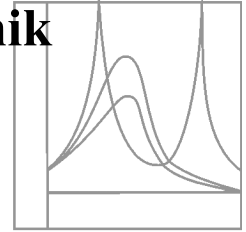
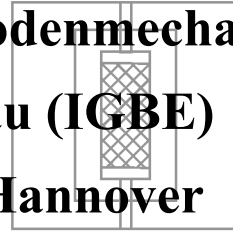
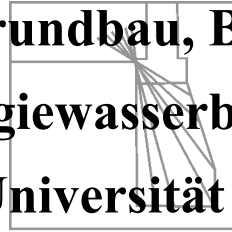
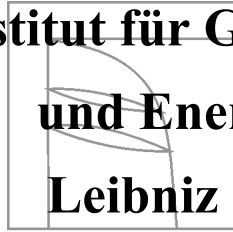
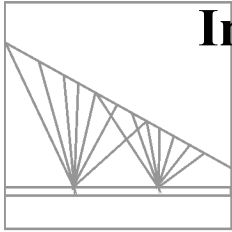
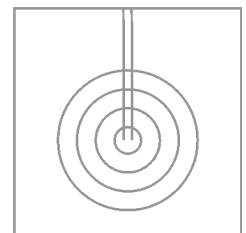
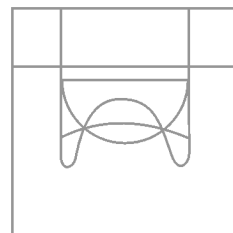
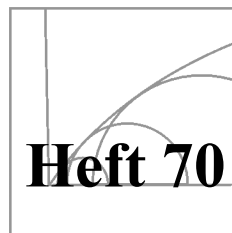
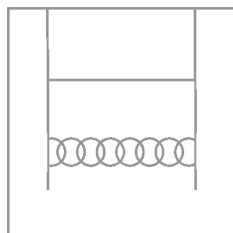
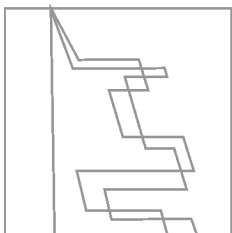


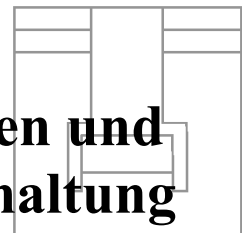
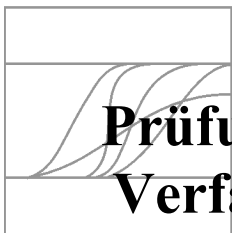
# MITTEILUNGEN



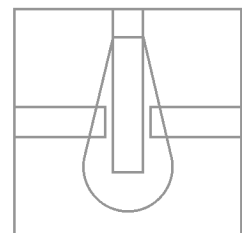
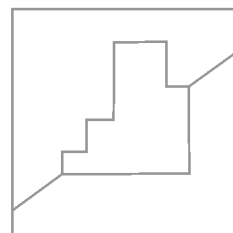
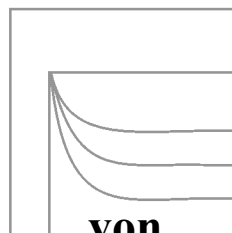
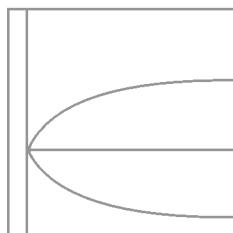
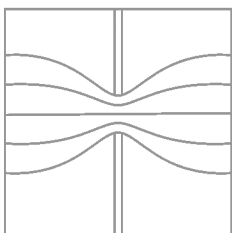
Institut für Grundbau, Bodenmechanik  
und Energiewasserbau (IGBE)  
Leibniz Universität Hannover



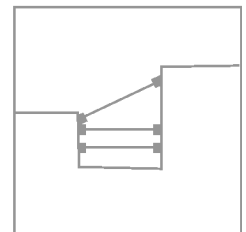
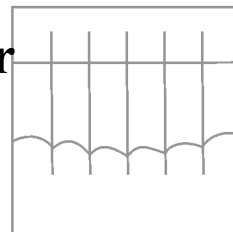
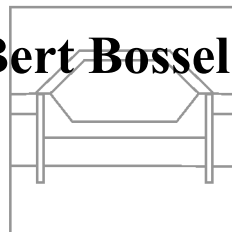
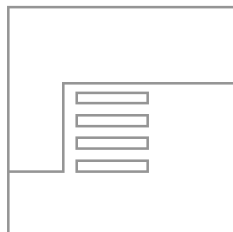
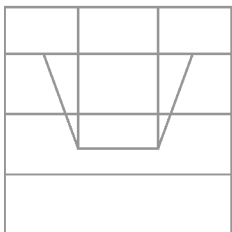
Heft 70



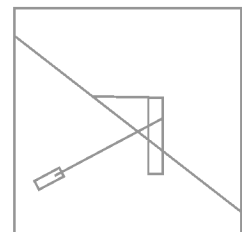
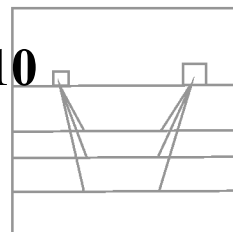
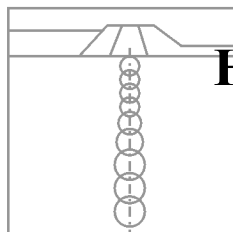
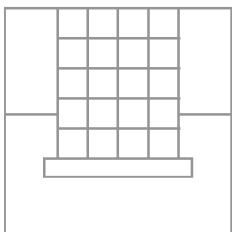
Prüfung und Bewertung von Produkten und  
Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung  
unterirdischer Kanäle und Leitungen



von



Bert Bosseler



Hannover 2010



# **MITTEILUNGEN**

**Institut für Grundbau, Bodenmechanik  
und Energiewasserbau (IGBE)  
Leibniz Universität Hannover**

**Heft 70**

**Prüfung und Bewertung von Produkten  
und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung  
unterirdischer Kanäle und Leitungen**

**von**

**Bert Bosseler**

**Hannover 2010**

Die vorliegende Arbeit wurde als Habilitationsschrift von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover zur Erlangung der  
VENIA LEGENDI für das Fachgebiet „Unterirdischer Kanal- und Leitungsbau“  
angenommen.

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong  
Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes

Tag der Habilitation: 23.06.2010



## **Vorwort des Herausgebers**

Kanal- und Leitungsnetze sind wichtige Bestandteile unserer unterirdischen Infrastruktur. Vielfältige Wechselwirkungen in Rohr-Boden-Systemen werfen anspruchsvolle geotechnische Fragen auf, die schon in den 1970er Jahren und in jüngerer Zeit vor allem mit dem Schwerpunkt auf der Wechselwirkung von Fernwärmeleitungen mit dem umgebenden Boden am IGBE in zahlreichen Forschungsprojekten und Studien untersucht wurden.

Darüber hinaus sind verfahrenstechnische und wasserwirtschaftliche Aspekte bei Planung, Bau, Betrieb und Sanierung unterirdischer Kanäle und Leitungen zu berücksichtigen. Die große Bandbreite der technischen Entwicklungen führt dazu, dass der unterirdische Kanal- und Leitungsbau mittlerweile als eigenständiges Fachgebiet der Ingenieurwissenschaften verstanden werden kann.

Vor diesem Hintergrund wurde Herrn Dr. Bosseler zum Wintersemester 2006/2007 durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Lehrauftrag „Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung“ am IGBE erteilt. Damit wird das Lehrangebot der Fakultät im Bereich Bauingenieurwesen in wichtiger und hervorragender Weise ergänzt.

Aufbauend auf seinen Arbeiten und umfassenden Erfahrungen als Wissenschaftlicher Leiter am IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, hat Herr Dr. Bosseler seine Habilitationsschrift zu dem Thema Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren im Bereich des unterirdischen Leitungsbaus erarbeitet, welche mit diesem Heft vorgelegt wird. Es gelingt ihm, die für eine belastbare und transparente vergleichende Bewertung unterschiedlicher Produkte bzw. Verfahren notwendigen Prozesse und Kompetenzen herauszuarbeiten und darauf aufbauend eine Systematik zu entwickeln, mit der Prüfungs- und Bewertungskonzepte validiert und gleichzeitig auch Entwicklungsperspektiven identifiziert werden können. Der Nutzen des neu entwickelten systematischen Beschreibungsansatzes wird anhand der Analyse bestehender Prüfkonzepte eindrucksvoll belegt.

M. Achmus

## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Habilitationsschrift gründet auf Erkenntnissen, die ich als Wissenschaftlicher Leiter am IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen und seit Oktober 2006 auch als Lehrbeauftragter für Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Leibniz Universität Hannover gewinnen durfte. Ihr Ziel ist es, den unterschiedlichen Vorgehensweisen in Produkt- und Verfahrensprüfungen sowie deren Bewertung einen systematischen Gesamtzusammenhang zu geben. Dies führte mich u.a. zu der kritischen Frage, welche Bewertungsdimensionen überhaupt denkbar und wie kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse zu verstehen sind - mit der Einsicht, gerade die Beantwortung dieser Fragen nicht vollständig anderen Disziplinen zu überlassen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Achmus für seine Bereitschaft, mich als Habilitanden am IGBE aufzunehmen und mich während des gesamten Verlaufs des Habilitationsverfahrens als Hauptberichter zu begleiten und zu unterstützen. Seine wissenschaftlichen Anregungen haben wesentlich zur Ausgewogenheit meiner Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Londong danke ich für die Bereitschaft, als Berichter im Rahmen des Habilitationsverfahrens tätig zu werden, und die sehr aufschlussreiche Diskussion zu wasserwirtschaftlichen und rohrbautechnischen Fragen. Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Thewes für seine Bereitschaft, als Berichter tätig zu werden - hier insbesondere für den wertvollen Gedankenaustausch zur Ausrichtung des Fachgebietes im Kontext des unterirdischen Bauens.

Herrn Prof. Dr. C. Heipke und Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Nackenhorst danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Habilitationskommission. Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Haberlandt, Herrn Prof. Dr.-Ing. L. Lohaus, Herrn Prof. Dr.-Ing. K.-H. Rosenwinkel, Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann und Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Schlurmann danke ich für die Mitwirkung in der Habilitationskommission.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Blümel danke ich für seine freundlichen Worte der Zuversicht.

Ich danke außerdem den Mitarbeitern des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, insbesondere Herrn Dr.-Ing. M.Sc. Khalid Abdel-Rahman, Herrn Dipl.-Ing. M. Klameth und Herrn Dr.-Ing. F. tom Wörden, für die überaus angenehme Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung in organisatorischen Fragen.

Erkenntnisgewinn ist häufig ein kollektiver Prozess, der durch den täglichen Gedankenaustausch zwischen neugierigen und freundlichen Menschen beschleunigt wird. Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen.

Meine Eltern, Hermann und Martha Bosseler, haben mir Werte vermittelt.  
Ihnen widme ich diese Arbeit.

Hannover, Juli 2010

Bert Bosseler

## **Kurzfassung**

Der Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sind mit hohen Investitionsrisiken verbunden. Besondere Unsicherheit besteht bei den Netzbetreibern hinsichtlich der Qualität der eingesetzten Produkte und Verfahren. Meist verfügen die Entscheidungsträger nur über herstellereitige Informationen zur Bewertung der Produkt- und Verfahrenseigenschaften. Lediglich Mindestanforderungen an die Arbeitssicherheit, Umweltverträglichkeit und grundsätzliche bauliche Eignung werden bereits durch gesetzliche Bestimmungen und Zulassungen abgedeckt.

Vor diesem Hintergrund wird die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren durch den Verfasser auf Grundlage eigener Forschungs-, Prüfungs- und Warentest-Projekte analysiert. Dabei wird deutlich, dass zwischen den an einer Prüfung und Bewertung beteiligten Institutionen und Entscheidungsträgern vielfältige Zusammenhänge bestehen, die einzelnen Aufgaben sehr unterschiedliche Kompetenzen fordern und Aspekte der Neutralität und Unabhängigkeit sowie das Verständnis für die Hintergründe von Entscheidungsprozessen eine besondere Rolle spielen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt diese Sachverhalte erstmals in systematischer Weise und gibt damit den mit Prüfungs- und Bewertungsaufgaben im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau befassten Wissenschaftlern und Prüfingenieuren eine anschauliche Orientierung im Umgang mit dieser komplexen Thematik.

**SCHLAGWORTE:** Kanalbau, Leitungsbau, Produktprüfungen

## **Abstract**

The construction and maintenance of underground pipes and conduits involve high investment risks. System operators are exposed to particular imponderables concerning the quality of the products and methods used; in most cases, the relevant decision-makers possess only information provided by the manufacturers for their evaluation of product and method properties. Legal provisions and approvals cover only the minimum requirements for safety, health and environmental (SHE) considerations and basic structural suitability.

Against this background, the author analyzes, on the basis of his own research, test/inspection and product test projects, the testing, inspection and evaluation of these products and methods. It is illustrated that many diverse interrelationships exist between the institutions and decision-makers involved in testing and evaluation, that the individual tasks necessitate highly diversified capabilities, and that not only the aspects of neutrality and impartiality, but also comprehension of the background circumstances in decision-making processes, play an important role.

This work for the first time analyzes these factors and processes systematically, and thus provides the scientists and inspection engineers entrusted with inspection and evaluation functions in the underground pipe and conduit construction sector with convenient and useful orientation for handling of these complex topics.

**KEYWORDS:** Drain/sewer engineering, Pipeline engineering, Product tests



## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Veranlassung und Problemstellung	1
1.2	Zielstellung und Vorgehensweise	4
2	Systematischer Beschreibungsansatz	6
2.1	Überblick	6
2.2	Verständniskompetenzen	8
2.3	Handlungskompetenzen	9
2.4	Verbesserungsprozesse	10
2.5	Anwendung	10
3	Leistungsziele und Prüfkriterien	11
3.1	Hintergrund	11
3.2	Standicherheit	13
3.3	Dichtheit	14
3.4	Funktionsfähigkeit	15
3.5	Dauerhaftigkeit	16
4	Mathematisch-Physikalische Modelle	22
4.1	Rohre und Rohrleitungen	22
4.1.1	Flächentragwerke	22
4.1.2	Rotations- und Kreiszyinderschalen	24
4.1.3	Kreisringmodell	28
4.1.4	Längsbiegung	30
4.1.5	Werkstoffverhalten	33
4.2	Dichtheit von Rohrleitungen	40
4.2.1	Normativer Rahmen	40
4.2.2	Wasserdruckprüfung	41
4.2.3	Luftdruckprüfung	42
4.3	Rohr-Boden-Systeme	44
4.3.1	Betrachtungsfälle	44
4.3.2	Neubau bzw. Erneuerung in offener Bauweise	44
4.3.3	Neubau in geschlossener Bauweise	50

4.3.4	Instandsetzung in geschlossener Bauweise	57
4.3.5	Numerische Modelle	59
4.3.6	Bodenmechanische Materialgesetze	60
4.4	Belastungsansätze	63
4.4.1	Verkehrslasten	63
4.4.2	Außenwasserdruck	64
4.4.3	Reibung aus Axialverschiebung	66
4.4.4	Besondere Belastungen	70
4.5	Wahrscheinlichkeiten und Risiken	73
4.5.1	Aufgabenstellung	73
4.5.2	Zuverlässigkeitsanalysen	74
4.5.3	Bedingte Wahrscheinlichkeiten	76
4.5.4	Produzenten- und Konsumentenrisiko	77
4.5.5	Aussagekraft von Dichtheitsprüfungen	78
5	Versuchstechnische Modelle	84
5.1	Modellmerkmale und -ebenen	84
5.2	In-situ-Untersuchungen	86
5.2.1	Anwendungsbereich	86
5.2.2	Zustands-, Abweichungs- und Schadensanalysen	86
5.2.3	Netzsituationen und betriebliche Belastungen	87
5.2.4	Identifizierung von Einflussfaktoren	87
5.2.5	Bedeutung von Personal- und Verfahrenseinflüssen	88
5.3	1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen	89
5.3.1	Anwendungsbereich	89
5.3.2	Offene Bauweise	90
5.3.3	Neubau in geschlossener Bauweise	92
5.3.4	Sanierung	95
5.3.5	Besondere Betriebssituationen	96
5.4	Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen	97
5.4.1	Anwendungsbereich	97
5.4.2	Offene Bauweise, Beispiel Stahlbeton-Großrohre	98
5.4.3	Geschlossene Bauweise, Beispiel Rohrvortrieb	104
5.4.4	Sanierung	115

---

5.4.5	Betriebsbeanspruchungen	116
5.5	Standard-Versuche	121
6	Prüfung	123
6.1	Prüfaufgabe	123
6.2	Objektive Dokumentation	125
6.3	Prüfung durch qualifiziertes Personal	128
6.4	Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit	131
6.5	Repräsentativität	134
7	Bewertung und Entscheidung	138
7.1	Entscheidungsträger und Bewertungsaufgabe	138
7.2	Bewertungsdimensionen	139
7.2.1	Allgemeine Grundsätze	140
7.2.2	Intuitive Urteile	141
7.2.3	Pragmatische Bewertung	143
7.3	Kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse	147
8	Synthese und Anwendung	149
8.1	Vorgehensweise	149
8.2	Netzbetreiberorientierte Forschung	150
8.2.1	Hintergrund und Zielstellung	150
8.2.2	Konzept	151
8.2.3	Validierung	154
8.2.4	Fazit	159
8.3	Vergleichende Produkt-/Verfahrenstests	161
8.3.1	Hintergrund und Zielstellung	161
8.3.2	Konzept	161
8.3.3	Validierung	165
8.3.4	Fazit	171
8.4	Qualitätsreports für Sanierungsverfahren	174
8.4.1	Hintergrund und Zielstellung	174
8.4.2	Konzept	175
8.4.3	Validierung	177
8.4.4	Fazit	181

8.5	Schlussfolgerungen	184
9	Entwicklungspotenziale der Prüfung und Bewertung	186
9.1	Erweiterung der Leistungsziele	186
9.2	Funktionen von Bettungs- und Verfüllmaterialien	186
9.3	Vernetzung des Wissens	187
9.4	Wirtschaftlichkeit	189
9.5	Personaleinflüsse	189
10	Zusammenfassung und Ausblick	190
11	Literatur	193



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 :	Ergebnistabelle eines vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests, Beispiel; aus [IKTW05a]	2
Abbildung 2 :	Systematischer Beschreibungsansatz: Zusammenhänge und Kompetenzen in der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen	7
Abbildung 3 :	Abbau des Abnutzungsvorrates und seine Erstellung durch Instandsetzung oder Verbesserung; aus [DIN31051]	19
Abbildung 4 :	Qualitätsverlauf über die Nutzungsdauer; in Anlehnung an Abbildung 3	20
Abbildung 5 :	Rotationsflächen mit Basisvektoren $\mathbf{a}_i$ ; aus [Bas85]	24
Abbildung 6 :	Gleichgewichtsbetrachtung am infinitesimalen Kreisbogenelement unter Außendruck; nach [Tim61]	28
Abbildung 7 :	Kreisringmodell, Beispiel „Auflast und Auflagergegendruck“; nach [Hor89]	30
Abbildung 8 :	Zylinderschale unter kritischer Biegebelastung; nach [Axe83a]	31
Abbildung 9 :	Rohrwerkstoffe im Kanal- und Leitungsbau; nach [Ste99], verändert	33
Abbildung 10:	Einfluss der Reihenfolge des Auftretens von Stahlbetonrissen auf den Spannungszustand in ihrer Umgebung; aus [Rüs72], S. 255	35
Abbildung 11:	Rohrgraben und Begriffsdefinitionen; Grafik aus [EN1295]	45
Abbildung 12:	Rohr-Boden-System in offener Bauweise, Modellvorstellungen	46
Abbildung 13:	Zusammenhänge der Silotheorie in der Darstellung nach MARSTON; aus [Mos08]	48
Abbildung 14:	Schubsteifer Balken auf elastischer Bettung; aus [Leo79]	49
Abbildung 15:	Ebene Berechnungsmodelle der geschlossenen Bauweise	51
Abbildung 16:	Modellvorstellung der Kurvenfahrt; aus [Buc03]	54
Abbildung 17:	Versuchsergebnisse: Qualitative Kontaktspannungsverteilung; aus [IKT07]	55
Abbildung 18:	Aus Abbildung 17 abgeleitete Rohrkinematik; aus [IKT07]	55
Abbildung 19:	Rohr-Boden-Modell nach MILLIGAN und NORRIS; aus [Mil99]	56
Abbildung 20:	Kinematisches Modell einer Kurvenfahrt nach VERBURG [Ver06]	56
Abbildung 21:	Lastfälle des Inliners; Grafik aus [Fal94]	58
Abbildung 22:	Mohr-Coulomb- und Drucker-Prager-Kriterien: Schnitt mit der $\pi$ -Ebene; nach [Sch94]	62

Abbildung 23:	Spannungsverteilung der Teilflächenlasten im Boden bei konstanter Überdeckung und unterschiedlicher Nennweite; aus [Fal08]	64
Abbildung 24:	Beulen eines freien Ringes unter Außendruck; nach [Gui94], verändert	65
Abbildung 25:	Darstellung zwei-, drei- sowie vierwelliger Beulfiguren	65
Abbildung 26:	Bereichaufteilung um ein Rohr unter zyklischer Axialverschiebung; aus [Wei08]	70
Abbildung 27:	Verformungen an Rohrleitungen unter seismischer Beanspruchung; aus [Kuh04]	71
Abbildung 28:	Zerrungen, Pressungen und Senkungen in oberflächennahen Bodenschichten infolge Bergsenkung; aus [IKT00]	72
Abbildung 29:	Verteilungsdichten; aus [Fuc84]	75
Abbildung 30:	Vorhersagewert des Prüfergebnisses (VdP) „nicht bestanden“	82
Abbildung 31:	Wahrscheinlichkeitsbaum, Beispiel für 10% tatsächlich undichter Leitungen	82
Abbildung 32:	Schematische Darstellung der 5 Phasen des Versuchsablaufs	90
Abbildung 33:	Messrohre mit a) Dehnungsmessrosetten und b) Druckmessfolien	91
Abbildung 34:	Druckfolienmessungen nach Abschluss der Phase 3 (Belastung)	92
Abbildung 35:	Rohrvortrieb im Maßstab 1:1 in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen	94
Abbildung 36:	Vortriebsversuch im Maßstab 1:1 in baustellenähnlichen Belastungssituationen	94
Abbildung 37:	Scheiteldruckversuch an Betonrohren	99
Abbildung 38:	Modifizierter Scheiteldruckversuch: Schematische Darstellung	100
Abbildung 39:	Bestimmung des Belastungsverhältnisses $\beta$	101
Abbildung 40:	Abstimmung der Spannungsgrößen in den maßgeblichen Querschnitten	102
Abbildung 41:	Rissentwicklung bei Versuchen mit in der Schalung erhärteten Rohren	103
Abbildung 42:	Aufgabenstellung Rohrvortrieb: Bemessung vs. versuchstechnische Simulation	105
Abbildung 43:	Vorversuche zur Vortriebssimulation am Modell im Maßstab 1:4, DN 400	107
Abbildung 44:	Versuchsanlage zur 1:1-Vortriebssimulation unter realitätsnahen Beanspruchungen	108
Abbildung 45:	Vortriebssimulator DN 1600 ( $d_a=2,1m$ ) – Bettung, Messtechnik	109

Abbildung 46:	Technische Teilsysteme zur realitätsnahen Trassensimulation im Maßstab 1:1	111
Abbildung 47:	Vortriebssimulation: Messergebnisse für die „Gegensteuerung“ mit resultierenden Zylinderkräften als Bettungsreaktion (geometrisch überhöhte Darstellung)	112
Abbildung 48:	Kontaktspannungen in der Rohrfuge für DÜM aus Vollholz (Holz), Spanplatte (Span) und Polyurethan (PU)	114
Abbildung 49:	Außenwasserdruckversuch: a) Druckkammer b) Beulversagen c) FEM-Berechnung	117
Abbildung 50:	Versuchseinrichtung zur Messung der Strahlkraft und Strahldruckverteilung am Auftreffort eines Hochdruckreinigungsstrahls	118
Abbildung 51:	Versuchsaufbau für Druckmessungen an Wurzeln; aus [RUB07]	119
Abbildung 52:	Messung des Anpressdruckes in einer Steckverbindung unter Scherlast	120
Abbildung 53:	Entscheidungsbaum der Take-the-Best-Heuristik; nach [Mar99]	143
Abbildung 54 :	Netzbetreiberorientierte Forschung, systematisches Profil gemäß Abbildung 2	160
Abbildung 55:	Konzept vergleichender Produkt-/Verfahrenstests	163
Abbildung 56:	Vergleichende Produkt-/Verfahrenstests: Aufbau der Ergebnistabelle	164
Abbildung 57 :	Vergleichende Produkt-/Verfahrenstests, systematisches Profil gemäß Abbildung 2	173
Abbildung 58 :	Qualitätsreports für Sanierungsverfahren, systematisches Profil gemäß Abbildung 2	183

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 :	Leistungsziel Standsicherheit: Typische Qualitätsanforderungen, charakteristische Prüfkriterien, Beispiele für Norm- bzw. Literaturangaben	14
Tabelle 2 :	Leistungsziel Dichtheit: Typische Qualitätsanforderungen, charakteristische Prüfkriterien, Beispiele für Norm- bzw. Literaturangaben	15
Tabelle 3 :	Linerreport: Tabellarische Darstellungen der Prüfergebnisse	176

## Symbole und Abkürzungen

### Allgemeine Parameter

$R$	Radius der Kreiszylinderschale bzw. des Kreisrings
$D, D_m$	mittlerer Rohrdurchmesser
$d_a$	äußerer Rohrdurchmesser
$d$	Wanddicke des Rohres bzw. Querschnittsdicke des Flächentragwerks
$E$	Elastizitätsmodul
$G$	Gleitmodul
$K$	Kompressionsmodul
$\nu$	Querdehnungszahl
$I$	Trägheitsmoment eines Längsschnitts durch die Rohrwandung
$J$	Trägheitsmoment des Rohrquerschnitts
$L, l$	Länge
$q_v$	vertikale Bodenspannung (vgl. [DWA-A127])
$q_h$	horizontale Bodenspannung (vgl. [DWA-A127])
$\gamma_B$	Wichte des Bodens
$t$	physikalische Zeit
$i, j$	ganzzahlige Zählvariablen

### Indizes

$ij$	tensorielle Komponenten eines Raumtensors
$\alpha\beta$	tensorielle Komponenten eines Flächentensors
$\langle\alpha\beta\rangle$	physikalische Komponenten eines (Flächen)tensors
$(\alpha\beta)$	Kennzeichnung der Symmetrie
$_{,\alpha}$	partielle Ableitung nach $\Theta^a$

### Abkürzungen

DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
DN	Nennweite
DÜM	Druckübertragungsmittel
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EN	European Norm
FEM	Finite Element Methode
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GGG	Guss Graphit Globular (Sphäroguss)
IKT	IKT – Institut für Unterirdischen Infrastruktur, Gelsenkirchen
ISO	International Organization for Standardization
MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
NRW	Nordrhein-Westfalen
PE-HD	Polyäthylen hoher Dichte
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid

# 1 Einführung

## 1.1 Veranlassung und Problemstellung

Der Wiederbeschaffungswert der öffentlichen unterirdischen Infrastruktur in Deutschland, von den Versorgungsleitungen über die Kanäle bis hin zu den Verkehrstunneln, beläuft sich auf über 600 Mrd. €<sup>1</sup>. Rund 550 Mrd. € entfallen auf die Ver- und Entsorgungsnetze für Gas, Wasser und Abwasser mit Netzlängen von weit über 1 Mio. Kilometer. Den größten Anteil stellt hier die Abwasserkanalisation mit ca. 330 Mrd. € Wiederbeschaffungswert dar, d.h. mehr als die Hälfte des öffentlichen unterirdischen Netzvermögens besteht aus Abwasserkanälen. Offensichtlich ist es außerordentlich aufwändig, viele Kilometer großer Rohre, meist mitten in der Straße, in beträchtlichen Tiefen zu verlegen. Jährlich werden ca. 4 Mrd. € für Kanalinvestitionen verplant<sup>2</sup>, so dass Nutzungsdauern von bis zu 100 Jahren nicht selten sind.

Die Aufwendungen für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sind allerdings mit einem hohen Investitionsrisiko verbunden, da bei den Netzbetreibern erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Qualität der angebotenen Produkte und Verfahren bestehen. Diese weisen z.T. deutliche technische Unterschiede und Einsatzmöglichkeiten auf, und sowohl unmittelbar nach Einbau als auch nach mehrjähriger betrieblicher Beanspruchung werden mitunter erhebliche Mängel und Schäden festgestellt (vgl. [Ber05], [IKT03a]). Die bisher zur Verfügung stehenden Informationen über die angebotenen Produkte und Verfahren greifen als Entscheidungsgrundlage offensichtlich zu kurz. Zwar werden in zahlreichen Fachveröffentlichungen und Regelwerken die Produkte und Verfahren hinsichtlich ihrer Funktionsweise beschrieben (vgl. [Ste99], [Ste03], [BMVV08], [EN12889], [TC165a]), und auch die Hersteller informieren mittels Werbematerialien oder Fachveröffentlichungen über die Vorteile und Einsatzbereiche; aber nur in Ausnahmefällen werden die Produkte und Verfahren durch eine neutrale und unabhängige Stelle hinsichtlich der vielfältigen Leistungsziele, wie Standsicherheit, Dichtheit und Funktionsfähigkeit, untersucht und nach Maßstäben der Netzbetreiber bewertet. So legt z.B. das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) lediglich für den

---

<sup>1</sup> Die Längen unterirdischer Verkehrswege wurden einer Veröffentlichung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen aus dem Jahr 2001 [Nag01] entnommen und mit den durchschnittlichen Meterkosten einer eigenen Erhebung des Jahres 2003 [IKT03] hochgerechnet. Die Länge der Gasleitungen wurde dem DVGW-Forschungsprogramm Gas [DVGW08], die der Wasserleitungen dem Branchenbild der Wasserwirtschaft 2008 [BDW08] und die Länge der Abwasserkanäle (ohne Hausanschlüsse) der DWA-Umfrage 2004 entnommen (vgl. [Ber05], dort nach Angaben des Statistischen Bundesamtes, Stand 2001). Die Wiederbeschaffungswerte der Ver- und Entsorgungsleitungen wurden entsprechend den Kostenansätzen in [Her02] hochgerechnet. Nicht betrachtet wurden Pipelines, Fernwärmeleitungen sowie Kabel, Rohrpost-, Abluft- und Gütertransportleitungen.

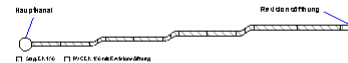
<sup>2</sup> Hochgerechnet auf Grundlage einer NRW-weiten Auswertung der Abwasserbeseitigungskonzepte, vgl. [IKT03d]. Private Anschlusskanäle und Grundleitungen sind darin noch nicht enthalten.

privaten Bereich gemäß den Bauordnungen der Länder technische Mindeststandards für das Inverkehrbringen von Bauprodukten und –verfahren fest<sup>3</sup>. Eine weitergehende, ggf. auch vergleichende Betrachtung der Produkt- bzw. Verfahrensqualität findet insbesondere für öffentliche Kanalnetze kaum oder gar nicht statt.

Die Thematik der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen wurde daher durch den Verfasser seit dem Jahr 2000 im Rahmen netzbetreiberorientierter Forschungsprojekte vorangetrieben (z.B. [IKT01a], [IKT02b], [IKT03b], [IKT03c], [IKT04], [IKT04a], [IKT05c], [IKT05d], [IKT06a], [IKT07e]). Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden u.a. die Grundlage für vergleichende Prüfungen und Bewertungen in sog. IKT-Warentests (z.B. [IKTW02]) sowie baustellenbezogenen Qualitätsreports mit hohem Praxisbezug (vgl. [Wan08]). Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Ergebnistabelle eines im Jahr 2005 veröffentlichten Testberichts [IKTW05a] für Verfahren zur Sanierung von Hausanschlussleitungen. Im Anschluss an diesen Test wurden zahlreiche der getesteten Produkte verbessert und erneuten Prüfungen unterzogen<sup>4</sup>. Darüber hinaus wurde im Jahr 2008 ein umfassender Nachttest nach aktualisierten Anforderungen der Netzbetreiber gestartet (vgl. [IKTW08a]).

IKT - Warentest „Hausanschluss-Liner“

Standardsituation<sup>1</sup>:



Sanierung von drei Anschlusskanälen aus Steinzeug DN 150; fachgerechter Anschluss mit einem Anschlussstutzen im Kämpfer des Hauptrohres; Inversion durch Revisionsöffnungen am Anfang des Steinzeugkanals; vertikale Bögen: 45° und 30°; eingebrachte Schäden: Längsrisse, Querrisse, Scherbenbildungen, fehlende Rohrstücke.



Lineranbieter	KOB KG	epros GmbH	MC Bauchemie Müller GmbH & Co. KG	EasyLiner GmbH	ALOCIT Chemie GmbH	VFG AG	epros GmbH	EasyLiner GmbH	Mr. PIPE GmbH	Institutoform Rohr-sanierungs-techniken GmbH
Schlauchliner	BRAWOLINER - FIX	DrainLiner	Konudur Homeliner	SoftLiner	Flex-Liner	ProFlex Liner (Prototyp)	DrainPlusliner	BendLiner	Mr. PIPE-Liner	Institutoform-Liner
Eingesetztes Trägermaterial	Polyester-Hochfestgewebe mit PU-Folie	Polyester-Nadelfilz mit PVC-Folie	Polyester-Nadelfilz mit PU-Folie	Polyester-Nadelfilz mit PU-Folie	Polyestergewirke mit PVC-Folie	Vermaschter Filz mit PU-Folie	-	-	-	-
Eingesetztes Harzsystem	Bravo 1	EPROPOX VIS AM/BA	Konudur 160 PL-XL	EasyFox 3008	RLDCT A 600, 5-48-48 bzw. 48-34*	Biresin LS	-	-	-	-
IKT- Prüfurteil: Standardsituation	GUT (1,6)	BEFRIEDIGEND (2,6)	BEFRIEDIGEND (2,6)	BEFRIEDIGEND (3,3)	AUSREICHEND (4,2)	AUSREICHEND (4,4)	NICHT BEWERTET	NICHT BEWERTET	NICHT BEWERTET	NICHT BEWERTET
Systemprüfung (Gewichtung 80%)	gut (1,6)	gut (2,2)	gut (2,1)	befriedigend (3,0)	ausreichend (3,7)	ausreichend (4,0)				
Sanierungsergebnis	Funktionsfähigkeit* (40%) Dichtheit** (60%)	17 12	24 27	22 18	29 35	26 35	21 42			
Verfahrensanlauf und Schulungen* (10%)	12	10	27	12	43	43	43			
Dichtheit nach mechanischer Reinigung* (20%)	16	27	21	43	43	43	54			
Qualitätssicherung (Gewichtung 20%)	sehr gut (1,5)	ausreichend (4,0)	mangelhaft (5,5)	ausreichend (4,5)	ungenügend (6,0)	ungenügend (6,0)				
DIB-Zulassung* (50%)	ja	nein	nein	ja*	nein	nein				
Umweltverträglichkeitsprüfzeugnis des Harzes vorgelegt* (20%)	ja*	ja	nein	ja*	nein	nein				
Verfahrenshandbuch und Schulungen* (10%)	ja	ja	nein	nein	nein	nein				
Fremdüberwachung* (10%)	ja	ja	ja	ja	nein	nein				
Nachweis der Entzorgbarkeit* (10%)	nein	nein	nein	nein	nein	nein				
Baustellen-Untersuchung	praktischer Einbau	kein Einbau	praktischer Einbau	praktischer Einbau	praktischer Einbau	praktischer Einbau				
Zusatzinformation: Lieferbar für	DN 100 bis DN 300	DN 100 bis DN 300	DN 100 bis DN 300	DN 100 bis DN 300	DN 100 bis DN 300	DN 100 bis DN 300				
Empfohlene Verbesserungen	Schwankungen der Linereigenschaften verringern	Schwankungen der Linereigenschaften verringern; DIB-Zulassung auch auf eingesetztes Harzsystem erweitern	Schwankungen der Linereigenschaften verringern; Dichtheitswirkung und Qualitätssicherung verbessern	Schwankungen der Linereigenschaften verringern; Dichtheitswirkung und Qualitätssicherung verbessern	Schwankungen der Linereigenschaften verringern; Dichtheitswirkung und Qualitätssicherung verbessern	Schwankungen der Linereigenschaften verringern; Dichtheitswirkung und Qualitätssicherung verbessern	Schlauchliner wurde nicht eingesetzt Begründung: Anbieter entschied sich bei der Sanierung der Standardsituation für den Einsatz des DrainLiners	Schlauchliner wurde nicht eingesetzt Begründung: Anbieter entschied sich bei der Sanierung der Standardsituation für den Einsatz des SoftLiners	Teilnahme abgelehnt Begründung des Anbieters: Qualität bereits durch andere Dokumente (u. a. DIB-Zulassung) in ausreichendem Maße nachgewiesen	Teilnahme abgelehnt Begründung des Anbieters: Testbedingungen außerhalb der Spezifikationen des Institutoform-Liners Vollständiges Abgeschnitten vom 14.02.2005 im Anhang I des Endberichtes

Abbildung 1 : Ergebnistabelle eines vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests, Beispiel; aus [IKTW05a]

<sup>3</sup> s. [DIB08], zur Geschichte und den Zielen des DIBT

<sup>4</sup> s. Informationen zu Nachttests unter [www.ikt.de](http://www.ikt.de): => IKT-Warentests

Das Verständnis für die Hintergründe und Zusammenhänge einer Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren sowie die hierfür notwendigen Kompetenzen gewinnt damit an Bedeutung. Allerdings fehlt bisher eine systematische Zusammenführung der Erfahrungen aus Forschung, vergleichenden Produkt- und Verfahrenstests sowie Qualitätssicherung, so dass derzeit in Zweifelsfällen die für eine Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen notwendigen Kompetenzen und die erforderlichen institutionellen und personellen Rahmenbedingungen nur fallbezogen und ohne systematischen Bezug diskutiert werden (vgl. [Hei08], [Hei08a]).

Die Situation verschärft sich für die verantwortlichen Netzbetreiber auch dadurch, dass Kriterien für die Produktauswahl aktiv von einzelnen Marktteilnehmern oder deren Verbänden vorgeschlagen werden (vgl. [FBS05], [Reh05]) und z.B. die komplexen Verhältnisse des Rohr-Boden-Systems in unterschiedlicher Weise hinsichtlich der eingesetzten Bauprodukte und –verfahren beschrieben und miteinander verglichen werden (vgl. [Spa05], [Sto08], [Ste05a], [Kie00]). Auch setzen sich wirtschaftsnahe Vereinigungen, wie z.B. die GSTT German Society for Trenchless Technology e.V., die Förderung einzelner Bautechniken explizit zum Ziel<sup>5</sup>, und das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN) bietet mit der sog. „Publicly Available Specification (PAS)“ die Möglichkeit, eine Übereinkunft über technische Anforderungen zwischen einzelnen Verfassern als öffentliche Anforderung, allerdings ohne Normungsanspruch, u.a. zu Marketingzwecken zu formulieren<sup>6</sup>.

Damit wächst die Notwendigkeit für eine systematische und nachvollziehbare Beschreibung von Prüfungs- und Bewertungskonzepten für Produkte und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen, die Wissenschaftlern und Prüfindingenieuren eine Orientierung im Umgang mit dieser komplexen Thematik gibt und die besonderen Entscheidungsunsicherheiten der Netzbetreiber berücksichtigt.

Um die Lesbarkeit zu verbessern, wird in dieser Arbeit überwiegend nur von „Prüfung und Bewertung“ bzw. „Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren“ gesprochen und dabei vorausgesetzt, dass sich dies auf Produkte und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen bezieht.

---

<sup>5</sup> vgl. [www.gstt.de](http://www.gstt.de), Homepage: „Die GSTT fördert das ökologisch und ökonomisch beispielhafte grabenlose Bauen und Instandhalten von Erdleitungen aller Art.“, eingesehen am 14.01.2009, bzw. Satzung der GSTT vom 29.06.2006: „Zweck des Vereins ist es, Wissenschaft und Technik für das grabenlose Bauen und Instandhalten von Leitungen zu fördern und weiterzuentwickeln.“

<sup>6</sup> s. [www.din.de](http://www.din.de) => Standardisierung/ Publicly Available Specification, eingesehen am 14.01.2009

## 1.2 Zielstellung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Verständnis für die notwendigen Kompetenzen sowie Bewertungs- und Entscheidungsprozesse einer Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen zu erhöhen. Hierzu sollen Hintergründe und Zusammenhänge erläutert, analysiert und veranschaulicht werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung eigener wissenschaftlicher Erkenntnisse und Erfahrungen des Verfassers<sup>7</sup>. Der gewählte systematische Beschreibungsansatz soll schließlich auch als Ausgangspunkt zur Validierung von bereits eingeführten Prüfungs- und Bewertungskonzepten sowie zur Identifizierung von Entwicklungspotenzialen und -perspektiven dienen.

Im Vordergrund der Untersuchung stehen die - über Mindestanforderungen der Arbeitssicherheit, der Umweltverträglichkeit und grundsätzlichen baulichen Eignung hinausgehenden - Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von Produkten und Verfahren für den durch die Hersteller angesprochenen Anwendungsfall und die damit verbundenen Informations- und Entscheidungsunsicherheiten auf Seiten der Netzbetreiber. Ausdrücklich grenzt sich diese Aufgabenstellung von einer wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung einzelner Bauvorhaben und der Auswahl von Produkten und Verfahren für einzelne Baumaßnahmen ab. Darstellungen zu dieser Thematik sowie zur Weiterführung damit verbundener aktueller Fragestellungen finden sich z.B. in [Gru97], [Sch00], [Bie08], [Her08].

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Grundgedanken der systematischen Beschreibung einer Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren erläutert (Abschnitt 2). Vor diesem Hintergrund werden dann - auf der Grundlage langjähriger Forschungs-, Prüfungs- und Bewertungserfahrungen des Verfassers - die für diese Aufgabenstellung notwendigen Verständnis- und Handlungskompetenzen beschrieben, detailliert begründet und mit Beispielen belegt (Abschnitte 3 bis 7). Anschließend werden erfolgreiche Prüfungs- und Bewertungskonzepte aus Forschung und Qualitätssicherung beschrieben und validiert (Abschnitt 8) sowie besondere Entwicklungspotenziale und -perspektiven abgeleitet (Abschnitt 9).

Da sich bautechnische Fragen unterirdischer Kanal- und Leitungsnetze insbesondere auf die innerstädtischen, großformatigen und tief liegenden Kanäle und Leitungen der Entwässerungsnetze konzentrieren und dies darüber hinaus den Erfahrungsschwerpunkt des Verfassers darstellt, sollen diese Einsatzbedingungen im Folgenden als Leitbild zur Entwicklung von Beschreibungsansätzen für die Prüfung und Bewertung dienen. Auf die besonderen Bedingungen von Versorgungsleitungen

---

<sup>7</sup> Der Verfasser ist seit dem Jahr 2000 Wissenschaftlicher Leiter des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen ([www.ikt.de](http://www.ikt.de)).



---

(u.a. Gas, Wasser, Fernwärme) wird ggf. fallbezogen eingegangen. Insbesondere mit Blick auf die bei der Bewertung von Wasserversorgungsleitungen dominierenden materialtechnischen Fragestellungen und die damit verbundenen speziellen Rehabilitationsstrategien sei auf die Arbeiten von SORGE (vgl. [Sor07]) und ROSCHER (z.B. [Ros08]) verwiesen. Auf eine Betrachtung von Leitungs- bzw. Kabelnetzen der Energieversorgung und Telekommunikation wird verzichtet.

## 2 Systematischer Beschreibungsansatz

Entscheidungsträger<sup>8</sup> stehen regelmäßig vor der Frage, welche Produkte und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen geeignet sind und wie deren Leistungsfähigkeit differenziert zu prüfen und bewerten ist. Die grundsätzlichen Prozesse und Inhalte einer Prüfung und Bewertung sollen in dieser Arbeit systematisch<sup>9</sup> beschrieben und mit den notwendigen wissenschaftlichen Kompetenzen in Verbindung gebracht werden. Den Hintergrund bieten vor allem eigene Erfahrungen des Verfassers, insbesondere mit Blick auf die Beschreibung mathematisch-physikalischer und versuchstechnischer Modelle. Hinsichtlich der Interpretation menschlichen Handelns und menschlicher Entscheidungen werden darüber hinaus klassische philosophische und moderne entscheidungstheoretische Ansätze als Orientierung einbezogen<sup>10</sup>.

### 2.1 Überblick

Die Freiheit zur Entscheidung für oder gegen ein Produkt oder Verfahren bzw. die Auswahl zwischen mehreren Alternativen ist von besonderen menschlichen Kompetenzen abhängig<sup>11</sup>. So können wir allgemeine oder situationsbezogene Anforderungen an den Einsatz eines Produktes entwickeln, die Erfüllung dieser Anforderungen überprüfen und anhand einer Bewertung über den Einsatz entscheiden. Die Entscheidungsfindung setzt idealerweise voraus, dass wir die Problemstellung und möglichen Lösungswege einer Prüfung und Bewertung verstehen (*Verständniskompetenzen*) und fähig sind, die notwendigen Prüfaufgaben und Bewertungen wahrzunehmen (*Handlungskompetenzen*). Der Entscheidungsträger kann diese Kompetenzen selbst besitzen und ausüben oder auch an Dritte delegieren bzw. auf unabhängige Ergebnisse zurückgreifen (z.B. von Prüfinstituten). Abbildung 2 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen den Kompetenzen und Verantwortlichen anhand eines Schaubildes und einer tabellarischen Übersicht für den besonderen Anwendungsfall der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen.

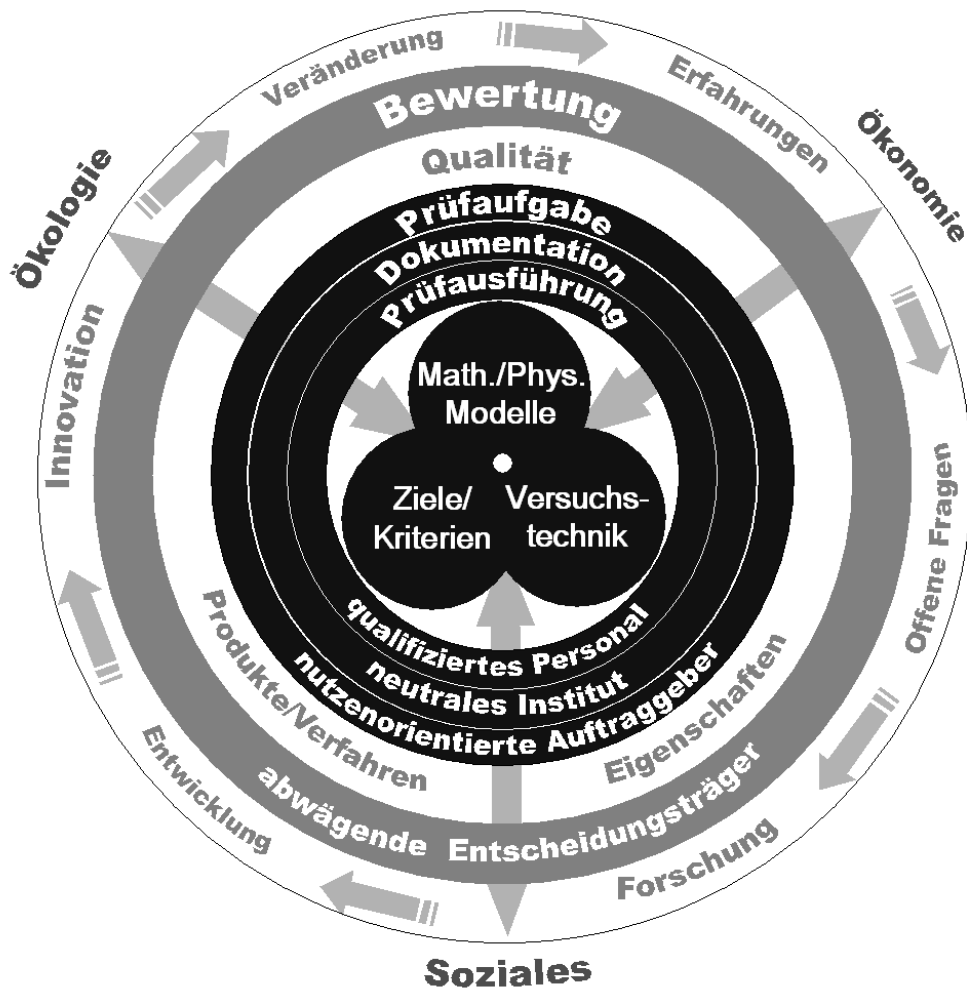
---

<sup>8</sup> Der Begriff Entscheidungsträger wird nachfolgend im funktionalen Sinne anstatt des in der wissenschaftlichen Literatur (vgl. [Lau05], [Bit81]) verbreiteten Begriffs „Entscheider“ verwendet, um die in Abschnitt 7.1 erläuterten Delegationsmöglichkeiten zu berücksichtigen.

<sup>9</sup> Der Begriff „systematisch“ wird in dieser Arbeit im Sinne von „mit Absicht ordentlich gegliedert, um das Verständnis gezielt und planmäßig zu erhöhen“ verwendet; vgl. Duden, Band 5 (Das Fremdwörterbuch), 5. Aufl., 1990: „*systematisch*: 1. das System, die Systematik betreffend, 2. in ein System gebracht, ordentlich gegliedert. 3. planmäßig, gezielt, absichtlich“.

<sup>10</sup> Zur Verdeutlichung dieser Verbindung wird in den Abschnitten 2 und 7 auch auf grundlegende Ausführungen aus der Philosophie und Entscheidungstheorie, z.B. in [Kan86], [Ben89], [Mil71] (bzw. als Überblick [Wer05]) sowie in [Lau05], [Bit81], [Bos90], verwiesen.

<sup>11</sup> vgl. [Wer05], S. 19 zu „Menschliche Freiheit“







Verständnis Kompetenzen 			Handlungskompetenzen	
Leistungsziele/ Prüfkriterien	Mathematisch- physik. Modelle	Versuchstechnische Modelle	Prüfung 	Bewertung 
Standicherheit Dichtheit Funktionsfähigkeit Dauerhaftigkeit	Rohre und Rohrleitungen Rohr-Boden-Systeme Belastungsansätze Dichtheit von Rohrleitungen Wahrscheinlichkeiten und Risiken	In-situ-Untersuchungen 1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen Standard-Versuche	Prüfaufgabe Objektive Dokumentation Prüfausführung: - Qualifiziertes Personal - Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit - Repräsentativität	Entscheidungsverantwortung Bewertungsdimensionen - Allgemeine Grundsätze - Intuitive Urteile - Pragmatische Bewertung Kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse
 Verbesserungsprozesse: Pulsierendes Wechselspiel mit gesellschaftlichen Anforderungen				

Abbildung 2 : Systematischer Beschreibungsansatz: Zusammenhänge und Kompetenzen in der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen  
Schaubild (oben) und tabellarische Übersicht (unten)

Im Kern des systematischen Beschreibungsansatzes stehen die *Verständniskompetenzen*, zu denen das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Leistungszielen und Prüfkriterien, für die verfügbaren mathematisch-physikalischen Modelle und für die Modellebenen der Versuchstechnik gehören. Dieser Kern wird umfasst durch *Handlungskompetenzen*. Diese betreffen die eigentliche Handlungsfähigkeit zur Wahrnehmung von Prüfungen und Bewertungen und das Zusammenspiel zwischen beiden Handlungen. Eine Bewertung setzt die Vergleichbarkeit zwischen den Qualitätsanforderungen der bewertenden Entscheidungsträger und den geprüften Produkt- bzw. Verfahrenseigenschaften voraus.

Die Verständniskompetenzen speisen sich im Sinne von *Verbesserungsprozessen* in hohem Maße aus den gesellschaftlichen und individuellen Rahmenbedingungen und den durch gesellschaftliche, wissenschaftliche und individuelle Veränderungen und Erfahrungen angestoßenen Forschungsarbeiten, Entwicklungen und Innovationen. Beispielhaft seien Werkstoff- und Geräteentwicklungen sowie veränderte ökologische Anforderungen genannt, welche die Definition und Erreichbarkeit von Sanierungszielen, die notwendige Versuchstechnik zur Qualitätssicherung und die Interpretation mathematisch-physikalischer Modelle beeinflussen können.

Nachfolgend werden die grundsätzlichen Inhalte und der Aufbau von Verständnis- und Handlungskompetenzen und die damit verbundenen Verbesserungsprozesse näher erläutert.

## 2.2 Verständniskompetenzen

Im Zentrum der Prüfung und Bewertung stehen drei Kompetenzen, die das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen **Leistungszielen und Prüfkriterien** (vgl. Abschnitt 3), für die verfügbaren **mathematisch-physikalischen Modelle** (vgl. Abschnitt 4) und für **versuchstechnische Modelle** (vgl. Abschnitt 5) betreffen.

Detaillierte Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Leistungszielen, Qualitätsanforderungen und Prüfkriterien (**Leistungsziele/Prüfkriterien**) sind mit Blick auf die Auswahl geeigneter Prüfkriterien gefragt. Prüfkriterien sind keine Produktanforderungen an sich, sondern gewinnen erst durch ihre argumentative Verbindung mit den Zielen des Produkteinsatzes und den hieraus abgeleiteten Qualitätsanforderungen ihren Wert. So unterscheiden sich z.B. die wesentlichen, zu prüfenden Eigenschaften von unterirdischen Druckleitungen (z.B. Langzeit-Zugfestigkeit) deutlich von denen der Freispiegelkanäle (z.B. Biegefestigkeit und Langzeit-Verformung).

Die Beschreibung komplexer Sachverhalte fordert ein umfassendes Verständnis der verfügbaren **mathematisch-physikalischen Modelle** zur Beschreibung unterirdischer Kanal- und Leitungsbauwerke und deren Wechselwirkungen mit der

Umwelt. Dies betrifft insbesondere die statische Betrachtung der Rohre bzw. Rohrleitungen, das Rohrwerkstoffverhalten, den Aufbau und die Wirkung des Rohr-Boden-Systems, die bodenmechanischen Gesetzmäßigkeiten und die Auswirkungen aus inneren und äußeren Belastungen, wie z.B. Medieneinfluss, Grundwasser und Verkehrslasten.

Versuchstechnisches Know-how (**Versuchstechnische Modelle**) ist zur Bewertung und Auswahl aussagekräftiger Versuchsmodelle und -techniken sowie geeigneter Versuchsbedingungen von Bedeutung. Dies betrifft die messtechnische Begleitung von In-situ-Untersuchungen ebenso wie 1:1-Versuche, Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen sowie Standardversuche nach dem Normen- und Regelwerk. Darüber hinaus ist besondere Kompetenz gefragt, wenn spezielle versuchstechnische Modelle eigens zur realitätsnahen und nutzungsdauerorientierten Abbildung von Belastungen und Beanspruchungen für den Laboreinsatz entwickelt werden sollen.

### 2.3 Handlungskompetenzen

Aufbauend auf den Verständniskompetenzen besteht die eigentliche **Prüfung** (vgl. Abschnitt 6) darin, die Prüfaufgabe durch qualifiziertes Personal sachgerecht umzusetzen und unter objektiven Gesichtspunkten zu dokumentieren. Dabei stellen sich im Rahmen der Qualitätssicherung auch Fragen nach der Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit von Prüfungen und der Repräsentativität einzelner Prüfergebnisse. Die Objektivität der Darstellungen kann insbesondere durch die Unabhängigkeit und Neutralität des Prüfinstituts gesichert werden. Die Prüfaufgabe und deren Finanzierung sind mit dem Auftraggeber hinsichtlich dessen Kosten- und Effizienzziele iterativ abzustimmen.

Die **Bewertung** der Prüfergebnisse betrifft in ihrem Ergebnis die Entscheidungsträger, die für den Einsatz und die Nutzung des Produktes oder Verfahrens in den Kanal- und Leitungsnetzen verantwortlich sind (vgl. Abschnitt 7). Sie wägen vor dem Hintergrund innerer und äußerer Zwänge und Freiheitsgrade sowie der verfügbaren Informationen individuell ab, inwieweit die für sie maßgeblichen Qualitätsanforderungen durch Prüfergebnisse zu den Produkt- und Verfahrenseigenschaften ausreichend angesprochen werden. Ggf. fließen diese Informationen und Einschätzungen auch in kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse ein. Eine besondere Kompetenz liegt darin, diese Prozesse zu verstehen und die Ergebnisse in geeigneter Weise zu interpretieren, denn insbesondere die Ergebnisse aus einer vergleichenden Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren können unmittelbar die Marktbedingungen beeinflussen. Auch rechtliche und technische Anforderungen orientieren sich zum Teil an Prüfergebnissen, wenn z.B. Mindestanforderungen im Normen- und Regelwerk definiert werden.

## 2.4 Verbesserungsprozesse

Als Folge einer Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren werden Verbesserungsprozesse angestoßen, die zum einen auf die unmittelbare Verbesserung der Produkt- und Verfahrenseigenschaften abzielen, zum anderen aber auch eine Verbesserung der Prüfungs- und Bewertungsmethoden zum Ziel haben können. Darüber hinaus ist auch die Fortentwicklung der gesellschaftlichen Randbedingungen möglich und ggf. in die Betrachtung einzubeziehen. In dem gewählten Beschreibungsansatz nach Abbildung 2 wird dies durch die Begriffe Ökologie, Ökonomie und Soziales stellvertretend veranschaulicht (vgl. [Bun01], [Hau87], [UNO92]). Auf eine weitergehende Analyse dieser Sachverhalte wird in der vorliegenden Arbeit allerdings verzichtet und vereinfachend unterstellt, dass gesellschaftliche Anforderungen und Märkte sowie Produkt- und Verfahrensentwicklungen in dem dargestellten Kreislauf aus Innovation, Veränderung, Erfahrung, Forschung und Entwicklung miteinander verzahnt sind. Die Integration in den vorgestellten systematischen Beschreibungsansatz begründet sich darin, dass Kenntnisse über derartige Veränderungen unmittelbar die Verbesserung und Ausrichtung von Verständniskompetenzen für den vorliegenden Anwendungsfall beeinflussen und darüber hinaus gesellschaftliche Entwicklungen auch zu einer Anpassung von Bewertungszielen führen können.

## 2.5 Anwendung

Der systematische Beschreibungsansatz unterstützt das Verständnis für die Kompetenzen sowie Bewertungs- und Entscheidungsprozesse, die bei der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren von besonderer Bedeutung sind. In den nachfolgenden Abschnitten 3 bis 7 werden die einzelnen Kompetenzbereiche auf der Grundlage eigener Erfahrungen des Verfassers exemplarisch veranschaulicht und ihre Hintergründe detailliert erläutert: Die Abschnitte 3 bis 5 befassen sich mit den *Verständniskompetenzen*, d.h. dem Verständnis für Leistungsziele und Prüfkriterien sowie mathematisch-physikalische und versuchstechnische Modelle; die Abschnitte 6 und 7 beschreiben und erklären die *Handlungskompetenzen*, die zur Wahrnehmung der Prüfung sowie Bewertung und Entscheidung notwendig sind.

Im Ergebnis bilden diese Analysen dann die Grundlage zur Validierung neuentwickelter Prüfungs- und Bewertungskonzepte in Abschnitt 8. Das Verständnis für die Anwendungsschwerpunkte und besonderen Merkmale dieser Konzepte wird so gezielt erhöht. Im Sinne eines systematischen Profils werden der Aufbau des jeweiligen Prüfungs- und Bewertungskonzeptes in einheitlicher Form beschrieben und die Konzeptschwerpunkte herausgestellt. Abschließend werden besondere Entwicklungspotenziale für die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren aufgezeigt (Abschnitt 9) und übergeordneten Erkenntnisse und Perspektiven für die wissenschaftliche Arbeit zusammengefasst (Abschnitt 10).

## 3 Leistungsziele und Prüfkriterien

### 3.1 Hintergrund

Die Prüfung von Produkten und Verfahren erfordert die Auswahl geeigneter Prüfkriterien. Diese Prüfkriterien sollen dabei helfen, die an die Produkte und Verfahren gestellten Qualitätsanforderungen<sup>12</sup> prüftechnisch in geeigneter Weise abzubilden. Die Qualitätsanforderungen leiten sich wiederum aus den besonderen Leistungszielen für den Einsatz der Produkte und Verfahren ab<sup>13</sup>. Prüfkriterien definieren somit keine Produkthanforderungen an sich, sondern gewinnen erst durch ihre argumentative Verbindung mit den Zielen des Produkteinsatzes und den hieraus abgeleiteten Qualitätsanforderungen ihren Wert.

Zum Beispiel ergeben sich aus dem Leistungsziel „Standicherheit“ eines unterirdischen Kanalbauwerks konkrete Qualitätsanforderungen an das Verhalten der verwendeten Produkte und Verfahren, wie z.B. das Verformungs- und Rissverhalten von Rohren und Verfüllstoffen. Die Prüfkriterien zielen dann auf dieses spezielle Verhalten ab, um Qualität im Einzelfall aussagekräftig bewerten zu können. So wird z.B. die Zugfestigkeit eines Rohrwerkstoffes als Prüfkriterium herangezogen, wenn die als Leistungsziel definierten Belastungsannahmen über den Weg der statischen Berechnung zu Anforderungen an das Verhalten des Rohres unter Zugbeanspruchungen führen. Umgekehrt liefern allerdings hohe Werte für die Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffes allein noch keine Aussage darüber, ob das Ziel der Standicherheit des unterirdischen Kanalbauwerkes erreicht werden kann, denn das Bauteil kann auch völlig zugspannungsfrei sein, oder andere Qualitätsanforderungen, wie die Verformbarkeit und Stabilität, können dominieren.

Das Verständnis für die maßgebenden Leistungsziele und deren Verknüpfung mit geeigneten Prüfkriterien stellt somit eine grundlegende Verständniskompetenz zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren dar. Als erste Orientierung zur Definition bzw. Unterscheidung von Leistungszielen können die Ausführung in [EN1990] und [EN1997] herangezogen werden. EN 1990 unterscheidet „*Prinzipien und Anforderungen für die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken*“<sup>14</sup>. Als Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit werden dort

---

<sup>12</sup> s. DIN EN ISO 9000:2005 [ISO9000], 3.1 Qualitätsbezogene Begriffe, hier Definition des Begriffs *Qualität*: „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt*“; und die dortige ANMERKUNG 2 „*‚Inhärent‘ bedeutet [...] ‚einer Einheit innewohnend‘, insbesondere als ständiges Merkmal*“ sowie Definition des Begriffs *Anforderung*: „*Erfordernis oder Erwartung, das oder die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist.*“

<sup>13</sup> Das Hauptaugenmerk liegt in der vorliegenden Arbeit auf dem Einsatz der Produkte und Verfahren in den Kanal- und Leitungsnetzen, d.h. der Anwendung. Nicht betrachtet werden hier die von Herstellerseite z.B. produktionsbedingt formulierten Anforderungen, wie die Verarbeitbarkeit und Qualität der Ausgangsmaterialien.

<sup>14</sup> s. [EN1990], Abschnitt 1.1 (1)

Zustände eingestuft<sup>15</sup>, die „die Funktion des Tragwerks oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen oder das Wohlbefinden der Nutzer oder das Erscheinungsbild des Bauwerks betreffen“. Gebrauchstauglichkeitsanforderungen werden gemäß EN 1990 für jedes Projekt besonders vereinbart. EN 1997 bezieht sich demgegenüber in der geotechnischen Betrachtung auf „Anforderungen an die Festigkeit, Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Bauwerke“<sup>16</sup> und ergänzt in der Betrachtung für Dränsysteme von Stützbauwerken auch die Begrifflichkeit des „Funktionieren eines Entwässerungssystems“<sup>17</sup>. Das für Rohrleitungen äußerst relevante Thema der Dichtheit wird in EN 1990 weder behandelt, noch der Gebrauchstauglichkeit zugeordnet. Auch EN 1997 führt die Dichtheit lediglich mit Blick auf besondere Fragestellungen, wie Gesteinseigenschaften<sup>18</sup> oder die Wasserdichtheit von Stützbauwerken<sup>19</sup> an; Kanal- und Leitungsbauwerke werden nicht angesprochen.

Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf die besondere Rolle der Dichtheit von Kanälen und Leitungen in rechtlichen Normen<sup>20</sup> werden die folgenden drei grundlegenden Leistungsziele (vgl. [EN752], [Ste99]) unterschieden:

- **Standsicherheit**, insbesondere als Nachweis der Widerstandsfähigkeit des Materials und der Tragsicherheit des Bauteils oder Bauwerks,
- **Funktionsfähigkeit**, insbesondere als Fähigkeit zur Durchleitung des transportierten Mediums in ausreichender Menge und Qualität,
- **Dichtheit**, insbesondere die Undurchlässigkeit der Rohrwandung und -verbindungen gegenüber inneren und äußeren Medien.

Werden technische Qualitäten zur Erfüllung dieser Leistungsziele über eine definierte Nutzungsdauer zugesichert, so kann auch dieser Zeitbezug zur Definition eines weiteren Leistungsziels herangezogen werden. Hier bietet sich in Anlehnung an die o.a. Definitionen aus [EN1990] und [EN1997] die

- **Dauerhaftigkeit**, mit Blick auf die über die Nutzungsdauer zugesicherten Eigenschaften,

---

<sup>15</sup> s. [EN1990], Abschnitt 3.4

<sup>16</sup> s. [EN1997], Abschnitt 1.1.1 (3)

<sup>17</sup> s. [EN1997], Abschnitt 9.4.2 (1) „Wenn Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit des geplanten Tragwerks vom erfolgreichen Funktionieren eines Entwässerungssystems abhängen, sind die Folgen seines Versagens hinsichtlich Sicherheit und Reparaturaufwand zu bedenken.“

<sup>18</sup> s. [EN1997], Abschnitt 3.3.8.1 (1)

<sup>19</sup> s. [EN1997], Abschnitt 9.4.1 (8)

<sup>20</sup> Eigenständige Anforderungen an die Dichtheit sind z.B. für private Abwasserleitungen in LWG NW §61a [NRW07] gesetzlich verankert.



als technischer Begriff an. Die Dauerhaftigkeit soll daher ergänzend zur Standsicherheit, Funktionsfähigkeit und Dichtheit im Sinne einer expliziten Zeitdimension als viertes Leistungsziel eingeführt und in Abschnitt 3.5 detailliert betrachtet werden.

Einzelne Qualitätsanforderungen können sich verändern<sup>21</sup> und auch unterschiedliche Leistungsziele betreffen; so stehen z.B. Forderungen zur Verformungsbeschränkung sowohl mit der Standsicherheit als auch Dichtheit in Wechselwirkung. Insbesondere gesetzliche Regelungen definieren fortlaufend konkrete gesellschaftliche Ziele, so z.B. die Landeswassergesetze oder Landesbauordnungen der Länder. Mit Blick auf das Inverkehrbringen von Bauprodukten für die Anwendung im privaten Bereich werden explizit entsprechende Prüfverfahren und -kriterien für Bauprodukte und -verfahren vereinbart. Stellvertretend für die Länder nimmt diese Aufgabe das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) in Berlin wahr und bedient sich in der Umsetzung anerkannter Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen. Der gesetzliche Rahmen und die grundsätzlichen Anforderungen leiten sich dabei aus den Vorgaben der Bauproduktenrichtlinie [BPR03], dem Bauproduktengesetz [BPG98], der Musterbauordnung [MBO02] und den entsprechenden Bauordnungen der Länder sowie den damit verbundenen allgemein anerkannten Regeln der Technik ab.

Vor diesem Hintergrund ist ein klares Verständnis für die Bedeutung der Leistungsziele und der damit verbundenen Qualitätsanforderungen und Prüfkriterien gefragt. Die Zusammenhänge werden nachfolgend für die einzelnen Leistungsziele beispielhaft erläutert.

### 3.2 Standsicherheit

Das Leistungsziel der Standsicherheit von Gründungen und unterirdischen Bauwerken ergibt sich unmittelbar aus den allgemein anerkannten Regeln der Technik (vgl. [EN1997]). Im Abwasserbereich wird nach [EN752] explizit gefordert: *„Abwasserleitungen, Kanäle sowie andere Bauteile müssen so geplant, gebaut, unterhalten und betrieben werden, dass der bauliche Zustand über die Nutzungsdauer aufrechterhalten wird.“*<sup>22</sup>

Prüfkriterien für Produkte und Verfahren dienen in der Regel dem Nachweis von Rechenwerten der Werkstoffkennwerte als Grundlage für die statische Berechnung im Einzelfall. Typisches Beispiel ist der Nachweis von Zug-, Druck- und Biegezugfestigkeiten sowie des Elastizitätsmoduls für die statische Berechnung nach

---

<sup>21</sup> Eine Veränderung der Qualitätsanforderungen äußert sich z.B. in veränderten Aufgabenstellungen und Prüfprogrammen bei Neuauflage von IKT-Warentests für die gleiche Produkt-/Verfahrensgruppe (vgl. [IKTW05a] und [IKTW08a]).

<sup>22</sup> s. [EN752], Abschnitt 5.1.10

den Arbeits- bzw. Merkblättern der DWA [DWA-A127], [DWA-M127], [DWA-A161]. Darüber hinaus können biegesteife Rohre auch als Bauteil pauschal gegenüber Vertikallasten im Scheiteldruckversuch nachgewiesen werden.

Eine Kernkompetenz der Prüfung und Bewertung liegt dann darin, die Relevanz der untersuchten Eigenschaften und Prüfkriterien mit Blick auf die später zu erwartenden statischen Nachweise zu verstehen. Während z.B. Zugfestigkeiten im Druckrohrbereich ein dominantes Prüfkriterium für die Qualitätsanforderung „Beständigkeit gegenüber Innendruck“ sind, werden Freispiegelleitungen im Wesentlichen durch Außendruck und Querschnittsbiegung beansprucht, so dass hier z.B. bei biegeweichen Rohr-Boden-Systemen die Verformbarkeit und die Biegung der Rohrwandung und damit andere Prüfkriterien, wie der E-Modul und das Kriechverhalten des Werkstoffs, maßgeblich sind [IKT05]. Als Orientierung fast Tabelle 1 für das Leistungsziel „Standicherheit“ einige typische Qualitätsanforderungen und charakteristische Prüfkriterien zusammen.

*Tabelle 1 : Leistungsziel Standicherheit: Typische Qualitätsanforderungen, charakteristische Prüfkriterien, Beispiele für Norm- bzw. Literaturangaben*

<b>Typische Qualitätsanforderungen</b>	<b>Charakteristische Prüfkriterien</b>	<b>Normen/Literatur (Bsp.)</b>
Rissfreiheit unter äußeren Lasten	Biegezugfestigkeiten des Querschnitts, Ringbiegezug-, Scheiteldruckfestigkeit	[ISO178], [EN1916] [Hor89], [DINV1201]
Verformungsbegrenzung unter äußeren Lasten	Elastizitätsmodul Kurzzeit/Langzeit, Ringsteifigkeit Kurzzeit/Langzeit	[ISO178] [EN1228], [EN761]
Beständigkeit gegenüber Innendruck	Zweiachiale Zugfestigkeit, Zeitstandinnendruckfestigkeit	[ISO9080]
Beständigkeit gegenüber Außen(wasser)druck	Maximale Beullast	[IKT05]
Längsbiegefähigkeit beim Einbau	Minimaler Krümmungsradius	[Zim94]
Chemische Beständigkeit bei Durchfluss des Transportmediums	Korrosionsbeständigkeit	[ISO175]
Mechanische Beständigkeit bei Durchfluss des Transportmediums	Abriebfestigkeit	[EN295] [DIN19565]
Widerstandsfähigkeit gegenüber Einsatz mechanischer Reinigungsgeräte	Hochdruckspülfestigkeit	[DIN19523]
Unempfindlichkeit beim Einbau	Schlagfestigkeit, Abwinkelbarkeit	[ISO179], [DWA-A125]

### 3.3 Dichtheit

Das Leistungsziel der Dichtheit unterirdischer Kanäle und Leitungen spielt im Hinblick auf den möglichen Verlust des transportierten Mediums und die Wechselwirkungen mit der Umgebung eine herausragende Rolle für die Prüfung und Bewertung. In der Gasversorgung [DVGW G401] ist eine Gefährdung der Umgebung und anderer Anlagen durch Gasaustritte zu vermeiden. In der Wasserversorgung wird nach [DVGW W401] die Verminderung von Wasserverlusten insbesondere vor dem Hintergrund wirtschaftlicher Gründe angesprochen und um Fragen der Standicherheit des umgebenden Bodens bei Bodenausspülungen ergänzt. Eine besondere Bedeutung hat das Leistungsziel der Dichtheit in der Abwasserentsorgung. Dies betrifft neben dem Schutz des Grundwassers vor Exfiltrationen auch die Vermeidung von Infiltrationen, z. B. mit Blick auf die

Funktionsfähigkeit der Anlagen, mögliche Bodeneinspülungen und daraus resultierende, weitere Gefährdungspotenziale (vgl. [WHG07]<sup>23</sup>, [EN752]).

Besondere Kompetenz ist gefordert, wenn die Erfüllung bzw. Nichterfüllung von Prüfkriterien mit der tatsächlichen Wahrscheinlichkeit einer Dichtheit des Kanals bzw. der Leitung in Verbindung zu bringen ist. Sollen z.B. zulässige Wasserzugaben mögliche Sättigungsprozesse des Rohrwerkstoffes, Restluftverdrängung oder Werkstoffdehnungen bei der Wasserdruckprüfung berücksichtigen (vgl. [EN1610]), so kann die Erfüllung der Prüfkriterien zwar grundsätzlich als geeigneter Hinweis auf Dichtheit interpretiert werden. Werden aber durch eine Inspektion der Rohrwand, Rohrverbindungen und Anschlüsse dennoch offensichtliche Undichtheiten optisch erkannt, z.B. bei direkter Beobachtung (vgl. [DIN4033]) oder ergänzender Untersuchung von Probekörpern (vgl. [APS05]), sind diese Ergebnisse als maßgeblich zu bewerten, auch wenn die zunächst hilfswise herangezogenen Prüfkriterien nach [EN1610] erfüllt sind. In ähnlicher Weise sind auch Art und Größe der Prüfbeanspruchungen bei der Dichtheitsprüfung kritisch zu hinterfragen, so z.B. wenn Ergebnisse aus Innendruckprüfungen als Hinweis für die Außendruckdichtheit gewertet werden sollen. Als Orientierung fasst Tabelle 2 für die Zieldimension „Dichtheit“ einige typische Qualitätsanforderungen und charakteristische Prüfkriterien zusammen.

*Tabelle 2 : Leistungsziel Dichtheit: Typische Qualitätsanforderungen, charakteristische Prüfkriterien, Beispiele für Norm- bzw. Literaturangaben*

<b>Typische Qualitätsanforderungen</b>	<b>Charakteristische Prüfkriterien</b>	<b>Normen/Literatur (Bsp.)</b>
Dichtheit bei Innenwasserdruck	Keine Wasseraustritte, Maximale Wasserzugabe	[APS05], [DIN50104] [EN1610], [EN1916]
Dichtheit bei Außenwasserdruck	Keine Wassereintritte, kein Druckabfall im äußeren Prüfraum	[IKT05]
Dichtheit bei Luft-/Gasdruck	Maximaler Druckabfall	[TÜV96]
Dichtheit unter Verformungen aus Betriebslasten	Kein Wasseraustritt unter Abwinklung und Scherkräfteinfluss	[EN1916]
Dichtheit gegenüber Wurzelwuchs im Kanal- bzw. Leitungsumfeld	Kein erkennbarer Wassereintritt/-austritt unter Scherkraft oder Außenwasserdruck, Anpressdruckverteilung der Dichtung	[DINV1201] [RUB04]

### 3.4 Funktionsfähigkeit

In der Wasserversorgung entspricht die Funktionsfähigkeit nach [DVGW W401] insbesondere der Aufrechterhaltung des Mindestversorgungsdruckes, der Lieferung ausreichender Wassermengen und der Einhaltung einer durch die Trinkwasserverordnung definierten Wasserqualität. In der Gasversorgung dominieren Kapazitätsfragen die Funktionsfähigkeit der Verteilungsnetze (vgl. [DVGW G401]). Die Funktion der Abwassersysteme ist nach [EN752] wiederum

<sup>23</sup> vgl. [WHG07], WHG §7a, 18a, 18b

unmittelbar mit dem Ziel der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit verbunden. Entwässerungssysteme werden vorgesehen, um die Ausbreitung von Krankheiten durch Kontakt mit im Wasser enthaltenen Verunreinigungen zu vermeiden, Trinkwasserquellen vor der Kontamination mit im Wasser enthaltenen Verunreinigungen zu schützen, Regenabfluss und Niederschlagswasser abzuleiten und damit die Gefährdung der Öffentlichkeit zu minimieren. Ziel ist es hier, das System so zu planen, zu bauen, zu betreiben, zu unterhalten und zu sanieren, dass die mit der Ableitung von Abwasser verbundenen Gesundheits- und Sicherheitsrisiken minimiert werden.

Vor dem Hintergrund der vorgenannten technischen Regeln bleibt festzustellen, dass die Funktionsfähigkeit im Wesentlichen mit der Fähigkeit zur Durchleitung des transportierten Mediums in ausreichender Menge und Qualität in Verbindung steht. Wechselwirkungen zur Forderung nach Dichtheit sind möglich, z.B. wenn im Falle von Infiltrationen in Kanäle die hydraulische Leistungsfähigkeit des Systems beeinträchtigt wird und im Falle von Exfiltrationen aus Trinkwasserleitungen die Wasserverluste zu Versorgungsengpässen führen. Gewinnt die Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems an höhere oder niedrigere Auslastungsgrade an Bedeutung, so sind darüber hinaus die Prüfkriterien für die eingesetzten Produkte und Verfahren auch hierauf auszurichten. Dies betrifft z.B. die Kompatibilität der bautechnischen Systeme untereinander oder die Einbindung der Produkte in ein Gesamtsortiment aus Rohren, Anschlüssen, Armaturen und Schachtbauteilen.

Im Gesamtblick hängen die Qualitätsanforderungen und Prüfkriterien der Funktionsfähigkeit maßgeblich von der Bewertung des Bauteils als Systembestandteil des Gesamtnetzes ab. In diesem Sinne lassen sich nur wenige allgemeine Qualitätsanforderungen und charakteristische Prüfkriterien zur Funktionsfähigkeit eines einzelnen Kanal- bzw. Leitungsstücks definieren, wie z.B. die zur hydraulischen Bemessung notwendigen Kenntnisse über Rohrreibungswiderstände sowie die für die betriebliche Wartung notwendige Inspizierbarkeit der Rohrwandung<sup>24</sup> und Widerstandsfähigkeit gegenüber Reinigungsgeräten.

### **3.5 Dauerhaftigkeit**

In EN 1990:2002 [EN1990]<sup>25</sup> werden als Planungsgröße für die Nutzungsdauer von Gebäuden und anderen gewöhnlichen Tragwerken 50 Jahre angesetzt, maximal 100 Jahre aber nur für monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke. In [LAW05] werden für die Hauptanlagen der Wasserversorgung und

---

<sup>24</sup> vgl. [IKT08c] zu Anforderungen an die Farbgebung von PE-Rohren für die Kamerainspektion

<sup>25</sup> s. [EN1990], Abschnitt 2.3 „Geplante Nutzungsdauer“, Abs. 1, Tabelle 2.1

Abwasserableitung Rechenwerte für die durchschnittliche Nutzungsdauer von 60 Jahren vorgeschlagen. Fragen der Dauerhaftigkeit unterirdischer Kanäle und Leitungen gewinnen u.a. im Zuge der Bewertung des Anlagevermögens und der Sanierungsplanung an Bedeutung (vgl. [DVGW W401], [DVGW G401], [EN752]).

In EN 1990:2002 [EN1990]<sup>26</sup> wird das Leistungsziel „Dauerhaftigkeit“ als allgemeine Anforderung an ein Tragwerk wie folgt definiert: *„Das Tragwerk ist so zu bemessen, dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer nicht unvorsehen verändern. Dabei sind die Umweltbedingungen und die geplanten Instandhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen.“* Als zeitabhängige „Veränderungen der Eigenschaften“ sind im vorliegenden Anwendungsfall insbesondere Veränderungen zu interpretieren, die zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit, Dichtheit oder Funktionsfähigkeit führen können. Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von unterirdischen Kanälen und Leitungen sind<sup>27</sup>:

- *die vorgesehene oder vorhersehbare zukünftige Nutzung*; dies betrifft für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen insbesondere die Beschaffenheit der durchzuleitenden Medien, so können z.B. Kanalisationen während der Nutzungsdauer im Einzelfall durch nicht vorhergesehene Indirekteinleitungen belastet werden.
- *die erwarteten Umweltbedingungen*; dies betrifft für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen z.B. die Beschaffenheit von Böden und Grundwasser sowie äußere Belastungen aus Verkehrs- und Auflasten sowie Vegetationseinflüsse. Nach EN 1990:2002 [EN1990]<sup>28</sup> sind *„die Umweltbedingungen bereits während der Planungsphase zu erfassen“*.
- *die Zusammensetzung, Eigenschaften und das Verhalten der Baustoffe und Bauprodukte sowie des Baugrundes*; dies betrifft für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen z.B. die Langzeit-Eigenschaften von Rohrleitung und Auflager, die Setzungseigenschaften von Bettungszone, Grabenverfüllung und Fahrbahnoberfläche sowie Einflüsse aus angrenzenden Baumaßnahmen.
- *die Wahl des Tragsystems*; hier sind für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen insbesondere die Unterschiede zwischen biegesteifen und biegeweichen Rohr-Boden-Systemen (s. Abschnitt 4.3) und

---

<sup>26</sup> s. [EN1990], Abschnitt 2.4 „Dauerhaftigkeit“, Abs. 1

<sup>27</sup> Die Aufzählung orientiert sich an [EN1990], Abschnitt 2.4 (2); *kursiver Text* entstammt unmittelbar der Norm.

<sup>28</sup> s. [EN1990], Abschnitt 2.4, Abs. 3

deren Empfindlichkeit gegenüber Biegungen, Setzungen, Lastkonzentrationen und Eingriffen in der Umgebung zu nennen.

- *die Gestaltung der Bauteile und Anschlüsse*; hier sind für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen insbesondere die Übergänge zwischen Produkten aus unterschiedlichen Werkstoffgruppen zu nennen. In den Schadensstatistiken der Kanäle dominieren z.B. fehlerhafte Anschlüsse (vgl. [Ber05]), die auch Angriffspunkte für weitere zeitabhängige Beanspruchungen, z.B. aus Wurzelwuchs, bieten können.
- *die Qualität der Bauausführung*; hierauf ist beim Bau und der Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen ein besonderes Augenmerk zu legen, da bei Abnahme der Bauleistungen die Kanäle bzw. Leitungen i.d.R. überdeckt sind und auch während der Nutzung mit vertretbarem Aufwand lediglich eine Inneninspektion möglich ist.
- *die geplante Instandhaltung während der geplanten Nutzungszeit*; unterirdische Kanäle und Leitungen werden in diesem Zusammenhang z.B. durch den Geräteeinsatz bei Reinigungs- und Reparaturmaßnahmen beansprucht.

Nach [EN1990] gilt: „Das Maß der zeitabhängigen Änderungen der Eigenschaften darf aufgrund von Berechnungen, Messungen und Erfahrungen mit bereits erstellten Bauwerken oder einer Kombination solcher Vorerfahrungen eingeschätzt werden.“ Gerade mit Blick auf die Erfahrungen zum Produkteinsatz vor Ort, bietet sich im vorliegenden Anwendungsfall eine enge Abstimmung der Prüfbedingungen mit den Anwendern und Netzbetreibern an (vgl. [IKTW02], [IKTW04], [IKTW05], [IKTW05a], [IKTW06]). Die maßgeblichen Einflüsse auf die Bauteilqualität können sich nutzungsdauerorientiert deutlich von dem in Abbildung 3 (vgl. [DIN31051], [Ste99]) dargestellten Ansatz einer über die Nutzungsdauer kontinuierlichen Abnutzung, wie z.B. Abrieb, unterscheiden. Beispiele sind Schlagbeanspruchungen beim Einbau, Werkstoffveränderungen durch Hochdruckreinigung [IKT04] und insbesondere chemische und chemisch-biologische Angriffe (vgl. [Sor07], [Bie87]) sowie Korrosionsangriffe aus unsachgemäßen Einleitungen (vgl. [ISO175], [IKT02]) oder auch Wurzelwuchs [RUB04].

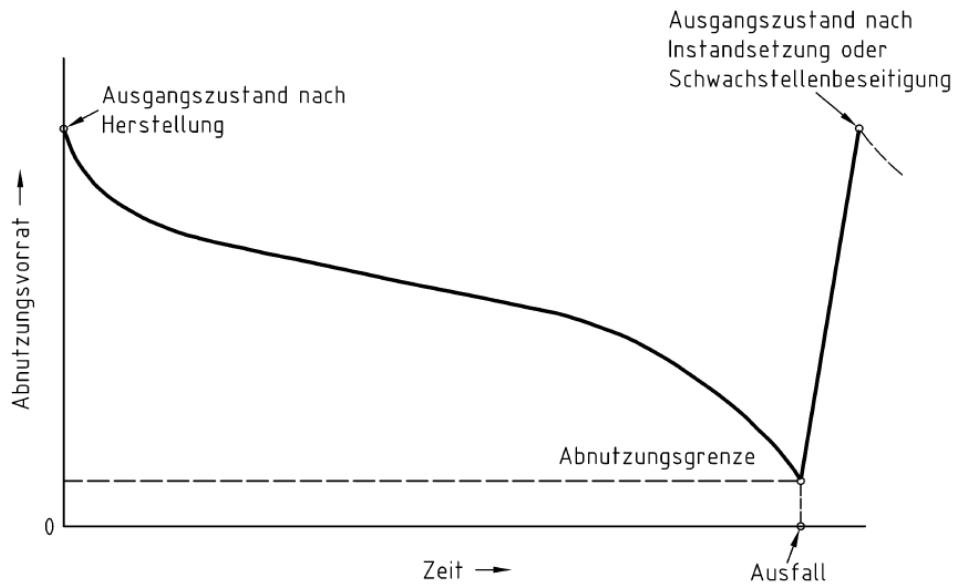


Abbildung 3: Abbau des Abnutzungsvorrates und seine Erstellung durch Instandsetzung oder Verbesserung; aus [DIN31051]<sup>29</sup>

Schlussendlich sind sämtliche Einflussfaktoren und Leistungsziele, die während der Nutzungsdauer an das unterirdische Kanal- bzw. Leitungsbauwerk gestellt werden, bei der Auswahl von Prüfkriterien für die eingesetzten Produkte und Verfahren in geeigneter Weise zu berücksichtigen. Dies betrifft neben den Leistungszielen der Standsicherheit, Funktionsfähigkeit und Dichtheit auch die Handhabbarkeit und Einbaubarkeit des Produktes sowie die Entsorgungsfähigkeit nach Ablauf der Nutzungsdauer. Abbildung 4 veranschaulicht beispielhaft, wie sich die im Leistungsspektrum aus Standsicherheit, Funktionsfähigkeit und Dichtheit definierten Eigenschaften in Abhängigkeit der Nutzungsdauer grundsätzlich verändern können und welche „Qualitätszeitpunkte“ einer besonderen Betrachtung bedürfen. Der Begriff Qualität kann in Abbildung 4 als Maßstab für die gemeinsame Erfüllung der aus den Leistungszielen Standsicherheit, Dichtheit und Funktionsfähigkeit abgeleiteten Qualitätsanforderungen verstanden werden.

<sup>29</sup> In [DIN31051] wird explizit angemerkt, dass die dargestellte Abbaukurve des Abnutzungsvorrates nur ein Beispiel der möglichen Verläufe ist.

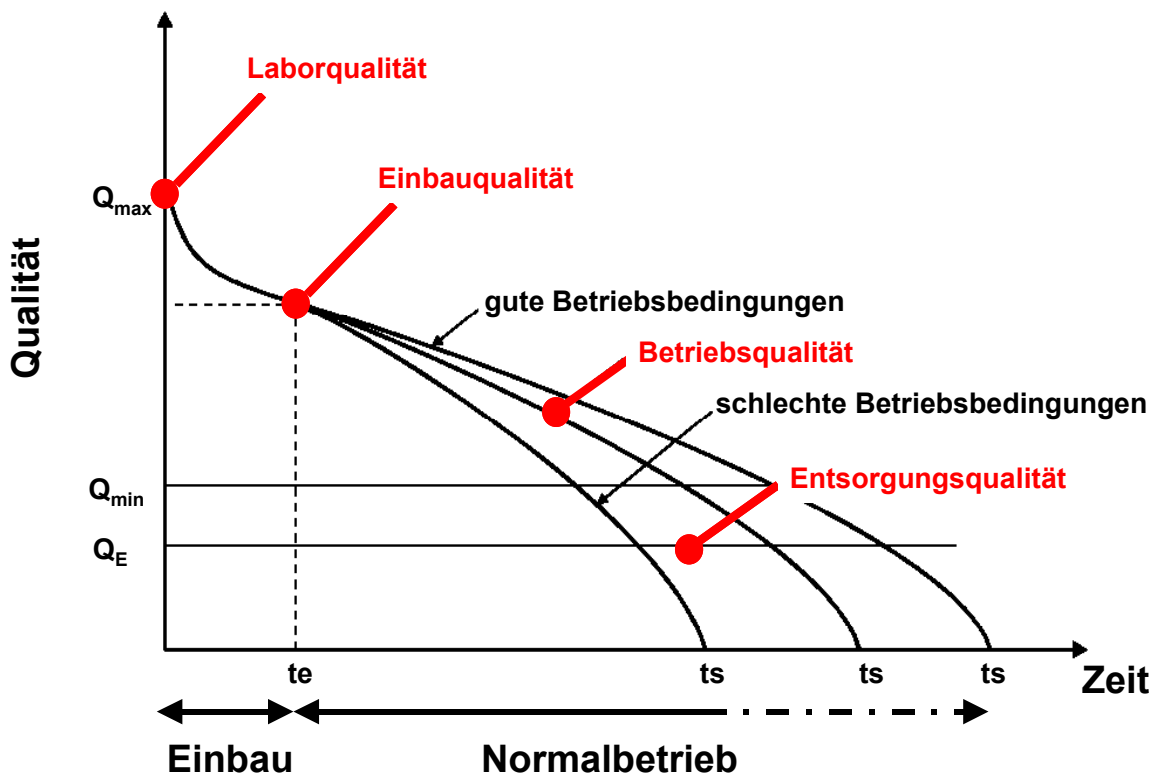


Abbildung 4 : Qualitätsverlauf über die Nutzungsdauer; in Anlehnung an Abbildung 3

Zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren liegt nun die besondere Kompetenz in der Auswahl des Prüfaufbaus, des Prüfzeitpunktes und der Interpretation der Prüfergebnisse im Zusammenhang mit den gewählten Belastungsbedingungen, dem erwarteten Qualitätsverlauf über die Nutzungsdauer und den Risiken dieser Einschätzungen<sup>30</sup>. Folgende Qualitätszeitpunkte sind dabei von besonderer Bedeutung:

#### Laborqualität:

Der Hersteller eines Produktes und/oder Verfahrens weist unter Laborbedingungen die grundsätzliche Einsatzfähigkeit seines Produktes nach. Es handelt sich um Idealbedingungen an z.B. eigens aufgebauten Probestrecken, die gerade zum Zwecke der Prüfung dem optimalen Einsatzbereich und damit der maximal erzielbaren Qualität  $Q_{\max}$  entsprechen.

#### Einbauqualität:

Produkte und Verfahren entfalten erst nach örtlichem Einbau in ein Ver- oder Entsorgungsnetz ihre eigentliche Qualität als tragendes Element eines unterirdischen Kanal- oder Leitungsbauwerks bzw. als Funktions- oder Dichtelement im Netz. Die

<sup>30</sup> Zur wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtung des Einflusses der Zeit auf den Netzzustand s. [Ste05].



Einbaubedingungen selbst können maßgebliche Belastungssituationen darstellen (vgl. [IKT07]) oder gleichzeitig Teil der Produktionsbedingungen sein (vgl. [IKT09]).

**Betriebsqualität:**

In Abhängigkeit der Betriebsbedingungen sind Bauwerke vielfältigen Deteriorationsmechanismen ausgesetzt (vgl. [RUB01], [RUB09]). Auch auf unterirdische Kanal- und Leitungsnetze wirken vielfältige Einflüsse während des Betriebs, die die Qualität der eingesetzten Produkte beeinträchtigen können. Hierzu gehören physikalisch-chemisch-biologische Beanspruchungen aus der Einleitung und dem Transport des Mediums, Belastungs- und Beanspruchungsänderungen im Kanal- bzw. Leitungsumfeld oder auch Beanspruchungen aus Instandhaltungsmaßnahmen, wie z.B. die Hochdruckreinigung, das Ausfräsen von Inkrustationen und die Erstellung bzw. Stilllegung von Hausanschlüssen.

**Entsorgungsqualität:**

Reicht die Qualität der eingesetzten Produkte und Verfahren zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr aus, um die Anforderungen an Standsicherheit, Dichtheit und Funktionsfähigkeit betriebssicher zu erfüllen, d.h. die für den Betrieb erforderliche Mindestqualität  $Q_{\min}$  wird unterschritten, muss das Kanal- bzw. Leitungsbauwerk mit der tatsächlichen Qualität  $Q_E$  saniert, erneuert oder außer Betrieb genommen werden. In Abhängigkeit der möglichen Entsorgungswege und zu erwartenden Entsorgungskosten kann diese *letzte Qualitätsbetrachtung* einen wesentlichen Einfluss auf die Bewertung der Nachhaltigkeit des eingesetzten Produktes oder Verfahrens haben (vgl. [IKT05b], [EWG83], [KWG05]).

Eine besondere Kompetenz liegt vor diesem Hintergrund in der Einschätzung der maßgeblichen Einflussfaktoren und Risiken für die o.a. Qualitäten und den zeitlichen Qualitätsverlauf. Um das hierfür notwendige Wissen zu erlangen, bietet sich die mathematisch-physikalische und versuchtechnische Modellierung der betrachteten baulichen Systeme an. Dies setzt allerdings eine hohe Verständniskompetenz im Umgang mit den zur Verfügung stehenden Modellen voraus. Hierauf wird in den folgenden beiden Abschnitten detailliert eingegangen.

## 4 Mathematisch-Physikalische Modelle

Unterirdische Kanal- und Leitungsbauwerke sind durch besondere Wechselwirkungen zwischen Rohr und Boden sowie den inneren und äußeren Belastungen aus Medieneinfluss, Grundwasser und Verkehr gekennzeichnet. Eine Kernkompetenz für die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren stellt die Auswahl von und der Umgang mit mathematisch-physikalischen Modellen zur Beschreibung der Rohre und Rohrleitungen, der Wechselwirkungen des Rohr-Boden-Systems und der inneren und äußeren Belastungen dar. Darüber hinaus lässt sich die Aussagekraft von Dichtheitsprüfungen nur bei Kenntnis des physikalischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Hintergrundes zuverlässig einschätzen. Diese nach Erfahrung des Verfassers für den vorliegenden Anwendungsfall wesentlichen<sup>31</sup> mathematisch-physikalischen Modellvorstellungen werden nachfolgend erläutert.

### 4.1 Rohre und Rohrleitungen

Die im Kanal- und Leitungsbau verwendeten Rohre lassen sich geometrisch überwiegend als Kreiszyinderschalen darstellen. Abweichende Querschnittsformen, wie Kreis-, Ei-, Maul- oder Rechteckquerschnitte werden insbesondere aus hydraulischen Gründen für Freispiegelkanäle im Abwasserbereich eingesetzt. Eine Übersicht zu besonderen Querschnittsformen und Einsatzbereichen enthalten [Ste99], [Ste03].

Kreiszyinderschalen können als Sonderfall der allgemeinen Rotationsschalen verstanden werden, die wiederum ein Sonderfall der Flächentragwerke sind. Die Belastungen, Beanspruchungen und Eigenschaften von Kreiszyinderschalen lassen sich für den vorliegenden Anwendungsfall getrennt im Querschnitt am Kreisringmodell, in Längsrichtung als Biegeproblem und schließlich als Frage nichtlinearen Werkstoffverhaltens verstehen. Die wesentlichen Zusammenhänge werden nachfolgend zusammengefasst.

#### 4.1.1 Flächentragwerke

Eine umfassende Darstellung zur Mechanik der Flächentragwerke findet sich in der Monographie [Bas85], die auf dem tensoriellen Konzept von ZERNA [Zer49] aufbaut.

---

<sup>31</sup> Bewusst wird hier der unscharfe Begriff „wesentlich“ gewählt, vgl. hierzu [BUW08]: „*Modelle im technisch-naturwissenschaftlichen Kontext beruhen in der Regel auf (phänomenologischen) Analogien zu beobachteten realen physikalischen Vorgängen. Eine Grundvoraussetzung für die Nutzbarkeit von Modellen ist, dass sie einen bestimmten Satz von beobachteten input-output-Beziehungen (Tests) nachbilden können. Naturgemäß sind diese Beziehungen unvollständig und daher nur eingeschränkt dazu geeignet, ein bestimmtes Partialmodell aus einer Klasse vorhandener Modelle eindeutig auszuwählen. In der Anwendung werden dann diese Modelle zu Vorhersagen in Situationen genutzt, die nicht durch die Beobachtung in der Realität abgesichert sind. Es entstehen somit zwangsläufig Spielräume bzw. Unschärfen der Modellbildung, entweder quantitativ (die kennzeichnenden Parameter betreffend) oder qualitativ (die innere Struktur des Modells) betreffend.*“

Die folgenden Darstellungen orientieren sich an einer hieran angelehnten Analyse in [Bos97] für den besonderen Anwendungsfall des Baus und der Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen.

Nach [Bas85]<sup>32</sup> gilt: *„Ein Flächentragwerk ist als ein in seiner Gestalt durch die Dünne-Hypothese eingeschränkter, mit Materie gefüllter Teilraum des Euklidischen Raums  $E^3$  (Schalenraum) beschreibbar, der lastabtragende Eigenschaften besitzt. Zweidimensionale Modelltheorien hierfür können nun auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen entwickelt werden. Der erste Herleitungsgang definiert das Flächentragwerk als ein dünnes klassisches Kontinuum, d.h. als eine zusammenhängende und kompakte Menge materieller Raumpunkte, die mit jeweils drei translatorischen Freiheitsgraden behaftet sind. Das theoretische Fundament bilden damit voraussetzungsgemäß die Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik. [...]. Der zweite Weg zur Herleitung flächenhafter Modelltheorien erweitert zunächst unsere Erfahrungswelt um die Definition eines orientierten zweidimensionalen Kontinuums. Hierunter wird eine mit materiellen Flächenpunkten dicht belegte Fläche im  $E^3$  verstanden, [...]. Dieses zweidimensionale Kontinuum besitze die Fähigkeit, Lasten durch Schnittgrößen abzutragen. Jedem mit endlicher Masse behafteten Flächenpunkt sind neben den drei translatorischen zusätzlich drei rotatorische Freiheitsgrade [...] zugeordnet [...]. Kraft- und Momentenkomponenten entsprechen diesen Freiheitsgraden als äußere Kraftgrößen auf der Fläche im Raum. Die Schnittgrößen dieses unendlich dünnen Kontinuums werden durch Schnittkräfte und Schnittmomente gebildet.“*

Zur Vereinfachung wird häufig angenommen, dass die Schnitt- und Verzerrungsgrößen im Elastizitätsgesetz durch eine lineare Beziehung verknüpft sind und die auftretenden kinematischen Variablen als infinitesimal, d.h. als sehr klein angesehen werden können. Im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau werden darüber hinaus die theoretischen Betrachtungen meist auf die überwiegend eingesetzten Vollwandquerschnitte beschränkt und Inhomogenitäten des Tragwerkes nicht berücksichtigt. Allerdings werden in der Abwassertechnik auch Kunststoffrohre mit profilierter Wandung unterschiedlichster Geometrie eingesetzt (vgl. [EN13476]). Weitergehende Ausführungen zu den damit verbundenen Beanspruchungen und möglichen Beschreibungsansätzen finden sich in [Moo94], [Sel94], [Mel84], [Jär89], [Sör92]. Auf die Prüfung und Bewertung des Trag- und Verformungsverhaltens profilierter Großrohre wird in [IKT05] eingegangen.

---

<sup>32</sup> s. [Bas85], S. 84 bis S. 86

### 4.1.2 Rotations- und Kreiszyinderschalen

In der Mechanik der Flächentragwerke können zur weiteren Vereinfachung die Betrachtungen auf Vollwandquerschnitte eingeschränkt und alle verformungsbedingten Änderungen der Tragwerksdicke sowie die Normalspannungen senkrecht zur Mittelfläche ebenso wie Einflüsse aus Temperaturänderung vernachlässigt werden. Darüber hinaus kann das Gleichgewicht näherungsweise am unverformten System formuliert werden. Wichtigstes Charakteristikum dieser linearen Theorie ist die Gültigkeit des Superpositionsgesetzes. Zur Vereinfachung der Darstellung wird die Summationsregel genutzt, d.h. es wird über alle Zahlenwerte summiert, die ein Index annehmen kann, wenn dieser in einem indizierten Ausdruck einmal oben und einmal unten auftritt. Dabei durchlaufen griechische Indizes die Zahlenwerte 1,2 und lateinische die Werte 1,2,3.

Rotationsschalen lassen sich dann über ihre Mittelfläche definieren, die durch Drehung einer ebenen Kurve  $r = r(\Theta^2)$  um eine in ihrer Ebene liegende Achse, beispielsweise um die  $x^3$ -Koordinatenachse, entsteht.  $\Theta^1$  bezeichnet den Winkel zwischen einer beliebigen Meridianebene und der  $(x^1, x^3)$ -Ebene;  $\Theta^2$  entspricht der Koordinate  $x^3$  (Abbildung 5a).

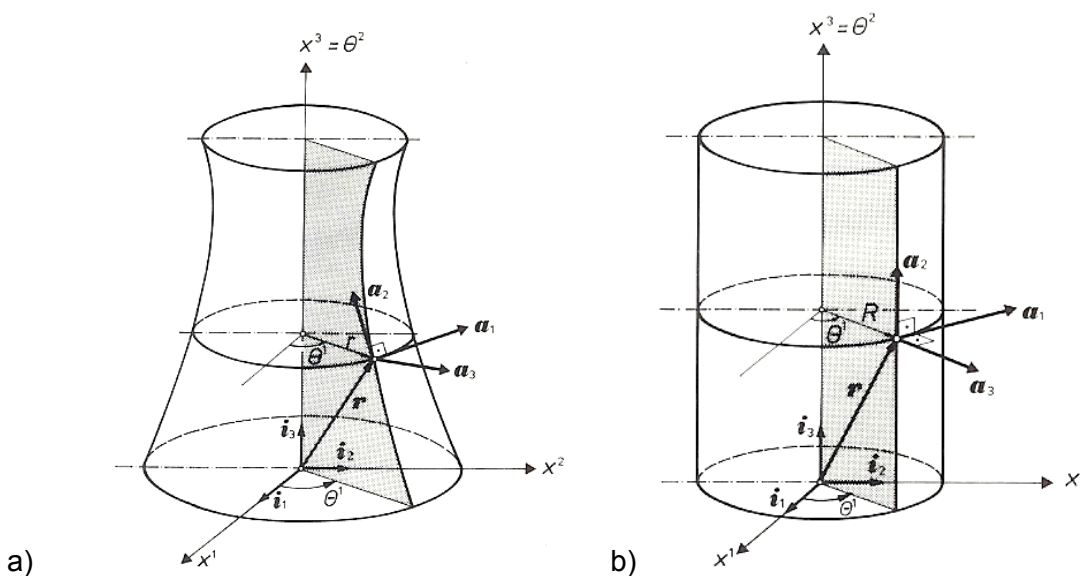


Abbildung 5 : Rotationsflächen mit Basisvektoren  $a_i$ ; aus [Bas85]  
 a) Allgemeine Rotationsfläche  
 b) Kreiszyinderschale

Mit den orthonormalen Basisvektoren  $i_1, i_2, i_3$  ergibt sich für den Ortsvektor  $\mathbf{r}$  einer allgemeinen Rotationsfläche

$$\mathbf{r} = r \cos \Theta^1 i_1 + r \sin \Theta^1 i_2 + \Theta^2 i_3.$$

Aus dem Ortsvektor lassen sich dann nach [Bas85] die entsprechenden ko- und kontravarianten Basisvektoren  $\mathbf{a}_\alpha$  bzw.  $\mathbf{a}^\alpha$ , die Komponenten des Maßensors  $a_{\alpha\beta}$  bzw.  $a^{\alpha\beta}$  sowie die Krümmungstensoren  $b_{\alpha\beta}$  bzw.  $b_\beta^\alpha$  ableiten.

Um auch den Tragwerksraum außerhalb der Mittelfläche beschreiben zu können, führt längs  $\mathbf{a}_3$  eine dritte, stets geradlinige Koordinate  $\Theta^3$ , die den von P aus gemessenen Abstand angibt. Damit beschreibt der Ortsvektor

$$\mathbf{r}^*(\Theta^i) = \mathbf{r}(\Theta^1, \Theta^2) + \Theta^3 \mathbf{a}^3(\Theta^1, \Theta^2) = \mathbf{r} + \Theta^3 \mathbf{a}^3 \quad (4.1-1)$$

$$\text{mit } -d/2 \leq \Theta^3 \leq +d/2$$

für jeden Koordinatenwert  $\Theta^3$ , der einen bestimmten Punkt  $P^*$  innerhalb der Tragwerksdicke  $d$  kennzeichnet, eine Fläche  $F^*$ .

Die kovarianten Basisvektoren von Punkten  $P^*$  des Schalenraumes werden in Abhängigkeit der Vektorbasis der Mittelfläche  $F$  dargestellt als

$$\mathbf{a}_\alpha^* = \mathbf{r}^*_{,\alpha} = \mathbf{r}_{,\alpha} + \Theta^3 \mathbf{a}_{3,\alpha} = \mathbf{a}_\alpha - \Theta^3 b_\alpha^\rho \mathbf{a}_\rho. \quad (4.1-2)$$

Die auf beide Laibungen eines Flächentragwerks einwirkenden Lastgrößen lassen sich dann als Lastvektor  $\mathbf{p}$  und Lastmomentenvektor  $\mathbf{c}$  mit

$$\mathbf{p} = p^\alpha \mathbf{a}_\alpha + p^3 \mathbf{a}_3 \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{c} = c^\rho (\mathbf{a}_3 \times \mathbf{a}_\rho) \quad (4.1-3a,b)$$

zusammenfassen. Ihre Intensität ist in der linearen Theorie stets auf die Flächeneinheit der Mittelfläche bezogen. Zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtszustandes in den Schnittrufern müssen innere Schnittgrößen wirksam werden, die als resultierende Schnittkraftvektoren  $\mathbf{n}^\alpha$  und Schnittmomentenvektoren  $\mathbf{m}^\alpha$  über die Tragwerksdicke  $d$  definiert sind.

Im Falle orthogonaler Basisvektoren entsprechen die eingeführten Komponenten den Normal-, Schub- und Querkräften bzw. Biege- und Torsionsmomenten. Eine Verknüpfung der o.a. Variablen kann über die Gleichgewichtsbedingungen erfolgen, die am unverformten Tragwerk formuliert werden<sup>33</sup>.

Der Dünne-Hypothese entsprechend wird die Annahme getroffen, dass die Relativverschiebung eines Punktes  $P^{*'}$  gegenüber  $P^*$  proportional zu seinem Mittelflächenabstand  $\Theta^3$  sei. Darüber hinaus sei das Tragwerk in  $\Theta^3$ -Richtung dehnungsfrei, d.h. es erfahre keine Dickenänderung.

<sup>33</sup> Die Herleitung der allgemeinen Gleichgewichtsbedingungen für Rotationsschalen ist im Rahmen des vorgestellten tensoriellen Konzepts umfassend in [Bas85] beschrieben. In Abschnitt 4.1.2 sollen die Darstellungen auf den für den Rohrleitungsbau relevanten Fall der Kreiszyinderschale beschränkt werden.

Im Rahmen einer linearen Theorie werden alle Verformungen als klein vorausgesetzt. Als erste Approximation der konstitutiven Beziehungen, die auch als Stoffgesetze oder physikalische Gleichungen bezeichnet werden, lassen sich die Elastizitätsgleichungen für linear-elastische und isotrope Flächentragwerke angeben zu [Bas85]

$$\tilde{n}^{(\alpha\beta)} = D H^{\alpha\beta\lambda\mu} \alpha_{(\lambda,\mu)}, \quad m^{(\alpha\beta)} = B H^{\alpha\beta\lambda\mu} \beta_{(\lambda,\mu)}, \quad q^\alpha = Gd a^{\alpha\lambda} \gamma_\lambda, \quad (4.1-4a,b,c)$$

mit

$$D = \frac{Ed}{1-\nu^2}, \quad B = \frac{Ed^3}{12(1-\nu^2)}, \quad Gd = \frac{Ed}{2(1+\nu)}. \quad (4.1-5a,b,c)$$

Die Ausdrücke  $D$ ,  $B$ , und  $Gd$  werden als Dehn-, Biege- und Schubsteifigkeit bezeichnet. Der isotrope Elastizitätstensor  $H^{\alpha\beta\lambda\mu}$  besitzt die Symmetrieeigenschaften

$$H^{\alpha\beta\lambda\mu} = H^{\beta\alpha\lambda\mu} = H^{\alpha\beta\mu\lambda} = H^{\lambda\mu\alpha\beta}. \quad (4.1-6)$$

Im Bereich des Rohrleitungsbaus ist die in Abbildung 5b dargestellte Kreiszylinderschale als Sonderfall einer Rotationsschale von besonderem Interesse. Der Ortsvektor für beliebige Werte  $\Theta^1 = \text{konst.}$  beschreibt eine zur  $x^3$ -Achse parallele Gerade mit  $r = r(\Theta^2) = R$ .

Neben den Gleichgewichtsbedingungen können hier die kinematischen Beziehungen erheblich vereinfacht werden; dies betrifft schließlich auch die physikalischen Verzerrungsmaße  $\alpha_{\langle\alpha\beta\rangle}$  und  $\beta_{\langle\alpha\beta\rangle}$ :

$$\begin{aligned} \alpha_{\langle 11 \rangle} &= \frac{1}{R} v_{\langle 1 \rangle, 1} + \frac{1}{R} v_{\langle 3 \rangle}, & \alpha_{\langle 22 \rangle} &= v_{\langle 2 \rangle, 2}, & \alpha_{\langle 12 \rangle} &= \alpha_{\langle 21 \rangle} = v_{\langle 1 \rangle, 2} + \frac{1}{R} v_{\langle 2 \rangle, 1}, \\ \beta_{\langle 11 \rangle} &= \frac{1}{R^2} (-v_{\langle 3 \rangle, 11} + 2 v_{\langle 1 \rangle, 1} + v_{\langle 3 \rangle} + \gamma_{\langle 1 \rangle, 1}), & \beta_{\langle 22 \rangle} &= -v_{\langle 3 \rangle, 22} + \gamma_{\langle 2 \rangle, 2}, \\ \beta_{\langle 21 \rangle} &= \beta_{\langle 12 \rangle} = \frac{1}{R} (-2 v_{\langle 3 \rangle, 12} + 2 v_{\langle 1 \rangle, 2} + \gamma_{\langle 1 \rangle, 2} + \gamma_{\langle 2 \rangle, 1}). \end{aligned} \quad (4.1-7)$$

Die konstitutiven Beziehungen können dann durch folgende nicht verschwindende Komponenten des Elastizitätstensors dargestellt werden:

$$H_{1111} = \frac{1}{R^4}, \quad H_{1122} = \frac{\nu}{R^2}, \quad H_{2222} = 1, \quad H_{1212} = \frac{1-\nu}{2R^2}. \quad (4.1-8)$$

Um in der Praxis das zweite Verzerrungsmaß  $\beta_{\alpha\beta}$  zur geometrisch-statischen Interpretation abschätzen zu können, sind geeignete Annahmen zur Vernachlässigung des unbekanntem Schubverzerrungswinkels zu treffen. Als klassische Näherung bietet sich die Kirchhoff-Love-Hypothese an, die besagt, dass jede Normale zur unverformten Mittelfläche auch im verformten Zustand ihre Normaleneigenschaft bezüglich der Mittelfläche beibehält und außerdem ihre Länge nicht ändert, was einem Verschwinden des Vektors  $\gamma$  entspricht. Die Querkräfte  $q_\alpha$

dürfen dann zur Vermeidung von Widersprüchen in den Gleichgewichtsbedingungen nicht mehr aus den konstitutiven Beziehungen 4.1-4c berechnet werden. Außerdem kann ein über die Querschnittsdicke  $d$  geradliniger Dehnungsverlauf zu gekrümmten Spannungsverläufen führen, deren angenäherte Wiedergabe durch Dehnungskräfte  $n^{\alpha\beta}$  und Momente  $m^{\alpha\beta}$  den generellen Unschärfbereich vergrößert. Näheres ist den detaillierten Ausführungen in [Bas85] und [Axe83a] zu entnehmen.

Die Berechnung der Verzerrungsmaße und - unter der Voraussetzung linear-elastischen Werkstoffverhaltens - auch der Schnittgrößenkomponenten ist nun allein in Abhängigkeit des Verschiebungsvektors  $\mathbf{v}$  der Mittelfläche möglich. In [Bos97] wird am Beispiel biegeweicher Abwasserleitungen dargestellt, welche Eigenschaften des Verschiebungsvektors  $\mathbf{v}$  bzw. seiner Ableitungen sinnvoller Weise aufgrund praxisnaher Annahmen festzulegen sind. Unter der Annahme des Ebenbleibens der Kreisquerschnitte der Zylinderschale bei gleichzeitig senkrechter Lage zur Rohrachse ergeben sich dann für das Rohrprofil - allerdings ohne Formtreue des Querschnittes - die Verhältnisse der BERNOULLI-Kinematik eines Balkens. Damit wird eine Problementkopplung in Längs- und Querrichtung des Balkens möglich, so dass sich folgende Betrachtungsschwerpunkte ergeben, die in den Abschnitten 4.1.3 bis 4.1.5 vertieft werden:

- Betrachtung des Querschnittsverhaltens am **Kreisringmodell** unter der Annahme eines zur Rohrachse senkrechten ebenen Verzerrungszustandes der langen Kreiszyinderschale. Eine derartige Betrachtung entspricht gerade der für erdverlegte Kanäle und Leitungen nach [DWA-A127] üblichen Annahme gleichmäßiger Bettungs- und Verformungseigenschaften in Längsrichtung. (Abschnitt 4.1.3)
- Betrachtung des Einflusses einer **Rohrkrümmung in Längsrichtung** auf die Querschnittsverformung bei Ansatz konstanter Radialdrücke. Diese Betrachtung dient der Abgrenzung nichtlinearer Effekte aus Längsbiegung, welche dem Verlust der Formtreue des Querschnitts im Modell des BERNOULLI-Balkens entsprechen. (Abschnitt 4.1.4)
- Betrachtung der im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau eingesetzten **Rohrwerkstoffe** mit nichtlinearem Verbundverhalten bzw. zeitabhängigem Kraft-Verformungsverhalten am Beispiel der Rohrwerkstoffe Stahlbeton und Kunststoff mit ergänzenden Hinweisen zu Einflüssen aus Temperaturdifferenz. (Abschnitt 4.1.5)

Diese Betrachtungen beziehen sich allein auf die strukturmechanische Analyse der Rohre und Rohrleitungen mit Blick auf deren Standsicherheit. Eine weitere wesentliche Anforderung an unterirdische Kanäle und Leitungen ist daneben die Dichtheit gegenüber aus- oder eindringenden Gasen und Flüssigkeiten. Hierauf wird im Abschnitt 4.2 eingegangen.

### 4.1.3 Kreisringmodell

Unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen Belastung und Auflagerung der Rohrleitung in Längsrichtung treten die maßgeblichen Schnittkräfte nur in Rohrquerrichtung auf. Längsspannungen, wie sie z.B. aufgrund von Querdehnungsbehinderungen in Längsrichtung (ebener Verzerrungszustand) oder ungleichmäßigen Lasten entstehen können, werden i.d.R. nicht berücksichtigt (vgl. [Hor89]).

Gleichgewichtsbetrachtungen am infinitesimalen Kreisbogenelement mit den winkelabhängigen Schnittkräften  $M(\varphi)$ ,  $N(\varphi)$  und  $Q(\varphi)$  und dem äußeren Radialdruck  $p(\varphi)$  (Abbildung 6) werden z.B. in [Tim61], u.a. mit Blick auf die Stabilität des Kreisrings unter Außendruck, beschrieben.

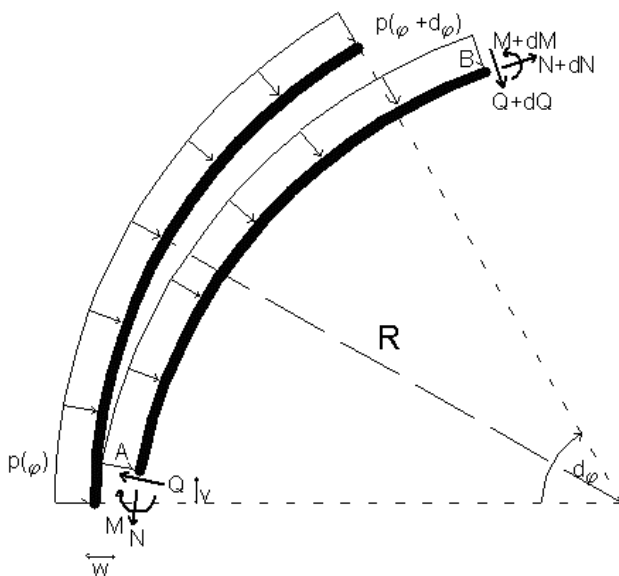


Abbildung 6 : Gleichgewichtsbetrachtung am infinitesimalen Kreisbogenelement unter Außendruck; nach [Tim61]

Das Biegemoment  $M(\varphi)$  und die Funktion der Radialverschiebungen  $w(\varphi)$  stehen unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit  $B$  nach Gleichung 4.1-5b dann in folgender Beziehung zueinander (vgl. [Tim61]) :

$$M(\varphi) = -B\kappa(\varphi) = -\frac{B}{R^2} \left( \frac{d^2 w}{d\varphi^2}(\varphi) + w(\varphi) \right). \quad (4.1-9)$$

Die Gleichgewichtsbedingungen ergeben sich entsprechend Abbildung 6 zu



$$\begin{aligned} \sum M_A = 0 &\Rightarrow dM = Q \cdot R d\varphi \quad \Rightarrow \quad \frac{dM}{d\varphi} = R \cdot Q, \\ \sum K_v = 0 &\Rightarrow \frac{dN}{d\varphi} = Q + QR \left( \frac{d^2 w}{R^2 d\varphi^2} + \frac{w}{R^2} \right), \\ \sum K_w = 0 &\Rightarrow \frac{dQ}{d\varphi} = -N - NR \left( \frac{d^2 w}{R^2 d\varphi^2} + \frac{w}{R^2} \right) - p(\varphi) \cdot R. \end{aligned}$$

Die Schnittkräfte in Rohrquerrichtung können darüber hinaus auch am dreifach statisch unbestimmten Kreisring z.B. nach dem Kraftgrößenverfahren ermittelt werden (Abbildung 7). In [Hor89] liegt ein umfassendes Tabellenwerk zur Berechnung typischer Lastfälle der Bemessungspraxis vor, das in Grundzügen auch Eingang in die Normung gefunden hat [DWA-A127]. Die Schnittgrößenbeziehungen werden dort für jeden einzelnen Lastfall in allgemeiner Form beschrieben durch:

$$M(\varphi) = m(\varphi) \cdot F \cdot R \quad \text{bzw.} \quad N(\varphi) = n(\varphi) \cdot F \quad \text{für Punktlasten } F$$

und

$$M(\varphi) = m(\varphi) \cdot q \cdot R^2 \quad \text{bzw.} \quad N(\varphi) = n(\varphi) \cdot q \cdot R \quad \text{für Flächenlasten } q,$$

mit dem Rohrradius  $R$ , den winkelabhängigen Momenten  $M(\varphi)$  und Normalkräften  $N(\varphi)$  sowie den winkelabhängigen, mittels Kraftgrößenverfahren ermittelten Schnittkraftbeiwerten  $m(\varphi)$  und  $n(\varphi)$ . Querkräfte können im Regelfall vernachlässigt werden<sup>34</sup>. Ergebnisse für beliebige Lastfallkombinationen lassen sich dann durch Superposition aus der Summe der Einzelschnittgrößen ermitteln (vgl. [Hor89], [DWA-A127]).

<sup>34</sup> vgl. [DWA-A127], Abschnitt 8.1: „Die Querkräfte in Ringrichtung können vernachlässigt werden, jedoch nicht bei profilierten Rohren“. Der geringe Einfluss der Querkräfte in Ringrichtung wird in der Fertigung von Stahlbetonrohren besonders deutlich, da diese regelmäßig ohne entsprechende Schubbewehrung ausgeführt werden. Auch für Vortriebsrohre wird in [DWA-A161], Abschnitt 6.1 festgehalten „Die Querkräfte beeinflussen die Bemessung im allgemeinen nicht und bleiben daher unberücksichtigt.“

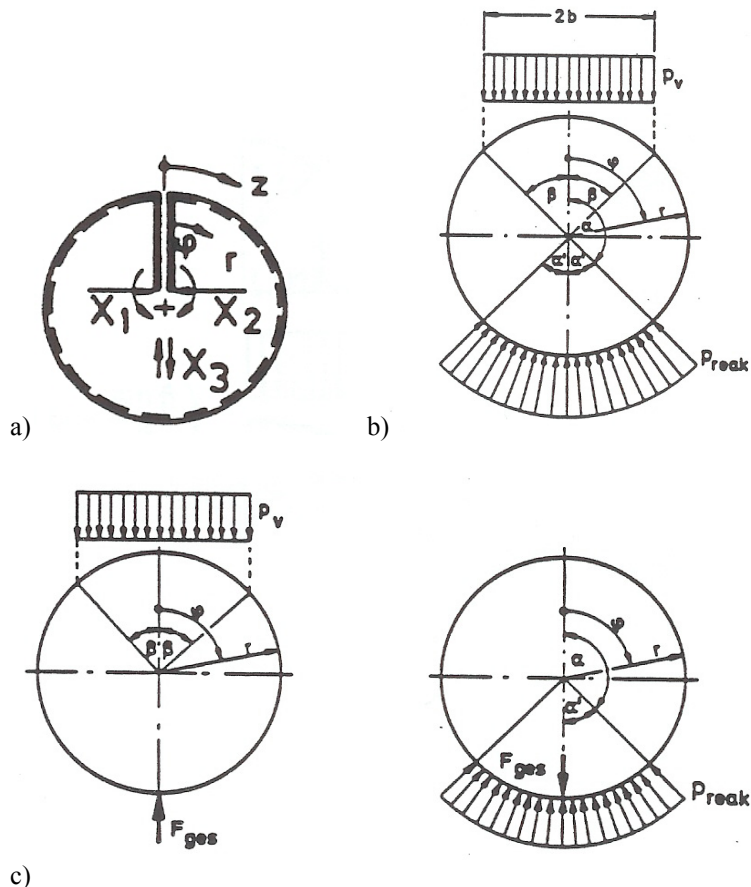


Abbildung 7 : Kreisringmodell, Beispiel „Auflast und Auflagergegendruck“; nach [Hor89]  
 a) statisch bestimmtes Hauptsystem nach dem Kraftgrößenverfahren ([Hor89], S. 99)  
 b) allgemeiner Lastfall ([Hor89], S. 98 oben)  
 c) Aufteilung nach dem Superpositionsprinzip ([Hor89], S. 98 unten)

#### 4.1.4 Längsbiegung

Beanspruchungen aus Längsbiegung gelten insbesondere für biegeweiche Rohre i.a. als vernachlässigbar, so dass in der Bemessungspraxis dieses Verhalten nur bei außergewöhnlichen Zwängungen während des Einbaus [AWW80], [DWA-M127] oder z.B. in den Nachweisen für den Transporttrommelradius gerollter Kunststoffrohre [Jan89] berücksichtigt wird. Da sich Abweichungen von der Planung, bedingt durch unvorhergesehene Setzungsdifferenzen, Bergsenkungen oder fehlerhaften Einbau, aber nie gänzlich ausschließen lassen, folgt eine Erläuterung und Beurteilung des Längsbiegeverhaltens kreisrunder Rohre. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf durchgehende Rohrstränge, wie sie z.B. durch Schweißverbindungen nach [DVS2207] erreicht werden, und basieren auf einer umfassenden Analyse in [Bos97]. Eigenspannungen oder Abwinkelungen in der Verbindung werden nicht berücksichtigt. Muffenverbindungen sind aufgrund der planmäßigen Abwinkelbarkeit i.a. weniger kritisch und werden ebenfalls nicht betrachtet.

##### 4.1.4.1 Versagensmechanismen

Dünnwandige Rohre versagen unter Biegung durch Beulen [Sei61], [Axe83a], wie

auch in Versuchen bestätigt wurde [Spe79], [Bra27]. Eine theoretische Einführung und Literaturübersicht gibt AXELRAD in [Axe80]. Im Zustand der Vorbeulverformung tritt zusätzlich eine nicht zu vernachlässigende Verformung des Rohrquerschnittes (Ovalisierung) in Verbindung mit der elastischen Verkrümmung auf. Diese nichtlineare Biegung von Rohren - das sog. BRAZIER-Problem [Bra27] - wurde in der Vergangenheit meist ohne Bezug zur Beulstabilität der Rohrwand betrachtet [Rei59], [Woo58]. In Abbildung 8 ist die Überlagerung beider Versagensformen nach [Axe83a] für das kurze gebogene Rohr dargestellt. Das geometrisch-statische System des längsgebogenen Rohres wird dabei durch die Wanddicke  $d$ , den Rohrradius  $R$ , den Biegeradius  $\rho$ , den Innendruck  $p$  sowie den Elastizitätsmodul  $E$  und die Biegesteifigkeit  $B$  bestimmt.

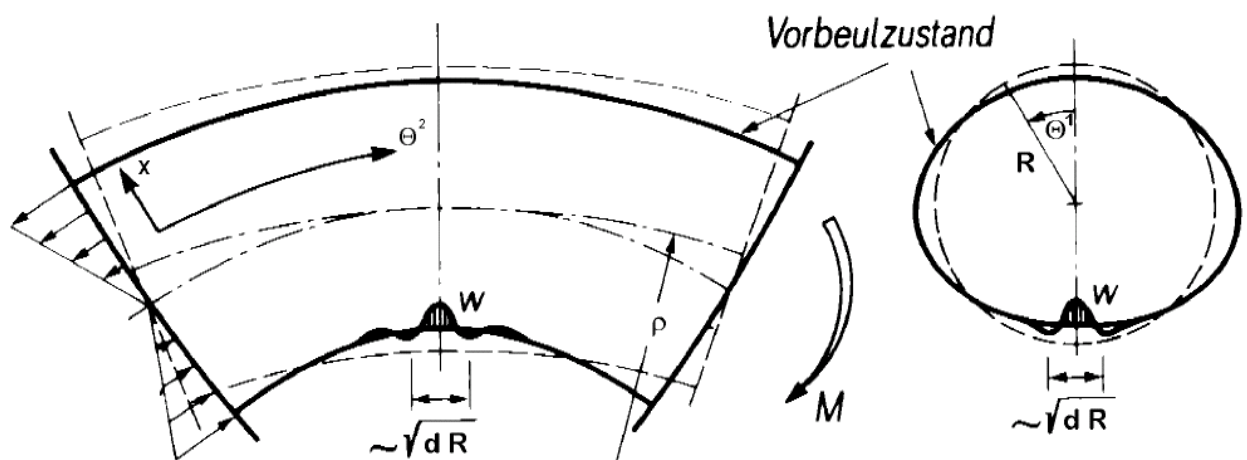


Abbildung 8: Zylinderschale unter kritischer Biegebelastung; nach [Axe83a]

Die Beziehungen bei nichtlinearer Biegung des langen Rohres im Vorbeulzustand lassen sich unter der Annahme eines gleichförmigen Innen- bzw. Außendrucks analytisch ermitteln. Für die Bemessung erdverlegter Rohre bietet es sich an, näherungsweise eine Erdlastverteilung anzusetzen, die dem vertikalen Erddruck des ungestörten Bodens entspricht ( $\gamma_B \cdot h$ ). Vorverformungen aus Querbiegung werden meist vernachlässigt und linear-elastisches Werkstoffverhalten für den gesamten Spannungsraum angenommen. Erweiterungen auf elliptische Querschnitte werden z.B. in [Emm81], [Emm82], der Einfluss elastisch-idealplastischen Werkstoffverhaltens in [Sob79] (s.a. [Hib94]) beschrieben. Weitere Hinweise zur Ermittlung der Traglasten von Rohren unter verschiedenen Randbedingungen, Vorkrümmungen und Imperfektionen finden sich in [Axe83b].

#### 4.1.4.2 Lineare Biegung des drucklosen, gekrümmten Rohres

Auf die Tatsache, dass die Hypothese der Formtreue auf die Biegung dünnwandiger gekrümmter Rohre nicht anwendbar ist, wies zuerst v. KÁRMÁN in [Kar11] hin. Er untersuchte die lineare Biegung gekrümmter Rohre, für die bei gegebener Momentenbelastung infolge von Querschnittsdeformationen eine Vergrößerung der

Krümmungsänderung eintritt. In der technischen Biegelehre wird der beschriebene Effekt in der Biegemomenten-Krümmungsänderungsbeziehung für gekrümmte Rohre durch den auch als Kármánkoeffizient bezeichneten Korrekturfaktor  $\chi$  berücksichtigt. Dieser kann als Funktion eines Krümmungsparameters  $\zeta$  angegeben werden, so dass sich das Biegemoment  $M$  in Abhängigkeit des Radius  $\rho$  des gebogenen Rohres unter Berücksichtigung der Vorkrümmung  $\rho^0$  des ungebogenen Rohres ergibt zu

$$M = \chi EJ \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho^0} \right) \quad \text{mit} \quad \chi = 1 - \frac{9}{10 + 12\zeta^2}, \quad \zeta = \frac{\rho^0 d}{R^2}. \quad (4.1-10)$$

#### 4.1.4.3 Nichtlineare Biegung des drucklosen, geraden Rohres

Bei der nichtlinearen Beschreibung der Biegung des geraden Rohres zeigt sich unter großen Verformungen ein demgegenüber verändertes Tragverhalten. Wird die Krümmungsänderung stetig gesteigert, erreicht das Biegemoment schließlich ein Maximum. Danach ist infolge der starken Einschnürung des Querschnittes eine Erhöhung der Krümmungsänderung bei gleichzeitiger Abnahme des Biegemomentes zu beobachten. Dieser Stabilitätsverlust wurde zum ersten Mal von BRAZIER [Bra27] sowohl theoretisch als auch durch Versuche für gerade Rohre mit Kreisquerschnitt untersucht. In Anlehnung an Gleichung 4.1-10 können seine Betrachtungen des geraden Rohres dargestellt werden durch die Beziehung

$$M = \chi \frac{EJ}{\rho} \quad \text{mit} \quad \chi = 1 - \frac{3(1-\nu^2)}{2} \frac{R^4}{\rho^2 d^2}. \quad (4.1-11)$$

Auch wenn die in Gleichung 4.1-11 dargestellte Beziehung von relativ einfacher mathematischer Natur ist, so bestätigten doch frühzeitig exaktere, analytisch-numerische Untersuchungen von REISSNER und WEINITSCHKE [Rei63] die hohe Genauigkeit dieser Näherung.

#### 4.1.4.4 Nichtlineare Rohrbiegung unter Innen- bzw. Außendruckbelastung

Einen wesentlichen Einfluss auf die nichtlineare Biegung des geraden Rohres hat ein konstanter Innen- bzw. Außendruck. Der Abplattungseffekt infolge Biegung wird durch einen Außendruck (bzw. Unterdruck im Rohr) verstärkt, während ein Innendruck dieser Tendenz entgegenwirkt. Wird das Rohr an beiden Enden geschlossen, so ergibt sich außerdem durch den Druck auf die Abschlussflächen eine Kraft in Längsrichtung des Rohres.

Emmerling nutzte für die Herleitung von Biegemomenten-Krümmungskurven in [Emm82] ein schalentheoretisches Modell, dessen Berechnungsansatz mit Hilfe iterativer, konvergierender Rechenalgorithmen beliebig exakte Lösungswerte erzielen konnte. Dadurch erhielt er auch nach Überschreiten des maximalen

Biegemomentes noch genaue Ergebnisse für die Biegemomenten-Krümmungsbeziehung unter Innen- bzw. Außendruckbelastung.

#### 4.1.5 Werkstoffverhalten

Einen Überblick über die im Kanal- und Leitungsbau eingesetzten Rohrwerkstoffe gibt Abbildung 9. Zahlreiche weitere Werkstoffe werden zur Instandhaltung eingesetzt, so z.B. Mörtel, Kunstharze, kunststoffmodifizierte Mörtel und Polyurethan. Holzwerkstoffe finden wiederum als Druckübertragungsmittel beim Rohrvortrieb Verwendung (s. Abschnitt 4.3.3).

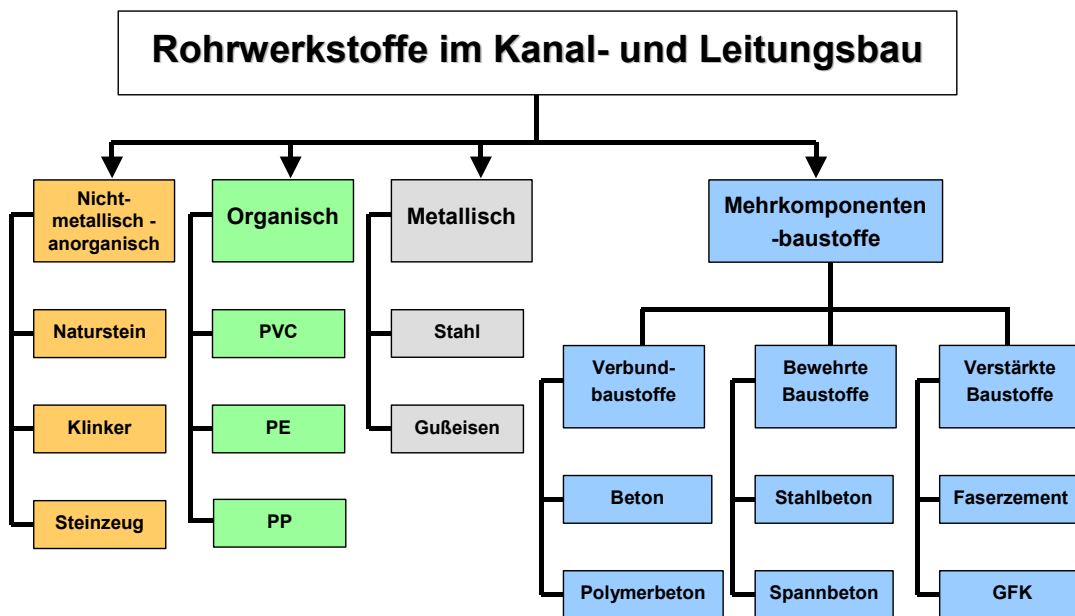


Abbildung 9 : Rohrwerkstoffe im Kanal- und Leitungsbau; nach [Ste99], verändert

Im Versagensbereich bzw. nach Überschreiten der zulässigen Grenzlaster und Sicherheiten zeigen Rohrwerkstoffe i.d.R. ein nichtlineares Verhalten, wie z.B. Plastizitäts- und Brucherscheinungen. Aber auch unter Gebrauchslasten sind einige Rohrwerkstoffe durch nichtlineares Verbundverhalten bzw. zeitabhängiges Spannungsverformungsverhalten geprägt. Mit Blick auf ihre besondere Bedeutung für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sollen nachfolgend zwei spezielle Werkstoffarten beispielhaft betrachtet werden:

- **Stahlbeton:** Stahlbetonrohre sind durch ein planmäßiges Rissverhalten zur Aktivierung der mittragenden Wirkung des Bewehrungsstahls charakterisiert. Aufgrund der besonderen Anforderungen an die Dichtheit von unterirdischen Kanälen und Leitungen (vgl. Abschnitt 3.3) fordert die Bewertung von Risshäufigkeiten und Rissbreiten ein Verständnis für dieses besondere Werkstoffverhalten.
- **Kunststoffe:** Sowohl beim Neubau als auch im Rahmen der Instandsetzung unterirdischer Kanal- und Leitungsnetze finden Kunststoffrohre verstärkt

Verwendung (vgl. [IKT06b]). Insbesondere ihr Einsatz in biegeweichen Rohr-Boden-Systemen fordert ein besonderes Verständnis für das spezifische Werkstoffverhalten, denn Kunststoffe verhalten sich viskoelastisch, d.h. mit nennenswerten zeitabhängigen Verformungen. Das Spannungs-Dehnungsverhalten von Kunststoffen wird daher durch die mittels Elastizitätstheorie ermittelten Lösungen (vgl. Abschnitte 4.1.3 und 4.1.4) nur unter besonderen Voraussetzungen zuverlässig beschrieben.

Ergänzend wird in Abschnitt 4.1.5.3 der Einfluss von Temperaturdifferenzen auf den Rohrwerkstoff und ggf. die statische Berechnung angesprochen.

#### 4.1.5.1 Stahlbeton

Das besondere Trag- und Rissverhalten von Stahlbeton erfordert auch für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen ein besonderes Verständnis. Die für die Betriebslasten als Kreisring bemessenen Rohre (vgl. Abschnitt 4.1.3) unterliegen zum einen nur geringen Querkraftbeanspruchungen (vgl. [Hor89]) und werden daher ohne Schubbewehrung allein für die Biegezugbeanspruchung innen (Rohrscheitel und Rohrsohle) sowie außen (Kämpferbereich) bemessen. Zum anderen kommt dem Bewehrungsstahl erst im gerissenen Querschnitt eine nennenswerte mittragende Wirkung zu. Mit Blick auf die Dichtheit der Kanäle und Leitungen (vgl. Abschnitt 4.2) und den Korrosionsschutz der Bewehrung ist dann die Rissbreitenentwicklung im gerissenen Zustand zu hinterfragen. Diese Situation verschärft sich auch dadurch, dass Rohre aus Stahlbeton oder Stahlfaserbeton nach DIN EN 1916 [EN1916] so bemessen werden, dass sie die Belastungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit rissefrei übertragen sollen, d.h. im sogenannten „Zustand I“ (vgl. [DINV1201]). Bei Überschreiten der Gebrauchslast tragen die Rohre im „Zustand II“, d.h. bei reiner Zugkraftübertragung über den Bewehrungsstahl. Auch bedeutet rissefrei im Zustand I lediglich, dass keine Belastungsrisse vorhanden sind. Unregelmäßig verlaufende Risse, wie z.B. spinnennetzartige Haarrisse in der zementreichen Oberfläche, Schwind- oder Temperaturhaarrisse, die eine Oberflächenbreite von 0,15 mm nicht überschreiten, sowie die bei Stahlbetonrohren aus der Prüfung entstandenen Risse gleicher Breite sind nach [EN1916] zulässig<sup>35</sup>.

Das Tragverhalten von Stahlbetonrohren im Zustand I und II wird umfassend in [Hor92], [Bos94], [IKT00a], [IKT04a] auch mit Blick auf die Prüfung der Rohre untersucht. Die Berechnung der Rissbreite aus der Lastbeanspruchung von Stahlbeton sowie deren Anspruch auf Exaktheit werden allgemein von MARTIN, SCHIEßL und SCHWARZKOPF in [Mar80] bzw. [Sch89] behandelt. Hierauf aufbauende Ausführungen zur Rissbreitenentwicklung in Stahlbetonrohren unter Last

---

<sup>35</sup> Zur Thematik der Rissarten, -ursachen, -merkmale und -erscheinungsformen s. a. die Übersichten in [Jun85], S. 174/175

enthalten [Bos94] und [IKT04a]. Sämtlichen Ausführungen liegt das allgemeine Verständnis zum Mechanismus der Rissbildung von Stahlbeton nach [Rüs72], [Mar80] bzw. [Sch89] zugrunde. Abbildung 10 zeigt den Einfluss der Reihenfolge des Auftretens der Risse auf den Spannungszustand in ihrer Umgebung nach RÜSCH (aus [Rüs72]):

- a) Ungerissener Zustand: die Biegezugkraft wird hauptsächlich vom Beton getragen.
- b) Nach Überschreiten der Biegezugfestigkeit des Betons an einer Stelle steigt die Stahlspannung sprunghaft an, bei gleichzeitig abfallender Betonspannung. Haftspannungen zwischen Stahl und Beton stellen über die Eintragungslänge  $a$  die Verträglichkeit der Dehnungen wieder her.
- c) Tritt ein zweiter Riss auf, baut dieser wiederum die Betonzugspannungen ab, so dass zunächst zwischen den beiden Rissen keine weiteren Risse zu erwarten sind. Spätere Laststeigerungen können allenfalls zu „Sekundärrissen“ mit geringerer Risshöhe führen.
- d) In einem Bereich konstanten Moments kann der zweite Riss in jeder beliebigen Entfernung vom ersten Riss auftreten, wo zufällig die Zugfestigkeit des Betons am niedrigsten ist.

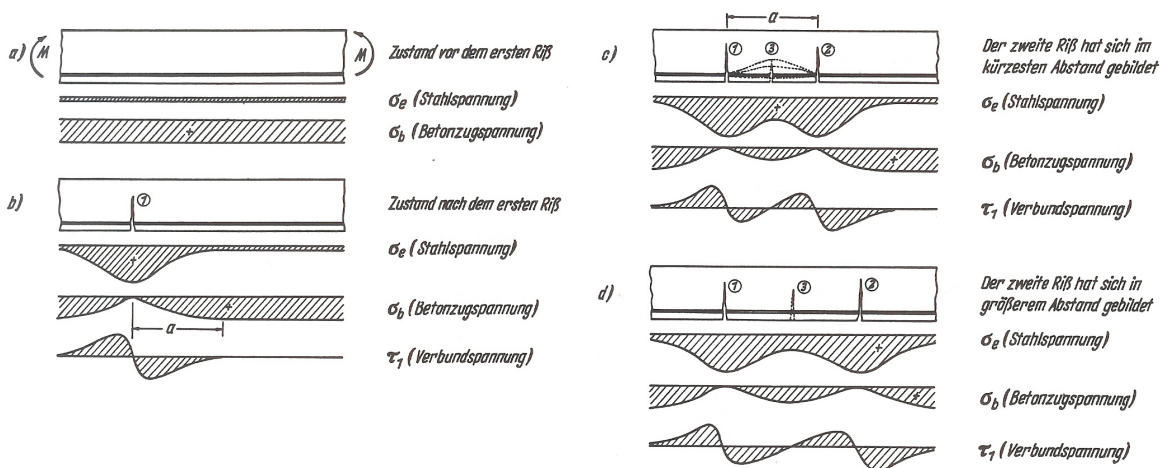


Abbildung 10: Einfluss der Reihenfolge des Auftretens von Stahlbetonrissen auf den Spannungszustand in ihrer Umgebung; aus [Rüs72], S. 255

Im Zusammenhang mit der Rissbreitenabschätzung sei darauf hingewiesen, dass die Rissbreitenformeln von SCHIEßL [Sch89] aus Betrachtungen zur Gebrauchsfähigkeit stammen und die Anforderungen an ihre Genauigkeit nicht sehr hoch waren. Das Augenmerk bei ihrer Entwicklung lag auf Aspekten wie Undurchlässigkeit, Korrosionsschutz und Ästhetik. Die Formeln dienen somit in erster Linie der Abschätzung von Rissen bei Kenntnis der Lasten, nicht aber der Abschätzung von

Lasten bei Kenntnis der Rissbreiten. Zitat nach SCHIEßL aus [Sch89]: „*Wegen der Streuung von Zug- und Verbundfestigkeit ist eine 'genaue' Vorausberechnung von Rissbreiten nicht möglich. [...] Es hat somit wenig Sinn, in Normen mehr oder weniger komplizierte Rissformeln anzugeben, die eine Vorhersagegenauigkeit vortäuschen, die weder erreichbar noch, hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, erforderlich ist.*“

Vor diesem Hintergrund wird hier auf eine weitergehende Darstellung der Rissbreitenberechnung verzichtet. Vergleichende Untersuchungen in [IKT04a] an Rohren unterschiedlicher Fertigungsqualität, d.h. in der Schalung erhärtete und sofort entschaltete Rohre, bestätigen diese Einschätzung für den vorliegenden Anwendungsfall. Rohre mit gleicher Bewehrung, jedoch unterschiedlichem Verbundverhalten, zeigten unter den selben Lasten deutliche Streuungen und Unterschiede in der gemessenen Rissbreitenentwicklung.

Für den praktischen Gebrauch ist nach [IKT04a] interessant, dass viele kleine Risse bei geringen Rissabständen i.A. auf einen sehr viel besseren Verbund hindeuten als wenige große Risse mit großen Rissabständen. Denn dies bedeutet, dass allein eine geringe Rissanzahl nicht als höhere Betonzugfestigkeit und somit bessere Qualität des Betons bzw. als geringere Lasteinwirkung gewertet werden darf.

#### 4.1.5.2 Viskoelastische Werkstoffe

Werden Kunststoffrohre in biegeweichen Rohr-Boden-Systemen eingesetzt, so ist das spezifische Kriech- und Relaxationsverhalten mit Blick auf die Prognose und Bewertung zeitabhängiger Verformungen zu berücksichtigen. Bei der Bemessung wird das viskoelastische Werkstoffverhalten insbesondere als zeitabhängige Korrektur des innerhalb der Elastizitätstheorie anzusetzenden Elastizitätsmoduls  $E$  berücksichtigt [DWA-A127], [DWA-M 127]. Ziel ist es dabei, die bereits vorhandenen Lösungen aus der Elastizitätstheorie auf den viskoelastischen Fall zu übertragen. Hierzu wird auf Kurz- und Langzeitwerte des Relaxations- bzw. Kriechmoduls zurückgegriffen, welche für die Bemessung des Zustandes direkt nach Einbau der Rohrleitung sowie am Ende der vorgesehenen Nutzungsdauer festgelegt sind. Aussagen zur Querdehnzahl  $\nu$  werden entweder aufgrund statischer Annahmen (z.B. [DWA-A127], ebener Spannungszustand) nicht getroffen oder beziehen sich auch in der Langzeit-Bemessung auf Kurzzeitwerte. Die beschriebene Vorgehensweise hat sich im Rohrleitungsbau der Abwassertechnik international durchgesetzt [EN1295], findet darüber hinaus aber auch in der Berechnung von Flächentragwerken aus Kunststoff in ähnlicher Form Anwendung [Bos81], [Men81].

Beim Versuch, die viskoelastischen Eigenschaften im einaxialen Spannungszustand auf modelltheoretischem Wege zu beschreiben, werden elastische und viskose Elemente entsprechend den Spannungs- und Verformungseigenschaften der viskoelastischen Werkstoffe miteinander kombiniert. Geschieht dies ausschließlich durch Nutzung ideal-elastischer Elemente entsprechend dem Hooke'schen Gesetz



und ideal viskoser Elemente entsprechend dem Newton'schen Gesetz, so sind die Grundgleichungen der Theorie linear. Systeme, die aus derartigen Elementen zusammengesetzt sind, werden daher i.a. als linear-viskoelastisch bezeichnet. Ihre Beziehungen lassen sich anschaulich über Feder-Dämpfer-Modelle wie folgt unterscheiden:

- ideal-elastisches Element (Hooke/Feder):  $\sigma = E_o \cdot \varepsilon$
- ideal-viskoses Element (Newton/Dämpfer):  $\sigma = \eta_v \cdot \dot{\varepsilon}$
- kombiniertes Element (Kelvin-Voigt/Parallelschaltung):  $\sigma = E_r \cdot \varepsilon + \eta_v \cdot \dot{\varepsilon}$
- kombiniertes Element (Maxwell/Reihenschaltung):  $\sigma = E_o \cdot \varepsilon_o = \eta_v \cdot \dot{\varepsilon}_v$

mit der Spannung  $\sigma$ , der Dehnung  $\varepsilon$ , den Dehnungsgeschwindigkeiten  $\dot{\varepsilon}$  bzw.  $\dot{\varepsilon}_v$ , den Elastizitätsmoduln  $E_o$  und  $E_r$  sowie den Viskositäten  $\eta_v$  und  $\eta_r$ .

Aufgrund der in bestimmten Anwendungsbereichen unvollständigen Beschreibung des Verhaltens viskoelastischer Werkstoffe mit Hilfe des Modells der linearen Viskoelastizität wurden auch unterschiedliche Feder-Dämpfer-Modelle zur Beschreibung der nichtlinearen Viskoelastizität entwickelt [Sch69]. Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens im Bereich der nichtlinearen Viskoelastizität wird allerdings häufig auf Beschreibungsfunktionen zurückgegriffen, die das Spannungs-Dehnungs-Verhalten nur für eine bestimmte Beanspruchungsgeschichte wiedergeben [Sar84], [Sch85]. Darüber hinaus sind auch numerische Methoden zur Bestimmung der Modellparameter für nichtlineare Feder-Dämpfer-Systeme entwickelt worden [Par83], [Sch85], [Men87], [Mic89].

Das Zusammenwirken von elastischem und viskosem Verhalten sowie die Abhängigkeit von Zeit und Temperatur ist nach [Men90] nur dann einigermaßen einfach zu beschreiben, wenn man sich auf den Bereich des linear-viskoelastischen Verhaltens beschränkt. Die in Lehre und Forschung am weitesten verbreiteten Methoden beruhen daher auf derartigen Modellen (s. [Kri76], [Men90], [Flü75], [Pip86]). Bisherige Untersuchungen zeigten allerdings auch, dass ein linear-viskoelastisches Verhalten allenfalls im Bereich kleiner Verformungen für amorphe Werkstoffe (z.B. PVC) gegeben ist [Sch85], [Mei71], [Mic89], [Sch68]. Bei den zäheren teilkristallinen Werkstoffen (z.B. PE-HD), speziell wenn ihre Betriebstemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur liegt, ergeben sich gerade auch im Bereich kleinerer Verformungen erhebliche Abhängigkeiten von der Beanspruchungshöhe, so dass die Voraussetzungen der linearen Viskoelastizität nur in einem gegenüber der Praxis beschränkten Bereich Gültigkeit besitzen [Sch85].

Drei Prinzipien stellen die Basis dar, um das linear-viskoelastische Verhalten zu beschreiben [Men90] :

### *Boltzmannsche Superpositionsprinzip*

Nach dem Boltzmannschen Superpositionsprinzip ruft die Summe zweier zeitabhängiger Spannungen  $\sigma_1(t)$  und  $\sigma_2(t)$  die Verformung  $\varepsilon_1(t)$  und  $\varepsilon_2(t)$  hervor, wenn die Spannungen einzeln  $\sigma_1(t)$  die Verformung  $\varepsilon_1(t)$  und  $\sigma_2(t)$  die Verformung  $\varepsilon_2(t)$  hervorrufen würden. Dies gilt auch umgekehrt.

### *Korrespondenzprinzip*

Das Korrespondenzprinzip leitet sich aus dem Superpositionsprinzip ab. Es liefert die für die Praxis wichtige Aussage, dass die aus der Elastizitätstheorie bekannten Lösungen auf den linear-viskoelastischen Bereich übertragen werden können.

### *Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip*

Das Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip gestattet, aus Messungen bei einer noch überschaubaren Zeitspanne, aber z.B. verschiedenen Temperaturen, auf einen sehr großen Zeitbereich zu schließen und umgekehrt. Es geht von der Voraussetzung aus, dass bei linear-viskoelastischem Verhalten alle Relaxationszeiten im Material die gleiche Temperaturabhängigkeit besitzen. Man nennt diese Stoffe thermo-rheologisch einfach [Gau76], [Ric59].

Die allgemeine Form der **konstitutiven Gleichung der linearen Viskoelastizität** kann für den einaxialen Spannungszustand als Differentialgleichung geschrieben werden zu [Flü75]

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} + \dots = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} + q_2 \ddot{\varepsilon} + \dots \quad (4.1-12)$$

bzw. kürzer in Operatorschreibweise

$$\mathbf{P} \sigma = \mathbf{Q} \varepsilon \quad \text{mit} \quad \mathbf{P} = \sum_{k=0}^m p_k \frac{d^k}{dt^k}, \quad \mathbf{Q} = \sum_{k=0}^n q_k \frac{d^k}{dt^k}. \quad (4.1-13)$$

Die Operatorpaare  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{Q}$  sind vollständig unabhängig voneinander und werden i.a. derart normiert, dass gilt  $p_0 = 1$  (s. Gl. 4.1-12). Unterwirft man Gleichung 4.1-13 einer Laplacetransformation<sup>36</sup>, so lassen sich zwischen den Laplacetransformierten der

<sup>36</sup> Die Laplacetransformierten  $\sigma^L(\phi)$ ,  $\varepsilon^L(\phi)$  der Spannungen  $\sigma(t)$  und Verzerrungen  $\varepsilon(t)$  werden mit der neu eingeführten Variable  $\phi$  über die Beziehung  $\sigma^L(\phi) = L\{\sigma\} = \int_0^{\infty} \sigma(t) e^{-\phi t} dt$  bzw.  $\varepsilon^L(\phi) = L\{\varepsilon\} = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) e^{-\phi t} dt$  ermittelt.

Spannungen und Verzerrungen ähnliche Beziehungen entwickeln, wie sie aus der Elastizitätstheorie bekannt sind (vgl. [Flü75], [Bos97]).

Mit ausreichender Genauigkeit kann das Verhalten realer viskoelastischer Werkstoffe, deren Kriech-, Dehnungs- und Spannungsrelaxationsvorgänge innerhalb des linear viskoelastischen Bereiches liegen, durch ein Vier-Parameter-Modell beschrieben werden [Men90], [Sar84]. Für dieses Modell reduzieren sich die Koeffizienten der Gleichung 4.1-12 dann auf die Parameter  $p_1, p_2, q_1, q_2$ .

Bei einaxialer Betrachtung lassen sich die zeitabhängigen Verzerrungsverläufe  $\varepsilon(t)$  und Belastungsfunktionen  $\sigma(t)$  auch durch Überlagerung der aus den Spannungs- bzw. Verzerrungsinkrementen resultierenden Systemreaktionen bestimmen. Sind die Kriechnachgiebigkeit  $C_K(t)$  und die Belastungsfunktion  $\sigma(t)$  bekannt, ergibt sich der Verzerrungsverlauf zu

$$\varepsilon(t) = \int_0^t C_K(t-\tau) \dot{\sigma}(\tau) d\tau. \quad (4.1-14)$$

Sind demgegenüber der Relaxationsmoduls  $E_R(t)$  und der Verzerrungsverlauf  $\varepsilon(t)$  bekannt, ergibt sich die Belastungsfunktion zu

$$\sigma(t) = \int_0^t E_R(t-\tau) \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau. \quad (4.1-15)$$

Aus der in beiden Fällen notwendigen Integration über den gesamten Belastungszeitraum des Rohres geht hervor, dass zur Ermittlung einer theoretisch exakten Lösung die gesamte Belastungs- bzw. Verzerrungsgeschichte bekannt sein muss. Darüber hinaus setzt der Ansatz von Ersatzmoduln zur Nutzung von Lösungsansätzen der Elastizitätstheorie voraus, dass die Belastungsgeschichte durch gleichgerichtete Verzerrungsinkremente geprägt ist. Wechselnde Verzerrungsrichtungen, wie sie durchaus bei Verlegung und Einbau von Rohrleitungen auftreten können, dürfen in dieser Form nicht abgeschätzt werden.

Neben der modelltheoretischen Beschreibung des viskoelastischen Werkstoffverhaltens bieten sich bei anwendungsorientierten Berechnungsverfahren auch empirische Ansätze an. Darüber hinaus ist eine Erweiterung auf räumliche Betrachtungen möglich [Bos97].

#### 4.1.5.3 Temperaturdifferenz

Nach [DWA-A127] sind Einflüsse aus Temperaturdifferenz auf das Verhalten des Rohrwerkstoffs für den Bemessungszeitraum in der statischen Berechnung von in

offener Bauweise verlegten, unterirdischen Kanälen und Leitungen zu berücksichtigen<sup>37</sup>. Auch [DWA-A161] weist darauf hin, dass für die Aufstellung der statischen Berechnung von Vortriebsrohren mit Blick auf die Belastungs- und Einbaubedingungen auch Angaben zur Betriebstemperatur erforderlich sind, „soweit 40°C überschritten werden“. Weitere Berechnungshinweise werden in beiden Normen allerdings nicht gegeben. Der Einfluss von Rohrverformungen aus Temperaturdifferenz auf die statische Berechnung des Rohr-Boden-Systems ist bei üblichen Betriebstemperaturen offensichtlich von untergeordneter Bedeutung.

Demgegenüber spielen Temperaturdifferenzen in der statischen Berechnung von Lining-Verfahren zur Sanierung unterirdischer Kanäle und Leitungen eine besondere Rolle, da hier neben Einflüssen auf die Baugrubenlänge beim Rohrstrangverfahren<sup>38</sup> die temperaturabhängigen Rohrverformungen grundsätzlich auch im Betriebszustand die geometrischen Randbedingungen des Gesamtsystems wesentlich beeinflussen können. Dies betrifft

- das Abkühlen des Liners und den hieraus entstehenden Spalt zwischen Liner und Altrohr bzw.
- das Erwärmen des Liners und den hieraus entstehenden Kontaktdruck zwischen Liner und Altrohr.

Die vorgenannte Effekte sind insbesondere im Stabilitätsnachweis (vgl. Abschnitt 4.4.2 und [DWA-M127]) zu berücksichtigen.

## **4.2 Dichtheit von Rohrleitungen**

Undichtheiten in unterirdischen Kanal- und Leitungsnetzen können zu Medienverlusten und damit verbundenen Gefährdungen führen und auch die Standsicherheit und Funktionsfähigkeit durch z.B. Grundwasserinfiltration und Bodeneinbrüche beeinträchtigen. Das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Leckagegröße, Prüfdruck und Prüfmedium ist eine wesentliche Kernkompetenz für die Dichtheitsprüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren.

### **4.2.1 Normativer Rahmen**

Nach [DIN50104] werden Hohlkörper, zu denen insbesondere Rohre und Formstücke gehören, mittels Innendruckversuch auf Dichtheit geprüft. Hierbei kommen Wasserdruckprüfungen und Luftdruckprüfungen zur Anwendung.

---

<sup>37</sup> vgl. [DWA-A127], Abschnitt 3.4: „Temperatur längerfristig: 20 ° C; Temperatur kurzfristig (entsprechend einem Zeitraum von 2 Jahren in 50 Jahren): DN < 400: 45 ° C, DN > 400: 35 ° C“

<sup>38</sup> vgl. [DWA-M127], Abschnitt 5.1.1

Vergleichende Untersuchungen zur Unterdruckprüfung zeigten, dass diese Prüftechnik trotz ihrer Arbeitssicherheitsvorteile aufgrund von Durchführungs- und Interpretationsmängeln für die Prüfung von Rohren und Rohrverbindungen ungeeignet erscheint (vgl. [Kau97], [Kün02]).

Nach [DIN50104] werden zur Innendruckprüfung als Prüfmedien Flüssigkeiten oder Gase eingesetzt. Unter der Dichtheit des geprüften Hohlkörpers versteht man dann, dass bei den Versuchsbedingungen ein festgelegter Grenzwert für

- die Menge des Prüfmediums, das zur Aufrechterhaltung eines konstanten Drucks zusätzlich benötigt wird, oder
- die Menge des austretenden Prüfmediums oder
- der Druckabfall bei konstanter Menge des Prüfmediums

nicht überschritten wird oder

- sich keine Undichtheit an seiner Außenoberfläche zeigt.

Zur Prüfeinrichtung gehören demnach ein Gerät zum Aufbringen des Prüfdrucks, ein Prüfmedium sowie geeignete Abdichtungen für die Anschlussstellen bzw. –enden des Rohres und ein Druck- bzw. Mengemessgerät. Als Prüfmedium wird nach [DIN 50104] *„im Regelfall eine Flüssigkeit, zweckmäßigerweise Wasser, verwendet. Dabei ist eine Möglichkeit zur Entlüftung vorzusehen.“*

#### **4.2.2 Wasserdruckprüfung**

Die Dichtheitsprüfung mit Wasserdruck ist eine Prüfung mit konstanter Druckhöhe. Gemessen wird die Wassermenge, die dem System zugeführt werden muss, um den Prüfdruck aufrecht zu erhalten. Der geprüfte Abschnitt ist als „dicht“ einzustufen, wenn die innerhalb der Prüfzeit zugegebene Wassermenge unterhalb eines vorgegebenen Grenzwertes liegt. [Kün02]

Nach KAUFMANN [Kau97] kann unter der Annahme, dass die Wasserzugabe während der Wasserdruckprüfung vollständig durch eine einzelne Leckage entweicht, diese sogenannte Grenzleckage  $A_L$  ermittelt werden. Hierzu ist das für die Prüfzeit  $t$  zulässige Wasserzugabevolumen *zul. V* in Abhängigkeit der Rohrstranglänge und des Rohrdurchmessers festzulegen, so dass mit der TORICELLI-Gleichung

$$Q = A_L \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad (4.2-1)$$

mit dem Wasserzustrom  $Q$ , der Druckhöhe  $h$  und dem Austrittswiderstand  $\alpha$ , die Fläche der Grenzleckage  $A_L$  bestimmt ist zu

$$A_L = \frac{\text{zul.}V}{t \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}. \quad (4.2-2)$$

Die Genauigkeit der Wasserdruckprüfung und ihrer Interpretation als Grenzleckage hängt wesentlich von der zuverlässigen Abdichtung und Entlüftung des Prüfraums und der zuführenden Schläuche ab. Andere Ursachen für übermäßige Wasserzugaben, wie die Wassersättigung der Rohroberfläche oder die Dehnung des Prüfkörpers unter Innendruck, sind insbesondere bei der Festlegung von Grenzwerten zu berücksichtigen (vgl. [EN1610]).

### **4.2.3 Luftdruckprüfung**

Da die Wasserdruckprüfung insbesondere bei größeren Rohrdurchmessern mit einem sehr hohen Prüfaufwand für das Füllen der Prüfstrecke mit Wasser verbunden ist, wird alternativ auch die Luftdruckprüfung eingesetzt. Bei der Durchströmung von Leckagen mit Luft und Wasser treten zwar unterschiedliche Reibungsverluste auf, grundsätzlich weichen die Ergebnisse von Dichtheitsprüfungen mit Luft aber zur sicheren Seite ab [Kün02]. Ist ein Kanal bzw. eine Leitung bei der Luftdruckprüfung dicht, so ist sie dies auch bei der Wasserdruckprüfung. Im Falle von gemessenen Undichtheiten bei der Luftdruckprüfung sind demgegenüber die Ergebnisse einer zweiten Prüfung mit Wasserdruck maßgebend (vgl. [EN1610]).

KAUFMANN stellt in [Kau97] verschiedene Ansätze aus der Literatur dar, mit denen die Zusammenhänge zwischen Leckagengröße, Prüfvolumen, Prüfdruck, Prüfzeit, Druckdifferenz und Temperatur bei einer Luftdruckprüfung rechnerisch beschrieben werden können. Er entwickelt auf dieser Basis den in Gleichung (4.2-3) dargestellten Beschreibungsansatz für Druckverluste während der Luftdruckprüfung, der sowohl Temperatureinflüsse als auch die Kompressibilität des Prüfmediums unter instationären Strömungsverhältnissen berücksichtigt. Da für das Integral in Gleichung (4.2-3) keine geschlossene Lösung vorliegt, ist der Wert  $\Delta t$  nur mit numerischen Verfahren ermittelbar.

$$\Delta t = \frac{V_{PR}}{\alpha \cdot A_L \sqrt{R \cdot T_{amb} \left( \frac{p_2 \cdot \kappa}{p_2 + (\kappa - 1) \cdot p_1} \right)} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1}}} \cdot \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p \cdot \sqrt{\left( \frac{p_{amb}}{p} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_{amb}}{p} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}} \quad (4.2-3)$$

mit

$\Delta t$	= Prüfzeit [s]	$\kappa$	= Isentropenexponent (1,4 für tr. Luft) [-]
$V_{PR}$	= Prüfvolumen [m <sup>3</sup> ]	$\alpha$	= Widerstandsbeiwert [-]
$p$	= Prüfdruck [N/m <sup>2</sup> ]	$A_L$	= Leckagenfläche [m <sup>2</sup> ]
$p_{amb}$	= Umgebungsdruck [N/m <sup>2</sup> ]	$R$	= spez. Gaskonstante (2,87058 J/(kg K))
$p_1$	= Anfangsprüfdruck [N/m <sup>2</sup> ]	$T_{amb}$	= Umgebungstemperatur [K]
$p_2$	= Endprüfdruck [N/m <sup>2</sup> ]		

KÜNSTER vergleicht in [Kün02] die Vorhersagegenauigkeit der in [Kau97] dargestellten Berechnungsansätze anhand von Prüfergebnissen an Rohrmuffen. Er schlägt vor diesem Hintergrund die auf die Dissertation von SCHWEBEL [Scw89] zurückgehende Gleichung (4.2-4) zur Bestimmung der Prüfzeiten vor. Dieser Gleichung liegt die Annahme eines quasistationären Ausströmverhaltens zugrunde. Nach KÜNSTER kann darüber hinaus mit ausreichender Genauigkeit von einem adiabaten<sup>39</sup> Prüfsystem mit  $n = \kappa = 1,4$  ausgegangen werden, vgl. Gl. (4.2-3).

$$\Delta t = \frac{V_{PR} \left( \frac{p_1}{p_2} - 1 \right)}{0,5 \cdot \alpha \cdot A_L \left( \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left( 1 - \left( \frac{p_{amb}}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)} + \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} \left( 1 - \left( \frac{p_{amb}}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)} \right)} \quad (4.2-4)$$

mit

$\Delta t$	= Prüfzeit [s]	$n$	= Polytropenexponent [-]
$V_{PR}$	= Prüfvolumen [m <sup>3</sup> ]	$\alpha$	= Widerstandsbeiwert [-]
$p_{amb}$	= Umgebungsdruck [N/m <sup>2</sup> ]	$A_L$	= Leckagenfläche [m <sup>2</sup> ]
$p_1$	= Anfangsprüfdruck [N/m <sup>2</sup> ]	$\rho_1$	= Dichte der eingeschlossenen Luft bei $p_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_2$	= Endprüfdruck [N/m <sup>2</sup> ]	$\rho_2$	= Dichte der eingeschlossenen Luft bei $p_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]

<sup>39</sup> adiabatisch – Zustandsänderung ohne Wärmeaustausch

### 4.3 Rohr-Boden-Systeme

Die Standsicherheit unterirdischer Kanal- und Leitungsbauwerke wird maßgeblich durch das Zusammenwirken von Rohrleitung und Boden als statisches Rohr-Boden-System geprägt. Die Beschreibung der diesbezüglichen Zusammenhänge erfordert hohe Kompetenz im Verständnis und der Auswahl geeigneter mathematisch-physikalischer Modellvorstellungen für den jeweiligen Betrachtungsfall.

#### 4.3.1 Betrachtungsfälle

Zur Berechnung und Bemessung unterirdischer Bauwerke für praxisnahe Problemstellungen werden analytische, halbempirische und numerische Verfahren eingesetzt<sup>40</sup>. Für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sind insbesondere halbempirische bautechnische Beschreibungsansätze verbreitet. Diese Ansätze gründen i.d.R. auf Baustellenerfahrungen, bautechnischen Versuchen und vergleichenden analytischen und numerischen Parameterstudien. Sie erleichtern mit anschaulichen Modellansätzen das bautechnische Verständnis und gestatten für Standardfälle durch einfache mathematische Berechnungsansätze eine ausreichend zuverlässige Abschätzung der auftretenden Belastungen, Beanspruchungen, Verformungen und Sicherheiten.<sup>41</sup>

In Anlehnung an [DVGW W401], [DWA-A161], [DWA-A127], [DWA-M127] lassen sich die folgenden grundsätzlichen Betrachtungsfälle unterscheiden:

- Neubau bzw. Erneuerung in offener Bauweise
- Neubau in geschlossener Bauweise
- Instandsetzung bzw. Sanierung in geschlossener Bauweise.

Die jeweiligen analytischen und halbempirischen Beschreibungsansätze werden in den folgenden Abschnitten zusammenfassend dargestellt. Im Anschluss wird auf die Bedeutung bodenmechanischer Materialgesetze und numerischer Berechnungsmethoden eingegangen.

#### 4.3.2 Neubau bzw. Erneuerung in offener Bauweise

Die Beschreibung der bautechnischen und statischen Verhältnisse von in offener Bauweise verlegten Rohrleitungen stellt ein komplexes technisches Fachgebiet dar,

---

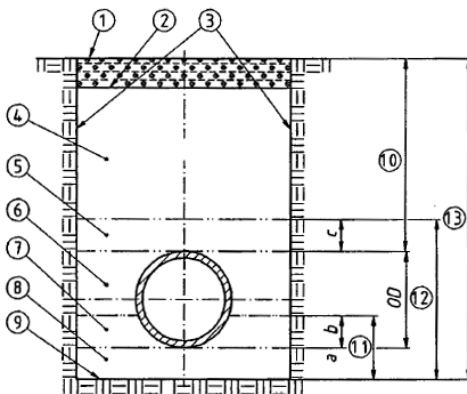
<sup>40</sup> vgl. [EN1997], Nr. 2.3 „Geotechnische Bemessung aufgrund von Berechnungen“, Nr. 2.4.1 (5): „Als Rechenmodell kommen in Frage ein analytisches Verfahren; ein halbempirisches Verfahren; ein numerisches Verfahren.“

<sup>41</sup> Auf die komplexere Beschreibung des nichtlinearen Verbundverhaltens und des zeitabhängigeren Verhaltens einiger Rohrwerkstoffe wurde bereits in Abschnitt 4.1.5 eingegangen; weitere Ausführungen zur Beschreibung des nichtlinearen Verhalten des Bodens finden sich in Abschnitt 4.3.5.



das Gegenstand umfassender Studien sowie Forschungs- und Normungsarbeiten ist; einen Überblick geben BULSON [Bul85], HORNUNG [Hor89], MOSER [Mos08] und der Normenüberblick in [EN1295].

In Anlehnung an die im Abschnitt 4.1.2 dargestellte Entkopplung der Problemstellung für Rohrleitungen in eine Längs- und Querschnittsbetrachtung wird im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau die Beschreibung des Rohr-Boden-Systems meist auf eine Querschnittsbetrachtung gemäß Abbildung 11 beschränkt. Dies setzt wiederum gleichmäßige Bauteil-, Belastungs- und Bettungsbedingungen in Längsrichtung voraus. Beanspruchungen in Längsrichtung werden entsprechend auch nicht als Standardfall in den allgemeinen Bemessungsverfahren berücksichtigt, vgl. hierzu [EN1295]: „Beanspruchungen in Längsrichtung entstehen durch Biegemomente, Scherkräfte, Zugkräfte, z.B. hervorgerufen durch ungleichförmige Bettung und Temperaturänderungen sowie bei Druckrohren durch Querdehnung und Schubkräfte bei Richtungswechsel oder Querschnittswechsel. [...] Der Planer muss diese Möglichkeiten in Verbindung mit den Verlegebedingungen prüfen und gegebenenfalls zusätzliche Maßnahmen vorsehen.“



- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1 Oberfläche   | 9 Grabensohle                       |
| 2 Unterkante der Straßen- oder Gleiskonstruktion, soweit vorhanden | 10 Überdeckungshöhe                 |
| 3 Grabenwände  | 11 Dicke der Bettung                |
| 4 Hauptverfüllung  | 12 Dicke der Leitungszone           |
| 5 Abdeckung  | 13 Grabentiefe                      |
| 6 Seitenverfüllung   | a Dicke der unteren Bettungsschicht |
| 7 Obere Bettungsschicht  | b Dicke der oberen Bettungsschicht  |
| 8 Untere Bettungsschicht   | c Dicke der Abdeckung               |

Abbildung 11: Rohrgraben und Begriffsdefinitionen; Grafik aus [EN1295]<sup>42</sup>

Ziel der weiteren mathematisch-physikalischen Beschreibung ist es, die verschiedenen Einflüsse auf das statische Tragsystem, wie Rohrdurchmesser, Überdeckungshöhe, Aushubverfahren sowie Einbettungs- und Verfüllbedingungen, in anschaulicher und zuverlässiger Weise zu berücksichtigen. Auch wenn Unterschiede

<sup>42</sup> Ähnliche Beschreibungen mit gleichen Bezeichnungen gelten für in offener Bauweise verlegte Leitungen unter Dämmen und Gräben mit geböschten Wänden.

zwischen den zahlreichen international verbreiteten Berechnungsverfahren bestehen (vgl. [Mos08], [EN1295]), so lassen sich die Wechselwirkungen zwischen Rohr, Einbettung, Grabenverfüllung und umgebendem Boden grundsätzlich auf fünf Modellvorstellungen zurückführen:

- **Silotheorie** der Grabenverfüllung,
- **Vertikale Lastaufteilung** über dem Rohrscheitel,
- **Auflagerspannungen** unter der Rohrsohle,
- **Horizontale Erdlasten** und
- **Bettungsreaktion** unter horizontalen Verformungen.

Diese Modellvorstellungen sind in Abbildung 12 schematisch veranschaulicht und werden nachfolgend näher erläutert.

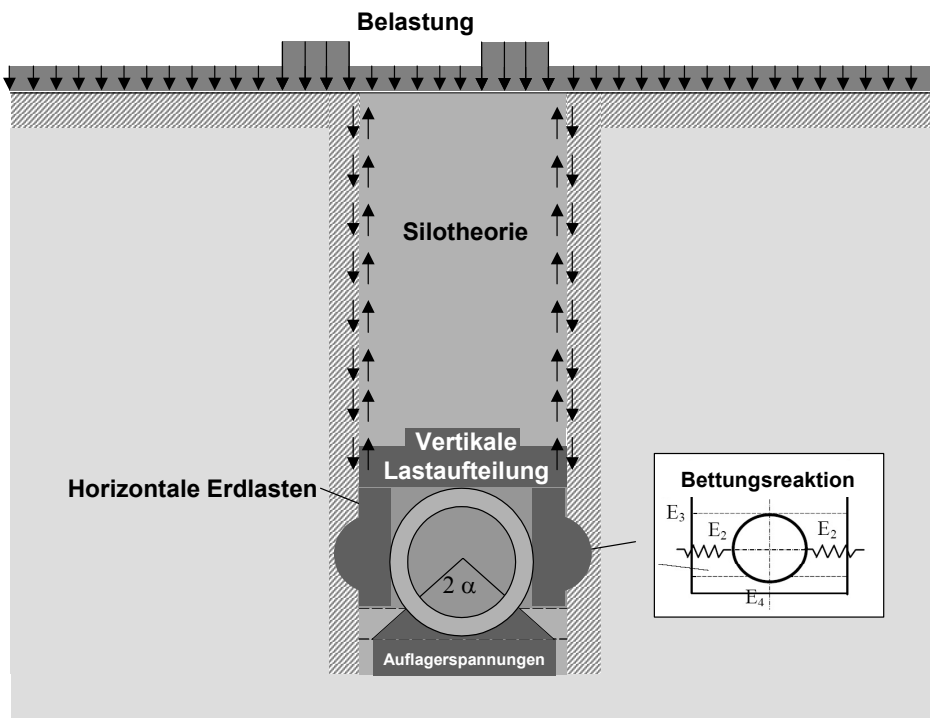


Abbildung 12: Rohr-Boden-System in offener Bauweise, Modellvorstellungen<sup>43</sup>

### Silotheorie der Grabenverfüllung

Die Silotheorie zur Erdlastberechnung in Rohrscheitelhöhe geht zurück auf die Untersuchungen von JANSSEN [Jan95], TERZAGHI [Ter36] und MARSTON [Mar30], die in Deutschland nach [Hor89] durch MARQUARDT und ROSKE

<sup>43</sup> Darstellung des Federmodells der Bettungsreaktionen aus [DWA-A127]

[Mar34]<sup>44</sup> eingeführt wurden. Nach dieser Modellvorstellung bilden sich im Boden durch unterschiedliche Setzungen und Verformungen senkrechte Gleit- bzw. Scherflächen an den Grabenwänden aus. Die in diesen Scherflächen auftretenden Reibungskräfte erhöhen oder vermindern die Erdauflast. Der Theorie von MARSTON liegen die wesentlichen Annahmen zugrunde, dass die Scherkräfte in den gedachten Gleitflächen in ihrer Größe durch den Reibungswinkel des Bodens bestimmt und der anstehende, gewachsene Boden einschließlich des Rohrauflegers gegenüber dem Verfüllboden bzw. gegenüber der Überschüttung als setzungsunempfindlich vorausgesetzt werden kann [Mar30], [Hor89], [Mos08]. Der Art des Grabenverbaus kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da dessen Entfernung während oder nach der Grabenverfüllung die aktivierbaren Reibungskräfte an den Grabenwänden maßgeblich beeinflusst [EIS97]. Auch müssen beide Grabenwände dauernd bestehen bleiben und dürfen nicht durch den späteren Aushub einer benachbarten Baugrube entfernt werden.

Die nach der Silotheorie zunächst über die gesamte Grabenbreite gleichmäßig verteilt angenommene Last in Rohrscheitelhöhe wird im Sinne einer maximalen vertikalen Belastung des Rohres bei starren Rohrleitungen unmittelbar dem Rohrkörper zugeteilt. MARSTON führt hierzu den Konzentrationsfaktor  $C_d$  in der nach ihm benannten Gleichung

$$W_d = C_d \cdot \gamma \cdot B_d^2 \quad (4.3-1)$$

ein [Mos08], mit der vertikalen Erdauflast  $W_d$ , der Bodenwichte  $\gamma$  und der Grabenbreite  $B_d$ . Der Konzentrationfaktor  $C_d$  ergibt sich aus der Lösung der Differentialgleichung

$$(V + dV) + \left( \frac{2K \cdot \mu' \cdot V}{B_d} \right) \cdot dh = V + \gamma \cdot B_d \cdot dh \Leftrightarrow \frac{dV}{dh} = \gamma \cdot B_d - \frac{2K \cdot \mu' \cdot V}{B_d} \quad (4.3-2)$$

zur Beschreibung der Gleichgewichtsbeziehung an der Grabenwand (vgl. Abbildung 13), mit der Vertikalkraft  $V$ , dem Seitendruckbeiwert  $K$  und dem Reibungsbeiwert an der Grabenwand  $\mu'$  zu<sup>45</sup>

$$C_d = \frac{1 - e^{-2K\mu'(H/B_d)}}{2K\mu'} \quad (4.3-3)$$

<sup>44</sup> Zu weiterführender Literatur von Marquardt und Roske siehe Literatur [3,17,19,21,22] in [Hor89]. Stellvertretend wurde die Erstveröffentlichung von Marquardt als [Mar34] aufgenommen.

<sup>45</sup> Zur grundsätzlichen Kritik an einer gleichzeitigen Anwendung des Erddruckbeiwertes  $K$  und des Reibungskoeffizienten  $\mu$  unter Annahme eines Hauptspannungszustandes zur Ermittlung von  $K$  siehe die Anmerkungen von TERZAGHI in [Ter54], S. 74 und als aktueller Diskussionsbeitrag HANDY in [Han04]. HANDY rechtfertigt schließlich die Theorie von MARSTON mit der Einführung ausreichend genauer, empirischer Korrekturglieder, wie  $C_d$ .

Auf gleicher Grundlage werden auch die Beiwerte zur Abminderung der vertikalen Erdlasten in dem Berechnungsansatz nach DWA-A 127 [DWA-A127] ermittelt.

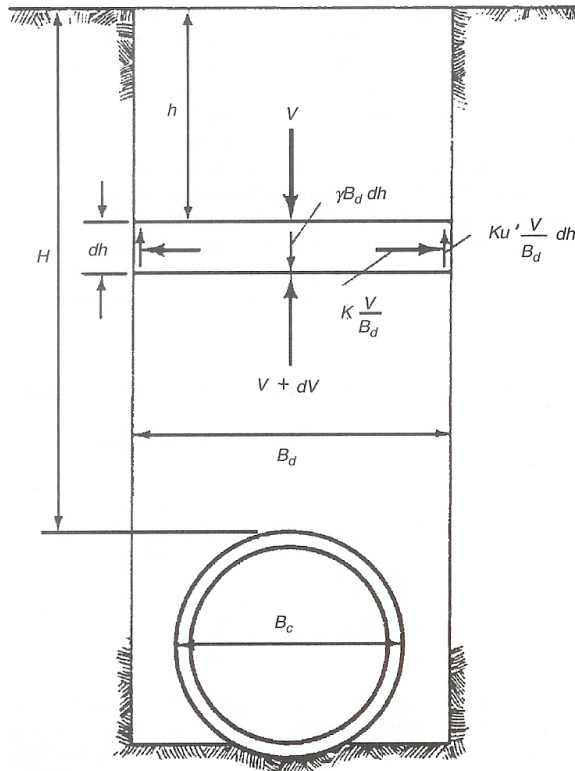


Abbildung 13: Zusammenhänge der Silotheorie in der Darstellung nach MARSTON; aus [Mos08]  
 $V$  – Vertikalkraft,  $K$  – Seitendruckbeiwert,  $\mu'$  – Reibungsbeiwert an der Grabenwand,  
 $B_d$  – Grabenbreite,  $B_c$  – äußerer Rohrdurchmesser,  $h$  – Höhe über Rohrscheitel,  
 $H$  – Überdeckungshöhe,  $\gamma$  – Wichte des Verfüllmaterials

### Vertikale Lastaufteilung über dem Rohrscheitel

Bei mitragender Wirkung des seitlichen Bodens neben dem Rohr kann nach MARSTON eine weitere Verfeinerung der Lastaufteilung dadurch realisiert werden, dass der Bodenkörper über dem Rohr als Vertikallast wiederum nach der Silotheorie abgemindert (bei flexiblen Rohren) oder bis maximal zur Last nach Gleichung (4.3-1) erhöht wird. Die gesonderte Lastberechnung erfolgt dann bis zu der sog. „Ebene gleicher Setzungen“.

Demgegenüber begründet LEONHARDT in einem alternativen Ansatz [Leo73] die Lastaufteilung für starre und stark verformbare Rohre mit Hilfe des Modells eines „Schubsteifen Balken“, das zwischenzeitlich auch internationale Anerkennung gefunden hat<sup>46</sup>. Nach der in [Leo79] dargestellten Übersicht (Abbildung 14) wird in diesem Modell der oberhalb der Rohrscheitelebene liegende Überschüttungskörper als „Schubsteifer Balken“ aufgefasst, der auf einem WINKLERSchen Halbraum

<sup>46</sup> vgl. [DWA-A127], so bewertet im Vorwort zur dritten Auflage

„elastisch gebettet“ ist und keine Biegemomente überträgt. Dabei wird dem Bereich des Rohres der Bettungsmodul  $C_R$  und den daneben liegenden Bodenkörpern der Bettungsmodul  $C_B$  zugeordnet. Die Schubdeformationen werden als volumenkonstant angesetzt. Aus dem Gleichgewicht einer infinitesimal schmalen Lamelle des schubsteifen Balkens lassen sich für die Senkung der Rohrscheitelebene die in [Leo73] dargestellten inhomogenen Differentialgleichungen 2. Ordnung aufstellen, mit deren Lösungen die in den vertikalen Tangentialebenen wirkenden Schubkräfte über eine Summenbildung ermittelt werden können. Im Ergebnis können die Spannungumlagerungen im Boden und die daraus resultierenden Lastkonzentrationen quantitativ erfasst werden. Dieses Konzept hat weitgehend Eingang in die deutsche Bemessungspraxis gefunden (s. [Leo84], [DWA-A127]).

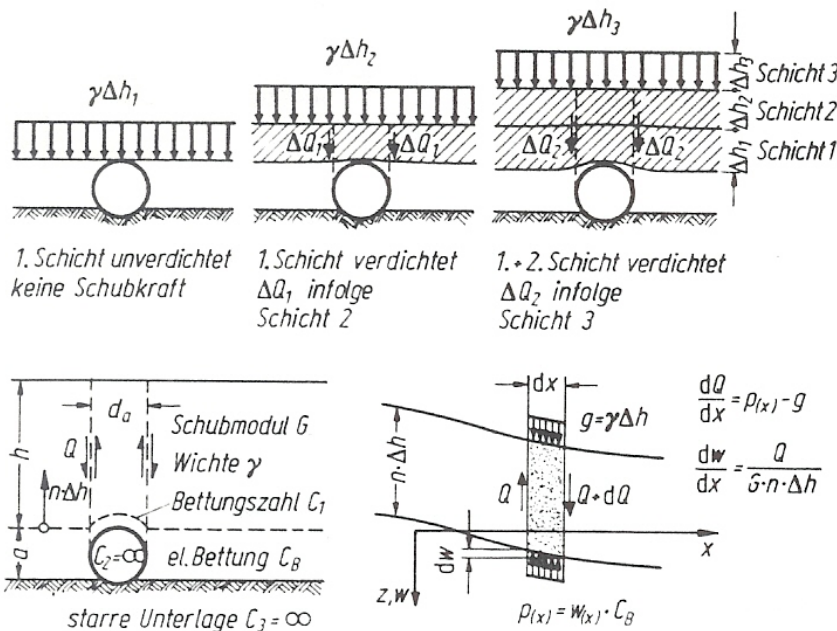


Abbildung 14: Schubsteifer Balken auf elastischer Bettung; aus [Leo79]

### Auflagerspannungen unter der Rohrsohle

Die Auflagerspannungen unter der Rohrsohle werden i.d.R. aus den vertikalen Gleichgewichtsbeziehungen unter Ansatz eines definierten Auflagerwinkels (Abbildung 12) für das Kreisringmodell ermittelt (vgl. Abschnitt 4.1.3, [Hor89], [DWA-A127], [Mos08]). Näherungsansätze für Spannungskonzentrationen bei starren, auf festem Untergrund verlegten Rohren werden von ANTZ in [Ant79] beschrieben.

### Horizontale Erdlasten

Auf ein starres Rohr wirken horizontale Erdlasten, die nach [Leo72] näherungsweise in Höhe des Erdruhedruckes angesetzt werden können (vgl. [DWA-A127]). Sie ergänzen sich mit dem entsprechenden Anteil aus vertikaler Erdlast zu gleichmäßig

über den Rohrumfang verteilten Außendruckspannungen. Bei großen Rohrdurchmessern ist der Anstieg des horizontalen Erdrucks mit der Grabentiefe als Dreiecks- bzw. Trapezlast zu berücksichtigen [Hor89].

### **Bettungsreaktionen** unter horizontalen Verformungen

Die Untersuchung des stützenden Einflusses des Bodens bei größeren Verformungen biegeweicher Rohre wurde in den USA von SPANGLER systematisch untersucht [Spa37], [Spa47] und in Deutschland von LEONHARDT [Leo79] durch Ansatz einer Bettungssteifigkeit zur Modellierung der verformungsabhängigen Versteifung des Rohres im Boden weitergeführt. Eine vertikale Durchbiegung ergibt demnach auch eine horizontale Durchmesserergrößerung, durch die das Rohr im Boden einen parabelförmigen, horizontalen Bettungsreaktionsdruck aktiviert. Auch dieser Ansatz hat Eingang in das Bemessungskonzept nach [DWA-A127] gefunden.

### **4.3.3 Neubau in geschlossener Bauweise**

Eine umfassende Übersicht über Verfahren zum Neubau in geschlossener Bauweise<sup>47</sup> enthalten [Ste03], [EN12889], [DWA-A125]. Letztere Quelle behandelt *„den unterirdischen Einbau von vorgefertigten Rohren unterschiedlicher Querschnittsgeometrie, bei dem durch Verdrängen, Rammen, Bohren, Pressen oder sonstigen Abbau ein Hohlraum im Boden geschaffen wird, in den die Rohre eingezogen, eingeschoben oder eingepresst werden, oder bei dem bestehende Kanäle oder Rohrleitungen überfahren bzw. ausgewechselt werden.“* Grundsätzlich lassen sich die Verfahren der grabenlosen Bauweise nach [EN12889] bzw. [DWA-A125] entsprechend den folgenden drei Kriterien einordnen:

- bemannte oder unbemannte Verfahren,
- steuerbare oder nichtsteuerbare Verfahren sowie
- Bodenverdrängungs- oder Bodenentnahmeverfahren.

Die Wahl der Verfahren hängt u.a. ab von der Vortriebslänge, dem Innen- bzw. Außendurchmesser, der angestrebten Lagegenauigkeit, der Mindestüberdeckung, den Baugrund- und Grundwasserverhältnissen sowie der angrenzenden Bebauung. Die Ermittlung der Beanspruchungen und die Bemessung der Rohrleitung erfolgt in der Regel getrennt nach

- Querschnittsbeanspruchungen am Kreisringmodell und
- Längskraftbeanspruchungen am Rohrstrang in axialer Richtung.

---

<sup>47</sup> Auch grabenlose Bauweise genannt, vgl. GSTT German Society for Trenchless Technology, Deutsche Gesellschaft für Grabenloses Bauen, s. [www.gstt.de](http://www.gstt.de).

#### 4.3.3.1 Kreisringbeanspruchung

Die Beanspruchungen im Querschnitt der unterirdischen Rohrleitung können in der Regel aufbauend auf der ebenen Kreisringbetrachtung (vgl. Abschnitt 4.1.3) nach unterschiedlichen Modellansätzen ermittelt werden, die eng mit den Berechnungsverfahren des Tunnelbaus (vgl. [Erd83]) bzw. der Statik der offenen Bauweise verbunden sind (vgl. [DWA-A161]). Die Berechnungsverfahren gruppieren sich in Verfahren nach der Kontinuumstheorie, Bettungszahltheorie und Silotheorie (Abbildung 15).

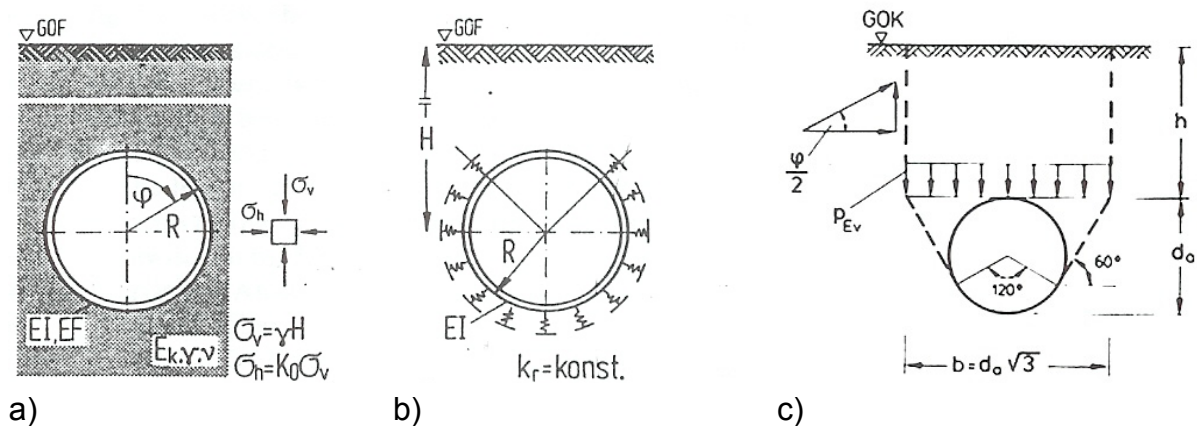


Abbildung 15: Ebene Berechnungsmodelle der geschlossenen Bauweise  
 a) Kreisring in Verbund mit Kontinuum; aus [Erd83]  
 b) Kreisring als teilgebetteter Balken nach Bettungszahltheorie; aus [Erd83]  
 c) Betrachtetes Bodenprisma nach Silotheorie; aus [Ste03]

ERDMANN und DUDDECK empfehlen dem entwerfenden Ingenieur in [Erd83] das Kontinuumsmodell für tiefere und das teilgebettete Balkenmodell nach Bettungszahltheorie für flachliegende Tunnel bzw. Rohrquerschnitte. Die Silotheorie hat insbesondere Eingang in die Berechnung von Vortriebsrohren mit Ringraumstützung gefunden [DWA-A161].

#### Kontinuumstheorie

In den Berechnungsverfahren nach der Kontinuumstheorie wird das räumliche Problem unter Annahme eines in Längsrichtung des Rohres unveränderlichen Belastungsverlaufs auf das ebene Problem der elastischen Scheibe mit Loch und Randverstärkung im unendlich ausgedehnten Halbraum reduziert. Sofern tangenciales Gleiten zwischen Ausbau und Baugrund angenommen wird, ergeben sich nach [Erd83] größere Biegemomente. EL SHAHID beschreibt in [EIS97] Beispiele für zweidimensionale Berechnungsverfahren nach der Kontinuumstheorie, z.B. nach VOELLMY [Voe37].

### **Bettungszahltheorie**

Die Entwicklung dieses Verfahrens wird ausführlich in [Erd83] dargestellt, eine Zusammenfassung enthält [EIS97]. Demnach wird die stützende Wirkung des Bodens durch einzelne gleichmäßig verteilte, linear elastische Federn beschrieben, die in radialer Richtung an der Außenseite des Kreisringes angesetzt werden. Der Scheitelbereich wird bettungsfrei gehalten, um vom Boden nicht aufnehmbare Zugspannungen rechnerisch zu minimieren. Das Federgesetz kann aus der WINKLERSchen Hypothese abgeleitet werden, wonach die Federkräfte  $p_r$  gemäß der Beziehung

$$p_r = k_r \cdot w \quad (4.3-4)$$

proportional zu den Radialverschiebungen  $w$  sind. Die Bodeneigenschaften werden bei diesem Berechnungsmodell nur durch eine Konstante, den Bettungsmodul  $k_r$ , wiedergegeben. Dabei wird eine dem Scherwiderstand des Bodens entsprechende Kopplung zwischen einzelnen Federn mit unterschiedlichen Verschiebungen im Rahmen dieses Modells vernachlässigt. Ferner wird das generell nichtlineare Verhalten des Bodenmaterials nicht berücksichtigt.

### **Silotheorie**

Durch das Auffahren eines unterirdischen Hohlraumes wird der im Erdreich herrschende primäre Spannungszustand so verändert, dass eine Abminderung der Erdlast beobachtet werden kann, die i. A. auf Auflockerungen im Scheitel oder Ringspaltbildung zurückgeführt werden [DWA-A161]. In dem allgemein anerkannten Berechnungsansatz nach [DWA-A161] wird dies in Anlehnung an die Modellvorstellungen von TERZAGHI [Ter36] und JANSSEN [Jan95] rechnerisch durch die Silowirkung innerhalb eines sich bildenden Grabens beschrieben. Je nach Gleitflächenansatz und Aufteilung des Bruchkörpers lassen sich unterschiedliche rechnerische Grabenbreiten und Belastungen ermitteln (vgl. [Web81], [Kön94]). Nach [DWA-A161] tangieren diese Gleitflächen die Rohre im Mittel unter  $60^\circ$ , so dass in Rohrscheitelebene näherungsweise die in Abbildung 15c dargestellte Einflussbreite angesetzt werden kann. Die vertikalen Bodenspannungen  $p_{Ev}$  aus Erdlast lassen sich dann ermitteln zu

$$p_{Ev} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot h. \quad (4.3-5)$$

Der Abminderungsfaktor  $\kappa$  wird aus der Integration der vertikalen Reibungskräfte am nach Abbildung 15c ermittelten Silokörper bestimmt zu

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2 \cdot K \cdot \tan(\varphi'/2) \cdot h/b}}{2 \cdot K \cdot \tan(\varphi'/2) \cdot h/b} \quad (4.3-6)$$



mit dem seitlichen Erdruckverhältnis  $K$  und dem inneren Reibungswinkel  $\varphi'$  (vgl. Gleichung (4.3-2) in Abschnitt 4.3.2 und Fußnote 45).

#### 4.3.3.2 Längs- und Querkraftbeanspruchung

In geschlossener Bauweise werden die vorgefertigten Rohre in einen Hohlraum im Boden eingezogen, eingeschoben oder eingepresst. Dabei werden die Rohre in einer geraden oder gekrümmten Trasse mit gerader, geneigter oder gekrümmter Gradienten eingebaut und entsprechend dem verwendeten Werkstoff und der jeweiligen Verbindungsart miteinander starr oder beweglich verbunden. [DWA-A125]

Die Tragfähigkeit der Rohrleitung gegenüber Beanspruchungen in Längsrichtung wird unter Einbeziehung der Vortriebskräfte nachgewiesen. Die statische Berechnung der im Lockergestein im Vortriebsverfahren einzubauenden Rohre erfolgt nach Arbeitsblatt ATV-A 161 [DWA-A161]. Dieses Berechnungsverfahren dient vielfach auch zur Grundlage für den Nachweis von Rohrleitungen, die mit anderen Verfahren der geschlossenen Bauweise eingebaut werden (vgl. [Web81], [IKT03b], [Ste03]).

Die zulässige Vorpresskraft muss in Abhängigkeit von der räumlichen Verwindung der Rohrverbindungen angegeben werden. Für Rohre, die im Festgestein vorgetrieben werden, sind im Einzelfall unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Gebirges und der Vortriebstechnik ingenieurmäßige Überlegungen und Berechnungen erforderlich. Für die Baugruben müssen gesonderte Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise geführt werden. Widerlager zur Aufnahme und Übertragung der Vortriebskräfte müssen entsprechend bemessen werden. [DWA-A125]

Beim Rohrvortrieb werden die Rohre durch Vorpresskräfte belastet, die von den Haupt- und Zwischenstationen zur Überwindung des Vortriebswiderstandes, d.h. die Summe aus Brust- und Reibungswiderstand, ausgeübt werden. Die Resultierende der Vorpresskräfte liegt in der Regel außerhalb der Rohrachse - als Folge von Steuervorgängen und bei planmäßig gekrümmter Gradienten. Bestimmend für die Größe der von den Rohren aufnehmbaren Vorpresskraft sind die Querschnittsfläche der Rohre an deren schwächster Stelle, die Festigkeit des Rohrwerkstoffes und das Maß der Ausmitte der Resultierenden der Vorpresskräfte. [DWA-A161]

Unter Annahme einer linearen Spannungsverteilung über den Rohrquerschnitt lassen sich die zulässigen Vortriebskräfte in der Rohrverbindung nach [DWA-A161] nachweisen. Alternativ werden in [Buc03] weitere Modelle von SCHERLE, ANTZ, MONFRONT, AVERESCH, MILLIGAN/NORRIS und HASLEM ([Sch90], [Ant86], [Mon96], [Ave97], [Mil99], [Has98] und [Has96]) zur Bestimmung der zulässigen Vortriebskraft vorgestellt sowie ein neues analytisches Berechnungsverfahren für Vortriebsrohre entwickelt. Mit diesem neuen Verfahren von BUCHHARDT können die während des Vorpressvorgangs in Locker- und Festgestein auf die Rohre wirkenden

Beanspruchungen in Längs- und Querrichtung sowie die maximal zulässige Vortriebskraft bestimmt werden. STEIN stellt in [Ste03] ein weiteres Berechnungsverfahren für Vortriebsrohre, das sogenannte „*Allgemeine Berechnungsverfahren nach S&P*“, dar. Im Gegensatz zu vielen anderen Modellen berücksichtigt dieses Verfahren, wie auch BUCHHARDT in [Buc02], [Buc03], das nichtlineare und vom Belastungsverlauf abhängige Spannungs- und Stauchungsverhalten des Fugenzwischenlagenwerkstoffs, d.h. des Druckübertragungsmittels (DÜM).

Forschungsergebnisse in [IKT02a], [IKT07] bestätigen, dass die elasto-plastischen Eigenschaften der Druckübertragungsmittel insbesondere im Zusammenhang mit Kurvenfahrten und Steuerbewegungen einen weitreichenden Einfluss auf die Form der Spannungsverteilung haben können. Darüber hinaus zeigen die Erfahrungen aus [IKT07], dass auch die Modellvorstellungen zur Rohrstrangkinematik bei Kurvenfahrten und Steuerbewegungen weiterentwickelt werden müssen. Die Erkenntnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Nach SCHERLE [Sch03] war bisher folgende Auffassung weit verbreitet:<sup>48</sup> *„Die Rohre brauchen beim Vortrieb in der vom Schild vorgeschnittenen Röhre ihre Führung. [...] die logische Folge ist hier, dass beim Vortrieb in Kurven die Gefahr des Ausknickens am geringsten ist, da die gesamte Rohrstrecke durch die Vorpresskraft an die Außenwand des Ausbruchraumes gedrückt wird.“* Abbildung 16 zeigt eine entsprechende Darstellung von BUCHHARDT aus [Buc03].

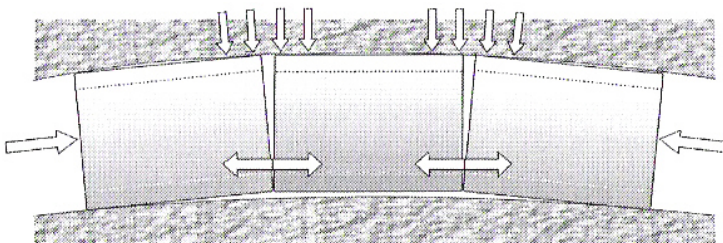


Abbildung 16: Modellvorstellung der Kurvenfahrt; aus [Buc03]

Demgegenüber lassen jedoch die im Versuch nach [IKT07] gemessene Bettungsdruckverteilung (vgl. Abschnitt 5.4.3.3) und die hieraus abgeleiteten qualitativen Kontaktspannungsverteilungen (Abbildung 17) deutlich erkennen, dass die gesamte Rohr-Kurve zwar in den Kurvenanfangs und -endpunkten an der Kurvenaußenseite gehalten wird. Die im Kurvenverlauf liegenden Rohre erfahren jedoch eine haltende Bettungsreaktion an der Kurveninnenseite.

<sup>48</sup> Unterstreichungen sind nicht Teil des Zitats, sondern dienen der Hervorhebung im Sinne des Gesamtzusammenhangs.

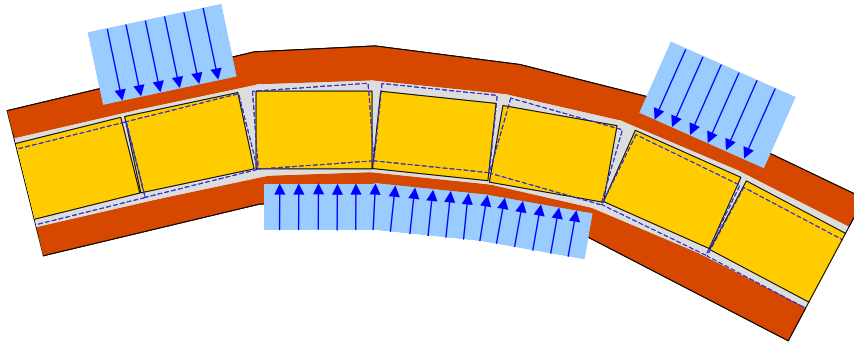


Abbildung 17: Versuchsergebnisse: Qualitative Kontaktspannungsverteilung; aus [IKT07]

Abbildung 18 zeigt die hieraus abgeleitete Rohrkinematik, d.h. die zu erwartenden Bewegungen bei verformbarer Bettung. Die mittleren Rohre neigen zu einer geradlinigen Ausrichtung, so dass sie sich relativ zum Anfangs- bzw. Endrohr verdrehen. In der Folge ist mit einer unregelmäßigen äußeren Bettung einzelner Rohre und entsprechenden Abwinkelungen und Querkraftbeanspruchungen in den Rohrverbindungen zu rechnen.

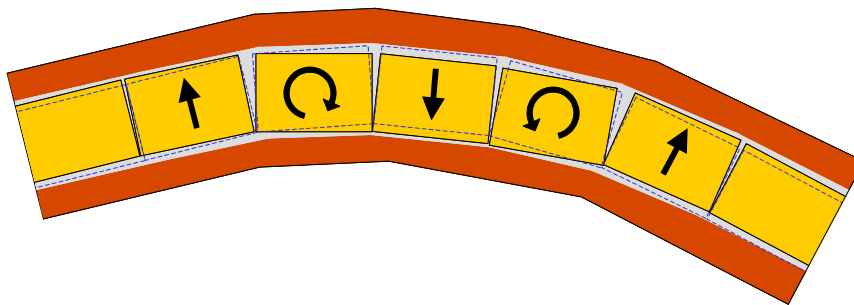


Abbildung 18: Aus Abbildung 17 abgeleitete Rohrkinematik; aus [IKT07]

Diese Ergebnisse gewinnen insbesondere dadurch an Bedeutung, dass eine Gruppierung von Rohren zu kurzen geraden Abschnitten (Stabeffekt) auch von Fachleuten aus der Vortriebspraxis bestätigt wird [IKT07a]. Entsprechende Messungen beschränken sich bisher allerdings nur auf Einzelfälle und die beobachteten Phänomene wurden meist als Sonderfall klassifiziert. MILLIGAN und NORRIS [Mil99] beobachteten in Feldversuchen ebenfalls das Anliegen des Rohrstranges an die Kurveninnenseite, jedoch schrieben sie dieses Phänomen kurzen, wechselnden Krümmungsbereichen zu (Abbildung 19).

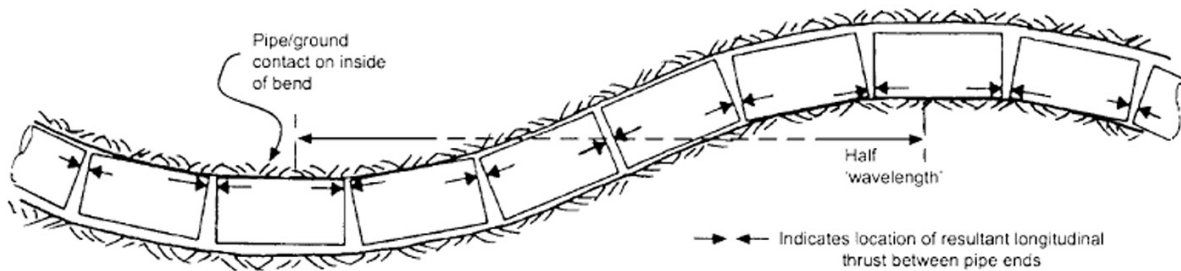


Abbildung 19: Rohr-Boden-Modell nach MILLIGAN und NORRIS; aus [Mil99]

Weitere Ergebnisse zur Berechnung der beim Rohrvortrieb entstehenden Bettungskräfte werden von VERBURG in [Ver06] dargestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Erfahrungen aus der Simulation in [IKT07a] zeigt, dass die unterschiedlichen Theorieansätze zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen. In [Ver06] wurden aus Messungen an Vortriebsmaßnahmen Rückschlüsse auf kinematische Zustände im Rohrstrang gezogen. So konnte festgestellt werden, dass Kurvenfahrten oder Steuerbewegungen zu erhöhten Bettungs- und Vortriebskräften führen. Die in diesen Vortriebszuständen größeren Bettungsreaktionen beeinflussen den Reibungswiderstand und erhöhen letztendlich die Vorpresskraft. Das in [Ver06] hierfür entwickelte kinematische Modell (Abbildung 20) bestätigt grundsätzlich die Beobachtungen aus [IKT07].

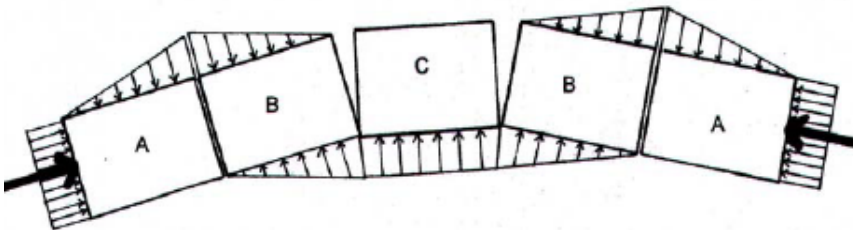


Abbildung 20: Kinematisches Modell einer Kurvenfahrt nach VERBURG [Ver06]

Insbesondere bei Steuerbewegungen und in Kurvenfahrten können somit neben Längskräften auch Quer- und Zwängungskräfte die Rohrbeanspruchung wesentlich beeinflussen. Das Geradeziehen des Rohrstrangs kann darüber hinaus zu einer Erhöhung einzelner Fugenklaffungen führen. Diese Zusammenhänge sind bei der Bemessung der Rohre und Druckübertragungsmittel, z.B. nach dem Entwurf des DWA-A 161 [DWA-A161n], zu berücksichtigen. Eine Weiterentwicklung der Berechnungsansätze ist Ziel künftiger Forschung und messtechnischer Baustellenuntersuchungen [IKT07h], [IKT08e] sowie der Normungsarbeit [DWA08a]. Einer Mindestbemessung, wie sie derzeit noch im gültigen Arbeitsblatt ATV-A 161 [DWA-A161] gefordert wird, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

#### 4.3.4 Instandsetzung in geschlossener Bauweise

Die Verfahren zur Instandsetzung von unterirdischen Kanälen und Leitungen sind umfassend in der Literatur beschrieben [Ste99], [Bos07], [Ros08]. Ihre Klassifizierung ist Gegenstand der Normung [TC165a].

In der Gas- und Wasserversorgung sind die Begriffe der Instandhaltung, Instandsetzung und Rehabilitation nach [DIN31051] in Verbindung mit [DVGW W401], [DVGW G401] verbreitet. Demnach gehört zur Instandhaltung neben der Inspektion und Wartung auch die Instandsetzung. Die Instandsetzung umfasst alle Reparatur- und Rehabilitationsmaßnahmen und die Rehabilitation wiederum alle Maßnahmen zur Erhaltung oder Verbesserung der Funktionsfähigkeit bestehender Versorgungsnetze unter Einschluss aller Reinigungs-, Sanierungs- und Erneuerungsmethoden. Unter Sanierung wird hier die Ertüchtigung einer vorhandenen Rohrleitung mit einer *nicht* selbsttragenden Auskleidung verstanden. Demgegenüber definiert [EN752] für Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden den Begriff der Sanierung umfassender, als „*alle Maßnahmen zur Wiederherstellung oder Verbesserung von vorhandenen Entwässerungssystemen*“, d.h. Reparatur, Renovierung oder Erneuerung. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Sanierung“ grundsätzlich in diesem erweiterten Sinne verwendet<sup>49</sup>.

Modelle zur Beschreibung der Rohr-Boden-Systeme für die Instandsetzung von unterirdischen Kanälen und Leitungen beschränken sich in der Regel auf den Fall der vollständigen Sanierung bzw. Erneuerung, da der Einsatz von Reparaturverfahren grundsätzlich nur einer vorübergehenden Stabilisierung und Abdichtung lokaler Schäden ohne Nachweis der Standsicherheit dient. Allerdings wurden auch für einzelne Reparaturverfahren fallbezogen mathematisch-physikalische Beschreibungsansätze aus der Renovierung übertragen und anhand von Versuchen für einzelne Lastfälle überprüft (z.B. [Fal05]). Fragen der Funktionsfähigkeit und Dichtheit sind Gegenstand aktueller Produkt- und Verfahrensprüfungen (z.B. [IKTW06]).

Nachfolgend wird ein maßgeblich von FALTER (vgl. [Fal75], [Fal94]) entwickelter und in [DWA-M127] eingeführter Beschreibungsansatz für Altrohr-Liner-Boden-Systeme im Sanierungsfall zusammengefasst. Das Verhalten des Systems aus Altrohr und umgebenden Boden wird entsprechend in drei statisch relevante Lastfälle bzw. (Altrohr-)zustände unterschieden (Abbildung 21, vgl. [Fal94], [DWA-M127], [Wag04]):

---

<sup>49</sup> vgl. die Überschrift „Sanierung“ der Abschnitte 5.3.4 und 5.4.4

**Zustand I:**

Das Altrrohr ist im Wesentlichen rissefrei, allein tragfähig und übernimmt alle Erd- und Verkehrslasten. Eine Sanierung ist z.B. zur Herstellung der Wasserdichtheit erforderlich. Neben verfahrensbedingten Eigenspannungen, Wärmeeinwirkungen und Eigengewicht sind insbesondere innerer und äußere Wasserdruck vom Liner aufzunehmen. Dabei sind örtliche Vorverformungen und Ringspaltbildung zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist auch mit einer Rissbildung des Altrohres nach der Sanierung zu rechnen [DWA-M127].

**Zustand II:**

Das Altrrohr hat einen oder mehrere durchgehende Längsrisse und ist nicht mehr allein tragfähig. Aufgrund einer ausreichenden Bettungswirkung des Bodens in der Leitungszone ist es jedoch weiterhin als „Altrrohr-Boden-System“ standsicher (z.B. bestätigt durch Langzeitbeobachtungen und/oder Rammsondierungen). Wie im Zustand I ist im allgemeinen die Herstellung der Wasserdichtheit erforderlich, so dass der Liner insbesondere gegen äußeren Wasserdruck bemessen werden muss. Dabei sind neben örtlichen Vorverformungen und Ringspaltbildung auch Gelenkring-Vorverformungen des Altrrohr-Boden-Systems zu berücksichtigen.

**Zustand III:**

Das „Altrrohr-Boden-System“ ist langfristig nicht mehr tragfähig, trägt aber als elastisch gebetteter Viergelenkring auch weiterhin zur Standsicherheit bei. Es sind Längsrisse und deutliche Verformungen erkennbar. Gegenüber Zustand II soll der Liner das System statisch stabilisieren, so dass er auch durch Erd- und Verkehrslasten beansprucht wird.

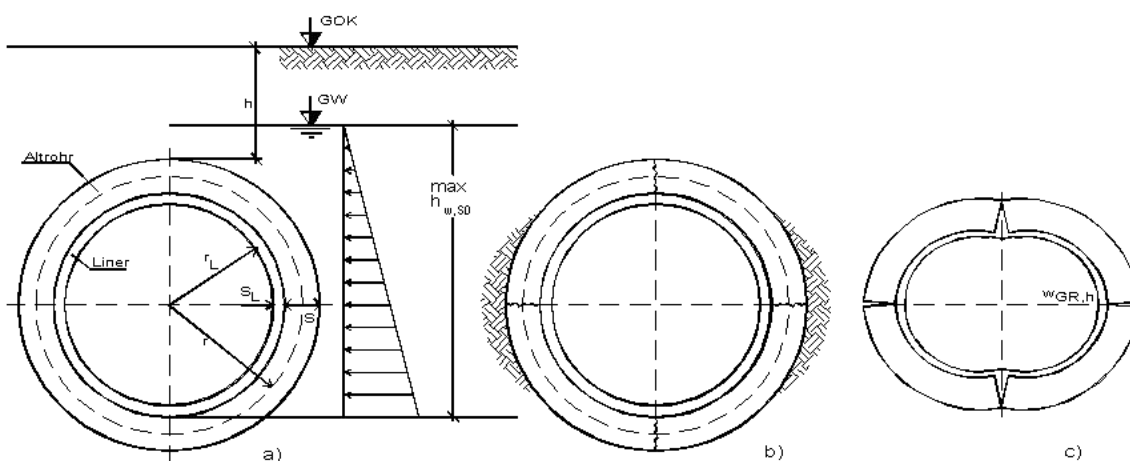


Abbildung 21: Lastfälle des Inliners; Grafik aus [Fal94]  
 a) undichtes Altrrohr allein tragfähig (Zustand I),  
 b) Altrrohr-Boden-System tragfähig (Zustand II),  
 c) Altrrohr-Boden-System nicht allein tragfähig (Zustand III)  
 ( $h_{w,SO}$  – Wasserstand über Linersohle,  $w_{GR,h}$  – Gelenkringverformung,  
 $r_L$  – Linerradius,  $s_L$  – Linerwanddicke,  $s$  – Altrrohrwanddicke)

Zuverlässige Aussagen über eine mittragende Wirkung des alten Kanals im Zustand III sind letztlich nur möglich, wenn die Bettungswirkung aufgrund von Bodenuntersuchungen bekannt ist. Weiterführende Betrachtungen für den Zustand III, insbesondere mit Blick auf das geometrisch nichtlineare Verformungsverhalten des Liners in Verbindung mit dem äußeren Viergelenkring wurden von ZIMMERMANN in [Zim94] beschrieben sowie unter Berücksichtigung eines nichtlinearen Steifigkeitsverhaltens des Bodens von DOLL in [Dol01]. Weitere Lastfälle können sich in Abhängigkeit des Einbauverfahrens ergeben, so z.B. die Krümmung des Rohrstrangs beim Einziehen im Rohrstrangling (s. [DWA-M127]). Für Sonderfälle, wie z. B. fehlende Rohrabschnitte oder breite Muffenspalte, wird in [DWA-M127] auf eine Berechnung nach der Schalentheorie verwiesen (vgl. Abschnitt 4.1.2). Ist nicht zu erwarten, dass das Altrohr-Boden-System zur Standsicherheit beiträgt, sollte der Kanal grundsätzlich erneuert werden [Wag04].

#### **4.3.5 Numerische Modelle**

Numerische Berechnungsmethoden nehmen in vielen Bereichen des Ingenieurwesens einen hohen Stellenwert ein. Wegen ihrer vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten ist die Finite-Elemente-Methode (FEM) das am häufigsten verwendete Verfahren, wenn auch die Randelemente-Methode (REM), Diskrete-Elemente-Methoden (DEM) sowie die Finite-Differenzen-Methoden (FDM) in einigen Fällen sinnvolle Alternativen darstellen. [Sch94]

Bei der Finite-Elemente-Methode wird der Verlauf der Unbekannten innerhalb eines Elementes durch Ansatzfunktionen bzw. Formfunktionen angenähert. Die primären Unbekannten - hier die Verschiebungen - werden an den Elementknoten ermittelt. Die Methode ist in der Literatur ausführlich beschrieben (z.B. [Gal76], [Zie75], [Sch94], [Hib94]). Ihr Einsatz ist insbesondere im Tunnelbau, aber auch im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau verbreitet (vgl. [Ste03], [Mos08], [Ste99], [IKT03b]). Jüngere Untersuchungen befassen sich insbesondere mit dem Einsatz der FEM zur Beschreibung von Kontaktproblemen zwischen Rohrleitung und Umgebung [Sch04], [Wei08], der baubegleitenden Berechnung von Rohr- bzw. Tunnelvortriebsmaßnahmen [Mes06] sowie der Erhöhung der Zuverlässigkeit von Prognosen des Verformungsverhaltens des Baugrunds und der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten bei maschinellen Vortrieben [Kas05]. Die fortwährende Entwicklung von Hard- und Software eröffnet darüber hinaus weitere Perspektiven, so z.B. in der (Echtzeit-)Simulation komplexer Strukturantworten, Bauprozesse und Deteriorationsmechanismen (vgl. [Gra03], [RUB01]).

Als wesentlicher Vorteil der FEM kann gelten, dass auch unregelmäßige Geometrien und Randbedingungen berücksichtigt werden können. Nachteilig kann sein, dass der gesamte Berechnungsausschnitt diskretisiert werden muss, was bei typischen geotechnischen Aufgabenstellungen zu sehr großen und damit sehr aufwändigen Systemen führt. Dieser Nachteil kann z.B. durch Nutzung von Symmetrien oder die

Verwendung von infiniten Elementen oder eine Koppelung von finiten Elementen und Randelementen reduziert bzw. vermieden werden (vgl. [Sch91]).

Als wichtigste Limitierung der Finite-Elemente-Methode muss festgehalten werden, dass sie auf kontinuumsmechanischen Grundsätzen beruht und daher Brucherscheinungen, die von einem Übergang Kontinuum-Diskontinuum gekennzeichnet sind, nicht oder nur unzureichend bzw. mit großem Aufwand beschreibt (vgl. [Sch94], [EIS97], [Sch04], [Kas05], [Wei08]).

#### **4.3.6 Bodenmechanische Materialgesetze**

Die in den Bemessungsansätzen nach [DWA-A127], [Mos08] verbreitete Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens ist die einfachste Form eines Stoffgesetzes für Böden (Kennwerte  $E, \nu$  bzw.  $K, G$ ). Es besteht in diesem Fall ein umkehrbar eindeutiger Zusammenhang zwischen Spannungen und Verzerrungen. In der Bodenmechanik ist diese Annahme grundsätzlich nur für sehr grobe Abschätzungen oder sehr geringe Belastungsniveaus gerechtfertigt. Im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau zeigten linear-elastische Ansätze in Vergleichsrechnungen, z.B. für biegeeweiche Abwasserleitungen in [Bos97], jedoch eine ausreichende Genauigkeit. Nachteilig kann allerdings für extreme Belastungen die Unabhängigkeit vom Spannungspfad, die mangelnde Kopplung zwischen Volumen- und Scherverformungen, sowie das Fehlen irreversibler Verformungen sein [Sch94].

Neben einer einfachen Erweiterung auf nichtlinear-elastisches Verhalten, mittels der Definition von Sekantenmoduln oder inkrementeller Tangentenmoduln, bietet sich die Modellierung mittels elastisch-idealplastischer Stoffgesetze an. Sie stellen eine entscheidende Verbesserung gegenüber elastischen Modellen dar, da sie irreversible Verformungen zumindest näherungsweise berücksichtigen. Soll die Fließfläche als Funktion eines Verfestigungsparameters in ihrer Größe verändert werden, sind allerdings erweiterte Modelle zu verwenden. Ebenso erfordert die Berücksichtigung zeitabhängigen Verhaltens besondere Beschreibungsansätze (vgl. Abschnitt 4.1.5.2).

Die drei wesentlichen Merkmale zur Beschreibung elastisch-idealplastischen Materialverhaltens sind (vgl. [Sch94]):

- **Spannungs-Dehnungs-Beziehung im elastischen Bereich**, diese wird z. B. als linear-elastisch angenommen.
- **Fließfunktion  $Y$** , welche im einfachsten Fall als Funktion des aktuellen Spannungszustandes  $\sigma$  so formuliert wird, dass für den elastischen Bereich gilt  $Y(\sigma) < 0$  sowie für den plastischen Bereich  $Y(\sigma) = 0$ . Der Zustand  $Y(\sigma) > 0$  ist nicht zulässig. Ist die Fließfunktion konstant, d.h. nicht von Ver- und



Entfestigungsparametern abhängig, spricht man auch von einer Bruchfunktion und das Materialverhalten ist elastisch-idealplastisch.

- **Fließregel**, die mit der Richtung des Vektors der plastischen Verzerrungssinkremente  $d\varepsilon^P$  in allgemeiner Form, unter Annahme eines plastischen Potentials  $Q$ , geschrieben werden kann zu

$$d\varepsilon^P = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma}. \quad (4.3-7)$$

$d\lambda$  ist kein Materialkennwert, sondern ein Proportionalitätsfaktor, der auch als Konsistenzparameter bezeichnet wird [Sch94]. Das plastische Potential kann analog zur Fließfunktion definiert werden, d.h. als Funktion des Spannungszustandes. Wird  $Q(\sigma) = Y(\sigma)$  angenommen, spricht man von einer assoziierten Fließregel oder vom Normalitätsprinzip.

Aufbauend auf den o.a. Grundlagen sind eine Reihe von Stoffgesetzen für Geomaterialien entwickelt worden, die üblicherweise in invarianter Form ausgedrückt werden und die Invarianten  $\sigma_m$ ,  $\sigma'$  und  $\theta$  verwenden mit

$$\sigma_m = 1/3 I_1, \quad \sigma' = \sqrt{J_2}, \quad \theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left( \frac{-3\sqrt{3} J_3}{2 \sigma'^3} \right), \quad (4.3-8)$$

- $I_1$  - 1. Invariante des Spannungstensors,
- $J_2, J_3$  - 2. bzw. 3. Invariante des Spannungsdeviators.

Das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb ist das in der Boden- und Felsmechanik am häufigsten verwendete Kriterium zur Modellierung drainierter Bedingungen. Es ist für effektive Spannungen gültig, geht von einem Versagen entlang einer Bruchfläche aus und wird mit dem inneren Reibungswinkel  $\varphi$ , der Kohäsion  $c$  und der normal auf die Bruchfläche wirkenden Druckspannung  $\sigma_n$  bzw. der in ihr wirkenden Scherspannung  $\tau$  geschrieben zu

$$|\tau| = \sigma_n \tan \varphi + c. \quad (4.3-9)$$

Mit den Invarianten nach Gleichung 4.3-8 lautet die Formulierung für dreidimensionale Spannungszustände [Sch94] :

$$Y = \sigma_m \sin \varphi + \sigma' \cos \theta - 1/\sqrt{3} \cdot \sigma' \sin \varphi \sin \theta - c \cos \varphi = 0.$$

Im Schnitt der Bruchfläche mit der  $\pi$ -Ebene treten Singularitäten auf (s. Abbildung 22), die in numerischen Formulierungen gesondert behandelt werden müssen, so dass in der Praxis häufig das Kriterium nach Drucker-Prager verwendet wird mit

$$Y = 3 \alpha' \sigma_m + \sigma' - K = 0. \quad (4.3-10)$$

Der 6-eckige Schnitt in der  $\pi$ -Ebene von Mohr-Coulomb wird dann durch einen Kreis angenähert, da der Lode Winkel  $\theta$  in Gleichung 4.3-10 entfällt. Wie aus Abbildung 22 ersichtlich, gibt es verschiedene Möglichkeiten der Annäherung und damit auch der Berechnung von  $\alpha'$  und  $K$  [Sch94] :

- Kreis durch die Punkte B, D, F  $\Rightarrow$  Kompressionskegel
- Kreis durch die Punkte A, C, E  $\Rightarrow$  Extensionskegel
- Kreis dem Sechseck eingeschrieben  $\Rightarrow$  Eingeschriebener Kegel
- Kreis zwischen Kompressions- und Extensionskegel  $\Rightarrow$  Kompromisskegel.

Kompressions- und Kompromisskegel sollten vermieden werden, da diese zu einer beträchtlichen Überschätzung der Festigkeit führen. Der Extensions- und vor allem der eingeschriebene Kegel liegen i.a. auf der sicheren Seite. Ungenauigkeiten dieser Näherungen gegenüber dem Mohr-Coulombschen Kriterium werden in der Praxis vor allem für Spannungszustände, die nicht nahe am Bruchzustand liegen, als vernachlässigbar eingestuft [Sch94], [Zie77].

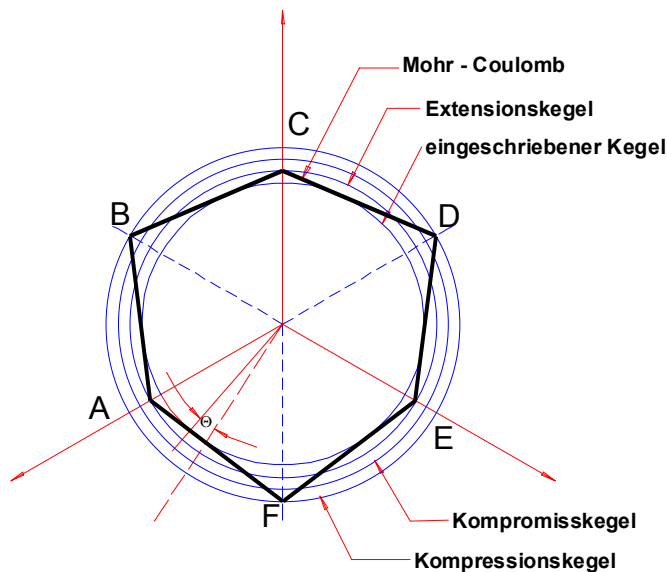


Abbildung 22: Mohr-Coulomb- und Drucker-Prager-Kriterien: Schnitt mit der  $\pi$ -Ebene; nach [Sch94]

Wird das Mohr-Coulomb-Kriterium durch den eingeschriebenen Kegel des Drucker-Prager-Kriteriums angenähert, so werden  $\alpha'$  und  $K$  durch folgende Gleichungen bestimmt:

$$\alpha' = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}}, \quad K = \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}. \quad (4.3-11)$$

In der Regel werden im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau assoziierte Fließregeln gewählt. Die Größe der Dilatanz wird in diesem Fall zwar meist

überschätzt, die numerische Berechnung bietet allerdings Vorteile. Eine für die meisten Bodenarten zu beobachtende Abhängigkeit des Dilatanzwinkels  $\psi$  von der Volumendehnung wird folglich ebenfalls nicht berücksichtigt. Insbesondere unter Baubedingungen mit starken Lockerungserscheinungen bietet sich jedoch die Anwendung nicht-assoziierter Fließregeln an. Beispielhaft wird dies in [EIS97] für die Modellierung des „Ziehens des Verbaus“ ausgehend von Triaxialversuchen dargestellt.

#### **4.4 Belastungsansätze**

Unterirdische Kanal- und Leitungsbauwerke sind vielfältigen Belastungen aus Verkehrs- und Umwelteinflüssen ausgesetzt. Mit Blick auf die Berechnung und den Standsicherheitsnachweis sind geeignete Belastungsbilder zu definieren und die Möglichkeiten einer mathematisch-physikalischen Modellierung der damit verbundenen Versagensmechanismen zu erkennen.

##### **4.4.1 Verkehrslasten**

Die Bodenspannungen infolge Straßenverkehrslasten werden nach [DWA-A127] in Abhängigkeit von der Überdeckungshöhe und vom Rohrdurchmesser in Anlehnung an die Spannungsverteilung nach Boussinesq [Bou85] berechnet (vgl. [DIN1072]). HORNUNG gibt in [Hor84] einen Überblick über geeignete Lastannahmen. Die Auswirkungen von Verkehrslasten sind insbesondere im Zusammenhang mit flachen Überdeckungen und der zu erwartenden Zunahme des Schwerlastverkehrs [BMVBS01] von großem Interesse, da hier hohe resultierende Bodenspannungen zu erwarten sind. Die Problemstellung flach überdeckter Leitungen wurde für biegeeweiche Rohre z.B. in [Ahl60] bereits anhand von Baustellenerfahrungen und [Wat68] anhand von Modellversuchen untersucht. FALTER stellt in [Fal08] aktuelle Untersuchungen zur Thematik anhand von Versuchen im Maßstab 1:1 und FE-Simulationen vor.

Typische Belastungen flach überdeckter Kanäle sind vertikale Scheitelbelastungen mit nur geringer seitlicher Stützung aus Erddruck, Längstragwirkung der Rohre aus konzentrierten Flächenlasten und Lastkonzentrationen im Rohrscheitel (Lastbrücke) ([Fal08], vgl. [Ste02]). Die Abhängigkeit solcher Belastungssituationen von der Nennweite wird insbesondere im Falle fehlender oder geringer horizontaler Stützung deutlich (Abbildung 23). Als Grenze für flache Überdeckungen kann nach [Fal08]  $h < 1,5 \text{ DN}$  bzw.  $h < 1 \text{ m}$  angenommen werden.

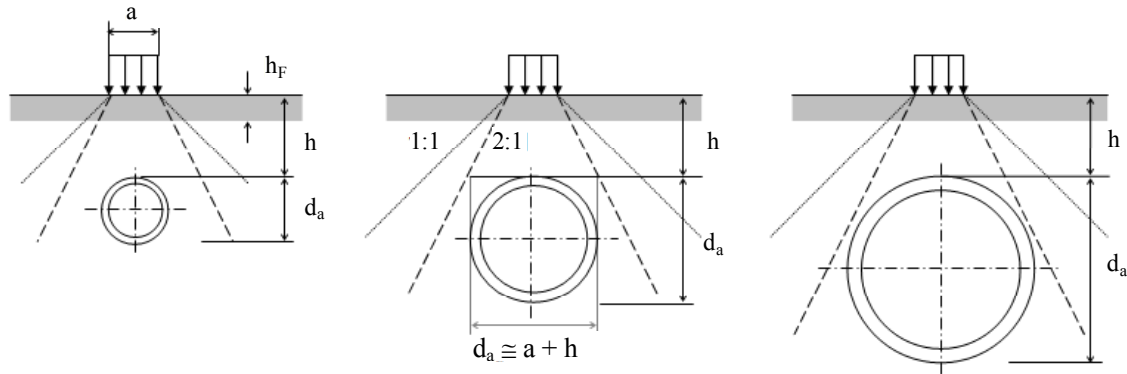


Abbildung 23: Spannungverteilung der Teilflächenlasten im Boden bei konstanter Überdeckung und unterschiedlicher Nennweite; aus [Fal08]

Versuchsergebnisse in [Fal08] bestätigen, dass neben der Querschnittsbetrachtung auch Schubspannungen und die Beanspruchungen in Rohrlängsrichtung bei flachen Überdeckungen zu betrachten sind. Die Anpassung der Berechnungsverfahren nach [DWA-A127] und [TR1295-2], [TR1295-3] steht noch aus und ist Gegenstand der Forschung [Fal08a].

#### 4.4.2 Außenwasserdruck

Betrachtungen zum Versagen von Rohrleitungen unter Außenwasserdruck, d.h. insbesondere Grundwasser, werden in Deutschland meist in Anlehnung an das DWA-Arbeitsblatt A 127 [DWA-A127] am elastisch gebetteten Kreisring bzw. für Inliner nach DWA-Merkblatt M 127-2 [DWA-M127] geführt. Wesentliche Erkenntnisse, insbesondere zur mathematisch-physikalischen Beschreibung des Verhaltens eingeeerdeter Rohre als einseitig elastisch gebetteter Kreisring, gehen auf die Untersuchungen von FALTER in [Fal75] zurück. GAUBE beschreibt in [Gau74] das besondere Versagensverhalten gebetteter Kunststoffrohre darüber hinaus durch halb-empirische Ansätze. Weitere Untersuchungen zu entsprechenden statischen Nachweisen werden z.B. in [Fal94], [Glo77], [Gau77], [Wag92], [Lo94], [Wei97] dargestellt. Als extreme Bettungssituationen können vor diesem Hintergrund das völlig freie Rohr ohne Bettung und das Rohr in starrer Ummantelung unterschieden werden. Das grundsätzliche Verhalten des Rohres unter einem gleichmäßigen, normalentremen Außen(wasser)druck soll für diese Fälle nachfolgend am Kreisringmodell verdeutlicht werden (vgl. [Bos96]).

Grundlegende Zusammenhänge zum Beulverhalten des freien Kreisringes wurden von TIMOSHENKO in [Tim61] dargestellt (s.a. [Gui94]). TIMOSHENKO beschreibt das Beulverhalten des freien, dünnen Ringes, der mit einem konstanten Außendruck radial belastet wird. Im Falle einer beliebig kleinen Anfangsverformung kommt es unter kritischer Belastung zum Beulen des Kreisringes, wie in Abbildung 24 dargestellt.

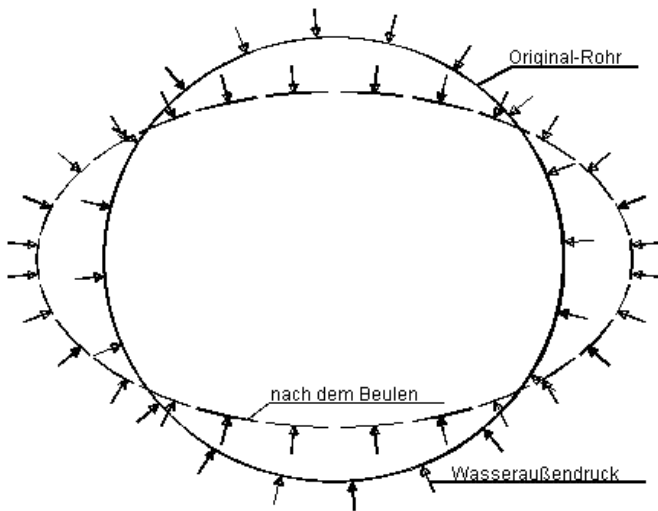


Abbildung 24: Beulen eines freien Ringes unter Außendruck; nach [Gui94], verändert

Das Biegemoment „ $M$ “ an einer beliebigen Stelle des Kreisringes kann dann aus den Gleichgewichtsbedingungen und geometrischen Zusammenhängen nach Abschnitt 4.1.3 abgeleitet werden. Die Auslenkung  $w$  des Ringes in radialer Richtung wird dabei durch die Differentialgleichung (4.1-9) beschrieben. Die kritische Beullast  $p_{krit}$  bestimmt sich dann für allgemeine Beulwellenzahlen  $k$  eines Rohres mit Radius  $R$  zu

$$p_{krit} = \frac{(k^2 - 1) \cdot EI}{R^3} \tag{4.4-1}$$

Mit der kleinsten nicht-trivialen Lösung  $k = 2$  ergibt sich die kritische Beullast des freien Rohres zu

$$P_{krit} = \frac{3 \cdot EI}{R^3} \tag{4.4-2}$$

Die verschiedenen Versagensfiguren sind für  $k=2,3,4$  im Bild 3 dargestellt.

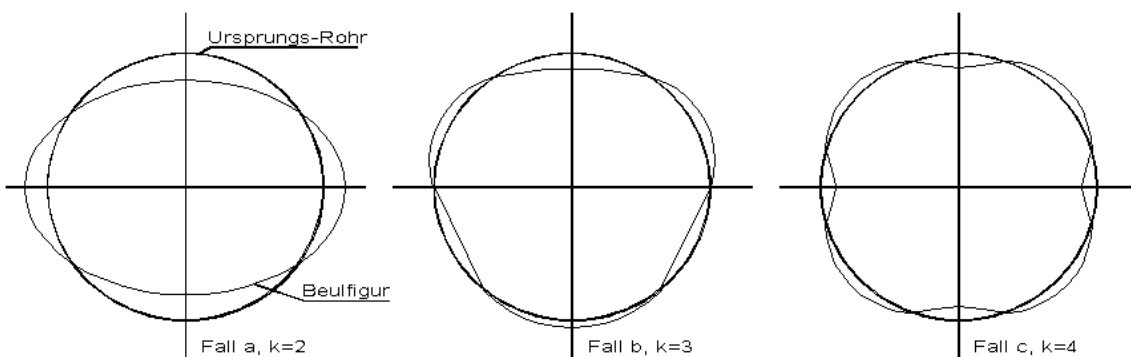


Abbildung 25: Darstellung zwei-, drei- sowie vierwelliger Beulfiguren

Wird auch der Faktor  $(1-\nu^2)$  zur Berücksichtigung behinderter Querdehnung des langen Rohres in die Gleichung (4.4-2) eingebunden, kann für das vollwandige freie

Rohr der Länge „1“ die allgemeine Form der Gleichung (4.4-1) auch geschrieben werden zu:

$$p_{krit} = 2 \cdot \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \left( \frac{d}{D_m} \right)^3 \quad (4.4-3)$$

mit der Querdehnzahl  $\nu$ , der Wanddicke  $d$  und dem mittleren Rohrdurchmesser  $D_m$ .

Eine Beschreibung des Stabilitätsversagens eines starr ummantelten spaltfreien Rohres unter Außendruck-, Temperatur- bzw. Schwindbelastung erfolgte durch GLOCK [Glo77], CHENEY [Che71] und CHICUREL [Chi68]. LO und ZHANG [Lo94] untersuchten darüber hinaus auch den Einfluss einer Spaltbildung zwischen Ummantelung und Inliner auf das Beulproblem. FALTER [Fal94] stellt ein Berechnungsverfahren vor, das ausgehend von der Lösung GLOCKs sowohl die Spaltbildung als auch Vorverformungen anhand von Vorfaktoren berücksichtigt, welche aus Stabwerksberechnungen abgeleitet wurden. Von WAGNER [Wag92] ist aus Ergebnissen von Versuchen an Inlinern unter besonderer Berücksichtigung des Spalteinflusses ein rein empirischer Bemessungsansatz entwickelt worden.

Alle Ansätze stellen mehr oder weniger gute Näherungen des tatsächlichen Beulverhaltens dar und gehen von verschiedenen vereinfachenden Annahmen aus. Bis auf die leicht abweichende Näherung von WAGNER [Wag92] lassen sich alle Ansätze bei Vernachlässigung des Querdehnungseinflusses für Vollwandrohre auf die Form

$$p_{krit.} = C \cdot E \cdot \left( \frac{d}{D_m} \right)^b \quad (4.4-4)$$

zurückführen und unterscheiden sich lediglich durch den Vorfaktor  $C$  und den Exponenten  $b$  (vgl. Gleichung 4.4-3)<sup>50</sup>. Sie beziehen sich ausschließlich auf Kreisprofile. Für Eiprofile sind FEM-Berechnungen vorzuziehen [Mie97].

### 4.4.3 Reibung aus Axialverschiebung

#### 4.4.3.1 Reibungswiderstand und Reibungskraft

Werden Rohre bei der Verlegung in geschlossener Bauweise eingezogen, eingeschoben oder eingepresst, entstehen im Kontaktbereich zwischen Rohrleitung und Untergrund Reibungswiderstände, deren Summation über Rohrumfang und Rohrlänge die resultierende Reibungskraft an der Rohrleitung ergeben. Der spezifische Reibungswiderstand zwischen Rohrleitung und Rohrumbgebung hängt

<sup>50</sup> Eine Übersicht der Werte für  $C$  und  $b$  findet sich in [Bos96] bzw. Tabelle 5.3.2-23 in [Ste99].

nach COULOMB von der radialen Kontaktspannung  $\sigma_R$  und dem Reibungsbeiwert  $\mu$  ab. Unter Vernachlässigung tangentialer Reibungskräfte<sup>51</sup> ergibt sich die zu überwindende Reibungskraft  $F$  einer Rohrleitung mit kreisrundem Rohrquerschnitt in Längsrichtung dann zu

$$F(L) = \int_L \oint \mu(l, \varphi) \cdot \sigma_R(l, \varphi) \cdot \frac{d_a}{2} d\varphi dl \quad (4.4-5)$$

mit dem Reibungsbeiwert  $\mu(l, \varphi)$ , der radialen Kontaktspannung  $\sigma_R(l, \varphi)$ , dem Rohraußendurchmesser  $d_a$  und der Rohrleitungslänge  $L$ .

Mit Blick auf die Entstehung und Entwicklung der Reibungswiderstände lassen sich die beiden Fälle der gleichgerichteten Axialbewegung, z.B. bei Vortriebsrohren, und der zyklischen Axialbewegung, z.B. bei Fernwärmleitungen, unterscheiden.

Daneben entstehen besondere Erddruckverhältnisse beim Einsatz von Bodenverdrängungsverfahren. Allerdings liegen nach [Ste03] noch keine standardisierten Verfahren zur Ermittlung der Lastannahmen für mittels Bodenverdrängungsverfahren verlegter Rohrleitungen vor. Empirische Berechnungsansätze für einzelne Bodenverdrängungsverfahren (vgl. [Möl89], [Fal95]) greifen weitgehend auf die Modellvorstellung einer Aufweitung eines radialsymmetrischen Hohlraumes in einer elasto-plastischen Scheibe zurück.

Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend die grundsätzlichen Zusammenhänge zur Wandreibung in axialer Richtung für Vortriebsrohre und Fernwärmleitungen beschrieben. Zur Entwicklung und Übertragung von Tangentialspannungen am Umfang von Vortriebsrohren nach Abschluss des Vortriebs sei auf [Sch04] verwiesen.

#### 4.4.3.2 Reibungskräfte beim Rohrvortrieb

Zum Verschieben der Vortriebsrohre müssen die an den Pressstationen eingeleiteten Pressenkräften neben dem Eindringwiderstand aus Brust-/Schneidwiderstand auch den Reibungswiderstand überwinden. HASAN stellt in [Has96a] verschiedene Ansätze zur Berechnung eines über die Mantelfläche konstanten Reibungswiderstandes  $M$  dar<sup>52</sup>, der entsprechend Gleichung (4.4-5) die Berechnung der Reibungskraft  $F$  vereinfacht zu

$$F = M \cdot d_a \cdot \pi \cdot L. \quad (4.4-6)$$

<sup>51</sup> Wird ein Teil der Reibungskräfte bereits durch Tangentialspannungen  $\tau_{\text{top}}$  in Umfangsrichtung aktiviert, reduzieren sich die aktivierbaren Reibungskräfte in Längsrichtung entsprechend zu (vgl. [Ach95]):  $\tau_{\text{red}} = \sqrt{(\mu\sigma_R)^2 - \tau_{R\varphi}^2}$ ;

zur Aktivierung von Tangentialspannungen im späteren Betriebszustand s.a. [Sch04].

<sup>52</sup> s. Tabelle 6 in [Has96a]

Neben pauschalen Abschätzungen mit  $M = 10 - 50 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  werden in [Has96a] auch Berechnungsformeln dargestellt, mit denen die mittlere Mantelreibung in Abhängigkeit der zu erwartenden mittleren Bodenspannungen am Rohrumfang und der angenommenen mittleren Reibungsbeiwerte für das Oberflächenverhalten in Anlehnung an den Integrationsterm in Gleichung (4.4-5) berechnet werden können.

Nach [Ste03] spielt auch der Bewegungszustand des vorzutreibenden Rohrstranges eine maßgebliche Rolle. Demnach kommt es beim Vortrieb immer wieder, bedingt durch Unterbrechungen, z.B. für den Einbau eines neuen Vortriebsrohres, zum Übergang von der Gleitreibung in die Haftreibung mit teilweise erheblichen Lastspitzen. Richtwerte und Bestimmungsgleichungen für den Reibungsbeiwert  $\mu$  in Abhängigkeit von Rohrwerkstoff, anstehender Bodenart und Bewegungszustand des Rohrstranges sind in [Ste03] zusammengefasst<sup>53</sup>.

Bei Vortrieben mit gekrümmter Linienführung können lokal erhebliche Abweichungen zu den nach Gleichung 4.4-6 pauschal ermittelten Reibungswiderständen entstehen. Während der in Gleichung 4.4-5 dargestellte Kennwert  $\mu(l, \varphi)$  bei vorgegebener Kinematik der Kurvenfahrten noch wahlweise als Kontaktreibung zwischen Boden und Rohr bzw. Ringraumschmierung und Rohr abgeschätzt werden kann, hängen die eigentlichen Kontaktspannungen  $\sigma_R(l, \varphi)$  wesentlich von den zu erwartenden Bettungsreaktionen ab. Für die ideal gekrümmte Linienführung eines fugenlosen Rohrstrangs lassen sich die Reibungskräfte nach [Shi01] bei konstantem  $\mu$  vereinfacht darstellen durch:

$$F_2 = F_1 \cdot e^{\mu \cdot \theta} + \frac{e^{\mu \cdot \theta} - 1}{\mu \cdot \theta} \cdot M \cdot \pi \cdot d_a \cdot L \quad (4.4-7)$$

mit der Vortriebskraft  $F_1$  vor der Kurve und  $F_2$  hinter Kurve, dem Kurvenöffnungswinkel  $\theta$ , der Kurvenlänge  $L$ , der Mantelreibung  $M$  und dem Rohraußendurchmesser  $d_a$ .

Zur Berücksichtigung der in [IKT07] beobachteten Abweichungen der Rohrstrangkinematik von der in [Shi01] dargestellten Idealvorstellung (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18 in 4.3.3.2) haben ACHMUS und KLAMETH in [Ach07] die Interaktion eines Vortriebsrohres mit dem umgebenden Erdreich im Lockergestein für verschiedene Böden und Überdeckungshöhen quantifiziert. Es wurde ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, mit dem sich umfassende Kraft-Verschiebungs-Beziehungen für die Querverschiebung eines Vortriebsrohres unter Vortriebsbelastungen und damit die resultierenden Reibungswiderstände ermitteln lassen.

<sup>53</sup> vgl. [Ste03], S. 789-795



#### 4.4.3.3 Reibungskräfte an Fernwärmeleitungen

Im besonderen Fall der Fernwärme erfahren Rohrleitungen bedeutende Belastungsänderungen infolge der sich ändernden Mediumtemperatur [Bei93]. Dabei durchlaufen die für den üblichen Betrieb und eine Nutzungsdauer von 30 Jahren ausgelegten Fernwärmeleitungen 100 bis 2500 Vollastwechsel [DIN13941]. Aus den Mediumtemperaturschwankungen von bis zu  $T = 120$  K resultieren, verglichen mit herkömmlichen Rohrleitungen, große Verschiebungen. Nach WEIDLICH [Wei08] nehmen die Reibungskräfte an zyklisch axial verschobenen Rohrleitungen ab, bis sie einen Minimalwert erreicht haben, der sich nicht mehr wesentlich ändert. Dieser Vorgang wird auch als Tunneleffekt bezeichnet und kann wie folgt beschrieben werden:

Die Reibung zwischen Rohrleitung und Boden hängt nach COULOMB von der Reibungskraft  $F$  und dem Reibungsbeiwert  $\mu$  ab.  $F$  ergibt sich wiederum aus der mittleren Radialspannung  $\sigma_m$  am Rohrumfang, die nach ACHMUS [Ach95] berechnet werden kann zu

$$\sigma_m = \frac{1+k}{2} \cdot \gamma \cdot \left( H + \frac{D}{2} \right)$$

mit der Wichte  $\gamma$  des umgebenden Bodens, der Überdeckungshöhe  $H$  und dem Rohrdurchmesser  $D$ . In [Ach95] wird der Erddruckbeiwert  $k$  vereinfachend für lockere bis mitteldichte Lagerungen zu 0,5, mitteldichte bis dichte Lagerung zu 0,7 und dichte bis sehr dichte Lagerung zu 0,9 angesetzt.

WEIDLICH beschreibt in [Wei08] den bodenmechanischen Prozess der Reibkraftabnahme unter zyklischer Belastung. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich drei Bereiche um das Rohr ausbilden (Abbildung 26):

- (a) eine Scherzone im Kontaktbereich Rohr-Boden, Dicke  $d_s$ ,
- (b) ein durch Dilatanzerscheinungen verdichteter Bereich, Dicke  $d_b$ , und
- (c) ein ungestörter Bereich.

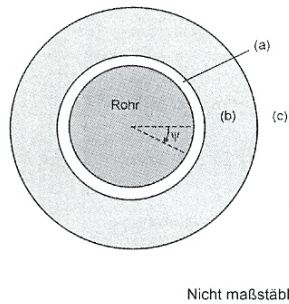


Abbildung 26: Bereichaufteilung um ein Rohr unter zyklischer Axialverschiebung; aus [Wei08]

Diese drei Zonen bilden sich innerhalb der ersten 5 bis 10 Zyklen aus. WEIDLICH beobachtete in Versuchen mit Sand und Rohrnennweiten DN 40 – DN 80 Ringdicken  $d_b$  von ca. 20 cm mit  $d_b/d_s \approx 40$  [Wei08].

Das Rohr bewegt sich nach [Wei08] in einem plastifizierten Scherzonenring mit reduzierter Festigkeit, während der verdichtete Bereich darum infolge Spannungsumlagerungen Lasten übernimmt, wodurch die Radialspannung auf das Rohr abgemindert wird. Die Reibungskraft, die von den Radialspannungen abhängig ist, muss deshalb durch die axialen Verschiebungen immer weiter abnehmen, bis die drei Zonen voll ausgebildet sind. Die Größe dieser Abminderung wurde in [Wei08] als Abminderungsfaktor  $D_F$  mittels linearer Regression für den dort untersuchten enggestuften Sand mit dichter Lagerung, Rohrleitungen DN 40 – DN 80 und Überdeckungshöhen  $1 \leq H/D \leq 4$  bestimmt zu

$$D_F = -0,0388 \cdot \frac{H}{D} + 0,73 . \quad (4.4-8)$$

Andere typische Verfüllmaterialien, größere Verlegetiefen und größere Rohrdurchmesser wurden bisher nicht untersucht.

#### 4.4.4 Besondere Belastungen

Im deutschen Normen- und Regelwerk werden zur statischen Berechnung unterirdischer Kanäle und Leitungen die Lastfälle Erdlast, Verkehrslast und Flächenlasten sowie Eigengewicht, Wasserfüllung und Wasserdruck regelmäßig berücksichtigt (vgl. [DWA-A127]). Auf die Lastfälle aus Längsbiegung, Temperaturdifferenz und Auftrieb wird verwiesen<sup>54</sup>. Besondere Belastungen, wie sie bei Erdbeben oder im Falle von Bergsenkungen auftreten können, werden in diesem

<sup>54</sup> vgl. [DWA-A127], Abschnitte 3.4 und 5.1

Regelwerk allerdings nicht angesprochen. Sie sollen nachfolgend beispielhaft angeführt werden, um die Bandbreite möglicher besonderer Belastungen zu verdeutlichen.

#### 4.4.4.1 Seismische Wellen

Erdbeben sind eines der Naturphänomene, die für die Sicherheit von Menschenleben und für von Menschen geschaffene Bauwerke ein großes Risiko darstellen [Kuh04]. Einen Einblick in die Problematik der erdbebensicheren Auslegung von unterirdisch verlegten Rohrleitungen gibt STEIN in [Ste03]. Des Weiteren ist die seismische Gefährdung unterirdischer Ver- und Entsorgungsnetze mitbestimmend für das Ausmaß der Folgeschäden eines Bebens und die Möglichkeit, die Bevölkerung nach einem Erdbeben effektiv und ausreichend zu versorgen. Die Erdbebenerregung setzt nach KUHLMANN [Kuh04] Energie frei, die von Wellen übertragen wird und letztlich zu Spannungen und Verformungen an der Rohrleitung führt. Durch Wellenbeanspruchung hervorgerufene Verformungen werden demnach in drei Anteile eingeteilt: die axiale Verformung infolge Normalspannungsbeanspruchung, die Krümmung in Längsrichtung infolge Biegebeanspruchung und die ellipsenförmige Verformung in Querrichtung. Die Art und Größe der Beanspruchung hängt von der Wellenart und dem Einfallswinkel der Wellen ab. Die verschiedenen Beanspruchungen sind schematisch in Abbildung 27 dargestellt.

KUHLMANN erläutert in [Kuh04] die wesentlichen Grundlagen für die Quantifizierung der seismischen Gefährdungen, behandelt die aus der seismischen Einwirkung resultierende Vulnerabilität von Bauwerken, insbesondere der unterirdischen Infrastruktur und entwickelt geeignete Verfahren, um die Reaktion unterirdischer Rohrleitungen auf seismische Beanspruchungen zu ermitteln. Aufgrund der Komplexität der Fragestellung wird hier auf eine detaillierte Darstellung verzichtet.

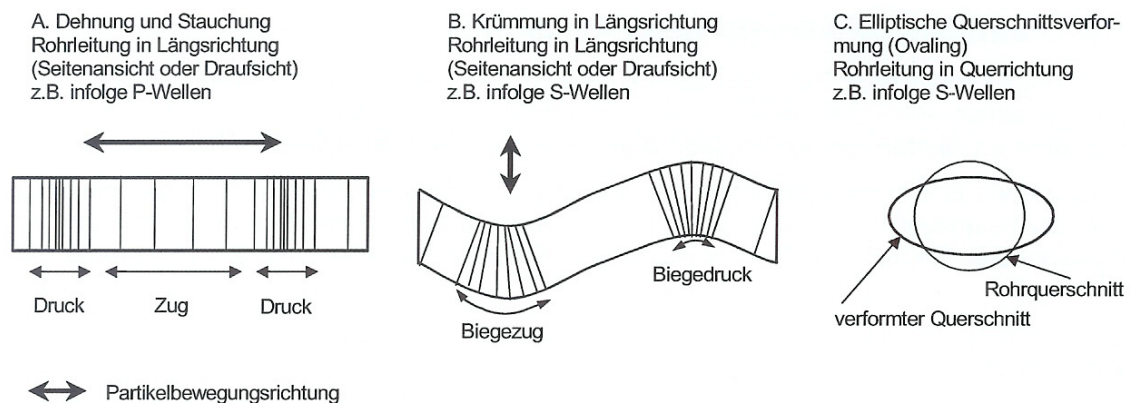


Abbildung 27: Verformungen an Rohrleitungen unter seismischer Beanspruchung; aus [Kuh04]

#### 4.4.4.2 Bergsenkungen

Die Vorausberechnung von Bodenbewegungen im Zusammenhang mit Bergbaubeanspruchungen dient dem Ziel, die Schadensrisiken aus einem Abbau

abzuschätzen und den sicheren Betrieb im Abbaubereich aufrecht zu erhalten. Mit Blick auf die Beanspruchung unterirdischer Rohrleitungen werden über die Bodenbewegungsvorausberechnung vom Bergbau diejenigen Rohrleitungsabschnitte eingegrenzt, in denen nach der allgemeinen Erfahrung mit einem Schaden gerechnet werden muss, wenn dagegen nicht rechtzeitig Sicherungsvorkehrungen getroffen werden [Spi98], [IKT98]. An der Tagesoberfläche wird die Wirkung des Bergbaus nach [Spi98] u.a. an der Bodensenkung, Schiefelage, Krümmung, Verschiebung und den Längenänderungen sichtbar (vgl. Abbildung 28). KIWITT unterscheidet in seiner weitgehend empirisch orientierten Arbeit [Kiw73] den Einfluss von vertikalen Bewegungselementen, wie Senkung, Schiefelage und Krümmung, und den Einfluss horizontaler Punktverschiebungen auf erdverlegte Rohrleitungen, insbesondere hinsichtlich der maximalen Reibung zwischen Rohrleitung und Erdboden. Seine Betrachtungen sind zwar auf das Verhalten geschweißter Stahlrohre für Öl- bzw. Gasantransportleitungen durch Bergbaubereiche fokussiert; sie wurden jedoch fortlaufend in der wissenschaftlichen Fachdiskussion (z.B. [Kol87]) oder auch in aktuellen Normen (z.B. [EN1594]) als Grundlage für weitergehende Interpretationen und Bemessungsansätze herangezogen. Im Ergebnis schlägt KIWITT eine wirtschaftlich günstigere Bestimmung der Dehnerabstände vor, indem er schließt<sup>55</sup>, „*dass der Dehnerabstand nicht mehr nach den zu erwartenden Längenänderungen festgelegt wird, sondern dass die zulässige Belastung einer erdverlegten Leitung den Dehnerabstand bestimmt.*“

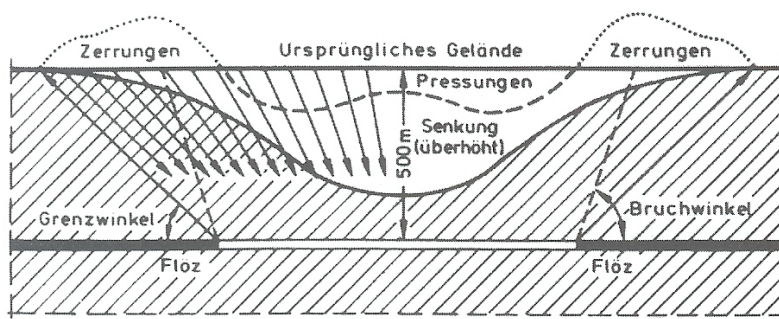


Abbildung 28: Zerrungen, Pressungen und Senkungen in oberflächennahen Bodenschichten infolge Bergsenkung; aus [IKT00]<sup>56</sup>

<sup>55</sup> s. [Kiw73], S. 84

<sup>56</sup> Aus [IKT00] entnommen; demnach im Original von Niemczyk, D.: Bergschadenskunde. Verlag Glückauf, Essen 1949.

## 4.5 Wahrscheinlichkeiten und Risiken

### 4.5.1 Aufgabenstellung

Zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren sind geeignete Messgrößen und -verfahren auszuwählen und in ihrer Aussagekraft einzuschätzen. Dies umfasst insbesondere die Einschätzung von Unsicherheiten, Erfolgswahrscheinlichkeiten und Risiken. Da es sich in der Regel um Einzelfallbetrachtungen bzw. die Beprobung einiger weniger Leistungsmuster handelt, ist eine statistische Auswertung nur selten möglich. Der Abschätzung wahrscheinlichkeitstheoretischer Zusammenhänge anstelle statistischer Interpretationen kommt damit eine besondere Bedeutung zu. Die Werkzeuge hierzu liefert die Wahrscheinlichkeitsrechnung. Diese ist nach [Müh88] gerade aus dem Wunsch entstanden, zufällige Vorgänge mathematisch zu beschreiben. Sie stellt demnach gewissermaßen als Präzisierung der Erfahrungswelt mathematische Modelle bereit, die für Anwendungen auf zufällige Vorgänge in Technik, Wirtschaft, Medizin usw. jeweils geeignet anzupassen sind. Innerhalb des wahrscheinlichkeitstheoretischen Modells einer Anwendung lassen sich rein rechnerisch aus speziellen Annahmen über die Verteilung von Grundwahrscheinlichkeiten abgeleitete Wahrscheinlichkeiten bestimmen: Die Wahrscheinlichkeitsrechnung lehrt laut [Müh88], wie man mit Wahrscheinlichkeiten rechnet; die Statistik lehrt demgegenüber, wie man jene Grundwahrscheinlichkeiten z.B. anhand von Stichproben ermittelt, sofern diese verfügbar sind.

Lediglich bei der Überprüfung typischer Fertigteile für den unterirdischen Leitungsneubau, wie z.B. Rohre und Formstücke, kann auf die klassischen statistischen Methoden zur Ermittlung und Verfolgung von Produktqualitäten zurückgegriffen werden. Der für das Bauwesen maßgebliche internationale Standard [ISO12491] führt hierzu aus *„The most frequently applied quality requirements limit admissible values of the mean by specified lower and upper boundary and/or limit the variance by a specified upper boundary, or specify boundaries for a given fractile. Then, methods of estimation and tests of population parameters and fractiles have to be applied.“*

Rein parameterbasierte Methoden greifen allerdings bei der Betrachtung einzelner Einbausituationen, wie sie insbesondere bei Sanierungsmaßnahmen auftreten, zu kurz<sup>57</sup>. Dennoch müssen z.B. im Rahmen von Verfahrenszulassungen oder Abnahmeprüfungen entsprechende Prüfentscheidungen (bestanden/nicht bestanden) in verantwortungsbewusster Weise gefällt werden. Dies setzt sowohl Verständnis für die bei der Bemessung zugrundegelegten Zusammenhänge

---

<sup>57</sup> Auch hierzu findet sich eine explizite Abgrenzung in der Normung, s. [ISO12491].

zwischen Einwirkungen, Widerständen und zu erwartenden Sicherheiten bzw. der Zuverlässigkeit eines Bauwerks als auch Kenntnisse über den Umgang mit bedingten Wahrscheinlichkeiten und den Wechselwirkungen zwischen Prüfmetho­den­genauigkeit und geprüfter Produktqualität voraus.

#### 4.5.2 Zuverlässigkeitsanalysen

Für die Bemessung von Tragwerken, Bauwerken und Rohrleitungen im konstruktiven Ingenieurbau, der Geotechnik und im Pipelinebau ist die Betrachtung der Zuverlässigkeit von Bemessungswerten für Einwirkungen und Auswirkungen von besonderer Bedeutung. Sie hat Eingang in die europäischen und internationalen technischen Regeln gefunden (vgl. [EN1990], [EN1997], [ISO16708]) und ist auch Gegenstand von Forschung und Lehre im Bauwesen [RUB01], [BUW08]. Für den Fall der Bemessung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen wurden entsprechende Sicherheitskonzepte in [DWA-A127], [DWA-M127] unter Berücksichtigung der Arbeiten von FUCHS [Fuc82], [Fuc84] zur probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie und ihre Anwendung auf im Erdboden verlegte Kanäle und Leitungen berücksichtigt. Die wesentlichen Zusammenhänge aus [Fuc82], [Fuc84] sind nachfolgend zusammengefasst.

Die Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie bedingt das Vorhandensein einer Grenzzustandsfunktion  $g$ , die den Zustand eines Bauwerkes oder eines Bauteiles in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter  $X_i$  beschreibt über

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = g(\underline{X}) = Z \quad (4.5-1)$$

Die Zufallsgrößen  $X_i$  stellen hierin Festigkeiten, Abmessungen und Lasten,  $g$  bzw.  $Z$  die Differenz zwischen aufnehmbaren und aufzunehmenden Einwirkungen (Lasten) dar.  $g(\underline{X}) = 0$  bezeichnet den Grenzzustand des Versagens; und Versagen tritt dann ein, wenn  $g(\underline{X}) < 0$  wird. Zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit ist es notwendig, die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(x_i)$  aller streuenden Größen zu kennen. Die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  ergibt sich als Integral der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichte aller Zufallsvariablen über den Versagensbereich mit  $g(\underline{X}_i) < 0$  bzw.  $Z < 0$  zu

$$p_f = \int_{z < 0} f(x_1, x_2, \dots, x_n) d\underline{x} \quad (4.5-2)$$

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit erfordert bei  $n$  Zufallsvariablen nach Gleichung (4.5-2) eine  $n$ -dimensionale Integration des Wahrscheinlichkeitsinhaltes des „Versagensbereiches“. Mit Ausnahme von Sonderfällen ist die Integration nicht mehr analytisch, sondern nur numerisch durchführbar. Zur approximativen Ermittlung der gesuchten Größen kann die sogenannte Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung herangezogen werden, bei der zwei Vereinfachungen eingeführt werden: erstens

wird die Grenzzustandsgleichung  $g(\underline{X}_i) = 0$  linearisiert und zweitens werden die Basisvariablen durch Mittelwert und Standardabweichung charakterisiert. [Fuc82]

Als Beispiel für eine Vereinfachung mittels Basisvariablen führt FUCHS in [Fuc84] die Beziehung zwischen zwei nach der Gauss-Verteilung charakterisierten Verteilungsdichten des Widerstands  $R$  und der Einwirkung  $S$  an (Abbildung 29a). Das Bauwerk ist auch hier so zu bemessen, dass der Versagensfall eine ausreichend geringe Auftretenswahrscheinlichkeit hat,  $R - S$  also größer oder gleich 0 ist. Da sowohl Widerstand  $R$  als auch Einwirkung  $S$  streuende Größen sind, überschneiden sich deren Verteilungsdichten. Es gibt also Fälle, in denen ein zufälliger Widerstand  $R$  kleiner als die gleichzeitig vorhandene Einwirkung  $S$  ist. Das bedeutet, dass Sicherheit im eigentlichen Sinn durch Bemessung nie garantiert werden kann. Zu dem schraffierten Bereich in Abbildung 29b gehören jedoch sehr kleine relative Häufigkeiten der Werte  $R$  und  $S$ , so dass ein gleichzeitiges Auftreten solch seltener Werte eine geringe Wahrscheinlichkeit hat.

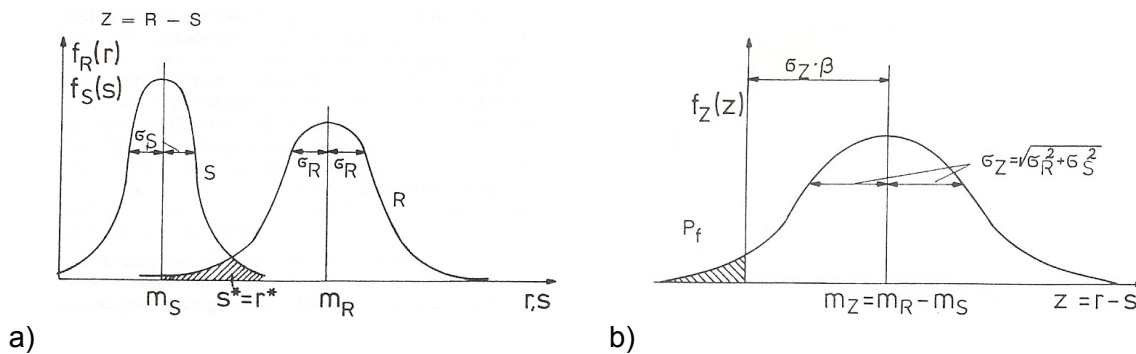


Abbildung 29: Verteilungsdichten; aus [Fuc84]  
 a) Widerstand  $R$  und Einwirkung  $S$   
 b) Sicherheitsabstand  $Z$

Die Wahrscheinlichkeit  $p_f$  von Kombinationen  $R < S$  ist auch hier ein Maß für die Unsicherheit eines Bauwerkes. Umgekehrt ist die Wahrscheinlichkeit  $p_s$  der Kombination  $R > S$ , die sog. Überlebenswahrscheinlichkeit, ein Maß für dessen Zuverlässigkeit. Sind  $R$  und  $S$  voneinander unabhängig und normalverteilt, so kann man die neue Zufallsvariable  $Z$  als Sicherheitsabstand zwischen  $R$  und  $S$  interpretieren. Versagen tritt demnach auf, wenn  $Z$  negative Werte annimmt.  $Z$  ist ebenfalls normal verteilt und der Mittelwert  $m_z$ , die Standardabweichung  $\sigma_z$  und der Variationskoeffizient  $V_z$  des Sicherheitsabstandes lassen sich ermitteln zu:

$$m_z = m_R - m_S; \quad \sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}; \quad V_z = \frac{\sigma_z}{m_z} \tag{4.5-3}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit entspricht nun der Fläche des schraffierten Bereiches in Abbildung 29b. Das Argument  $\beta$  der Standardverteilung an der Stelle  $Z = 0$  wird als Sicherheitsmaß im probabilistischen Nachweisverfahren nach [Fuc84] zugrunde gelegt und kann ermittelt werden zu

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_S}{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (4.5-4)$$

Demnach muss bei einer Bemessung je nach vorhandener Streuung  $\sigma_z$  stets  $m_R$  um  $\beta \cdot \sigma_z$  über  $m_S$  angehoben werden, um bei unterschiedlichen Streuungen, ausgedrückt durch  $\sigma_z$ , stets gleiche Zuverlässigkeit zu erhalten. Zur Problematik der Einhaltung eines gleichmäßigen Zuverlässigkeitsniveaus weist FUCHS in [Fuc82] darauf hin, dass zur Vergleichmäßigung des Zuverlässigkeitsniveaus entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte aus den o.a. statistischen Kenngrößen abgeleitet werden können. Dies betrifft auch den Lastsicherheitsbeiwert, der demnach aufzuspalten ist für Bauausführung, Erdauflast, Verkehrslast, Eigengewicht und Wasserfüllung. Vor dem Hintergrund seiner umfassenden Analysen zum Einfluss der vorgenannten Kenngrößen auf die Sicherheit unterirdischer Leitungen schließt FUCHS seine Ausführungen in [Fuc84] mit dem Satz: „Die Zuverlässigkeit einer im Erdboden verlegten Rohrleitung hängt somit in entscheidendem Maß von einer den Annahmen entsprechenden Bauausführung ab.“

#### 4.5.3 Bedingte Wahrscheinlichkeiten

Im Rahmen des statistischen Nachweises einzelner Eigenschaften und Bemessungswerte von Produkten und Verfahren werden im Bauwesen auch bedingte Wahrscheinlichkeiten herangezogen (vgl. [ISO12491], [EN1990]). Hierdurch lassen sich insbesondere qualitätsrelevante Erfahrungen, wie z.B. „unsichere Vorverteilungen“ (vgl. Abschnitt D.7 in [EN1990]), wahrscheinlichkeitstheoretisch erfassen. Eine ähnliche Argumentation kann auch zur Bewertung der zu erwartenden Genauigkeit von Prüfergebnissen in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Prüfmethode und der abgeschätzten Verteilung der Produktqualität herangezogen werden. Als mathematisches Instrument bietet sich hier die Definition der bedingten Wahrscheinlichkeit an. Die bedingte Wahrscheinlichkeit von  $A$  unter der Voraussetzung, dass  $B$  eingetroffen ist, d.h.  $P(A|B)$ , entspricht nach [Müh88]:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (4.5-5)$$

Im Falle einer vollständigen Fallunterscheidung mit den einzelnen Ereignissen  $A_k$  gilt dann für jedes Ereignis  $B$  der Satz von der totalen Wahrscheinlichkeit:

$$P(B) = \sum_k P(A_k) \cdot P(B|A_k) \quad (4.5-6)$$

sowie der Satz von BAYES (oder Satz von der Wahrscheinlichkeit à posteriorie):

$$P(A_k|B) = \frac{P(A_k) \cdot P(B|A_k)}{\sum_i P(A_i) \cdot P(B|A_i)} \quad (4.5-7)$$



#### 4.5.4 Produzenten- und Konsumentenrisiko

Für das Bauwesen wird in [ISO12491]<sup>58</sup> deutlich herausgestellt, dass die klassischen statistischen Methoden zur Bewertung von Reihenuntersuchungen an Bauprodukten im Falle der Betrachtung einzelner Einbausituationen, wie sie z.B. im Falle der Sanierung von Leitungsschäden üblicherweise auftreten, zu kurz greifen. Für die Abnahmeprüfung im Einzelfall („inspection of an isolated lot“) werden daher stichprobenartige Eigenschaftsprüfungen („sampling inspection by attributes“) mit den Ergebnissen „bestanden“ bzw. „nicht bestanden“ und einer Abschätzung des sogenannten Produzenten- bzw. Konsumentenrisikos vorgeschlagen. Ähnliche Zusammenhänge können analog auf die Prüfung von Produkten und Verfahren für den unterirdischen Kanal- und Leitungsbau übertragen werden.

Ausgehend von den allgemeinen Darstellungen in [Müh88] bzw. [ISO12491] wird von einem Produzentenrisiko gesprochen, wenn die Nullhypothese „bestanden“ abgelehnt wird, obwohl sie wahr ist. Entsprechend wird vom Konsumentenrisiko gesprochen, wenn die Nullhypothese „bestanden“ angenommen wird, obwohl sie falsch ist. Produzentenrisiko bzw. Konsumentenrisiko stehen damit in engem Zusammenhang zu den statistischen Begriffen der Spezifität bzw. Sensitivität.

**Die Spezifität** (auch **Richtignegativ-Rate**) ist die Wahrscheinlichkeit, einen tatsächlich negativen Sachverhalt auch durch ein negatives Testergebnis zu erkennen. Dies entspricht nach dem Satz von BAYES mit Gleichung (4.5-7) in der Interpretation für Produkttests der bedingten Wahrscheinlichkeit

$$P(A_0 | B) = \frac{P(A_0) \cdot P(B | A_0)}{P(A_0) \cdot P(B | A_0) + P(A_1) \cdot P(B | A_1)}$$

mit

$A_0$  – das Testergebnis ist negativ

$A_1$  – das Testergebnis ist positiv

$B$  – das getestete Produkt ist fehlerfrei

Mit der Falschpositiv-Rate addiert sich die Richtignegativ-Rate zu 100% der tatsächlich negativen Sachverhalte. Falls ein negativer Sachverhalt fälschlicherweise als positiv (**falschpositiv**) klassifiziert wird, spricht man von einem **Fehler 1. Art** (vgl. **Produzentenrisiko**).

Die **Sensitivität** (auch **Richtigpositiv-Rate**) ist die Wahrscheinlichkeit, einen tatsächlich positiven Sachverhalt auch durch ein positives Testergebnis zu erkennen. Sie gibt also den Anteil der richtig als positiv (richtig positiv) erkannten Sachverhalte an der Gesamtheit der in Wirklichkeit positiven Sachverhalte an. Dies entspricht nach

<sup>58</sup> s. Abschnitt „sampling inspection“ (Stichprobenprüfung) in [ISO12491]

dem Satz von BAYES mit Gleichung (4.5-7) in der Interpretation für Produkttests der bedingten Wahrscheinlichkeit

$$P(A_1 | C) = \frac{P(A_1) \cdot P(C | A_1)}{P(A_0) \cdot P(C | A_0) + P(A_1) \cdot P(C | A_1)}$$

mit

- $A_0$  – das Testergebnis ist negativ
- $A_1$  – das Testergebnis ist positiv
- $C$  – das getestete Produkt ist fehlerhaft

Mit der Falschnegativ-Rate addiert sich die Richtigpositiv-Rate zu 100 % der tatsächlich positiven Sachverhalte. Falls ein positiver Sachverhalt fälschlicherweise als negativ (**falschnegativ**) klassifiziert wird, spricht man von einem **Fehler 2. Art** (vgl. **Konsumentenrisiko**).

#### 4.5.5 Aussagekraft von Dichtheitsprüfungen

Der Aussagekraft von Dichtheitsprüfungen an unterirdischen Kanälen und Leitungen kommt eine besondere Bedeutung zu, da Undichtheiten nicht nur zu Medienverlusten und Gefährdungen führen, sondern indirekt auch die Standsicherheit und Funktionsfähigkeit durch z.B. Grundwasserinfiltration und Bodeneinbrüche beeinträchtigen können. In Abschnitt 4.2 wurde bereits dargestellt, dass damit auch ein hohes Verständnis für die technischen Zusammenhänge zwischen Leckagegröße, Prüfdruck und Prüfmedium erforderlich ist. Darüber hinaus sind aber auch Risiken und Wahrscheinlichkeiten für Fehlinterpretationen von Prüfergebnissen zu bewerten. Dies gilt insbesondere für die in Kanalisationen mittels mobiler Absperrgeräte unter schwierigen Umweltbedingungen durchgeführten Dichtheitsprüfungen. Die Aussagekraft der Prüfergebnisse ist hier stets aufs Neue zu hinterfragen, insbesondere mit Blick auf die Zuverlässigkeit der Prüfung, d.h. inwieweit in einzelnen Prüfungen die Möglichkeit *falschundichter* und *falschdichter* Prüfungen (vgl. Abschnitt 4.5.4, falschpositiv / falschnegativ) zu erwarten ist. Nachfolgend werden diese Zusammenhänge beispielhaft näher untersucht. Da keine belastbare Datenbasis zur Zuverlässigkeit von Dichtheitsprüfungen zur Verfügung steht, werden die notwendigen Parameter in den Berechnungsbeispielen in praxisorientierten Größenordnungen frei festgelegt<sup>59</sup>.

Nach Abschnitt 4.5.4 spricht man von einem Fehler 1. Art oder Produzentenrisiko, wenn ein negativer Sachverhalt fälschlicherweise als positiv (falschpositiv)

<sup>59</sup> Aus der Auswertung von Gesprächen mit Mitgliedern des Expertengremiums „Dichtheitsprüfung“ des kommunalen Netzwerks Grundstücksentwässerung ([www.komnetgew.de](http://www.komnetgew.de)) und Gesprächen mit Fachverbänden und Ausbildungsstätten des Handwerks, Tiefbaus und Garten- und Landschaftsbaus, insbesondere DEULA Kempen ([www.deula-kempen.de](http://www.deula-kempen.de)). Eine gesicherte Datengrundlage liegt nicht vor. Die in diesem Abschnitt gewählten Schätzwerte für Fehlerquoten dienen lediglich zur Veranschaulichung von Fehlereinflüssen auf die Prüfergebnisse in praxisrelevanten Größenordnungen. Die Form 10<sup>n</sup> der Fehlerquoten begünstigt diese Anschauung rein zufällig.

klassifiziert wird. Im Rahmen der Dichtheitsprüfung heißt dies, dass das Prüfergebnis auf eine Leckage schließen lässt (positives Prüfergebnis), obwohl die Leitung dicht ist. Im Folgenden wird dieser Fall als „*falschundicht*“ bezeichnet. Ursachen für *falschundichte* Ergebnisse können z.B. die mangelhafte Absperrung des Prüfraumes oder Fehlinterpretationen von optischen Unregelmäßigkeiten bei Kamerabefahrung der Leitung sein. Darüber hinaus werden spezielle Einflüsse für die Wasserinnendruckprüfung und Luftdruckprüfung genannt<sup>59</sup>: Für die Wasserinnendruckprüfung betrifft dies z.B. die Kompression eines verbliebenen Luftteilschlusses oder dessen Entweichen durch geringfügige Undichtheiten sowie unerkannte Umläufigkeiten an Absperrerelementen. Für die Luftdruckprüfung sind insbesondere Temperatureinflüsse<sup>60</sup> und Umläufigkeiten an Absperrerelementen wegen korrodierter, ungereinigter oder poröser Rohroberflächen sowie undichter und zum Prüfraum gehörender Schläuche und Geräte zu nennen.<sup>61</sup> Die *Fehlerrate* „*falschundicht*“ wird sowohl für die Wasserinnendruckprüfung als auch für die Luftdruckprüfung für den Einsatz in der Kanalisation auf ca. ein Zehntel der Prüfergebnisse geschätzt und in den nachfolgenden Beispielrechnungen mit 10% angesetzt<sup>59</sup>.

Nach Abschnitt 4.5.4 spricht man von einem Fehler 2. Art oder Konsumentenrisiko, wenn ein positiver Sachverhalt fälschlicherweise als negativ (*falschnegativ*) klassifiziert wird. Im Rahmen der Dichtheitsprüfung heißt dies, dass das Prüfergebnis auf eine leckagefreie, dichte Leitung schließen lässt (negatives Prüfergebnis), obwohl die Leitung undicht ist. Im Folgenden wird dieser Fall als „*falschdicht*“ bezeichnet. *Falschdichte* Ergebnisse ergeben sich insbesondere durch ungewollte bzw. unerkannte Abdichtungseffekte, wenn z.B. Schmutzstoffe zeitweise Undichtheiten abdichten oder die Prüfeinrichtung bzw. Prüfblase selbst eine Schadstelle abdeckt oder durch Fehleinschätzungen und das Nichterkennen von Leckagen bei einer rein optischen Prüfung der Leitung. Auch der durch den Grundwasserspiegel verursachte Gegendruck, der bei Innendruckprüfungen die Zugabemenge soweit reduzieren kann, dass die Dichtheitskriterien scheinbar erfüllt werden, kann zu *falschdichten Ergebnissen* führen. Diese Fehlerquote wird allerdings als äußerst gering angesehen und soll daher für die weiteren Beispielberechnungen mit einem Zehntel der erwarteten *Falschundicht*-Rate angesetzt werden, d.h. die *Falschdicht*-Rate wird zu 1 % angenommen<sup>59</sup>.

---

<sup>60</sup> Kaufmann diskutiert diesen Einfluss auf die Ergebnisse von Prüfungen an Abwasserleitungen mittels Luftüber- und Luftunterdruck umfassend in [Kau97].

<sup>61</sup> Beispielrechnungen nach Gleichung (4.2-4) in Abschnitt 4.2.3 und die Ausführungen von KAUFMANN in [Kau97] und KÜNSTER in [Kün02] bestätigen die Empfindlichkeit sowohl der Luftdruckprüfung als auch der Wasserdruckprüfung gegenüber einer optisch geringfügigen Leckage von weniger als 1mm Durchmesser, die auch als Grenzleckage definiert wird. Führen optisch nicht erkennbare Undichtheiten zu schlechten Prüfergebnissen, gelten die Prüfungen als wiederholbar, aber nicht reproduzierbar (vgl. Abschnitt 6.4).

Wird vor der Druckprüfung optisch inspiziert, und z.B. die Hälfte der undichten Leitungen bereits vorher erkannt, sinkt die *Falschdicht-Rate* noch weiter auf 0,5%<sup>62</sup>. Die *Falschundicht-Rate* wird durch die optische Inspektion demgegenüber kaum oder gar nicht verändert, da die o.a. Fehlerquellen durch vorherige optische Inspektion kaum ausgeschlossen werden können.

Nur unter der Annahme, dass die Fehlerquellen für *falschundichte* Ergebnisse bei der Luftdruckprüfung und Wasserdruckprüfung weitgehend unabhängig voneinander sind<sup>63</sup>, kann bei gleichzeitiger Prüfung mit beiden Verfahren (Wasser/Luft) die Rate für eine zweifache Fehleinschätzung durch einfache multiplikative Verknüpfung der o.a. Fehlerraten berechnet werden. Daraus ergibt sich die *Falschundicht-Rate (W+D)* zu 1%. Sind die Ursachen für das Ergebnis „*falschdicht*“ demgegenüber ähnlicher Natur, so sollte hier auch die *Falschdicht-Rate (W+D)* weiterhin mit 1% bzw. 0,5%<sup>62</sup> angesetzt werden.

Die o.a. Fehlerraten der Prüfung bestimmen nun gemeinsam mit den tatsächlichen Produktfehlern die Aussagekraft einer Dichtheitsprüfung. Dabei ist unter Annahme bekannter Falschundicht- bzw. Falschdicht-Raten insbesondere von Interesse, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einem Prüfergebnis „bestanden“ bzw. „nicht bestanden“ tatsächlich von einer dichten bzw. undichten Leitung ausgegangen werden darf. Auch diese Wahrscheinlichkeiten - im folgenden Vorhersagewert des Prüfergebnisses (VdP) genannt – lassen sich unter Nutzung des Satz von BAYES entsprechend Gleichung 4.5-7 in Abschnitt 4.5.2 ermitteln. Für die Vorhersagewerte der Prüfergebnisse „bestanden“ und „nicht bestanden“ ergeben sich dann erwartungsgemäß Ausdrücke, die mathematisch den Definitionen der Sensitivität und Spezifität entsprechen, allerdings von anderen Grundaussagen ausgehen:

$$\text{VdP „bestanden“} = P(A_0 | B) = \frac{P(A_0) \cdot P(B | A_0)}{P(A_0) \cdot P(B | A_0) + P(A_1) \cdot P(B | A_1)} \quad (6.6-1)$$

mit

- $A_0$  – die getestete Leitung bzw. das Produkt ist **dicht**
- $A_1$  – die getestete Leitung bzw. das Produkt ist **undicht**
- $B$  – die Prüfung wurde mit dem Ergebnis „dicht“ **bestanden**

und

<sup>62</sup> unter der Annahme statistischer Unabhängigkeit der Ergebnisse der Druckprüfung von den optischen Eigenschaften der Leckagen und Auffälligkeiten

<sup>63</sup> Diese Annahme bedingt allerdings, dass eine grob mangelhafte Absperrung des Prüfraums mit Wasser- und Luftumläufigkeiten ausgeschlossen werden kann. Gerade diese Fehlerquelle wird in der Praxis aber häufig angeführt.

$$\text{VdP „nicht bestanden“} = P(A_1 | C) = \frac{P(A_1) \cdot P(C | A_1)}{P(A_0) \cdot P(C | A_0) + P(A_1) \cdot P(C | A_1)} \quad (6.6-2)$$

mit

$A_0$  – die getestete Leitung bzw. das Produkt ist **dicht**

$A_1$  – die getestete Leitung bzw. das Produkt ist **undicht**

$C$  – die Prüfung wurde mit dem Ergebnis „undicht“ **nicht bestanden**

Abbildung 30 zeigt den Vorhersagewert des Prüfergebnisses (VdP) „nicht bestanden“ für angenommene Falschundicht-Raten zwischen 0,01% und 50% in Abhängigkeit des Anteils tatsächlich dichter Probekörper<sup>64</sup>. Deutlich ist zu erkennen: Wenn der Anteil der tatsächlich dichten Leitungen 90% beträgt, ist für die o.a. Falschundicht-Rate von 10% für die einzelne Wasserdichtheits- bzw. Luftdruckprüfung mit Vorhersagewerten des Prüfergebnisses „nicht bestanden“ von ca. 52,5% zu rechnen. Dieses Ergebnis kann leicht mit Hilfe eines Wahrscheinlichkeitsbaums veranschaulicht werden. Nach Abbildung 31a sind in diesem Fall ca. die Hälfte aller in der Prüfung als „nicht bestanden“, d.h. undicht gewerteten Leitungen *falschundicht*. Sind sowohl die *Falschundicht*-Rate  $P(C|A_0)$  als auch die Fehlerquote des Produktes  $P(A_1)$  unendlich klein, jedoch von gleicher Größe, und wird die Richtigundichtrate  $P(C|A_1)$  näherungsweise zu 1 angenommen, so ergibt sich als Grenzwert des Vorhersagewertes exakt 50%. Denn neben der Summationsbedingungen  $P(A_0) + P(A_1) = 1$  gilt dann auch  $P(A_1) = P(C|A_0)$ , so dass aus Gleichung (6.6-2) folgt

$$P(A_1 | C) = \frac{P(A_1) \cdot P(C | A_1)}{P(A_0) \cdot P(C | A_0) + P(A_1) \cdot P(C | A_1)} = \frac{P(A_1) \cdot 1}{(1 - P(A_1)) \cdot P(A_1) + P(A_1) \cdot 1} = \frac{1}{2 - P(A_1)} \approx \frac{1}{2} = 50\%$$

Ähnliche Betrachtungen sind insbesondere aus der Psychologie und Medizin bekannt (vgl. [Gig04]).

<sup>64</sup> Der Einfluss unterschiedlicher *Falschdicht*-Raten kann hier vernachlässigt werden, da er in den Diagrammen für die im Text angeführten Beispielergebnisse von 1,0% und 0,5% nicht erkennbar wäre.

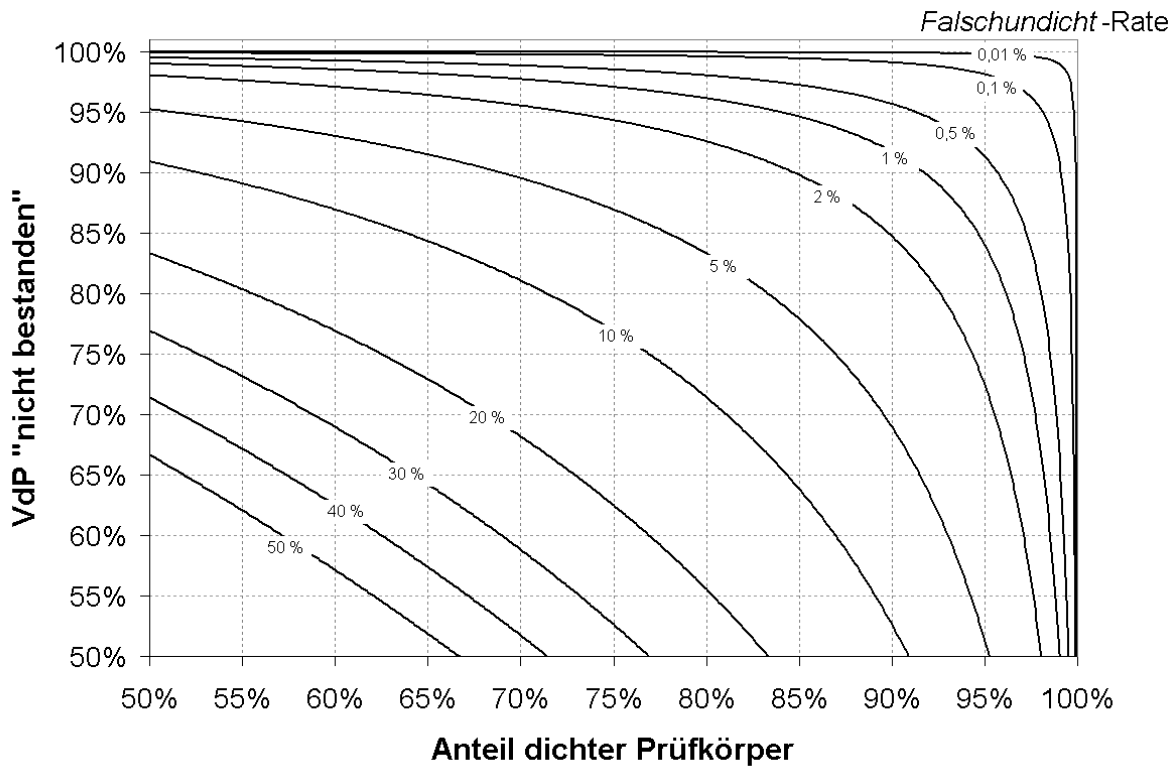
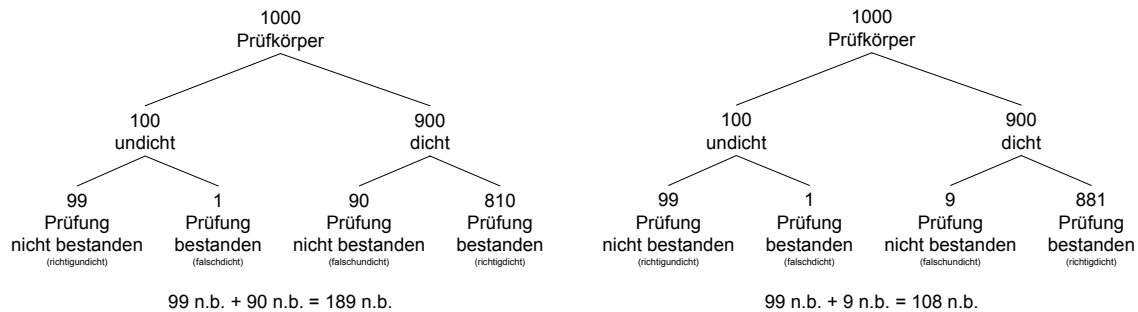


Abbildung 30: Vorhersagewert des Prüfergebnisses (VdP) „nicht bestanden“ Variation für verschiedene Falschundicht-Raten der Prüfung, in Abhängigkeit des Anteils der tatsächlich dichten Prüfkörper, bei Annahme einer Falschdichtrate von 1%



a) => Vorhersagewert (VdP) „nicht bestanden“ =  $99/189 \approx 52,5\%$     b) => Vorhersagewert (VdP) „nicht bestanden“ =  $99/108 \approx 91,5\%$

Abbildung 31: Wahrscheinlichkeitsbaum, Beispiel für 10% tatsächlich undichter Leitungen a) für Falschundicht-Rate von 10%; b) für Falschundicht-Rate von 1%

Erst bei Falschundicht-Raten von ca. 1% werden auch Vorhersagewerte von über 90% erreicht, wie auch der Wahrscheinlichkeitsbaum in Abbildung 31b bestätigt. Diese Zusammenhänge bestätigen die Anforderungen nach [EN1610], dass mit Luftdruck geprüfte Leitungen nur als „undicht“ klassifiziert werden dürfen, wenn eine anschließende Wasserdruckprüfung das Ergebnis bestätigt. Es wäre sogar zu bedenken, ob für die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren nicht anstelle von Wasser- oder Luftdruckprüfungen grundsätzlich optische Informationen

zur Undichtheit der Leitung entsprechend DIN 50104<sup>65</sup> (vgl. Abschnitt 4.2.1) vorzuziehen sind. Die optische Überprüfung im offenen Graben an der noch nicht überschütteten Leitung war bereits Gegenstand der früheren Norm DIN 4033 [DIN4033]<sup>66</sup> und auch zur Prüfung von Schlauchliner-Probestücken nach [APS05] wird die optische Beurteilung vorgezogen.

Neben dem Vorhersagewert der Prüfergebnisse sind noch zwei weitere Sachverhalte mit Blick auf die Aussagekraft von Dichtheitsprüfungen zu hinterfragen: Systematische Fehler und die Bedeutung der Messschwelle.

Systematische Fehler sind grundsätzlich nicht Gegenstand einer Betrachtung der Zuverlässigkeit<sup>67</sup>. Im Vorfeld ist auszuschließen, dass Prüfergebnisse anstatt durch das gewählte Bauteil bzw. Prüfverfahren selbst durch ein anderes äußeres Ereignis bzw. eine andere Randbedingung der Prüfung (z.B. abgesperrte Prüfventile oder Konstruktionsfehler der Entlüftungselemente/-schwimmer) beeinflusst werden. Erst wenn solche äußeren Einflüsse ausgeschlossen sind, können die Sensitivität bzw. Spezifität oder Fehler 1. und 2. Art der Prüfmethode bewertet werden.

Bei der Festlegung von Kriterien für die Dichtheitsprüfung ist die Höhe der unteren Messschwelle zu beachten, an der ein Messwert zuverlässig als Signal für die Messgröße erkannt wird. So nimmt die Wahrscheinlichkeit, einen Zustand messtechnisch zu erkennen, meist nicht sprunghaft von null auf eins an der definierten Messschwelle zu<sup>68</sup>.

Abschließend bleibt festzustellen, dass zur Bewertung der Aussagekraft von Dichtheitsprüfungen besondere Kompetenzen erforderlich sind. Dies betrifft insbesondere das methodische Verständnis für die wahrscheinlichkeitstheoretischen Hintergründe von qualitativen bzw. binären Prüfergebnissen, die Erfahrung in der Abschätzung realitätsnaher Fehlerraten sowie das praktische Verständnis für die Ausführungsrisiken bei Dichtheitsprüfungen mit Wasser oder Luft.

---

<sup>65</sup> vgl. Abschnitt 4.2.1 bzw. [DIN50104]: „Unter der Dichtheit des geprüften Hohlkörpers versteht man dann, dass bei den Versuchsbedingungen [...] sich keine Undichtheit an seiner Außenoberfläche zeigt.“

<sup>66</sup> vgl. [DIN4033], Pkt. 9.2 „Prüfung auf Wasserdichtheit“

<sup>67</sup> vgl. Fußnote 110, „accuracy“ vs. „precision“

<sup>68</sup> vgl. [IUP95] in [Eur98], hier wird auch von „minimum detectable (true) value“ gesprochen.

## 5 Versuchstechnische Modelle

Eine Kernkompetenz für die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren stellt das Verständnis für die Entwicklung und Auswahl von versuchstechnischen Modellen zur realitätsnahen Untersuchung von Eigenschaften, Belastungen, Beanspruchungen und Randbedingungen unterirdischer Kanäle und Leitungen dar. Die Ergebnisse können u.a. auch der Gewinnung von Daten zur Validierung der im vorherigen Abschnitt dargestellten mathematisch-physikalischen Modelle dienen.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge und Hintergründe versuchstechnischer Modelle ausgehend von einer allgemeinen Modeldefinition analysiert, die Anwendungsbereiche der einzelnen Modellebenen erläutert und deren versuchstechnische Umsetzung anhand von ausgewählten Untersuchungsvorhaben veranschaulicht, die unter der wissenschaftlichen Leitung des Verfassers am IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen bearbeitet wurden.

### 5.1 Modellmerkmale und -ebenen

Nach STACHOWIAK [Sta73] kann unabhängig von der betroffenen wissenschaftlichen Fachdisziplin der Begriff Modell durch drei Merkmale beschrieben werden<sup>69</sup>:

- **Abbildung:** *„Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentation natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.“*
- **Verkürzung:** *„Modelle erfassen allgemein nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellschaffern und/oder Modellnutzern relevant scheinen.“*
- **Pragmatismus:** *„Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für bestimmte – erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende – Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen.“* STACHOWIAK interpretiert das pragmatische Modellmerkmal entsprechend in Kurzform als *„für wen, wozu und wann“*<sup>70</sup> und damit im eigentlichen Wortsinn als *„Orientierung am Nützlichen“*<sup>71</sup>.

---

<sup>69</sup> s. [Sta73], S. 131

<sup>70</sup> s. [Sta73], S. 133

<sup>71</sup> vgl. Duden, Band 5 (Das Fremdwörterbuch), 5. Aufl., 1990: Pragmatik: „die Orientierung auf das Nützliche, Sinn für Tatsachen, Sachbezogenheit“



Ein Modell zeichnet sich demnach durch Abstraktion aus, die bewusste Vernachlässigung bestimmter Merkmale, um die für den Modellierer oder den Modellierungszweck wesentlichen Modelleigenschaften hervorzuheben. Für die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen heißt dies, dass im versuchstechnischen Modell die maßgeblichen Randbedingungen sowie Belastungs- und Beanspruchungsszenarien realitätsnah und nutzungsdauerorientiert nachempfunden werden, während bewusst andere Einflussfaktoren zurücktreten, weil sie weniger relevant, ohne Nutzen oder versuchstechnisch nur unzureichend abzubilden sind. Da im betrachteten Anwendungsfall die Einbauqualität der Produkte in hohem Maße von den angewendeten Einbauverfahren und dem verantwortlichen Personal abhängt, ist auch dies bei der Auswahl der versuchstechnischen Modellebene und der Dimensionierung des eigentlichen Versuchsmodells zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund werden die folgenden vier versuchstechnischen Modellebenen definiert, die ggf. noch weiter in Versuchsarten nach [EN1990]<sup>72</sup> unterteilt werden können:

- **In-situ-Untersuchungen:** Das Verhalten und die Leistung der Produkte und Verfahren werden im Rahmen von Baustellenbeobachtungen messtechnisch erfasst und die Beobachtungen systematisch ausgewertet.
- **1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen:** Die Produkte und Verfahren werden in einer praxisnahen, definierten und wiederholbaren Systemsituation eingesetzt, z.B. im erdüberdeckten Leitungsraben, und diese Gesamtsituation bau- und betriebsähnlichen Belastungen unterworfen. Das Verhalten des Systems einschließlich der untersuchten Produkte und Verfahren wird geprüft und bewertet.
- **Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen:** Zur Prüfung und Bewertung der Produkte und Verfahren werden die in typischen Belastungssituationen maßgeblichen Beanspruchungsbilder der Bauteile, wie Bettungsreaktionen, Normalkräfte und Biegemomente, durch versuchstechnische Modelle nachempfunden, die ggf. eigens für diesen Anwendungsfall entwickelt werden.
- **Standardprüfungen an Rohren, Werkstoffen und Komponenten:** Die Bauteil-, Werkstoff- und Komponenteneigenschaften der zu prüfenden Produkte und Verfahren werden unter vordefinierten Beanspruchungsbildern

---

<sup>72</sup> s. Abschnitt 5.2 in [EN1990] und Anhang D (informativ) „Versuchsgestützte Bemessung“ in [EN 1990]

nach einheitlichen Vorgaben geprüft und z.B. mit dem Ziel der Klassifizierung bewertet.

Nachfolgend werden für die o.a. Modellebenen typische Anwendungsbereiche erläutert und deren versuchstechnische Umsetzung anhand aussagekräftiger Projektbeispiele veranschaulicht. Dabei wird insbesondere auf eigene Erfahrungen des Verfassers mit der (Weiter-)Entwicklung versuchs- und messtechnischer Einrichtungen zu Fragestellungen des unterirdischen Kanal- und Leitungsbaus zurückgegriffen. Projekte mit starker Wechselwirkung zwischen mathematisch-physikalischen und versuchstechnischen Modellen werden vertiefend dargestellt. Sie geben im Sinne von Kompetenzbeispielen eine anschauliche Orientierung für die Entwicklung versuchstechnischer Modelle für den vorliegenden Anwendungsfall.

## **5.2 In-situ-Untersuchungen**

### **5.2.1 Anwendungsbereich**

In In-situ-Untersuchungen werden das Verhalten bzw. die Leistung der Produkte und Verfahren in messtechnisch unterstützten Baustellenbeobachtungen erfasst und systematisch ausgewertet. Die untersuchten Baustellenbedingungen bilden als messtechnisches Modell die Realität unmittelbar in sich selbst ab. Sie erfahren nur durch den gewählten messtechnischen Beobachtungsraum eine Verkürzung. Die Aussagekraft der Beobachtungen kann allerdings durch undefinierte äußere Einflussfaktoren deutlich eingeschränkt sein. Untersuchungen auf dieser Modellebene sind insbesondere dann pragmatisch sinnvoll, wenn gerade die Suche nach relevanten Praxiszuständen, Einflussfaktoren oder Schadensursachen Gegenstand der Untersuchung ist oder eine messtechnische Begleitung im Rahmen der Qualitätssicherung ohnehin ansteht. Im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau werden In-situ-Untersuchungen insbesondere durchgeführt, um

- maßgebliche Bauwerkszustände, Abweichungen von Leistungserwartungen und Schadensbilder zu erfassen,
- schwer zu simulierende Netzsituationen und betriebliche Belastungen in die Bewertung einzubeziehen,
- unbekannte Einflussfaktoren aus Bau und Betrieb zu identifizieren oder
- Personal- und Verfahrenseinflüsse zu erkennen und zu bewerten.

### **5.2.2 Zustands-, Abweichungs- und Schadensanalysen**

Im Zusammenhang mit der Prüfung und Bewertung kann eine produktgruppenbezogene Analyse von Zustandsdaten aus In-situ-Untersuchungen helfen, typische produktgruppen- bzw. verfahrensspezifische Qualitätsanforderungen zu entwickeln. Diese Untersuchungen beginnen mit der Abnahme der Bauleistung

und werden z.B. aufgrund von rechtlichen Anforderungen (vgl. [NRW95], [NRW07]) oder zur Entwicklung von Prognosemodellen fortgeführt (vgl. [Ste05]). Im Rahmen von Forschungsvorhaben des IKT wurden u.a. Erfassungsgrade [IKT03a] aufgenommen, produktbezogene Prüfverfahren entwickelt [IKT05] und Schadensbildkataloge [IKT07b] erarbeitet.

Ein typisches Beispiel für die kontinuierliche Zustands-, Abweichungs- und Schadensanalyse ist die Beobachtung der Verformungsentwicklung von Kunststoffrohren in Freispiegelkanälen [Bos97], [Bos98]. Übermäßige Verformungen können sowohl die Standsicherheit des Rohr-Boden-Systems als auch die Dichtheit der Rohrverbindungen und die Funktionsfähigkeit des Kanalquerschnitts beeinträchtigen. Die Ergebnisse aus zeitabhängigen Verformungsmessungen bilden dann eine wesentliche Grundlage für die Definition von Qualitätsanforderungen an Produkte und Einbauverfahren [Gau71], [Geh82], [Elz84]. Darüber hinaus können neben den geplanten Erfassungsdaten auch andere Abweichungen und Schadensbilder in In-situ-Untersuchungen erkannt und diese mit Blick auf ihre Relevanz in die Produkt- und Verfahrensbewertung einbezogen werden. So zeigte die Auswertung von Daten aus der Inneninspektion von 1,5 km begehbaren und ca. 10 km nichtbegehbaren Kunststoffrohrleitungen in [IKT05], dass die in der statischen Berechnung häufig diskutierten Verformungsgrenzwerte für Kunststoffrohre nur selten in der Praxis relevant werden, demgegenüber aber Fehler an Anschlüssen, Materialübergängen und Schweißnähten von großer Bedeutung für die Bewertung der eingesetzten Produkte und Verbindungstechniken sind.

### **5.2.3 *Netzsituationen und betriebliche Belastungen***

Ein weiterer Schwerpunkt von In-situ-Untersuchungen ist die Produkt- und Verfahrensprüfung unter im Labormaßstab schwer zu simulierenden Netzsituationen oder betrieblichen Belastungen, wie spezifische Inhaltsstoffe und Ablagerungsbedingungen im Abwasserbereich. Beispiele für derartige Untersuchungen sind stoffstrombezogene Geräteprüfungen, z.B. für Drosseleinrichtungen [IKT06] oder Geruchsfilter [IKT07c], sowie die Prüfung von Reinigungsgeräten und –verfahren an tatsächlichen, schwer simulierbaren Netz- und Ablagerungssituationen [IKT04], [IKT04b]. In [IKT04] wurde z.B. der Einfluss des Strahlausbreitungswinkels von Hochdruckreinigungsdüsen auf das Lösen der Sielhaut im Zuge der Kanalreinigung in situ untersucht. Weitere Auswertungen erlaubten schließlich umfassende Empfehlungen für die Auswahl und den Einsatz von Reinigungswerkzeugen [IKT05a].

### **5.2.4 *Identifizierung von Einflussfaktoren***

In-situ-Untersuchungen spielen für die Identifizierung noch unbekannter Einflussfaktoren auf die Qualität der Rohre, Rohrverbindungen und des Rohr-Boden-Systems in Bau-, Betriebs- und Sanierungsprozessen eine herausragende Rolle. Ein

typisches Beispiel für die Bauphase sind Fugenspaltmessungen während des Rohrvortriebs zur Quantifizierung von Rohrstrangbewegungen und -abwinkelungen [IKT07], [IKT07h]. Ein Beispiel für die Sanierung ist die Erfassung komplexer Boden-Altrohr-Neurohr-Interaktionen, wie beim Einsatz des Berstverfahrens [IKT03b].

Stellvertretend für die vielfältigen Einflüsse während der Betriebsphase sei das Wechselspiel zwischen Vegetation und unterirdischen Leitungen durch Rohr-Wurzel-Interaktionen angeführt [IKT01], [IKT07d], [RUB04], [RUB07].

### **5.2.5 Bedeutung von Personal- und Verfahrenseinflüssen**

Nach [EN1610] sind unterirdische Rohrleitungen technische Konstruktionen, bei denen das Tragsystem aus Rohr und Boden erst durch das Zusammenwirken von Bauteilen, Einbettung und Verfüllung seine Stand- und Betriebssicherheit erhält. Allerdings hängt die Einbauqualität eines Produktes bzw. Verfahrens in hohem Maße von den örtlichen Randbedingungen auf der Baustelle und der qualifizierten Ausführung durch das verantwortliche Personal ab. Dies gilt insbesondere für Produkte und Verfahren zur Instandhaltung von Kanälen und Leitungen, bei denen das Bauteil erst im unterirdischen Kanal- bzw. Leitungsbauwerk vor Ort durch Formgebung und/oder Aushärtung einzelner Komponenten produziert wird. Erkannt, analysiert und beschrieben wurden Personal- und Verfahrenseinflüsse auf die Produktqualität z.B. bei In-situ-Untersuchungen zur Renovierung und Reparatur von Schachtabdeckungen [IKT02b], [IKT02c], [IKT07e], zur Sanierung von Hauptkanälen mittels Schlauchlining-Verfahren [IKT03c], zur Sanierung von Hausanschlussleitungen [IKT04c] sowie zum Einsatz flüssiger Verfüllstoffe für den Neubau in offener Bauweise [IKT07f].

Insbesondere für den Einsatz von Schachtsanierungsverfahren wurden diese Einflüsse detailliert untersucht, da diese Verfahren i.d.R. kaum automatisiert und durch hohen Personaleinsatz gekennzeichnet sind. In den Forschungsprojekten [IKT02b], [IKT02c], [IKT05c], [IKT07e] wurden die Sanierungsmaßnahmen durch Fachfirmen ausgeführt, welche lediglich Vorgaben zur Auswahl des Sanierungsmaterials und der einzusetzenden Verfahrenstechnik erhielten. Auf Hinweise zur Sanierungsdurchführung wurde bewusst verzichtet, um die üblichen Arbeitsprozesse, die tatsächliche Sanierungsqualität sowie mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotenziale wirklichkeitsgetreu erkennen zu können. Als typische Beispiele bestätigen die Ergebnisse des Forschungsprojektes [IKT05c] den Einfluss von Ausführungsfehlern während des Beschichtungsprozesses als Hauptursache für Qualitätsmängel an beschichteten Abwasserschächten. Darüber hinaus war die Untergrundvorbereitung in vielen Fällen nicht ausreichend, so dass Schmutz, Beläge und Glasuren sowie geschädigtes Material das Verbundverhalten deutlich schwächten. Auch wurden die notwendigen Vorarbeiten erst durch die Begleitung von In-situ-Einsätzen offenkundig, z.B. Vorarbeiten an schadhafte Zuläufen oder die Demontage von Steigeisen und -bügeln zur Vermeidung späterer Spritzschatten.

Wesentliche Schlussfolgerungen für die Praxis wurden in [IKT07b] für die Zielgruppe der Netzbetreiber zusammengefasst.

### **5.3 1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen**

#### **5.3.1 Anwendungsbereich**

Versuche im Maßstab 1:1 in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen empfehlen sich insbesondere, wenn für die Prüfaufgabe realitätsnahe und möglichst vollständige Bau- und Betriebsbedingungen mit hohem Sicherheitsanspruch als definierte und wiederholbare Systemsituation gefordert sind. Die Versuche weisen dann für sämtliche drei Modellmerkmale *Abbildung*, *Verkürzung* und *Pragmatismus* typische Modelleigenschaften auf:

- Der Versuch spiegelt als *Abbild* der Realität einen geometrisch definierten Ausschnitt des untersuchten Systems in bau- und betriebsähnlichen Belastungen wider. Die Beanspruchungs- und Belastungsbedingungen an den Grenzen dieses Ausschnitts werden versuchstechnisch nachempfunden.
- Der Versuch *verkürzt* die Attribute der Originalfragestellung auf einzelne definierte Prüfaufgaben, z.B. definierte Eigenschaften des Bodens und ausgewählte Temperatur- und Grundwasserbedingungen.
- Während der Untersuchungszeit werden die unter pragmatischen Gesichtspunkten, d.h. *Nutzenaspekten*, ausgewählten Bau- und Betriebssituationen nachempfunden. Parametervariationen orientieren sich an den für Auftraggeber und Entscheidungsträger relevanten Teilfragestellungen und dem damit ggf. verbundenen versuchstechnischen Aufwand.

Untersuchungen auf dieser Modellebene sind insbesondere dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn zu erwarten ist, dass die für die Bewertung von Produkten und Verfahren maßgeblichen Qualitätsfaktoren wesentlich von den Baustellen- und Betriebsbedingungen, wie z.B. Grundwasser- und Bodenverhältnissen sowie Schadensbildern, abhängen und daher nur bei deren Einbeziehung die Aussagekraft der Ergebnisse gesichert werden kann. Die Anforderungen verschärfen sich bei vergleichenden Produkt- und Verfahrenstests, da hier eine gegenüber In-situ-Untersuchungen hohe Wiederholbarkeit der betrachteten Phänomene und Prüfsituationen gefordert ist. In Einzelfällen können auch Sicherheitsanforderungen mit Blick auf mögliche Versagenszustände dazu führen, dass 1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen einer In-situ-Untersuchung vorzuziehen sind. Beispiele aus der Forschung werden nachfolgend für die offene und geschlossene Bauweise, den Einsatz von Sanierungsverfahren sowie besondere Betriebssituationen und erhöhte Sicherheitsanforderungen dargestellt.

### 5.3.2 Offene Bauweise

Die offene Bauweise ist charakterisiert durch die im Abschnitt 4.3.2 dargestellten mathematisch-physikalischen Modellvorstellungen. Mit Blick auf die Silotheorie, Lastverteilung, horizontalen Erdlasten und möglichen Bettungsreaktionen kommt auch in der versuchstechnischen Modellierung der Wahl der Verbauart und der eingesetzten Bettungsmaterialien eine besondere Bedeutung zu. EL SHAHID untersuchte den Einfluss des Ziehens von Verbauprofilen auf die Belastung erdverlegter Rohrleitungen in [EIS97] anhand von 1:1-Versuchen unter baustellenähnlichen Bedingungen und kommt zu dem Ergebnis, dass das Ziehen der Verbauelemente einen erheblichen Einfluss auf die Leitungszone in Form von Bodenverschiebungen, Setzungen und einer Vergrößerung der Rohrbeanspruchung ausübt.

Weitergehende Versuche zum Vergleich des Trag- und Verformungsverhaltens verschiedener Bettungsmaterialien in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen sind in [RUB06] dargestellt. Hier wurden insgesamt fünf Bettungsmaterialien in vergleichenden Versuchen unter identischen Randbedingungen im Maßstab 1:1 in einzelnen Kammern des Großversuchsstands des IKT eingesetzt. Zu Anwendung kamen sowohl Schüttgüter für den lagenweise verdichteten Bodeneinbau als auch fließfähige Verfüllmaterialien. Abbildung 32 zeigt die einzelnen Versuchsphasen: Einbauzustand, Ziehen der Kanaldielen, Belastung, Simulation eines Grundwasseranstiegs und Simulation von Senkungen bzw. Sackungen.

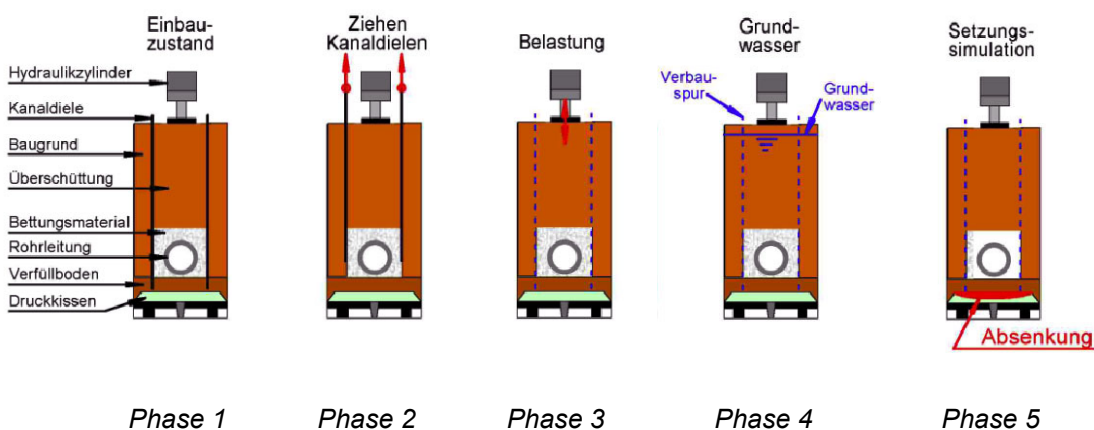


Abbildung 32: Schematische Darstellung der 5 Phasen des Versuchsablaufs

In der Leitungszone wurden die in [RUB06] detailliert beschriebenen Schüttgüter Mineralgemisch (MGM), EKA-Bett (EKB) und Sand-Kies-Gemisch (KSG) sowie die fließfähigen Materialien Weimarer Boden-Mörtel<sup>®</sup> (WBM) und RSS<sup>®</sup>-Flüssigboden (RSS) eingesetzt. Im Ergebnis konnte bei den fließfähigen Materialien in jeder Versuchsphase eine nahezu ungestörte Bettung der Rohre nachgewiesen werden.

Bei den Schüttgütern hingegen wurden selbst unter den optimalen Rahmenbedingungen im Großversuchsstand die aus der Praxis hinlänglich bekannten Probleme bei der Verdichtung im Zwickelbereich, d.h. im seitlich unterhalb des Rohres liegenden Auflagerbereich, beobachtet.

Zur Erfassung der Lastumlagerungen innerhalb des Bettungsmittels wurden neben Erddruckgeber- und Niveaumessungen sowie modifizierten Lastplattenversuchen<sup>73</sup> auch Messungen mittels auf der Rohrwand applizierten Dehnmessstreifen und im Zwickelbereich angeordneten Druckmessfolien durchgeführt (Abbildung 33).

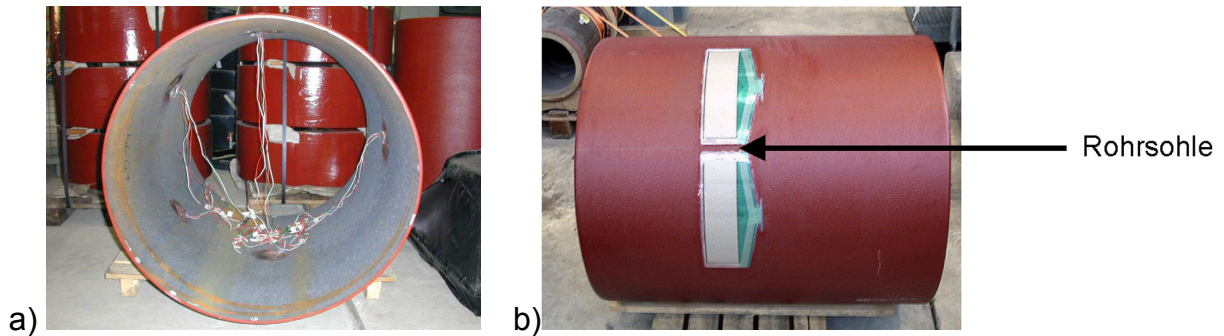


Abbildung 33: Messrohre mit a) Dehnmessrosetten und b) Druckmessfolien

Das unterschiedliche Verhalten der Bettungsmittel wird insbesondere durch einen Vergleich der Ergebnisse der Druckmessfolien-Messungen deutlich.<sup>74</sup> Infolge des Ziehens der Kanaldielen waren bei den Schüttgütern deutliche Spannungskonzentrationen bzw. -erhöhungen im Auflagerbereich festzustellen, die infolge von zyklischen und statischen Belastungen noch geringfügig zunahmen (Phase 3, vgl. Abbildung 34). Die beim Einbau noch flüssigen Bettungsmaterialien RSS und WBM zeichneten sich nach Aushärtung in sämtlichen Belastungsphasen durch eine gegenüber den Schüttgütern bedeutend gleichmäßigere Spannungsverteilung am Rohrumfang aus.

<sup>73</sup> Um direkte Informationen über die Bettung der Rohre im ungestörten Zustand zu erhalten, wurde in [RUB06] eine Einrichtung konzipiert, welche aus dem Inneren spezieller Messrohre heraus das hydraulische, spannungsgeregelte Ausfahren kleiner Lastplatten bei gleichzeitiger Erfassung des Weges ermöglichte.

<sup>74</sup> Da die Folien nach dem Einbau nicht kalibriert werden konnten, sind die Ergebnisse qualitativ zu interpretieren.

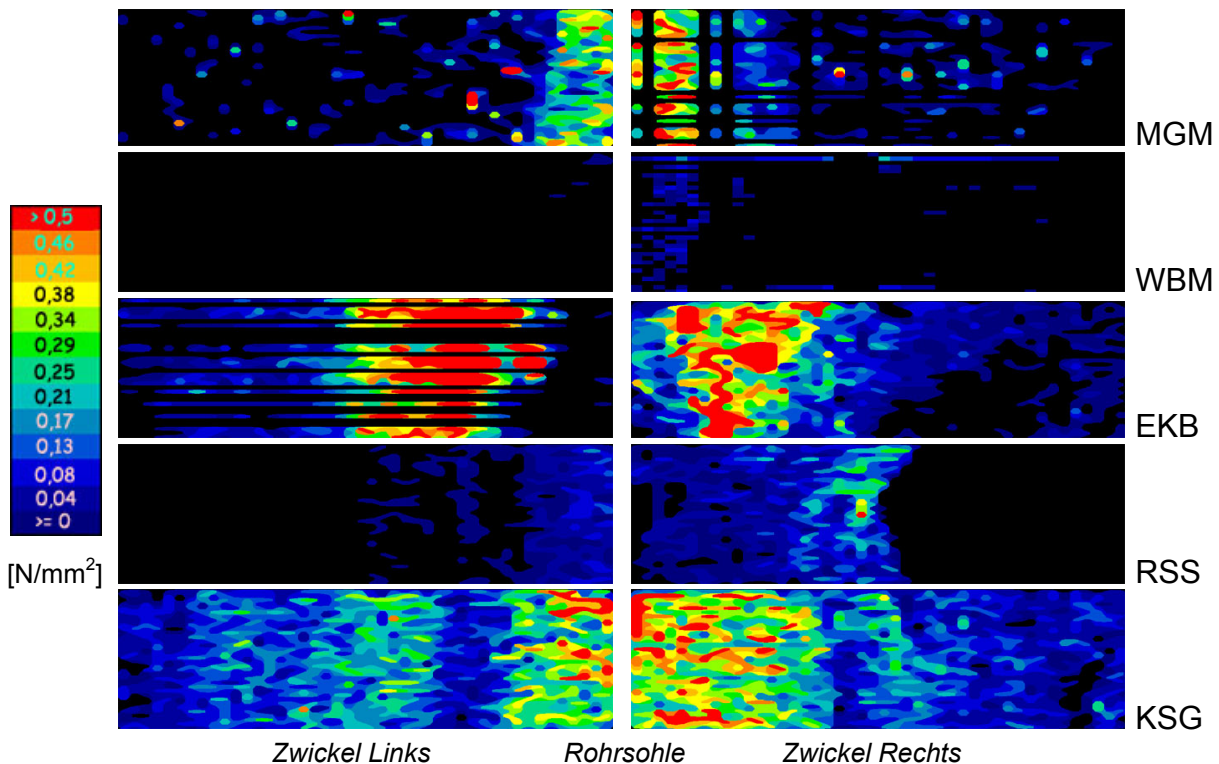


Abbildung 34: Druckfolienmessungen nach Abschluss der Phase 3 (Belastung)  
 MGM - Mineralgemisch, EKB - EKA-Bett, KSG - Sand-Kies-Gemisch,  
 WBM - Weimarer Boden-Mörtel®, RSS - RSS®-Flüssigboden

Untersuchungen zum Einsatz innovativer Bettungsmaterialien können auch in kleineren Versuchsanlagen als Einzelversuche durchgeführt werden. So werden in [IKT07g] die versuchstechnischen Einbau- und Belastungssituationen für neuartige Polystyrol-Bettungskissen dargestellt. Die Fragestellung der besonderen Beanspruchungen flach überdeckter Kanäle und Leitungen (vgl. Abschnitt 4.4.1) wurde von FALTER in [Fal08a] ebenfalls anhand von 1:1-Versuchen in o.a. Versuchsstand in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen erfasst und mit Blick auf die statischen Berechnungsansätze näher untersucht. Darüber hinaus wurde in [IKT02c] auch das Tragverhalten von Schachtabdeckungen erfolgreich in 1:1-Versuchen an Schacht-Boden-Straßenkörper-Systemen getestet.

### 5.3.3 Neubau in geschlossener Bauweise

Der Neubau in geschlossener Bauweise ist u.a. dadurch charakterisiert, dass die Belastungsbedingungen sowohl zu Beanspruchungen in Rohrumfangsrichtung als auch in -längsrichtung führen (Abschnitt 4.3.3). Die versuchstechnische Simulation ist entsprechend mit hohem Aufwand verbunden. Der Großversuchsstand des IKT bietet hier die einzigartige Möglichkeit, mehraxiale Beanspruchungen unterirdischer Rohr-Boden-Systeme in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen, wie z.B. Vortriebslasten, Grundwasser- und Verkehrslasten, im Maßstab 1:1 sowohl für kleinere Nennweiten (vgl. [IKT05d]) als auch für den Vortrieb von Groß- und Sonderprofilen zu untersuchen. So wurde der im Rahmen von [IKT99] entwickelte



Prototyp eines Rechteck-Stahlbetonrohres für den gesteuerten Rohrvortrieb im 1:1-Versuch in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen geprüft, um Schadensfälle im praktischen Einsatz auszuschließen (vgl. [Bar65], [Dri87]) und die Einsatzbereiche u.a. mit Blick auf die Unterquerung von Bahndämmen, Straßen und Flüssen zu erhöhen. Der in [IKT02a] umfassend dargestellte Versuch orientiert sich an den Belastungsannahmen nach ATV-A 161 [DWA-A161].

In den Vortriebsversuchen im Maßstab 1:1 (Abbildung 35) wurden unter definierten Umgebungsbedingungen das Rohrverhalten bei Interaktion mit dem Baugrund, die sich hieraus ergebenden Beanspruchungen sowie die ggf. auftretenden verfahrenstechnischen Schwierigkeiten und die Wirkung von Schutzmaßnahmen untersucht. Der Bodenaufbau wurde für den Vortriebsversuch entsprechend Abbildung 36 gewählt. Unterschiedliche Tiefenlagen konnten während des Versuches über hydraulische Druckkissen, zyklische Verkehrslasten über einen Druckzylinder (1000 kN) an der Bodenoberfläche und ein Grundwasseranstieg durch Füllen und Abdeckeln des Standes sowie Wasserdruckerhöhung im so geschlossenen Behälter simuliert werden.

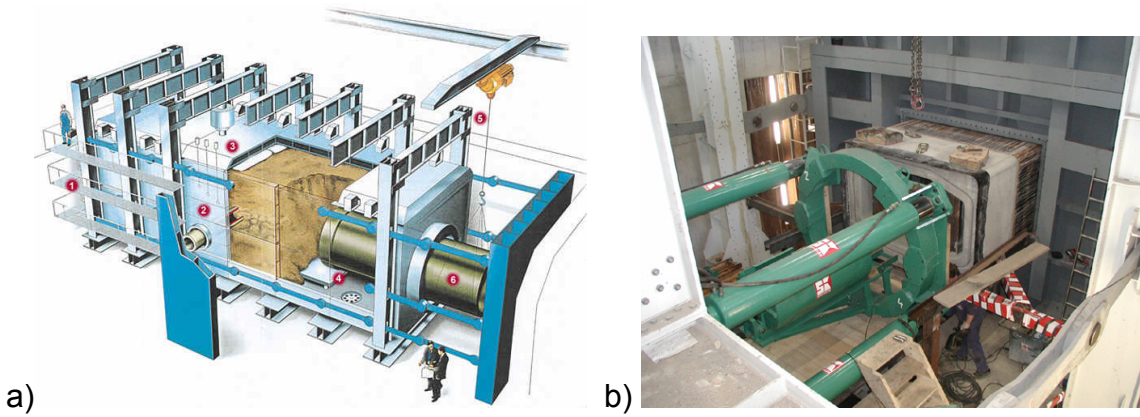


Abbildung 35: Rohrfortrieb im Maßstab 1:1 in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen  
 a) Systemskizze des IKT-Großversuchsstandes  
 b) Startbaugrube mit Rechteck-Vortriebsrohr (Rohr außenmaße 2,6 m x 1,85 m)

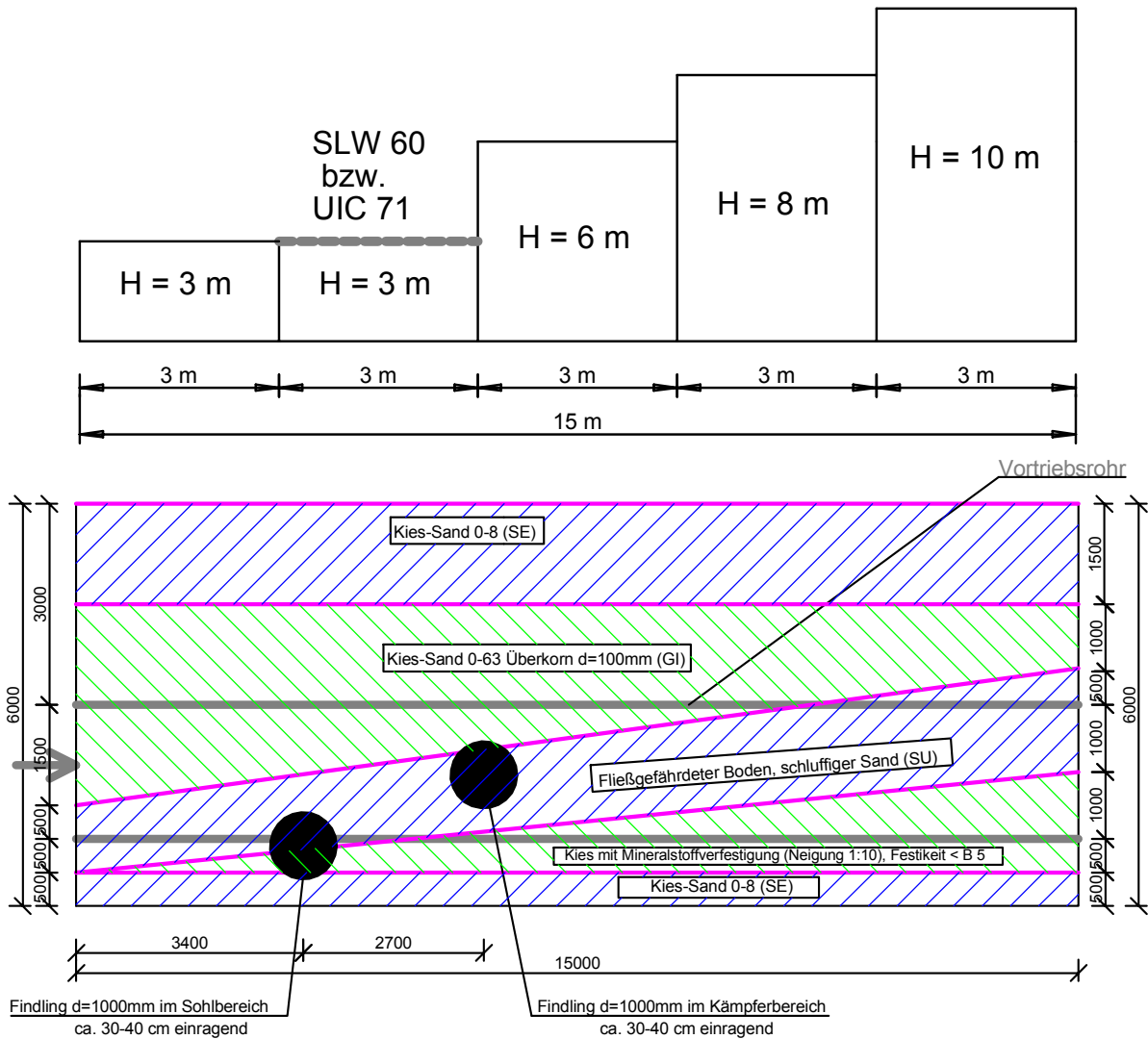


Abbildung 36: Vortriebsversuch im Maßstab 1:1 in baustellenähnlichen Belastungssituationen  
 Überdeckungs- und Verkehrslasten, simuliert mittels Hydraulikkissen bzw. Druckzylinder (oben); Aufbau der Bodenschichten im Versuchsstand, Skizze (unten)

Während der Versuche wurden die Beanspruchungen der Rohre durch Einsatz umfangreicher Messtechnik erfasst, so u.a. mittels Druckmessfolien zur Bestimmung der Verteilung der Vortriebskraft in einzelnen Rohrverbindungen, Kraft- und Wegaufnehmern an den Steuer-, Vorpress- und Belastungszylindern sowie Inklinometern, Extensometern und Erddruckmessdosen zur Verfolgung von Bodenverschiebungen und -spannungen.

Die Versuchsergebnisse bestätigten die Einsatzfähigkeit des neuen Rohrsystems, auch mit Blick auf Konstruktionsdetails, wie die Teilung des Druckübertragungsrings, die „Sandwich-Konstruktion“ des Druckübertragungsmittels und die Funktionsweise der Dichtungskonstruktion. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse enthält [IKT02a].

### **5.3.4 Sanierung**

Die Prüfung von Produkten und Verfahren zur Instandsetzung bzw. Sanierung<sup>75</sup> unterirdischer Kanäle und Leitungen unterscheidet sich durch die Einbeziehung von Schadensbildern in die Prüfsituation wesentlich von der Betrachtung des Neubaus. Das Sanierungsziel und die erzielbare Einbauqualität hängt unmittelbar von der örtlichen Situation ab. Entsprechend ist die Auswahl angemessener Altrohrzustände und Schadensbilder (vgl. Abschnitt 4.3.4) eine wesentliche Voraussetzung für die aussagekräftige Prüfung. Darüber hinaus müssen Altrohrzustände und Schadensbilder unter Laborbedingungen reproduzierbar hergestellt werden können, um auch Produkt- und Verfahrenvergleiche zuzulassen. Versuche im Maßstab 1:1 in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen bieten hier besondere Möglichkeiten, da sie die Abbildung der realen Netzbedingungen bei gleichzeitig ausreichender Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Prüfbedingungen und – abläufe erlauben. Typische Beispiele für derartige Prüfaufbauten finden sich in vergleichenden Tests für Reparatur- und Sanierungsverfahren (vgl. [IKTW04], [IKTW05a]) sowie Forschungsvorhaben zur Ermittlung komplexer Belastungs- und Beanspruchungssituationen unterirdischer Sanierungstechniken, wie z.B. beim Berstverfahren (vgl. [IKT03b]).

In [IKTW04] wurden Reparaturverfahren zur Schadensbehebung an Anschlussstutzen vergleichend getestet. Geprüft wurden sowohl Hutprofilverfahren als auch Injektionsverfahren<sup>76</sup>. Zur Prüfung der Verfahren wurden im Maßstab 1:1 Kanalstrecken mit definiert eingebrachten Schäden aufgebaut. Bewusst wurden auch

---

<sup>75</sup> Zur Abgrenzung der Begriffe „Instandsetzung“ und „Sanierung“ vgl. Abschnitt 4.3.4. In dieser Arbeit wird durchgehend der Begriff „Sanierung“ im Sinne von [EN752] verwendet.

<sup>76</sup> Bei Hutprofilverfahren wird in den zu sanierenden Anschlussbereich von innen eine hutförmige, mit Harz getränkte Gewebeauskleidung angepresst und ausgehärtet. Bei Injektionsverfahren werden die Schadstellen von innen mit Injektionsmaterial verpresst, welches die Schadstelle im Verbund mit dem umliegenden Boden abdichtet.

Schadensbilder einbezogen, die bis an die Einsatzgrenzen der Verfahren heranreichten. Dabei wurde grundsätzlich unterschieden zwischen der Reparatur eines sogenannten *Standardschadens* und eines sogenannten *Extremschadens*. Der *Standardschaden* diente zur Überprüfung der generellen Einsatzmöglichkeiten der Verfahren zur Reparatur von Anschlussstutzen. Durch den *Extremschaden* sollten Grenzbereiche beim Einsatz berührt werden. Alle Verfahrensanbieter hatten die Möglichkeit den Standardschaden und den Extremschaden jeweils dreimal mit dem jeweiligen Verfahren zu reparieren. Die Ergebnisse der Verfahrenstests zeigten u.a., dass eine Vielzahl der untersuchten Verfahren die Qualitätsanforderungen kaum oder gar nicht erfüllten und das Reparaturergebnis wesentlich vom Verbundverhalten der eingesetzten Reparaturmaterialien mit den vorhandenen Rohrwerkstoffen (Beton, Steinzeug usw.) abhängt.

In [IKT03b] wurden zur Ermittlung der Neurohrschädigung durch den Einbauvorgang beim Berstverfahren in einem mittelformatigen Versuchsstand Berstversuche an eingedeten Altrohren durchgeführt. Wesentliches Ziel dieser Untersuchungen war die Quantifizierung der durch Reibung zwischen Neurohr und Altrohrscherben entstehenden Riefen. Es wurden unterschiedliche Kombinationen von Neu- und Altrohren verwendet und nach dem Erneuerungsvorgang zyklische Belastungen zur Simulation von Verkehrslasten aufgebracht. Die Kerbtiefen waren nahezu unabhängig vom Altrohrwerkstoff. Die Maße der altrohrspezifischen Scherbengeometrien dienten in Verbindung mit den Ergebnissen aus FEM-Berechnungen als Grundlage zur Ermittlung von Ersatzbelastungen und –geometrien für vereinfachte Rohrprüfungen.

### **5.3.5 Besondere Betriebssituationen**

Versuche im Maßstab 1:1 bieten sich für besondere Betriebssituationen an, wenn eine gegenüber In-situ-Untersuchungen hohe Wiederholbarkeit der betrachteten Phänomene und Prüfsituationen gefordert ist. In [IKT04] wurden z.B. Hochdruckdüsen in Kanalprüfstrecken mit definierten Geschiebesituationen getestet. Des Weiteren werden besondere Betriebssituationen auch im Maßstab 1:1 nachempfunden, um die grundsätzliche Anwendbarkeit von Reinigungs- und Inspektionsverfahren zu erkunden (vgl. [IKT00b], [IKT04b], [IKT06a], [KGK03]).

Darüber hinaus bieten sich Versuche im Maßstab 1:1 in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen an, wenn Versagenszustände oder Betriebsprozesse mit hohem Gefährdungspotenzial realitätsnah und reproduzierbar in die Produktbewertung bzw. –entwicklung einbezogen werden sollen und die Konsequenzen erst unter Laborbedingungen beherrschbar sind oder sogar vermieden werden können. Als typisches Beispiel aus Forschung und Entwicklung sei die Prüfung einer Geräteentwicklung für die Schwallspülung nach [IKT04b] genannt. Bei der Schwallspülung wird Wasser zunächst aufgestaut und dann zur Kanalreinigung als Schwallwelle plötzlich in den Kanal freigegeben. In [IKT04b]

wurde ein blasenartiger Verschlusskörper getestet, der aus einem Standard-Revisionsschacht DN 1000 in den Kanal abgesenkt und dort mit Druckluft gefüllt werden kann. Nachdem eine bestimmte Stauhöhe erreicht ist, wird der Verschlusskörper über eine Steuerungseinheit schlagartig entlüftet und die aufgestaute Wassermenge freigegeben. Der Prototyp dieser Entwicklung wurde in einer 40 m langen und 6 m tief im Boden verlegten Versuchsstrecke der Nennweite DN 2200 getestet. Die Prüfung der Funktionen „Abwickeln/Aufwickeln“ und „Einstauen“ standen im Vordergrund dieser großformatigen Versuche. Sämtliche Prüfungen wären bei In-situ-Einsätzen des Prototyps aus Sicherheitsgründen nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand oder gar nicht durchführbar gewesen.

## 5.4 Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen

### 5.4.1 Anwendungsbereich

Während In-situ-Untersuchungen und 1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen die Realität bzw. Ausschnitte der Realität weitgehend ohne Veränderung abbilden, zeichnen sich *Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen* durch besondere versuchstechnische Forschungs- und Entwicklungsleistungen aus. Die technischen Modelle werden speziell für den Anwendungsfall des unterirdischen Kanal- und Leitungsbaus entwickelt und hinsichtlich der drei Modellmerkmale „Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus“ wie folgt optimiert:

- Für reale Systembedingungen und Belastungssituationen werden die relevanten Beanspruchungsbilder (z.B. Spannungsverteilungen) identifiziert, die dann als Zielgröße für die Entwicklung der versuchstechnischen Lastbilder und des labortechnischen Versuchsaufbaus dienen. Im Ergebnis sind die Beanspruchungssituationen im Laborversuch ein *Abbild von idealisierten, an der Realität orientierten Beanspruchungssituationen*, wie sie z.B. in der Bemessung erwartet werden.
- Aus der vorgenannten Definition der versuchstechnischen Abbildung leitet sich ab, dass die Originalfragestellung i.d.R. eine *Verkürzung* auf einzelne Beanspruchungsbilder erfährt und auf nichtlineare Überlagerungen von realen Auswirkungen unterschiedlicher Belastungsbilder auf das Beanspruchungsverhalten weitgehend verzichtet wird. Darüber hinaus werden die Beanspruchungsdauern auf das zur Berücksichtigung zeitabhängigen Werkstoffverhaltens notwendige Maß verkürzt.
- Während der Untersuchungszeit werden unter *Nutzenaspekten* ausgewählte Beanspruchungsbilder typischer Bau- und Betriebssituationen nachempfunden, die für die konkreten Fragestellungen der Auftraggeber einer

Produkt- und Verfahrensprüfung und die anschließende ausgewogene Bewertung der Ergebnisse durch die Entscheidungsträger relevant sind.

Untersuchungen auf dieser Modellebene sind insbesondere dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn die für die Bewertung von Produkten und Verfahren maßgeblichen Qualitätsfaktoren wesentlich von einzelnen Beanspruchungssituationen, wie z.B. Biegemomenten-, Normalkraft-, Querkraft oder Temperaturbeanspruchungen, abhängen. Vorteile ergeben sich für entwicklungsbegleitende Prüfungen, wenn der Einfluss von Fertigungstechniken oder Werkstoffkomponenten auf die Produktleistung unter identischen Beanspruchungssituationen miteinander verglichen werden soll. Beispiele aus der Forschung und Qualitätssicherung werden nachfolgend für die offene und geschlossene Bauweise, Sanierungsverfahren sowie besondere Beanspruchungen während der Betriebsdauer zusammengefasst. Ihnen kommt hinsichtlich der technischen und wissenschaftlichen Forschungsleistung eine besondere Bedeutung zu, so dass auch Hintergründe ausführlich dargestellt werden.

#### **5.4.2 Offene Bauweise, Beispiel Stahlbeton-Großrohre**

Die Belastung der in offener Bauweise hergestellten Rohr-Boden-Systeme wird wesentlich durch vertikale und horizontale Erdlasten bestimmt. In der Folge werden die Rohrleitungen durch eine Kombination aus Biegemomenten, Normalkräften und Querkraften beansprucht, die in der statischen Berechnung näherungsweise am Kreisringmodell ermittelt werden können (vgl. Abschnitt 4.3.2). Insbesondere für biegesteife Rohrwerkstoffe ist in vielen Fällen der Nachweis der maximalen Biegezugspannungen im Rohrscheitel, ggf. verbunden mit einem Bauteilversuch unter Biegebelastung, maßgebend für die Dimensionierung (vgl. [Hor89], [EN1916], [DINV1201], [EN295]). Diesem Nachweis liegt die Annahme zugrunde, dass der Rohrwerkstoff homogene Eigenschaften besitzt und die Rohrsohle gleichmäßig gebettet ist, z.B. in Anlehnung an die Bemessungsannahmen in [DWA-A127]. Für inhomogene Werkstoffe oder Verbundwerkstoffe, wie z.B. Stahlbeton, kann dies zu Fehlinterpretationen führen. Zur Simulation von realitätsnahen Beanspruchungen für Stahlbeton-Großrohre wurde daher in [IKT04a] eigens ein neuartiges Versuchskonzept entwickelt und umgesetzt, mit dem auch der Einfluss unterschiedlicher Fertigungstechniken und Bewehrungsanteile auf das Trag- und Rissverhalten von Stahlbeton-Großrohren wirklichkeitsgetreu untersucht werden kann. Der besondere Hintergrund und die wesentlichen Erkenntnisse aus dieser Entwicklung werden nachfolgend zusammengefasst.

In Deutschland gibt es über hundert Hersteller von Beton- bzw. Stahlbetonrohren für die Verlegung in offener oder geschlossener Bauweise [IKT03e]. Neben den Ausgangsstoffen ist der Formgebungs- und Verdichtungsprozess maßgebend für die Qualität der Rohre [Sch02]; insbesondere wird zwischen Verfahren mit Sofortentschalung und Verfahren mit Erhärtung in der Schalung (Formerhärtung) unterschieden. Hinsichtlich der Bemessung von Stahlbetonrohren ist von besonderer

Bedeutung, dass erst seit April 2003 mit der DIN EN 1916 [EN1916] die Forderung nach einer Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rissbreite eingeführt wurde, allerdings nur für Nennweiten  $< DN\ 1750$ . Rohre der Nennweite  $> DN\ 1750$  werden lediglich in der nationalen Vornorm DIN V 1201 [DINV1201] erfasst. Nach DIN EN 1916 [EN1916] wird zur Qualitätsüberwachung der „klassische“ Scheiteldruckversuch eingesetzt, der bereits vor mehr als einhundert Jahren zur Prüfung von Betonrohren entwickelt wurde (vgl. Abbildung 37).

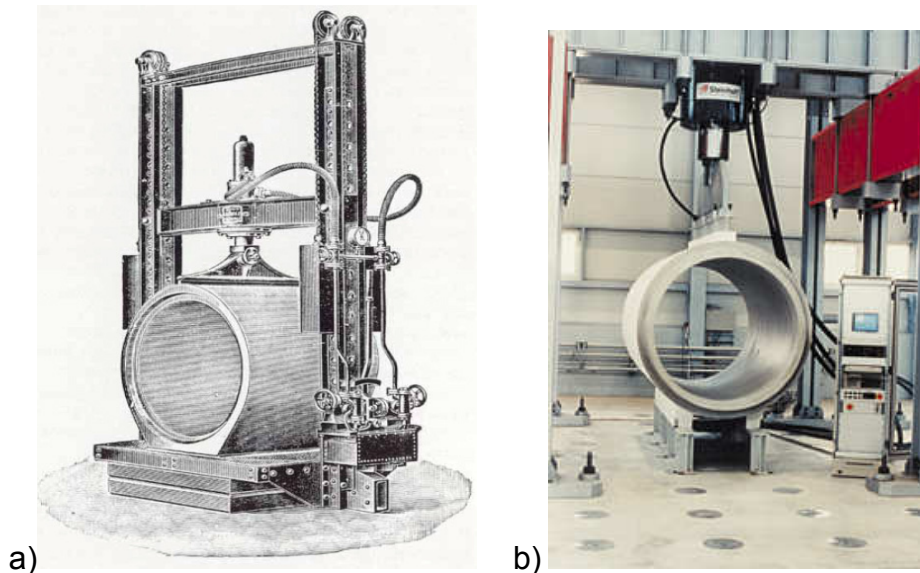


Abbildung 37: Scheiteldruckversuch an Betonrohren

- a) Hydraulische Rohrprüfpresse System „Koenen“ im Jahr 1902; aus [BDBF78]  
 b) Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1916 [EN1916], IKT-Versuchsanlage

Ziel dieser Versuche war es ursprünglich, die Ringbiegezugfestigkeit eines Betonquerschnitts und somit allein das Trag- und Rissverhalten des Betons zu untersuchen. Die rissverteilenden Eigenschaften des Werkstoffes Stahlbeton wurden bei diesem Modellansatz nicht betrachtet, 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 Normkrafteinfluss steht. In anderen Bereichen des unterirdischen Bauens, wie z.B. bei der Prüfung von stahlfaserbewehrten Tübbing, wurden daher bereits Versuche mit gleichzeitiger Normkraft- und Momenten-Beanspruchung entwickelt (vgl. [Mai93]). In [IKT04a] wurde festgestellt, dass auch im Scheiteldruckversuch für Stahlbeton-Großrohre durch Wahl einer modifizierten Versuchsanordnung die Spannungsverteilung in der Rohrwandung maßgeblich beeinflusst und auf die tatsächlichen Beanspruchungsbedingungen abgestimmt werden kann. Hierzu wurde der in Abbildung 38b dargestellte Versuchsaufbau als „modifizierter Scheiteldruckversuch“ vorgeschlagen. Durch die Einleitung von Horizontalkräften im Bereich des Kämpfers wächst insbesondere der Normkraftanteil im Rohrscheitel, so dass dieser maßgebliche Prüfquerschnitt realitätsnahe Beanspruchungen erfahren kann.

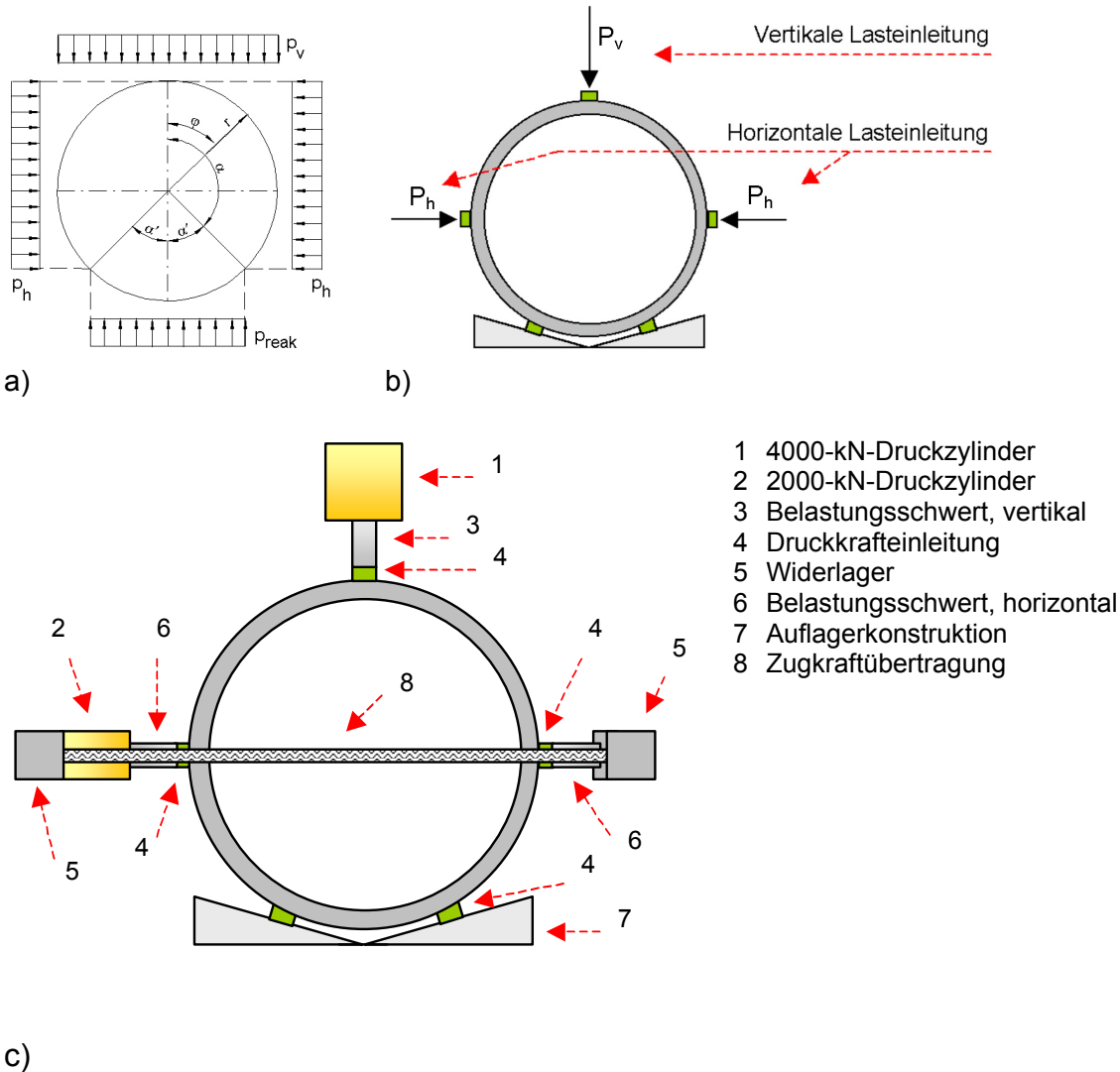


Abbildung 38: Modifizierter Scheiteldruckversuch: Schematische Darstellung  
 a) In-situ-Belastung, Beispiel für horizontale und vertikale Erdlasten; aus [Hor89]  
 b) Versuchsschema mit vertikaler und horizontaler Lasteinleitung  
 c) Versuchsaufbau mit Belastungselementen, Auflager- und Widerlagerkonstruktion

Die eigentlichen Versuchsparameter 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 [IKT04a] das Seitendruckverhältnis  $\beta = P_h/P_v$  so gewählt, dass der in Abbildung 38a dargestellte Beanspruchungszustand versuchstechnisch im Prüfquerschnitt nachempfunden wurde. Grundsätzlich werden das dem In-situ-Lastfall entsprechende Verhältnis  $\beta$  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 $\beta$ :

Das Belastungsverhältnis  $\beta$  im Scheiteldruckversuch gibt das Verhältnis zwischen horizontaler Stützkraft und vertikaler Scheiteldruckkraft an. Für den Lastfall „Scheiteldruckversuch“ wird das Belastungsverhältnis  $\beta$  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 39 zeigt beispielhaft die Exzentrizitätsverteilung für eine In-situ-Beanspruchung nach Abbildung 38a und die Exzentrizitätsverteilung für den gewählten  $\beta$ -Wert im Scheiteldruckversuch mit seitlicher Stützung bei Innenrissbetrachtung. Die Exzentrizität bei  $0^\circ$  im Scheiteldruckversuch entspricht in diesem Fall dem  $180^\circ$ -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.

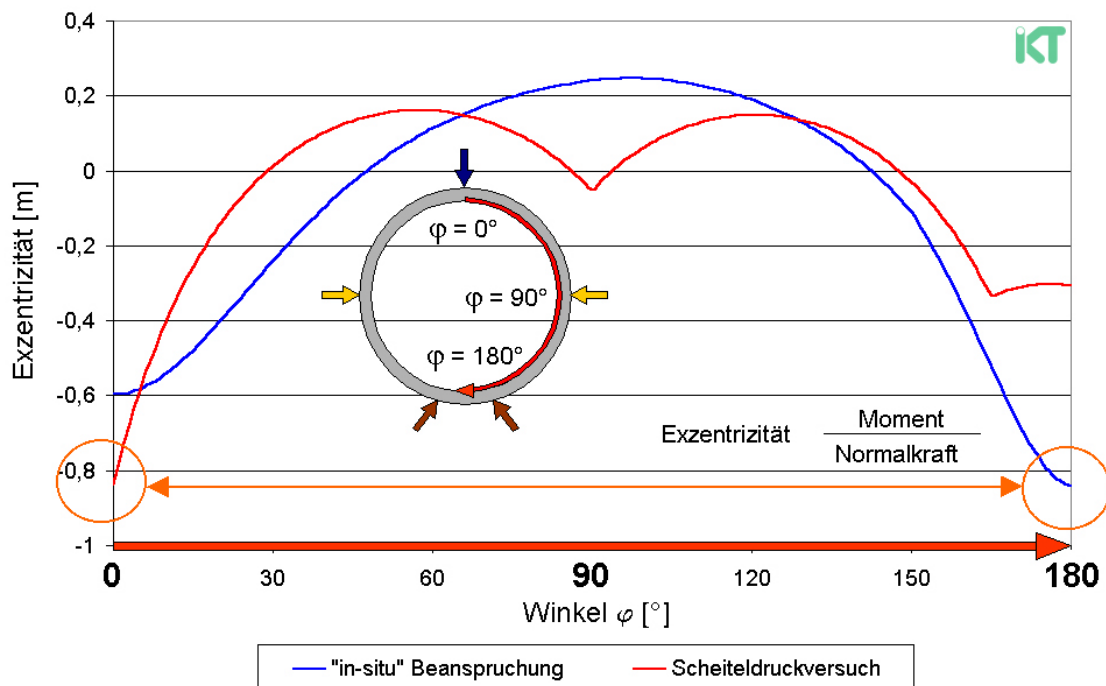


Abbildung 39: Bestimmung des Belastungsverhältnisses  $\beta$

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

Maßgebend ist die maximale Zugspannung an der Rohrinne- 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  $\beta$ -Wert nach 2. und das Spannungsniveau nach 3. ermittelt. Die Abbildung 40 zeigt beispielhaft die Spannungsverteilung für eine In-situ-Beanspruchung und für den Scheiteldruckversuch mit seitlicher Stützung bei maßgebender Scheiteldruckkraft. Die Spannungen bei  $0^\circ$  (Versuch) und  $180^\circ$  (in situ) entsprechen einander.

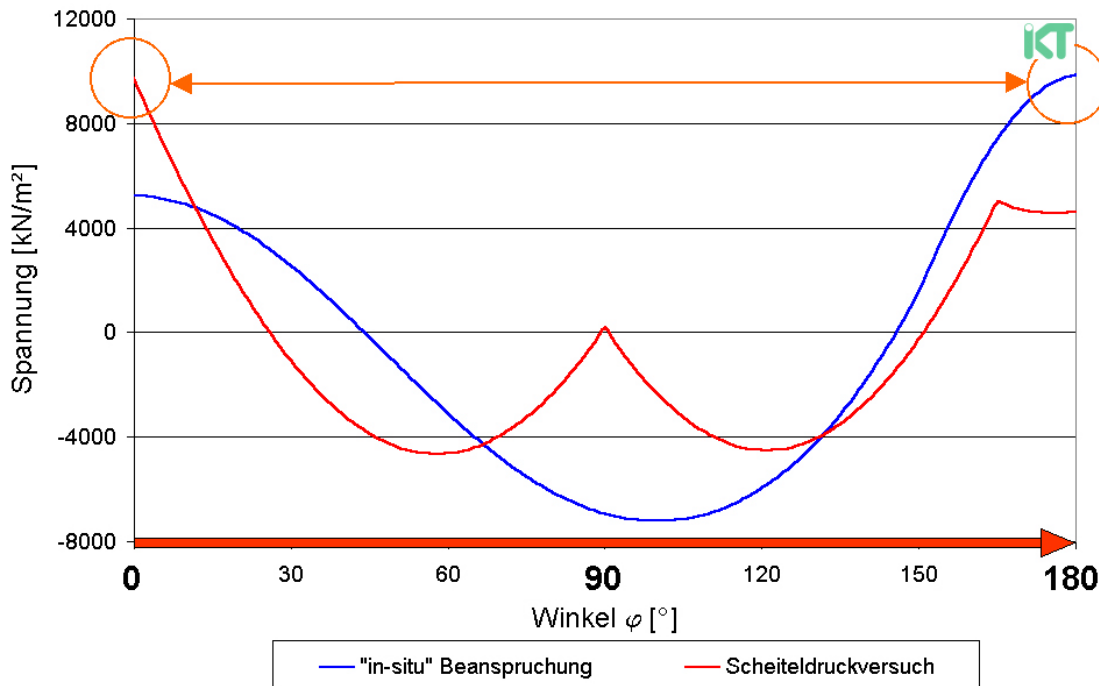


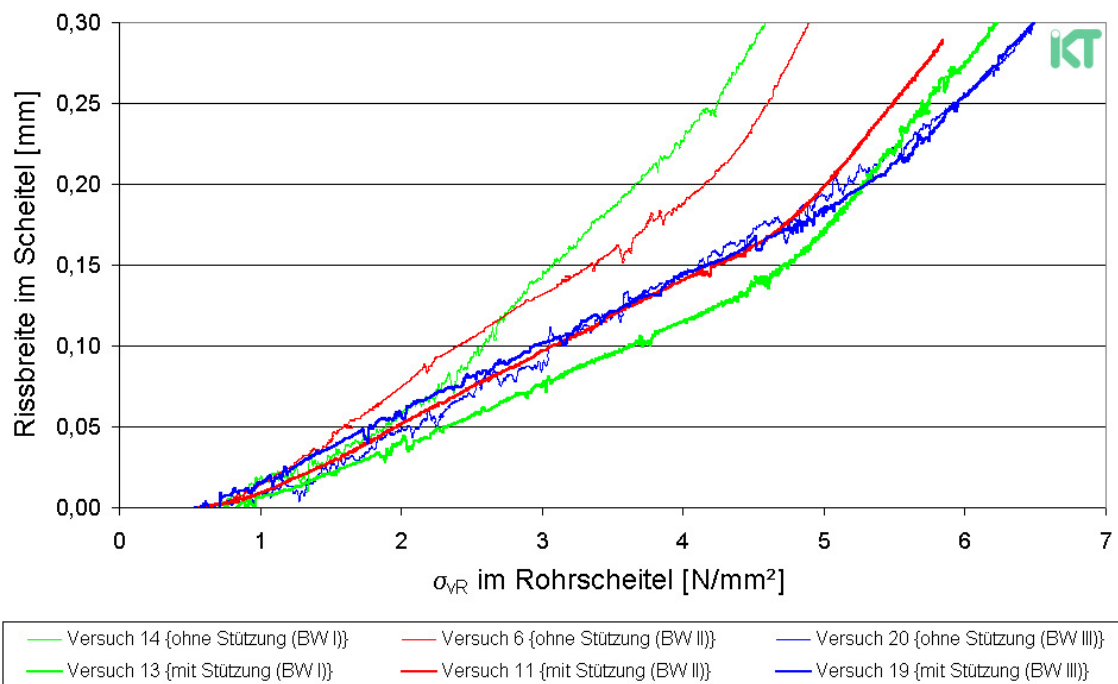
Abbildung 40: Abstimmung der Spannungsgrößen in den maßgeblichen Querschnitten

Im Ergebnis entspricht das Rissverhalten des Stahlbetons im maßgebenden Versuchsquerschnitt dem Verhalten unter Bemessungslast. Dies bedeutet, dass erstmalig ein unmittelbarer Vergleich der gelieferten Rohrqualität mit den Qualitätsanforderungen unter Betriebsbedingungen möglich ist. Darüber hinaus ist auch eine Weiterverwendung der Rohre nach 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. Die Auswirkung der Vorbeanspruchungen auf die zulässige Restnutzungsdauer wäre allerdings noch gesondert zu untersuchen.

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 besonderen Qualitätssicherungsfragen der beteiligten Netzbetreiber auszurichten.

Alle Rohre wurden in dem modifizierten Versuchsaufbau mit horizontaler Stützung geprüft. Einige Rohre wurden nach dieser Prüfung und einer Vierteldrehung auch einer klassischen Scheiteldruckprüfung ohne seitliche Stützung unterzogen. Geprüft wurden Rohre, die sofort entschalt, in der Schalung erhärtet (Formerhärtung) bzw. in der Schalung erhärtet mit Betonnachbehandlung produziert worden waren.

Aus den Versuchen lässt sich die folgende wesentliche Beobachtung festhalten: Die Risse öffneten sich bei einer Versuchsdurchführung mit seitlicher Stützung, d.h. unter Momenten- und Normalkrafteinfluss, unter Steigerung der Randfaser-Vergleichsspannung  $\sigma_{VR}$  langsamer als bei einer Versuchsdurchführung nach [EN1916] bzw. [DINV1201] ohne seitliche Stützung<sup>77</sup>. Abbildung 41 stellt beispielhaft die gemessenen Rissbreitenentwicklungen aus Versuchen mit und ohne seitliche Stützung bis zu einer Rissbreite von 0,3 mm für unterschiedliche Bewehrungstypen einander gegenüber. Vor diesem Hintergrund ist auch die bisherige Philosophie der Schadensbewertung nach [DWA-M149], nach der allein auf Basis der Rissbreite eines Stahlbetonrohres die maßgebliche Schadensklasse bestimmt wird, kritisch zu hinterfragen.



**Abbildung 41:** Rissentwicklung bei Versuchen mit in der Schalung erhärteten Rohren  
 Bewehrungstyp I (BW I): minimal zulässige äußere Bewehrungslage (Geringstbew.)  
 Bewehrungstyp II (BW II): äußere entspricht innerer Bewehrungslage (konstruktiv)  
 Bewehrungstyp III (BW III): äußere Bewehrungslage mit techn. Mindestbewehrung

<sup>77</sup> Dieses Ergebnis ist überraschend, da hier das Verhalten bei identischem Spannungsniveau verglichen wird. Bei gleicher Größe der rechnerischen Randfaserstressspannung eines ungerissenen Vergleichsquerschnitts waren die Rissbreiten im Versuch ohne seitliche Stützung deutlich geringer als im Versuch mit seitlicher Stützung.

Aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens lässt sich das Fazit ziehen, dass der neue modifizierte Scheiteldruckversuch die aussagekräftige Prüfung des Rissverhaltens von Stahlbetonrohren unter realitätsnahen Beanspruchungen gestattet, d.h. unter 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 für unterschiedliche Fertigungsverfahren aussagekräftig bewertet und verglichen werden. Weiterführende Untersuchungen in [IKT05] erweitern den Einsatz der Versuchstechnik auf das Verformungsverhalten von profilierten Großrohren aus Kunststoff.

### **5.4.3 Geschlossene Bauweise, Beispiel Rohrvortrieb**

Die statistische Auswertung zahlreicher Bauschadensfälle bei Rohrvortriebsmaßnahmen in [Vog93] zeigte, dass Schäden an den Vortriebsrohren und den Rohrverbindungen, hier insbesondere Rissbildungen oder Abplatzungen, im Vergleich zu Schwierigkeiten mit Presseinrichtung, Vortriebsschild usw. am häufigsten auftreten. Besonders kritisch sind Schäden an der Rohraußenseite, da diese beim Rohrvortrieb in der Regel nicht erkannt werden können. Auch konnte diesen Schäden nach dem bisherigen Kenntnisstand nicht immer eine Ursache zugeordnet werden, da die Rohre insbesondere bei nicht geradliniger Trasse und schwierigen Baugrundverhältnissen während des Bauvorganges nicht vollständig quantifizierbaren Belastungen unterliegen.

Bisherige Prüfkonzepte beschränkten sich wiederum nur auf die Prüfung einzelner Rohre und Verbindungen und vernachlässigten die Bettung und Krümmung des Rohrstranges (vgl. [Hus89], [Rip89], [Rip89a], [Rip92], [Buc02]). Auch die notwendigen Eigenschaften der Werkstoffe für die Druckübertragungsmittel sind für Vortriebsbelastungen nur schwer zu beschreiben. Ziel des Forschungsprojektes [IKT07] war es vor diesem Hintergrund, die bisherigen Erkenntnisse zum Verhalten von Rohren unter Vortriebslasten zu hinterfragen und geeignete Belastungsmodelle für Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen im Maßstab 1:1 zu entwickeln.

#### **5.4.3.1 Versuchskonzept**

Grundgedanke für die Entwicklung des Versuchskonzepts war ein „aktiver“ Betrachtungsansatz, der sich von dem üblichen „passiven“ Rohrmodell der Bemessung wesentlich unterscheidet (Abbildung 42).

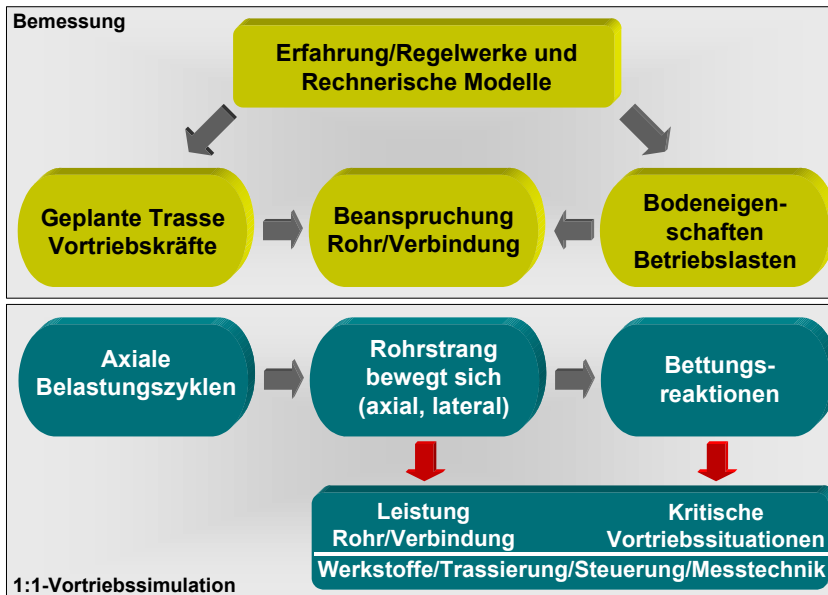


Abbildung 42: Aufgabenstellung Rohrvortrieb: Bemessung vs. versuchstechnische Simulation

Die Bemessung von Rohren und Rohrverbindungen für den Rohrvortrieb findet ihre Grundlagen sowohl im Normen- und Regelwerk (vgl. [EN12889], [DWA-A161], [DWA-A125]) als auch in den besonderen Erfahrungen der an der Baumaßnahme Beteiligten sowie den verfügbaren analytischen, empirischen und numerischen Modellen (vgl. Abschnitt 4.3). Gegenstand der Bemessung ist dann der Nachweis, dass das Rohr einschließlich Rohrverbindungen die Bau- und Betriebslasten der konkreten Vortriebsmaßnahme und die hieraus resultierenden Beanspruchungen mit ausreichender Sicherheit „passiv“ erträgt. Der rechnerische Nachweis fußt entsprechend auf Annahmen zu den Bodeneigenschaften, zu den erwarteten Betriebslasten sowie zur geplanten Trassengeometrie und den zu erwartenden Vortriebskräften. Ob die Bemessungsmodelle und -annahmen mit der tatsächlichen Situation der einzelnen Baumaßnahme übereinstimmen, bleibt im Falle eines schadensfreien Vortriebs letztlich offen. Lediglich im Schadensfall werden Widersprüche offenkundig und geben Anlass, die bisherigen In-situ-Beobachtungen um weitere Erfahrungen zu ergänzen und ggf. auch einzelne Modellvorstellungen zu hinterfragen.

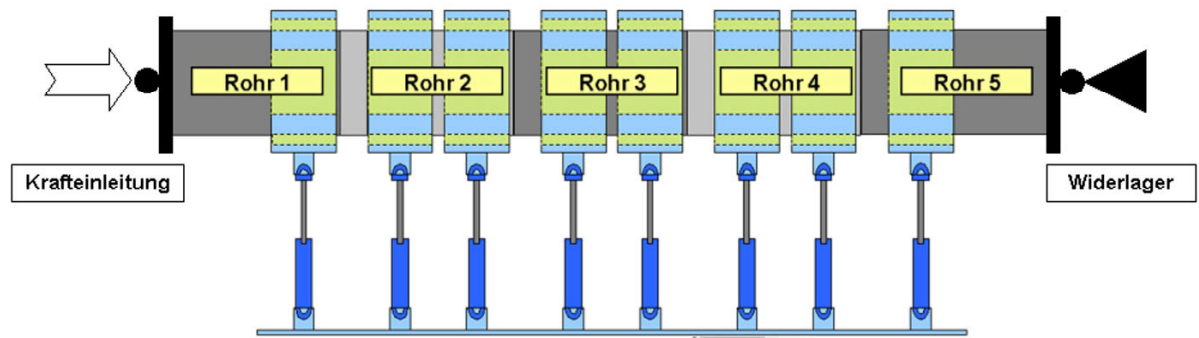
Das in [IKT07] entwickelte Versuchskonzept (Abbildung 42, unten) betrachtet demgegenüber den Rohrstrang als „aktives“ Element, das sich aufgrund der axialen, zyklischen Vortriebskräfte nicht nur axial vorschiebt, sondern insbesondere in Kurvenfahrten „aktiv“ die zur Stabilisierung seiner Lage notwendigen seitlichen Bettungsreaktionen provoziert. Im Modellansatz wird dabei die geplante Vortriebsstrasse einschließlich planmäßiger Kurvenfahrten und Steuerkorrekturen als maßgebend für alle passierenden Rohre angesehen (vgl. [Bey06]). Im Versuch wird dann ein Rohrstrang aus fünf Rohren in Abhängigkeit einer definierten Trassengeometrie axialen Belastungszyklen und definierten lateralen Positionierungen ausgesetzt. Die zur Stabilisierung der Lage im Versuch

notwendigen Bettungsreaktionen werden dann als in situ maximal mögliche Bodenreaktionen bei vorgegebener Rohrstrangposition betrachtet. Die 1:1-Simulation mit tatsächlichen Rohren, Druckübertragungsmitteln und Dichtelementen bietet dabei die Möglichkeit, auch die in rechnerischen Modellen kaum zu erfassenden geometrischen Imperfektionen (zum Beispiel der Betonoberfläche) und das nichtlineare elasto-visko-plastische Werkstoffverhalten der Druckübertragungsmittel, wie Holz, Kunststoff oder Mehrschichtwerkstoffe, zu berücksichtigen. Im Ergebnis lassen sich ggf. nicht nur Informationen zur Leistungsfähigkeit der Rohre und Verbindungstechnik gewinnen, sondern auch kritische Vortriebssituationen, sinnvolle Trassierungselemente und Steuerstrategien erkennen sowie Empfehlungen zum Einsatz geeigneter Werkstoffe und Messtechnik ableiten.

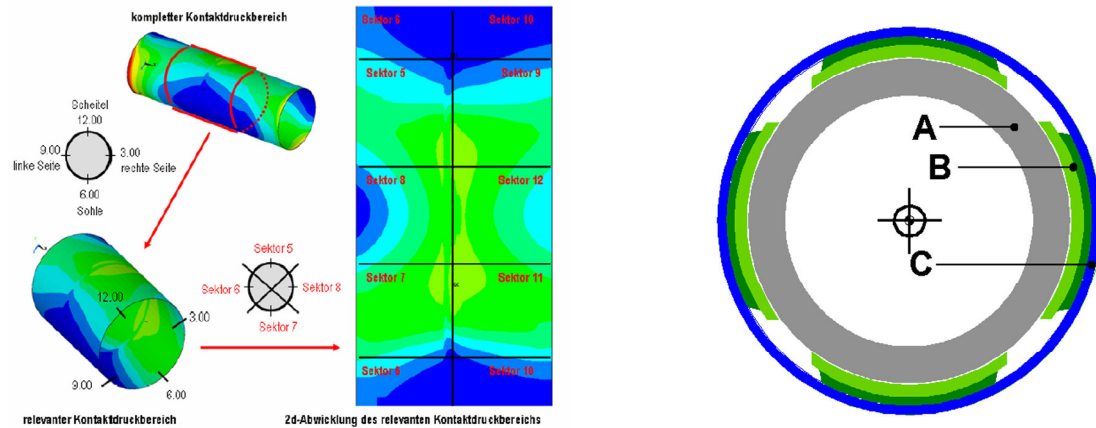
#### 5.4.3.2 Versuchstechnische Umsetzung

Die Dimensionierung des Versuchsstandes einschließlich der zur Rohrbettung gewählten Hydraulikkissen basiert auf baugrundtechnischen Betrachtungen bisheriger Baumaßnahmen [ELE04] sowie Vorberechnungen mit der Finite-Element-Methode [Zer04]. Die neu entwickelte Mess- und Steuertechnik für die Versuchsdurchführung sowie der grundsätzliche Versuchsablauf wurden zunächst in Vorversuchen im Modellmaßstab 1:4 an einem Rohrstrang aus fünf Betonprobekörpern DN 400 erprobt (Abbildung 43). Das Gesamtkonzept für die Versuche im Maßstab 1:1 (Stahlbetonrohre DN 1600) wurde anschließend umgesetzt (Abbildung 44).



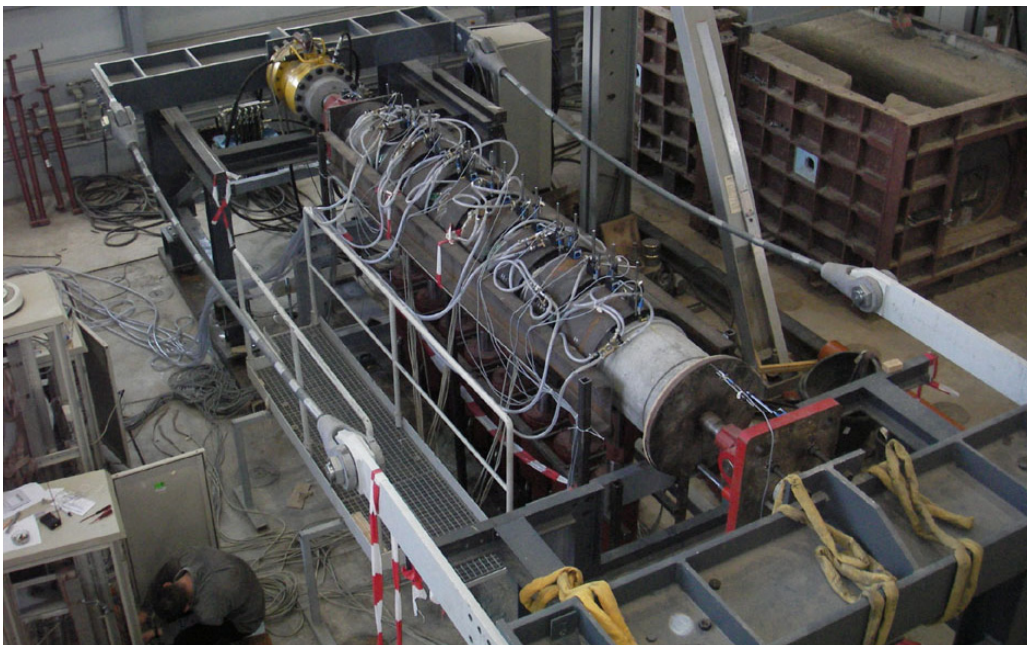


a)



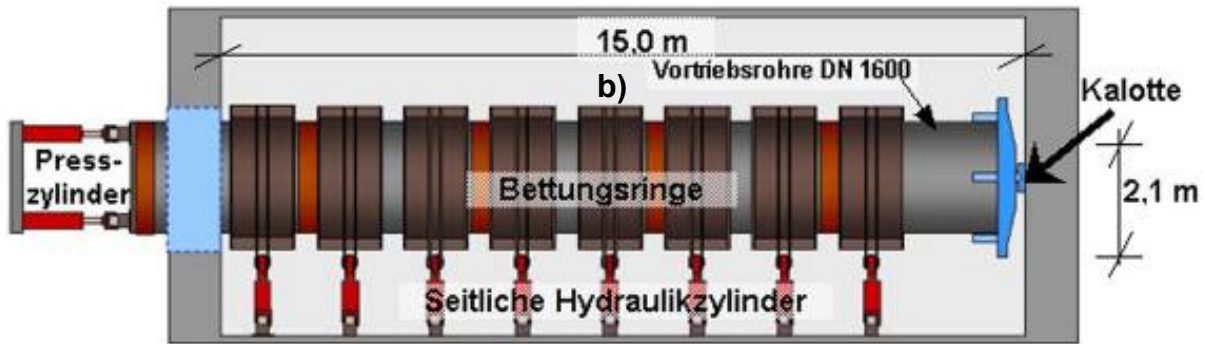
b)

c)



d)

Abbildung 43: Vorversuche zur Vortriebssimulation am Modell im Maßstab 1:4, DN 400  
 a) Prinzipskizze: Rohrstrang, Bettungsringe, Krafteinleitung, Widerlager  
 b) FEM-Berechnungen; aus [Zer04]  
 c) Bettungsringe je Rohr (A: Vortriebsrohr / B: Druckkissen / C: Stahlring)  
 d) Gesamtansicht der Versuchsanlage



a)



b)

c)

Abbildung 44: Versuchsanlage zur 1:1-Vortriebssimulation unter realitätsnahen Beanspruchungen  
 a) Prinzipskizze: Presszylinder, Bettungsringe, seitliche Hydraulikzylinder, Widerlager  
 b) 1:1-Vorpress-Station DN 1600 (4 x 2 MN)  
 c) 1:1-Rohrstrang DN 1600 ( $d_a = 2.100 \text{ mm}$ ,  $L = 16,0 \text{ m}$ )

Die Vorpressstation besteht aus vier 2-MN-Hydraulikzylindern, die sowohl weg- als auch kraftgesteuert angesprochen werden können und eine maximale Vorpresskraft von 8 MN ermöglichen. Dies entspricht maximalen Kräften, wie sie auch für größere Vortriebslängen aufgebracht werden müssen.<sup>78</sup> Die Einleitung der Vorpresskraft in den Rohrstrang erfolgt über einen stählernen Druckring. Der Anschluss der Hydraulikzylinder an den Druckring wurde sowohl horizontal als auch vertikal gelenkig ausgeführt. Die versuchstechnische Ausführung der Bettungsbedingungen und Messtechnik zeigt Abbildung 45.

<sup>78</sup> Die Maximalkraft wird in der Praxis dann durch Einsatz von Zwischenpressstationen begrenzt.



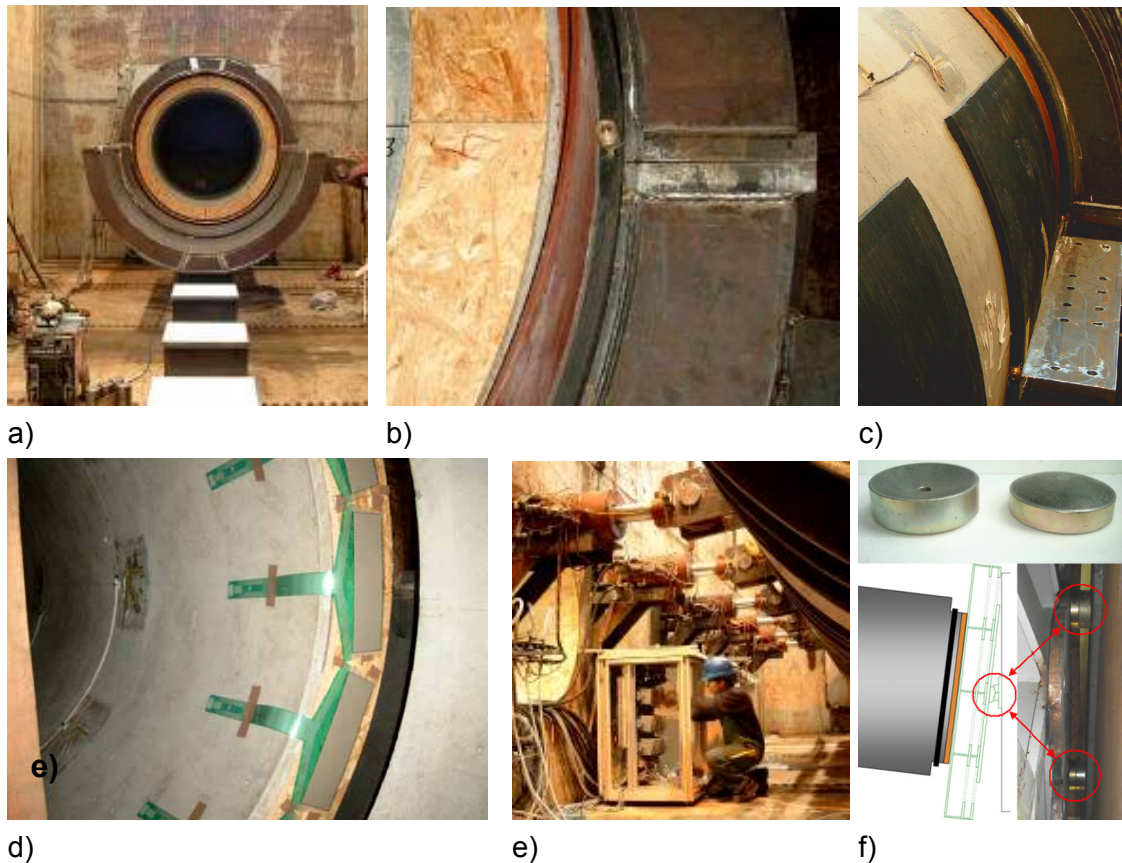


Abbildung 45: Vortriebssimulator DN 1600 ( $d_a=2,1\text{m}$ ) – Bettung, Messtechnik  
 a) Gleitlager für Stahlrahmen, b) Rohr-Kissen-Stahlring, c) Hydraulische Druckkissen,  
 e) Druckmessfolien, f) Seitliche Hydraulikzylinder, g) Widerlager mit Kalotten

Die Rohre werden durch wassergefüllte Mantelsegmentdruckkissen gestützt. Diese sind zur messtechnischen Aufnahme der Bettungsreaktionen insbesondere im Kämpferbereich (Kissengröße 1,2 m x 1,2 m) platziert. Sohlkissen dienen lediglich zur Rohrlagerung und Scheitelkissen als Sicherung gegen unvorhergesehene Auftriebslasten. Je Rohr bilden zwei umlaufende Stahlringe mit Innendurchmesser 2170 mm die Widerlager für die Hydraulikkissen, welche im 35-mm-Ringspalt zwischen Vortriebsrohren und Stahlringen angeordnet sind. Die untere Halbschale ist jeweils auf einem Stahltisch mit PTFE<sup>79</sup>-Zwischenlage aufgelegt, so dass die Rohre in horizontaler Richtung nahezu reibungsfrei positioniert werden können. Zum Befüllen bzw. Entleeren der Hydraulikkissen werden elektrische Steuerventile am Zu- sowie Ablauf der Kissen und zur Druckmessung elektronische Drucksensoren eingesetzt.

Unterschiedliche Vortriebszustände werden durch eine horizontale Verschiebung der Rohrführung mittels acht 1000-kN-Hydraulikzylinder eingestellt. Diese sind über

<sup>79</sup> PTFE – Polytetrafluorethylen, umgangssprachlich auch unter dem Handelsnamen „Teflon“ der Firma DuPont bekannt

Laschen und Bolzen gelenkig an die Stahlringe angeschlossen und mit der Seitenwand des Großversuchsstandes verbunden. Ventile, Wegaufnehmer und Drucksensoren dienen der Steuerung der Zylinder; eine speziell programmierte Prozesstechnik erlaubt das gemeinsame, koordinierte Ansteuern aller Pressen. Die Widerlagerkonstruktion besteht aus einer rückseitig ausgesteiften Stahlplatte, die über zwei Kugelkalotten gegen die Rückwand des IKT-Großversuchsstandes abgestützt ist. Die Kalottenlagerung gestattet das Drehen der Widerlagerkonstruktion um die Hochachse, so dass die in Abbildung 46 dargestellten Trassenelemente entsprechend eingestellt werden können. Die fünf Stahlbeton-Vortriebsrohre DN 1600 mit einer Baulänge von 3,2 m fungieren im Wesentlichen als Messsysteme und sind Teil des Versuchsaufbaus. Neben üblicher Messtechnik, wie induktive Wegaufnehmer, Seilwegaufnehmer, Druckmesssensoren und Dehnungsmessstreifen, wurden in den Rohrverbindungen auch Druckmessfolien eingesetzt (Abbildung 45d), mit denen die Druckverteilung zwischen Druckübertragungsmittel und Rohrspiegel qualitativ aufgenommen werden kann.

#### 5.4.3.3 Trassensimulation

Mit der entwickelten Versuchseinrichtung können relevante Vortriebssituationen, wie der „Gerade Vortrieb“, „Abweichung Solltrasse“, „Gegensteuerung“, „Rückführung Solltrasse“ und „Kurvenfahrt“ so nachempfunden werden (Abbildung 46a-d), dass nahezu jede beliebige Vortriebstrasse im Versuch nachgestellt werden kann.

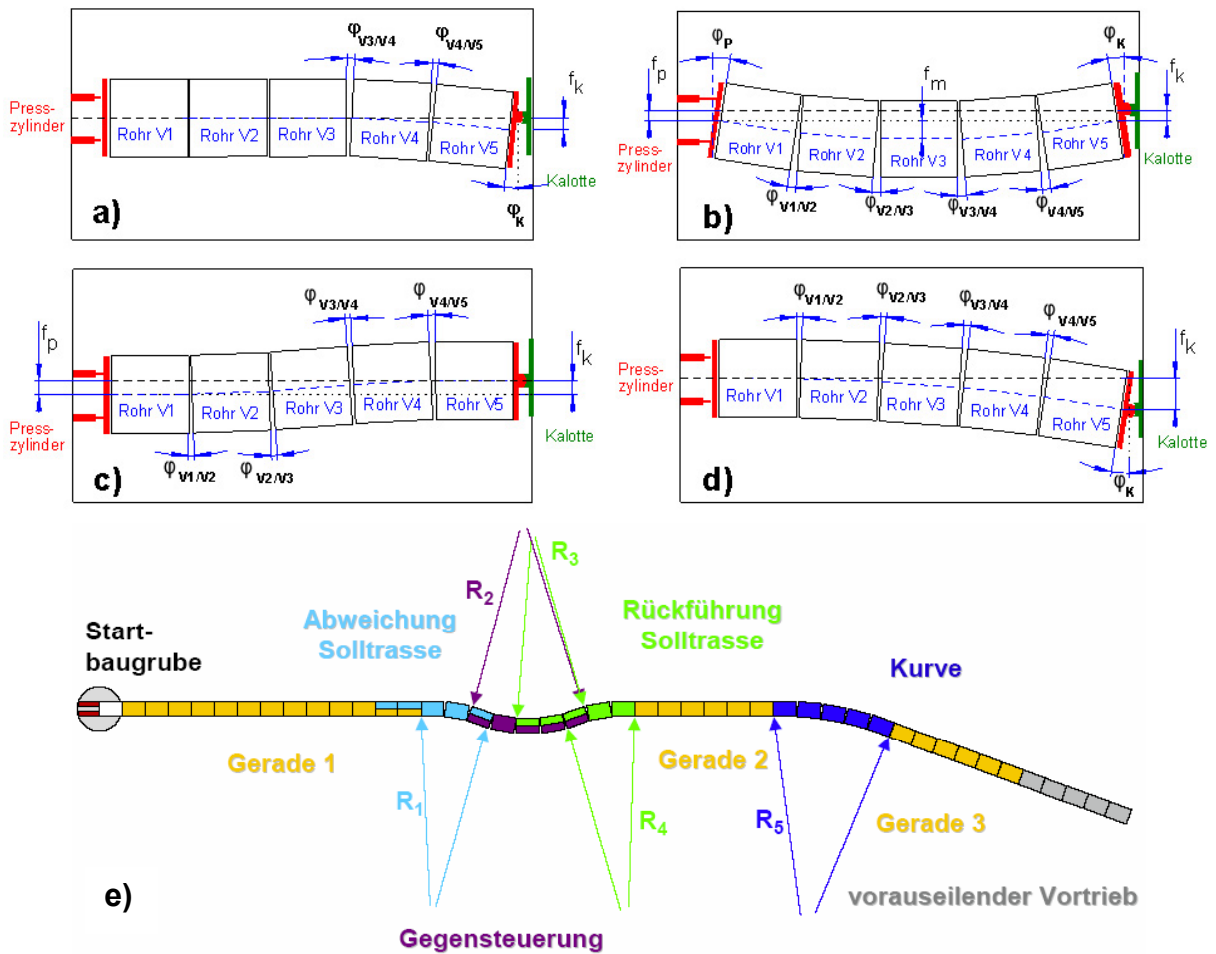


Abbildung 46: Technische Teilsysteme zur realitätsnahen Trassensimulation im Maßstab 1:1  
 a) Abweichung Solltrasse, vgl. R1, b) Gegensteuerung, vgl. R2,  
 c) Rückführung Solltrasse, vgl. R3 und R4, d) Planmäßige Kurvenfahrt, vgl. R5  
 e) Beispieltrasse, abgeleitet aus Baustellenerfahrungen (vgl. [IKT07])

Exemplarisch sei die Umsetzung der „Gegensteuerung“ in Abbildung 46b erläutert; hierunter ist die Ausgleichskurve nach Abweichungen bei geradlinig geplanter Linienführung zu verstehen. Für die Umsetzung in Großversuchen werden einige Grundannahmen getroffen. Die Vortriebskraft wird auf das abgewinkelte erste Rohr über unterschiedliche Zylinderhübe eingeleitet. Die Kalotte ermöglicht die Verdrehung des Widerlagers um die Hochachse. Dazwischen werden Winkel zwischen den Rohrstirnflächen eingestellt, welche von der maximalen Abweichung  $f_m$  und vom Anfangswinkel  $\varphi_P$  abhängen. Für den dargestellten Fall muss die Vortriebskraft exzentrisch in den Rohrspiegel eingeleitet werden. Da der Druckring, anders als die Kalotte, nicht relativ zum Rohrspiegel verschoben werden kann, muss die Exzentrizität durch eine Ausmitte der Kraftresultierenden der Zylinderkräfte erzeugt werden. Für das jeweilige Maß der Ausmitte sind die anteiligen Pressenkräfte für das linke und rechte Zylinderpaar zu berechnen.

Die Versuchsergebnisse für den Fall der „Gegensteuerung“ zeigt Abbildung 47. Die Bettungsreaktionen werden als resultierende Zylinderkräfte der Horizontalpressen

dokumentiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die gesamte Rohr-Kurve zwar in den Kurvenanfangs und -endpunkten an der Kurvenaußenseite gehalten wird, die im Kurvenverlauf liegenden Rohre jedoch eine haltende Bettungsreaktion an der Kurveninnenseite erfahren (vgl. Abschnitt 4.3.3.2, Abbildung 17 und Abbildung 18). In der Folge ist mit einer unregelmäßigen äußeren Bettung einzelner Rohre und entsprechenden Querkraftbeanspruchungen in den Rohrverbindungen zu rechnen.

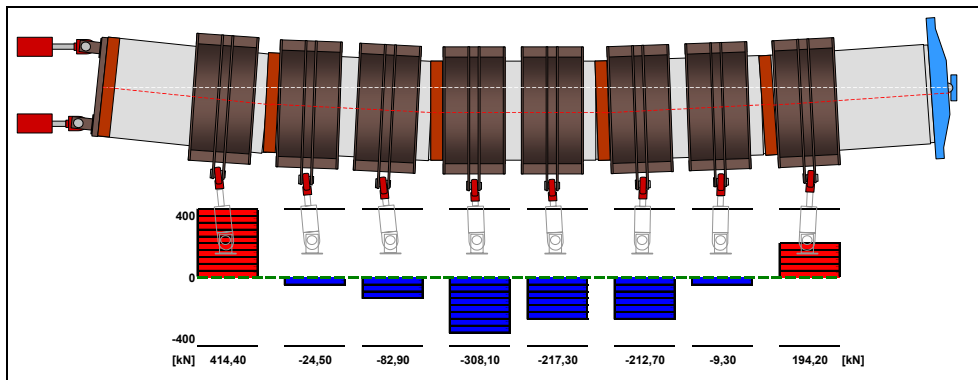


Abbildung 47: Vortriebssimulation: Messergebnisse für die „Gegensteuerung“ mit resultierenden Zylinderkräften als Bettungsreaktion (geometrisch überhöhte Darstellung)

Um die im Vortriebssimulator gewonnenen Erkenntnisse zu überprüfen und auch weitere Parameterstudien durchzuführen, wurde ein 3D-Finite Element Modell der gesamten Versuchseinrichtung entwickelt (vgl. [Fal07]), in dem die fünf Rohre des Stranges entsprechend den verschiedenen Vortriebszuständen abgewinkelt werden können. Berechnungen mit dem nichtlinearen 3D-Modell bestätigten die Phänomene, die am Simulator beobachtet wurden. Darüber hinaus konnten weitere Informationen, z.B. zu maximalen Rohrspannungen und den zu erwartenden Beanspruchungen im Druckübertragungsring gewonnen werden.

Mit Blick auf die Interpretation der gemessenen Bettungsreaktionen als aktivierbare Bodenspannungen wurden in [Ach07] ergänzende FE-Berechnungen durchgeführt, die zu einem Berechnungsalgorithmus führten, mit dem sich umfassende Kraft-Verschiebungs-Beziehungen für die Querverschiebung eines Vortriebsrohres unter Vortriebsbelastungen herleiten lassen. Dabei können unterschiedliche Bodenarten, Lagerungsdichten, Überdeckungshöhen und Überschnitte berücksichtigt werden, so dass auch eine iterative Steuerung der Horizontalpressen im Versuch in Abhängigkeit einer angenommenen Bettungssteifigkeit möglich wäre.

Die dargestellten Ergebnisse gewinnen insbesondere dadurch an Bedeutung, dass die Bemessung von Vortriebsrohren für den Lastfall Kurvenfahrt bislang auf der Theorie nach Scherle [Sch03] basierte (vgl. [DWA-A161]). Diese geht bezüglich der Kontaktspannungsverteilung an der Rohraußenseite bei Kurvenfahrten davon aus, dass die Rohre in Kurven durch die Vorpresskraft gleichmäßig an die Außenwand des Ausbruchsraumes gedrückt werden (vgl. Abschnitt 4.3.3.2). An der Kurveninnenseite wird demnach das Druckübertragungsmittel komprimiert und an

der Kurvenaußenseite besteht die Gefahr der klaffenden Fuge. Die Abwinklung zwischen den Rohren wird allein durch den Radius der aufgefahrene Kurve und den Überschneidung und die Elastizität des anstehenden Bodens begrenzt. Aus den dargestellten Versuchen ergaben sich nun jedoch von diesen Modellvorstellungen abweichende Erkenntnisse, so dass auch der Einfluss der Druckübertragungsmittel neu zu hinterfragen war.

#### 5.4.3.4 Vergleich von Druckübertragungsmitteln

In den dargestellten 1:1-Versuchen unter realitätsnahen Beanspruchungen nach Abbildung 46 wurden in der Rohrfuge spezielle Druckmessfolien<sup>80</sup> eingesetzt, um die Spannungsverteilung in den einzelnen Vortriebsabschnitten bei Einsatz unterschiedlicher Druckübertragungsmittel vergleichend zu untersuchen. Abbildung 48 zeigt das Spannungsbild der zwei im Rohrkämpfer angeordneten Foliensensoren für die jeweils vollständige Vorpresssimulation mit Vollholz (Holz), Spanplatte (Span) und Polyurethan (PU). Dargestellt ist die Spannungsverteilung zum Ende des jeweils letzten Lastzyklusses der Vortriebszustände Gerade Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3. Es wirkte jeweils eine Vorpresskraft von 6 MN.

---

<sup>80</sup> Auch in diesen Versuchen wurde wiederum das Tekscan®-Foliensensor-Messsystem eingesetzt.

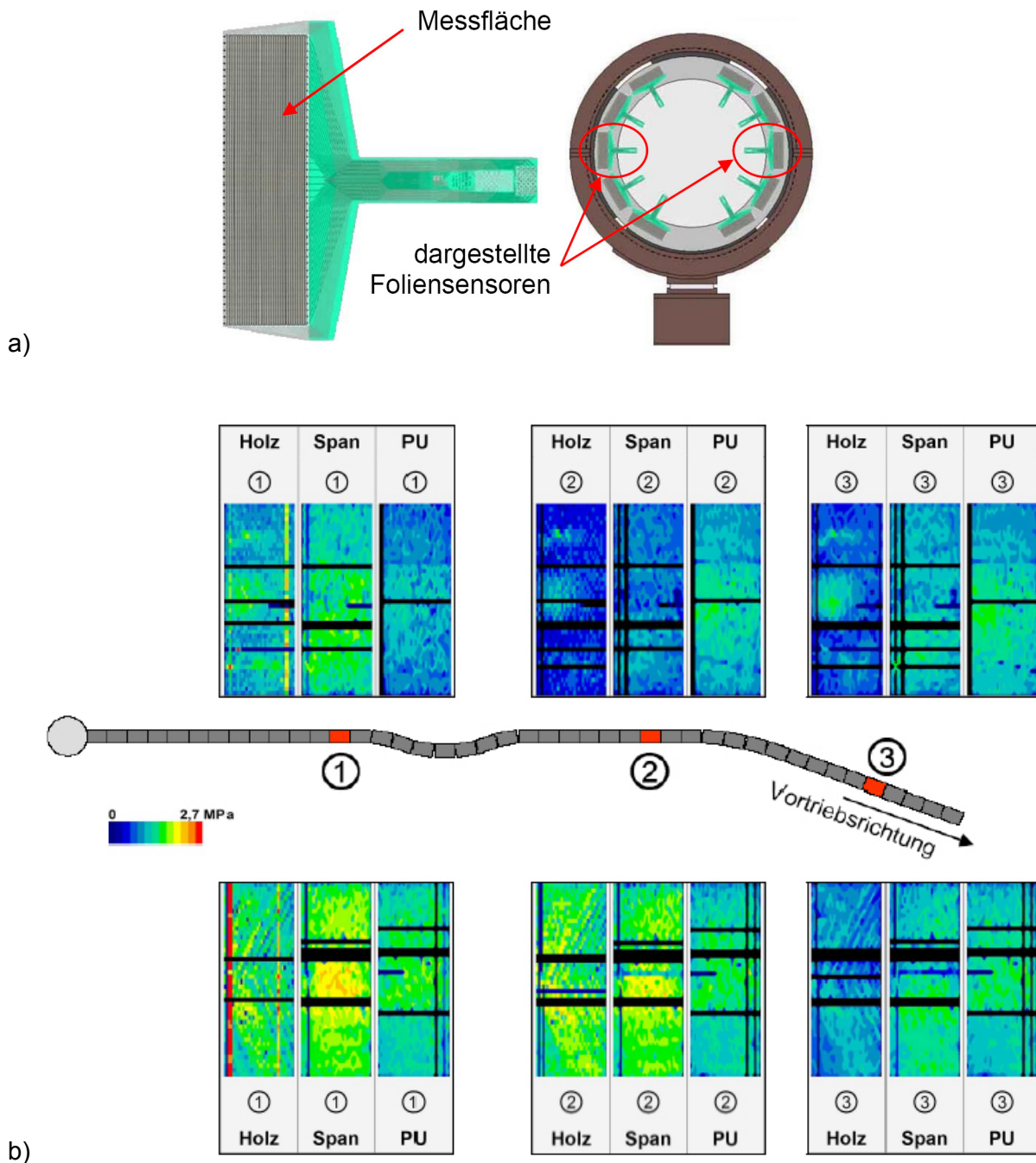


Abbildung 48: Kontaktspannungen in der Rohrfuge für DÜM aus Vollholz (Holz), Spanplatte (Span) und Polyurethan (PU)<sup>81</sup>

a) Anordnung der Druckmessfolien im Rohrspiegel

b) Messergebnisse im linken Kämpfer (oben) und rechten Kämpfer (unten) für das Durchfahren der 1., 2. und 3. Gerade

Bei dem Druckübertragungsmittel Polyurethan wird nach Durchfahren des Trassenelementes Gerade Nr. 1 ein um etwa 20 % geringerer maximaler Wert im Vergleich zu entsprechenden Werten des Holzes bzw. des Holzspanwerkstoffes

<sup>81</sup> Das Druckübertragungsmittel aus PU wurde gemeinsam mit einem Übergangsblech auf dem Rohrspiegel montiert, um die Einleitung übermäßiger Querspannungen zu vermeiden.



gemessen. Die weiteren Spannungsverteilungen lassen kaum Änderungen des Spannungsniveaus bei Durchfahren der Beispieltrasse erkennen. Das Material verhält sich offensichtlich in hohem Maße elastisch.

Beim Druckübertragungsmittel Vollholz ist demgegenüber zu erkennen, dass das Spannungsniveau im linken und rechten Kämpfer bereits nach dem letzten Lastzyklus der ersten Geraden unterschiedlich ist. Auf der rechten Seite wird ein um etwa 30 % höherer Wert gemessen. Nach Durchlaufen einer Steuerbewegung und einer weiteren Gerade mit zusammen 14 Lastzyklen steigt das Spannungsniveau im rechten Kämpfer weiter an. Im linken Kämpfer nimmt es ab. Die im Trassenverlauf folgende planmäßige Kurve und eine weitere Gerade haben zur Folge, dass das Spannungsniveau auch auf der rechten Seite deutlich abnimmt. Der gemessene Wert hat sich etwa halbiert. Im linken Kämpfer, der Kurvenaußenseite, ist lediglich ein geringer Anstieg des Spannungsniveaus zu erkennen. Im Vergleich zur 1. Gerade scheint das Spannungsniveau insgesamt abzusinken. Dies ist jedoch nur in den äußeren Kämpferbereichen der Fall. In Richtung Querschnittsmitte kommt es zu einer Spannungserhöhung und somit zu einer Lastkonzentration, welche durch die plastischen Verformungsanteile infolge der Wechselbelastungen hervorgerufen wird. Die Kämpferbereiche haben sich offensichtlich aufgrund der hohen Dehnungsbeanspruchungen im plastischen Bereich während der Kurvenfahrten der mittragenden Wirkung entzogen. Die Messwerte für das Druckübertragungsmittel des Holzspanwerkstoffes Spanplatte zeigten ein ähnliches Verhalten.

Offensichtlich beeinflussen die Verformungseigenschaften des Druckübertragungsmittels maßgeblich die Druckspannungsverteilung im Rohrspiegel und die zu erwartenden Maximalspannungen. Die *Vortriebsversuche im Maßstabe 1:1 unter realitätsnahen Beanspruchungen* lieferten erstmals unter identischen Trassenbedingungen zuverlässige Aussagen zum Verhalten eines Rohrstrangs bei Einsatz unterschiedlicher Druckübertragungsmittel.

#### **5.4.4 Sanierung**

Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen bieten sich zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zur Sanierung<sup>82</sup> unterirdischer Kanäle und Leitungen insbesondere an, wenn Verfahrens- und Produktleistungen unter identischen Beanspruchungssituationen miteinander verglichen werden sollen. Die für diese Modellebene charakteristische Möglichkeit zur versuchstechnischen Optimierung der Beanspruchungsbilder ist jedoch gegenüber den Beispielen aus dem Neubau deutlich eingeschränkt, da die relevanten Schadensbilder und Rohr-Boden-Situationen in der Regel nur selten vollständig modellierbaren

---

<sup>82</sup> Zur Abgrenzung der Begriffe „Instandsetzung“ und „Sanierung“ vgl. Abschnitt 4.3.4. In dieser Arbeit wird durchgehend der Begriff „Sanierung“ im Sinne von [EN752] verwendet.

Gesetzmäßigkeiten unterliegen und daher nur unter baustellenähnlichen Bedingungen nachempfunden werden können (vgl. Abschnitt 5.3.4). Für den Fall des Berstverfahrens wurden einzelne Beanspruchungssituation allerdings auch in 1:1-Versuchen unter realitätsnahen Bedingungen untersucht (vgl. [IKT03b]). Dabei wurden zunächst die Größe der Scherben für die zu sanierenden Altrrohrwerkstoffe (Grauguss, Beton und Steinzeug) ermittelt und unter Annahme eines maximalen Erddrucks die Gesamtbelastung je Scherbe ermittelt. Unter der Annahme, dass diese Belastung gleichverteilt über die Kontaktpunkte in das Neurohr eingeleitet wird, wurden Vorberechnungen mit der FE-Methode zur Ermittlung des maßgeblichen Spannungsniveaus und schließlich Punktbelastungsversuche an Neurohren aus Kunststoff zum Nachweis der Versagenssicherheit unter Langzeitbelastung und des Abriebverhaltens durchgeführt. Die entwickelten Prüfverfahren können zur aussagekräftigen Qualitätskontrolle von Kunststoffrohren für das Berstverfahren herangezogen werden.

#### **5.4.5 Betriebsbeanspruchungen**

*Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen* bieten sich insbesondere zur Simulation von Betriebsbeanspruchungen an, wenn die Zeitdauer der Versuche gegenüber In-situ-Beobachtungen oder betriebsähnlichen Belastungen erheblich reduziert werden kann. Anwendungsfelder sind z.B. die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren für über die Zeit veränderliche oder zyklische äußere und innere Belastungen oder zeitabhängige Interaktionen der Rohrleitung mit der Umgebung, wie z.B. bei Wurzeleinwuchs in Rohrleitungen.

##### 5.4.5.1 Belastungen von Außen

Äußere Belastungen, die in situ über die Betriebsdauer auftreten, sind z.B. Verkehrslasten an flach überdeckten Rohrleitungen (vgl. Abschnitt 4.4.1) und Verkehrslasten an Schachtabdeckungen von Kanalisationen, hier ggf. auch in Kombination mit Frost-Tausalz-Angriff und Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen (vgl. [IKT02b], [IKT07e]).

Eine weitere betriebliche Belastung mit erheblichem Einfluss auf die Standsicherheit der Rohrleitung ist der mögliche Grundwasseranstieg und damit eine Außenwasserdruckbelastung der Rohrleitung. Im Falle von Sanierungsmaßnahmen zur Fremdwasserreduzierung in Kanalnetzen kann auch die Sanierungsmaßnahme selbst die Ursache für eine zeitverzögerte Außenwasserdruckbelastung sein (vgl. [IKT06c]). Im Versuch können diese Belastungen grundsätzlich in speziellen wassergefüllten Druckkammern nachempfunden werden (Abbildung 49a). Im Falle des Beulversagens von Rohren unter Außenwasserdruck (vgl. Abschnitt 4.4.2) sind hier allerdings die Bedingungen des freien Rohres nach Gleichung (4.4-1) mit dem tatsächlichen Beanspruchungsniveau abzugleichen und ggf. um entsprechende Plausibilitätskontrollen, wie z.B. FEM-Berechnungen (Abbildung 49c), zu ergänzen.



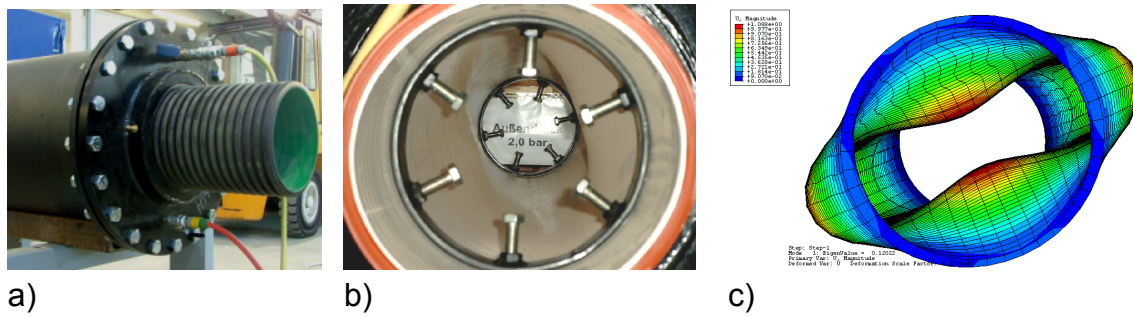


Abbildung 49: Außenwasserdruckversuch: a) Druckkammer b) Beulversagen c) FEM-Berechnung

#### 5.4.5.2 Belastungen von Innen

Typische zyklisch wiederkehrende Belastungen im Inneren von unterirdischen Rohrleitungen werden durch physikalische und chemische Interaktion mit dem transportierten Medium (Temperaturwechsel, Druckstöße, Korrosion) sowie mechanische Beanspruchungen aus regelmäßigen Wartungsmaßnahmen verursacht, wie z.B. bei der Hochdruckreinigung von Kanälen. Umfassende Untersuchungen zur Beanspruchung von Kanälen aus unterschiedlichen Rohrwerkstoffen durch Hochdruckreinigung liegen mit [IKT04] vor. Diese Erkenntnisse sind von besonderer versuchstechnischer Bedeutung und sollen daher als Beispiel für diese Versuchsart herangezogen werden.

Um die Wirkung von HD-Strahlen am Auftreff-Ort untersuchen zu können, wurde eine Versuchseinrichtung entwickelt, mit der das Strahl- und Druckbild von HD-Einzelstrahlen weitgehend erfasst werden konnte (Abbildung 50). Ziel der Versuche war es, die charakteristische Druckverteilung von HD-Strahlen auf einer bestrahlten Oberfläche messen zu können. Dazu wurde jeweils ein einzelner Strahl einer mehrstrahligen Düse auf eine Druckmessfolie geleitet. Im Ergebnis wurde insbesondere der große Einfluss von Strahlabstand und Strahlwinkel auf die Druckspitzenwerte deutlich. Schließlich konnten auch die Düseneigenschaften unter reproduzierbaren Randbedingungen im Versuch grundsätzlich charakterisiert werden.

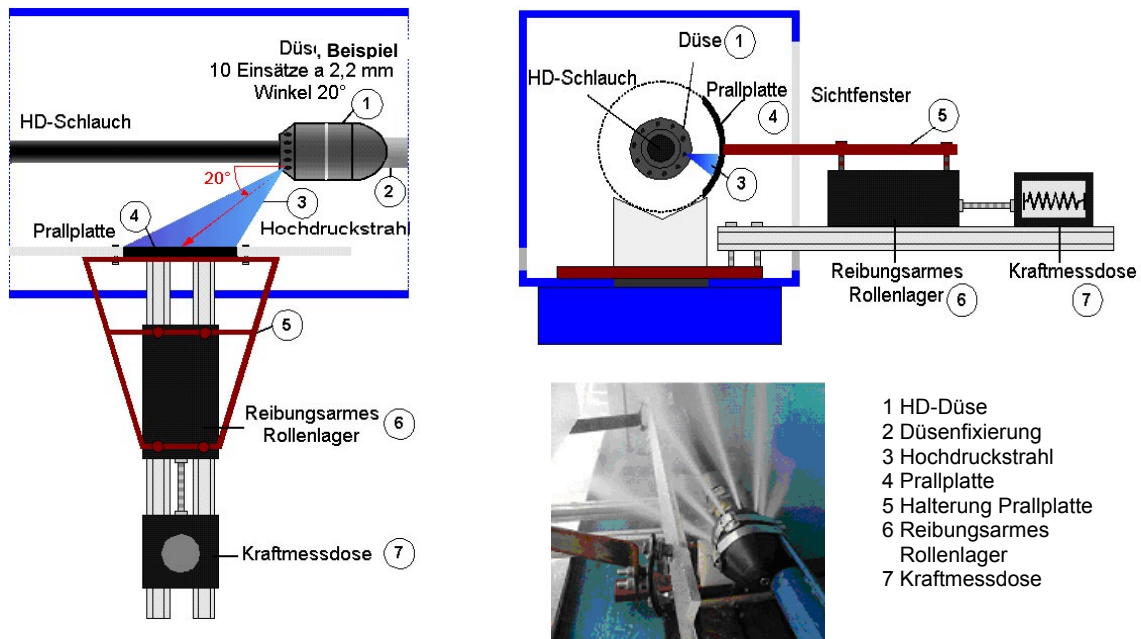


Abbildung 50: Versuchseinrichtung zur Messung der Strahlkraft und Strahldruckverteilung am Auftreffort eines Hochdruckreinigungsstrahls

#### 5.4.5.3 Rohr-Wurzel-Interaktion

In [RUB04], [RUB07] wurden Lösungsvorschläge erarbeitet, wie Produkte und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen mit Blick auf die mögliche Interaktion zwischen Rohr bzw. Rohrverbindung und Wurzelwerk der Umgebungsvegetation in Laborversuchen unter realitätsnahen Beanspruchungen so untersucht werden können, dass auf aufwändige und kaum reproduzierbare In-situ-Untersuchungen für die Prüfung und Bewertung weitgehend verzichtet werden kann. Drei Ansätze wurden bei den Untersuchungen in [RUB07] unterschieden:

- **Druckspannungsvergleiche zwischen Wurzeln und Dichtungen** mit dem Ziel, den Wurzeldruck der Pflanzen physikalisch zu beschreiben und auf dieser Grundlage die Anpressdruckverteilung typischer Dichtringverbindungen von Rohren in ihrer wurzelabweisenden Wirkung bewerten zu können.
- **Durchwurzelungsversuche** an Rohrverbindungen mit dem Ziel, in speziellen, aus Rohrverbindungen geformten Pflanzgefäßen eine Durchwurzelung zu provozieren und das Interaktionsverhalten beschreiben zu können.
- **Außendruckversuche** an Rohrverbindungen mit dem Ziel, die Widerstandsfähigkeit von Rohrverbindungen gegenüber der mechanischen Wirkung der von außen eindringenden Wurzeln in einem einfachen Versuch prüfen zu können.

Die Untersuchungen wurden an marktgängigen Rohrprodukten aus Steinzeug, PVC, PP und GGG im Nennweitenbereich DN 150 mit Steckverbindungen durchgeführt.

Besondere versuchstechnische Kompetenz war für die Entwicklung und Umsetzung der Druckspannungsvergleiche zwischen Wurzeldruck und Dichtungsdruck gefragt, da hier biologische und physikalische Phänomene gemeinsam betrachtet und in ihren Wechselwirkungen bewertet werden mussten. Dieses Beispiel soll daher detaillierter dargestellt werden.

Im Rahmen von [RUB04] wurde bereits der Wurzeldruck an Erbsenkeimlingen und an Eichenkeimlingen ermittelt. Darauf aufbauend wurden in [RUB07] ergänzende Versuche an Keimwurzeln von Nadelbäumen (Gymnospermen) und Laubbäumen (Angiospermen) mit dem in Abbildung 51 dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt.

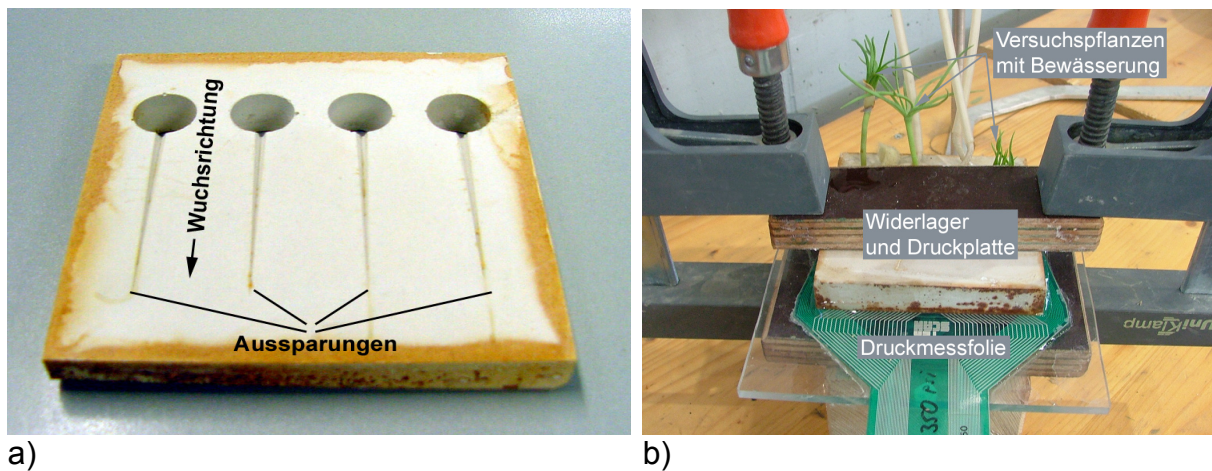


Abbildung 51: Versuchsaufbau für Druckmessungen an Wurzeln; aus [RUB07]

- a) Druckplatte aus Gips  
b) Druckmessfolie mit Widerlager

Bei allen untersuchten Baumarten konnte Wurzeldruck in radialer Richtung gemessen werden, mit Maximalwerten von 8,8 bar für Keimwurzeln von Pinien (*Pinus pinea*) und 11,9 bar für Keimwurzeln von Eiche (*Quercus robur*).

Diese Werte dienen als Orientierung zur Bewertung der Anpressdruck-Verteilung von Dichtungen in Steckverbindungen unter Scherlast in Anlehnung an DIN 4060 [DIN4060]. Für die Bestimmung der Anpressdrücke sowie der korrespondierenden Dichtflächen wurden mit Druckmessfolien bestückte Rohrverbindungen in einem für Rohrquerschnitte bis ca. DN 150 konzipierten Scherlastversuchsstand untersucht. Die Position der Druckfolie ist in Abbildung 52a,b dargestellt. Eine in den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung mit Druckfolie zeigt Abbildung 52c. Beispielhaft ist in Abbildung 52d die Verteilung der Anpressdrücke und Anpressflächentiefe im Rohrumfang einer Rohrverbindung dargestellt.

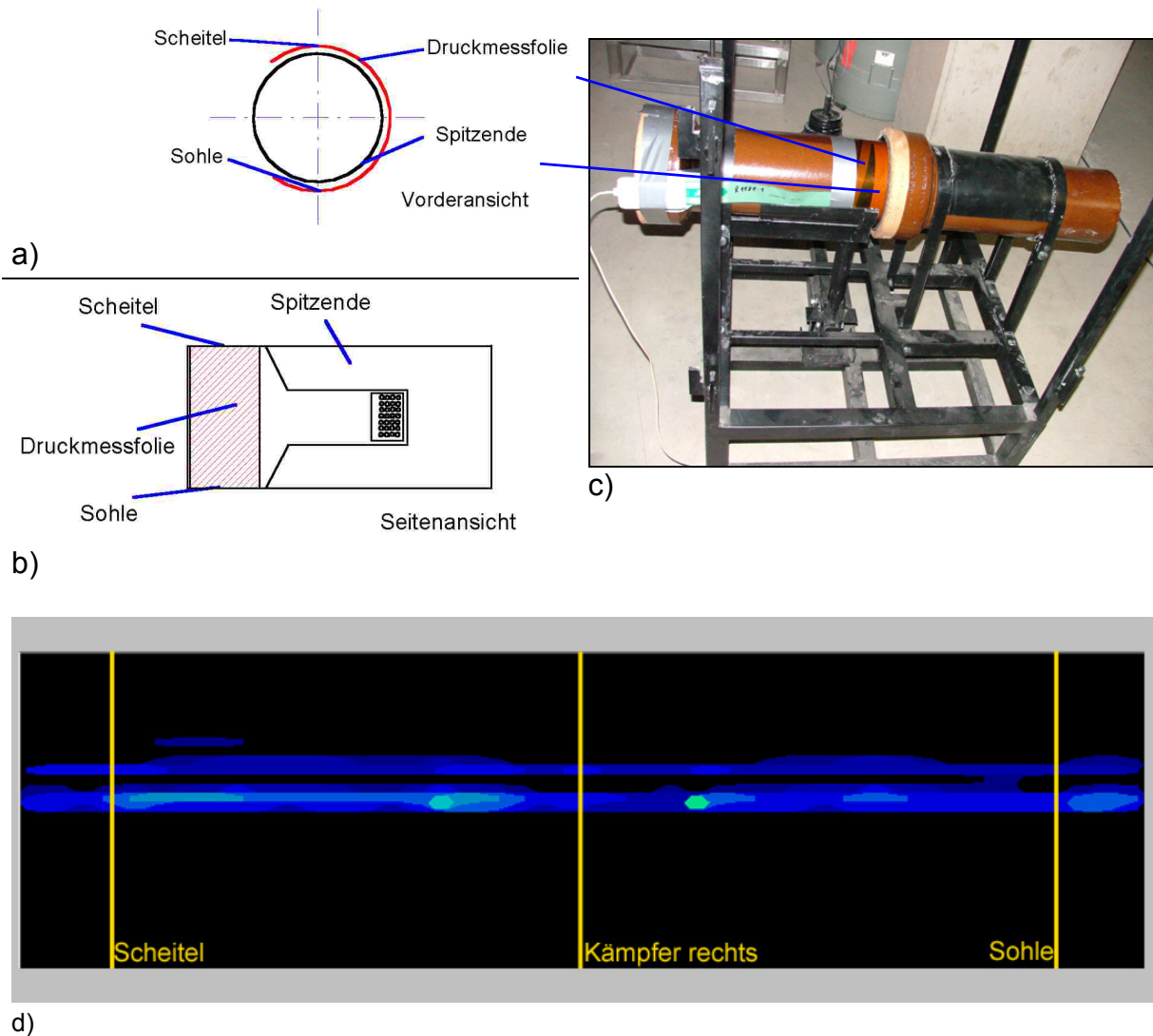


Abbildung 52: Messung des Anpressdruckes in einer Steckverbindung unter Scherlast  
 a) Skizze: Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Querschnittsansicht.  
 b) Skizze: Druckfolie auf dem Spitzende einer Rohrverbindung, Draufsicht.  
 c) In den Scherlastversuchsstand eingebaute Rohrverbindung aus Keramik.  
 d) Messergebnis der Anpressdruckverteilung in einer Rohrverbindung, Beispiel.

Die dargestellten Untersuchungen veranschaulichten auch Einflüsse aus der Konstruktion der Rohrverbindung auf maßgebliche Eigenschaften der Anpressdruck-Verteilung wie z.B. Minimalwerte, Anpressflächentiefe und wirksame Dichtbreiten (vgl. DIN EN 1916 [EN1916]). Die gemessenen mittleren Anpressdrücke der untersuchten Rohrverbindungen DN 150 schwankten zwischen 2,0 bar und 22,2 bar ohne Einwirkung von Scherlasten bei Dichtbreiten zwischen 2,4 mm und 21,9 mm. Zur Beurteilung der untersuchten Rohrverbindungen auf deren Widerstandsfähigkeit gegen wachsende Wurzeln können diese Untersuchungen allein allerdings nicht herangezogen werden, da auch das Verformungsverhalten unter Last und die Rohrverbindungsgeometrie einen Einfluss haben können.

Die Ergebnisse der hier angesprochenen Prüfungen haben wesentlichen Einfluss auf die Regelwerksarbeit zu Planung, Bau und Betrieb von Baumstandorten, Kanälen und Leitungen. So fließen die dargestellten Ergebnisse direkt in die Arbeit der DWA Arbeitsgruppe ES 3.6 „Baumstandorte, Kanäle und Leitungen“ ein<sup>83</sup>. Verbesserte Kenntnisse über das Wuchsverhalten von Wurzeln und deren Interaktion mit den Kanal- und Leitungsgräben können helfen, Konflikte zwischen Grünflächenämtern und Netzbetreibern zu entschärfen bzw. ganz zu vermeiden.

## 5.5 Standard-Versuche

Als Standard-Versuche sollen für den vorliegenden Anwendungsfall solche Versuche bezeichnet werden, mit denen Bauteil-, Werkstoff- und Komponenteneigenschaften unter vordefinierten Beanspruchungsbildern einheitlich geprüft und z.B. mit dem Ziel der Klassifizierung bewertet werden können. Die jeweiligen technischen Modelle werden i.d.R. für den allgemeinen Anwendungsfall der Werkstoff- oder Bauteilprüfung entwickelt und sind überwiegend genormt. Die drei Modellmerkmale „Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus“ werden auch hier unmittelbar angesprochen:

- Zur Charakterisierung des Bauteil-, Werkstoff- oder Komponentenverhaltens werden im Versuch *an Probekörpern typische Belastungsanteile als teilweises Abbild realer Belastungssituationen* nachempfunden, so z.B. einaxiale Zug- und Druckkräfte, Biegemomente oder normalentreue Druckspannungsbelastungen.
- Aus der vorgenannten Definition der versuchstechnischen Abbildung leitet sich ab, dass die Originalfragestellung eine *Verkürzung auf definierte Beanspruchungsanteile* erfährt und daher eine realitätsnahe Beschreibung des gesamten Beanspruchungsverhaltens nur möglich wird, wenn die Ergebnisse sowohl zeitlich als auch spannungs- und verformungsabhängig superponierbar sind.
- Sind die charakteristischen Beanspruchungsanteile bekannt, so erlauben Standard-Versuche unter *Nutzenaspekten* eine extrem günstige Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren, auch im Sinne einer fortlaufenden Qualitätskontrolle sowie statistischen Auswertung und Analyse (vgl. [ISO12491], [Eur98]).

---

<sup>83</sup> vgl. [DWA08]. Die Arbeitsgruppe wird getragen von DVGW - Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FLL - Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., GSTT - German Society for Trenchless Technologie e.V., GALK - Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz. Der Verfasser ist Sprecher dieser Arbeitsgruppe.



Untersuchungen auf dieser Modellebene sind insbesondere dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn die für die Bewertung von Produkten und Verfahren maßgeblichen Qualitätsfaktoren wesentlich von den für die Standard-Versuche ausgewählten Beanspruchungsanteilen abhängen und die technische Prüfdurchführung so kostengünstig ist, dass auch statistische Auswertungen möglich werden. Da die Prüfungen weitgehend genormt sind, sollen hier nur einige Beispiele genannt und auf eine detaillierte Darstellung einzelner Prüfverfahren verzichtet werden. Beispiele aus der Prüfpraxis sind die

- **Rohr-Bauteilprüfungen:** Hierzu gehören insbesondere Prüfungen an Rohren einschließlich Rohrverbindungen und weiteren damit verbundenen Bauteilen wie z.B. Schacht- und Anschlusselementen, z.B. als Scheiteldruckversuche zur Festigkeitsbestimmung für Beton- und Steinzeugrohre sowie Risskontrolle von Stahlbetonrohren [DINV1201], Parallelplattenversuche zur Bestimmung der Rohrsteifigkeit und des Kriechverhaltens von Kunststoffrohren [EN1228], [EN761], Scherlastversuche zur Bestimmung der Wasserdichtheit unter Scherlast [EN1916] und Zeitstand-Innendruckversuche zur Bestimmung des Bruch- und Alterungsverhaltens von Kunststoffrohren [ISO9080].
- **Werkstoffprüfungen:** Hierzu gehören insbesondere Prüfungen der Verformbarkeit, Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Umweltbelastungen, so z.B. Prüfungen der Biegezug- und Druckfestigkeit von Sanierungsmörteln [DIN18555], Versuche zur Bestimmung der Frost-Tausalz- und Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Schachtkopfmörteln [Ril96], Kraft-Verformungsprüfungen an Druckübertragungsmitteln (vgl. [IKT07]), Schlagversuche zur Bestimmung der Schlagzähigkeit von Kunststoffen [EN179] und 3-Punkt-Biegeversuche an Linerausschnitten [ISO178].
- **Prüfung von Verbundwerkstoffen und Werkstoffkomponenten:** Verbundwerkstoffe setzen sich aus mehreren Werkstoffkomponenten zusammen, die einzeln oder auch gemeinsam, z.B. hinsichtlich ihrer Verbundwirkung, geprüft werden können. Beispiele sind die Prüfung der Würfeldruckfestigkeit von Betonproben aus der Stahlbetonrohr-Produktion [EN12390], die Analyse von Linerharzen mittels DSC-Bestimmung [DIN53765], die Prüfung des Verbundverhaltens zwischen Altrohr und Gewebeauskleidung durch Abschälversuche [DIN30658] und die Prüfung des Verbundverhaltens zwischen Beschichtungsmaterial und Untergrund durch Haftzugprüfungen [DAfStb01].

## 6 Prüfung

In den Abschnitten 3 bis 5 wurden die für eine zuverlässige Prüfung und Bewertung notwendigen Verständniskompetenzen systematisch beschrieben. Darüber hinaus sind aber weitere Handlungskompetenzen zur eigentlichen Wahrnehmung der Prüfaufgabe erforderlich. Dies betrifft die Festlegung und Finanzierung der Prüfaufgabe durch den Auftraggeber, ebenso wie die eigentliche Ausführung der Prüfung durch qualifiziertes Prüfpersonal sowie die objektive Dokumentation der Ergebnisse durch ein neutrales und unabhängiges Prüfinstitut. Der fortlaufenden, iterativen Abstimmung der Inhalte der Prüfaufgabe mit dem Auftraggeber, d.h. dem Kunden, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu<sup>84</sup>.

Nachfolgend soll mit Blick auf die Prüfung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen detailliert betrachtet werden,

- welche Funktion bzw. welchen Nutzen die Prüfaufgabe für den Auftraggeber haben kann,
- wie die Forderung nach einer objektiven Dokumentation der Ergebnisse bzw. der Neutralität des beauftragten Prüfinstituts nach üblicher Auffassung zu bewerten ist,
- welche grundsätzlichen Anforderungen an eine Prüfung durch qualifiziertes Personal zu stellen sind und
- welche besonderen Fragen der Qualitätssicherung hinsichtlich Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Repräsentativität zu berücksichtigen sind.

### 6.1 Prüfaufgabe

Ausgangspunkt für die systematische Beschreibung einer Prüfaufgabe ist die Frage nach den Anforderungen des Auftraggebers und der Funktion der Prüfung für ihn, so dass er zu einer Finanzierung bereit ist. Grundlage für die Beantwortung dieser Frage bilden im Folgenden die Betrachtungen von PERNKOPF in [Per06]. In Anlehnung an das dort beschriebene Gedankenmodell<sup>85</sup> können drei mögliche Anforderungen des Auftraggebers bzw. Funktionen einer Prüfaufgabe identifiziert werden:

---

<sup>84</sup> vgl. [ISO 17025], 4.1. Organisation, hier 4.1.1 und 4.1.2; die Befriedigung der Kundenbedürfnisse wird dort explizit als organisatorische Aufgabe beschrieben

<sup>85</sup> PERNKOPF unterscheidet in [Per06] zwischen *Experimenten als Prüfinstanzen*, *Experimenten zur Bestimmung unbestimmter Parameter* und *Erkundungen bzw. exploratives Experimentieren*.

- *Prüfung zur Verifikation*

Die größte Beachtung finden störungsfrei<sup>86</sup> durchgeführte Prüfungen i.d.R., wenn sie der Verifikation oder Widerlegung von Vorhersagen und Erwartungen dienen, die aus Theorien oder Hypothesen resultieren. Für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sei hier als Beispiel aus der Forschung die Überprüfung von Bemessungsverfahren (vgl. [IKT03c], [IKT07g]) genannt. Verifizierend wirken darüber hinaus auch Qualitätskontrollen der Eigen- und Fremdüberwachung sowie Prüfungen im Zuge der Abnahme von Bauleistungen, z.B. nach VOB/B [VOB06]<sup>87</sup>.

- *Prüfung zur Parameterbestimmung*

Der Bestimmung von Parametern gehen Prüfungen zum „Sammeln von Daten“ voraus, aus denen die gesuchten Größen ermittelt werden. Typische Beispiele für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sind Forschungsprojekte zur Entwicklung von Bemessungs- und Prüfverfahren (vgl. [Fal08a], [RUB06], [IKT03b]) sowie die Bestimmung von Sollwerten für charakteristische Eigenschaften eines Bauproduktes oder – verfahrens zum Nachweis der Verwendbarkeit bzw. Anwendbarkeit im Sinne der Zulassungsgrundsätze des DIBt (vgl. [Ste04]).

- *Prüfungen als explorative Untersuchung*

Prüfungen als explorative Untersuchung dienen dazu, empirische Regularitäten aufzudecken und passende Begrifflichkeiten dafür zu finden. Erkenntnisziele dieser Prüfungen müssen demnach nicht notwendigerweise theoretischer Art sein. Exploratives Arbeiten kann insbesondere auch mit der Art des Erfahrungsgewinns in vielen lebenspraktischen Kontexten in Verbindung gebracht werden. Typische Beispiele für den Bau und die Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sind Forschungsprojekte zu Qualitätseinflüssen und Einsatzgrenzen einzelner Verfahrenstechniken (vgl. [IKT05c], [IKT05d]), entwicklungsbegleitende Prüfungen für Produkt- und Verfahrenshersteller zur Bestimmung der Anwendungsmöglichkeiten und – grenzen eines neuen Verfahrens (vgl. [IKT02c]) oder vergleichende Produkt-/Verfahrenstests zur Erkundung der am Markt verfügbaren Produktqualitäten (vgl. [IKTW02]), zur Klärung der grundsätzlichen Umsetzbarkeit von Kundenanforderungen (vgl. [IKTW05]) und zur Identifikation maßgeblicher Zustandsbilder und Beanspruchungsfälle für neue Sanierungstechniken (vgl. [IKTW04]).

---

<sup>86</sup> d.h. insbesondere ohne ungeplante äußere Einwirkungen bzw. Ausreißer

<sup>87</sup> Sehr umstritten ist im Zusammenhang mit Leistungen der Kanalisationstechnik, welcher *Zeitpunkt* für die Beurteilung der Frage maßgebend ist, ob die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten wurden (vgl. [Han08]).



Vor diesem Hintergrund bestimmt der Auftraggeber einer Prüfung, welche der o.a. Funktionen im Vordergrund der Prüfung stehen. Ausschlaggebend ist dabei in der Regel das Verhältnis zwischen dem zu erwartenden Nutzen und den Kosten einer Prüfung.<sup>88</sup> Werden eigens neue Prüfverfahren zur Erfüllung der vorgenannten Funktionen entwickelt, so sind grundsätzlich zwei Wege denkbar (vgl. [Eur98]): Erstens können bestehende Prüfverfahren geringfügig angepasst werden, um sie auf ähnliche Anwendungen bzw. Produkte und Verfahren zu übertragen; zweitens können zur Abbildung neuer Prüfsituationen verschiedene Prüfidéen und Randbedingungen skizziert, ggf. gemeinsam mit dem Auftraggeber iterativ verfeinert und schließlich eine geeignete und möglichst effiziente neue Prüfmethode entwickelt werden (vgl. Lenkungskreissitzungen in vergleichenden IKT-Warentests, Abschnitt 8.2 und [IKTW02], [IKTW04], [IKTW05], [IKTW05a], [IKTW06]).

## 6.2 Objektive Dokumentation

Das in Abschnitt 6.1 dargestellte Spektrum zwischen „verifizierendem“ und „explorativem“ Prüfen macht bereits eine wesentliche Problematik deutlich, nämlich die Frage, was - insbesondere im Falle des „datensammelnden“ Prüfens – objektiv bzw. von einem neutralen Standpunkt betrachtet als Störung durch äußere Einwirkungen bzw. Ausreißer gilt<sup>89</sup> und was unter Objektivität bzw. Neutralität grundsätzlich zu verstehen ist<sup>90</sup> und in welcher Weise diese Eigenschaft im konkreten Anwendungsfall definiert und gefordert wird. Im Folgenden werden zur Orientierung im Umgang mit dieser komplexen Thematik zunächst einige grundsätzliche Aspekte erläutert.

Unter „objektiv“ versteht man nach [Per06] alltagssprachlich meist Unvoreingenommenheit und Unparteilichkeit, die es ermöglichen, etwas so zu sehen, „wie es wirklich ist“. <sup>91</sup> NAGEL <sup>92</sup> prägte den auch in den Naturwissenschaften zur Definition von Objektivität verbreiteten Begriff „view from nowhere“ (vgl. [Nag86]) und verbindet kritisch den Begriff der Objektivität mit der Suche nach einem neutralen Standpunkt<sup>93</sup>. Dieser Zusammenhang findet sich auch in Anforderungen an

---

<sup>88</sup> Insbesondere in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben können bei der Finanzierung auch Dritte beteiligt sein, z.B. die öffentliche Hand als Fördermittelgeber.

<sup>89</sup> vgl. [Per06], S. 48

<sup>90</sup> vgl. [Per06], S. 94 „Objektivität ist ein altes wissenschaftliches Versprechen“.

<sup>91</sup> Pernkopf leitet in [Per06] aus der Wissenschaftsgeschichte noch weitere Aspekte der Objektivität ab: ontologisch (der Suche nach einer letztgültigen Struktur der Realität), aperspektivisch (ohne individuelle Eigenarten) und mechanisch (dem Verbot von Interpretation bei der Darstellung wissenschaftlicher Ergebnisse).

<sup>92</sup> US-amerikanischer Philosoph (\* 1937)

<sup>93</sup> vgl. [Nag86], S. 5: „... *objectivity is both underrated and overrated, sometimes by the same persons. It is underrated by those who don't regard it as a method of understanding the world as it is in itself. It is overrated by those who believe it can provide a complete view of the world on its own, replacing the subjective views from which it has developed. These errors are connected: they both stem from an insufficiently robust sense of reality and of its independence of any particular form of human understanding [...]. We can add to our knowledge of the world by accumulating information at a*

enzyklopädische Inhalte wieder. Das Web-Portal Wikipedia fordert von seinen Autoren z.B. in hohem Maße „Neutralität“ und definiert den sog. neutralen Standpunkt als eines von vier sog. unveränderlichen Grundprinzipien<sup>94</sup>. Der neutrale Standpunkt selbst wird wiederum detailliert durch drei Grundsätze beschrieben: „*Quellenbasierung*“, „*Ausgewogenheit der Standpunkte*“ sowie „*Sachlichkeit/Objektivität der Darstellung*“. Zusammenfassend wird erläutert<sup>95</sup>: „*Der neutrale Standpunkt versucht, Ideen und Fakten in einer Weise zu präsentieren, dass sowohl Gegner als auch Befürworter einer solchen Idee deren Beschreibung tolerieren können. Er fordert nicht die Akzeptanz aller; dies wird man selten erreichen, zumal manche Ideologien alle anderen Standpunkte außer ihrem eigenen ablehnen. Daher sollte das Ziel darin bestehen, eine für alle rational denkenden Beteiligten tolerable Beschreibung zu formulieren.*“

Objektivität allein sichert somit noch nicht, dass die so erzielten Ergebnisse der Realität entsprechen. Objektivität ist lediglich ein Standpunktwechsel, nämlich der Wechsel zum neutralen Standpunkt, der zwar von subjektiven Einflüssen losgelöst, aber immer noch vom menschlichen Verständnis geprägt ist. Trotz dieser Einschränkung wird der Neutralität und Unparteilichkeit von Prüfpersonal und Prüfinstitut in gesetzlichen und technisch-wissenschaftlichen Regelungen sowie institutionellen Selbstverpflichtungen gerade mit Blick auf die Prüfung von Produkten und Verfahren eine herausragende Bedeutung zuerkannt:<sup>96</sup>

- *Gesetzliche Regelungen:*

Als Beispiel seien hier die Bauproduktenrichtlinie und das Bauproduktengesetz genannt: Nach Artikel 18 (2) der Bauproduktenrichtlinie [BPR03] müssen die Zertifizierungs-, Überwachungs- und Prüfstellen den in Anhang IV der Richtlinie festgelegten Kriterien entsprechen und damit neben den Mindestanforderungen wie Kompetenz des Personals und erforderliche Mittel und Ausrüstung insbesondere auch die Forderung nach „*Unparteilichkeit der Führungskräfte und des technischen Personals in bezug auf alle Kreise, Gruppen oder Personen, die direkt oder indirekt am Markt für Bauprodukte interessiert sind, hinsichtlich der Durchführung der Prüfungsverfahren und der Erstellung von Berichten, der Ausstellung von Bescheinigungen und der Überwachungstätigkeiten gemäß der Richtlinie*“

---

*given level – by extensive observation from one standpoint. But we can raise our understanding to a new level only if we examine that relation between the world and ourselves which is responsible for our prior understanding, and form a new conception that includes a more detached understanding of ourselves, of the world, and of the interaction between them. Thus objectivity allows us to transcend our particular viewpoint and develop an expanded consciousness that takes in the world more fully. All this applies to values and attitudes as well as to beliefs and theories.”*

<sup>94</sup> Die vier Grundprinzipien des Wikipedia: „Wikipedia ist eine Enzyklopädie“, „Neutralität“, „Freie Inhalte“, „Keine persönlichen Angriffe“; s. <http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Grundprinzipien> (eingesehen am 23.11.2008)

<sup>95</sup> s. [http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Neutraler\\_Standpunkt](http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Neutraler_Standpunkt) (eingesehen am 23.11.2008).

<sup>96</sup> Unterstreichungen sind nicht Teil des Zitats, sondern dienen der Hervorhebung im Sinne des Gesamtzusammenhangs.

erfüllen. Das deutsche Bauproduktengesetz [BPG98] führt in §11 ergänzend aus, dass die Anerkennungsbehörde (hier das DIBt) die o.a. Stellen anerkennen kann, „wenn sie oder die bei ihr Beschäftigten nach ihrer Ausbildung, Fachkenntnis, persönlichen Zuverlässigkeit, ihrer Unparteilichkeit und ihren Leistungen Gewähr dafür bieten, dass diese Aufgaben sachgerecht wahrgenommen werden und wenn sie über die erforderlichen Vorrichtungen verfügen.“

- *Technisch-wissenschaftliche Regelungen:*

Grundsätzliche Forderungen zur Objektivität und Unparteilichkeit eines Prüfinstituts ergeben sich bereits aus DIN EN ISO 17025 [ISO17025]<sup>97</sup> „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“<sup>98</sup>: „Das Laboratorium muss [...] über grundsätzliche Regelungen und Verfahren verfügen, durch welche die Teilnahme an Tätigkeiten vermieden wird, die das Vertrauen in seine Kompetenz, Unparteilichkeit, sein Urteilsvermögen oder seine betriebliche Integrität herabsetzen könnten“. Darüber hinaus wird auch explizit die objektive Darstellung von Ergebnisberichten gefordert<sup>99</sup>. Nach [Thi84] gilt für wissenschaftliche Texte „das objektive Urteil im Sinne einer sachlichen und wertfreien Aussage traditionell als Musterbeispiel einer wissenschaftlichen Aussage“.

- *Institutionelle Selbstverpflichtungen:*

Einzelne Auftraggeber, insbesondere wenn sie als Träger von öffentlichen Prüfaufgaben auftreten, stellen hohe Anforderungen an die Neutralität und Unabhängigkeit der ausführenden Prüfinstitutionen. So fordert das DIBt dies schon aufgrund der seiner Tätigkeit zugrunde liegenden gesetzlichen Bestimmungen des Bauproduktengesetzes. Darüber hinaus definieren aber auch andere Körperschaften in ihren eigenen Satzungen vergleichbare Anforderungen. Die Stiftung Warentest formuliert z.B. im §2 ihrer Satzung [SWT08] als Stiftungszweck u.a. „Ausschließlicher und unmittelbarer Zweck der Stiftung ist es, die Öffentlichkeit über objektivierbare Merkmale des Nutz- und Gebrauchswertes sowie der Umweltverträglichkeit von Waren und privaten sowie individuell nutzbaren öffentlichen Leistungen zu unterrichten“. In der Folge fordert die Stiftung Warentest von den beauftragten Prüfinstituten die Unterzeichnung einer Neutralitätsverpflichtung [SWT08a], in der „der

---

<sup>97</sup> Anforderungen nach [ISO17025] werden insbesondere in Ausschreibungen und Verträgen für Prüfleistungen im Zusammenhang mit der Sanierung unterirdischer Kanäle und Leitungen formuliert.

<sup>98</sup> s. [ISO17025], Abschnitt 4.1.5 d)

<sup>99</sup> vgl. [ISO17025], Abschnitt 5.10.1 „Die Ergebnisse der einzelnen, vom Laboratorium durchgeführten, Prüfungen oder Kalibrierungen oder Prüf- oder Kalibrierreihen müssen genau, klar, eindeutig und objektiv sowie in Übereinstimmung mit den in den Prüf- oder Kalibrierverfahren enthaltenen speziellen Anweisungen berichtet werden.“

*Auftragnehmer versichert, dass er die Gewähr für eine unparteiische, unabhängige und nicht an eigenen oder Interessen Dritter orientierte Erfüllung seines Auftrages bietet und den Auftrag ohne Rücksicht auf die Interessen gegebenenfalls betroffener Anbieter/Hersteller von Produkten der zu untersuchenden Produktgruppe oder auf sonstige sachfremde Anliegen Dritter neutral und ergebnisoffen erfüllen wird.“ Der TÜV legt in ähnlicher Weise im §2 seiner Satzung [TÜV05] fest: „Der TÜV Rheinland Berlin Brandenburg Pfalz hat den Zweck, unabhängig und neutral in allen wirtschaftlichen und sonstigen Lebensbereichen Sicherheit und Qualität zu entwickeln, zu sichern, nach definierten Kriterien zu zertifizieren und durch Schulungen oder sonstige Maßnahmen zu fördern.“*

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass die Neutralität und Unabhängigkeit eines Prüfinstitutes eine wesentliche Voraussetzung zur objektiven Aufgabenerfüllung und Dokumentation der Ergebnisse sind. Vorzugsweise ist dies bereits durch die institutionellen Rahmenbedingungen, wie die Satzung und eine öffentliche bzw. gemeinnützige Trägerschaft, sicherzustellen. Ist dies nicht möglich, sollte zumindest eine auftragsbezogene Neutralitätsverpflichtung vorliegen, um die für eine ausgewogene Darstellung von Prüfergebnissen notwendige Neutralität und Unabhängigkeit sicherzustellen.

### **6.3 Prüfung durch qualifiziertes Personal**

Das eingesetzte Personal muss die jeweilige Prüfaufgabe qualifiziert und kompetent lösen können: Die Qualifikation betrifft das ausführende Personal unmittelbar mit Blick auf die Erfahrung im Umgang mit der gestellten Aufgabe, die fachtechnischen Kenntnisse und entsprechenden Problemlösungsfähigkeiten. Kompetenz geht hierüber hinaus und betrifft auch die Verfügbarkeit geeigneter Geräte und die Einbindung in eine entsprechend neutrale und unabhängige Organisation. [Eur98]

Diese Definition ist eng mit den Verständniskompetenzen nach Abbildung 2 in Abschnitt 2 bzw. dem Verständnis für die Zusammenhänge in den Abschnitten 3, 4 und 5 sowie dem Neutralitätsanspruch nach Abschnitt 6.2 verbunden. Werkzeuge und Methoden dürfen nur eingesetzt werden, wenn sie für den Anwendungsfall der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen geeignet sind. Dies betrifft insbesondere die Zuverlässigkeit der Messergebnisse sowie das Erkennen und Bewerten möglicher Prüffehler (vgl. [Eur98] und Abschnitt 6.4).

Als wesentliche Aufgabe für qualifiziertes Prüfpersonal ist die Versuchsplanung anzusehen. Entsprechende Anforderungen werden für die Bautechnik insbesondere

in [EN1990]<sup>100</sup> formuliert. Hier werden sieben Anforderungspunkte genannt, die auch als Grundlage für die qualifizierte Prüfung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen dienen können. Sie werden nachfolgend im Sinne eines Leitfadens zur Aufstellung des Prüfplans bzw. Versuchsplans interpretiert und dienen entsprechend auch als Orientierung für die Qualifizierung des Prüfpersonals. Die Anforderungen an den Prüfplan bzw. Versuchsplan und damit auch die Kompetenzen des Prüfpersonals betreffen im Einzelnen (vgl. [EN1990], wörtliche Argumentationen aus dieser Norm sind hervorgehoben):

**1. Zielsetzung und Anwendungsbereich:**

*„Die Versuchsziele sollten eindeutig dargestellt werden“,* wie z.B. die Überprüfung vordefinierter Erwartungswerte zur Dichtheit, Funktionsfähigkeit und Standsicherheit, oder *„die Erfassung des Einflusses bestimmter Parameter, die im Versuch variiert werden sollen.“* Ggf. sind die *Untersuchungsgrenzen* entsprechend den *Versuchsmöglichkeiten und die erforderlichen Übertragungsfunktionen* (z.B. infolge Modellgesetzen) festzulegen.

**2. Prognose der Versuchsergebnisse:**

*„Die erwarteten Versagensarten sind in Verbindung mit den Einflussgrößen zu beschreiben. Bei Unklarheit hinsichtlich der maßgebenden Versagensart sollte der Versuchsplan Pilotversuche berücksichtigen. Es sind alle Eigenschaften und Umstände, die die Prognose der Versuchsergebnisse beeinflussen könnten, zu berücksichtigen.“* Dies betrifft insbesondere die Ausbildung und Veränderung geometrischer Parameter, wie z.B. Schadensbilder, sowie vorbereitende Maßnahmen und Dichtheitsprüfungen.

**3. Festlegung der Prüfkörper und Proben:**

*„Die Prüfkörper sind so festzulegen oder zu entnehmen, dass sie die Baubedingungen wiedergeben.“* Ggf. sind bei vor Ort aushärtenden Produkten, wie z.B. Schlauchlinern und Injektionskörpern, das zu erwartende Maß und die Streuung der Qualitätseigenschaften durch gesonderte Voruntersuchungen zu bestimmen (vgl. [IKT09]). Besonders zu beachten sind dabei die *„Abmessungen und Toleranzen“*; so können für mechanische Prüfungen von Sanierungskörpern i.d.R. keine vollständigen Kreisringe zur statischen Überprüfung (vgl. Abschnitt 4.1.3) entnommen werden und geometrische Abweichungen, wie z.B. Falten oder Wanddickenschwankungen, sind bei der Dokumentation der Probenentnahme und Prüfergebnisse zu berücksichtigen.

Im Zuge vergleichender Produkt- und Verfahrenstests ist zu beachten, dass die eingesetzten Baustoffe und Verfahren marktüblich und keine Prototypen sind.

---

<sup>100</sup> s. Anhang D zu EN 1990:2002 [EN1990], Nr. D.4 „Versuchsplanung“

Auch kann sich bei aufwändigen Verfahrenseinsätzen die Anzahl der Prüfkörper drastisch reduzieren und das Probenentnahmeverfahren bei Verbundsystemen (z.B. Hausanschlussliner, vgl. [IKTW05a]) an seine Grenzen kommen. Zwängungen bzw. Belastungsänderungen und deren Einfluss auf die Prüfergebnisse sind ggf. zu dokumentieren bzw. zu begründen; so führt z.B. die Freilegung eines unterirdisch hergestellten Probekörpers bei optischer Dichtheitsprüfung am offenen Graben zu Belastungsänderungen, die nur bei angemessenen Analogieschlüssen zur Praxis, z.B. Öffnung durch angrenzende Baumaßnahmen, vertretbar scheinen.

Zur Ermittlung von Bemessungswerten ist es nach [EN1990] üblich, die Proben so zu entnehmen, dass sie „*statistisch repräsentative Proben*“ darstellen. Im Rahmen der Qualitätssicherung und Abnahme ist entsprechend anzustreben, sowohl Aussagen zur mittleren Bauwerksqualität, welche wiederum abhängig ist von der Rohwerkstoff- und Ausführungsqualität, als auch zu deren Streuung bzw. zu dem geforderten Sicherheitsmaß zu erzielen (vgl. [Fuc84] und Abschnitt 4.5).

#### 4. **Festlegung der Belastungen:**

Die Festlegung der Belastungs- und Umgebungsbedingungen orientiert sich an den Zielen des Auftraggebers und den zu erwartenden Nutzen und Kosten (vgl. Abschnitt 6.1). Dies betrifft sowohl die Form der Lasteinleitungen, z.B. als zyklische Verkehrslasten oder axiale Vortriebslasten, die relevante Belastungsgröße, die werkstoffabhängigen Prüfzeiträume, die akzeptierbaren Zwängungen der Versuchseinrichtung, die Temperaturverläufe und die atmosphärischen Bedingungen wie Feuchtigkeit und aggressive Medien.

*„Belastungsfolge ist so festzulegen, dass sie den vorgesehenen Einsatzbedingungen des Bauteils entspricht, sowohl unter normalen als auch erschwerten Bedingungen.“<sup>101</sup>*

*“Wenn das Bauteilverhalten von der Veränderung einer oder mehrer Einwirkungen abhängt, die im Versuch nicht variiert werden, so sollten diese mit ihren repräsentativen Werten angesetzt werden.“* Bei der Prüfung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen betrifft dies insbesondere die Wahl der Bodeneigenschaften (vgl. Abschnitt 5.3).

#### 5. **Versuchseinrichtungen und –durchführung:**

*„Für eine ausreichende Qualität der Versuchsergebnisse sind geeignete Versuchseinrichtungen und Messverfahren notwendig“* (vgl. Abschnitt 5).

*„Besonders auf ausreichende Festigkeit und Steifigkeit der Lasteinleitungs- und Lagerkonstruktion sowie auf freie Verformungswege ist zu achten.“* Für die

---

<sup>101</sup> vgl. die Ausführungen zu Standard- und Extremschäden in Abschnitt 5.3.4

Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen werden diese Anforderungen z.B. durch die Versuchsanlagen am IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur<sup>102</sup> erfüllt.

6. **Messplan:**

*„Vor der Versuchsdurchführung sind alle Eigenschaften, die an den verschiedenen Prüfkörpern gemessen werden sollen, aufzulisten.“* Die Messstellen und die Messverfahren sind anzugeben. Die Auswahl der Messstellen orientiert sich – ggf. auch iterativ - am Informationsbedarf des Auftraggebers und der für eine hierauf ausgerichtete und aussagekräftige Auswertung notwendigen Datenbasis.

7. **Auswertung und Berichte:**

Besondere Anforderungen werden z.B. in [ISO17025] gestellt. Demnach müssen *„die Ergebnisse der einzelnen, vom Laboratorium durchgeführten Prüfungen oder Kalibrierungen oder Prüf- oder Kalibrierreihen [...] genau, klar, eindeutig und objektiv sowie in Übereinstimmung mit den in den Prüf- oder Kalibrierverfahren enthaltenen speziellen Anweisungen berichtet werden. Die Ergebnisse müssen üblicherweise in einem Prüfbericht oder einem Kalibrierschein [...] dargestellt werden und müssen alle Informationen enthalten, die der Kunde verlangt hat und die für die Interpretation der Prüf- oder Kalibrierergebnisse erforderlich sind, sowie alle Informationen, die nach dem verwendeten Verfahren erforderlich sind“*, wie Abweichungen von, Zusätze zu oder Ausnahmen von dem Prüfverfahren und Angaben über spezielle Prüf- und Umgebungsbedingungen. Weitere detaillierte Angaben zu den Inhalten von Prüfberichten enthält [ISO17025]. Insbesondere wird dort explizit gefordert, dass bei der Darstellung von Meinungen und Interpretationen *„das Laboratorium die Grundlagen, auf denen die Meinungen und Interpretationen beruhen, schriftlich niedergelegt [...] und eindeutig als solche gekennzeichnet“* haben muss. Gleiches gilt für die Ergebnisse von Unterauftragnehmern.

#### 6.4 Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit

Die Bewertung der Zuverlässigkeit von Prüfverfahren stellt in der wissenschaftlichen Praxis vor allem dann eine besondere Herausforderungen dar, wenn es sich um einzigartige Prüfungen handelt, die nur durch einzelne Institutionen isoliert durchgeführt werden (vgl. [Eur98]<sup>103</sup>). Dies ist gerade im vorliegenden Anwendungsfall zu erwarten, da der Aufwand für die Entwicklung und Umsetzung

---

<sup>102</sup> IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen; s. [www.ikt.de](http://www.ikt.de): Technik/Versuchshalle.

<sup>103</sup> vgl. [Eur98], 6.3 „working in isolation“

der Versuchsmodelle in Abschnitt 5 sehr hoch ist und Prüfinstitute entsprechend auf einzelne Prüftechniken spezialisiert sind. Das Vertrauen in die Prüfergebnisse hängt dementsprechend in hohem Maße von der Zuverlässigkeit und Nachvollziehbarkeit der Prüfbedingungen, der Prüfverfahren und der Ergebnisermittlung ab. Unsicherheiten müssen ggf. erkannt und dokumentiert werden, sowohl bei der Entwicklung neuer Prüfverfahren für besondere Problemstellungen (vgl. [IKTW02], [IKT05e]) als auch bei der Erweiterung etablierter Prüfverfahren für neue Anwendungsfelder (vgl. [IKT04c]).

Vor diesem Hintergrund ist grundsätzlich zu hinterfragen, wie mit Forderungen nach Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit umzugehen ist, die insbesondere in den Naturwissenschaften scheinbar selbstverständlich angesprochen werden<sup>104</sup>. Um einfache Wiederholung kann es sich dabei nur selten handeln, denn die verwendeten Prüfkörper unterliegen im Versuch oft irreversiblen Prozessen, so dass man den Versuch nicht mit denselben Prüfkörpern nochmals durchführen kann. Reproduzierbarkeit als Forderung an den Versuch bzw. das Experiment in den Naturwissenschaften lautet nach TETENS [Tet95] generell: *„Alle Experimente müssen jederzeit und überall von jedem sachkundigen Experimentator wiederholt werden können, so dass bei gleichen Anfangsbedingungen und Randbedingungen das Experiment stets gleich verläuft.“* Die Unabhängigkeit von Zeit, Ort und Personen gilt als unabdingbar, das Realisieren gleicher Ergebnisse an derselben konkreten Versuchsanordnung lässt sich davon unterscheiden [Per06]. In Anlehnung an [Eur98] können dann auch die Begriffe der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit voneinander abgegrenzt werden<sup>105</sup>:

- Die *Wiederholbarkeit* gibt an, welche Streuungen zu erwarten sind, wenn die selbe Prüfmethode durch den selben Prüfer innerhalb einer kurzen Zeitspanne wiederholt wird.
- Die *Reproduzierbarkeit* gibt an, welche Streuungen zu erwarten sind, wenn die selbe Prüfmethode durch unterschiedliche Prüfer, in beliebigen Zeitabständen, an unterschiedlichen Orten durchgeführt wird.

Zwischenzustände sind denkbar<sup>106</sup>. Versuchsdurchführungen und Versuchsergebnisse, wie sie z.B. im Abschnitt 5 dargestellt sind, werden in den meisten Fällen nur an einem bestimmten Ort erzielt<sup>103</sup>. Dennoch wird um allgemeine Anerkennung zu gewinnen, generell deren Nachvollziehbarkeit und Nachvollzug durch anderes Prüfpersonal an einem anderen Ort an einer anderen

---

<sup>104</sup> vgl. [Per06], S. 39

<sup>105</sup> vgl. [Eur98], 6.37; in Anlehnung an eine sinngemäße Übersetzung der englischsprachigen Definitionen von „repeatability“ und „reproducibility“.

<sup>106</sup> vgl. [Eur98], S. 25 „intermediate precision“



Versuchseinrichtung gefordert. Allerdings fehlen für den Nachvollzug aufwändiger Versuche häufig die Mittel, so dass andere Kriterien für Glaubwürdigkeit und Verlässlichkeit herangezogen werden müssen. Nach STEINLE [Ste00] gewinnt in diesem Zusammenhang die Kommunikation von Versuchsergebnissen eine besondere Bedeutung. Demnach trug in früheren Jahrhunderten das Nennen hochrangiger Zeugen dazu bei, Ergebnisse glaubwürdig zu machen; heute ist es die Renommiertheit von Forschungsinstitutionen und arrivierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die eine gewichtige Rolle spielt.<sup>107</sup> Im Übrigen ist es auch denkbar<sup>108</sup>, dass die völlige Bestimmbarkeit des wissenschaftlichen Vorgehens durch quasi lückenlose Anweisungen zu einem unproduktiven Regress<sup>109</sup> führen würde (vgl. [Per06]).

Die Überprüfung von Versuchen durch ihre Reproduktion kann allerdings keine Aussage darüber treffen, ob deren Ergebnisse nun richtig oder falsch sind. Diese Prüfung kann nur über eine anders gelagerte Herangehensweise an ein Problem erfolgen (vgl. [Fel95]). In der chemischen Analytik (vgl. [Eur98]) wird diese Beschränkung der Reproduzierbarkeit auch darauf zurückgeführt, dass Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit zwar eine Aussage über die Nähe bzw. Streuung unterschiedlicher Prüfergebnisse zulassen, nicht aber systematische Fehler erkennen lassen<sup>110</sup>.

Im Wesentlichen zielt nach [Per06] der wissenschaftliche Anspruch der Reproduzierbarkeit darauf ab, Handlungsanweisungen aufzustellen, deren Befolgung die Vermeidung von Störungen in der Prüfpraxis erlaubt. Ein erfahrener Experimentator vermag Störungen zu identifizieren bzw. Störungen zu vermeiden. Handlungsanweisungen sollen Störungen zudem weitgehend verhindern. Allerdings bleibt auch hier offen, was tatsächlich als Störung definiert wird. In diesem Sinne steht die Forderung nach Reproduktion in gewissem Sinne im Gegensatz zur Absicht, Forschung als offene Bewegung zu verstehen. Denn *„so verhält es sich mit allen wirklich wertvollen Versuchen: sie sind immer unklar, unfertig, einmalig. Und wenn sie klar, präzise und beliebig reproduzierbar werden – sind sie für eigentliche Forschungszwecke nicht mehr nötig, sie dienen dann nur zu Demonstrationszwecken oder Einzelfeststellungen“*<sup>111</sup>.

---

<sup>107</sup> vgl. [Per06], S. 40. Pernkopf bezieht sich darin auf [Ste00].

<sup>108</sup> vgl. [Ste00], S. 220-222.

<sup>109</sup> vgl. Duden, Band 5 (Das Fremdwörterbuch), 5. Aufl., 1990: Regress, 2: „das Zurückschreiten des Denkens vom Besonderen zum Allgemeinen, vom Bedingten zur Bedingung, von der Wirkung zur Ursache (Logik).“

<sup>110</sup> vgl. hierzu in [Eur98] auch die Abgrenzung der Begriffe accuracy bzw. measurement uncertainty („closeness of a result to a true value“), trueness („normally expressed in terms of bias“), precision („how close results are to one another“) sowie die Unterteilung des Kriteriums precision in reproducibility (Reproduzierbarkeit) und repeatability (Wiederholbarkeit).

<sup>111</sup> s. [Fle35], S. 112-113

Vor diesem Hintergrund werden Anforderungen an die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit in technischen Normen und Regelwerken insbesondere mit dem Ziel der zuverlässigen Einzelfeststellung von Prüfkörper- bzw. Probeeigenschaften formuliert. Allgemein fordert z.B. [ISO17025] im Rahmen der Validierung von Prüfverfahren<sup>112</sup>, dass der Bereich und die Genauigkeit der mit validierten Verfahren erreichbaren Werte mit Blick auf die Ergebnisunsicherheit und Robustheit gegen äußere Einflüsse beurteilt wird sowie den Erfordernissen des Kunden entsprechen soll. Allerdings wird auch unmittelbar drauf hingewiesen<sup>113</sup>, dass bei der Validierung immer die Kosten, Risiken und technischen Möglichkeiten abzuwägen sind, da in vielen Fällen der Bereich und die Unsicherheit der Werte (u.a. für Genauigkeit, Wiederholpräzision, Reproduzierbarkeit und Robustheit) mangels Information nur in vereinfachter Weise angegeben werden können<sup>114</sup>.

In [Eur98] wird die Anwendung von Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von Prüfungen ausdrücklich auf quantitative Untersuchungen beschränkt. Als qualitative Untersuchung werden demgegenüber Messungen mit binärem Ergebnis, d.h. bestanden/nicht bestanden bzw. ja/nein, dicht/undicht, bei Über- oder Unterschreiten eines Schwellenwertes aufgefasst. Deutlich wird darauf hingewiesen (vgl. Abschnitt 4.5.4):

*„For qualitative methods precision cannot be expressed as a standard deviation or relative standard deviation, but may be expressed as true and false positive (and negative) rates.”*

Insbesondere mit Blick auf die Dichtheitsprüfung, die für die Bewertung von Produkten und Verfahren zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen in vielen Fällen maßgeblich ist, bestätigt sich auch hier, dass ihre Zuverlässigkeit und Aussagekraft weniger mit statistischen Verteilungen als mit den wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtungen nach Abschnitt 4.5.3, 4.5.4 und 4.5.5 verbunden sind.

## **6.5 Repräsentativität**

Der Begriff der Repräsentativität wird meist mit statistischen Methoden und Stichprobenwerten in Verbindung gebracht (vgl. [Müh88]). Repräsentativ sind statistische Erhebungen dann, wenn sie zuverlässige Aussagen über die Verteilung einer Grundgesamtheit zulassen. In der Regel wird dies durch Zufallsstichproben, Quotenstichproben oder geschichtete Zufallsstichproben erreicht. Auch bei der landesweiten Hochrechnung von Erhebungsdaten für Kanal- und Leitungsnetze

---

<sup>112</sup> vgl. [ISO17025], 5.4.5.3

<sup>113</sup> vgl. [ISO17025], 5.4.5.3, ANMERKUNG 3

<sup>114</sup> vgl. 2. Absatz dieses Abschnitts

wurde bereits in dieser Weise vorgegangen [IKT08d]. Zuverlässige Rückschlüsse auf die unbekannte Verteilung von Zufallsgrößen sind allerdings nur möglich, wenn die Stichprobenwerte tatsächlich zufällig und unabhängig voneinander gewonnen wurden. Unter sonst gleichen Bedingungen wirkt sich ein größerer Stichprobenumfang grundsätzlich positiv auf die sog. "Repräsentativität" aus.

Bei der Prüfung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen ergibt sich allerdings die Problematik, dass die Anwendung statistischer Methoden aufgrund der Einzigartigkeit der Bauwerke und des Aufwandes zur Erstellung von Probekörpern als Lösungsweg im Regelfall ausscheidet. Um dennoch Zusammenhänge zur Qualität von Produkten und Verfahren zu erkennen, wird für den vorliegenden Anwendungsfall im eigentlich Wortsinne als repräsentativ<sup>115</sup> angesehen, was als einzelnes Probestück so typisch für das Produkt- oder Verfahren ist, dass es die spezifische Eigenart der gesamten Produkt- oder Verfahrensqualität wiedergibt. Damit gewinnt insbesondere die Kontrolle von Störfaktoren während der Herstellung und Prüfung der Probestücke an Bedeutung, zu der spezielle Techniken eingesetzt werden<sup>116</sup>, unter denen im vorliegenden Anwendungsfall insbesondere die *Elimination*, d.h. die Ausschaltung möglicher Störvariablen, weiterverfolgt wird. Ihr Ziel ist es, dass bei Erstellung und Einsatz der zu prüfenden Produkte und Verfahren neben der unabhängigen Variablen, möglichst keine weiteren Faktoren einwirken. Um für den Anwendungsfall des Baus und der Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen sicherzustellen, dass das eingebaute Produkt nicht durch äußere Ereignisse beeinflusst wird, können die Versuche zum Beispiel an gesonderten Teststrecken in einer Versuchshalle durchgeführt werden.

Darüber hinaus bedingt Repräsentativität in vergleichenden Produkt- und Verfahrenstests auch Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Versuche und Prüfungen (vgl. Abschnitt 6.4). Um sicherzustellen, dass beobachtete Effekte allein auf die Variation der Produkt- und Verfahrenseigenschaften zurückgehen, sind daher alle anderen Faktoren weitgehend konstant zu halten bzw. in gleicher Weise anzuwenden. Dies betrifft mit Blick auf den Versuchsaufbau z.B. die Bau- bzw. Sanierungsaufgabe, Temperatur- und Klimabedingungen, bau- und betriebsähnliche Belastungen bzw. Beanspruchungen sowie den Einfluss des Personals auf die Einbauqualität<sup>117</sup>.

---

<sup>115</sup> vgl. Duden, Band 5 (Das Fremdwörterbuch), 5. Aufl., 1990: repräsentativ, 2a: „als einzelner, einzelnes so typisch für etwas, eine Gruppe o.ä., dass es das Wesen, die spezifische Eigenart der gesamten Erscheinung, Richtung o.ä. ausdrückt“.

<sup>116</sup> vgl. Seite „Störfaktor“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 1. Februar 2009, 20:02 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=St%C3%B6rfaktor&oldid=56130375> (Abgerufen: 9. Februar 2009, 19:27 UTC)

<sup>117</sup> Zur Auswahl des Personals bietet sich z.B. der Rückgriff auf die Empfehlungen des Produktherstellers bzw. Verfahrensanbieters im Sinne einer bewährten Praxis, eines Standardverfahrens oder Erfolgsrezepts an

Vor diesem Hintergrund wird für die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren empfohlen, die Repräsentativität von Prüfungen und Prüfergebnissen insbesondere unter den drei Aspekten *Charakteristik*, *Best Practice* und *Nutzungsdauerorientierung* sicherzustellen:

### **Charakteristik** der Produkt- und Verfahrenseigenschaften

Unter diesem Aspekt sollten die einbezogenen Prüfkörper eine typische Charakteristik des Produktes oder Verfahrens repräsentieren. In Anlehnung an die in Abschnitt 4.5.2 dargestellte Zuverlässigkeitsanalyse nach FUCHS stellt sich dann die Frage, welches die maßgeblichen Produkt- und Verfahrenseigenschaften sind und welche Werte diese annehmen können. Ggf. ist der Wertebereich über geeignete Verteilungsfunktionen und deren Parameter zu beschreiben. Die Auswahl der zu bewertenden Probekörper richtet sich dann z.B. nach den Ergebnissen von Voruntersuchungen. Ein Beispiel ist das „Abscannen“ eines Liners mit zerstörungsfreien Messverfahren zur Auswahl geeigneter Probenentnahmestellen [IKT09]. Ist eine mathematische Beschreibung nicht möglich, sollte ggf. auf heuristische Lösungsansätze und/oder kollektive Entscheidungsprozesse zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 7.3).

### **Best Practice** der Produktions- und Einbaubedingungen

Unter diesem Aspekt sollten die Hersteller aufgefordert werden, ihre Produkte oder Verfahren im Sinne einer bewährten Praxis bzw. eines Standardverfahrens durch Firmen ihrer Wahl ohne zeitliche Beschränkung einbauen zu lassen. Durch die *Auswahl von Personal und Verfahrensabläufen durch die Hersteller* darf davon ausgegangen werden, dass die erzielten Produkt- bzw. Verfahrensqualitäten als Bestmarken der *in der Praxis erzielbaren Qualitäten* gewertet und untereinander verglichen werden können. Qualitätseinbußen aufgrund von Fehlern im Produkt- bzw. Verfahrenseinsatz können zwar immer noch auftreten, dürfen dann aber allein auf den Hersteller und sein Produkt bzw. Verfahren, im Sinne z.B. mangelhafter Qualitätssicherung und Schulung<sup>118</sup>, zurückgeführt werden. Nur wenn der Hersteller nicht zu einer Auswahl bzw. Empfehlung eines Dienstleisters bereit ist, sollte eine durch den Hersteller zugelassene Firma frei nach Angebot ausgewählt werden.

### **Nutzungsdauerorientierung** der Randbedingungen und Belastungen

Unter diesem Aspekt werden die über die Nutzungsdauer relevanten Randbedingungen und Belastungen für die zu prüfenden Produkte und Verfahren einheitlich nachgebildet. Dies beginnt mit der Einbausituation, wie z.B. Standard- und

---

(vgl. Seite „Best Practice“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 4. Februar 2009, 19:53 UTC. URL: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Best\\_Practice&oldid=56253615](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Best_Practice&oldid=56253615) (Abgerufen: 9. Februar 2009, 19:28 UTC))

<sup>118</sup> Qualitätssicherung und Schulung des Personals bzw. Schulungsangebote für die ausführenden Dienstleister werden in IKT-Warentests z.B. explizit als Bestandteil der Produkt- bzw. Verfahrensqualität gewertet, vgl. Abschnitt 8.2.

---

Extremschäden für Sanierungsverfahren, und bezieht auch die Betriebsphase ein, z.B. über Reinigungseinsätze und Sonderbelastungen wie Scherlast oder Außenwasser- und Wurzeldruck.

## 7 Bewertung und Entscheidung

### 7.1 Entscheidungsträger und Bewertungsaufgabe

In Abschnitt 6 wurde beschrieben, in welcher Weise die Prüfaufgabe durch qualifiziertes Personal sachgerecht umzusetzen und zu dokumentieren sowie die Prüfinhalte mit dem Auftraggeber hinsichtlich seiner Kosten- und Effizienzziele abzustimmen sind. Die eigentliche Bewertung der Prüfergebnisse obliegt jedoch den Entscheidungsträgern, die für den Einsatz und die Nutzung des Produktes oder Verfahrens in den Kanal- und Leitungsnetzen verantwortlich sind. Diese wägen individuell oder auch in Gemeinschaft mit Dritten ab, inwieweit die für sie maßgeblichen Qualitätsanforderungen durch die Produkt- und Verfahrenseigenschaften erfüllt werden und welche Produkte oder Verfahren im jeweiligen Netz eingesetzt werden können.

Dabei ist die Rolle des Entscheidungsträgers und damit die Frage nach der Verantwortung für die unterirdischen Kanal- und Leitungsnetze im öffentlichen Bereich eng mit der gesellschaftlichen Diskussion um Daseinsvorsorge und Privatisierung bzw. Liberalisierung verbunden (vgl. [Mos08a], [BDW08]). Die verantwortlichen Netzbetreiber stehen unter hohem Erwartungsdruck, wenn sie den ihnen gestellten Aufgaben in wirtschaftlich sinnvoller und nachvollziehbarer Weise gerecht werden wollen. Dies gilt insbesondere, wenn neben der unternehmensbezogenen Forderung nach effizienten Bau- und Betriebsleistungen die gesellschaftliche Anforderung nach Daseinsvorsorge rechtlich definiert ist, so z.B. für die Abwasserentsorgung mit Übertragung der Abwasserbeseitigungspflicht auf die Kommune oder deren Erfüllungsgehilfen<sup>119</sup>.

Vielfach werden Entscheidungsvorlagen durch Dritte erarbeitet, so z.B. durch Ingenieurbüros<sup>120</sup> im Rahmen der Erarbeitung von Generalentwässerungsplänen bzw. Abwasserbeseitigungskonzepten oder der Ausschreibung von Bauleistungen. Beschränkt sich die Prüfung der Planungsergebnisse und Ausschreibungsunterlagen durch den Netzbetreiber auf reine Plausibilitätskontrollen, üben die Ingenieurbüros de facto die Funktion eines Entscheidungsträgers aus. Im Falle von Instandhaltungsarbeiten, zu denen auch Reparatur-, Renovierungs- und Erneuerungsarbeiten gehören (vgl. Abschnitt 4.3.1), ist sogar eine weitergehende Delegation der Entscheidungsverantwortung an die ausführenden Firmen, z.B. im Rahmen von Jahresverträgen, zu beobachten (vgl. [IKT02b]). Mit der Delegation der Entscheidungsverantwortung können allerdings Konflikte verbunden sein, wenn

---

<sup>119</sup> vgl. §18a WHG *Abwasserbeseitigung* [WHG07]

<sup>120</sup> Dabei kann es sich auch um Organisationseinheiten oder Gesellschaften des Netzbetreibers handeln, die im Sinne eines internen Ingenieurbüros auftreten.

persönliche Präferenzen des Auftragnehmers die Entscheidungskriterien des Auftraggebers überlagern und zu Verzerrungen führen<sup>121</sup>.

Um bei der Entscheidungsfindung die Nachvollziehbarkeit für Dritte zu verbessern, orientieren sich vergaberechtliche Argumentationen mitunter allein an einer Prüfung von Mindestqualitätsstandards und einer anschließenden Bewertung der Produkte aufgrund des Angebotspreises. Allerdings findet dieses Vorgehen bei kaum standardisierbaren Leistungen, wie z.B. Sanierungsarbeiten an unterirdischen Leitungen, seine Grenzen. Hier verstärkt sich der Bedarf nach einer transparenten Bewertung unter Einbeziehung aller qualitativen Leistungsziele (vgl. Abschnitt 3). Dies gilt sowohl für die Ausschreibung, Vergabe und Abnahme einzelner Produkte und Verfahrensleistungen (vgl. [IKT09], [IKT08a]) als auch die vergleichende Produkt- und Verfahrensbewertung (vgl. [IKTW04], [IKTW06]). Gerade vergleichende Tests erfordern hier besondere Sorgfalt, da sie zu Veränderungen der Umgebungs- und Marktbedingungen sowie des Anbieter- und Kundenverhaltens führen können, insbesondere bei Veröffentlichung der Testergebnisse (vgl. [Raf84], [Sil84] und [IKTW02], [IKTW04], [IKTW05], [IKTW05a]). Darüber hinaus wurde in Einzelfällen auch ein direkter Einfluss auf technische und rechtliche Normen beobachtet (vgl. [IKT08b], [NRW07], [IKTW05]).

Vor diesem Hintergrund ist für den vorliegenden Anwendungsfall zu hinterfragen,

- welche *Bewertungsdimensionen* überhaupt denkbar sind und welche grundsätzlichen Entscheidungsprozesse damit verbundenen sind und
- wie kollektive *Bewertungs- und Entscheidungsprozesse* für den Fall einer gemeinsamen Bewertung durch Gruppen von Entscheidungsträgern in geeigneter Weise zu verstehen sind.

## 7.2 Bewertungsdimensionen

Die Nachvollziehbarkeit einer individuellen oder kollektiven Bewertung von Produkten und Verfahren setzt voraus, dass die relevanten Bewertungsdimensionen bekannt und durch die Entscheidungsträger geeignete Bewertungsziele ausgewählt werden. Dabei ist insbesondere zu hinterfragen, welche Bewertungsdimensionen überhaupt denkbar sind<sup>122</sup> und welche dieser Bewertungsdimensionen im betrachteten

---

<sup>121</sup> vgl. Prinzipal-Agent-Theorie in den Wirtschaftswissenschaften

<sup>122</sup> vgl. hierzu [Wer05], S. 16: „Ob es eher sinnvoll ist, normativ-ethische Grundlagendiskurse aus den übrigen Wissenschaften auszugrenzen und ganz getrennt zu behandeln, oder ob es sinnvoller ist, ethische Grundlagendiskurse als integralen Bestandteil der eigenen Disziplin zu pflegen, kann nur jeweils von Fall zu Fall beantwortet werden. Problematisch wird es jedenfalls, wenn die normativ-ethische Bedeutung der eigenen Voraussetzungen nicht mehr erkannt wird, wenn also den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern nicht mehr klar ist, worin der Beitrag der eigenen Forschung zur Beantwortung der Frage liegt, was wir überhaupt tun sollen. Noch problematischer wird es, wenn Fachwissenschaftler/innen in Publikationen oder öffentlichen Statements zu praktischen Fragen mit moralischer Bedeutung Stellung beziehen, ohne die moralische Bedeutung dieser Fragen (wie auch ihrer jeweiligen Antworten) zu

Anwendungsfall ganz oder teilweise in der Entscheidungskompetenz der Netzbetreiber liegen. Als Bewertungsdimensionen werden im Folgenden *allgemeine Grundsätze*, *intuitive Urteile* und *pragmatische Bewertungen* unterschieden.

### 7.2.1 Allgemeine Grundsätze

Mit allgemeinen Grundsätzen werden im vorliegenden Anwendungsfall grundsätzliche, gesellschaftliche Bewertungsdimensionen angesprochen, die z.B. mit moralischen und ethischen Fragen in Verbindung gebracht werden können. Im engeren Sinne betrifft dies auch gesellschaftliche Grundsätze, die z.B. als demokratisch legitimierter, gesellschaftlicher Konsens durch Recht und Gesetz abgebildet werden. Dabei werden insbesondere nicht austauschbare Werte, die einer Marktregulierung verschlossen bleiben, im Sinne „innerer Werte“ vereinbart<sup>123</sup>. Typische Beispiele finden sich in kulturellen Regeln oder auch den Grundrechten des Grundgesetzes [GG02]<sup>124</sup>.

Im vorliegenden Fall der Prüfung und Bewertung spiegeln sich allgemeine Bewertungsgrundsätze z.B. durch die Vorgaben des Baurechts wider. Nach §4 Bauproduktengesetz (BauPG) [BPG98] darf ein Bauprodukt grundsätzlich nur in den Verkehr gebracht und frei gehandelt werden, wenn es brauchbar nach §5 BauPG und auf Grund nachgewiesener Konformität nach § 8 BauPG mit der CE-Kennzeichnung nach § 12 Abs. 1 gekennzeichnet ist. Im Einzelnen wird in §5, Abs. 1 BauPG definiert:<sup>125</sup>

*„Ein Bauprodukt ist brauchbar, wenn es solche Merkmale aufweist, daß die bauliche Anlage, für die es verwendet werden soll, bei ordnungsgemäßer Instandhaltung dem Zweck entsprechend während einer angemessenen Zeitdauer und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit gebrauchstauglich ist und die wesentlichen Anforderungen der mechanischen Festigkeit und Standsicherheit, des Brandschutzes, der Hygiene, Gesundheit und des Umweltschutzes, der Nutzungssicherheit, des Schallschutzes sowie der Energieeinsparung und des Wärmeschutzes erfüllt.“*

---

*bemerken, etwas im Glauben, es handle sich um ‚rein ökonomische‘ oder ‚rein technische‘ Probleme.“*

Der Verfasser ist sich bewusst, dass in diesem Sinne die Frage nach denkbaren Dimensionen einer „Bewertung“ bzw. „Beurteilung“ zur grundsätzlicheren Frage nach „Werten“ und „Urteilen“ führt, die allerdings nicht mehr Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein kann. Die folgenden Ausführungen orientieren sich dementsprechend an den Grundlagen von KANT [Kan86] und MILL [Mil71] sowie psychologischen Betrachtungen von GIGERENZER in [Gig07] und überlassen weitere Analysen diesen Fachdisziplinen. Zur Einführung s. [Wer05] und [Gig99].

<sup>123</sup> vgl. [Kan86], S. 435

<sup>124</sup> s. insbesondere: GG Artikel 1, Abs. 1, Satz 1 „Die Würde des Menschen ist unantastbar“; GG Artikel 2, Abs. 2, Satz 1 „Jeder hat das Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit.“; GG Artikel 14, Abs. 2 „Eigentum verpflichtet. Sein Gebrauch soll zugleich dem Wohle der Allgemeinheit dienen.“

<sup>125</sup> Unterstreichungen sind nicht Teil des Zitats, sondern dienen der Hervorhebung im Sinne des Gesamtzusammenhangs.



Insbesondere Anforderungen aus dem Gesundheits-, Arbeits- und Umweltschutz beziehen sich auch auf nicht austauschbare Werte, die einer Marktregulierung verschlossen bleiben. Mit Blick auf die Dichtheit von Leitungen finden sich sogar direkte Anknüpfungen an das Strafrecht, wie z.B. mit § 324 StGB<sup>126</sup> „Gewässerverunreinigung“ bzw. § 324a StGB „Bodenverunreinigung“. Weitere Anforderungen für den Einsatz von Produkten und Verfahren in öffentlichen Netzen ergeben sich im Sinne der Daseinsvorsorge auch durch den allgemein vertretenen Anspruch, dass öffentliche Netze nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu bauen und zu betreiben sind<sup>127</sup>.

In der Folge führen insbesondere die durch das DIBt gestellten Mindestqualitätsanforderungen an Bauprodukte regelmäßig zu streng formalen Argumentationen, die sich am gültigen Normen- und Regelwerk orientieren. So entwickeln STEIN und BRAUER in [Ste04] durch die Zusammenstellung geeigneter Normen- und Regelwerke sogenannte<sup>128</sup> „allgemeine Prüfrichtlinien für die wichtigsten Verfahren zur Reparatur, Renovierung und Erneuerung von nichtbegehbaren Abwasserleitungen und –kanälen [...], auf deren Grundlage die Erteilung entsprechender bauaufsichtlicher Zulassungen durch das DIBt nach einheitlichen Prüf- und Beurteilungskriterien erfolgen können.“

Kulturelle Regeln spiegeln sich insbesondere in den Anforderungen an Objektivität bzw. Unparteilichkeit des Prüfungs- und Bewertungsprozesses sowie einem „fairen“ Umgang mit den Interessen der Produkt- und Verfahrensanbieter, z.B. in vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests (vgl. Abschnitt 8.2), wider.

### 7.2.2 Intuitive Urteile

Unter Intuition versteht man das unmittelbare, nicht diskursive, nicht auf Reflexion beruhende Erkennen, Erfassen eines Sachverhalts oder eines komplizierten Vorgangs<sup>129</sup>. GIGERENZER spricht in diesem Zusammenhang in [Gig07] auch über „unbewusste Intelligenz“ und verwendet die Begriffe Intuition, Ahnung oder Bauchgefühl austauschbar, um ein Urteil zu bezeichnen<sup>130</sup>,

- das rasch im Bewusstsein auftaucht,
- dessen tiefere Gründe uns nicht ganz bewusst sind und

---

<sup>126</sup> StGB - Strafgesetzbuch, s. [StGB08]

<sup>127</sup> vgl. [WHG07], WHG §18b (1) „Abwasseranlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass die Anforderungen an das Einleiten von Abwasser insbesondere nach § 7a eingehalten werden. Im Übrigen gelten für Errichtung und Betrieb von Abwasseranlagen die allgemein anerkannten Regeln der Technik.“

<sup>128</sup> vgl. [Ste04], S. 7

<sup>129</sup> vgl. Duden, Band 5 (Das Fremdwörterbuch), 5. Aufl., 1990

<sup>130</sup> vgl. [Gig07], S. 25-26

- das stark genug ist, um danach zu handeln.

Entsprechend definiert er das Grundprinzip der Intuition als „*einfache Faustregeln, die sich evolvierte Fähigkeiten des Gehirns zunutze machen*“<sup>131</sup>. Demnach stellt uns das evolvierte Gehirn „*Fähigkeiten zur Verfügung, die wir im Lauf von Jahrtausenden entwickelt haben, die aber von der Entscheidungstheorie weitgehend außer Acht gelassen werden.*“<sup>132</sup> Evolvierte Fähigkeiten, wie z.B. kognitive Möglichkeiten und soziale Instinkte, sind die Quelle für Heuristiken. Wir erleben damit Intuition als heuristikbasiertes Urteil über Umweltstrukturen. Die besonderen Vorteile liegen insbesondere in der Möglichkeit, auch unter Unsicherheit und unter Einbeziehung nicht mathematisierbarer Einflüsse plausible Vermutungen anzustellen. Im vorliegenden Anwendungsfall können dies z.B. die „überzeugende“ Konstruktion eines Produktes, Marktmeinungen und Bekanntheitsgrad der Produkte sowie persönliche Erfahrungen mit diesem oder ähnlichen Produkten und Verfahren sein.

Die Betrachtung intuitiver Bewertungsmaßstäbe hat auch zur Entwicklung intuitiver Entscheidungsregeln geführt, die auf eine vollständige Problemanalyse zunächst verzichten. Nach GIGERENZER [Gig99], [Gig07] kann allgemein insbesondere die *Regel des einen guten Grundes*, auch *One-Reason Decision Making* oder *Take-the-Best-Heuristik*, herangezogen werden. Sie besteht aus drei Schritten eines lexikografischen Prozesses<sup>133</sup>:

1. Suchregel: Prüfe die Auswahlkriterien in der Reihenfolge ihrer Bedeutung.
2. Stoppregel: Beende die Suche, sobald sich die Alternativen hinsichtlich eines Auswahlkriteriums unterscheiden.
3. Entscheidungsregel: Wähle diejenige Alternative, die dieses Auswahlkriterium nahe legt.

MARTIGNON und HOFFRAGE haben diese Regeln in [Mar99] einem Entscheidungsbaum entsprechend Abbildung 53 zugeordnet. Gigerenzer fasst in [Gig07] die Erkenntnisse aus [Gig99] und weiteren Studien zum Vergleich der Take-the-Best-Heuristik mit den klassischen Verfahren der Entscheidungstheorie (vgl. Abschnitt 7.2.3) wie folgt zusammen: „*Intuitionen, die sich nur auf einen einzigen guten Grund stützen, sind in der Regel zutreffend, wenn es darum geht, die Zukunft vorherzusagen (oder einen unbekanntem gegenwärtigen Zustand), diese Zukunft aber schwer vorhersehbar und die relevante Information beschränkt ist. Solche*

---

<sup>131</sup> s. [Gig07], S. 26; GIGERENZER verwendet den umgangssprachlichen Ausdruck *Faustregel* synonym mit dem wissenschaftliche Terminus *Heuristik*

<sup>132</sup> s. [Gig07], S. 65

<sup>133</sup> vgl. [Gig07], S. 158

Intuitionen sind auch ökonomischer in der Verwendung von Zeit und Information. Eine komplexe Analyse<sup>134</sup> dagegen zahlt sich aus, wenn es gilt, die Vergangenheit zu erklären, wenn die Zukunft in hohem Maße vorhersagbar ist oder wenn reichlich Information vorliegt.“

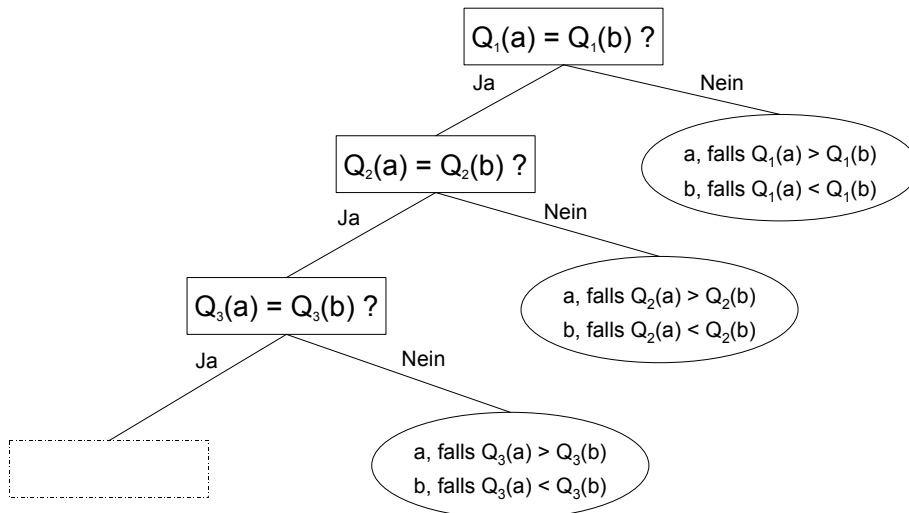


Abbildung 53: Entscheidungsbaum der Take-the-Best-Heuristik; nach [Mar99]  
Vergleich der beiden Alternativen a und b in Abhängigkeit  
der nach Bedeutung geordneten Auswahlkriterien  $Q_i$

### 7.2.3 Pragmatische Bewertung

Die pragmatische Bewertung umfasst im Wortsinne der Pragmatik<sup>135</sup> „die Orientierung auf das Nützliche, Sinn für Tatsachen, Sachbezogenheit“ und kann mit den Ausführungen von BENTHAM in [Ben89]<sup>136</sup> bzw. dem Utilitarismus nach MILL [Mil71] in Verbindung gebracht werden. Auf ihr bauen weitgehend auch die Ansätze für die moderne Entscheidungstheorie (vgl. [Lau05], [Bit81]) auf. Für einen pragmatischen Prozess zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren lassen sich entsprechend in Analogie zu den Darstellungen der modernen Entscheidungstheorie nach LAUX<sup>137</sup> die folgenden fünf Prozessschritte definieren:

<sup>134</sup> gemeint ist hier eine Lösung nach der klassischen Entscheidungstheorie über gewichtete Zielfunktionen (vgl. Abschnitt 7.2.3).

<sup>135</sup> vgl. Duden, Band 5 (Das Fremdwörterbuch), 5. Aufl., 1990

<sup>136</sup> vgl. [Ben89], Kap. 1 „alles das ist dem Nutzen oder dem Interesse einer Gemeinschaft gemäß, was dahin zielt, die Totalsumme des Wohls der Individuen zu vermehren“ und Kap. 8 „von der Schätzung der Lust- und Unlustempfindungen“; BENTHAM wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff „the greatest happiness of the greatest number“ („das größte Glück der größten Zahl“) zugeschrieben; vgl. die durch BENTHAM ergänzte Fassung der englischen Originalausgabe „An Introduction to the Principles of Morals and Legislation“, 1823, <http://oll.libertyfund.org>, und hier Fußnote 9 in Kapitel I.

<sup>137</sup> vgl. [Lau05], S. 8

**1. Prüfungs- und Bewertungsaufgabe formulieren:**

Die Formulierung der Prüfungs- und Bewertungsaufgabe stellt selbst ein Entscheidungsproblem dar. Um zu einer scharfen Aufgabenformulierung zu gelangen, kann es insbesondere sinnvoll sein, weitere Informationen über die Besonderheiten der infrage stehenden Einsatzfälle der Produkte und Verfahren zu beschaffen.

**2. Zutreffende Qualitätsanforderungen definieren:**

Eine pragmatische Entscheidung über die Auswahl eines Produktes oder Verfahrens kann nur getroffen werden, wenn Zielvorstellungen existieren, mit deren Hilfe die Alternativen beurteilt und bewertet werden können. Diese *Qualitätsanforderungen* an das Produkt bzw. das Verfahren dienen dazu, der Erforschung der Produkt- bzw. Verfahrenseigenschaften eine konkrete Richtung zu geben; außerdem liefern sie den Beurteilungsmaßstab für die abschließende Auswahl einer Alternative. Dabei kann die Art und Weise, wie die Qualitätsanforderungen präzisiert werden, u.a. von den jeweils gefundenen Alternativen und ihren (möglichen) Einsatzbereichen abhängen. Im Sinne der Entscheidungstheorie können die Qualitätsanforderungen in ihrer Gesamtheit eine Zielfunktion als formale Entscheidungsregel bilden, die Präferenzen zum Beispiel als Nutzwertbetrachtungen abbildet und ein Optimierungskriterium (z.B. Minimierung bzw. Maximierung von Präferenzwerten) enthält. Die Bewertung von Alternativen kann so auf einen rein analytischen Vorgang reduziert werden.

**3. Leistungsfähigkeit erkunden und bewerten:**

Eine Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produkten und Verfahren setzt voraus, dass überhaupt geeignete Produkte und Verfahren am Markt verfügbar sind und durch diese Produkte und Verfahren grundsätzliche Restriktionen, wie z.B. Rechtsvorschriften (vgl. Abschnitt 7.2.1), bereits erfüllt werden. Diese Betrachtung kann ggf. zu einer Vorauswahl der zu prüfenden und bewertenden Produkte und Verfahren führen. Die eigentliche Bewertung des Produktes bzw. Verfahrens betrachtet dann die Konsequenzen für den eigentlichen praktischen Einsatz. Die Sicherheit dieser Prognose hängt wesentlich vom Informationsstand des Entscheidungsträgers und damit z.B. von der Verfügbarkeit aussagekräftiger Prüfergebnisse und Erfahrungen mit dem Produkteinsatz ab.

**4. Geeignete Produkte bzw. Verfahren auswählen:**

Zur pragmatischen Entscheidung über die Auswahl von Produkten bzw. Verfahren für den praktischen Einsatz kann ggf. auf etablierte Entscheidungsmodelle zurückgegriffen werden, die es erlauben, das Entscheidungs- bzw. Auswahlproblem *„so zu definieren, dass aus dem resultierenden Strukturkomplex die Problemlösung als logische Implikation*

abgeleitet werden kann.“<sup>138</sup> Es wird dabei in Abhängigkeit der Eindeutigkeit der Konsequenzen von Alternativen unterschieden zwischen Modellen<sup>139</sup>

- a. bei „Sicherheit“, d.h. jede Alternative erzeugt bekannte, eindeutige Ergebnisse,
- b. bei „Risiko“, d.h. eine Alternative kann mehrere Ergebnisse bekannter Eintrittswahrscheinlichkeiten erzeugen, und
- c. bei „Unsicherheit im engeren Sinne“, d.h. eine Alternative kann mehrere Ergebnisse unbekannter Eintrittswahrscheinlichkeiten erzeugen.

Individualentscheidungen bei „Sicherheit“ und bei „Risiko“ können mathematisch über statistische Ansätze oder eine Zielgrößenmatrix, ggf. mit Zielgewichtung nach Bedeutung und Eintrittswahrscheinlichkeiten, beschrieben werden<sup>140</sup>. Entscheidungen bei „Unsicherheit im engeren Sinne“ werden in der klassischen Entscheidungstheorie dagegen als „wenig geeignet, praktische Entscheidungsprobleme zu beschreiben“ angesehen, so dass ihnen lediglich „didaktische Bedeutung“ zuerkannt wird<sup>141</sup>. Berechnungsansätze für „Unsicherheit im engeren Sinne“ orientieren sich daher insbesondere an Extremszenarien<sup>142</sup> oder einer voraussetzungslosen Annahme von Eintrittswahrscheinlichkeiten. Bekanntestes Beispiel ist die LAPLACE-Regel, nach der davon ausgegangen wird, dass von n möglichen Zuständen alle n Zustände gleichwahrscheinlich sind, also jeweils die Eintrittswahrscheinlichkeit  $1/n$  haben.<sup>143</sup>

## 5. Bewertungen und Entscheidungen in der Umsetzung treffen:

Auch im Zuge der Umsetzung, d.h. dem Einsatz der ausgewählten Produkte und Verfahren, sind ständig weitere Entscheidungen im Sinne von

<sup>138</sup> [Bre80], S. 8, zitiert in [Lau05], S. 17

<sup>139</sup> vgl. [Lau05], S. 22

<sup>140</sup> vgl. LAUX [Lau05] und BITZ [Bit81] zum  $(\mu, \sigma)$ -Prinzip und BERNOULLI-Prinzip

<sup>141</sup> vgl. LAUX [Lau05], S. 106

<sup>142</sup> vgl. [Bit81], Kap.2 und [Lau05], S. 111 zur Maximin-, Maximax-Regel und dem HURWICZ-Prinzip

<sup>143</sup> Offensichtlich besteht eine enge Beziehung zwischen „Unsicherheit im engeren Sinne“ und „Intuitiven Bewertungen“, vgl. [Lau05], S. 117: „Das theoretische Konstrukt der Unsicherheit i.e.S. hat nur geringe praktische Bedeutung. Reale Entscheidungssituationen lassen sich grundsätzlich besser durch Risikosituationen als durch Unsicherheitssituationen i.e.S. repräsentieren: 1. zum einen verfügt der Entscheider in aller Regel aufgrund seiner allgemeinen Erfahrungen und/oder seiner speziellen Informationen bezüglich der zur Debatte stehenden Alternativen über gewisse Glaubwürdigkeitsvorstellungen hinsichtlich der Zustände, die durch (subjektive) Wahrscheinlichkeiten dargestellt werden können. 2. zum anderen kann selbst in seltenen Fällen, in denen ein Entscheider keinerlei Informationen zur Prognose des Zustandes hat, ein bestimmtes Wahrscheinlichkeitsurteil über die Zustände gerechtfertigt sein: Wenn keinerlei Informationen darüber existieren, welches von mehreren sich gegenseitig ausschließenden Ereignissen eintritt, besteht kein Grund anzunehmen, dass irgendeines dieser Ereignisse eher eintritt als ein anderes. Es erscheint dann sinnvoll, sich so zu verhalten, als ob jedes der Ereignisse dieselbe Eintrittswahrscheinlichkeit habe (Prinzip des unzureichenden Grundes).“

Detailentscheidungen für die konkreten Randbedingungen des jeweiligen Einsatzfalles zu treffen.

Auch der o.a. Entscheidungsprozess und die genannten Entscheidungsmodelle führen weiterhin zu einer subjektiven Bewertung von Produkten und Verfahren, da diese von den Zielvorstellungen, d.h. Qualitätsanforderungen, des jeweiligen Entscheidungsträgers sowie den von ihm wahrgenommenen Aktionsmöglichkeiten und seinen subjektiven Erwartungen über die Konsequenzen von Produkt- und Verfahrenseigenschaften abhängen.

Ihre besondere Bedeutung erlangt die pragmatische Bewertung durch ihre Zugänglichkeit für mathematische Beschreibungen und die daraus resultierende hohe Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsprozesses. So steht sie auch im Mittelpunkt von Entscheidungs- und Auswahlprozessen, die durch hohe Anforderungen an die Nachvollziehbarkeit durch Dritte geprägt sind, wie öffentliche Investitionen. Für das unterirdische Bauen und die Bewertung von Maßnahmen des Baus und der Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen finden sich entsprechende Ausführungen z.B. in den Arbeiten von GRUNWALD [Gru97], SCHOCKEMÖHLE [Sch00], THEWES [The09] sowie den Leitlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA [LAW05]. Grundsätzlich werden in diesem Zusammenhang die folgenden methodischen Instrumente unterschieden (vgl. [Gru97]):

- **Kostenvergleich**, durch Berücksichtigung der budgetwirksamen Kosten;
- **Kosten-Nutzen-Analyse**, durch Ansatz von Kosten und monetär bewerteten Nutzen;
- **Nutzwertanalyse**, durch Erweiterung der Nutzenbetrachtung auch auf nichtmonetäre Bewertungen mittels Formulierung von Zielkriterien und die nichtmonetäre Bewertung und Gewichtung von Zieelerträgen jeder Alternative;
- **Kostenwirksamkeitsanalyse**, durch Zusammenfassung der Möglichkeiten der Nutzwertanalyse mit der monetären Kostenseite der Kosten-Nutzen-Analyse.

Die hohe Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen bei Nutzung dieser Instrumente darf allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass allein pragmatische Gesichtspunkte im Vordergrund der Bewertung stehen und die so ermittelten Entscheidungsvorschläge dennoch intuitiven Urteilen der Verantwortlichen (vgl. Abschnitt 7.2.2) oder sogar allgemeinen Grundsätzen (vgl. Abschnitt 7.2.1) widersprechen können. In der Folge sind dann Ausgleichshandlungen der

Betroffenen zu erwarten<sup>144</sup>. Kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse können diese Effekte ggf. vermindern.

### 7.3 Kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse

Im Falle der Bewertung von Produkten und Verfahren spielen kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse eine große Rolle. Dies betrifft die Suche nach allgemeinen gesellschaftlichen Grundsätzen<sup>145</sup>, die Definition bautechnischer Grundsätze in der Gesetzgebung (vgl. Abschnitt 7.2.1), die gemeinschaftliche Bewertung von Prüfergebnissen in Entscheidungsgremien, wie z.B. den Sachverständigenausschüssen des DIBt<sup>146</sup> oder Auftraggebergremien von Verbundprojekten (vgl. Abschnitt 8), sowie Beteiligungsverfahren im Normen- und Regelwerk (vgl. [DWA-A400]).

Insbesondere unter pragmatischen Gesichtspunkten können Bewertungs- und Entscheidungsmodi für kollektive Entscheidungsprozesse unterschieden werden in<sup>147</sup>:

#### **Autokratischer Entscheidungsmodus:**

Bei ihm bestimmt die individuelle Wertschätzung einer einzelnen Person innerhalb der Gruppe die Wertschätzung der Gruppe und damit die Gruppenentscheidung. Es kann dennoch von einer Gruppenentscheidung gesprochen werden, wenn die Entscheidung zwar nicht von der Gruppe, aber für sie getroffen wird, für die Gruppe also eine Verbindlichkeit hat. Es kann nicht von vornherein ausgeschlossen werden, dass der autokratische Entscheidungsmodus das Gesamtergebnis im Interesse der Gruppe positiv beeinflussen kann. Insbesondere ist es möglich, dass sich eine Gruppe freiwillig und ganz bewusst diesem Modus unterworfen hat, wenn diese aus entscheidungsunwilligen bzw. entscheidungsunfähigen Mitgliedern bestehen<sup>148</sup>.

#### **Ritueller Entscheidungsmodus:**

Er liegt vor, wenn die Entscheidungsfindung einer Gruppe unabhängig von den Wertvorstellungen der die Gruppe konstituierenden Personen ist; üblicherweise orientieren sich hier die Entscheidungen an bestimmten in der Vergangenheit (von

---

<sup>144</sup> Umgangssprachlich spricht man hier auch vom „Schönrechnen“ einer Lösung. Zitate aus Gesprächen mit Entscheidungsträgern: „Wenn ich das will, dann kostet das Produkt X nur noch Y Euro“, „In der Kanalisation redet keiner über Kosten, sondern nur über Gebühren!“

<sup>145</sup> vgl. die Ausführungen von WEBER in [Web05] zu Verfahren der Diskursethik

<sup>146</sup> vgl. [BPG98] BauPG §6 Abs. 3 und 4

<sup>147</sup> vgl. [Bos90], S. 77ff

<sup>148</sup> BOSSERT verdeutlicht dies in [Bos90] am Beispiel eines Orchestermitglieds in Bezug zum Dirigenten; s.a. im täglichen Sprachgebrauch „Young: Jeder Dirigent ist ein Autokrat“ in <http://www.netzeitung.de/kultur/324474.html>; vgl. auch POPPER zur Verantwortung einer „demokratisch gewählten konstitutionellen Regierung“ in [Pop94].

einem ganz bestimmten Personenkreis) getroffenen Entscheidungen bzw. sie kopieren diese.

### **Kompromissentscheidungen:**

Bei ihnen werden die Wertvorstellungen mehrerer oder gar aller Gruppenmitglieder, auf die sich die Entscheidung bezieht, berücksichtigt. Dieser Typ umfasst eine große Anzahl verschiedener Ausprägungen, wie z.B. die Mehrheitsentscheidungsregel, das Klassenwahlrecht, die Expertenentscheidung, mehrstufige Wahlmännerentscheidungen, das Rangordnungsverfahren und alle Arten von Abstimmungen sowie Gruppenentscheidungen als Verhandlungsergebnis zwischen mehreren Personen.

Weitere Ausführungen zu den o.a. Entscheidungsmodi (vgl. [Bos90], [Bit81], [Lau05]) orientieren sich i.d.R. streng an einer pragmatischen Bewertung von Alternativen bzw. Prüfergebnissen im Sinne einer kollektiven Nutzwertbetrachtung bzw. Wohlfahrtsfunktion (vgl. Abschnitt 7.2.3) und setzen ein hohes Maß an Informationen über sämtliche individuellen Präferenzen der Betroffenen voraus. Demgegenüber können nach [Gig07] intuitive Urteile auch bei Informationsmangel des Einzelnen, z.B. unter Nutzung der Rekognitionsheuristik<sup>149</sup>, zu einer zuverlässigen kollektiven Bewertung führen, wie Untersuchungen von BORGES et al in [Bor99] bestätigen.

Aufgaben von Institutionen, die kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse organisieren, werden z.B. im Zusammenhang mit der bautechnischen Zulassung von Bauprodukten und Verfahren in der Bauproduktenrichtlinie [BPR03], Artikel 10, Absatz 2 definiert. Demnach müssen Zulassungsstellen den Bestimmungen der Richtlinie genügen und insbesondere in der Lage sein,

- die Brauchbarkeit neuer Produkte aufgrund von wissenschaftlichen und praktischen Kenntnissen zu beurteilen,
- gegenüber den Interessen der betreffenden Hersteller oder deren Beauftragten unparteiisch zu entscheiden und
- die Beiträge aller beteiligten Parteien zu einer ausgewogenen Bewertung zusammenzufassen.

Im Gesamtblick bleibt festzustellen, dass sich kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse einzeln oder auch in Kombination durch eine denkbar große Vielfalt an möglichen Lösungsansätzen auszeichnen.

---

<sup>149</sup> vgl. [Gig07], S. 123: Rekognitionsheuristik nutzt die Korrelation zwischen Namenswiedererkennung und Qualität in Wettbewerbssituationen.



## 8 Synthese und Anwendung

### 8.1 Vorgehensweise

In Abschnitt 2 wurde bereits der in dieser Arbeit verfolgte systematische Ansatz eingeführt, mit dem die zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren notwendigen Kompetenzen, Bewertungs- und Entscheidungsprozesse beschrieben werden können (vgl. Abbildung 2). In den Abschnitten 3 bis 7 wurde dieser Beschreibungsansatz detailliert anhand seiner einzelnen Elemente, den notwendigen Verständnis- und Handlungskompetenzen, analysiert. Dieser Analyse soll nun im Abschnitt 8 die Synthese am Beispiel neu entwickelter, marktrelevanter Konzepte zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen folgen.

Besondere Marktrelevanz erfahren die Prüfung und Bewertung, wenn sie sich unmittelbar an den Bedürfnissen der für die Kanal- und Leitungsnetze verantwortlichen Netzbetreiber orientieren und mit ihren Ergebnissen einen nachvollziehbaren Vergleich der Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Produkten bzw. Verfahren unterstützen, so dass schließlich die Auswahl eines Produktes bzw. Verfahrens für einen bestimmten Anwendungsfall erleichtert wird. Im Folgenden werden drei seit dem Jahr 2001 unter der wissenschaftlichen Leitung des Verfassers ständig fortentwickelte Konzepte zur Prüfung und Bewertung näher betrachtet:

- netzbetreiberorientierte Forschung,
- vergleichende Produkt-/Verfahrenstests und
- Qualitätsreports für Sanierungsverfahren.

Die Ausführungen beginnen mit einer Beschreibung des jeweiligen Konzepts im Sinne einer Synthese der vorgestellten Verständnis- und Handlungskompetenzen zu einem Abbild des übergreifenden Ansatzes gemäß Abschnitt 2. Anschließend wird die Umsetzung des Konzeptes mit Blick auf die Elemente des in dieser Arbeit entwickelten Beschreibungsansatzes im Detail validiert. Der Begriff „Validierung“ wird dabei im ursprünglichen Sinne der Definition nach DIN EN ISO 17025 [ISO17025] verstanden. Dort heißt es in Abschnitt 5.4.5.1<sup>150</sup> <sup>151</sup>: *„Die Validierung ist die Bestätigung durch Untersuchung und Bereitstellung eines Nachweises, dass die besonderen Anforderungen für einen speziellen beabsichtigten Gebrauch erfüllt werden.“* Als *besondere Anforderung* soll in diesem Sinne die sachgerechte Ansprache der in dieser Arbeit vorgestellten Kompetenzen durch das jeweilige

---

<sup>150</sup> Ähnliche Definitionen finden sich auch mit Blick auf eine Methodvalidierung in der chemischen Analytik, vgl. [Eur98].

<sup>151</sup> Unterstreichungen sind nicht Teil des Zitats, sondern dienen der Hervorhebung im Sinne des Gesamtzusammenhangs.

Prüfungs- und Bewertungskonzept verstanden werden und als *Erfüllung für einen speziellen beabsichtigten Gebrauch* die argumentative Nachvollziehbarkeit des Gesamtkonzepts im Sinne des übergreifenden Beschreibungsansatzes nach Abbildung 2.

Die Betrachtung des jeweiligen Konzeptes schließt mit einem Fazit zu dessen wesentlichen Merkmalen. Auf eine Darstellung und Validierung einzelfallbezogener, nicht-vergleichender Prüfungen und Bewertungen wird in dieser Arbeit verzichtet. Insbesondere Prüfungs- und Bewertungskonzepte für nichtgeregelte Bauprodukte und –verfahren im Sinne des Bauproduktengesetzes [BPG98] unterliegen bereits einer Validierung, und zwar für jede einzelne Prüfung und Bewertung eines Produktes, entweder als „Zustimmung im Einzelfall“, „allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis“ oder „bauaufsichtliche Zulassung“ (vgl. [MBO02]), selbst wenn sog. „Zulassungsgrundsätze“ vorliegen, die im Auftrag des DIBt erarbeitet wurden (vgl. [Ste04]). Die konkrete Umsetzung erfolgt hier i.d.R. in Zusammenarbeit mit den zugeordneten Sachverständigenausschüssen des DIBt (vgl. [DIB08]).

## 8.2 Netzbetreiberorientierte Forschung

### 8.2.1 Hintergrund und Zielstellung

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die Ausrichtung von Forschungsaktivitäten z.B. hinsichtlich ihres Zwecks in *Grundlagenforschung* und *angewandte Forschung* unterschieden<sup>152</sup>, auch wenn der Übergang fließend sein kann<sup>153</sup>. Nach europäischer Auffassung versteht man unter Grundlagenforschung insbesondere [EC04] „*Forschungsarbeiten ohne direkten Bezug zu einer bestimmten Anwendung und mit dem vorrangigen, wenn auch nicht ausschließlichen Ziel der Wissensvermehrung*“. Sie wird ihrem Wortsinne entsprechend als wesentliche Grundlage für die angewandte Forschung und weitere Entwicklungen angesehen. Angewandte Forschung wird demgegenüber als reine Zweckforschung verstanden, die ein bestimmtes, oft technisches Problem lösen will und vor allem die wirtschaftliche Anwendung zum Ziel hat. Typische Beispiele für angewandte Forschung im Bereich des unterirdischen Kanal- und Leitungsbaus sind die Erforschung und Entwicklung neuer Bauverfahren sowie Betriebs- und Inspektionstechniken durch Verfahrensanbieter und wirtschaftsnahe Forschungsinstitute (vgl. [Ber09]).

Mit Blick auf die Verantwortung der Netzbetreiber für Maßnahmen und Entwicklungen zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen

---

<sup>152</sup> vgl. Seite „Forschung“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 9. Februar 2009, 07:18 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Forschung&oldid=56431478> (Abgerufen: 9. Februar 2009, 19:31 UTC)

<sup>153</sup> vgl. [DFG08]; die DFG spricht z.B. von einer sog. „anwendungsorientierten Grundlagenforschung“ bei Förderung von Forschung bis zum vorwettbewerblichen Bereich bzw. im Transferbereich.

ist festzustellen, dass diesbezügliche Forschungsaktivitäten zwar nicht zur Grundlagenforschung gehören, aber dennoch ein übergeordnetes gesellschaftliches Interesse an der Leistungsfähigkeit der Kanal- und Leitungsnetze und der Prüfung und Bewertung der eingesetzten Produkte und Verfahren besteht, welches nicht als rein wirtschaftliche Zielsetzung angesehen werden kann und damit über das klassische Ziel angewandter Forschung hinaus geht. Insbesondere orientieren sich die Problemstellungen an einer übergeordneten Verantwortung der Netzbetreiber bzw. der diese beauftragenden Kommunen für die Daseinsvorsorge (vgl. Abschnitte 7.1 und 7.2.1.) und nicht allein an den individuellen Zwecken für die Nutzer.

In der Folge sind auch die Forschungsaktivitäten zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren auf diese übergeordneten Bedürfnisse der für die Netze verantwortlichen Entscheidungsträger, d.h. auf eine Vielzahl von Netzbetreibern, auszurichten. Ansätze für wasserwirtschaftliche Forschungsaktivitäten, die sich an den Interessen mehrerer Wasserunternehmen orientieren, sind z.B. aus England bekannt<sup>154</sup>. Weiterführende Konzepte zur systematischen Entwicklung und Umsetzung einer an den Bedürfnissen von Netzbetreibergruppen orientierten Forschung, insbesondere für den bautechnisch relevanten Kanalbau, lagen bisher allerdings nicht vor und wurden daher seit dem Jahr 2001 durch den Verfasser entwickelt und in zahlreichen Forschungsvorhaben vorangetrieben.

## **8.2.2 Konzept**

### 8.2.2.1 Beteiligte

Netzbetreiberorientierte Forschungsprojekte werden stets in enger Abstimmung mit Netzbetreibern entwickelt und durch eine Gruppe von Netzbetreibern, d.h. Entscheidungsträger im Sinne des Abschnitts 7.1, in einem Projektbeirat begleitet. Als Forschung im gesellschaftlichen Interesse werden die Vorhaben in der Regel durch öffentliche Fördermittelgeber unterstützt<sup>155</sup>. Im Sinne des systematischen Beschreibungsansatzes nach Abbildung 2 repräsentiert der Projektbeirat einen Ausschnitt der von den Ergebnissen betroffenen Entscheidungsträger. Der Projektbeirat berät und unterstützt das Forschungsinstitut in regelmäßigen Sitzungen mit Blick auf

- die Auswahl der inhaltlichen Untersuchungsschwerpunkte im Interesse der Netzbetreiber,
- die Umsetzung von In-situ-Untersuchungen in den Netzen der beteiligten Betreiber,

---

<sup>154</sup> vgl. WRc – Water Research Center, Swindon ([www.wrcplc.co.uk](http://www.wrcplc.co.uk)), „Portfolio Collaborative Research Programme“

<sup>155</sup> Forschung ist z.B. explizit ein Verwendungszweck gemäß Abwasserabgabengesetz [ABW05], AbwAG §13 (2) Pkt. 6.

- die Darstellung der Forschungsergebnisse in einer auf die Belange der Netzbetreiber ausgerichteten Form.

Neben den forschungsorientierten Prüfaufgaben wird auch die Bewertung der Ergebnisse durch ein neutrales und unabhängiges Forschungsinstitut bzw. sein entsprechend qualifiziertes Personal verantwortet und umgesetzt. Den Verständniskompetenzen entsprechend Abschnitt 3 bis 5 kommt dabei eine herausragende Bedeutung zu.

#### 8.2.2.2 Inhalte

Netzbetreiberorientierte Forschungsprojekte zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zielen grundsätzlich auf diejenigen Anwendungsbereiche des unterirdischen Kanal- und Leitungsbaus,

- die für die Netzbetreiber entsprechend ihren gesetzlichen Aufgaben oder vertraglichen Verpflichtungen von besonderem Interesse sind,
- in denen das bisherige Wissen der Netzbetreiber nicht ausreicht, um zuverlässig sichere und wirtschaftlich sinnvolle Entscheidungen treffen zu können, und
- für die kaum oder gar keine wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen, um die offenen Fragen durch übliche Ingenieurleistungen beantworten zu können.

Die ausgewählten Fragestellungen werden dann im Sinne von „*Prüfungen zur Parameterbestimmung*“ und insbesondere „*Prüfungen als explorative Untersuchungen*“ (vgl. Abschnitt 6.1) durch eine oder mehrere der folgenden Forschungsinhalte untersucht:

- **Systematische Erhebung und Auswertung von Praxiserfahrungen**, z.B. im Rahmen von bundes- oder landesweiten Erhebungen und Umfragen. Typische Beispiele sind die Ermittlung des Zustandes und Sanierungsbedarfs für einzelnen Netztypen [IKT03a], [IKT03d], [IKT08d] sowie die Erfassung der Einsatzfähigkeit und Verbreitung neuartiger Sanierungsverfahren [IKT01a].
- **Entwicklung von Prüfverfahren und –kriterien bei Simulation bau- und betriebsähnlicher Bedingungen bzw. realitätsnaher Beanspruchungen**, z.B. als Basis für gezielte Parametervariationen und zum weitergehenden Erkenntnisgewinn (Regularitäten) entsprechend den Darstellungen in den Abschnitten 5.3 und 5.4, um z.B. die Leistungsfähigkeit von (neuen) Produkt- und Verfahrensvarianten bewerten und miteinander vergleichen zu können. Typische Ziele sind die Entwicklung von Eignungsprüfungen [IKT02b], [IKT07e] und Bemessungsverfahren [IKT03b], die Prüfung und Bewertung von Prototypen neuartiger Produkt- und Verfahrenstypen [IKT02a], [IKT02c], [IKT04b], [IKT07g], [KGK03], [IKT07i], [RUB06], die reproduzierbare Variation bautechnischer Belastungen bzw. Beanspruchungen zur Identifizierung der

maßgeblichen bautechnischen Einflussfaktoren [IKT04a], [IKT07] und die Untersuchung betrieblicher Belastungen, Beanspruchungen und Risiken [IKT04], [IKT06a].

- **Sichtbarmachen bisher unbekannter, unsichtbarer Phänomene**, z.B. zum Erkennen und besseren Verständnis der maßgeblichen Einflussfaktoren in Bau und Betrieb, insbesondere als Grundlage für die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produkten und Verfahren. Typische Beispiele sind die Messung von Bettungsreaktionen in der bautechnischen Simulation (vgl. Abschnitt 5.4.3 und [IKT07]), die Beschreibung vegetationstechnischer Vorgänge und Belastungen [RUB04], [RUB07] sowie Untersuchungen zur Veranschaulichung betriebstechnischer Reinigungs- und Strömungsprozesse [IKT04], [IKT06a] (vgl. Abschnitt 5.4.5).

Deutlich ist die vornehmlich explorative Ausrichtung der o.a. Forschungsinhalte hervorzuheben. Die Erfassung von Praxiserfahrungen ebenso wie die experimentellen Untersuchungen sind entsprechend als „*Akt des Schaffens*“<sup>156</sup> zu verstehen, der dem nachstehenden, grundsätzlichen Ablauf folgt<sup>157</sup>:

- **Systematisches Erfassen oder Variieren** einer großen Zahl verschiedener Parameter mit dem Ziel, stabile empirische Regeln aufzustellen;
- **Entwickeln angemessener Darstellungssysteme und Begriffe**, mit deren Hilfe sich solche Regeln möglichst allgemein formulieren lassen; hier bieten sich z.B. die Weiterentwicklung und/oder Modifikation etablierter mathematisch-physikalischer Modelle an;
- **Ermitteln dominanter Effekte und deren maßgeblicher Randbedingungen und Einflussfaktoren**;
- ggf. **isolierte Betrachtung einzelner Effekte** in weiteren experimentellen Untersuchungen.

Der gesamte explorative Prozess hat starke Ähnlichkeit zu Verfahren, mit denen Menschen auch im lebenspraktischen Kontext Probleme angehen<sup>158</sup> und kann auch wissenschaftstheoretisch interpretiert werden<sup>159</sup>. Das begriffliche Darstellungs-

---

<sup>156</sup> vgl. [Ste00], S. 222: im Gegensatz zum *Rezipieren* der empiristischen Tradition

<sup>157</sup> vgl. [Ste00], S. 229

<sup>158</sup> vgl. [Ste00], S. 233 „*Wichtige Bereiche wissenschaftlichen Experimentierens sind von unserer Alltagspraxis und unserem Alltagsdenken nicht so abgehoben, wie es bisweilen erscheinen mochte, sondern haben sich aus ihnen heraus entwickelt.*“

<sup>159</sup> vgl. [Pop94], S. 32, vierstufiges Schema:  
„1. das ältere Problem; 2. versuchsweise Theorienbildung; 3. Eliminationsversuche[...]; 4. die neuen Probleme [...]“

system, mit dem die beobachteten Regularitäten beschrieben werden können, steht typischerweise am Ende der Arbeiten und wird eng mit dem Projektbeirat oder in Einzelgesprächen mit den Netzbetreibern auf deren spezifischen Informationsbedarf und besonderen Sprachgebrauch abgestimmt<sup>160</sup>.

### 8.2.3 Validierung

#### 8.2.3.1 Verständniskompetenzen

Im Rahmen von netzbetreiberorientierten Forschungsprojekten kommt den in Abbildung 2 dargestellten drei Verständniskompetenzen eine herausragende Bedeutung zu:

**Leistungsziele und Prüfkriterien** sind in vielen Fällen nicht vorher konkretisiert und damit gerade Forschungsgegenstand. Insbesondere wenn die relevanten Einflussfaktoren und damit auch die Einsatzmöglichkeiten und –grenzen einer Produkt- bzw. Verfahrensgruppe ungewiss sind, fordert die Erforschung der unterschiedlichen Einflüsse auf die Leistungsziele der Standsicherheit, Dichtheit, Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit spezielle Kenntnisse, die z.T. erst in Kompetenzverbänden erschließbar sind. Neben bautechnischen Fragestellungen sind z.B. wasserwirtschaftliche Fragen und Leistungsziele aus der integralen Entwässerungsplanung und dem Grundwassermonitoring zu berücksichtigen (vgl. [IKT06c]). Darüber hinaus können neben ingenieurtechnischem Wissen auch weitere Fachdisziplinen angesprochen werden, wie z.B. die Bodenkunde und Botanik im Falle der Untersuchungen zur Rohr-Wurzel-Interaktion (vgl. [RUB04]).

**Mathematisch-Physikalische Modelle** können ebenfalls Gegenstand netzbetreiberorientierter Forschungsprojekte sein. Forschungsvorhaben zielen hier insbesondere auf die Beschreibung bisher unbekannter oder unsichtbarer Phänomene und die Erweiterung der mathematisch-physikalischen Modellvorstellungen. Ausgangspunkt können theoretische Überlegungen, Praxiserfahrungen oder auch Versuchsergebnisse sein. So wurde in [IKT03b] u.a. die Übertragbarkeit gängiger Bemessungsansätze der grabenlosen Bauweise nach [DWA-A161] auf die Beanspruchungssituationen des Berstverfahrens untersucht<sup>161</sup>. In [IKT07g] wurde hinterfragt, in welcher Weise die Bemessungsansätze der offenen Bauweise nach [DWA-A127] auch auf den Einsatz neuartiger Bettungselemente aus EPS<sup>162</sup> erweitert werden können. Auch die in [IKT07] und Abschnitt 4.3.3.2

---

<sup>160</sup> z.B. [IKT04] zur Begriffsdefinition der Grundbelastungsarten der HD-Reinigung („HD-Strahl, Feststoff, Schleifen, Fallen, Prallen“) oder [RUB04] zu Modellen der Rohr-Wurzel-Interaktion („Leck-Modell, Dichtefallenmodell, Quellungsmodell, Sauerstoffmodell, Kombinationsmodell“) und [IKT07] zum „Geradeziehen“ des Rohrstranges bei Kurvenfahrten

<sup>161</sup> Beim Berstverfahren werden die Erdlasten über die Altrohrscherben als Punktlasten in die Rohroberfläche des Neurohres eingetragen, so dass die Rohre im Bau- und Betriebszustand besondere Beanspruchungen erfahren.

<sup>162</sup> EPS - Expandierbares Polystyrol

dargestellten Erkenntnisse aus Versuchen zur Rohrstrang-Kinematik beim Rohrvortrieb lassen erwarten, dass die entsprechenden mathematisch-physikalischen Modellvorstellungen weiterentwickelt und die Ergebnisse in der Regelwerksbearbeitung diskutiert werden (vgl. [DWA08a]). Weitere Korrekturen bzw. Erweiterungen gängiger Modellvorstellungen wurden nach Untersuchungen zur HD-Reinigung in [IKT04]<sup>163</sup> und der Analyse der Rohr-Wurzel-Interaktion in [RUB04]<sup>164</sup> notwendig.

**Versuchstechnische Modelle** in netzbetreiberorientierten Forschungsprojekten stehen häufig in enger Wechselwirkung mit praxisrelevanten Fragestellungen, die nicht allein durch Betrachtung mathematisch-physikalischer Modelle gelöst werden können, so z.B. wenn Fertigungseinflüsse oder ein komplexes nicht-lineares Werkstoffverhalten zu berücksichtigen sind. Ein typisches Beispiel für die Entwicklung eines solchen versuchstechnischen Modells ist der in [IKT04a] und Abschnitt 5.4.2 dargestellte modifizierte Scheiteldruckversuch für Großrohre aus Stahlbeton. Die Einflüsse einzelner Dimensionierungs- und Fertigungsparameter, wie Bewehrungsgrad, Betonqualität, Schalungstyp und Nachbehandlung, auf das Trag- und Rissverhalten der Großrohre können hier im Versuch erkannt und gegeneinander abgegrenzt werden. Im IKT-Vortriebssimulator (s. [IKT07] bzw. Abschnitt 5.4.3) kann wiederum die Leistungsfähigkeit von Druckübertragungsmitteln und deren Wechselwirkungen mit möglichen Bettungsreaktionen während des Rohrvortriebs unter identischen Trassenbedingungen im Maßstab 1:1 untersucht werden. Weitere versuchstechnische Modelle für Sanierungs- und Inspektionsverfahren wurden z.B. in [IKT03b], [IKT07e] bzw. [KKG03], [IKT07i] entwickelt.

#### 8.2.3.2 Handlungskompetenzen

Eine Besonderheit netzbetreiberorientierter Forschungsprojekte liegt darin, dass sämtliche Handlungskompetenzen zwar mit dem Projektbeirat abgestimmt, jedoch letztlich treuhänderisch<sup>165</sup> durch ein neutrales und unabhängiges Forschungsinstitut bzw. dessen Forschungspartner wahrgenommen werden. Dies gilt für die Wahrnehmung der Prüfaufgabe ebenso wie für die Bewertung der Prüfergebnisse.

#### *Prüfung*

Die Prüfung umfasst nach Abbildung 2 bzw. Abschnitt 6 die Festlegung der Prüfaufgabe durch den Auftraggeber, die eigentliche Prüfung durch qualifiziertes

---

<sup>163</sup> Dies betraf insbesondere die weitverbreiteten Annahmen zur Häufigkeit „schwebender“ und „schlagender“ Düsen und deren Wirkung auf die Rohrwandung.

<sup>164</sup> Die Untersuchungen in [RUB04] zeigten, dass Wurzeln nicht allein in undichte, wasserexfiltrierende Leitungen einwachsen, sondern Poren und Hohlräume im Boden und an Rohrverbindungen das Wurzelwachstum maßgeblich fördern und Wurzeln auch in dichte Leitungen einwachsen können.

<sup>165</sup> vgl. Duden, Band 1, 21. Aufl., 1996: treuhänderisch: „fremde Rechte ausübend“

Personal bzw. die Qualitätssicherung sowie die objektive Dokumentation der Ergebnisse. Sie ist in der netzbetreiberorientierten Forschung entsprechend Abschnitt 8.2.2.2 wesentlich durch eine explorative Ausrichtung geprägt und wird mit dem Fördermittelgeber entsprechend dessen Förderrichtlinien und dem Projektbeirat abgestimmt. Die **Aufgabe einer netzbetreiberorientierten, forschungsbasierten Prüfung und Bewertung** liegt im Falle des Baus und der Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen insbesondere in der Gewinnung grundlegender Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen technischer Lösungsansätze als Basis für künftige Entscheidungen der Netzbetreiber. In Erweiterung der klassischen angewandten Forschung sind auch Erkenntnisse über Leistungsmängel und -grenzen von Produkt- und Verfahrensgruppen sowie Erkenntnisse über betriebliche Belastungsrisiken nach Ablauf der Gewährleistungsfrist von hohem Wert, da hierdurch Netzbetreiber vor Fehlinvestitionen geschützt und das gesellschaftliche Interesse der Daseinsvorsorge unterstützt werden.

Die **Objektivität der Dokumentation** ist eng mit der Verantwortung im Umgang mit der Freiheit von Wissenschaft und Forschung<sup>166</sup> und somit mit grundsätzlichen Anforderungen an wissenschaftliches Arbeiten verbunden. Sie ist damit eine selbstverständliche Leitlinie der Forschung und kann auch als Ergebnis eines sozialen Prozesses innerhalb der wissenschaftlichen Öffentlichkeit angesehen werden<sup>167</sup>, wenn sie durch die Veröffentlichung der Ergebnisse und deren Diskussion in der wissenschaftlichen Fachwelt kontrolliert und unterstützt wird<sup>168</sup>. Diese Grundhaltung kann durch institutionelle Selbstverpflichtungen von Forschungseinrichtungen noch weiter unterstrichen werden, so ist z.B. das IKT satzungsgemäß zu objektivem Handeln befähigt und verpflichtet<sup>169</sup>.

Die erforderliche **Qualifikation des Personals** hängt wesentlich von der zu untersuchenden wissenschaftlichen Fragestellung ab. Werden neben bautechnischen Problemstellungen z.B. weitere naturwissenschaftliche, medizinische oder wirtschaftliche Fragen berührt, sind diese Kompetenzen durch entsprechende Kooperationen mit anderen Forschungsinstitutionen abzudecken. Typische Beispiele sind chemische und biologische Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bewertung von Werkstoffkomponenten, Korrosionsmechanismen und betrieblichen sowie vegetationstechnischen Belastungen (vgl. [IKT03c], [IKT00d], [IKT05c], [RUB04]). Mit Blick auf die Netzbetreiberorientierung wird eine besondere

---

<sup>166</sup> vgl. [GG02]: Grundgesetz, Artikel 5, Abs. 3, Satz 1 „Kunst und Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei.“

<sup>167</sup> STEINLE formuliert in [Ste00] zu diesem Ansatz überspitzt „*experimentelle Resultate werden nicht erzielt, sondern ausgehandelt*“.

<sup>168</sup> vgl. die vollständige Veröffentlichung von Endberichten zu IKT-Forschungsergebnissen unter [www.ikt.de](http://www.ikt.de)

<sup>169</sup> s. Satzungen der beiden Fördervereine als Download unter <http://www.ikt.de/mitglieder/>



Qualifikation des Personals durch enge Verknüpfung zwischen wissenschaftlicher Tätigkeit und der praxisorientierten bautechnischen Qualitätsüberwachung gewährleistet. So erarbeitet z.B. das wissenschaftliche Personal des IKT auch Prüfprogramme für die DIBt-anerkannte Prüfstelle für Bauprodukte in Anlehnung an die Anforderungen nach Abschnitt 6.3 und kann darüber hinaus auf umfassende Erfahrungen aus regelmäßigen Qualitätsprüfungen und Gutachten für Netzbetreiber zurückgreifen.

Die **Qualitätssicherung** in netzbetreiberorientierten Forschungsprojekten umfasst neben den üblichen wissenschaftlichen Ansprüchen, wie interne Betrachtungen zur Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Prüfungen sowie zur Repräsentativität der Untersuchungsbedingungen, auch die Veröffentlichung der Ergebnisse als Grundlage für die wissenschaftliche Diskussion (vgl. „Objektivität der Dokumentation“). Insbesondere werden die Ergebnisse auch explizit für die Zielgruppe der Netzbetreiber aufbereitet<sup>170</sup> und in ihrer Aussagekraft und Qualität über den Kreis der Projektbeiratsmitglieder hinaus in regelmäßigen Foren<sup>171</sup> diskutiert und mit Praxiserfahrungen abgeglichen.

#### *Bewertung und Entscheidung*

Netzbetreiberorientierte Forschungsprojekte zeichnen sich dadurch aus, dass das Forschungsinstitut für die Netzbetreiber die Rolle eines Treuhänders übernimmt und stellvertretend für die Entscheidungsträger nicht nur die Prüfung wahrnimmt, sondern auch die wissenschaftlichen Ergebnisse bewertet. Eine solche Delegation der Entscheidungsverantwortung ist in Forschungsprojekten notwendig, da die wissenschaftliche Bewertung unteilbar mit den hierzu erforderlichen wissenschaftlichen Kompetenzen verbunden ist. Hohe Anforderungen sind dann an die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen sowohl im wissenschaftlichen als auch im praktischen Sinne zu stellen. Eine besondere Bedeutung kommt damit der vollständigen Veröffentlichung und Erläuterung der Bewertungsschritte und -hintergründe zu. Entsprechend sind die o.a., zur Prüfung gestellten Anforderungen an die Objektivität der Dokumentation und an die Qualitätssicherung auch auf die Bewertung und Entscheidung auszudehnen. Bewertende Anteile der Forschungsergebnisse müssen darüber hinaus in transparenter Weise verdeutlichen, inwieweit die in Abschnitt 7.2 angeführten **Bewertungsdimensionen** berührt werden. Typische Beispiele sind für „*allgemeine Grundsätze*“ der explizite Vergleich mit Anforderungen aus technischen und rechtlichen Normen und Regelwerken, für „*intuitive Urteile*“ die systematische Erhebung und Darstellung von

---

<sup>170</sup> Am IKT werden praxisrelevante Ergebnisse der wissenschaftlichen Berichte z.B. als IKT-Handbücher [IKT05a], [IKT07b] und als journalistisch aufbereitete IKT-Ergebnishefte und -eNewsletter publiziert.

<sup>171</sup> vgl. Veranstaltungen des IKT unter [www.ikt.de](http://www.ikt.de) => Veranstaltungen

Betreibererfahrungen (vgl. [IKT01a]) und für eine „*pragmatische Bewertung*“ die Darstellung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (vgl. [IKT05f]).

**Kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse** spielen in netzbetreiberorientierten Forschungsprojekten eine besondere Rolle. Zwar dominieren Kompromissentscheidungen i.d.R. die Diskussion im Projektbeirat, dennoch liegt im wissenschaftlichen Sinne die abschließende Bewertung und Entscheidungsfindung beim Forschungsinstitut. Dieses Vorgehen kann im Sinne des Abschnitts 7.3 als kollektiver Bewertungs- und Entscheidungsprozess in allen drei Entscheidungsmodi interpretiert werden:

- **Kompromissentscheidungen:** Im Projektbeirat werden die Prioritäten der Netzbetreiber i.d.R. als Verhandlungsergebnis im Sinne einer Kompromissentscheidung herbeigeführt.
- **Ritueller Entscheidungsmodus:** Durch das Forschungsinstitut werden die Untersuchungsergebnisse nach allgemein anerkannten wissenschaftlichen Grundsätzen bewertet und dargestellt.
- **Autokratischer Entscheidungsmodus:** Wissenschaftliche Interpretationen, Entscheidungen und Bewertungen, die über übliche Fragestellungen hinaus gehen, werden nach eigenem Ermessen von den jeweils wissenschaftlich kompetenten Forschungspartnern formuliert.

#### 8.2.3.3 Verbesserungsprozesse

Forschung ist per se auf die Gewinnung neuer Erkenntnisse ausgerichtet und orientiert sich entsprechend unmittelbar an dem in Abbildung 2 dargestellten Kreislauf aus Innovation, Veränderung, Erfahrung, Forschung und Entwicklung. Verbesserungsprozesse werden insbesondere durch die Dokumentation und Verbreitung von Forschungsergebnissen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Fachzeitschriften, dem Internet und begleitenden Veranstaltungen angestoßen. Netzbetreiberorientierte Forschungsprojekte zeichnen sich darüber hinaus durch ihre enge Anbindung an gesellschaftliche Wertvorstellungen und Nachhaltigkeitsforderungen im Sinne der Daseinsvorsorge aus. Die im Projektbeirat vertretenen Betreiber öffentlicher Ver- und Versorgungsnetze werden unmittelbar durch die Öffentlichkeit und gesellschaftliche bzw. politische Gremien kontrolliert. Aktuelle Forschungsthemen können darüber hinaus durch institutionelle Verknüpfungen zwischen Netzbetreibern und Forschungsinstituten verstärkt in die wissenschaftliche Arbeit eingebracht werden<sup>172</sup>.

---

<sup>172</sup> Am IKT findet z.B. jährlich am „Tag der Forschung“ die Mitgliederversammlung des „IKT-Förderverein der Netzbetreiber e.V.“, dem Hauptgesellschafter des IKT statt, an dem künftige Forschungsschwerpunkte diskutiert und ausgerichtet werden (vgl. [IKT06d] und [IKT08f]).

### **8.2.4 Fazit**

Die besondere Struktur netzbetreiberorientierter Forschung sowie die hierfür notwendigen Kompetenzen können vor dem Hintergrund des in Abschnitt 2 vorgestellten systematischen Beschreibungsansatzes anschaulich vermittelt werden. Sämtliche Kompetenzbereiche werden umfassend angesprochen und das Prüfungs- und Bewertungskonzept ist argumentativ vollständig nachvollziehbar. Dabei zeichnet sich die netzbetreiberorientierte Forschung durch folgende Merkmale aus:

#### **Forschungsinstitut als Treuhänder**

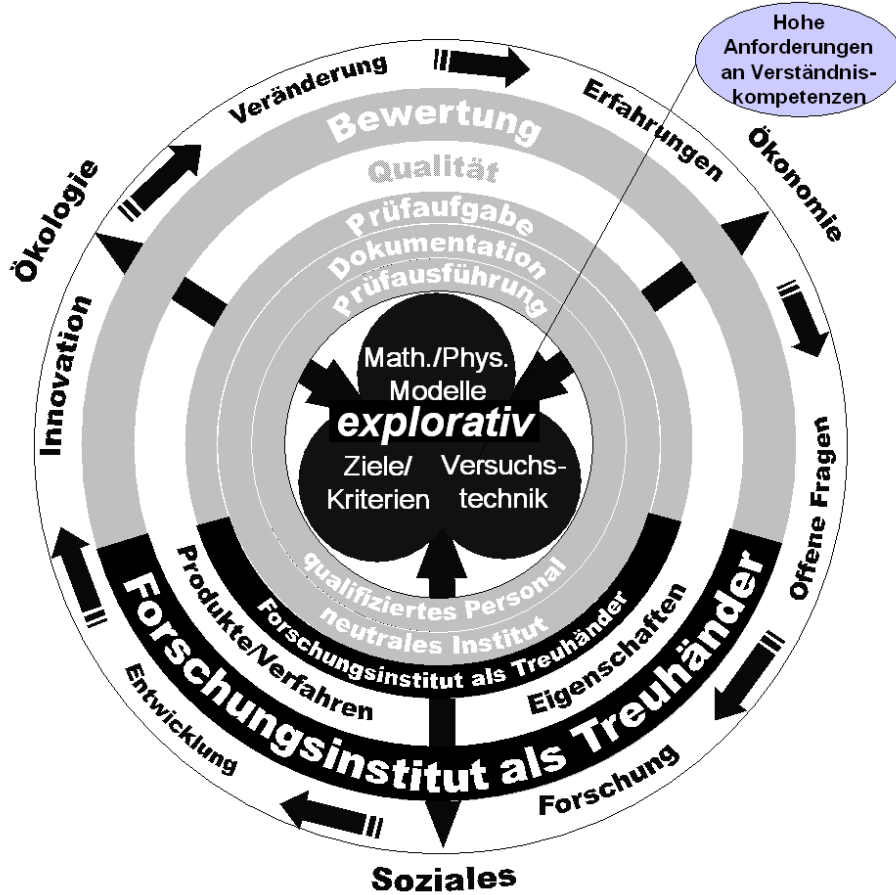
Sämtliche Handlungskompetenzen werden treuhänderisch durch ein neutrales und unabhängiges Forschungsinstitut bzw. dessen Forschungspartner wahrgenommen. Dies gilt für die Formulierung und Umsetzung der Prüfaufgabe ebenso wie für die Bewertung der Prüfergebnisse. Der Projektbeirat der Netzbetreiber unterstützt das Forschungsinstitut zwar maßgeblich bei der Festlegung von Untersuchungsschwerpunkten bzw. -prioritäten und dem Abgleich mit den Erwartungen aus der Praxis; die wesentliche, wissenschaftliche Bewertung verbleibt jedoch allein bei den hierfür kompetenten Forschungseinrichtungen und wird auch von diesen erwartet.

#### **Hohe Anforderungen an Verständniskompetenzen**

In netzbetreiberorientierten Forschungsprojekten zur Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren werden hohe Anforderungen an die Verständniskompetenzen des Forschungsinstituts bzw. -personals und seiner Partner gestellt. Dies betrifft das Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Leistungszielen und Prüfkriterien sowie die Interpretation mathematisch-physikalischer Modelle ebenso wie die Fähigkeit und Bereitschaft zur Entwicklung neuer versuchstechnischer Modellansätze, die eine Forschung jenseits bekannter und erwarteter Effekte erst möglich machen („explorativer“ Ansatz).

Abbildung 54 fasst die dominierenden Merkmale der netzbetreiberorientierten Forschung sowie die in Abschnitt 8.2.2 bzw. Abschnitt 8.2.3 dargestellten Informationen zum Konzept bzw. zu den Ergebnissen der Validierung als Profil des in dieser Arbeit entwickelten systematischen Beschreibungsansatzes zusammen.

**Netzbetreiberorientierte Forschung:** Forschung im gesellschaftlichen Interesse; enge Abstimmung mit Gruppe von Netzbetreibern/Entscheidungsträgern (Projektbeirat); Themen mit Entscheidungsunsicherheiten, gesetzlichem Druck, fehlenden wissenschaftlichen Erkenntnissen; vornehmlich explorative Ausrichtung mit im Ergebnis netzbetreiberorientierten Erklärungsansätzen, Begrifflichkeiten und Darstellungen. Forschungsinhalte: Systematische Erhebungen von Praxiserfahrungen; Entwicklung von Prüfverfahren; Simulation von Bau- und Betriebsbedingungen; Sichtbarmachen unsichtbarer Phänomene. Veröffentlichung der Ergebnisse als wissenschaftliche Analyse in Berichtsform.



**Verständnis-kompetenzen**

**Handlungskompetenzen**

Verständnis-kompetenzen			Handlungskompetenzen	
Leistungsziele/Prüfkriterien	Mathematisch-physik. Modelle	Versuchstechnische Modelle	Prüfung	Bewertung
Ziele und Kriterien als Forschungsgegenstand Bestimmung von Einflüssen auf Standsicherheit, Funktionsfähigkeit, Dichtheit, Dauerhaftigkeit Weitere Fragen aus Bautechnik, Wasserwirtschaft, anderen Disziplinen	Modelle als Forschungsgegenstand Ziele: - Modelle für neue Fragestellungen - Sichtbarmachen von unsichtbaren Phänomenen - Reduzieren von - Risiken durch Simulation	Modelle als Forschungsgegenstand Wechselwirkungen zu Praxisfragen, jenseits mathem./phys. Modelle: - Belastungsszenarien - Beanspruchungsbilder - Bau- und Betriebsprozesse - Werkstoffverhalten	Explorative Ausrichtung durch Forschungsinstitut als Treuhänder Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten und Grenzen techn. Lösungsansätze Objekt. Dokumentation als wissenschaftliche Leitlinie Netzbetreiberorientierte Ergebnisdarstellung	Forschungsinstitut als Treuhänder Enge Verknüpfung zwischen Bewertung und wissenschaftlicher Kompetenz Hohe Transparenz der Bewertungsschritte; Anteil kollektiver Bewertungs- und Entscheidungsprozesse Veröffentlichung als wissenschaftliche Analyse mit hoher Nachvollziehbarkeit auch für die Praxis der Netzbetreiber

➡ **Verbesserungsprozesse:** Forschung dient per se zur Gewinnung neuer Erkenntnisse; Wissenschaftliche Veröffentlichungen und ggf. institutionalisierte Diskussion mit Netzbetreibern; Impulse aus gesellschaftlichen Anforderungen

Abbildung 54 : Netzbetreiberorientierte Forschung, systematisches Profil gemäß Abbildung 2 Konzeptbeschreibung (oben), Schaubild mit Schwerpunkten (mittig), Kompetenzen und Verbesserungsprozesse (unten)

## 8.3 Vergleichende Produkt-/Verfahrenstests

### 8.3.1 Hintergrund und Zielstellung

Mit der vergleichenden Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen wird die aus dem Konsumgüterbereich bekannte vergleichende Darstellung von Prüfergebnissen<sup>173</sup> auf diesen besonderen Anwendungsfall übertragen. Ziel ist es, den beteiligten Netzbetreibern zuverlässige und unabhängige Informationen über Eigenschaften von marktgängigen Produkten und Verfahren zu liefern. Ein zentraler Aspekt ist dabei die Leistung der Produkte und Verfahren beim Einsatz unter realitätsnahen Einbau- und Betriebsbedingungen. Im Ergebnis sollen die Entscheidungsträger die notwendigen Investitionsentscheidungen auch unter Berücksichtigung qualitativer Kriterien treffen können.

### 8.3.2 Konzept

#### 8.3.2.1 Beteiligte

Ein vergleichender Produkt-/Verfahrenstest wird stets durch eine Gruppe von Netzbetreibern, d.h. Entscheidungsträger im Sinne des Abschnitts 7.1, getragen. Diese Gruppe finanziert die Entwicklung der Tests und die erste Testreihe, je nach Fragestellung auch mit Unterstützung durch öffentliche Fördermittelgeber (vgl. [IKTW05], [IKTW05a], [IKTW06]), und begleitet den gesamten Test durch die Entsendung von Vertretern der Netzbetreiber in einen sog. *Lenkungskreis*. Im Sinne des systematischen Beschreibungsansatzes nach Abbildung 2 repräsentiert dieser Lenkungskreis sowohl einen Ausschnitt der von den Ergebnissen betroffenen Entscheidungsträger als auch einen Ausschnitt der für die Prüfaufgabe und Finanzierung verantwortlichen Auftraggeber. Der Lenkungskreis entscheidet in regelmäßigen Sitzungen über

- die Auswahl von Produkten bzw. Verfahren für die erste Testreihe,
- die Bau- bzw. Instandhaltungsaufgabe für den Einsatz der Produkte bzw. Verfahren im Test,
- die maßgeblichen Leistungsziele und Qualitätsanforderungen,
- den Umfang und die Ausrichtung des Prüfprogramms,
- den Informationsaustausch mit den Produkt- bzw. Verfahrensanbietern,
- die Bewertung und Veröffentlichung der Ergebnisse.

---

<sup>173</sup> vgl. [www.test.de](http://www.test.de), Internet-Seite der Stiftung Warentest

Die Prüfung und Dokumentation der Ergebnisse wird durch die beteiligten Netzbetreiber an ein neutrales und unabhängiges Institut, hier das IKT, bzw. sein entsprechend qualifiziertes Personal übertragen. Das Prüfpersonal ist im Rahmen der Prüfung insbesondere verantwortlich für die ingenieurtechnische Entwicklung der Prüfaufbauten und des Prüfprogramms und greift in hohem Maße auf spezielle Verständniskompetenzen entsprechend Abschnitt 3 bis 5 zurück. Diesbezügliche Entscheidungen werden in iterativer Wechselwirkung mit dem *Lenkungskreis* entwickelt.

Die im Rahmen der ersten Testreihe durch den Lenkungskreis ausgewählten Hersteller der relevanten Produkte und Verfahren erhalten einen nach Angebot vergüteten Auftrag zur Ausführung der Bau- bzw. Instandhaltungsmaßnahme mit ihrem Produkt bzw. Verfahren unter definierten und für alle Anbieter gleichen Bedingungen. Dem Hersteller ist freigestellt, welchen Dienstleister er die Arbeiten ausführen lässt, so dass die erzielte Produkt- bzw. Verfahrensqualität im Sinne einer Bestmarke der *in der Praxis erzielbaren Qualität* gewertet wird<sup>174</sup>. Die Auftragsbedingungen unterscheiden sich damit von denen der Praxis nur dadurch, dass der Ablauf und die Qualität jedes einzelnen Einsatzes durch das unabhängige und neutrale Prüfinstitut vollständig überprüft und dokumentiert werden.

#### 8.3.2.2 Inhalte

Die ausgewählten Produkte und Verfahren werden mit Blick auf drei Schwerpunkte untersucht: Qualitätssicherung, Systemprüfung und In-situ-Einsatz.

Der Schwerpunkt **Qualitätssicherung** betrifft die durch den Produkt- bzw. Verfahrensanbieter getroffenen Maßnahmen zur Qualitätssicherung, wie z.B. den Umfang und die Inhalte einer Verfahrensbeschreibung bzw. eines Verfahrenshandbuches, die Schulungsangebote für ausführende Firmen sowie die bereits vorliegenden Prüfzeugnisse und Zulassungen als Nachweis erfüllter Mindestanforderungen.

Im Rahmen der **Systemprüfung** werden die Produkte bzw. Verfahren im Prüfinstitut unter realitätsnahen Bedingungen eingebaut, typischen Betriebsbelastungen ausgesetzt und hinsichtlich der geforderten Leistungsziele und Prüfkriterien getestet. Dies entspricht i.d.R. den im Abschnitt 5.3 erläuterten Versuchen im Maßstab 1:1 in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen. Abbildung 55 veranschaulicht diesen Ansatz grafisch in Anlehnung an die Ausführungen zur Dauerhaftigkeit in Abschnitt 3.5. Maßgeblicher Ausgangszustand ist die Einbauqualität; die weitere Qualitätsentwicklung wird in Abhängigkeit der aufgetragenen Betriebsbelastungen im

---

<sup>174</sup> vgl. Abschnitt 6.5 „Best Practice“ und Fußnote 117

Sinne einer Trendabschätzung des Systemverhaltens über die angestrebte Nutzungsdauer interpretiert.

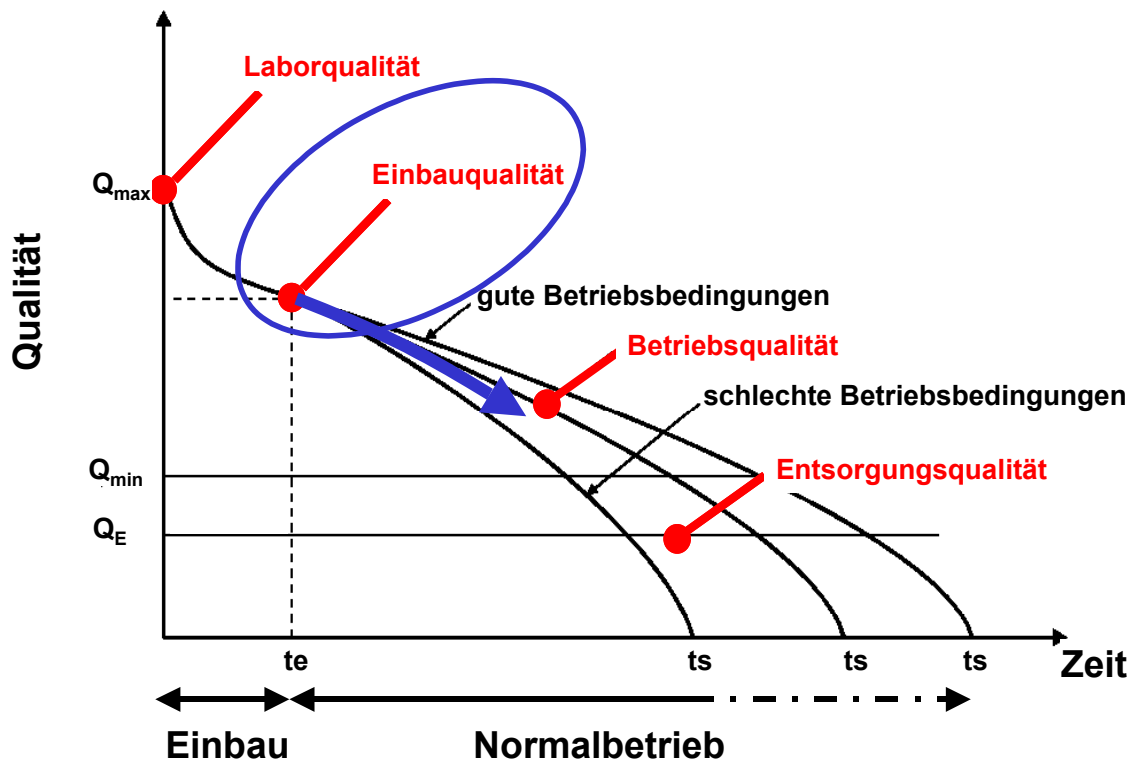


Abbildung 55: Konzept vergleichender Produkt-/Verfahrenstests  
Prüfung der Einbauqualität (Ellipse) und Simulation typischer Betriebsbelastungen  
(Pfeil als Tendenz); vgl. Abbildung 4

Die Prüfurteile für die getesteten Produkte und Verfahren basieren allein auf den Ergebnissen der Prüfung der Qualitätssicherung und der Systemprüfung, da nur diese Ergebnisse für alle Produkte bzw. Verfahren unter gleichen Randbedingungen erzielt werden und damit vergleichbar sind.

Zur Plausibilitätsprüfung werden die Produkte bzw. Verfahren darüber hinaus auch unter **In-situ-Bedingungen** eingesetzt. Hier wird durch das Prüfinstitut insbesondere überprüft, inwieweit das während der Systemprüfung beobachtete Vorgehen der Anbieter tatsächlich auch in situ, d.h. unter Einflüssen aus z.B. Verkehr, Wetter und Zeitdruck, realisiert werden kann.

Die einzelnen Leistungsziele und Prüfkriterien sowie deren Bedeutung werden durch den *Lenkungskreis* festgelegt und gewichtet. In die Festlegung von Mindestanforderungen und die Spreizung der Bewertung kann auch das Wissen über die Bandbreite der Prüfergebnisse einer Produkt- bzw. Verfahrensguppe – ohne Ansehen einzelner Produktergebnisse – einfließen. Auf Grundlage der Gewichtung werden die abschließenden Testurteile durch das Prüfinstitut berechnet und die Testergebnisse auf Wunsch der beteiligten Netzbetreiber veröffentlicht.

Die Veröffentlichung umfasst:

- den vollständigen Testbericht, mit Ausführungen zur Entwicklung der Testaufbauten, des Vorgehens beim Produkt-/Verfahrenseinsatz und der detaillierten Dokumentation der Prüfabläufe, Ergebnisse und Bewertungen.
- den Kurzbericht, mit einer Zusammenfassung der Beobachtungen, Prüfergebnisse und Bewertungen.
- die auf einer Seite verdichteten Testtabellen, mit Informationen zu den Prüfungs- und Bewertungsergebnissen einschließlich Verweisen auf relevante Zusatzinformationen (vgl. Abbildung 56).

<b>Vergleichender Test für die Produkt-/Verfahrensgruppe XY</b>						
<b>Hersteller</b>	<b>Hersteller A</b>	<b>Hersteller B</b>	<b>Hersteller C</b>	<b>Hersteller D</b>	<b>Hersteller E</b>	<b>Hersteller F</b>
<b>Verfahren</b>	<b>Verfahren 1</b>	<b>Verfahren 2</b>	<b>Verfahren 3</b>	<b>Verfahren 4</b>	<b>Verfahren 5</b>	<b>Verfahren 6</b>
Preis [€]	...	...	...	...	...	...
<b>Prüferteil</b>	<b>SEHR GUT</b>	<b>GUT</b>	<b>GUT</b>	<b>BEFRIEDIGEND</b>	<b>AUSREICHEND</b>	<b>MANGELHAFT</b>
<b>Systemprüfung (X %)</b>	sehr gut	gut	gut	befriedigend	ausreichend	mangelhaft
<b>Dichtheit (a %)</b>	+++	++	++	o	-	--
Prüfkriterium 1	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium ...	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium N	...	...	...	...	...	...
<b>Funktionsfähigkeit (b %)</b>	+++	+	+++	o	--	-
Prüfkriterium 1	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium ...	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium N	...	...	...	...	...	...
<b>Standicherheit (c %)</b>	++	++	+	+	o	-
Prüfkriterium 1	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium ...	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium N	...	...	...	...	...	...
<b>Dauerhaftigkeit (d %)</b>	+++	++	+	-	-	--
Prüfkriterium 1	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium ...	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium N	...	...	...	...	...	...
<b>Qualitätssicherung (Y%)</b>	sehr gut	gut	gut	ausreichend	mangelhaft	mangelhaft
Prüfkriterium 1	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium ...	...	...	...	...	...	...
Prüfkriterium N	...	...	...	...	...	...
<b>In-situ-Untersuchung</b>	++	+	+	o	-	--
Zusatzinformationen						
Empfohlene Verbesserungen	...	...	...	...	...	...

Abbildung 56: Vergleichende Produkt-/Verfahrenstests: Aufbau der Ergebnistabelle

Der auch als *IKT-Warentest* bekannte vergleichende Test von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen unterscheidet sich von den Prüfungen der Stiftung Warentest insbesondere durch seine Fokussierung auf die speziellen Anwendungsfälle in unterirdischen Kanal- und Leitungsnetzen. Darüber hinaus enthalten die Testergebnisse auch Hinweise zu den durch das Prüfinstitut und den Lenkungskreis erkannten Verbesserungspotenzialen der einzelnen Produkte und Verfahren als Element eines angestrebten „Kreislaufs der Produktverbesserung“ (vgl. [ISO9001]). Durch die beteiligten Netzbetreiber werden regelmäßig sog. Nachtests von Produkten bzw. Verfahren zugelassen, wenn diese signifikante Veränderungen aufweisen, welche eine Verbesserung der Qualität



des Einsatzes erwarten lassen<sup>175</sup>. Die technischen Testbedingungen im Nachtest entsprechen dann vollständig denen des Haupttests, insbesondere müssen die einzelnen Testphasen wie im Haupttest in einem Zuge durchlaufen werden. Allerdings trägt der Hersteller die Kosten für den Nachtest und muss sich im Vorfeld zur Veröffentlichung der Ergebnisse verpflichten. Entwicklungsbegleitende Prüfungen vor dem eigentlichen Nachtest sind möglich, allerdings nicht bewertungsrelevant (vgl. „Test in einem Zuge“).

### 8.3.3 Validierung

Seit dem Jahr 2001 wurden die Ergebnisse von insgesamt vier *IKT-Warentests* veröffentlicht (vgl. [IKTW02], [IKTW04], [IKTW05], [IKTW05a]) und drei weitere *IKT-Warentests* begonnen (vgl. [IKTW06], [IKTW08a], [IKTW08b]). Die Erfahrungen aus der Vorbereitung, Durchführung und anschließenden Diskussion dieser Tests dienen als Grundlage für die nachfolgende Validierung des Konzepts vergleichender Produkt-/Verfahrenstests.

#### 8.3.3.1 Verständniskompetenzen

Im Rahmen der vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests, hier der *IKT-Warentests*, werden insbesondere Produkte und Verfahren untersucht, bei denen die Qualitätserwartungen der Netzbetreiber durch große Unsicherheiten geprägt sind. In diesen Fällen kann vermutet werden, dass die bis zu diesem Zeitpunkt verfügbare Qualitätsnachweise die für die Netzbetreiber relevanten Leistungsziele nicht ausreichend abbilden, z.B. weil die bisher verfügbare Versuchstechnik eine Überprüfung kaum oder gar nicht gestattete. Auch kann das Verständnis für die Wirkung der Produkte und Verfahren noch Lücken aufweisen. Den in Abbildung 2 dargestellten drei Verständniskompetenzen kommt damit eine nennenswerte Bedeutung zu.

Die **Leistungsziele und Prüfkriterien** werden in den Lenkungskreissitzungen unmittelbar mit den Entscheidungsträgern abgestimmt. Dies betrifft insbesondere die Frage, welche Bedeutung die Ziele der Standsicherheit, Dichtheit, Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit für den Einsatz der Produkte oder Verfahren haben. Während z.B. für den Neubau hohe Anforderungen an das vollständige Erreichen dieser Ziele gestellt werden (vgl. [IKTW02]), sind die Erwartungen beim Einsatz von Reparaturverfahren deutlich geringer. Hier wird im Wesentlichen nur eine Stabilisierung des Bauwerkszustandes (Standsicherheit ohne Nachweis), eine Stabilisierung der Funktionsfähigkeit (keine Abflusshindernisse) und eine weitgehende Verringerung von Ex- und Infiltrationen (Dichtheit) erwartet (vgl.

---

<sup>175</sup> Ob diese beiden Kriterien erfüllt sind, entscheiden allein die beteiligten Netzbetreiber auf Grundlage der durch das IKT zusammengestellten Herstellerinformationen.

[IKTW04]). Anforderungen an die Dauerhaftigkeit werden i.d.R. über zyklische Belastungen durch Reinigungsgeräte, Korrosionsbeanspruchungen oder z.B. äußere mechanische Belastungen aus Scherlast abgebildet (vgl. [IKTW02], [IKTW04]).

**Mathematisch-Physikalische Modelle** werden im Rahmen von *IKT-Warentests* insbesondere zur Entwicklung realitätsnaher Prüfaufbauten und Belastungsszenarien eingesetzt. Dies betrifft u.a. die Abschätzung der zu erwartenden Schadensmechanismen, die Nachbildung realitätsnaher Bettungsbedingungen und die Bewertung von Ergebnissen aus der Dichtheitsprüfung.

**Versuchstechnische Modelle** umfassen in vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests insbesondere zwei der in Abschnitt 5 dargestellten Modellebenen: In-situ-Untersuchungen und 1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen. Die In-situ-Untersuchungen werden zur Plausibilitätsprüfung eingesetzt, da durch sie praxisbezogene Einflüsse, wie Personalqualifikation und örtliche Randbedingungen, erst erkennbar werden. So lässt sich auch die Praxistauglichkeit der eingesetzten Technik nur unter In-situ-Bedingungen zuverlässig einschätzen. Die Systemprüfungen finden wiederum vorzugsweise unter Laborbedingungen statt, um insbesondere die Vergleichbarkeit der Prüfdurchgänge zu gewährleisten. 1:1-Versuche in bau- und betriebsähnlichen Belastungssituationen erlauben hier, dass der Boden als Bestandteil des Kanal- bzw. Leitungsbauwerkes in die Betrachtung mit einbezogen werden kann, so z.B. bei der Untersuchung von Injektionsverfahren für die Reparatur (vgl. [IKTW04]). Spezielle Versuchstechnik für Laborversuche unter realitätsnahen Beanspruchungen (vgl. Abschnitt 5.4) wurde bisher nur in Ausnahmefällen für einzelne Lastsituationen entwickelt<sup>176</sup>. Standardprüfungen an einzelnen Werkstoffen und Bauteilen sind in der Regel nicht Bestandteil des Prüfprogramms, sondern werden über entsprechende Prüfzeugnisse, z.B. aus Zulassungsverfahren des DIBt, mit in die Bewertung einbezogen.

#### 8.3.3.2 Handlungskompetenzen

Eine weitere Besonderheit der *IKT-Warentests* liegt darin, dass die Handlungskompetenzen wesentlich durch den Lenkungsreis der Netzbetreiber geprägt werden. Dies gilt für die Bewertung der Prüfergebnisse, ebenso wie für die Formulierung der Prüfaufgabe selbst.

---

<sup>176</sup> In dem laufenden IKT-Warentest [IKTW06] wurden Rohre mit definierten Schadensbildern in speziell dimensionierten Bettungskonstruktionen aus gespannten Elastomerkissen eingebaut, um bei Reparatur mittels Kurzlinern und Innenmanschetten gleiche und realitätsnahe Systemreaktionen unter Packerdruck zu gewährleisten.

## Prüfung

Die Prüfung umfasst nach Abbildung 2 die Definition der Prüfaufgabe durch den Auftraggeber, die eigentliche Prüfausführung durch qualifiziertes Personal einschließlich Qualitätssicherung sowie die objektive Dokumentation.

Ausgangspunkt für die systematische Beschreibung der Prüfung sind die **Anforderungen der Auftraggeber**, d.h. der beteiligten Netzbetreiber, bzw. der Nutzen der Prüfungen aus der Sicht der Mitglieder des Lenkungskreises. Die **Prüfaufgabe** liegt in *IKT-Warentests* sowohl in der *Prüfung zur Verifikation* als auch der *Prüfung als explorative Untersuchung* (vgl. Abschnitt 6.1). So werden die durch die Hersteller aufgestellten Hypothesen zur Leistungsfähigkeit ihrer Produkte einer Verifikation unterzogen und im Rahmen der Prüfung als Exploration auch innerhalb einer Produkt- bzw. Verfahrensgruppe empirische Regularitäten aufgedeckt<sup>177</sup>. Die Erkundung der am Markt verfügbaren Produkt- bzw. Verfahrensqualitäten führte im Einzelfall auch zur Klärung der grundsätzlichen Umsetzbarkeit gesetzlicher Anforderungen<sup>178</sup>. Auch Ansprüche an die konkreten Prüfungsszenarien werden innerhalb eines *IKT-Warentests* grundsätzlich mit dem Lenkungskreis iterativ abgestimmt.

Die **Objektivität der Dokumentation** erwächst in den *IKT-Warentests* insbesondere aus der *institutionellen Selbstverpflichtung* des IKT als neutralem und unabhängigem Prüfinstitut. Zum einen ist das IKT satzungsgemäß zu objektivem Handeln befähigt und verpflichtet. So legen die Satzungen der Gesellschafter jeweils in §2 Abs. 3 fest<sup>179</sup> „Auf die Arbeitsergebnisse des IKT haben Verein, einzelne Vereinsmitglieder oder Dritte keinerlei Einfluss. Der Verein stellt jederzeit sicher, dass das IKT seine Arbeit neutral und unabhängig durchführt.“ Zum anderen gehört die Berücksichtigung der technisch-wissenschaftlichen Regeln einer objektiven Dokumentation zum Selbstverständnis des IKT als „Forschungs- und Prüfinstitut“. Dies wird ebenfalls durch die Satzungen unterstrichen, die in §1 Abs. 1 als Zweck der Vereine auch die „Förderung von Wissenschaft“ hervorheben, sowie durch die Gemeinnützigkeit der Trägergesellschaft des IKT.

Die **Qualifikation des Personals** für die anspruchsvollen Aufgaben eines vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests leitet sich insbesondere aus der engen

---

<sup>177</sup> Im IKT-Warentest [IKTW04] offenbarte sich z.B., dass die eingesetzten Reparaturverfahren zwar durchweg zu optisch ansprechenden Ergebnissen führten, das Leistungsziel der Dichtheit jedoch regelmäßig verfehlt wurde. Diese Erkenntnis wurde in weiterführenden Artikeln für die Baupraxis auch durch das Fazit „Schön, aber undicht“ anschaulich zusammengefasst (vgl. Enewsletter unter [www.ikt.de/print.php?doc=402](http://www.ikt.de/print.php?doc=402)).

<sup>178</sup> So wurden in [IKTW05] Inspektionssysteme für Grundstücksentwässerungsnetze vergleichend getestet und durchweg mit dem Prüfurteil „gut“ bewertet. Grundsätzliche Zweifel an der Umsetzbarkeit der in der nordrhein-westfälischen Landesbauordnung LBO §45 verankerten Dichtheitsprüfung an privaten Leitungen mittels optischer Inspektion konnten so ausgeräumt werden. In der Folge wurde diese Regelung schließlich ins Landeswassergesetz (LWG NW §61a) überführt.

<sup>179</sup> vgl. Satzungen der beiden Fördervereine als Download unter <http://www.ikt.de/mitglieder/>

Verknüpfung zwischen den wissenschaftlichen und prüftechnischen Tätigkeitsfeldern des IKT ab. So liegen umfassende Erfahrungen in der Entwicklung komplexer prüftechnischer Konzepte aus Forschungs- und Entwicklungsvorhaben vor (vgl. Abschnitt 5). Darüber hinaus sind detaillierte Kenntnisse zu Prüfabläufen und Qualitätssicherungsinstrumenten aus der Tätigkeit der DIBt-anerkannten Prüfstelle für Bauprodukte verfügbar und werden routinemäßig entsprechend den Anforderungen nach Abschnitt 6.3 umgesetzt.

Die **Qualitätssicherung** der Prüfungen umfasst neben routinemäßigen Betrachtungen zur Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit entsprechend den Anforderungen der Prüfstelle für Bauprodukte insbesondere eine Betrachtung der Aussagekraft von Dichtheitsprüfungen und der Repräsentativität der Prüfbedingungen. In den Dichtheitsprüfungen werden nicht bestandene Prüfungen grundsätzlich nur nach optischer Bestätigung des Prüfergebnisses durch erkennbaren Medienverlust als „undicht“ gewertet, um eine Fehlinterpretation nicht bestandener Prüfungen als „falschundichte“ Ergebnisse nahezu auszuschließen (vgl. Abschnitt 4.5.5). Repräsentativität im Sinne der Ausführungen in Abschnitt 6.5 wird insbesondere mit Blick auf den Versuchsaufbau, die Bau- bzw. Sanierungsaufgabe, Temperatur- und Klimabedingungen sowie bau- und betriebsähnliche Belastungen bzw. Beanspruchungen betrachtet. Dem besonders kritischen Punkt der Personalauswahl für den Einbau wird grundsätzlich dadurch begegnet, dass dem Hersteller freigestellt ist, welchen Dienstleister er die Arbeiten ausführen lässt, so dass Fehler im Produkt- bzw. Verfahrenseinsatz im Sinne mangelhafter Qualitätssicherung und Schulung auch bewertungsrelevant sind.<sup>180</sup>

### *Bewertung und Entscheidung*

Die besondere Akzeptanz der *IKT-Warentest*-Ergebnisse rührt aus der engen Einbeziehung der Entscheidungsträger in die Bewertung der Produkte bzw. Verfahren. Neben der Definition von Qualitätsanforderungen und der Freigabe der Prüfkriterien legen die Vertreter der beteiligten Netzbetreiber im *Lenkungskreis* fest, wie die Prüfergebnisse im einzelnen zu bewerten, zu gewichten und zu einem Prüfurteil zusammenzufassen sind. Sie geben damit ihren Präferenzen ohne Verzerrung durch Dritte transparent Ausdruck, und ihre Bewertung orientiert sich explizit an qualitativen Leistungszielen und nicht allein an Mindestqualitätsstandards. In diesem Zusammenhang werden sowohl die relevanten Bewertungsdimensionen nach Abschnitt 7.2 als auch die Möglichkeiten kollektiver Bewertungs- und Entscheidungsprozesse gemäß Abschnitt 7.3 genutzt. Insbesondere werden in den Lenkungkreissitzungen die in Abschnitt 7.2 angeführten Bewertungsdimensionen, d.h. „*allgemeine Grundsätze*“, „*intuitive Urteile*“ und eine „*pragmatische Bewertung*“ mit Blick auf die Auswahl der zu testenden Produkte und Verfahren, die Festlegung

---

<sup>180</sup> vgl. Abschnitt 6.5 „Best Practice“ und Fußnote 117

der zu untersuchenden Leistungsziele und die spätere Formulierung einer nachvollziehbaren Bewertungsmatrix vollständig angesprochen.

**Allgemeine Grundsätze** spiegeln sich u.a. in sog. „k.o.-Kriterien“ wider, die eine Beteiligung eines Produktes und Verfahrens am Test von vornherein ausschließen oder zu direkten Abwertungen führen. Dies können z.B. fehlende Nachweise zur Umweltverträglichkeit oder das Nichtvorliegen einer DIBt-Zulassung sein (vgl. [IKTW04], [IKTW05a])<sup>181</sup>. Auch die Erfüllung weiterer, allgemein anerkannter methodischer Anforderungen an die Produkt- bzw. Verfahrensauswahl kann als allgemeiner Grundsatz angesehen werden. Bei der Auswahl sind das am Markt angebotene technische Verfahrenspektrum und die relevanten Marktanteile der Produkte und Verfahren sowie Bekanntheit, öffentliches Interesse und Innovationsgrad zu berücksichtigen. Dies alles unterstützt die spätere Objektivität und Aussagekraft einer vergleichenden Bewertung. Im Bewertungsprozess selbst betreffen allgemeine Grundsätze auch kulturelle Regeln bzw. die Objektivität im Umgang mit den Produkt- und Verfahrensanbietern („Fairness“), wenn z.B. Stellungnahmen der teilnehmenden Firmen mit dem Ziel einer ausgewogenen Darstellung auch im Ergebnisbericht veröffentlicht werden (vgl. [IKTW05a]).

**Intuitive Urteile** der Netzbetreiber finden in *IKT-Warentests* eine besondere Berücksichtigung in der Begleitung des gesamten Tests durch mehrfache Lenkungskreissitzungen<sup>182</sup>. Die Intuition der Netzbetreiber ist insbesondere für die Gewichtung der Bewertungskriterien von zentraler Bedeutung, da kaum verlässliche Informationen bzw. mathematisierbare Aussagen zur Bedeutung einzelner Leistungsziele für die Gesamtleistung der unterirdischen Kanal- und Leitungsnetze vorliegen. Im Sinne der Ausführungen in Abschnitt 7.2.2 entspricht die intuitive Gewichtung hier einem „*heuristikbasierten Urteil über Umweltstrukturen*“. Die Darstellung einer prozentualen Gewichtung in Abbildung 56 verdeutlicht, dass Unsicherheiten auch implizit durch subjektive Wahrscheinlichkeiten (vgl. Fußnote 143) interpretiert werden können. Auf intuitive Urteile wird darüber hinaus z.B. zur Bewertung der Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit („überzeugende“ Konstruktion bzw. „Optik“ des Sanierungsergebnisses) sowie im Umgang mit Reaktionen der Produkt- bzw. Verfahrensanbieter und für die Beurteilung der Praxisrelevanz von außergewöhnlichen Prüfsituationen und –ergebnissen zurückgegriffen.

Die **pragmatische Bewertung** ist durch ihre hohe Nachvollziehbarkeit insbesondere für die Dokumentation der Testergebnisse von großer Bedeutung. Dies betrifft sämtliche der in Abschnitt 7.2.3 aufgeführten fünf Prozessschritte. Die Prüfungs- und

---

<sup>181</sup> vgl. die Hinweise in den Abschnitten 1.2 und 3.1, dass die in dieser Arbeit schwerpunktmäßig betrachteten Qualitätsanforderungen über „*Mindestanforderungen der Arbeitssicherheit, der Umweltverträglichkeit und grundsätzlichen baulichen Eignung*“ hinausgehen.

<sup>182</sup> Die bisherigen Tests wurden jeweils in ca. 10 Lenkungskreissitzungen begleitet.

Bewertungsaufgabe wird zunächst z.B. auf der Grundlage von Inspektionsdaten konkretisiert; dies gilt insbesondere, wenn Produkte und Verfahren für die Instandhaltung untersucht werden (vgl. [IKTW05a]). Aus den relevanten Leistungszielen werden konkrete Qualitätsanforderungen, z.B. zur Dichtheit und Funktionsfähigkeit der Systeme, abgeleitet und im Sinne einer Nutzwertbetrachtung mit Gewichtungsfaktoren belegt (vgl. Abbildung 56). Die Bewertungsmaßstäbe orientieren sich an den Erfahrungen der Entscheidungsträger und den Konsequenzen für den praktischen Einsatz, so z.B. hinsichtlich unterschiedlicher Dichtheitsanforderungen für Reparatur- und Renovierungsverfahren. Die auf diesen Grundlagen ermittelten Prüfurteile und Gesamtergebnisse dienen den einzelnen Entscheidungsträgern dann als Entscheidungsvorlage für die individuelle Auswahl eines Produktes oder Verfahrens für den konkreten Einsatz vor Ort. Hier können im Einzelfall abweichende Gewichtungen, Risiken und Unsicherheiten der Qualitätsanforderungen zur Wahl unterschiedlicher Produkte und Verfahren führen. Ggf. können auf Grundlage der Prüfergebnisse auch weitere Vorkehrungen im Rahmen der Umsetzung getroffen werden, so z.B. ergänzende Abnahmeprüfungen. Letztlich kann auch der aktuell erzielbare Marktpreis der verfügbaren Produkte und Verfahren die Auswahl im konkreten Einzelfall maßgeblich beeinflussen.

**Kollektive Bewertungs- und Entscheidungsprozesse** spielen in *IKT-Warentests* durch die Einbeziehung des *Lenkungskreises* der beteiligten Netzbetreiber in sämtlichen Phasen des Projektablaufes eine herausragende Rolle. Die in Abschnitt 8.3.2.1 angeführten Entscheidungen des Lenkungskreises werden dabei in der Regel als Kompromissentscheidungen (vgl. Abschnitt 7.3) getroffen, d.h. die (auch intuitiven) Wertvorstellungen mehrerer oder gar aller Lenkungskreismitglieder werden in der Entscheidungsfindung durch gemeinsame Diskussion möglicher Lösungswege und Bewertungsansätze berücksichtigt. Die Erfahrungen zeigen, dass grundsätzlich durch die Lenkungskreismitglieder ein Konsens gewünscht und ein einstimmiges Votum angestrebt wird. Konnte in den bisherigen Projekten eine einstimmige Befürwortung einer Lösung auch nach Diskussion im Sinne eines Verhandlungsergebnisses nicht erzielt werden, so wurde in der Regel ein zweistufiges Verfahren gewählt, mit erstens einer Meinungsfindung durch Diskussion und Mehrheitsentscheid sowie zweitens einstimmiger Akzeptanz dieses Entscheids im Sinne einer optimalen Lösung für die Gruppe. Widersprüche zum Gruppenentscheid konnten so bisher ausgeschlossen werden. Dem Projektleiter des neutralen und unabhängigen Prüfinstituts, hier IKT, kommt in diesem Prozess die Rolle des Moderators zu, der die Beiträge aller Beteiligten zu einer ausgewogenen Bewertung zusammenfasst und wesentlich zur Findung eines für alle Lenkungskreismitglieder tragbaren Ergebnisses beiträgt.

#### 8.3.3.3 Verbesserungsprozesse

Der Kreislauf aus Innovation, Veränderung, Erfahrung, Forschung und Entwicklung wird im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses unmittelbar durch die

gutachtliche Form der Veröffentlichung von Testsergebnissen in Fachzeitschriften und im Internet angestoßen. Es entsteht ein Marktdruck, dem die Firmen dauerhaft nur durch kontinuierliche Weiterentwicklung ihrer Produkte stand halten können. Zahlreiche Nachtests neuer Produktvarianten belegen diese Wirkung<sup>183</sup>.

Darüber hinaus wirken sich die aktuellen gesellschaftlichen Wertvorstellungen und Nachhaltigkeitsforderungen stets auf die Rahmenbedingungen von *IKT-Warentests* aus, da gerade die Betreiber öffentlicher Ver- und Entsorgungsnetze unmittelbar durch die Öffentlichkeit und gesellschaftliche bzw. politische Gremien kontrolliert werden. Veränderte Anforderungen an Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Arbeitssicherheit der eingesetzten Produkte und Verfahren leiten sich auch aus gesetzlichen bzw. vertraglichen Aufträgen und Vorgaben ab (vgl. Abschnitt 7.1 und 7.2.1).

#### **8.3.4 Fazit**

Die Ausführungen in den Abschnitten 8.3.1 bis 8.3.3 belegen den besonderen Wert der vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests vor dem Hintergrund des in Abschnitt 2 vorgestellten systematischen Beschreibungsansatzes. Sämtliche Kompetenzbereiche werden umfassend angesprochen und das Prüfungs- und Bewertungskonzept ist argumentativ vollständig nachvollziehbar. Als Besonderheiten für die vergleichenden Produkt- bzw. Verfahrenstests, wie sie als *IKT-Warentest* umgesetzt wurden, sind vor allem die folgenden Merkmale festzuhalten:

##### **Entscheidungsträger als Auftraggeber**

Die im *Lenkungskreis* vertretenen Netzbetreiber sind sowohl als Teilmenge der von den Ergebnissen betroffenen Entscheidungsträger als auch – bei Förderung durch die öffentliche Hand - als Teilmenge der den Test finanzierenden Auftraggeber anzusehen. Die iterative Abstimmung der Prüfungsziele und -inhalte findet hier somit nicht nur mit Auftraggebern, sondern auch unmittelbar mit Entscheidungsträgern statt.

##### **Organisation kollektiver Bewertungs- und Entscheidungsprozesse**

Durch die Einrichtung eines *Lenkungskreises* ist in sämtlichen Testphasen eine kollektive Bewertung und Entscheidung auf Grundlage von Diskussions- und Verhandlungsprozessen möglich. Dieses formalisierte, aber dennoch offene Verfahren erlaubt schon während des laufenden Tests die Einbeziehung sämtlicher Bewertungsdimensionen, d.h. „*allgemeine Grundsätze*“, „*intuitive Urteile*“ und „*pragmatische Bewertung*“. Das Wissen um die mögliche Veröffentlichung der Testergebnisse und die hieraus erwachsenden Konsequenzen für Hersteller und nicht am Test beteiligte Netzbetreiber verstärkt dabei in hohem Maße das

---

<sup>183</sup> vgl. hierzu die Veröffentlichung aktueller Nachtest-Ergebnisse unter [www.ikt.de](http://www.ikt.de) => IKT-Warentest

Verantwortungsbewusstsein der Lenkungskreis-Mitglieder und ist in den Diskussionen als Verantwortungsdruck zu spüren.

### **Erste Testreihe als Anstoß für kontinuierlichen Verbesserungsprozess**

Die beteiligten Netzbetreiber finanzieren im Wesentlichen die Entwicklung des Prüfprogramms und des Bewertungsschemas. Die erste Testreihe stellt in diesem Sinne eine Pilotanwendung zur erstmaligen praktischen Umsetzung der Prüfung und Bewertung dar, deren Ergebnis einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess mit herstellerfinanzierten Nachtests anstößt.

Abbildung 57 fasst die dominierenden Merkmale der vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests sowie die in Abschnitt 8.3.2 bzw. Abschnitt 8.3.3 dargestellten Informationen zum Konzept bzw. zu den Ergebnissen der Validierung als Profil des in dieser Arbeit entwickelten systematischen Beschreibungsansatzes zusammen.



**Vergleichende Produkt-/Verfahrenstests:** Vergleichende Prüfung und Dokumentation durch neutrales und unabhängiges Institut; Prüfergebnisse als zuverlässige Basis für Auswahlentscheidungen der Netzbetreiber; Test-Einsätze unter realitätsnahen Einbau- und Betriebsbedingungen; Begleitung, (Teil-)Finanzierung und hoher Einfluss auf Bewertungs- und Entscheidungsprozesse durch Lenkungsreis der Netzbetreiber. Untersuchungsschwerpunkte: Systemprüfungen, Qualitätssicherung und Baustellenbegleitung. Veröffentlichung als Testberichte mit Übersichtstabellen in gutachtlicher Form.

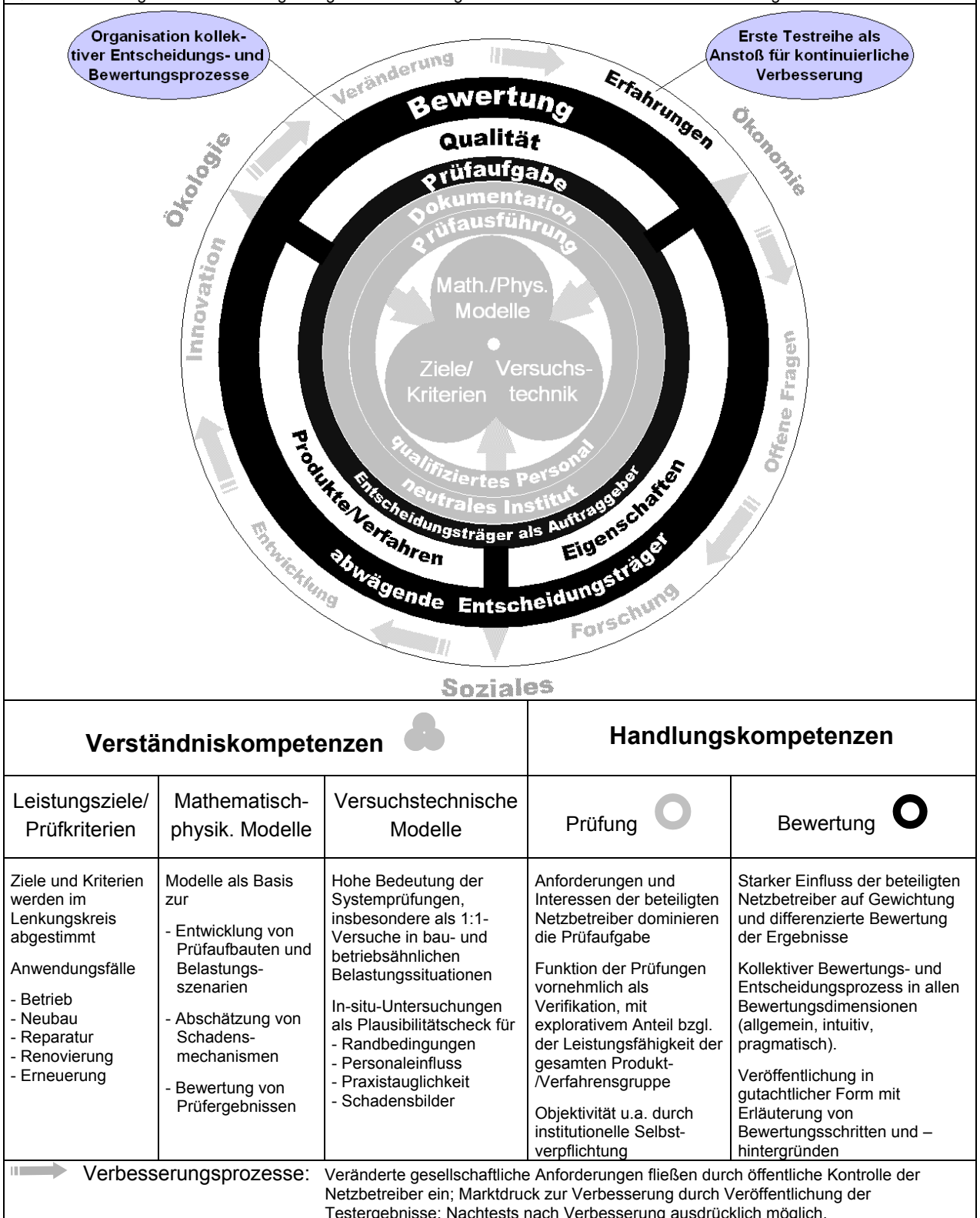


Abbildung 57 : Vergleichende Produkt-/Verfahrenstests, systematisches Profil gemäß Abbildung 2 Konzeptbeschreibung (oben), Schaubild mit Schwerpunkten (mittig), Kompetenzen und Verbesserungsprozesse (unten)

## 8.4 Qualitätsreports für Sanierungsverfahren

### 8.4.1 Hintergrund und Zielstellung

An die zur Sanierung der unterirdischen Kanal- und Leitungsnetze eingesetzten Produkte und Verfahren werden hohe Qualitätsanforderungen gestellt. Werden nämlich die zugesicherten Eigenschaften nicht erreicht, so stehen auch die angesetzten Restnutzungsdauern in Frage und somit auch die Wirtschaftlichkeit der gesamten Sanierungsmaßnahme. Insbesondere wenn die eingesetzten Bauteile erst auf der Baustelle ihre Material- und Geometrieigenschaften erhalten, kann die gelieferte Qualität erst im Einbauzustand, d.h. bei Abnahme der Einbauleistung, bewertet werden.

Um einen Überblick über die Einbauqualität der vor Ort eingesetzten Produkte und Verfahren zu erhalten, bietet es sich an, die Ergebnisse der üblichen Abnahmeprüfungen zu sammeln, systematisch auszuwerten und als sog. „Qualitätsreports“ zu veröffentlichen. Hierdurch kann auf der Grundlage der zunächst durch die einzelnen Auftraggeber getrennt und unabhängig von einander erfassten Abnahmeergebnisse ein flächendeckendes Bild der am Markt üblichen Einbauqualität gewonnen und den Auftraggebern<sup>184</sup> als erweiterter Informationshorizont vermittelt werden.

Als erstes und bisher einziges Sanierungsverfahren wurde das Schlauchlining-Verfahren<sup>185</sup> im Rahmen eines kontinuierlich fortgeschriebenen *Qualitätsreports* betrachtet. Seit dem Jahr 2004 werden am IKT die an Baustellenproben gewonnenen Prüfergebnisse in Abständen von ca. 12 Monaten systematisch ausgewertet und die Ergebnisse als *Linerreport*<sup>186</sup> veröffentlicht. Dieser *Qualitätsreport* soll im folgenden zur beispielhaften Erläuterung des Konzepts herangezogen und mithilfe des in dieser Arbeit dargestellten Beschreibungsansatzes validiert werden.

---

<sup>184</sup> Hauptzielgruppe sind die Auftraggeber der Sanierungsmaßnahmen, auch wenn die Produkt- und Verfahrensanbieter die Qualitätsreports ebenfalls als Informationsquelle und Grundlage für eigene Entwicklungsentscheidungen nutzen können.

<sup>185</sup> Liningverfahren, zu denen insbesondere das Schlauchlining gehört, sind mit einem Anteil von 88% die am häufigsten eingesetzten Renovierungsverfahren [IKT03c]. Untersuchungen des IKT zeigten, dass die besonderen Produktionsbedingungen für Schlauchliner, die erst auf der Baustelle ihre Material- und Geometrieigenschaften erhalten, einen hohen Einfluss auf die Qualität des Endproduktes haben können. Die grundsätzliche Aussagekraft von baubegleitend ermittelten mechanischen Kennwerten an Probestücken wurde bestätigt. (vgl. [bi04])

<sup>186</sup> vgl. bi-UmweltBau 5/2004, 1/2006, 2/2007, 2/2008, 2/2009.

## 8.4.2 Konzept

### 8.4.2.1 Beteiligte

Die Entwicklung eines *Linerreports* unterteilt sich in die Phasen: Prüfungen, inhaltliche Auswertung, Dokumentation und journalistische Veröffentlichung im Stil eines Berichts bzw. einer Reportage<sup>187</sup>. In allen Phasen ist ausschließlich qualifiziertes Personal beteiligt; dies betrifft mit Blick auf die Prüfung, inhaltliche Auswertung und Dokumentation insbesondere die Mitarbeiter und die Leitung der DIBt-anerkannten Prüfstelle für Bauprodukte und mit Blick auf den Stil und den Weg der Veröffentlichung die Pressestelle und Geschäftsführung des neutralen und unabhängigen Instituts. Die Auftraggeber haben bereits mit Beauftragung von Abnahmeprüfungen ihr Einverständnis zur weiteren Verarbeitung der Prüfergebnisse im Rahmen eines *Linerreports* gegeben. Das Einverständnis der betroffenen Sanierungsfirmen ist nur notwendig, wenn diese gleichzeitig Auftraggeber der Abnahmeprüfung sind<sup>188</sup>.

### 8.4.2.2 Inhalte

Datengrundlage für die Auswertungen der *Linerreports* sind die im Berichtszeitraum durch die Prüfstelle für Bauprodukte erzielten Ergebnisse aus Prüfungen an ca. 1000 Baustellenproben. Eine Sanierungsfirma wird nur dann in der Auswertung berücksichtigt, wenn mindestens 25 Linerproben von fünf verschiedenen Baustellen im Betrachtungszeitraum durch das IKT geprüft worden sind<sup>189</sup>. Die eingesandten Baustellenproben werden auf zwei zentrale Schlauchliner-Eigenschaften hin untersucht: die mechanischen Kennwerte (E-Modul, Biegespannung<sup>190</sup> und Wanddicke) und die Wasserdichtheit. Die Beschränkung auf anerkannte und standardisierte Prüfungen sichert in hohem Maße die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse sowie eine breite Datenbasis mit Proben von zahlreichen Baustellen und Auftraggebern. Die Struktur der Datenbasis wird im *Linerreport* unter Angabe der Sanierungsfirmen bzw. Linersysteme und Linertypen, der Anzahl der Proben und mit Informationen zur anonymisierten Auftraggeberstruktur<sup>191</sup> dargestellt.

---

<sup>187</sup> daher auch der Begriff Linerreport

<sup>188</sup> Auf die besonderen Interessenkonflikte, die aus einer solchen Doppelrolle resultieren können, wird in den *Linerreports* seit Erstveröffentlichung regelmäßig hingewiesen, vgl. abschließender Hinweis im *Linerreport* 5/2004 „den Bock zum Gärtner“ und Abschnitt 6.2 „objektiv“.

<sup>189</sup> Diese Festlegung wurde bereits für die erste Auswertung intuitiv mit Blick auf die Marktdurchdringung und zu erwartenden Qualitätsschwankungen getroffen, anschließend mit Auftraggebern und Herstellern diskutiert und in der Folge unverändert auch für weitere Auswertungen beibehalten. Eine mathematisch-statistische Bewertung liegt nicht vor.

<sup>190</sup> Dabei handelt es sich um die Größe der Biegespannung bei ersten Brucherscheinungen in der Linerstruktur.

<sup>191</sup> Angegeben werden je Linersystem die Anteile der Aufträge von Sanierungsfirmen- bzw. Bauherrenseite (Summe 100%).

Die Ergebnisse der Prüfungen der mechanischen Kennwerte und Wasserdichtheit werden tabellarisch entsprechend Tabelle 3 zusammengefasst. Als Sollwerte für die mechanischen Kennwerte gelten grundsätzlich die vertraglichen Vereinbarungen zwischen Auftraggeber und Sanierungsfirma bzw. die Sollwerte der DIBt-Zulassung.

Tabelle 3 : *Linerreport: Tabellarische Darstellungen der Prüfergebnisse*  
 a) *Prüfergebnisse der mechanischen Kennwerte*  
 b) *Ergebnisse der Wasserdichtheitsprüfung*

<b>a) Prüfergebnisse (<math>E/\sigma_{fb}/d</math>)</b>				
in Anlehnung an [ISO178] und [EN13566]				
Sanierungsfirmen/Linersysteme*	Jahr		Vorjahr	Tendenz
	Anz. Proben	Sollwert** erreicht in % der Prüfungen	Sollwert** erreicht in % der Prüfungen	
Firma/System 1	66	100,0	99,5	↑
Firma/System ...	25	...	...	...
Firma/System m	34	94,1	99,0	↓
<b>Mittelwert</b>		<b>94,0</b>	<b>89,9</b>	<b>↑</b>
Firma/System n	168	93,5	84,2	↑
Firma/System ...	...	...	...	↓
Firma/System z	...	...	...	...

\* Einzelne Sanierungsfirmen setzen teilweise mehrere Linersysteme ein  
 \*\* Sollwerte laut Auftraggeber-Angaben (Statik bzw. Probenbegleitschein)

<b>b) Prüfergebnisse Wasserdichtheit</b>				
nach APS-Prüfrichtlinie [APS05]				
Sanierungsfirmen/Linersysteme*	Jahr		Vorjahr	Tendenz
	Anz. Proben	wasserdicht in % der Prüfungen	wasserdicht in % der Prüfungen	
Firma/System 1	25	100,0	100,0	↔
Firma/System ...	63	...	...	...
Firma/System m	71	100,0	99,0	↑
<b>Mittelwert</b>		<b>93,8</b>	<b>88,8</b>	<b>↑</b>
Firma/System n	33	84,8	61,9	↑
Firma/System ...	...	...	...	↓
Firma/System z	...	...	...	...

\* Einzelne Sanierungsfirmen setzen teilweise mehrere Linersysteme ein

Die *Linerreports* enthalten grundsätzlich nur eine Zusammenstellung der Prüfergebnisse und **keine eigene Bewertung** oder gar Notenvergabe wie bei den *IKT-Warentests*. Um jedoch die Bewertung der Ergebnisse durch die Entscheidungsträger zu erleichtern, werden wesentliche Hintergründe und Tendenzen der Ergebnisse sowie übergreifende Vergleiche zu Ergebnissen vorangegangener Jahre journalistisch aufbereitet und beschrieben. Ähnlich wie die vergleichenden Testtabellen des *IKT-Warentests* führen so auch die *Linerreports* zu einer transparenten Darstellung der Leistungsfähigkeit der Anbieter und damit zu einem Marktdruck, der einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess einleiten kann. Gleichzeitig wird bei Veröffentlichung bereits auf die Grenzen der Aussagekraft reiner Laborprüfungen hingewiesen, insbesondere mit Blick auf

- die möglichen Einflüsse aus der Auswahl von Ort und Zeitpunkt der Probenentnahme,
- den Stichprobencharakter einer einzelnen Baustellenprobe,
- die Beschränkung auf einzelne, vergleichbare Prüfkriterien,

so dass die Ergebnisse keinesfalls als alleiniger Maßstab zur Bewertung oder zum Vergleich der Sanierungsfirmen und ihrer Linersysteme empfohlen werden. Empfehlungen im *Linerreport* verzichten darüber hinaus auf detaillierte Hinweise zu Verbesserungspotenzialen, wie sie im *IKT-Warentest* üblich sind; sie geben lediglich allgemeine Hinweise zur Notwendigkeit von Produkt- und Leistungsverbesserungen und zur Bedeutung und zu den Perspektiven von Qualitätssicherungsmaßnahmen.

### 8.4.3 Validierung

Seit dem Jahr 2004 wurden fünf *Linerreports* veröffentlicht<sup>186</sup>. Die Erfahrungen aus der Vorbereitung, Umsetzung und anschließenden Diskussion dieser Veröffentlichungen dienen als Grundlage für die nachfolgende Validierung eines Qualitätsreports für Sanierungsverfahren.

#### 8.4.3.1 Verständniskompetenzen

Im Rahmen der Ausarbeitung eines *Linerreports* greift das hierfür verantwortliche Personal stets auf die Kompetenzen des IKT und seiner Prüfstellen gemäß Abbildung 2 zurück. Die **Versuchstechnik** unterliegt insbesondere den Anforderungen nach DIN EN ISO/IEC 17025 [ISO17025] und weist eine hohe Anerkennung und Standardisierung auf. Die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen **Leistungszielen und Prüfkriterien**, z.B. zwischen Standsicherheit und mechanischen Kennwerten, sowie der kompetente Umgang mit **mathematisch-physikalischen Modellen**, z.B. zur Dichtheitsprüfung, fußt u.a. auf den besonderen Erfahrungen aus der IKT-Forschung [IKT03c] und dem fortlaufenden Kontakt der Prüfstelle zur Praxis. So werden z.B. Sollwerte und Kriterien der Wasserdichtheitsprüfung in den *Linerreports* differenziert dargestellt und in ihrer Bedeutung und Aussagekraft fortlaufend hinterfragt<sup>192</sup>. Darüber hinaus werden die Verständniskompetenzen ständig weiterentwickelt und auf die aktuellen Anforderungen der Netzbetreiber ausgerichtet (vgl. [IKT09]).

#### 8.4.3.2 Handlungskompetenzen

Eine wesentliche Leistung des Qualitätsreport-Konzepts liegt darin, dass die Aggregation verteilter, aber schon vorhandener Informationen den

---

<sup>192</sup> Sollwerte können sich aus den vertraglichen Vereinbarungen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer oder in Ausnahmefällen aus den Mindestanforderungen der DIBt-Zulassung ableiten. Kriterien für die Dichtheitsprüfung sind in optische Bewertungen und Betrachtungen zur Menge des Prüfmittels zu unterscheiden (vgl. [DIN50104]).

Entscheidungsträgern gestattet, die Produkt- und Verfahrensleistungen umfassender als lediglich auf Basis eigener Erfahrungen und Prüfergebnisse zu bewerten. Die Ergebnisse aus einzelnen, voneinander unabhängigen Abnahmeprüfungen werden gesammelt, ausgewertet und in einer übergeordneten Dokumentation vergleichend zusammengefasst und veröffentlicht. Sie werden damit Gegenstand der öffentlichen Diskussion und Meinungsbildung jedes einzelnen Entscheidungsträgers.

### *Prüfung*

Die Prüfung umfasst nach Abbildung 2 die Definition der Prüfaufgabe durch den Auftraggeber, die eigentliche Prüfausführung durch qualifiziertes Personal einschließlich Qualitätssicherung sowie die objektive Dokumentation.

Zunächst stellt sich die Frage, wer im Sinne des systematischen Beschreibungsansatzes überhaupt Auftraggeber eines Qualitätsreports ist bzw. für wen er eine Funktion oder einen Nutzen hat. Grundsätzlich finanzieren die externen Auftraggeber zwar die einzelne Prüfung eines Probestückes, nicht aber die Zusammenführung der Ergebnisse im Rahmen eines übergreifenden Berichtes. Die **Funktion des Linerreports** ergibt sich daher im Sinne einer Gemeinnützigkeit des Prüfinstituts. Als *Prüfung zur Parameterbestimmung* nach Abschnitt 6.1 dient das „Sammeln der Daten“ dem Marktüberblick und auch der Einschätzung der charakteristischen Eigenschaften von Schlauchliner-Produkten. Dieser Informationsgewinn kommt den Auftraggebern der Einzelprüfungen ebenso wie anderen Netzbetreibern zugute, z.B. als Grundlage für Ausschreibungen von weiteren Baumaßnahmen und die Auswahl geeigneter Verfahren. Darüber hinaus können die Ergebnisse den Herstellern z.B. als Orientierung für die Produktentwicklung dienen. Schließlich profitiert auch das Prüfinstitut selbst, durch die Erklärung seiner neutralen und unabhängigen Position am Markt.

Eine weitere **Funktion der Prüfungen** liegt für den externen Auftraggeber zunächst definitionsgemäß im Sinne der Bauabnahme in einer *Prüfung zur Verifikation*. Die durch die Hersteller aufgestellten Hypothesen zur Leistungsfähigkeit ihrer Produkte werden – ähnlich wie bei den *IKT-Warentests* – einer Überprüfung unterzogen. Darüber hinaus bietet die Aggregation im *Qualitätsreport* auch Aspekte der Erkundung der am Markt angebotenen Produkte und Verfahren im Sinne einer *Prüfung als explorative Untersuchung*, wenn innerhalb einer Produkt- bzw. Verfahrensgruppe oder im Vergleich zwischen diesen empirische Regularitäten aufgedeckt werden<sup>193</sup>.

---

<sup>193</sup> Im dritten IKT-Linerreport (bi UmweltBau 2/2007) zeigten sich z.B. tendenziell Ergebnisunterschiede in Abhängigkeit der betrachteten Produktgruppe, hier GFK- bzw. Nadelfilz-Liner.

Die **Objektivität der Dokumentation** erwächst wiederum, wie in den *IKT-Warentests*, aus der *institutionellen Selbstverpflichtung* des IKT (vgl. Abschnitt 8.3.3.2). Darüber hinaus orientiert sich die DIBt-anerkannte Prüfstelle des Instituts in den einzelnen Prüfungen auch an den *gesetzlichen Regelungen* für Zertifizierungs-, Überwachungs- und Prüfstellen entsprechend Bauproduktengesetz sowie den *technisch-wissenschaftlichen Regelungen* nach [ISO17025].

Die besondere **Qualifikation des Personals** und die **Qualitätssicherung** der Prüf Abläufe leitet sich wiederum aus der engen Verknüpfung zwischen den wissenschaftlichen und prüftechnischen Tätigkeitsfeldern des IKT sowie der weitgehenden Standardisierung der für den *Qualitätsreport* relevanten Prüfungen ab. Darüber hinaus fordert auch die Anerkennung einer Prüfstelle durch das DIBt sowie die Akkreditierung nach [ISO17025] den Einsatz von entsprechend qualifiziertem Personal sowie eine ausreichende Qualitätssicherung. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Dichtheitsprüfung nach APS-Richtlinie [APS05], die ausdrücklich die optische Bewertung zur Feststellung von Undichtheiten festlegt und damit entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 4.5.5 „*falschundichte*“ Ergebnisse nahezu ausschließt<sup>194</sup>.

#### *Bewertung und Entscheidung*

Wie bereits einleitend dargestellt, enthalten die *Qualitätsreports* keine ausdrückliche Bewertung der Prüfergebnisse oder gar Notenvergabe für die Produktleistungen, wie sie aus dem *IKT-Warentest* bekannt sind. Dennoch werden durch die Auftraggeber der Prüfungen drei von fünf wesentlichen Prozessschritten einer **pragmatischen Bewertung** im Sinne des Abschnitts 7.2.3 bereits vor bzw. mit Beauftragung des IKT als neutralem und unabhängigen Prüfinstitut und gleichzeitiger Freigabe der Ergebnisse zur Weiterverarbeitung im *Qualitätsreport* vollzogen.

Erstens betrifft dies die Zustimmung zu der durch das IKT vorgegebenen *Formulierung der Prüfaufgabe* als Reihe vergleichbarer, standardisierter Prüfungen. Zweitens betrifft dies die vertragliche *Definition von Qualitätsanforderungen* im Sinne baumaßnahmenbezogener Sollwerte. Drittens hat der Auftraggeber bereits durch die Ausschreibung und Vergabe der Bauleistung an das ausgewählte Sanierungsunternehmen zur *Erkundung und Bewertung der Leistungsfähigkeit* von Sanierungsunternehmen beigetragen. Lediglich die nach Abschnitts 7.2.3 verbleibenden beiden Prozessschritte „*Geeignete Produkte bzw. Verfahren auswählen*“ und „*Bewertung und Entscheidung in der Umsetzung treffen*“ werden als unabhängige Entscheidung des einzelnen Entscheidungsträgers auf die Zeit nach

---

<sup>194</sup> Stand der Technik ist die Prüfung nach APS-Richtlinie. Lediglich einige wenige Auftraggeber bestehen auf Prüfungen, bei denen ein zulässiger Wasserzugabewert in Anlehnung an DIN EN 1610 als maximal tolerierbarer Wasserdurchfluss durch die Linerwand interpretiert wird.

der Veröffentlichung des Qualitätsreports und damit z.T. in einen kollektiven Bewertungs- und Entscheidungsprozess verlagert.

Im Sinne eines **kollektiven Bewertungs- und Entscheidungsprozesses** können nach der Veröffentlichung eines *Qualitätsreports* erhebliche Wechselwirkungen sowie ein starker Meinungs austausch zwischen unterschiedlichen Gruppen von Auftraggebern und Entscheidungsträgern auftreten (vgl. [Hei08]). Letztlich ist nicht auszuschließen, dass auch dieser öffentliche Diskussionsprozess zur Entscheidung des Einzelnen über die Eignung eines Produktes für seinen konkreten Anwendungsfall beiträgt. Die abschließende Bewertung der Ergebnisse verbleibt aber allein bei den Entscheidungsträgern als Leser der Qualitätsreports. Die Gegenüberstellung der Prüfergebnisse für sämtliche geprüften Produkte (vgl. Tabelle 3) einschließlich der Auftraggeberstruktur der Prüfungen<sup>195</sup> sowie der journalistische Stil der Darstellung erleichtern die Vergleichbarkeit und das Erkennen von Trends und Zusammenhängen als Basis für die eigene Bewertung.

#### 8.4.3.3 Verbesserungsprozesse

Die Veröffentlichung der *Linerreports* initiierte und beschleunigte in hohem Maße die kontinuierliche Verbesserung der eingesetzten Schlauchliniungsverfahren. Ein ähnlicher Kreislauf aus Innovation, Veränderung, Erfahrung, Forschung und Entwicklung, wie er auch mit den *IKT-Warentests* angestoßen wurde, ist auch hier zu beobachten. Insbesondere durch die regelmäßige Veröffentlichung und hohe Transparenz der dargestellten Informationen entsteht ein dauerhafter Marktdruck, dem die Firmen nur durch kontinuierliche Weiterentwicklung ihrer Prozesse und Produkte stand halten können. Dies betrifft die verfahrensinternen Abläufe, ebenso wie echte Produktveränderungen und die Erweiterung der Produktpaletten der Anbieter zur besseren Anpassung auf unterschiedliche Einsatzbereiche und –grenzen (vgl. [bi08-1], [bi08-2]). Die in der vierten Ausgabe des *Linerreports* [Wan08] dokumentierten, deutlich besseren Gesamtergebnisse unterstützten bereits dieses Bild.

Darüber hinaus führte die Einführung der Qualitätsreports auch unmittelbar zu einer weitergehenden Standardisierung der Prüfkriterien (vgl. [Hei08a]). Während für die Prüfung der mechanischen Kennwerte von Probestücken auf nationale oder sogar internationale Normen zurückgegriffen werden konnte, wurden das Prüfverfahren und die Prüfkriterien für die Dichtheitsprüfung an Probestücken bis dahin weitgehend frei durch das jeweilige Prüfinstitut festgelegt. Nach öffentlicher Diskussion dieses Themas infolge der Veröffentlichung des ersten *Linerreports* gründete sich der „Arbeitskreis Prüfinstitute Schlauchliner“ (APS), dem fünf führende Prüfinstitute

---

<sup>195</sup> Auch diese Information kann im Sinne einer *Prüfung als explorative Untersuchung* genutzt werden, um Einflussnahmen der Sanierungsfirmen durch eigene Vergabe von Prüfaufträgen zu erkennen.



dieses Bereiches angehören, und erarbeitete die gemeinsame APS-Prüfrichtlinie [APS05] zur Dichtheitsprüfung von Probestücken aus Schlauchlinern. Insbesondere die Auswahl geeigneter Probenentnahmestellen ist aber weiter Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung und der Entwicklung neuartiger Messtechnik (vgl. [IKT09]).

#### **8.4.4 Fazit**

Die Ausführungen in den Abschnitten 8.4.1 bis 8.4.3 erläutern den Hintergrund und Aufbau des Qualitätsreport-Konzepts für Sanierungsverfahren am Beispiel des *Linerreports* vor dem Hintergrund des in Abschnitt 2 vorgestellten systematischen Beschreibungsansatzes. Die Verständniskompetenzen sowie die Handlungskompetenzen einer Prüfung werden umfassend angesprochen und auch die Verbindung zur Bewertung durch die Entscheidungsträger leitet sich hieraus unmittelbar ab. Im Ergebnis ist das zugrunde liegende Prüfungs- und Bewertungskonzept argumentativ vollständig nachvollziehbar. Als Besonderheiten lassen sich die folgenden Merkmale festhalten:

##### **Zusammenführung verteilter Informationen mit hohem Praxisbezug**

Eine wesentliche Leistung des Qualitätsreport-Konzepts liegt darin, dass verteilt vorhandene Informationen verschiedener Entscheidungsträger in einer übergeordneten Dokumentation zusammengefasst und veröffentlicht werden. Dies führt zu einer räumlichen und zeitlichen Verbreiterung des Informationshorizonts der einzelnen Entscheidungsträger. Sämtliche Auswertungen im *Linerreport* beruhen z.B. auf Prüfergebnissen von ca. 1000 Baustellenproben aus der Bauabnahme tatsächlicher Produkt- und Verfahrenseinsätze. Als Sollwerte für die mechanischen Kennwerte gelten grundsätzlich die tatsächlichen vertraglichen Vereinbarungen zwischen Auftraggeber und Sanierungsfirma.

##### **Anerkannte standardisierte Prüfungen mit geringem Aufwand**

Sämtliche Prüfungen zur Bestimmung der relevanten mechanischen Kennwerte und Dichtheit der Probekörper beruhen auf (international) anerkannten und standardisierten Prüfverfahren. Darüber hinaus führte die Diskussion der *Linerreports* auch zu einer weitergehenden Qualitätsverbesserung der Prüfabläufe und -techniken, so dass Lücken in der Standardisierung geschlossen werden konnten. Der im vorliegenden Fall vergleichsweise geringe Aufwand zur Versendung und Prüfung von standardisierten Probekörpern erlaubt darüber hinaus ein wirtschaftlich sinnvolles Massengeschäft mit positiven Skaleneffekten, so dass die o.a. große Zahl an Prüfergebnissen erst möglich wird.

##### **Wirkung auf das Qualitätsbewusstsein im Markt**

Durch die regelmäßige Aktualisierung und Veröffentlichung der Qualitätsreports entsteht ein Marktdruck, der letztlich die kontinuierliche Verbesserung der eingesetzten Sanierungsverfahren beschleunigt. Dies betrifft verfahrensinterne

Abläufe ebenso wie echte Produktveränderungen und die Erweiterung der Produktpaletten der Anbieter. Die Wirkung auf das Qualitätsbewusstsein im Markt spiegelt sich durch unterschiedliche Reaktionen wider, so z.B. die Diskussion über Bewertungskriterien (z.B. Dichtigkeit), die Korrektur unangemessener Sollwerte in den Zulassungen, eine Umsatzverschiebung zu zuverlässigeren Produkten und Verfahren und die Innovationsbereitschaft der Sanierungsfirmen mit Blick auf Qualitätsmerkmale.

Abbildung 58 fasst die dominierenden Merkmale der Qualitätsreports für Sanierungsverfahren sowie die in Abschnitt 8.4.2 bzw. Abschnitt 8.4.3 dargestellten Informationen zum Konzept bzw. zu den Ergebnissen der Validierung als Profil des in dieser Arbeit entwickelten systematischen Beschreibungsansatzes zusammen.

**Qualitätsreports für Sanierungsverfahren:** Übersicht über die bei einer Vielzahl von Auftraggebern in situ erzielte Ausführungsqualität; systematische Auswertung von Prüfergebnissen aus der Bauabnahme von am Markt verfügbaren Sanierungsverfahren; Veröffentlichung der Ergebnisse durch das Prüfinstitut als Qualitätsreport einer Produkt-/Verfahrensgruppe, erstes Beispiel „Linerreport“; Bearbeitungsphasen: Einzelprüfungen, zusammenfassende Auswertung und Dokumentation; keine eigene Bewertung; Veröffentlichung in journalistischem Stil als Qualitätsreport.

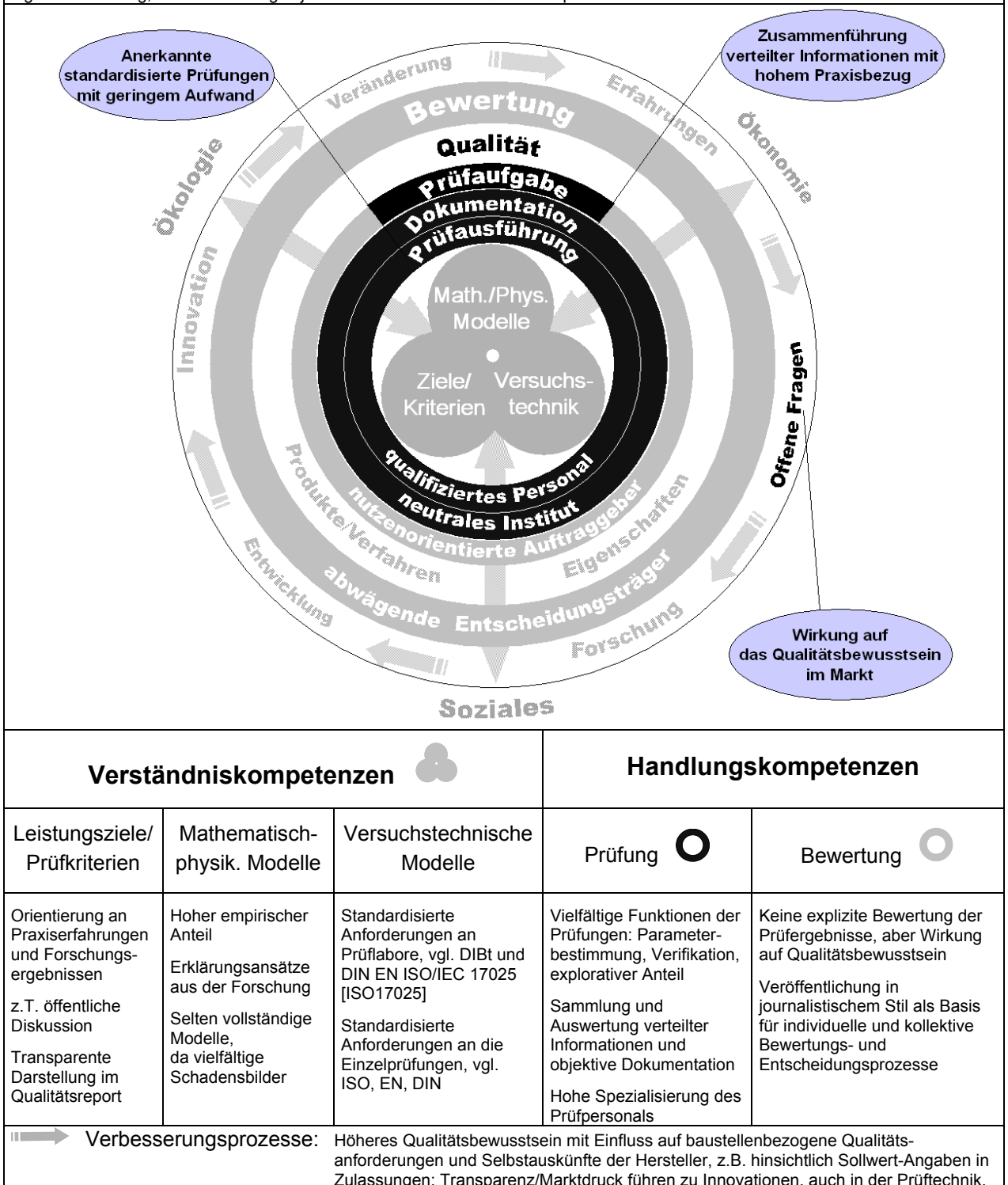


Abbildung 58 : Qualitätsreports für Sanierungsverfahren, systematisches Profil gemäß Abbildung 2 Konzeptbeschreibung (oben), Schaubild mit Schwerpunkten (mittig), Kompetenzen und Verbesserungsprozesse (unten)

## 8.5 Schlussfolgerungen

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Synthese am Beispiel neu entwickelter Prüfungs- und Bewertungskonzepte lässt einige übergeordnete Schlussfolgerungen zu:

Die an dem **systematischen Beschreibungsansatz** nach Abschnitt 2 orientierten Konzept-Darstellungen bestätigen dessen **Aussagekraft** für den vorliegenden Anwendungsfall. Die Möglichkeit zum Rückgriff auf die in den Abschnitten 3 bis 7 vereinbarten Begriffsdefinitionen und Klassifizierungen unterstützt darüber hinaus die Validierung der vorgestellten Konzepte mit Blick auf die „*sachgerechte Ansprache der relevanten Kompetenzen*“ und die „*argumentative Nachvollziehbarkeit des Prüfungs- und Bewertungskonzepts*“<sup>196</sup>.

Der **Nutzen des systematischen Beschreibungsansatzes** zeigt sich insbesondere darin, dass er für den besonderen Anwendungsfall des unterirdischen Kanal- und Leitungsbaus schrittweise erlaubt, ein Prüfungs- und Bewertungskonzept zu beschreiben, dieses Konzept und seine Zusammenhänge zu verstehen, wesentliche Merkmale eines Konzepts zu identifizieren und schließlich verschiedene Konzepte hinsichtlich ihrer wesentlichen Merkmale zu vergleichen. Dieser Vergleich ist im vorliegenden Fall unmittelbar anhand der in den Abschnitten 8.2, 8.3 und 8.4 entwickelten, systematischen Profile gemäß Abbildung 54, Abbildung 57 bzw. Abbildung 58 möglich und gestattet die folgende, übergreifende Bewertung:

- Die inhaltlichen Schwerpunkte der Konzepte sind äußerst unterschiedlich; sie liegen in der Forschung sowohl auf *Verständnis- als auch Handlungskompetenzen*, während sie bei den Qualitätsreports und bei den vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests im Wesentlichen auf den *Handlungskompetenzen der Prüfung bzw. Bewertung* liegen.
- Die dargestellten drei Prüfungs- und Bewertungskonzepte ergänzen sich in ausgezeichneter Weise. Sämtliche Kompetenzbereiche werden als Schwerpunkte wenigstens eines Konzeptes angesprochen.
- Alle Konzepte weisen integrierte Verbesserungsprozesse auf und schließen auch den Wandel politisch-gesellschaftlicher Anforderungen direkt oder indirekt ein, z.B. über die wissenschaftliche Diskussion und die Einbeziehung der Netzbetreiber als Mitglieder von Projektbeiräten und Lenkungskreisen.

Mit Blick auf die **Auswahl von Prüfungs- und Bewertungskonzepten** lässt sich folgende grundsätzliche **Handlungsempfehlung** ableiten:

---

<sup>196</sup> vgl. Abschnitt 8.1

Die Auswahl des Prüfungs- und Bewertungskonzeptes sollte sich am Entwicklungsstand und der Marktverbreitung der Produkte orientieren. Im zeitlichen Ablauf der Produkt- und Verfahrensentwicklung ergänzen sich die in diesem Abschnitt dargestellten Konzepte der netzbetreiberorientierten Forschung, der vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests und der Qualitätsreports. Werden durch die Netzbetreiber neue Fragestellungen identifiziert<sup>197</sup> und besitzen die ggf. angebotenen Produkte und Verfahren noch geringe Marktverbreitung, so zielen Prüfungs- und Bewertungsaktivitäten i.d.R. auf explorative Untersuchungen im Sinne der netzbetreiberorientierten Forschung. Durchdringen dagegen die Lösungsversuche der Anbieter bereits den Markt, so bieten sich vergleichende Prüfungen und Bewertungen an. Handelt es sich um bewährte Produkte und Verfahren, die bereits das grundsätzliche Vertrauen der Netzbetreiber genießen, so erhalten die Netzbetreiber über Qualitätsreports einen aktuellen Überblick über die stichprobenhaft geprüfte Einbauqualität. Der so beschriebene Ablauf kann nicht nur Fortschritte, sondern auch Rückschritte aufweisen, z.B. wenn das Vertrauen in die Qualität bewährter Produkte und Verfahren schwindet oder veränderte Leistungsziele deren Weiterentwicklung notwendig machen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass sich die im Abschnitt 8 dargestellten Prüfungs- und Bewertungskonzepte iterativ im engen Kontakt zu den Entscheidungsträgern, hier insbesondere den Betreibern öffentlicher Kanal- und Leitungsnetze, entwickelt haben. Sie stellen in ihrer Detail-Ausprägung somit ein zeitgemäßes Optimum dar. Eine Weiterentwicklung ist bei Änderung der Rahmenbedingungen nicht nur möglich, sondern notwendig und anzustreben. Welche grundsätzlichen Entwicklungspotenziale für die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen zu erkennen sind, soll im folgenden Abschnitt 9 vertieft werden.

---

<sup>197</sup> z.B. bei Betrachtung weiterer (privater) Netzbereiche, vgl. Grundstücksentwässerung als Teil der Kanalisation in LWG NW §61a [NRW07]

## 9 Entwicklungspotenziale der Prüfung und Bewertung

In dieser Arbeit wurden die Hintergründe und Zusammenhänge der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren systematisch beschrieben und anhand unterschiedlicher Konzept-Betrachtungen erprobt. Auf dieser Grundlage sollen nun besondere Entwicklungspotenziale benannt und begründet werden. Dabei werden folgende Gesichtspunkte angesprochen:

- die Erweiterung von Leistungszielen,
- die Funktionen von Bettungs- und Verfüllmaterialien,
- die verstärkte Vernetzung des Wissens,
- die Wirtschaftlichkeit einer Prüfung und Bewertung,
- die Einflüsse des Bau- bzw. Sanierungspersonals auf die Produkt- bzw. Verfahrensqualität.

### 9.1 Erweiterung der Leistungsziele

Ökologische, ökonomische und soziale Randbedingungen und die mit diesen Bedingungen verbundenen Gesellschafts- und Wirtschaftssysteme sind einem beschleunigten Wandel unterworfen. In der Folge verändern sich auch die Anforderungen an Infrastrukturleistungen stetig (vgl. [Mos08a]). Bisherige Prüfungs- und Bewertungsansätze gehen allerdings meist von äußerst konservativen Annahmen zur Entwicklung äußerer Randbedingungen aus. Insbesondere in standardisierten Kostenvergleichen wird häufig eine nahezu unveränderte Nutzung des einmal geplanten Systems für die gesamte geplante Nutzungsdauer vorausgesetzt (vgl. [LAW05]). Nutzungsdauerorientierung wird dann lediglich als Kombination der Fragen nach Haltbarkeit der technischen Systeme und nach der zumutbaren Finanzierungsbelastung für jetzige und künftige Generationen interpretiert. Hier bietet es sich an, die Anpassungsfähigkeit einer technischen Lösung, z.B. im Sinne der Kompatibilität mit anderen, veränderten und neuen Systemen, als Leistungsziel, ähnlich der Dauerhaftigkeit oder auch als Teil dieses Ziels, in die Bewertung aufzunehmen. Konkret könnte hier die Kompatibilität von Rohren bzw. Rohrverbindungen, -anschlüssen und Sanierungssystemen mit anderen am Markt verfügbaren Systemen geprüft und auch der Grad der Offenlegung von Systeminformationen, um anderen oder auch künftigen Anbietern den Anschluss an diese Systeme zu ermöglichen, bewertet werden.

### 9.2 Funktionen von Bettungs- und Verfüllmaterialien

Die heutigen Qualitätsanforderungen an Produkte und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen leiten sich im Wesentlichen aus den Leistungszielen der Funktionsfähigkeit, Dichtheit, Standsicherheit und

Dauerhaftigkeit ab. Als Funktionsfähigkeit wird vorwiegend die Fähigkeit zur Durchleitung des transportierten Mediums angeführt (vgl. Abschnitt 3.4). Bettungs- und Verfüllmaterialien werden lediglich mit Blick auf die Bauausführung und Sicherung der Verlegequalität betrachtet. Neue Entwicklungen (vgl. Abschnitt 5.3.2) legen hier aber eine weitergehende Betrachtung nahe, denn Bettungs- und Verfüllmaterialien könnten grundsätzlich mehrere Funktionen übernehmen, und zwar im Sinne eines

1. bodenmechanisch beschreibbaren Bettungs- und Verfüllmaterials für Rohrleitungen und -gräben,
2. porenraumreichen Substrats für Pflanzen bzw. porenraumarmen Schutzraums gegen Wurzelwuchs,
3. dränage- und speicherfähigen Untergrunds, z.B. als Rigole,
4. Filters zur qualitativen Verbesserung von im Untergrund abgeleitetem Niederschlagswasser,
5. wärmeenergiespeichernden Bodenvolumens.

Ansätze zur Beschreibung der Punkte 1 und 2 werden bereits im Rahmen der Regelwerksarbeit verfolgt (vgl. [DWA08]). Die Erweiterung dieser Beschreibungsansätze auf die Punkte 3 und 4 ist zu erwarten (vgl. [Emb08]). Punkt 5 gewinnt insbesondere durch die Diskussion der Nutzung von Wärme aus Abwasser an Bedeutung.

Die Bettungs- und Verfüllmaterialien wären in der Folge als Teil eines „Ingenieurbauwerks Leitungsgraben“ anzusehen, das entsprechend seiner vielfältigen Funktionen zu planen, zu dimensionieren, zu bauen und zu betreiben wäre. Produkte und Verfahren wären dann auch mit Blick auf diese Funktionen zu prüfen und zu bewerten und die Verständnis- und Handlungskompetenzen entsprechend zu erweitern bzw. zu ergänzen. Dies betrifft insbesondere die Definition von Qualitätsanforderungen und die Zuordnung geeigneter Prüfkriterien, das Verständnis für oder sogar die Entwicklung von mathematisch-physikalischen Modellen zur Beschreibung der vielfältigen Bauwerksfunktionen und deren Interaktion untereinander sowie die Entwicklung geeigneter Versuchstechnik, wie sie z.B. mit Blick auf die Rohr-Wurzel-Interaktion bereits angestoßen wurde (vgl. Abschnitt 5.4.5.3).

### **9.3 Vernetzung des Wissens**

Der Austausch und die Vernetzung von Wissen gewinnt durch die rasante Entwicklung vernetzter Informations- und Kommunikationstechniken weiter an Bedeutung. Die Bildung von Netzwerken bzw. Clustern gilt darüber hinaus als wirtschaftsfördernd und wird auch politisch unterstützt (vgl. [NRW07a]). Nachdem

Bau- und Sanierungsfirmen bereits vielfach in global agierenden Konzernen vernetzt sind, wurde mit den Konzepten der netzbetreiberorientierten Forschung und der vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests auch erstmals die Kundenseite, d.h. die Betreiber der Ver- und Entsorgungsnetze, zur kollektiven Bewertung von Produkten und Verfahren zusammengebracht. Allerdings waren die bisherigen Projektbeiräte und Lenkungskreise durch eine weitgehend zufällige Auswahl bundesdeutscher Netzbetreiber geprägt. Hier stellt sich die Frage nach den Rechten und Pflichten der Lenkungskreismitglieder und inwieweit eine gezielte Auswahl der Mitglieder noch weitere Entwicklungspotenziale bietet. Ziel eines bewussten „Designs“ der Lenkungskreise in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Aufgabenstellung könnte z.B. die verstärkte Einbindung von Mitgliedern mit geeigneter und sich ergänzender Qualifikation und Wissen über die Belange verschiedener Nutzergruppen und -generationen sein.

Darüber hinaus könnte auch eine Ausweitung der Lenkungskreise auf europaweite Verbände einerseits und die Fokussierung auf stark regionalisierte Teilnehmerkreise andererseits besondere Entwicklungsperspektiven bieten. Die Bildung europaweiter Verbände leitet sich schon aus der Entwicklung im europäischen Regelwerks- und Zulassungswesen ab, nach der gemeinsame europäische Mindestanforderungen an Produkte und Verfahren im Zuge der europäischen Normung und europäischen bautechnischen Zulassungen (ETA) formuliert werden (vgl. [DIB08]). Der Bedarf für weitergehende Produkt- und Verfahrensprüfungen scheint offensichtlich.

Perspektiven für eine regionalisierte Bewertung von Produkten und Verfahren gründen sich auf der Erfahrung, dass die einzelne Bundesländer unterschiedliche Anforderungen an den Bau, den Betrieb und die Sanierung der Netze stellen können<sup>198</sup> und auch Bau- und Sanierungsfirmen ihre Produkte und Verfahren z.T. nur in einzelnen Schwerpunktregionen Deutschlands einsetzen. Hier liegen die Entwicklungspotenziale in der Organisation von lokalen Verbundprojekten mit Netzbetreibern dieser Regionen unter Formulierung spezifischer regionaler Anforderungen an die Prüfung und Bewertung der Produkte und Verfahren. Einen ersten solchen regionalen Cluster stellt das durch das IKT organisierte Kommunale Netzwerk Grundstücksentwässerung (KomNetGEW) dar, dass sich vor dem Hintergrund der speziellen nordrhein-westfälischen Anforderungen an die Beratungspflicht der Kommunen im Rahmen der Dichtheitsprüfung von Anlagen der Grundstücksentwässerung gebildet hat<sup>199</sup>.

---

<sup>198</sup> im Abwasserbereich z.B. durch die unterschiedlichen Eigenkontrollverordnungen der Länder

<sup>199</sup> vgl. LWG NW §61a und Webseite des KomNetGEW unter [www.komnetgew.de](http://www.komnetgew.de), eingerichtet im Juli 2008.



## 9.4 Wirtschaftlichkeit

Fragen der Wirtschaftlichkeit stellen sich nicht nur beim Einsatz der geprüften Produkte und Verfahren, sondern auch hinsichtlich der Prüfung und Bewertung selbst. Dem Aufwand für den Erwerb von Kompetenzen, für die Planung und Ausführung der einzelnen Prüfungen und für die zuverlässige Bewertung von Prüfergebnissen muss ein entsprechender Nutzen, z.B. durch verminderte Qualitätsrisiken, die Reduzierung von Fehlinvestitionen oder auch künftige Qualitätsverbesserungen gegenüber stehen. Soll eine Entscheidung für einen bestimmten Lösungsweg der Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren auch für Dritte nachvollziehbar sein, fordert dies klare, pragmatische Argumente, ähnlich wie sie auch schon für die eigentliche Bewertung der Produkte und Verfahren nach Abschnitt 7.2.3 notwendig wurden.

Während die Aufwandsschätzung durch Nachkalkulation bisheriger Prüfungs- und Bewertungsprojekte abgesichert werden kann, liegen zum wirtschaftlichen Nutzen, wie z.B. volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Vorteile für die Auftraggeber, meist nur grobe Schätzungen<sup>200</sup> vor. Eine wissenschaftliche Aufarbeitung dieser Zusammenhänge bietet sich an, insbesondere um auch künftigen Auftraggebern und Förderern von Prüfungs- und Bewertungsprojekten stichhaltige Argumente für eine Finanzierung an die Hand zu geben. Systematische Untersuchungen aus der Prüfung und Bewertung von Konsumgütern könnten hier als Orientierung dienen (vgl. [Raf84], [Sil84]).

## 9.5 Personaleinflüsse

Der Einfluss des Personals auf die Produkt- bzw. Verfahrensqualität wurde bisher nur in Forschungsprojekten detailliert untersucht (vgl. Abschnitt 5.2.5). In den vergleichenden Produkt- und Verfahrenstests wurde dieser Gesichtspunkt lediglich im Sinne eines BestPractice-Vergleichs der durch die Hersteller beauftragten Bau- und Sanierungsfirmen berücksichtigt (vgl. Abschnitt 6.5). Offensichtlich fehlen nachvollziehbare Prüfungs- und Bewertungsverfahren zur Identifikation und Beurteilung von Zusammenhängen zwischen Personalqualifikation und möglichen Ausführungsrisiken. Insbesondere der Einfluss einer Fremdüberwachung der Bau- und Sanierungsfirmen auf die tatsächlich vor Ort zu erwartende Produkt- bzw. Verfahrensqualität böte hier interessante Perspektiven für die Weiterentwicklung von *Warentests* und *Qualitätsreports*.

---

<sup>200</sup> Diese (unveröffentlichten) Schätzungen dienen insbesondere dazu, gegenüber Auftraggebern die Notwendigkeit von Forschungsvorhaben oder vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests zu begründen.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen kann mit hohen Investitionsrisiken verbunden sein, da bei den Netzbetreibern erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Qualität der angebotenen Lösungen bestehen. Während Mindestanforderungen an die Arbeitssicherheit, Umweltverträglichkeit und grundsätzliche bauliche Eignung der Produkte und Verfahren bereits durch gesetzliche Bestimmungen und Zulassungen abgedeckt werden, stehen den Entscheidungsträgern zur weitergehenden Bewertung der Produkt- und Verfahrenseigenschaften meist nur herstellereitige Informationen zur Verfügung. Vor diesem Hintergrund wurde die Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren durch den Verfasser seit dem Jahr 2000 in zahlreichen Forschungs-, Prüfungs- und Warentest-Projekten vorangetrieben und analysiert<sup>201</sup>.

Dabei wurde deutlich, dass zwischen den an einer Prüfung und Bewertung beteiligten Institutionen und Entscheidungsträgern vielfältige Zusammenhänge bestehen, die einzelnen Aufgaben sehr unterschiedliche Kompetenzen fordern und Aspekte der Neutralität und Unabhängigkeit und das Verständnis für die Hintergründe von Entscheidungsprozessen eine besondere Rolle spielen. Die vorliegende Arbeit beschreibt diese Sachverhalte erstmals in systematischer Weise und gibt damit den mit Prüfungs- und Bewertungsaufgaben im unterirdischen Kanal- und Leitungsbau befassten Wissenschaftlern und Prüfengeuren eine anschauliche Orientierung im Umgang mit dieser komplexen Thematik.

Abbildung 2 fasst den grundsätzlichen Beschreibungsansatz in einem Schaubild sowie einer tabellarischen Übersicht der Kompetenzschwerpunkte zusammen. In den Abschnitten 3 bis 7 werden dann die für eine zuverlässige Prüfung und Bewertung notwendigen *Verständnis- und Handlungskompetenzen* systematisch beschrieben, detailliert begründet und mit Beispielen aus der Erfahrung des Verfassers belegt. Dies betrifft einerseits die notwendigen Kompetenzen für die Definition von Leistungszielen und Prüfkriterien sowie den Umgang mit mathematisch-physikalischen und versuchstechnischen Modellen (Abschnitt 3 bis 5), andererseits aber auch Fragen nach der Bedeutung von Objektivität, der Bandbreite der Bewertungsdimensionen und der Vielfalt von Entscheidungsprozessen (Abschnitt 6 und 7). Mit Hilfe des eingeführten systematischen Beschreibungsansatzes werden schließlich im Abschnitt 8 neuartige Prüfungs- und Bewertungskonzepte erläutert und validiert und besondere Entwicklungspotenziale (Abschnitt 9) aufgezeigt.

---

<sup>201</sup> Der Verfasser ist seit dem Jahr 2000 Wissenschaftlicher Leiter des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen ([www.ikt.de](http://www.ikt.de)).

Im Gesamtblick lassen sich die folgenden übergeordneten Erkenntnisse und Perspektiven für die wissenschaftliche Arbeit ableiten:

### **Systematischer Beschreibungsansatz unterstützt Kooperationen**

Durch die systematische Darstellung der Kompetenzfelder, Bewertungs- und Entscheidungsprozesse lassen sich auch im konkreten Einzelfall die für ein schlüssiges Prüfungs- und Bewertungskonzept notwendigen Kompetenzen und Verantwortlichkeiten identifizieren. Kompetenzlücken werden erkannt und können z.B. durch gezielte Kooperationen mit Wissenschaftlern und Prüferingenieuren anderer Fachrichtungen geschlossen werden. Die Kommunikation zwischen den Beteiligten wird darüber hinaus durch die eingeführten Begrifflichkeiten erleichtert und das Verständnis für Bewertungs- und Entscheidungsprozesse erhöht.

### **Auswahl von Prüfungs- und Bewertungskonzepten orientiert sich am Entwicklungsstand und der Marktverbreitung der Produkte**

Im zeitlichen Ablauf der Produkt- und Verfahrensentwicklung ergänzen sich die in Abschnitt 8 dargestellten Konzepte der netzbetreiberorientierten Forschung, der vergleichenden Produkt-/Verfahrenstests und der Qualitätsreports. Werden durch die Netzbetreiber neue Fragestellungen identifiziert und besitzen die ggf. angebotenen Produkte und Verfahren noch geringe Marktverbreitung, so zielen Prüfungs- und Bewertungsaktivitäten i.d.R. auf explorative Untersuchungen im Sinne der netzbetreiberorientierten Forschung. Durchdringen dagegen die Lösungsversuche der Anbieter bereits den Markt, so bieten sich vergleichende Prüfungen und Bewertungen an. Handelt es sich um bewährte Produkte und Verfahren, die bereits das grundsätzliche Vertrauen der Netzbetreiber genießen, so erhalten die Netzbetreiber über Qualitätsreports einen aktuellen Überblick über die stichprobenhaft geprüfte Einbauqualität. Der so beschriebene Ablauf kann allerdings nicht nur Fortschritte, sondern auch Rückschritte aufweisen, z.B. wenn das Vertrauen in die Qualität bewährter Produkte und Verfahren schwindet oder veränderte Leistungsziele deren Weiterentwicklung notwendig machen.

### **Erfolgreiche Prüfungs- und Bewertungskonzepte entwickeln sich weiter**

Die in Abschnitt 8 dargestellten Prüfungs- und Bewertungskonzepte haben sich iterativ im engen Kontakt zu den Entscheidungsträgern, hier insbesondere den Betreibern öffentlicher Kanal- und Leitungsnetze, entwickelt. Sie stellen in ihrer Detail-Ausprägung somit ein zeitgemäßes Optimum dar. Eine Weiterentwicklung ist bei Änderung der Rahmenbedingungen nicht nur möglich, sondern notwendig und anzustreben. Dies betrifft sowohl den Erwerb technischer Kompetenzen zur Prüfung und Bewertung neuartiger Produkte und Verfahren als auch die Anpassung der

Bewertungs- und Entscheidungsprozesse an veränderte Verantwortlichkeiten<sup>202</sup> und Entscheidungsstrukturen. Besondere Impulse lassen hier die Entwicklungen in der Informations- und Kommunikationstechnik erwarten, da schon heute im Konsumgüterbereich Anbieter und deren Produkte öffentlich von einer Vielzahl von Konsumenten bewertet werden<sup>203</sup> und auch der Wandel demokratischer Entscheidungsprozesse diskutiert wird<sup>204</sup>.

### **Bewerten und Entscheiden erfordert Ingenieurwissen und –intuition**

Von einer Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren wird erwartet, dass möglichst umfassende Informationen zum Grad der Erfüllung von Leistungszielen und Qualitätsanforderungen gewonnen und diese in angemessener Weise bewertet werden. Der Transparenz und Nachvollziehbarkeit dieser Bewertung kommt eine besondere Bedeutung zu, wenn – wie im Bauwesen üblich – die hierauf aufbauenden Entscheidungen auch Dritten vermittelt werden sollen. Hier ist allerdings Sensibilität gefragt, denn wirklich nachvollziehbar und transparent lassen sich nur Sachverhalte darstellen, die vollständig verstanden wurden und nach allgemeinen Grundsätzen beschreibbar sind. Und gerade dies ist in hochinnovativen Bereichen nicht immer der Fall. Ähnlich wie der Entwurfsprozess eine schöpferische Tätigkeit ist, die nicht durch mathematische Hilfsmittel ersetzt, sondern durch diese nur unterstützt werden kann, setzt auch die Prüfung und Bewertung eines Produktes und Verfahrens die Fähigkeit zur intuitiven Erfassung und Bewertung nicht-mathematisierbarer oder sogar unbewusster Sachverhalte voraus. Die Forderung nach Transparenz und Nachvollziehbarkeit findet hier ihre Grenzen. Besonders deutlich wird dies, wenn ein erfahrener Ingenieur oder eine erfahrene Ingenieurin eine neue Konstruktion prüfend in Augenschein nimmt und ohne weitere Information und dokumentierte Analyse als „fragwürdig“ oder „überzeugend“ bewertet.

---

<sup>202</sup> Als Beispiel sei hier auf die Entwicklung im Bereich privater Grundstücke verwiesen. So könnten als Entscheidungsträger künftig auch deren Eigentümer bzw. entsprechende Vertreter einbezogen werden, um angemessene Leistungsziele und Qualitätsanforderungen festzulegen.

<sup>203</sup> vgl. z.B. die Bewertungsmöglichkeiten der Internet-Plattformen [www.ebay.de](http://www.ebay.de), [www.amazon.de](http://www.amazon.de)

<sup>204</sup> vgl. hierzu [TAB05] „Internet und Demokratie“ und zu diesbezüglichen aktuellen Entwicklungen [TAB08] „Öffentliche elektronische Petitionen und bürgerschaftliche Teilhabe“

## 11 Literatur

- [Abw05] AbwAG: Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer. Abwasserabgabengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Januar 2005 (BGBl. I S. 114), neugefasst durch Bek. v. 18.1.2005 I 114.
- [Ach07] Achmus, M.; Klameth, M.: Bodenmechanische Modellierung zur Größe der Bodenreaktionsspannungen an Vortriebsrohren. Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Leibniz Universität Hannover, 05/2007, unveröffentlicht, auszugsweise veröffentlicht in [IKT07].
- [Ach95] Achmus, M.: Zur Berechnung der Beanspruchungen und Verschiebungen erdverlegter Fernwärmeleitungen. Dissertation, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Mitteilungsheft 41, Universität Hannover, 1995.
- [Ahl60] Ahlvin, R.G.: Effects of heavy-load traffic on a shallow-buried flexible pipe. Highway Research Board, 1960.
- [Ant79] Antz, H.: Auflagerspannungen von starren, auf festem Untergrund verlegten Rohren. Bautechnik, 08/1979.
- [Ant86] Antz, H.: Untersuchungen über Kantenpressungen an Vorpressrohren. Bautechnik, 07/1986.
- [APS05] Arbeitskreis Prüfinstitute Schlauchliner: APS-Prüfrichtlinie - Wasserdichtheit von Baustellenproben aus vor Ort härtenden Schlauchlinern. bi UmweltBau, 05/2004.
- [Ave97] Aversch, U.: Entwicklung eines Rechenmodells zur Bestimmung der Vortriebskräfte beim Rohrvortrieb. Dissertation, Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH Aachen, 12/1997.
- [AWW80] AWWA Manual M23: PVC Pipe - Design and Installation. American Water Works Association, 1980.
- [Axe80] Axelrad, E.L.: Flexible shells. Preprints, 15th International Congress on Theoretical and Applied Mechanics, eds. F. Rimrott and B. Tabarrok, Toronto, 1980.
- [Axe83a] Axelrad, E.L.: Schalentheorie. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1983.
- [Axe83b] Axelrad, E.L.; Emmerling, F.A. : Große Verformungen und Traglasten elastischer Rohre unter Biegung und Außendruck. Ingenieur-Archiv 53, Springer Verlag, 1983.
- [Bar65] Barsch, Erhard: Durchpressen größerer Stahlbetonquerschnitte durch einen Damm. Bauplanung Bautechnik 19, 11/1965.
- [Bas85] Basar, Y.; Krätzig, W.B.: Mechanik der Flächentragwerke - Theorie, Berechnungsmethoden, Anwendungsbeispiele. Vieweg, Wiesbaden, 1985.
- [BDBF78] Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V. (Hrsg.): Handbuch für Rohre aus Beton, Stahlbeton, Spannbeton. Bauverlag, Wiesbaden, 1978.

- [BDW08] Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2008. Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. (ATT), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft e.V. (DBVW), Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. Technisch-wissenschaftlicher Verein (DVGW) , Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU), wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2008.
- [Bei93] Beilke, O.: Interaktionsverhalten des Bauwerks „Fernwärmeleitung – Bettungsmaterial“. Dissertation, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Mitteilungsheft 33, Universität Hannover, 1993.
- [Ben89] Bentham, J.: Prinzipien der Gesetzgebung. Unveränderte reprografischer Nachdruck der Ausgabe von 1833. Verlag Sauer & Auvermann, Frankfurt a.M. 1966 (englische Erstveröffentlichung 1789).
- [Ber05] Berger, C.; Lohaus, J.: Zustand der Kanalisation in Deutschland, Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004. KA Korrespondenz Abwasser, 05/2005.
- [Ber09] Berger, W.: Forschungsergebnisse für die Entwässerungssysteme der Gegenwart und der Zukunft, 23. Oldenburger Rohrleitungsforum, IRO, 02/2009.
- [Bey06] Beyert, J.; Bohle, U.; Osebold, R.; Sommerhage, H.: Online Überwachungen von Rohrvortrieben. bi UmweltBau, 01/2006.
- [bi04] bi: IKT präsentiert Forschungsergebnisse: Ja zum Schlauchlining, aber .... bi UmweltBau, 01/2004.
- [bi08-1] bi UmweltBau: Insituform jetzt auch mit Glasfaserliner. bi UmweltBau, 02/2008.
- [bi08-2] bi UmweltBau: Coating als integraler Bestandteil des Insituform – Linersystems. bi UmweltBau, 06/2008.
- [Bie87] Bielecki, R.; Schremmer, H.: Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen. Sonderdruck aus H. 94, Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, 1987.
- [Bie08] Bielecki, R.; Thewes, M.: Analyse zur ökologischen und ökonomischen Bewertung offener und geschlossener Bauweisen zur Herstellung und Sanierung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen. Kurzbericht zur Studie, im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 2008, unveröffentlicht.
- [Bit81] Bitz, M.: Entscheidungstheorie. Verlag Franz Vahlen München, 1981.
- [BMVBS01] Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung (FE-Nr. 96.578/1999). Schlussbericht, 04/2001.
- [BMVV08] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesministerium der Verteidigung: Arbeitshilfen Abwasser: Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes. <http://www.arbeitshilfen-abwasser.de>, Fassung 10.10.2008, eingesehen am 12.01.2009.
- [Bor99] Borges, B.; Goldstein, D.G.; Ortmann, A.; Gigerenzer, G.: Can ignorance beat the stock market? In: Simple heuristics that make us smart. ABC Research Group, Oxford University Press, 1999 (s. [Gig99]).

- [Bos07] Bosseler, B.; Diburg, B.: Sanierung von Abwasserkanälen. In: „Abwasserableitung“, Skript zum Weiterbildenden Studium Wasser und Umwelt. Bauhaus-Universität Weimar, 04/2006.
- [Bos81] Bosniakowski, S.; Goldammer, K.-R.; Schmitz, U.P.: Berechnung von rotationssymmetrischen Schalen aus Kunststoff. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 3074, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1981.
- [Bos90] Bossert, W., Stehling, F.: Theorie kollektiver Entscheidungen – eine Einführung. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [Bos94] Bosseler, B.: Untersuchung zum Trag- und Rißverhalten kreisförmiger Stahlbetonrohre begehbarer Nennweite. Diplomarbeit, Arbeitsgruppe Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Ruhr-Universität Bochum, 02/1994.
- [Bos96] Bosseler, B., Weith, C.: Vergleichende Untersuchung zur Bemessung von mittels Relining-Verfahren sanierten Abwasserleitungen. Arbeitsgruppe Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Ruhr-Universität Bochum, 1996, unveröffentlicht, auszugsweise veröffentlicht in [Ste99], S. 628ff.
- [Bos97] Bosseler, B.: Beitrag zur Darstellung, Analyse und Interpretation von Verformungsmessdaten aus der Inneninspektion biegeweicher Abwasserleitungen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum. Technisch-wissenschaftliche Berichte des IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Bericht 97/4, Gelsenkirchen, 1997.
- [Bos98] Bosseler, B.; Stein, D.: Einfluss viskoelastischen Werkstoffverhaltens auf die Bewertung von Verformungen erdverlegter Kunststoffrohre. 3R-International, 09/1998.
- [Bou85] Boussinesq, J.: Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Gauthier-Villars, Paris, 1885.
- [BPG98] Deutsche Bundesregierung: Gesetz über das Inverkehrbringen von und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten zur Umsetzung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte und anderer Rechtsakte der europäischen Gemeinschaften (Bauproduktengesetz – BauPG), Neufassung vom 28. April 1998, zuletzt geändert zum 1. Mai 2004.
- [BPR03] Rat der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG), zuletzt geändert durch die Verordnung (EG) Nr. 1882/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. September 2003.
- [Bra27] Brazier, L.G.: On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections. Proc. Royal Society, Vol. 116, London, 1927.
- [Bre80] Bretzke, W.-R.: Der Problembezug von Entscheidungsmodellen. Tübingen, 1980.
- [Buc02] Buchhardt, A.: Untersuchungen zur Spannungsverteilung zwischen Vorpressrohren. bi UmweltBau, 02/2002 und 03/2002.
- [Buc03] Buchhardt, A.: Statische Berechnung von Microtunneling-Vortriebsrohren mit abwinkelbaren Rohrverbindungen für den Bauzustand. Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Baubetrieb und Projektmanagement, ibb – Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH Aachen, 2003.
- [Bul85] Bulson, P.S.: Buried structures. Chapman and Hall, London, New York, 1985.

- [Bun01] Deutsche Bundesregierung: Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, beschlossen am 17.04.2002. Download unter <http://www.nachhaltigkeitsrat.de/der-rat/strategie/strategie-2002/>, eingesehen am 14.01.2009.
- [Bur05] Burn, L.S.: Elastomeric pipe joint performance – Sewer & Stormwater Pipelines. Präsentation auf der Sitzung der COST C15 – Tagung in Brüssel, 02/2005, unveröffentlicht.
- [BUW08] Bauhaus-Universität Weimar: Graduiertenkolleg 1462 „Bewertung gekoppelter numerischer Partialmodelle im Konstruktiven Ingenieurbau“. Vorhabensbeschreibung, gefördert durch die DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2008, <http://www.uni-weimar.de/cms/bauing/forschung/grk1462/problemstellung.html>, eingesehen am 14.01.2009.
- [Che71] Cheney, J.A.: Pressure buckling of ring encased in cavity. Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 08/1971.
- [Chi68] Chicurel, R.: Shrink buckling of thin circular rings. Journal of Applied Mechanics, ASME 35, 1968.
- [DAfStb01] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs- Richtlinie), Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze, Teil 2: Bauprodukte und Anwendung, Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung, Teil 4: Prüfverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 10/2001.
- [DFG08] DFG: Deutsche Forschungsgemeinschaft Aufbau und Aufgaben. Deutsche Forschungsgemeinschaft, 02/2008, [http://www.dfg.de/aktuelles\\_presse/publikationen/verzeichnis/download/aufbau\\_aufgaben.pdf](http://www.dfg.de/aktuelles_presse/publikationen/verzeichnis/download/aufbau_aufgaben.pdf), eingesehen am 18.01.2009.
- [DIB08] DIBt: 40 Jahre DIBt Deutsches Institut für Bautechnik. DIBt, Berlin, 2008.
- [DIN1072] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken - Lastannahmen. Beuth Verlag, Berlin, 12/1985.
- [DIN13941] DIN 13941: Berechnung und Verlegung von werkmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für Fernwärme. Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [DIN18555] DIN 18 555, Teil 3: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemittel; Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte. Beuth Verlag, Berlin, 1982.
- [DIN19523] DIN 19523: Anforderungen und Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckstrahlbeständigkeit und -spülfestigkeit von Rohrleitungsteilen für Abwasserleitungen und -kanäle. Beuth Verlag, Berlin, 08/2008.
- [DIN19565] DIN 19565: Rohre und Formstücke aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; geschleudert, gefüllt; Maße, Technische Lieferbedingungen. Beuth Verlag, Berlin, 03/1989.
- [DIN30658] DIN 30658: Mittel zum nachträglichen Abdichten von erdverlegten Gasleitungen - Teil 1: Folienschläuche und Gewebesläuche zum nachträglichen Abdichten von Gasleitungen; Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen. Beuth Verlag, Berlin, 01/1998.
- [DIN31051] DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Beuth Verlag, Berlin, 06/2003.



- [DIN4020] DIN 4020: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag, Berlin, 09/2003.
- [DIN4033] DIN 4033: Entwässerungskanäle und –leitungen – Richtlinien für die Ausführung. Beuth Verlag, Berlin, 11/1979.
- [DIN4060] DIN 4060: Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und –leitungen mit Elastomerdichtungen. Beuth Verlag, Berlin, 02/1998.
- [DIN50104] DIN 50104: Dichtheitsprüfung bis zu einem bestimmten Innendruck – Allgemeine Festlegungen. Beuth Verlag, Berlin, 11/1983.
- [DIN53765] DIN 53765: Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren; Thermische Analyse; Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK). Beuth Verlag, Berlin, 03/1994.
- [DIN8039] DIN 8039: Steinbohrer mit Zylinderschaft, mit Schneidplatte aus Hartmetall. Beuth Verlag, Berlin, 04/1963.
- [DINV1201] DIN V 1201: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton für Abwasserleitungen und -kanäle – Typ 1 und Typ 2 – Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität, Vornorm. Beuth Verlag, Berlin, 08/2004.
- [Doh03] Dohmann, M.; Dettmar, J.: Leitfaden zur Planung und Anwendung von Schwallspüleinrichtungen in Mischwasserkanalisationen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, 06/2003.
- [Dol01] Doll, H.: Dimensionierung von Kunststofflinern Close-Fit-Verfahren – Versuchsgestützte Modifikation von Berechnungsansätzen der ATV M 127 Teil 2 -. Dissertation, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Mitteilungsheft 59, Universität Hannover, 2001.
- [Dri87] Drigert; Z.: Zur Bestimmung der Einleitungskräfte bei örtlicher Lasteintragung. Bauplanung Bautechnik 41, 06/1987.
- [DVGW G401] DVGW G 401: Entscheidungshilfe für die Rehabilitation von Gasverteilungsnetzen. Technische Regel, Arbeitsblatt, DVGW Regelwerk, Bonn, 09/1999.
- [DVGW W401] DVGW W 401: Entscheidungshilfe für die Rehabilitation von Wasserrohrnetzen. Technische Mitteilung, Hinweis, DVGW Regelwerk, Bonn, 09/1997.
- [DVGW08] DVGW: DVGW-Forschungsprogramm Gas. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. Technisch-wissenschaftlicher Verein, Bonn, 2008.
- [DVS2207] DVS 2207: Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen, Teil 1 bis 6. DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., DVS Verlag, 2005.
- [DWA08] DWA: Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES 3.6 „Baumstandorte, Kanäle und Leitungen“. KA Korrespondenz Abwasser 56, S. 240-243, 03/2009.
- [DWA08a] DWA-Arbeitsgruppe ES 5.4: Protokoll der Sitzung am 19.10.2007 im IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen.
- [DWA-A125] DWA-A 125: Rohrvortrieb und verwandte Verfahren. Regelwerk der DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Gelbdruck, 02/2007.

- [DWA-A127] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen. Regelwerk der DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 3. Auflage, 08/2000.
- [DWA-A161] ATV-A 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren. Regelwerk der DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 01/1990.
- [DWA-A161n] DWA-A 161, Entwurf: Statische Berechnung von Vortriebsrohren. Regelwerk der DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2. Auflage, Entwurf, 10/2008.
- [DWA-A400] DWA-A 400: Grundsätze für die Erarbeitung des DWA-Regelwerkes. Regelwerk der DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 6. Auflage, 01/2008.
- [DWA-M127] ATV-M 127, Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren. Regelwerk der DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 01/2000.
- [DWA-M149] ATV-M 149: Zustandserfassung, -klassifizierung und –bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. Regelwerk der DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 04/1999.
- [EC04] Kommission der europäischen Gemeinschaften: Mitteilung der Kommission – Europa und die Grundlagenforschung. KOM(2004) 9, Brüssel, 01/2004, [http://ec.europa.eu/research/press/2004/pdf/acte\\_de\\_version\\_final\\_15janv\\_04.pdf](http://ec.europa.eu/research/press/2004/pdf/acte_de_version_final_15janv_04.pdf), eingesehen am 29.01.2009.
- [ELE04] ELE Erdbaulaboratorium Essen - Ingenieurgesellschaft für Geotechnik mbH: Bodenkennwerte für Finite-Element-Berechnungen. Essen, 04/2004.
- [EIS97] El Shahid, S.: Zur Belastung erdverlegter Rohrleitungen nach dem Ziehen von Verbauprofilen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Berichte des IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Bericht 97/5, Gelsenkirchen, 1997.
- [Elz84] Elzink, W.J.; Gehrels, J.F.; van der Woude, P.J.M.: Das Verhalten der Kunststoff-Kanalrohre in Theorie und Praxis, Teil 2. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau (TIS), 02/1984.
- [Emb08] Embrén, B.; Bennerscheidt, C.; Stål, Ö.; Schröder, K.: Optimierung von Baumstandorten. wwt wasserwirtschaft wassertechnik, 07-08/2008.
- [Emm81] Emmerling, F.A.: Nichtlineare Biegung eines schwach gekrümmten Rohres. ZAMM 61, T86-89, 1981.
- [Emm82] Emmerling, F.A.: Nichtlineare Biegung und Beulen von Zylindern und krummen Rohren bei Normaldruck. Ingenieur-Archiv 52, Springer Verlag, 1982.
- [EN1228] DIN EN 1228: Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) - Ermittlung der spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit. Beuth Verlag, Berlin, 08/1996.
- [EN12390] DIN EN 12390: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [EN12889] DIN EN 12889: Grabenlose Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen. Beuth Verlag, Berlin, 03/2000.

- [EN1295] DIN EN 1295: Statische Berechnung von erdverlegten Rohrleitungen unter verschiedenen Belastungsbedingungen. Beuth Verlag, Berlin, 09/1997.
- [EN13476] DIN EN 13476-1: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Leistungsmerkmale. Beuth Verlag, Berlin, 08/2007.
- [EN13566] DIN EN 13566-4: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) - Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining. Beuth Verlag, Berlin, 04/2003.
- [EN1594] DIN EN 1594: Gasversorgungssysteme - Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar - Funktionale Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin, 09/2000.
- [EN1610] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. Beuth Verlag, Berlin, 10/1997.
- [EN179] DIN EN ISO 179-1: Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung (ISO 179-1:2000 + Amd.1:2005). Beuth Verlag, Berlin, 05/2006.
- [EN1916] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton. Beuth Verlag, Berlin, 04/2003.
- [EN1990] DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag, Berlin, 10/2002.
- [EN1997] DIN EN 1997 Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik -Teil1: Allgemeine Regeln. Beuth Verlag, Berlin, 10/2005.
- [EN295] DIN EN 295-3: Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle - Teil 3: Prüfverfahren (enthält Änderung A1:1998). Beuth Verlag, Berlin, 02/1999.
- [EN752] DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Beuth Verlag, Berlin, 04/2008.
- [EN761] DIN EN 761: Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) - Bestimmung des Kriechfaktors im trockenen Zustand. Beuth Verlag, Berlin, 08/1994.
- [Erd83] Erdmann, J.; Duddeck, H.: Statik der Tunnel im Lockergestein – Vergleich der Berechnungsmodelle. Bauingenieur 58, S. 407-414, Springer-Verlag, 1983.
- [Eur98] Eurachem Guide: The fitness for purpose of analytical methods – a laboratory guide to method validation and related topics. First English Edition 1.0, LGC (Teddington) Ltd, 1998.
- [EWG83] Rat der Europäischen Gemeinschaften: Grundlagendokument „Wesentliche Anforderung Nr. 3 ‚Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz‘“, Anhang I zur Richtlinie des Rates 89/106/EWG (s. [BPR03]).
- [Fal05] Falter, B.; Wolters, M.: Außendruckprüfungen an Quick-Lock-Stahlmanschetten DN 200 bis DN 600 für Altrohrzustand II. Bericht, Fachhochschule Münster, 10/2005.

- [Fal07] Falter, B.; Holthoff, F.: Numerische Modellierung des IKT-Vortriebssimulators – Variation der Druckübertragungsmittel (OSB, Spanplatte, PU, Holz) -. Fachhochschule Münster, 06/2007, unveröffentlicht.
- [Fal08] Falter, B.; Wolters, M.; Bosseler, B.; Diburg, B.; Liebscher, M.: Belastungen und Beanspruchungen flach überdeckter Kanäle und Leitungen. 9. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium 2008, Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 12, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, 2008.
- [Fal08a] Falter, B.; Wolters, M.: MIBAK - Mindestüberdeckung und Belastungsansätze für flach überdeckte Abwasserkanäle.“ Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, Fachhochschule Münster in Kooperation mit dem IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 12/2008.
- [Fal75] Falter, B.: Berechnung freier und einseitig elastisch gebetteter Kreisbögen und -ringe unter Außendruck mit großen Verschiebungen und Verdrehungen. Dissertation, TU Hannover, 1975.
- [Fal94] Falter, B.: Praktische Vorgehensweise beim Standsicherheitsnachweis für Linersysteme in Abwasserkanälen. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau (TIS), 09/1994.
- [Fal95] Falk, C.: Modellierung des dynamischen Berstverfahrens zur Erneuerung erdverlegter Leitungen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum. Technisch-wissenschaftliche Berichte des IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Bericht 95/2, Gelsenkirchen, 1995.
- [FBS05] FBS: FBS-Leitfaden zur Rohrwerkstoffauswahl. Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V., 2005, <http://www.rohrwerkstoffauswahl.de>, eingesehen am 14.01.2009.
- [Fel95] Felt, U.; Nowotny, H.; Taschwer, K.: Wissenschaftsforschung, Eine Einführung. Reihe Campus Studium, Band 1086, S. 132-133, Campus Verlag, Frankfurt a. M., 1995.
- [Fle35] Fleck, L.: Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre von Denkstil und Denkkollektiv. Suhrkamp, Frankfurt a. M., 1980; Erstausgabe Benno Schwabe & Co., Basel, 1935.
- [Flü75] Flügge, W.: Viscoelasticity. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1975.
- [Fuc82] Fuchs, W.: Zuverlässigkeitsanalyse von Rohrleitungen aus unbewehrtem Beton. Dissertation, Technische Universität München, 1982.
- [Fuc84] Fuchs, W.: Grundzüge der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie und ihre Anwendung auf im Erdboden verlegte Rohre. KA Korrespondenz Abwasser 31, S. 523-527, 06/1984.
- [Gal76] Gallagher, R.H.: Finite-Element-Analysis, Grundlagen. Springer-Verlag, 1976.
- [Gau71] Gaube, E.; Hofer, H.; Müller, W.: Kanalrohre aus Polyäthylen hart, Meßergebnisse über die Zeitabhängigkeit des Erddrucks und der Verformung. Kunststoffe, 10/1971.
- [Gau74] Gaube, E.; Müller, W.; Falcke, F.: Statische Berechnung von Abwasserrohren aus Polyäthylen hart. Kunststoffe, 04/1974.
- [Gau76] Gaube, E.; Diedrich, G.; Müller, W.: Rohre aus thermoplastischen Kunststoffen. Kunststoffe, 01/1976.

- [Gau77] Gaube, E.: Bemessen von Kanalrohren aus PE hart und PVC hart. Kunststoffe, 06/1977.
- [Geh82] Gehrels, J.F.; Elzink, W.J.: More than 15 years of distortion measurement results with uPVC pipes. Europe Conference, 1982.
- [GG02] Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland, vom 23. Mai 1949 (BGBl. S. 1), zuletzt geändert durch Gesetz vom 28. August 2006 (BGBl. I S. 2034), <http://www.bundestag.de/parlament/funktion/gesetze/grundgesetz/index.html>, eingesehen am 03.12.2008.
- [Gig04] Gigerenzer, G.: Das Einmaleins der Skepsis – Über den richtigen Umgang mit Zahlen und Risiken. BVT Berliner Taschenbuch Verlags GmbH, Berlin, 2004, amerikanisches Original: „Calculated Risk: How to know when Numbers Deceive you“, Simon & Schuster, New York, 2002.
- [Gig07] Gigerenzer, G.: Bauchentscheidungen – die Intelligenz des Unbewussten und die Macht der Intuition. C. Bertelsmann Verlag, München, 2007.
- [Gig99] Gigerenzer, G., Todd, M.: Simple Heuristics that make us smart. ABC Research Group, Oxford University Press, 1999.
- [Glo77] Glock, D.: Überkritisches Verhalten eines starr ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von außen und Temperaturdehnung. Der Stahlbau, 07/1977.
- [Göb99] Göbel, C.: Entwicklung einer technischen Einrichtung zur Aktivierung von Kanalvolumen für den nachträglichen Einbau in Mischwassernetzen. Diplomarbeit, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, 1999.
- [Gra03] Grasberger, S.; Neumann, M.; Meschke, G.: Numerische Dauerhaftigkeitsanalysen von Betonstrukturen am Beispiel einer Tunnelinnenschale. Bauingenieur, Band 78, 09/2003.
- [Gru97] Grunwald, G: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei Kanalsanierungen; Dissertation, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum. Technisch-wissenschaftliche Berichte des IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Bericht 97/3, Gelsenkirchen, 1997.
- [Gui94] Guice, L.K.; Li, J.Y.: Buckling models and influencing factors for pipe rehabilitation design. Design Theory Workshop, NASST NoDig, 1994.
- [Han04] Handy, R.: Anatomy of an error. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, S. 768-771, ASCE, 07/2004.
- [Han08] Hannich, A.: Welchen Qualitätsstandard erfordert eine „mangelfreie Leistung“?. RO-KA-TECH Journal, 03/2008.
- [Has96] Haslem, R.F.: Structural interaction at joints in pipe jacked tunnels. The Structural Engineer, Vol. 74, 10/1996.
- [Has96a] Hasan, M.: Abschätzung der Eindring- und Reibungswiderstände beim unterirdischen Rohrvortrieb. Dissertation, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Mitteilungsheft 45, Universität Hannover, 1996.
- [Has98] Haslem, R.F.: Stress formulation for joints in pipe-jacked tunnels. Trenchless Technology Research, Vol. 12, No. 1-2, S. 39-48, Elsevier Science, 1998.
- [Hau87] Hauff, V. (Hrsg.): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Eggenkamp Verlag, Greven 1987; (englische Originalfassung, s. [http://en.wikisource.org/wiki/Brundtland\\_Report](http://en.wikisource.org/wiki/Brundtland_Report)).

- [Hei08] Heinlein, M.: Schlauchliner-Reports der Prüfinstitute. 6. Deutscher Schlauchlinertag 2008, bi UmweltBau Kongressausgabe, 2008.
- [Hei08a] Heinlein, M.; Krölller, W.; Schamer, T. Waniek, R.W.: Prüfkriterien beim Schlauchlining: Klare Ergebnisse. bi UmweltBau, 01/2008.
- [Her02] Herz, R; Werner, W; Marschke, L.: Erfordernisse und Finanzierung der Anpassung der stadttechnischen Infrastruktur im Zuge des Stadtumbaus. Abschlussbericht, Unterirdischer Städtebau, Technische Universität Dresden, 06/2002, <http://www.tu-dresden.de/stadtbau/stadtumbau/pdf/abschlussbericht.pdf>, eingesehen am 14.01.2009.
- [Her08] Herbst, H.: Bewertung zentraler und dezentraler Abwasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, GWA Heft 213, RWTH Aachen, 2008.
- [Hib94] Hibbit; Karlsson; Sorensen: ABAQUS V. 5.4/5.5, User, theory and example problems manual, 1994.
- [Hor84] Hornung, K.: Straßenverkehrsbelastung erdüberdeckter Rohre. KA Korrespondenz Abwasser 31, S. 532-541, 06/1984.
- [Hor89] Hornung, K.; Kittel, D.: Statik erdüberdeckter Rohre/Structural analysis of buried pipes. Bauverlag, Wiesbaden Berlin, 1989.
- [Hor92] Hornung, K.: Bemessung und Prüfung unbewehrter und bewehrter Rohre aus Beton. Dissertation, Fachbereich Bautechnik, Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, 1992.
- [Hus89] Husein, N.M.: Vitrified clay pipes installed by trenchless techniques. PhD Thesis, University of Bradford, 1989.
- [IKT00] IKT: Wirtschaftlicher Kanalbau in Bergsenkungsgebieten, Vorprojekt. Endbericht, IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Gelsenkirchen, 05/2000.
- [IKT00a] IKT: Kosteneinsparung beim Bau begehrbarer Abwasserkanäle durch Optimierung des Bauverfahrens unter besonderer Betrachtung von Auflager und Einbettung. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW und die Emschergenossenschaft, Essen; IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Gelsenkirchen, 10/2000.
- [IKT00b] IKT: Protokoll der Projektbesprechung zum Projekt „Elektrische Kanalmesssonde“ am 31.10.2000 im IKT - Institut für Kanalisationstechnik, im Auftrag der S&P GmbH, Bochum, und der SEG Schwerte.
- [IKT00c] IKT: Empfehlungen zur Kanalreinigung. Endbericht zum Pilotvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 05/2000.
- [IKT00d] IKT: Infektionsgefahr durch Austrag von Krankheitserregern aus Einsteigschächten von Kanalisationen durch Aerosole. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2000.
- [IKT01] IKT: Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwasserkanälen und –leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 03/2001.

- [IKT01a] IKT: Bundesweite Umfrage zur Sanierung von Schachtbauwerken im Bereich der Abwassertechnik - mittels Beschichtungsverfahren. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 07/2001.
- [IKT02] IKT: Einwirkung von leicht flüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW) auf Elastomerdichtungen in Rohrverbindungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2002.
- [IKT02a] IKT: Unterirdischer Vortrieb von Stahlbetonrohren mit Rechteckquerschnitt, Teil 2. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 03/2002.
- [IKT02b] IKT: Eignungsprüfung von Verfahren zur Sanierung von Schachtabdeckungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, im Auftrag des Stadtentwässerungsbetriebes Düsseldorf, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 11/2002.
- [IKT02c] IKT: Entwicklung eines Elastomerrings zur Sanierung von Schachtabdeckungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 07/2002.
- [IKT03] IKT: Erhebung der Kilometerkosten für unterirdische Verkehrswege in Deutschland. 2003, unveröffentlicht.
- [IKT03a] IKT: Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) bei den kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in NRW. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2003.
- [IKT03b] Erneuerung mit dem Berstverfahren - Bemessung, Prüfung und Qualitätssicherung von Abwasserrohren. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 11/2003.
- [IKT03c] IKT: Qualitätseinflüsse Schlauchliner - Stichproben-Untersuchung an sanierten Abwasserkanälen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2003.
- [IKT03d] IKT: Struktur und Entwicklung der Abwasserwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2003, unveröffentlicht.
- [IKT03e] IKT: Markterhebung Stahlbetonrohre. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, im Auftrag von Emschergenossenschaft/Lippeverband, 2003, unveröffentlicht.
- [IKT04] IKT: Kanalreinigung mit dem HD-Verfahren – Düsen, Drücke, Hochdruckstrahlen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2004.
- [IKT04a] IKT: Stahlbetonrohre in offener Bauweise – Rohrprüfungen unter realitätsnahen Beanspruchungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW und die Emschergenossenschaft Essen, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 02/2004.
- [IKT04b] IKT: Neue Methode zur Schwallspülung „Spülsack“ -Vorbereitung für den Praxiseinsatz-. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW und BRW Bergisch-Rheinischer Wasserverband Haan, 05/2004.

- [IKT04c] IKT: Sanierung von Hausanschlussleitungen -Pilotprojekt Stadt Würselen-. Endbericht zum Forschungsvorhaben, im Auftrag der Stadt Würselen, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 01/2004.
- [IKT05] IKT: Profilierte Großrohre aus Kunststoff – Praxiserfahrungen und Prüfkonzepte. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2005.
- [IKT05a] IKT: Handbuch Kanalreinigung. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 11/2005.
- [IKT05b] IKT: Entsorgung von Rohrwerkstoffen und Sanierungsmaterialien in der Kanalisationstechnik. Vorhabensbeschreibung, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 09/2005, unveröffentlicht.
- [IKT05c] IKT: Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten – Studie zu Qualitätseinflüssen und Einsatzgrenzen anhand von Praxis- und Laboruntersuchungen -. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 02/2005.
- [IKT05d] IKT: Anschlusskanäle und Grundleitungen - Schäden, Inspektion, Sanierung -. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2005.
- [IKT05e] IKT: Entwicklung eines Gerätes zur Prüfung der Dichtheit von angebohrten Hausanschlussstutzen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 08/2005, unveröffentlicht.
- [IKT05f] IKT: Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 01/2005.
- [IKT06] IKT: Wasserstandsmessungen an Regenbecken und Stauraumkanälen - Auswertung von Einstau- und Entlastungsereignissen am Beispiel des Aggerverbandes. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 05/2006.
- [IKT06a] IKT: Abwasserdruckleitungen - Möglichkeiten und Verfahren zur Reinigung –. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2006.
- [IKT06b] IKT: Marktumfrage Bauinvestitionen der Kanalnetzbetreiber. Studie im Auftrag der Steinzeug Abwassersysteme GmbH Frechen, 10/2006.
- [IKT06c] IKT: Dränagewasser von Privatgrundstücken – Umweltgerecht Sammeln und Ableiten -. Endbericht zum Pilotprojekt in der Stadt Billerbeck, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 06/2006.
- [IKT06d] IKT: Netzbetreiber identifizieren Forschungsschwerpunkte. ERGEBNISSE, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 02/2006.
- [IKT07] IKT: Der IKT-Vortriebssimulator - Entwicklung, Bau, Versuche und Ergebnisse. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW und die Emschergenossenschaft Essen, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2005.



- [IKT07a] IKT: IKT-Symposium on Pipe-Jacking-Simulation. IKT – eNewsletter Februar 2007, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, <http://www.ikt.de/pipejacking/>, eingesehen am 14.01.2009.
- [IKT07b] IKT: Handbuch Schacht 2007. IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2007.
- [IKT07c] IKT: IKT-Warentest GeruchsfILTER/Geruchsmatten, laufendes Vorhaben, <http://www.ikt.de/iktnewsneu.php?doc=752>, eingesehen am 14.01.2009.
- [IKT07d] IKT: Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle - ergänzende Feldversuche. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, und Ruhr-Universität Bochum und Forschungsinstitut für Wasser und Abfallwirtschaft (FIW), 06/2007.
- [IKT07e] IKT: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Schachtkopfmörtel. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 09/2007.
- [IKT07f] IKT: Gut gebettet liegen Rohre länger. IKT-Ergebnisheft 01/2007, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2007.
- [IKT07g] IKT: EPS-Bettungskissen in der offenen Bauweise. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 08/2007.
- [IKT07h] IKT: IKT-Forschungsschwerpunkt Rohrvortrieb. Sechsteilige Artikelserie, bei UmweltBau, 06/2007, 01/2008, 02/2008, 03/2008, 04/2008, 06/2008.
- [IKT07i] IKT: Kanal- und Baugrunderkundung im nicht begehbaren Bereich – Voruntersuchungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2007.
- [IKT08a] IKT: Gewährleistungsabnahme Schlauchlining. IKT - eNewsletter September 2008, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, <http://www.ikt.de/index.php?doc=905>, eingesehen am 14.01.2009.
- [IKT08b] IKT: Erarbeitung von allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) zur „Inspektion und Sanierung von Grundstücksentwässerungsanlagen“ in Nordrhein-Westfalen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 04/2008.
- [IKT08c] IKT: Ausschreibungsempfehlungen und QS-Hinweise für den „Neubau von Freispiegelkanälen aus PE-Rohren“. Endbericht zum Verbundprojekt, im Auftrag von fünf Netzbetreibern, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2008.
- [IKT08d] IKT: Zustand der Kanalisation in Bayern. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur (IKT-Süd), Neubiberg, 06/2008.
- [IKT08e] IKT: Forschungsantrag an die DBU-Deutsche Bundesstiftung Umwelt - Qualitätssicherung beim Rohrvortrieb durch kontinuierliche Fugenvermessung. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 12/2008.
- [IKT08f] IKT: IKT-Handlungsschwerpunkte, Stand 2008. ERGEBNISSE, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 01/2008.

- [IKT09] IKT: Abnahme von Linermaßnahmen, - Materialnachweise und Bewertung der Linerqualität -. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 03/2009.
- [IKT98] Tagungsband zum IKT-Workshop „Einflüsse auf Rohrleitungen durch Bergsenkungen“, IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Gelsenkirchen, 11/1998.
- [IKT99] IKT: Unterirdischer Vortrieb von Stahlbetonrohren mit Rechteckquerschnitt, Teil I. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Gelsenkirchen, 01/1999.
- [IKTW02] IKT: IKT-Warentest „Hausanschluss-Stutzen“. Endbericht, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 06/2002.
- [IKTW04] IKT: IKT-Warentest „Reparaturverfahren für Anschlussstutzen“. Endbericht, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 06/2004.
- [IKTW05] IKT: IKT-Warentest „Inspektionssysteme für Grundstücksentwässerungsnetze“. Endbericht, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 09/2005.
- [IKTW05a] IKT: IKT-Warentest „Hausanschluss-Liner“. Endbericht, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 11/2005.
- [IKTW06] IKT: Startschuss zum neuen IKT-Warentest „Reparaturverfahren für Hauptkanäle“. IKT – eNewsletter März 2006, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, [www.ikt.de/index.php?doc=562](http://www.ikt.de/index.php?doc=562).
- [IKTW08a] IKT: Angebot und Projektbeschreibung zum IKT-Warentest „Hausanschlussliner 2008“, laufendes Projekt, Abschluss vorauss. Ende 2009, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen.
- [IKTW08b] IKT: Neuer IKT-Warentest GeruchsfILTER/Geruchsmatten. Projektbeschreibung, IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2008, [http://www.ikt.de/down/07\\_04\\_geruch.pdf](http://www.ikt.de/down/07_04_geruch.pdf), eingesehen am 14.01.2009.
- [ISO12491] ISO 12491: Statistical methods for quality control of building materials and components, First edition. International Organization for Standardization, Genf, 05/1997.
- [ISO16708] DIN EN ISO 16708: Erdöl- und Erdgasindustrie – Rohrleitungstransportsysteme – Zuverlässigkeitsanalysen. Englische Fassung, Beuth Verlag, Berlin, 08/2006.
- [ISO17025] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. Beuth Verlag, Berlin, 08/2005.
- [ISO175] DIN EN ISO 175: Kunststoffe - Prüfverfahren zur Bestimmung des Verhaltens gegen flüssige Chemikalien. Beuth Verlag, Berlin, 10/2000.
- [ISO178] DIN EN ISO 178: Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 178:2001 + AMD 1:2004). Beuth Verlag, Berlin, 04/2006.
- [ISO179] DIN EN ISO 179-1: Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung (ISO 179-1:2000 + Amd.1:2005). Beuth Verlag, Berlin, 05/2006.
- [ISO9000] DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag, Berlin, 12/2005.
- [ISO9001] DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin, 12/2008.

- [ISO9080] DIN EN ISO 9080: Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme – Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens von thermoplastischen Rohrwerkstoffen durch Extrapolation. Beuth Verlag, Berlin, 10/2003.
- [IUP95] IUPAC: IUPAC Recommendations 12, Nomenclature in evaluation of analytical methods including detection and quantification capabilities, International Union of Pure and Applied Chemistry, Pure & Appl. Chem., Vol. 67, S. 1699 – 1723, 1995.
- [Jan89] Janson, L.-E.: Plastic pipes for water supply and sewerage disposal. Uponor, 1989.
- [Jan95] Janssen, H.A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Band XXXIX, Nr. 35, S. 1045-1049, 1895.
- [Jär89] Järvenkylä, J.J.: Thin-walled thermoplastic pipes. Construction and Building Materials 3, Elsevier, 04/1989.
- [Jun85] Jungwirth, D.: Begrenzung der Reißbreite im Stahlbeton- und Spannbetonbau aus Sicht der Praxis. Beton- und Stahlbetonbau, S. 173-178 u. S. 204-208, 1985.
- [Kan86] Kant, I.: Grundlegung zur Metaphysik der Sitten. Akademieausgabe Kant's gesammelte Schriften, Band 4 (Abdruck Reclams Universal-Bibliothek 2008), auf Grundlage der Ausgabe Johann Friedrich Hartknoch, 2. Auflage, 1786.
- [Kar11] von Kármán, T.: Ueber die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleichsrohre. Z-VDI 55, 11/1911.
- [Kas05] Kasper, T.: Finite Elemente Simulation maschineller Tunnelvortriebe in wassergesättigtem Lockergestein. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2005-1, Ruhr-Universität Bochum, 2005.
- [Kau97] Kaufmann, O.: Zur Dichtheitsprüfung von Rohren mit Hilfe von Luftüber- und Unterdruck. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Berichte des IKT - Institut für Kanalisationstechnik, Bericht 97/6, Gelsenkirchen, 1997.
- [Reh05] Rehau AG: Kunststoff statt Beton: Neues Material und innovative Konstruktion verhindern typische Schäden an Kanalschächten. KOMMUNAL DIREKT, 06/2005.
- [KGK03] Konsortium Gläserner Kanal: Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren. Endbericht zum Forschungsvorhaben, Projektträger Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR, gefördert durch das MUNLV NRW, 09/2003.
- [Kie00] Kiesselbach, G.: Beanspruchung von Rohrleitungen während des Einbauzustandes. Rohrbau, Weimar, S. 207-218, 12/2000.
- [Kiw73] Kiwitt, W.: Über das Verhalten von erdverlegten Rohrleitungen unter akuter Bergbaueinwirkung. Dissertation, TU Clausthal, 1973.
- [Kol87] Kolonko, A.: Sicherheitsverbesserungen von Rohrleitungen in Bergsenkungsgebieten. s+t Straßen- und Tiefbau, 09/1987.
- [Kön94] König, D.: Beanspruchungen von Tunnel- und Schachtausbauten in kohäsionslosem Lockergestein unter Berücksichtigung der Verformungen im Boden. Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Geotechnik, Heft 22, Ruhr-Universität Bochum, 1994.
- [Kri76] Krings, W.: Beitrag zur Finiten Element Methode bei linearem, viskoelastischem Stoffverhalten. Dissertation, Institut für Mechanik, Ruhr-Universität Bochum, 1976.

- [Kuh04] Kuhlmann, W.: Gesamtkonzept zur Ermittlung der seismischen Vulnerabilität von Bauwerken am Beispiel unterirdischer Rohrleitungen. Dissertation, Mitteilungen des Lehrstuhls für Baustatik und Baudynamik, Heft 9, RWTH Aachen, 2004.
- [Kün02] Künstler, M.: Entwicklung von Prüfkriterien für die Dichtheitsprüfung einzelner Rohrverbindungen in nicht begehbaren Abwasserkanälen. Dissertation, RWTH Aachen, GFA Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef, 2002.
- [KWG05] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG); vom 27. September 1994 (BGBl. I 1994 S. 2705), zuletzt geändert durch Art. 2 des Gesetzes vom 21.06.2005 I S. 1666.
- [Lau05] Laux, H.: Entscheidungstheorie. 6. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 2005.
- [LAW05] LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichrechnungen (KVR-Leitlinien). Kulturbuchverlag, Berlin, 2005.
- [Leo72] Leonhardt, G.: Einfluss der Bettungssteifigkeit auf die Tragfähigkeit und die Verformungen von flexiblen Rohren. Strasse Brücke Tunnel, 03/1972.
- [Leo73] Leonhardt, G.: Die Belastung von starren Rohrleitungen unter Dämmen. Dissertation, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Mitteilungsheft 4, TU Hannover, 1973.
- [Leo79] Leonhardt, G.: Die Erdlasten bei überschütteten Durchlässen. Bautechnik, 11/1979.
- [Leo84] Leonhardt, G.: Einige Bemerkungen zum statischen und bodenmechanischen Konzept des ATV-Arbeitsblattes A 127. KA Korrespondenz Abwasser, 06/1984.
- [Lo94] Lo, K.H.; Zhang, J.Q.: Collapse resistance modelling of encased pipes. Buried Plastic Pipe 2nd, New Orleans, 1994.
- [Mai93] Maidl, B.: M-N-Qualitätsprüfung für Stahlfaserbeton im Tunnelbau. Bautechnik, 08/1993.
- [Mar30] Marston, A.: Iowa Engineering Experiment Station. Bull. no. 96, 1930.
- [Mar34] Marquardt, E.: Beton- und Eisenbetonleitungen – ihre Belastung und Prüfung. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1934.
- [Mar80] Martin, H.; Schießl, P.; Schwarzkopf, M.: Ableitung eines allgemeingültigen Berechnungsverfahrens für Rißbreiten aus Lastbeanspruchung. Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, Heft 309, 1980.
- [Mar99] Martignon, L.; Hoffrage, U.: Why does one-reason decision making work?, - A case study in ecological rationality. In: Simple heuristics that make us smart. ABC Research Group, Oxford University Press, 1999 (s. [Gig99]).
- [MBO02] Bauministerkonferenz: Musterbauordnung (MBO), Fassung 11/2002.
- [Mei71] Meißner, J.: Deformationsverhalten der Kunststoffe im flüssigen und im festen Zustand, Teil 1 : Einführung und linear-viskoelastisches Verhalten. Kunststoffe, 08/1971.
- [Mei84] Meldt, R.: Versuche zum statischen Verhalten erdverlegter HDPE-Rohre mit Hohlprofil und glatter Innenfläche. 3R international, 06/1984.

- [Men81] Menges, G.; Bieling, U.: Berechnung von rotationssymmetrischen Schalen aus Kunststoff. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 3073, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1981.
- [Men87] Menges, G.; Schmachtenberg, E.: Das Deformationsmodell. Kunststoffe, 03/1987.
- [Men90] Menges, G.: Werkstoffkunde Kunststoffe. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 1990.
- [Mes06] Meschke, G.: Das Forschungsprojekt TUNCONSTRUCT – Eine europäische Technologieoffensive im Tunnelbau. Beratende Ingenieure, 03/2003.
- [Mic89] Michaeli, W.; Fölster, T.; Lewen, B.: Beschreibung des nichtlinear-viskoelastischen Verhaltens mit dem Deformationsmodell. Kunststoffe 12/1989.
- [Mie97] Mielke, M.: Numerische Untersuchung zur Stabilitätsanalyse von Inlinern mit Kreis- und Eiprofil. Diplomarbeit, Arbeitsgruppe Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Ruhr-Universität Bochum, 1997.
- [Mil71] Mill, J.S.: Utilitarianism. In: Essays on ethics, religion and society (Collected Works. Vol.10), University of Toronto Press, London, Routledge & Kegan Paul, 1969. Abdruck Reclams Universal-Bibliothek 2006 nach Originalbuchausgabe von 1871.
- [Mil99] Milligan, G.W.E.; Norris, P.: Pipe-soil interaction during pipe jacking. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 137, S. 27-44, 01/1999.
- [Möl89] Möllers, K.: Bodenverformungen und –spannungen beim Einsatz bodenverdrängender Verfahren des Leitungsbaus in nichtbindigen Böden. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1989.
- [Mon96] Monfront, L.: Maximale Vorpresskraft für Stahlbetonrohre nach Eurocode 2. Beton + Fertigteiltechnik, 03/1996.
- [Moo94] Moore, I.D.: Profiled HDPE pipe response to parallel plate loading. Buried Plastic Pipe Technology, 2nd Volume, Philadelphia, 1994.
- [Mos08] Moser, A.P., Folkman, S.: Buried pipe design. Third edition, McGraw-Hill, 2008.
- [Mos08a] Moss, T., Naumann, M.; Wissen, M. (Hrsg.): Infrastrukturnetze und Raumentwicklung – Zwischen Universalisierung und Differenzierung. Ergebnisse Sozial-ökologischer Forschung, Band 10, oekom Verlag, München, 2008.
- [Müh88] Mühlbach, G.: Repetitorium der Ingenieur-Mathematik, Teil 3: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. Verlag C. Feldmann, Springe, 1988.
- [Nag01] Nagel, R.: Verkehrsinfrastrukturausbau als Basis zukünftiger Mobilität in Deutschland. In: Unterirdisches Bauen 2001 – Wege in die Zukunft, Vorträge der STUVA-Tagung 2001 in München. Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Köln, Forschung + Praxis, Band 39, 2001.
- [Nag86] Nagel, T.: The view from nowhere. Oxford University Press, 1986.
- [NRW07] Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen - Landeswassergesetz - LWG vom 25. Juni 1995, , zuletzt geändert am 06.12.2007. GV. NRW. S.926 / SGV. NRW. 77. GV. NRW. S. 708, hier §61a Private Abwasseranlagen.

- [NRW07a] MWME: Operationelles Programm (EFRE) für das Ziel "Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung" für Nordrhein-Westfalen nach Artikel 37 der Verordnung (EG) Nr. 1083/2006 des Rates vom 11. Juli 2006, MWME Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Stand 11. Juni 2007.
- [NRW95] Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitung von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal – SöwV Kan): Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land NRW. Nr. 49, S. 64-67, Düsseldorf, 1995.
- [Par83] Partom, Y.; Schanin, I.: Modeling nonlinear viscoelastic response. *Polymer Engineering and Science* 23, S. 849-859, 10/1983.
- [Per06] Pernkopf, E.: Unerwartetes erwarten – Zur Rolle des Experimentierens in naturwissenschaftlicher Forschung. *Epistemata – Würzburger Wissenschaftliche Schriften, Reihe Philosophie*, Band 413, Verlag Königshausen & Neumann, 2006.
- [Pip86] Pipkin, A.C.: *Lectures on viscoelasticity theory*. 2nd edition, Springer-Verlag, New York, 1986.
- [Pop94] Popper, K.R.: *Alles Leben ist Problemlösen – Über Erkenntnis, Geschichte und Politik*. Piper Verlag, München, 1994.
- [Raf84] Raffée, H.; Silberer, G. (Hrsg.): *Warentest und Unternehmen – Nutzung, Wirkungen und Beurteilung der vergleichenden Warentests in Industrie und Handel*. Campus Verlag, Frankfurt/Main, 1984.
- [Rei59] Reissner, E.: On finite bending of pressurized tubes. *J. Appl. Mech., ASME*, 09/1959.
- [Rei63] Reissner, E.; Weinitschke, H. J.: Finite pure bending of circular cylindrical tubes. *Quarterly of Applied Mathematics*, 01/1963.
- [Ric59] Richard, K.; Ewald, R.: Extrapolationsverfahren, Sicherheitsbeiwerte und zulässige Rohrwandbeanspruchung von Polyäthylen- und PVC-Rohren. *Kunststoffe*, 03/1959.
- [Ril96] RILEM recommendation: CDF test - Test method for freeze-thaw resistance of concrete – tests with sodium chloride solution (CDF). *TC 117FDC freeze-thaw and deicing resistance of concrete, Materials and Structures* 29, S. 523-528, 1996.
- [Rip89] Ripley, K.J.: *The performance of jacked pipes*. Thesis at the University of Oxford, Hilary Term, 1989.
- [Rip89a] Ripley, K.J.; Milligan, G.W.E.: Packing materials in jacked joints. *Conference Papers, NO-DIG '89, Fourth International Conference and Exhibition on Trenchless Construction for Utilities*, 04/1989.
- [Rip92] Ripley, K.J.; Milligan, G.W.E.: Pipe end load transfer mechanisms during pipe jacking. *Conference Papers, NO-DIG '92, Trenchless Benefits Society, Washington DS, USA*, 04/1992.
- [Ros08] Roscher, H. (Hrsg.): *Rehabilitation von Rohrleitungen – Sanierung und Erneuerung von Ver- und Entsorgungsnetzen, Skript zum Weiterbildenden Studium Wasser und Umwelt*, 2. überarbeitete Auflage, Bauhaus-Universität Weimar, 09/2008.
- [RUB01] Ruhr-Universität Bochum: *Arbeitsbericht Sonderforschungsbereich SFB 398, Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten, Periode 1998-2001*, 07/2001.

- [RUB04] Ruhr-Universität Bochum und IKT: Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Spezielle Botanik und Botanischer Garten und IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Bochum Gelsenkirchen, 07/2004.
- [RUB06] Ruhr-Universität Bochum und IKT: Ausführungsrisiken beim Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik und IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Bochum Gelsenkirchen, 2006.
- [RUB07] Ruhr-Universität Bochum und IKT: Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle - Ergänzungsvorhaben. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das MUNLV NRW, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Spezielle Botanik und Botanischer Garten und IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Bochum Gelsenkirchen, 06/2007.
- [RUB09] Ruhr-Universität Bochum: Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte, Sonderforschungsbereich SFB 398. RUBIN Wissenschaftsmagazin, Sonderheft 2009.
- [Rüs72] Rüsç, H.: Stahlbeton – Spannbeton, Band 1, Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren, S. 252-266. Werner Verlag, Düsseldorf, 1972.
- [Sar84] Sarabi, B.: Das Anstrengungsverhalten von Polymerwerkstoffen infolge ein- und zweiachsigen Kriechens, Ermittlung von Langzeitbemessungskennwerten. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Kassel, 1984.
- [Sch00] Schockemöhle, B.: Kriterien zur Wahl der Abdichtungs- und Entwässerungskonzepte von Verkehrstunneln. Dissertation, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Mitteilung Nr. 2000-1, Ruhr-Universität Bochum, 2000.
- [Sch02] Schwabe, J.-H.: Schwingungstechnische Auslegung von Betonrohrfertigern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technische Universität Chemnitz, 04/2002.
- [Sch03] Scherle, M.; Rößler, U.: Fernseminar Rohrvortrieb. 03/2003, <http://www.maxscherle.com>, eingesehen am 14.01.2009.
- [Sch04] Schößler, B.: Untersuchungen zur Entwicklung und Übertragung von Tangentialspannungen am Umfang von Vortriebsrohren im nichtbindigen Lockergestein. Dissertation, Arbeitsgruppe Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Ruhr-Universität Bochum, 04/2004.
- [Sch68] Schreyer, G.; Bauer, P.: Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Kunststoffen im Zug-, Druck- und Biegeversuch, Teil 1: Theoretische Grundlagen. Kunststoffe 01/1968.
- [Sch69] Schapery, R.A.: On the Characterization of Nonlinear Viscoelastic Materials. Polymer Engineering and Science, 09/1969.
- [Sch85] Schmachtenberg, E.: Mechanische Eigenschaften nichtlinear viskoelastischer Werkstoffe. Dissertation, RWTH Aachen, 1985.
- [Sch89] Schießl, P.: Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rißbreite; Erläuterungen zu DIN 1045. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 400. Beuth Verlag, Berlin, 1989.

- [Sch90] Scherle, M.: Zwängungsbeanspruchungen beim Rohrvortrieb im Locker- und Festgestein. Forschungsergebnisse aus dem Tunnel- und Kavernenbau, Institut für Unterirdisches Bauen, Heft 14, Universität Hannover, 1990.
- [Sch91] Schweiger, H.F.; Haas, W.; Handel, E.: Finite-Element-Berechnungen zur Lösung boden- und felsmechanischer Probleme mit speziellen Elementformulierungen. Bauingenieur 66, S. 311-321, 1991.
- [Sch94] Schweiger, H.F.: Ein Beitrag zur Anwendung der Finite-Elemente-Methode in der Geotechnik. Habilitationsschrift, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz, 1994.
- [Scw89] Schwebel, J.: Die Dichtheitsprüfung von Abwasserrohren und –leitungen mit Luft. Dissertation, Ingenieurhochschule Cottbus, 1989.
- [Sei61] Seide, P; Weingarten, V.I.: On the Buckling of Circular Cylindrical Shells under Pure Bending. J. Appl. Mech. 28, S. 112-116, 1961.
- [Sel94] Selig, E.T.; DiFrancesco, L.C.; Mc Grath, T.J.: Laboratory Test of Buried Pipe in Hoop Compression. Buried Plastic Pipe Technology, 2nd Volume, Philadelphia 1994.
- [Shi01] Shimada, H.; Sasaoka, T.; Inoue, M; Kubota, S.; Kikuo, M.: Estimation of thrust in the construction of underground pipelines in curved area using slurry pipe-jacking. NoDig, Prag, 2001.
- [Sil84] Silberer, G.; Raffée, H. (Hrsg.): Warentest und Konsument – Nutzung, Wirkungen und Beurteilung der vergleichenden Warentests im Konsumentenbereich. Campus Verlag, Frankfurt/Main, 1984.
- [Sob79] Sobel, L.H.; Newman, S.Z.: Plastic in-plane bending and buckling of an elbow : comparison of experimental and simplified analysis results. Westinghouse Advanced Reactors Division, Report WARD-HT-94000-2, 1979.
- [Sör92] Sörgel, F.P.; Hurler, M.: Leichte Rohre, Vor- und Nachteile im Vergleich. Kunststoffe, 06/1992.
- [Sor07] Sorge, H.-C.: Technische Zustandsbewertung metallischer Wasserversorgungsleitungen als Beitrag zur Rehabilitationsplanung. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2007.
- [Spa05] Spahn, K.; Berger, W.; Mälzer, D.: Rohrleitungen in selbstverdichtenden Verfüllmaterialien. bi UmweltBau, 06/2005.
- [Spa37] Spangler, M.G.: Structural design of flexible pipe culverts. 17th Annual Meeting, Highway Research Board, 1937.
- [Spa47] Spangler, M.G.: Underground Conduits – an appraisal of modern Research. ASCE Proc., Paper 2337, 1947.
- [Spe79] Spence, J.; Toh, S.L.: Collapse of thin orthotropic elliptical cylindrical shells under combined bending and pressure loads. J. Appl. Mech., S. 363-371, 06/1979.
- [Spi98] Spielberg, P.: Einflüsse auf Rohrleitungen durch Bergsenkungen – Vorhersagemöglichkeiten zu Auswirkungen von Bergsenkungen. IKT-Workshop „Einflüsse auf Rohrleitungen durch Bergsenkungen“, IKT - Institut für Kanalisationstechnik, 11/1998.
- [Sta73] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Springer Verlag, Wien, 1973.



- [Ste00] Steinle, F.: Die Vielfalt experimenteller Erfahrung: Neue Perspektiven. In: „Die Erfahrungen, die wir machen, sprechen gegen die Erfahrungen, die wir haben“. Über Formen der Erfahrung in den Wissenschaften (Hrsg. Hampe, M.; Lotter, M.-S.). Erfahrung und Denken, Duncker & Humblot Berlin, Band 86, S. 213-233, 2000.
- [Ste02] Steffens, K. (Hrsg.); Falter B.; Grundwald, G.; Harder, H.: Abwasserkanäle und –leitungen, Statik bei der Substanzerhaltung und Renovierung (ASSUR). Abschlussbericht zum kooperativen Forschungsprojekt 01RA 9803/8, gefördert durch das BMBF, Institut für Experimentelle Statik, Hochschule Bremen, 2002.
- [Ste03] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2003.
- [Ste04] Stein, D.; Brauer, A.: Entwicklung von Prüf- und Beurteilungskriterien für Sanierungsverfahren für Abwasserleitungen zur Erteilung bauaufsichtlicher Zulassungen. Im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH, Bochum, 07/2004.
- [Ste05] Stein, R.; Trujillo Alvarez, R.: Vorausschauende Sanierungsplanung von Entwässerungssystemen auf der Basis konsistenter und stabiler Prognosemodelle. KA Korrespondenz Abwasser, 06/2005.
- [Ste05a] Stein, R.; Brauer, A.: Eine interessante Alternative. bi UmweltBau, 01/2005.
- [Ste99] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen. 3. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, 1999.
- [StGB08] Strafgesetzbuch (StGB). In der Fassung der Bekanntmachung vom 13. November 1998 (BGBl. I S. 3322), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 13. August 2008 (BGBl. I S. 1690).
- [Sto08] Stolzenburg, O.: Die Vorteile des Einsatzes von Flüssigboden für das Rohr-Boden-System - Flüssigboden im Sinne einer technischen Definition (terminus technicus), 22. Oldenburger Rohrleitungsforum, IRO, 02/2008.
- [SWT08] Stiftung Warentest: Satzung. Januar 2008. Download unter <http://www.test.de>, eingesehen am 14.01.2009.
- [SWT08a] Stiftung Warentest: Neutralitätsverpflichtung für Auftragnehmer. 2008. Download unter <http://www.test.de>, eingesehen am 14.01.2009.
- [TAB05] TAB: "Internet und Demokratie" - Analyse netzbasierter Kommunikation unter kulturellen Aspekten - TAB-Arbeitsbericht Nr. 100, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Berlin, 05/2005. Zusammenfassung unter <http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab100.htm>, eingesehen am 08.05.2009.
- [TAB08] TAB: Öffentliche elektronische Petitionen und bürgerschaftliche Teilhabe. TAB-Arbeitsbericht Nr. 127, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Berlin, 12/2008. Zusammenfassung unter <http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab127.htm>, eingesehen am 08.05.2009.
- [TC165a] TC 165 WI 188.4:2007: Classification and performance characteristics of techniques for renovation and repair of drains and sewers; Klassifizierung und Leistungsmerkmale von Techniken für die Renovierung und Reparatur von Abwasserkanälen und –leitungen. 2007, unveröffentlicht.

- [Ter36] Terzaghi, K.: Stress distribution in dry sand and in saturated sand above a yielding trap door. First International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 1936.
- [Ter54] Terzaghi, K.; Jelinek, R.: Theoretische Bodenmechanik. Springer Verlag, 1954.
- [Tet95] Tetens, H.: Reproduzierbarkeit. In: Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie (EPHW), Band 3, S. 593 ff, 1995.
- [The09] Thewes, M.: Auswahl umweltschonender, sicherer Bauverfahren zur Herstellung unterirdischer Infrastruktur (Verkehrstunnel, Ver- und Entsorgungstunnel). In: Schildvortrieb mit Tübbingausbau – eine umweltschonende, sichere Baumethode. Wissenschaftsstiftung Deutsch-Tschechisches Institut (WSDTI), GbR Veröffentlichungen Unterirdisches Bauen, Hamburg, 2009.
- [Thi84] Thiel, C.: objektiv/Objektivität. In: Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie (EPHW), Band 2, S. 1052-1054, 1984.
- [Tim61] Timoshenko, S.P; Gere, J.M.: Theory of elastic stability. 2nd edition, McGraw-Hill, 1961.
- [TR1295-2] TR 1295-2: Statische Berechnung von erdverlegten Rohrleitungen unter verschiedenen Belastungsbedingungen - Teil 2 : Zusammenstellung national eingeführter Berechnungsverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 02/2006.
- [TR1295-3] TR 1295-3: Structural design of buried pipelines under various conditions of loading – Part 3: Common method. Beuth Verlag, Berlin, 03/2008.
- [TÜV05] TÜV: Satzung des Technischer Überwachungs-Verein Rheinland Berlin Brandenburg Pfalz e.V.; Oktober 2005. Download unter <http://www.tuv.com>, eingesehen am 14.01.2009.
- [TÜV96] TÜV: Entwicklung von Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Alterung und Undichtigkeit bei Dichtungswerkstoffen und – systemen in industriellen und öffentlichen Abwasserrohrleitungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, gefördert durch das BMBF (02-WK 9175/0), TÜV Südwest, Filderstadt, 1996.
- [UNO92] UNO: Agenda 21, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro, - Original Dokument in deutscher Übersetzung -, [http://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda\\_21.pdf](http://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf), eingesehen am 14.01.2009.
- [Ver06] Verburg, N.: An analysis of friction by microtunnelling. Final report, TU Delft, 12/2006.
- [VOB06] VOB: Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB), Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen (VOB/B). Ausgabe 2006.
- [Voe37] Voellmy, A.: Eingebettete Rohre – Statische Untersuchung überschütteter Leitungen mit Berücksichtigung ihrer Elastizität. Dissertation, ETH Zürich, AG Gebr. Leemann & Co., Zürich, 1937.
- [Vog93] Vogel, J.; Rizkallah, V.; Hasan, M.: Begehbare und nichtbegehbare Rohrvortriebe – Verfahren, Bauschadensfälle und Empfehlungen zur Schadensminimierung. Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Mitteilungsheft 38, Universität Hannover, 1993.

- [Wag92] Wagner, V.: Beulnachweis bei der Sanierung von nichtbegehbaren, undichten Abwasserkanälen mit dem Schlauchverfahren. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1992.
- [Wag04] Wagner, V.: Schlauchlining, das berechenbare Renovierungsverfahren. 2. Deutscher Schlauchlinertag, Würzburg, 2004.
- [Wan08] Waniek, R.W.; Homann, D: IKT-LinerReport 2007, Schlauchlinerqualität 2007: Besser als im Vorjahr. bi UmweltBau, 01/2008.
- [Wat68] Watkins, R.K.; Ghavami, M.; Longhurst, G.R.: Minimum cover for buried flexible conduits. Journal of the Pipeline Division, Proc. of the ASCE, 10/1968.
- [Web81] Weber, W.: Experimentelle Untersuchungen in rolligem Boden zur Dimensionierung von Pressbohranlagen. Dissertation, Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, RWTH Aachen, 1981.
- [Wei08] Weidlich, I.: Untersuchung zur Reibung an zyklisch axial verschobenen erdverlegten Rohren. Dissertation, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Mitteilungsheft 64, Leibniz Universität Hannover, 2008.
- [Wei97] Weith, C.: Vergleichende Untersuchung zur Bemessung von mittels Relining-Verfahren sanierten Abwasserleitungen. Diplomarbeit, Arbeitsgruppe Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Ruhr-Universität Bochum, 1997.
- [Wer05] Werner, M.H.: Einführung in die philosophische Ethik I: Gegenstand und Aufgabe der Ethik und II: Methoden und Theorien der Ethik. Fernlehrgang „Berater/in für Ethik im Gesundheitswesen“, Klinikum Nürnberg, Centrum für Kommunikation Information Bildung, 2005.
- [WHG07] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG). In der Fassung der Bekanntmachung vom 19. August 2002 (BGBl. I S. 3245), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 666).
- [Woo58] Wood, J.D.: The Flexure of a Uniformly Pressurized, Circular, Cylindrical Shell. J. Appl. Mech., S. 453-458, 12/1958.
- [Zer04] Zerna, Köpper & Partner – Ingenieurgesellschaft für Bautechnik: Numerische Untersuchungen zu Rohrvortrieben. Abschlussbericht, Bochum, 09/2004.
- [Zer49] Zerna, W.: Beitrag zur allgemeinen Schalenbiegetheorie. Ingenieur-Archiv 17, S. 149-164, Springer Verlag, 1949.
- [Zie75] Zienkiewicz, O.C.: Methode der finiten Elemente. Carl Hanser Verlag, München, 1975.
- [Zie77] Zienkiewicz, O.C.; Pande, G.N.: Some useful forms of isotropic yield surfaces for soil and rock mechanics. Finite Elements in Geomechanics, S. 179-190, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [Zim94] Zimmermann, H.: Beanspruchung eines Auskleidungsrohres in Verbindung mit einer längs gerissenen, elastisch gebetteten Rohrleitung. Dissertation, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen 1994-12, Ruhr-Universität Bochum, 1994.

## **Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE)**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Erich Lackner

---

- |    |         |                             |   |
|----|---------|-----------------------------|---|
|    | Heft 1  | Rizkallah, V.               | Die erdstatische Bemessung von Wänden und Pfählen in Sandböden (1971)   |
| v) | Heft 2  | Lohmann, H.                 | Ein Beitrag zur Spannungsberechnung in der elastisch-isotropen Halbebene unter tief angreifenden Lasten und Anwendungsmöglichkeiten auf den Baugrund (1971) |
| v) | Heft 3  | Weißbach, A.                | Baugrubensicherung - Berechnung und Konstruktion von Baugrubenumschließungen (1973)   |
| v) | Heft 4  | Leonhardt, G.               | Die Belastung von starren Rohrleitungen unter Dämmen (1973)   |
|    | Heft 5  | Rizkallah, V.               | Großbohrpfähle - Beitrag zur Abschätzung der lotrechten Tragfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit (1973)   |
|    | Heft 6  | Hahn, F. R.                 | Ein Beitrag zur Herstellung und Ermittlung der Tragfähigkeit von temporären Erdankern in den Bodenarten der hannoverschen Kreideformation (1974)            |
|    | Heft 7  | Blümel, W.                  | Ein Beitrag zum eindimensionalen Konsolidierungsverhalten von Klei im Kompressionsversuch (1974)  |
|    | Heft 8  | Grade, H.                   | Ein Beitrag zur Abschätzung der Tragfähigkeit von Verpreßankern in nicht-injizierbaren, nichtbindigen Böden (1974)  |
|    | Heft 9  | Krämer, U.                  | Zugwiderstände und Eindringverhalten von Schiffsankern in nichtbindige Böden (1974)   |
|    | Heft 10 | Krämer, U.<br>Rizkallah, V. | Erfahrungen bei der Ermittlung von Scherparametern im Kastenscherggerät (1976)  |
| v) | Heft 11 | Richwien, W.                | Zum Einfluß der Konsolidierungsdauer auf die wirksame Spannung und die Scherfestigkeit von aufbereitetem Klei (1976)  |
|    | Heft 12 | Krämer, H.                  | Abschätzung der Tragfähigkeit von Verpreßankern durch Anwendung der Korrelationstheorie (1977)  |
|    | Heft 13 | Quast, P.                   | Ein Beitrag zum Kriechverhalten eines norddeutschen Kleis (1977)  |
|    | Heft 14 | Paschen, R.                 | Konsolidierungs- und Scherverhalten von salzhaltigem Klei (1977)  |
| v) | Heft 15 | Liedtke, L.                 | Berechnung der Tragfähigkeit von temporären Erdankern mit der Methode der finiten Elemente (1978)   |
|    | Heft 16 | Blümel, W.                  | Ein Verfahren zur Verminderung des Porenwasserdrucks bei Baugruben im Ton durch Entspannungsbohrungen (1979)  |

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Victor Rizkallah

---

- |    |         |                      |   |
|----|---------|----------------------|---|
| v) | Heft 17 | Hellweg, V.          | Ein Vorschlag zur Abschätzung des Setzungs- und Sackungsverhaltens nichtbindiger Böden bei Durchnässung (1981)    |
|    | Heft 18 | Richwien, W.         | Das Formänderungs- und Festigkeitsverhalten weicher bindiger Böden (1981)   |
| v) | Heft 19 | Maschwitz, G.        | Ein Beitrag zur Abschätzung des Tragverhaltens von unbewehrten pfahlartigen Tragelementen (1983)                  |
|    | Heft 20 | Cunze, G.            | Ein Beitrag zur Abschätzung des Porenwasserüberdrucks beim Rammen von Verdrängungspfählen in bindige Böden (1985) |
|    | Heft 21 | Wehner, T.           | Seegangserzeugte Spannungsänderungen im Sandkern eines Seedeichs (1987)   |
| v) | Heft 22 | Rizkallah, V. et al. | Festschrift aus Anlaß des 75. Geburtstages von o. Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Erich Lackner (1988)           |
| v) | Heft 23 | El Sherif, M. M.     | Ein Beitrag zur Stabilisierung von bindigen Sedimentböden in  |

- Entwicklungsländern (1988)
- v) Heft 24 Buchmann, K.-J. Zum Tragverhalten ausgesteifter Bohrpfahlwände im Hannoverschen Ton (1988)
- Heft 25 Harder, H. Numerische Modellierung des "Cone Penetration Tests" in wassergesättigten bindigen Böden (1989)
- v) Heft 26 Rizkallah, V., Hilmer, K. Bauwerksunterfangung und Baugrundinjektion mit hohen Drücken (Düsenstrahlinjektion) (1989)
- v) Heft 28 Rizkallah, V. et al. Bauschäden im Spezialtiefbau (Baugruben, Rohrvortriebe, unterirdische Bauanlagen) (1990)
- Heft 29 Rizkallah, V. et al. Geböschte Baugruben, Baugruben mit Stahlspundwänden (1991)
- Heft 30 Eklun-Natey, D. Erodierbarkeit zementstabilisierter tropischer Böden im Straßenbau Togos (1992)
- Heft 31 Achmus, M., Rizkallah, V. Vortrieb von Rechteckprofilen (Belastungen-Bemessung-Anwendung) (1992)
- Heft 32 Jebe, P., Rizkallah, V. et al. Untersuchung von Hochbauschäden in den neuen Bundesländern Teil 1: Globale Bestandsaufnahme und systematische Erfassung (1993)
- Heft 33 Beilke, O. Interaktionsverhalten des Bauwerks "Fernwärmeleitung - Bettungsmaterial" (1993)
- Heft 34 Jebe, P., Rizkallah, V. et al. Untersuchung von Hochbauschäden in den neuen Bundesländern Teil 2: Dokumentation des baulichen Zustands historischer Bauwerke (1993)
- v) Heft 35 Vogel, J. Untersuchungen bauschadensrelevanter Faktoren beim Vorpressen begehbare Rohre (1993)
- Heft 36 Vogel, J. et al. Festschrift aus Anlaß des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. V. Rizkallah (1993)
- Heft 38 Vogel, J., Rizkallah, V. et al. Begehbare und nichtbegehbare Rohrvortriebe Verfahren, Bauschadensfälle und Empfehlungen zur Schadensminimierung (1993)
- Heft 39 Jebe, P., Rizkallah, V. Beispiele zur Sanierung alter Bausubstanz (1994)
- Heft 41 Achmus, M. Zur Berechnung der Beanspruchungen und Verschiebungen erdverlegter Fernwärmeleitungen (1995)
- Heft 43 von Bloh, G. Verfahren zur Ermittlung des Scherverhaltens von Bagger- und Klärschlamm mit der Flügelsonde (1995)
- Heft 44 Clasmeier, H.-D. Ein Beitrag zur erdstatischen Berechnung von Kreiszellenfangedämmen (1995)
- Heft 45 Hasan, M. Abschätzung der Eindring- und Reibungswiderstände beim unterirdischen Rohrvortrieb (1996)
- Heft 47 Rizkallah, V., Richwien, A. Beschleunigte Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes bindiger Böden (1998)
- v) Heft 48 Bruns, T. Untersuchung des Tragverhaltens von Ortbetonschraubpfählen (1998)
- Heft 49 Döbbelin, J. U. Salveter, G. et al. Festschrift aus Anlaß des 65. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. V. Rizkallah (1998)
- Heft 52 Salveter, G. Validierung numerischer Verfahren zur Berechnung des Interaktionsverhaltens "Fernwärmeleitung – Baugrund" (2000)
- Heft 53 Döbbelin, J. U. Zur geotechnischen Anwendung wissensbasierter Systeme mit Elementen der Fuzzy-Logik (2000)
- v) Heft 54 Baesmann, A., Rizkallah, V. Berechnung und Bemessung von Pfahl-Plattengründungen (2000)
- Heft 55 Kaiser, J. Zu Schadensursachen und zur Setzungsproblematik bei herkömmlichen Bauwerksunterfangungen (2000)

Heft 58 Döbbelin, J.U.      Empfehlungen zur Vermeidung von Planungs- und  
Rizkallah, V.            Ausschreibungsfehlern bei Ingenieurbauwerken (2001)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Hanno Müller – Kirchenbauer / Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel

---

Heft 27 Friedrich, W.            Ausbreitung chlorierter Kohlenwasserstoffe bei Einkapselung und  
Inversionsströmung (1989)

Heft 37 Rogner, J.                Modelle zur Beständigkeitsbewertung von Dichtwandmassen auf der  
Basis von Lagerungsversuchen (1993)

Heft 40 initiiert von Univ.-      Festschrift aus Anlaß des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Prof.Dr.-Ing. habil.      H. Müller – Kirchenbauer  
S. Savidis

Heft 42 Schlötzer, C.            Filtrationsverhalten von Dichtsuspensionen an flüssigkeitsgestützten  
Erdwänden (1995)

Heft 46 Brummermann, K.      Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponiebasis-  
Abdichtungen - Prüfung und Bewertung ihrer Wirksamkeit (1997)

Heft 50 Mbonimpa, M.            Injizierfähigkeit von Feistbindemittelsuspensionen zur Abdichtung  
von Lockergesteinen (1998)

Heft 51 Düser, O.              Verwertung von aus Bauschutt aufbereitetem Recyclingmaterial in  
mineralischen Dichtungssystemen (1999)

Heft 56 Stoewahse, C.        Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und  
Erdstoffen im Rahmenschergerät (2001)

Heft 57 Gawalek, K.        Silikatgele auf Organosilanbasis für Abdichtungsinjektionen im  
Lockergestein (2001)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus / Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel

---

Heft 59 Doll, H.                 Dimensionierung von Kunststofflinern – Close-Fit-Verfahren (2001)

Heft 60 Kuk, M.                Untersuchungen zur Beeinflussung der Feistbindemittelausbreitung im  
Lockergestein durch Filtrationsmechanismen (2004)

Heft 61 Achmus, M.            Bauwerkserschütterungen durch Tiefbauarbeiten (2005)  
Kaiser, J.  
tom Wörden, F.

Heft 62 Mansour, B.G.S.        Investigations on Design and Rehabilitation Options for River  
Barrages with Special Respect to Piping (2005)

Heft 63 Achmus, M.            Bodenmechanik und Grundbau - Grundlagen und Konzepte (2007)

Heft 64 Weidlich, I.            Untersuchung zur Reibung an zyklisch axial verschobenen  
erdverlegten Rohren (2008)

Heft 65 Kuo, Y.-S.            On the behavior of large-diameter piles under cyclic lateral  
load (2008)

Heft 66 Maßmann, J.        Modeling of Excavation Induced Coupled Hydraulic-Mechanical  
Processes in Claystone (2009)

Heft 67 Müller-                    Funktionsnachweis für geotextile Tondichtungsbahnen in  
Kirchenbauer, A.        Deponieoberflächenabdichtungen (2009)

Heft 68 tom Wörden, F.        Untersuchungen zum räumlichen aktiven Erddruck auf starre vertikale  
Bauteile im nichtbindigen Boden (2010)

Heft 69 Quast, A.              Zur Baugrundsteifigkeit bei der gesamtdynamischen Berechnung von  
Windenergieanlagen (2010)

Heft 70 Bosseler, B.            Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und  
zur Instandhaltung unterirdischer Kanäle und Leitungen

