungsverteilung für eine In-situ-Beanspruchung und für den Scheiteldruckversuch mit seitlicher Stützung bei maßgebender Scheiteldruckkraft. Die Spannungen bei 0° (Versuch) und 180° (In-situ) entsprechen einander.

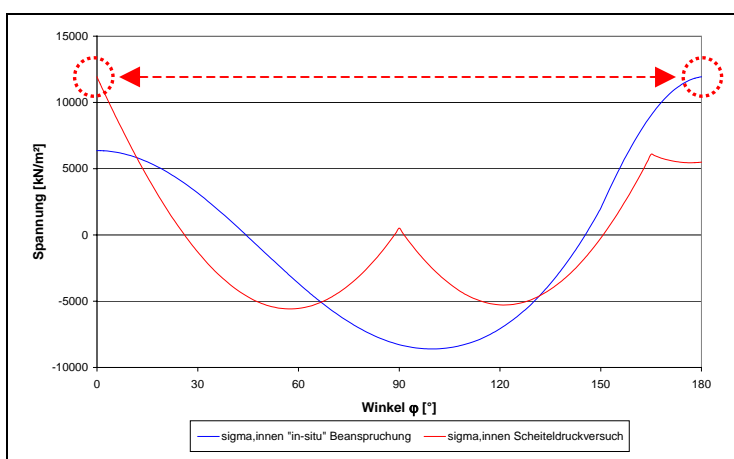


Abbildung 6:
Abstimmung der Spannungsgrößen in den maßgeblichen Querschnitten

Im Ergebnis entspricht das Rissverhalten des Stahlbetons im maßgebenden Versuchsquerschnitt dem Verhalten unter Bemessungslast. Für die Praxis bedeutet dies, dass erstmalig ein unmittelbarer Vergleich der gelieferten Rohrqualität mit den unter Betriebsbedingungen

geforderten Leistungen möglich ist. Darüber hinaus ist auch eine quasi-zerstörungsfreie Prüfung denkbar, wenn lediglich die Rissbreite bei Rissbeginn untersucht werden soll. So könnten bereits geprüfte Rohre für den weiteren In-situ-Einsatz zugelassen werden, wenn nach Überschreiten der Erstrisslast lediglich „Haarrisse“ im Beton auftreten und auf eine weitere Laststeigerung im Versuch verzichtet wird.

5 Versuchsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden **insgesamt 30 Versuche an Rohren unterschiedlicher Bewehrung und Herstellungsverfahren** durchgeführt, um einerseits den Versuchsablauf zu optimieren und andererseits das Messprogramm auf die Qualitätssicherungsanforderungen der Praxis auszurichten. Geprüft wurden im Wesentlichen Rohre, die

- sofort entschalt,
- in der Schalung erhärtet (Formerhärtung) bzw.
- in der Schalung erhärtet (Formerhärtung) mit Betonnachbehandlung

produziert worden waren. Für Rohre mit Nennweiten > DN 2000 stellt die Formerhärtung die im Betrachtungsbereich der Emschergenossenschaft übliche Fertigungsvariante dar (siehe [15]). Sämtliche Rohrhersteller, die über Produktionskapazitäten für diesen Nennweitenbereich verfügen, bieten eine Erhärtung in der Schalung (Formerhärtung) an. Sämtliche nach [15] befragten Hersteller, die über eine bedeutende Großrohr-Produktion verfügen (> 33 %), haben ihre Produktion ausdrücklich auf die Formerhärtung ausgelegt.

Durch die Prüfung von Rohren aus unterschiedlichen Fertigungsverfahren sollten erste Aussagen zum qualitativen Rissverhalten, d.h. hinsichtlich der Rissverläufe bzw. Rissentwicklung unter Last, gewonnen werden. Statistisch auswertbare Aussagen zum Verhältnis der absoluten Rissbreiten an Rohren aus unterschiedlichen Fertigungsverfahren waren aufgrund der üblicherweise großen Streuungen (vgl. [14]) für den gewählten Stichprobenumfang nicht zu erwarten. Auch wurden nur Stahlbetonrohre eines einzigen Herstellers eingesetzt, so dass eine quantitative Übertragung auf andere Hersteller oder sogar Produktionsabläufe nicht möglich ist.

Im Vordergrund der Untersuchung standen somit die lastabhängige Aufnahme der Rissentwicklung und die vergleichende Interpretation der charakteristischen Rissverläufe. Dies forderte allerdings einen besonderen Aufwand hinsichtlich

- der Konstruktion der Versuchseinrichtung zur lastabhängigen seitlichen Stützung des Rohres,
- der Erkennung des Rissbeginns im maßgebenden Riss, z.B. durch Applikation zahlreicher DMS,
- der Aufnahme der Rissbreitenentwicklung im maßgebenden Riss, z.B. durch Einsatz eines Video-Extensometers.

Die innere Bewehrungslage entsprach in allen Fällen den Vorgaben der DIN 4035 [3], d.h. es werden die Schnittgrößen unter Traglast aufgenommen und es wird auf eine Mindestbewehrung (vgl. DIN 1045 [18]) verzichtet. Die Bewehrung an der Rohraußenseite wurde in drei Bewehrungstypen mit wachsendem Bewehrungsgrad ausgeführt: I Bemessung nach DIN 4035 [3]; II Bewehrungsgrad entsprechend Innenbewehrung; III Mindestbewehrung nach DIN 1045 [2] zur Beschränkung der Rissbreite $w \leq 0,2$ mm. Alle Rohre wurden in einem modifizierten Versuchsaufbau mit horizontaler Stützung auf Basis des Scheiteldruckversuches nach DIN EN 1916 [9] bzw. DIN V 1201 [6] geprüft. Einige Rohre wurden nach dieser Prü-

fung und einer Vierteldrehung auch einer klassischen Scheiteldruckprüfung ohne seitliche Stützung unterzogen.

Aus den Versuchen lassen sich die folgenden **wesentlichen Beobachtungen** festhalten:

- Erwartungsgemäß öffneten sich die Risse bei einer Versuchsdurchführung mit seitlicher Stützung, d.h. unter Momenten- *und* Normalkrafteinfluss, unter Laststeigerung langsamer als bei einer Versuchsdurchführung nach DIN 1916 [9] bzw. DIN V 1201 [6] ohne seitliche Stützung. Die *Abbildung 7* stellt beispielhaft die gemessenen Rissbreitenentwicklungen aus Versuchen mit sowie ohne seitliche Stützung bis zu einer Rissbreite von 0,3 mm einander gegenüber.

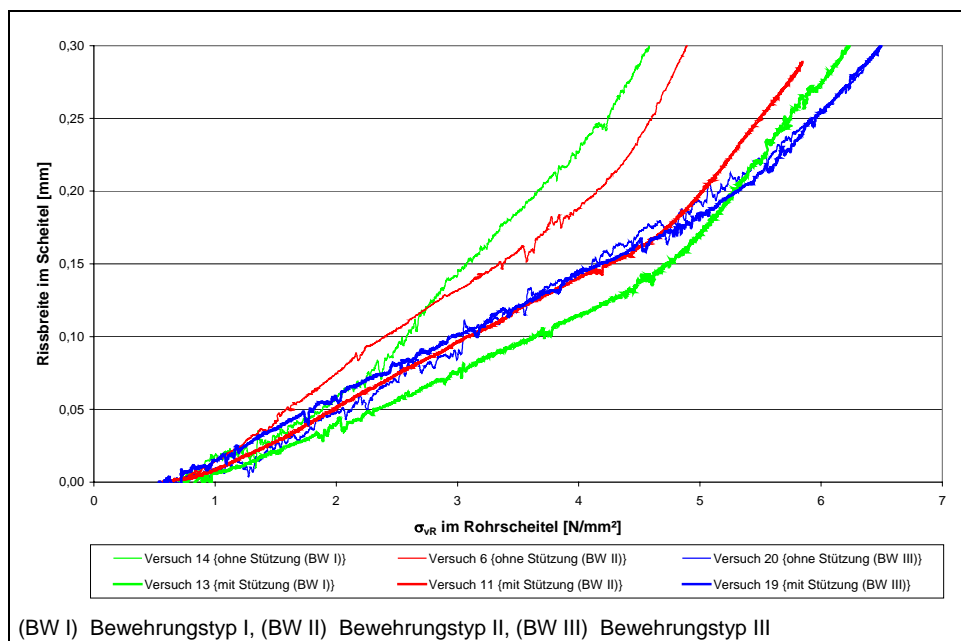


Abbildung 7:

Rissentwicklung bei Versuchen mit in der Schalung erhärteten Rohren

- Im Rohrscheitel entstehen unter Laststeigerung Risse an der Rohrinneenseite, die sich kontinuierlich öffnen. Eine Beschränkung auf Einzelrisse trat bei allen Versuchen ohne seitliche Stützung auf sowie i.d.R. bei Rohren mit Betonnachbehandlung unter seitlicher Stützung. Rohre ohne Betonnachbehandlung zeigten mit seitlicher Stützung nacheinander zwei bis drei parallele Risse. Dieses von Biegemomenten und Normalkräften dominierte Beanspruchungs- und Rissverhalten orientiert sich an den tatsächlichen Beanspruchungen beim Einbau vor Ort und verbessert die Aussagekraft der Rissbreitenbewertung deutlich, im Vergleich zu einer reinen Biegemomentenbeanspruchung im Scheiteldruckversuch nach DIN 1916 [9] bzw. DIN V 1201 [6].
- Die Rohre des Herstellungstyps mit Betonnachbehandlung zeigten bei vergleichbaren Laststufen geringere Rissbreiten als die Rohre des Herstellungstyps ohne Betonnachbehandlung. Bei geringen Bewehrungsgraden konnte es so in einigen Fällen, ausgehend von zunächst geringen Rissbreiten, unter Laststeigerung zu einem vergleichsweise spröden Versagen kommen (siehe *Abbildung 8a-c*). Ein solches Verhalten stellt die bisherige Philosophie der Schadensbewertung nach ATV M 149 [12] in Frage. Demnach wird allein

auf Basis der Rissbreite eines Stahlbetonrohres die maßgebliche Schadensklasse bestimmt, d.h. unabhängig vom Herstellverfahren und Bewehrungsgrad.



Abbildung 8a - c:
Prüfung eines Rohres bis zum Versagensfall

- Sowohl die Wahl einer Mindestbewehrung als auch die Verbesserung des Verbundverhaltens durch Beton-Nachbehandlung können zu einer Verminderung der Rissbreitenentwicklung führen. Allerdings lässt sich ein geringer Bewehrungsgrad nicht durch eine verbesserte Nachbehandlung ausgleichen, da dieser auch zu einer Minderung der Traglast führt und die Nachbehandlung lediglich das Verbundverhalten und damit die Rissbreitenentwicklung beeinflusst.

Neben den o.a. zentralen Erkenntnissen bezüglich der Versuchsdurchführung, Rissentstehung und Rissentwicklung konnten auch **ergänzende Schlussfolgerungen** aus weiteren Versuchsbeobachtungen gezogen werden:

- Je nach Fertigungsverfahren zeigten sich Unterschiede in der Maßhaltigkeit und der Oberflächenstruktur der Rohre. Die in der Schalung erhärteten Rohre zeigten hier deutlich bessere Eigenschaften als die sofort entschalteten Rohre.
- Als mögliche Schwachstelle erwies sich in einzelnen Fällen die Ausführung des Transportankersystems. Ggf. ist zu hinterfragen, inwieweit hierdurch der Korrosionsschutz der Bewehrung bzw. die Dichtheit der Rohre beeinträchtigt wird.
- Neben der Video-Messtechnik zur Risserkennung und -verfolgung wurde ein Ultraschall-Messverfahren eingesetzt, um die Möglichkeit einer Risstiefenbestimmung zu untersuchen. Aussagekräftige Ergebnisse lassen sich allerdings nur bei sehr engem Messraster mit entsprechend hohem Messaufwand erzielen. Außenrisse konnten aus dem Rohrinne unter den gegebenen Randbedingungen weder erkannt noch vermessen werden.

6 Einfluss der Linienlagerung

Die Standsicherheit eines Abwasserkanals aus Stahlbetonrohren hängt aufgrund der großen Nennweite darüber hinaus auch in besonderem Maße von der Einbettung und der Ausführung des Auflagers ab. Allerdings müssen bei Ansatz eines großen Auflagerwinkels erhebliche Anforderungen an die Bauausführung und -überwachung gestellt werden, da Abweichungen zu einer unmittelbaren Abminderung der Sicherheiten führen können. Es stellte sich daher die Frage, ob eine Bemessung der Rohre für den denkbar ungünstigsten Fall der Bauausführung, d.h. eine **Linienlagerung**, diese Risiken in wirtschaftlich sinnvoller Weise reduzieren kann. Die folgenden wesentlichen Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

Beispielberechnungen unterstreichen, dass die Umsetzung der derzeitigen Bemessungsphilosophie nach DIN 4035 [3], d.h. Gebrauchslastnachweis in Zustand I (ungerissen) und

Traglastnachweis in Zustand II (gerissen), mit bedeutenden wirtschaftlichen Konsequenzen verbunden sein kann. Der Nachweis nach Zustand I führt de facto zu einer Betonrohr-Bemessung des Stahlbetonrohres unter Gebrauchslast und damit zu großen Wanddicken unter den für Linienlasten typischerweise hohen Biegemomentenbeanspruchungen. Aufgrund der daraus abzuleitenden Auswirkungen auf das Rohrgewicht und damit den Rohrtransport scheint eine Bemessung für den Lastfall Linienlagerung in Anlehnung an DIN 4035 [3] wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Eine unverhältnismäßige Vergrößerung der Wanddicke bei höherer Beanspruchung kann nur dann vermieden werden, wenn die derzeit geltende Bemessungsphilosophie, d.h. die Forderung nach einem unter Gebrauchslast ungerissenen Rohr, fallengelassen wird und die Gebrauchslast im Zustand II aufgenommen werden kann. Eine Bemessung ähnlich der bei WU-Beton, ggf. unter Vorgabe von Abdichtungsmaßnahmen nach Einbau, könnten hier eine Alternative darstellen.

7 Fazit

Für die **Praxis** lässt sich aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens das folgende **Fazit** ziehen:

- Im „klassischen“ Scheiteldruckversuch wird die Rissentwicklung im Scheitel aufgrund fehlender Normalkrafteinflüsse überschätzt. In der Folge stehen einwandfrei produzierte Rohre zunächst im Verdacht einer übermäßigen Rissbildung. Umgekehrt können Rohre mit schlechten Verbundeigenschaften durch Hinweis auf die nicht praxisnahen Prüfbedingungen „schön geredet“ werden, frei nach dem Motto „draußen treten solche Belastungen und damit auch solche Rissbilder gar nicht auf“.
- Der neue modifizierte Scheiteldruckversuch gestattet die Prüfung des *Riss*verhaltens von Stahlbetonrohren unter realitätsnahen Beanspruchungen, d.h. Momenten- *und* Normalkraftbeanspruchung, so dass ein Rohr unter tatsächlichen Bemessungsbedingungen geprüft werden kann. Neben der Betonfestigkeit kann damit auch die Rissentwicklung und das Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton praxisnah bewertet werden.
- Weichen die gewählten Bemessungsbedingungen, z.B. Betondeckung und Abstand der Bewehrungslagen, erheblich von den üblichen Ansätzen des Stahlbetons ab, so dass die Anwendbarkeit der heute verbreiteten Bemessungsansätze anzuzweifeln ist, könnten ergänzende Prüfungen im modifizierten Scheiteldruckversuch zusätzliche Sicherheit bieten.
- Bestehen auf der Baustelle andere Randbedingungen als in der statischen Berechnung angesetzt wurden, z.B. hinsichtlich Grabenbreite, -form, und -tiefe sowie Einbau- und Überschüttungsbedingungen, so ist ein neuer statischer Nachweis zu erbringen. Sollen bereits produzierte und ursprünglich für einen anderen Lastfall bemessene Rohre eingesetzt werden, könnten stichprobenartige Belastungsprüfung im modifizierten Scheiteldruckversuch weitere Sicherheit bieten, da das tatsächliche Rissverhalten der Rohre unter den neuen Bemessungsbedingungen überprüft werden kann.
- Im Rahmen der Inspektion können Risse an der Rohraußenseite mit vertretbaren Mitteln nicht erkannt werden, so dass für diese Bewehrungslage insbesondere bei aggressivem Grundwassereinfluss eine Mindestbewehrung in jedem Falle zu empfehlen ist.
- Die in der Schalung erhärteten Rohre mit Beton-Nachbehandlung zeigten auch unter großen Beanspruchungen nur sehr geringe Rissbreiten.
- Eine Anwendung der Schadensklassifizierung nach ATV - M 149 [12] scheint insbesondere für in der Schalung erhärtete Rohre mit Beton-Nachbehandlung wenig aussagekräftig, da diese Rohre auch unter großen Lasten geringe Rissbreiten aufweisen können.

8 Ausblick

Vor dem Hintergrund der im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Erkenntnisse lassen sich auch zahlreiche noch offene Fragestellungen identifizieren. Als **Ausblick** auf zukünftige Forschungs- und Prüfkaktivitäten sind in diesem Zusammenhang die folgenden Punkte zu nennen:

- Die Beanspruchungen im modifizierten Scheiteldruckversuch wurden in der hier dargestellten Untersuchung im Wesentlichen auf den für den Erstriss maßgebenden inneren Scheitel- bzw. Sohlbereich ausgelegt. Im Zuge einer Untersuchung der Außenrisse böte sich auch die Wahl der Stützkraft in Abhängigkeit der unter In-situ-Bedingungen auftretenden Außenrissneigung an.
- Grundsätzlich bietet sich die Entwicklung eines ganzheitlichen Prüfprogramms zur Simulation der gesamten statischen Belastungsgeschichte eines Rohres (Transport, Bauzustand, Betrieb) für den modifizierten Scheiteldruckversuch an.
- Ergänzende Prüfungen an ausgebauten Rohren, z.B. im Zuge von Erneuerungsmaßnahmen, könnten Aussagen zum Tragverhalten vorgeschädigter bzw. korrodierter Rohre geben.
- Beanspruchungen von Stahlbetonrohren unterliegen möglicherweise zahlreichen Wechselwirkungen und damit entsprechend komplexen Schädigungsmechanismen. So können sich dynamische Lasten, bio-chemische Prozesse und daraus folgende Änderungen der Tragstruktur gegenseitig beeinflussen oder sogar beschleunigen. Insbesondere mit Blick auf schwierige Bauzustände, Grundwassereinflüsse und die vielfältigen Abwasserinhaltsstoffe können hier im Einzelfall weiterführende Untersuchungen von Interesse sein. Ähnlich dem Vorgehen in [16] böten sich Aufgrabungen an Stahlbetonrohren mit Innenrissen nach mehrjähriger Betriebsdauer an, um insbesondere das Rissverhalten an der Außenseite unter Betriebsbedingungen besser zu verstehen und das Risiko von Außenrissen auf der Basis der bereits bekannten Innenrisse abzuschätzen.
- Um eine bessere Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften des Stahlbetons im Kanalbau zu ermöglichen, könnten neue Bemessungsregeln für den Gebrauchslastnachweis entwickelt werden, die sich zum Beispiel an den Erfahrungen aus dem Umgang mit WU-Beton orientieren.
- Die Fortschreibung der Versuchsdokumentation im Rahmen der stichprobenhaften Qualitätssicherung künftiger Baumaßnahmen kann weitere Erkenntnisse hinsichtlich der herstellungsbedingten Qualitätseinflüsse liefern. Auch ließe sich durch Prüfung von Produktmustern (Musterrohre) die maximale Lieferqualität eines bestimmten Rohrherstellers ermitteln.

Künftige IKT-Untersuchungen setzen hier – in enger Kooperation mit interessierten Netzbetreibern - an.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Bosseler, B.; Redmann, A.: Kosteneinsparung beim Bau begehrbarer Abwasserkanäle durch Optimierung des Bauverfahrens unter besonderer Betrachtung von Auflager und Einbettung, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen 2000.
- [2] DIN 1045-1, Ausgabe:1988-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- [3] DIN 4035, Ausgabe: 1995-08: Stahlbetonrohre, Stahlbetondruckrohre und zugehörige Formstücke aus Stahlbeton; Maße, Technische Lieferbedingungen.
- [4] Handbuch für Rohre aus Beton, Stahlbeton, Spannbeton hrsg. Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V., Bauverlag Wiesbaden 1978.
- [5] Forschungsantrag zum Projekt: „Qualitäts- und Kostensicherung beim Bau begehrbarer Abwasserkanäle aus Stahlbetonrohren“ IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen 2001.
- [6] DIN V 1201, Ausgabe: 2003-04: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton für Abwasserleitungen und –kanäle, Typ 1 und Typ 2 Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität.
- [7] Hornung, K.; Kittel, D.: Statik erdüberdeckter Rohre. Bauverlag GmbH. Wiesbaden und Berlin 1989.
- [8] ÖNORM B 5071, Ausgabe: 1995-08: Stahlbetonrohre, Stahlbetondruckrohre und zugehörige Formstücke aus Stahlbeton Anforderungen, Prüfung und Gütesicherung.
- [9] DIN EN 1916, Ausgabe: 2003-04: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton.
- [10] Schwabe, J.-H.: Schwingungstechnische Auslegung von Betonrohrfertigern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz, 04/2002.
- [11] Regelwerk der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. (ATV-DVWK), Arbeitsblatt A 139: Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen - Ergänzungen und Hinweise zu DIN EN 1610, Juni 2001.
- [12] Regelwerk der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. (ATV-DVWK), Merkblatt M 149: Zustandserfassung, -klassifizierung und –bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, April 1999.
- [13] Kanalzustandsreferenzkatalog nach ATV-Merkblatt M 143, Teil 2, Anlage 2, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz der Landes NRW, September 1994.
- [14] Schießl, P.: Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rissbreite; Erläuterung zur DIN 1045. Heft 400 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1989.
- [15] Markterhebung Stahlbetonrohre, IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur

- im Auftrag von Emschergenossenschaft/Lippeverband, unveröffentlicht, 2003.
- [16] Bosseler, B.; Schlüter M.: Qualitätseinflüsse Schlauchliner – Stichproben-Untersuchungen an sanierten Abwasserkanälen, IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen 2003.
- [17] Maidl, B.: M-N-Qualitätsprüfung für Stahlfaserbeton im Tunnelbau, Bautechnik 70 (1993), Heft 8.
- [18] DIN 1045-1, Ausgabe: 2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion.