



Hochschule
Augsburg University of
Applied Sciences

Schlussbericht

F&E-Vorhaben

Prüfung und Sanierung von Abwasserdruckleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Risikopotentials seeverlegter Leitungen

Auftraggeber:

Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Hochschule Augsburg
Fakultät Architektur und Bauwesen
Wasserwirtschaft und Umwelttechnik
König, Johannes, M.Eng.
Montau, Benedict, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Rita Hilliges

In Zusammenarbeit mit:

INGENIEURBÜRO WOLFF
TIEFBAU WASSER TECHNIK

Mitterstraßweg 23, 82064 Straßlach





Inhalt

1	Veranlassung und Ausgangssituation	8
2	Fachspezifische Grundlagen.....	12
2.1	Stand der Technik	12
2.1.1	Normierte Verfahren zur Prüfung der Dichtheit von Druckleitungen .	14
2.2	Gesetz von Boyle-Mariotte	26
3	Grundlagen Prüfverfahren für Abwasserdruckleitungen.....	28
3.1	Testleitung HSA	28
3.2	Prüfstand zur Untersuchung des Luftaustrags in Druckleitungen.....	31
3.3	Rahmenbedingung	33
3.3.1	Generelle Festlegungen.....	33
3.3.2	Identifikation von in Betrieb befindlichen Druckleitungen.....	33
3.3.3	Prüffirmen	35
3.3.4	Prüfequipment	35
3.3.5	Leckagevolumen.....	41
3.3.6	Prüfdruck	42
3.3.7	HSA-Normalverfahren	44
3.3.8	20-Min Test.....	49
4	Entwicklung der Prüfverfahren	53
4.1	Theoretische Überlegungen zur Anwendung des HSA-Normalverfahrens an Beispielleitungen mit großen Durchmessern	53
4.1.1	Theoretische Luftvolumenbestimmung bei der Druckprüfung von Rohrleitungen nach Teschke	54
4.1.2	Problematik der zulässigen Leckage- und Luftmenge in Druckleitungen.....	60
4.1.3	Problematik der Materialdehnung bei Rohrleitungen mit großen Durchmessern	66
4.1.4	Anpassung der Leckage	72
4.1.5	Maximale Anhebung des Prüfdrucks.....	79
4.1.6	Zulässiges Ablassvolumen in der Druckabfallprüfung	80
4.1.7	Maximal zulässiger Luftanteil.....	82
4.1.8	Bestimmung des Grenzwerts in der Hauptprüfung.....	83
4.1.9	Dauer der Vorprüfung	84
4.2	20-Min Test	86



4.2.1	Entwicklung des Nachpumpintervalls	87
4.2.2	Maximal zulässiger Luftanteil.....	88
4.2.3	Notwendigkeit Vorprüfung 20-Min Test.....	92
4.2.4	Abbruchkriterium des 20-Min Tests	95
5	Entwicklung des Simulationstools für die Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens sowie den 20-Min Test	96
5.1	Simulation des Leckagevolumens	98
5.2	Aufbau der Simulation.....	104
5.2.1	HSA-Normalverfahren	105
5.2.2	20-Min Test	117
5.3	Extremfallbetrachtung	126
5.3.1	HSA-Normalverfahren	126
5.3.2	Anhebung des Prüfdrucks bei Überschreitung des zulässigen Luftanteils.....	134
5.4	Verifizierung der Ergebnisse der Simulation.....	136
5.4.1	Verifizierung des HSA-Normalverfahrens	137
5.4.2	Verifizierung des 20-Min Tests	144
6	Auswertung der Ergebnisse aus der Luftanteilsberechnung	149
6.1	Auffälligkeiten und Fehlerquellen bei der Berechnung vorhandener Luftanteile	149
6.1.1	Fehlerquellen in der Luftanteilsberechnung	150
6.1.2	Unterschiede in der Luftanteilsberechnung durch Aufpump- und Ablassvorgängen.....	150
6.2	Streuung der berechneten Luftanteile	152
7	Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen.....	155
7.1	Durchgeführte Dichtheitsprüfungen.....	156
7.2	Druckluftspülung und Fortpflanzung von Druckstößen	158
7.3	Ergebnisse des HSA-Normalverfahrens an realen Abwasserdruckleitungen	161
7.4	Ergebnisse der 20-Min Tests an realen Abwasserdruckleitungen	168
7.4.1	Grenzwert 20-Min Test	174
8	Sicherheiten	178
8.1	Sicherheiten HSA-Normalverfahren	178
8.1.1	Einfluss der Lage der Luftanteile in der Leitung.....	178



8.1.2	Sicherheitsaufschlag auf berechneten Luftanteil	184
8.2	Sicherheiten 20-Min Test.....	191
9	Maximale Prüfabschnitte und Nenndurchmesser	192
10	Prüfung neuer Abwasserdruckleitungen	195
11	Empfehlungen für eine reibungslose Durchführung von Druckprüfungen in der Praxis	197
11.1	Sichtung der Unterlagen und Bestimmung der Leitungseigenschaften	197
11.2	Bauliche Voraussetzungen für die Prüfbarkeit von Abwasserdruckleitungen	198
11.3	Gewährleisten einer ausreichenden Luftfreiheit.....	202
11.3.1	Betriebliche/Bauliche Maßnahmen zur Vermeidung von Luftanteilen	202
11.3.2	Methoden zum Austrag von Luftanteilen.....	205
11.3.3	Gegenüberstellung der im Forschungsprojekt erzielten minimalen Luftanteile an realen Druckleitungen.....	209
11.4	Umgang mit Druckleitungen aus Asbestzement	212
12	Instandhaltungsmaßnahmen und Havariekonzepte	213
13	Schäden an Abwasserdruckleitungen	216
13.1	Bekannte Schadensbilder an Abwasserdruckleitungen	216
13.2	Erkennen einer unzulässigen Undichtigkeit an der Druckleitung – erste Handlungsempfehlung zur Ortung der Leckage	220
13.3	Verfahren zur Ortung von Leckagen in Abwasserdruckleitungen.....	222
13.3.1	SmartBall-Verfahren der Fa. Xylem Water Solutions GmbH	224
13.3.2	Einsatz des SmartBall-Verfahrens an der südlichen Druckleitung Zirndorf	226
13.3.3	Zustandserfassung mittels Einsatz von Sicherheitsrohrsystemen bei der Neuverlegung von Abwasserdruckleitungen	228
13.4	Sanierung von Abwasserdruckleitungen.....	229
14	Seedruckleitungen	233
14.1	Einführung Seedruckleitungen.....	233
14.1.1	Verwendete Materialien	235
14.1.2	Ballastierung seeverlegter Druckleitungen.....	236
14.1.3	Verlegung von Seedruckleitungen	237
14.1.4	Differenz zwischen Innen- und Außendrücken.....	238



14.1.5	Zustandserfassung und Leckageortung an Seedruckleitungen.....	238
14.1.6	Sanierungsmöglichkeiten seeverlegter Abwasserdruckleitungen....	243
14.2	Seedruckleitungen in Bayern	245
14.2.1	Seedruckleitungen Chiemsee.....	246
14.2.2	Seedruckleitung Starnberger See.....	249
14.2.3	Seedruckleitungen Königssee	250
14.2.4	Seedruckleitung Obersee am Königssee.....	256
14.2.5	Abwasserdruckleitung Rottachsee.....	258
14.2.6	Abwasserdruckleitung Großer Alpsee	259
14.2.7	Abwasserdruckleitung Förgensee.....	261
14.3	Probleme und Risiken beim Betrieb von Abwasserdruckleitungen im Bereich von bayerischen Seen.....	264
14.3.1	Gefahr des Aufschwimmens.....	265
14.3.2	Gefahr von Beschädigungen durch Dritte	269
14.3.3	Gefahr von Beschädigungen durch hohen Außendruck.....	271
14.3.4	Gefahr von Schäden durch zunehmende Alterung seeverlegter Druckrohre	274
14.3.5	Auswirkungen von Schäden und Betriebsproblemen an Seedruckleitungen.....	277
14.3.6	Instandhaltungsmaßnahmen und Havariekonzepte zur Reduzierung des Risikopotentials von Seedruckleitungen.....	281
14.4	Dichtheitsprüfungen an seeverlegten Abwasserdruckleitungen.....	284
14.4.1	Dichtheitsprüfungen an seeverlegten Druckleitungen durch die Betreiber.....	284
14.4.2	Prüfdruck des HSA-Normalverfahrens für Prüfungen an in Betrieb befindlichen seeverlegten Abwasserdruckleitungen.....	284
14.4.3	Durchführung des HSA-Normalverfahrens an seeverlegten Druckleitungen in Bayern.....	286
14.4.4	Durchführung des 20-Min Tests an seeverlegten Druckleitungen...	287
15	Zusammenfassung	288
15.1	Kurzbeschreibung HSA-Normalverfahren	293
15.2	Kurzbeschreibung 20-Min Test	295
	Abbildungsverzeichnis.....	297
	Tabellenverzeichnis.....	304
	Literaturverzeichnis	306



Anhangsverzeichnis..... |



Vorbemerkung

Dieses Forschungsvorhaben baut auf dem Forschungsvorhaben „Durchführung von Dichtheitsprüfungen an bestehenden Abwasserdruckleitungen“ aus dem Jahr 2017 auf, das durch die Hochschule Augsburg (HSA) für das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) durchgeführt wurde. Hinsichtlich der Grundlagen sowie der Ergebnisse des Vorgängerprojektes wird auf die Berichte des Vorgängerprojektes verwiesen.

Im Rahmen dieses Berichts wurde durchgehend die Einheit bar für Drücke verwendet, da es sich in der Praxis um die gebräuchlichste Einheit handelt. In den Normen (DIN EN 805, 2000) und (DIN EN 1610, 2015) wird für Druck die Einheit kPa verwendet. In dem gängigeren Regelwerk (DVGW-W 400-2, 2004) wird jedoch die Einheit bar verwendet, entsprechend dem gängigen Umgang in der Praxis.

Daher wurde in diesem Bericht auf die Verwendung der kohärent abgeleiteten SI-Einheit des weltweit akzeptierten Internationalen Einheitensystem SI (Le Système internationale d'unités) für Druck Pascal (Pa) verzichtet. Da Drucklogger i.d.R. den Relativdruck angeben, kommt dieser beim Verwenden des Formelapparats zum Einsatz.

Das HSA-Normalverfahren wurde ausschließlich für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen entwickelt. Für neue Abwasserdruckleitungen wird weiterhin eine Prüfung mit hohen Drücken, analog der Prüfungen im Trinkwasserbereich, vorgeschlagen (siehe Kap. 10).

Für die Durchführung dieses Forschungsprojekts war die Unterstützung von Netzbetreibern essentiell, die ihre Leitungen für die Prüfungen zur Verfügung gestellt haben. Neben der Bereitstellung der Leitungen war oft auch eine aufwändige Identifikation von prüfbaren Abwasserdruckleitungen inkl. Vor-Ort-Terminen erforderlich. In vielen Fällen waren sogar bauliche Maßnahmen erforderlich, um die Druckprüfung zu ermöglichen. Durch die Pandemie wurde die Durchführung von Druckprüfungen weiter erschwert. Daher gilt unser besonderer Dank den Betreibern – nicht nur für die Bereitstellung der Leitungen – sondern auch für den Einsatz von Personal und Sachmitteln, um die Prüfungen zu ermöglichen – sogar in Zeiten einer Pandemie.

Viele Erkenntnisse konnten durch den Einsatz von Druckloggern gewonnen werden. Für die Bereitstellung der Drucklogger danken wir Hr. Eckhardt, Wasser-Müller Ingenieurbüro GmbH, Biberach. Für die großzügige Bereitstellung des Hochdruckreinigers danken wir dem Kärcher Center Frisch, Gersthofen. Durch die Firma MesSen Nord wurde ebenfalls ein Prüfgerät zur Verfügung gestellt. Unser



Dank geht an Hr. Machka. Ferner möchten wir uns bei den Netzbetreibern bedanken, die durch Ihren großen Einsatz die Druckprüfungen an Ihren Druckleitungen und damit dieses Forschungsprojekt ermöglicht haben.

Last but not least danken wir dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) sowie dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) für die Finanzierung des Projekts. Außerdem bedanken wir uns für die gute Zusammenarbeit, insbesondere bei Herrn Loy und Herrn Backhof.



1 Veranlassung und Ausgangssituation

Die derzeit gültige (EÜV - Eigenüberwachungsverordnung, 1995) besagt, dass Sammelkanalisationen einschließlich zugehöriger Sonderbauwerke überwacht werden müssen. Dies inkludiert auch Abwasserdruckleitungen.

Laut dieser Verordnung muss der Kanal einmal in 10 Jahren einer eingehenden Sichtprüfung unterzogen werden. Bei Rohrdurchmessern < DN 1200 soll die Sichtprüfung mittels Fernsehuntersuchung stattfinden (EÜV - Eigenüberwachungsverordnung, 1995). Eine Prüfung auf Wasserdichtheit ist nach Eigenüberwachungsverordnung alle 20 Jahre durchzuführen, jedoch erstmalig 40 Jahre nach der Inbetriebnahme.

Durch die teils geringen Durchmesser der Abwasserdruckleitungen, der nicht immer geraden Leitungsführung sowie der gegenüber des Freispiegelkanals sehr langen Leitungsabschnitte ist eine Sichtprüfung mittels Fernsehuntersuchung oft nicht möglich. Des Weiteren können aus unter Druck stehenden Abwasserleitungen bereits durch kleine Schadstellen erhebliche Wassermengen austreten, welche, u.U. auch durch eine Sielhaut oder Ablagerungen verdeckt sind und mittels optischer Untersuchung nicht immer sicher erkannt werden können. Hinzu kommt, dass sich viskoelastische Druckrohre gegenüber dem im Betrieb auftretenden Leitungsdruck im drucklosen Zustand zusammenziehen. Durch diesen Effekt können sich kleinere Schadstellen im drucklosen Zustand der Leitung verschließen und während der Sichtprüfung ggf. übersehen werden.

Derzeit wird die EÜV überarbeitet. Der den Fachverbänden zur Stellungnahme vorgelegte Entwurf vom April 2020 enthält eine explizite Anforderung zur Überprüfung von Abwasserdruckleitungen. Nach diesem Entwurf sind Druckleitungen einmal jährlich visuell im Bereich von Kontroll- und Reinigungsöffnungen zu überprüfen sowie einmal in 10 Jahren mittels Druckprüfung. Im Entwurf ist jedoch noch eine Übergangsfrist von 5 Jahren nach Inkrafttreten der neuen EÜV vorgesehen.

Abwasserdruckleitungen weisen gegenüber Freispiegelleitungen ein höheres Schadenspotential für die Umwelt auf. Durch den vorhandenen Leitungsdruck kommt es bei Undichtigkeiten in Druckleitungen zu einer Exfiltration des Abwassers und einer erhöhten Ausbreitung im vorhandenen Boden. Dies kann zu einer Kontamination von Boden und Grundwasser führen.

Um die Dichtheit von Druckleitungen überprüfen zu können, muss i.d.R. eine Druckprüfung der in Betrieb befindlichen Leitung durchgeführt werden. Bisher liegt jedoch nur für den Bereich der Trinkwasserdruckleitungen ein entsprechendes standardisiertes Prüfverfahren vor (DIN EN 805, 2000) und (DVGW-W 400-2, 2004).



Es ist jedoch zu beachten, dass sich die vorhandenen Normen zur Druckprüfung von Trinkwasserleitungen nur auf die Prüfung neuer Leitungen beziehen, die vor einer Inbetriebnahme geprüft werden. Ein weiterer Unterschied zwischen Trinkwasser- und Abwasserdruckleitungen ist neben dem unterschiedlichen Medium auch der i.d.R. grundlegend höhere Druckbereich von Trinkwasserleitungen. Zudem beträgt die Prüfdauer in Abhängigkeit des Leitungsmaterials oft mehrere Stunden. Die Dichtheit von Trinkwasserleitungen im Betrieb wird mittels Bilanzierung überprüft. Dies ist bei Abwasserdruckleitungen aufgrund fehlender Armaturen sowie Messfehlern durch z.B. Lufteinschlüsse nicht möglich. Lange Außerbetriebnahmen, wie sie bei der Dichtheitsprüfung von Trinkwasserleitungen auftreten, sind bei in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen jedoch meist nicht möglich. Auch die für Trinkwasserleitungen typischen Prüfdrücke von 15 bzw. 21 bar sind bei Prüfungen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen i.d.R. nicht sinnvoll und oftmals aufgrund der vorhandenen für niedrigen Druck ausgelegte Armaturen auch nicht möglich.

Dieses Forschungsvorhaben baut auf dem Forschungsvorhaben „Durchführung von Dichtheitsprüfungen an bestehenden Abwasserdruckleitungen“ aus dem Jahr 2017 auf, das durch die Hochschule Augsburg (HSA) für das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) durchgeführt wurde. Ziel dieses ersten Forschungsprojektes war es, die Übertragbarkeit der Dichtheitsprüfungen zur Abnahme von Trinkwasserdruckleitungen nach (DIN EN 805, 2000) in Verbindung mit (DVGW-W 400-2, 2004) auf in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen zu überprüfen und ggfs. angepasste Verfahren vorzuschlagen. Im Rahmen des Projektes hatte sich relativ schnell gezeigt, dass eine direkte Übertragbarkeit der Prüfverfahren aus dem Trinkwasserbereich auf in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen nicht möglich ist. Daher wurde in Abstimmung mit dem LfU ein umfangreiches Konzept mit unterschiedlichen Prüfungen entwickelt und an sieben geeigneten Leitungen aus PE und Guss eine Vielzahl von Prüfungen durchgeführt.

Im Rahmen dieses ersten Projektes konnte ein Vorschlag für ein praktikables Prüfverfahren entwickelt werden, das sog. HSA-Normalverfahren. Dieses Verfahren basiert auf dem Normalverfahren nach W 400-2, ist jedoch an die speziellen Randbedingungen in Betrieb befindlicher Abwasserdruckleitungen angepasst worden. Abgesehen von Prüfungen mit sehr hohen Luftanteilen konnten mit dem HSA-Normalverfahren alle Leckagen sicher erkannt werden. Durch die kurze Projektlaufzeit konnte das Verfahren jedoch nur an Leitungen mit kleinen Durchmessern getestet werden und noch nicht umfassend auf eine allgemeingültige Anwendbarkeit hin untersucht werden.

Neben dem HSA-Normalverfahren erwies sich auch der sog. 20-Min Test, ursprünglich basierend auf dem korrespondierenden englischen Regelwerk, durch die geringe Prüfdauer von nur 20 min als vielversprechend.



Im Rahmen der hier vorgestellten Fortsetzung des Forschungsvorhabens „Prüfung und Sanierung von Abwasserdruckleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Risikopotentials seeverlegter Leitungen“ stand v.a. die Weiterentwicklung und anschließende Verifizierung des HSA-Normalverfahrens als allgemeingültiges Prüfverfahren im Vordergrund, sowie die Entwicklung und Erprobung des 20-Min Tests.

Hierzu wurden umfangreiche Prüfungen an realen in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen vorgesehen. Zusätzlich zur Variation der örtlich unterschiedlichen Leitungskennwerte wie Material, Durchmesser, Länge, Höhenverlauf, hydrostatischer Druck, etc. der Leitung sollten folgende Einflussgrößen auf die Prüfungen gezielt untersucht werden:

- Prüfdruck
- Leckagegröße
- Einfluss von unvermeidbaren Luftanteilen in der Leitung

Ein Untersuchungsaspekt, der im Vorgängerprojekt nicht umgesetzt werden konnte, waren die Untersuchungen an Leitungen mit Durchmessern deutlich über DN100. Daher wurden insbesondere Untersuchungen an diesen Leitungen vorgesehen.

Neben den Prüfungen an realen Leitungen waren umfangreiche Untersuchungen an zwei Testleitungen im Labor der HSA vorgesehen, um Prüfequipment zu optimieren und um spezielle Fragestellungen detailliert untersuchen zu können.

Im Fokus der Untersuchungen stand auch die Erarbeitung von Grenzwerten sowie die Bestimmung der relevanten Einflussgrößen auf die Prüfverfahren – v.a. zur Berücksichtigung der Worstcases, um das Verfahren an möglichst allen in der Praxis vorkommenden Fällen einsetzen zu können. Hierzu sollte durch die Identifizierung der relevanten Einflussgrößen und deren theoretische Grundlagen ein Simulationstool entwickelt werden, um die Ergebnisse der beiden Prüfverfahren auch leitungsspezifisch berechnen zu können. Dies ermöglichte ein besseres Verständnis der Einflussgrößen und konnte bei der finalen Entwicklung der Prüfverfahren entscheidende Grundlagen schaffen. Das Simulationstool war jedoch zunächst anhand der vorab gewonnenen Ergebnisse an realen sowie Testleitungen durch Abgleich der Ergebnisse zu verifizieren. Anschließend sollte das Simulationstool für die Klärung gezielter Fragestellungen im Rahmen der Entwicklung der Prüfverfahren eingesetzt werden, da relevanten Aspekte an Dichtheitsprüfungen gezielt berechnet werden können. Dies war für die Entwicklung der Verfahren von großem Wert, u.a. zur Entwicklung von Grenzwerten sowie von Sicherheiten im Verfahren.

So sollte auf Grundlage der Prüfungen an realen in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen sowie der Ergebnisse der Simulation die Entwicklung der beiden



Prüfverfahren abgeschlossen werden. Eine Kurzbeschreibung des HSA-Normalverfahrens sowie des 20-Min Tests war abschließend für Prüffirmen und Betreiber zu verfassen.

Die Prüfverfahren sind für die Anwendung an Abwasserdruckleitungen im Betrieb vorgesehen. Der Umgang mit neuen Abwasserdruckleitungen wurde jedoch auch kurz behandelt.

Zur Unterstützung der Netzbetreiber sollten des Weiteren die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Umsetzung der Dichtheitsprüfungen in der Praxis zusammengefasst werden. Neben der Durchführung der Druckprüfungen selbst sollten weitere betriebliche Aspekte wie Havariekonzepte sowie das Lokalisieren und Sanieren von Abwasserdruckleitungen beleuchtet werden.

Einen besonderen Bereich der Abwasserdruckleitungen bilden seeverlegte Abwasserdruckleitungen. Neben einer Bewertung der besonderen Risiken, der Erfassung der aktuellen Situation in Bayern waren auch hier die wichtigsten Erkenntnisse für den vorausschauenden Betrieb der Anlagen zusammenzufassen sowie Empfehlungen für die Instandhaltung auszuarbeiten und geeignete Sanierungsverfahren zusammenzustellen. Weiteres Ziel war die Durchführung von Untersuchungen an Seedruckleitungen und die Übertragung der entwickelten Prüfverfahren auch auf diese besondere Form der Abwasserdruckleitungen.

Das Projekt wurde durch die Hochschule Augsburg in Kooperation mit dem Ingenieurbüro Wolff durchgeführt.

2 Fachspezifische Grundlagen

Im Folgenden wird der Stand der Technik erläutert sowie das Gasgesetz nach Boyle-Mariotte beschrieben.

2.1 Stand der Technik

Für öffentliche Abwasserdruckleitungen existiert keine Norm hinsichtlich einer wiederkehrenden Dichtheitsprüfung. Die (DIN EN 16932-2, 2018) „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Pumpsysteme - Teil 2: Druckentwässerungssysteme“ und die (DIN EN 1610, 2015) „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen“ verweisen für die Druckprüfung zur Bestimmung der Dichtheit lediglich auf die (DIN EN 805, 2000) „Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden“.

Die (DIN EN 805, 2000) enthält Verfahren zur Dichtheitsprüfung von Trinkwasserleitungen, die vor der Inbetriebnahme durchzuführen sind. Diese Verfahren werden oftmals für die (Abnahme-)Prüfung vor Inbetriebnahme von Abwasserdruckleitungen übernommen. Abnahmeprüfungen mit Druckluft sowie Prüfungen in Anlehnung an die Gas Norm nach (DVGW-G 469, 2010) sind vor Inbetriebnahme der Abwasserdruckleitungen auch in der Praxis zu finden, ermöglichen jedoch durch das unterschiedliche Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen sowie dem Aufbau der Prüfung keine verlässlichen Aussagen zur Dichtheit von Abwasserdruckleitungen. Ferner ist das Gefahrenpotential bei einer Prüfung mit Luft durch die gespeicherte Energie in Form von Druckluft deutlich höher als das Prüfen mit Wasser. Eine Druckprüfung mit Luft ist aus diesem Grund beispielsweise in Österreich nicht zulässig. Für eine Druckprüfung mit Luft müsste eine in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitung des Weiteren komplett von Wasser befreit werden. Eine vollständige Entleerung ist i.d.R. nicht möglich.

Der Einsatz der in Trinkwasserleitungen verwendeten Prüfverfahren ist aufgrund des dort grundlegend unterschiedlichen Druckniveaus von 15 bzw. 21 bar für Abwasserdruckleitungen i.d.R. nicht anwendbar. Dies wurde bereits im vorangegangenen Forschungsvorhaben untersucht. Aufgrund des grundlegend anderen Verhaltens von Luft in dem für Abwasser typischen Druckbereich ist eine Anpassung der bisherigen für den Trinkwasserbereich geltenden Prüfverfahren allein durch Verringerung des Prüfdrucks nicht möglich. Das im Trinkwasserbereich angewandte Kontraktionsverfahren für viskoelastische Materialien kann ebenfalls nicht auf das für Abwasserdruckleitungen typische Druckniveau übertragen werden. Die zu erwartenden Materialbewegungen fallen bei geringen Prüfdrücken und im Speziellen an in Betrieb befindlichen Leitungen zu gering aus.



Über das Vorgehen bei einer Wiederholungsprüfung gibt die (DIN EN 805, 2000) keine Auskunft. Als Grund wird vermutet, dass bei Trinkwasserleitungen üblicherweise im Betrieb keine Druckprüfungen mehr durchgeführt werden. Anstelle der Dichtheitsprüfung einzelner Leitungen wird die Dichtheit des Trinkwassernetzes durch Bilanzierung überprüft. Hierzu gibt das (DVGW-W 392, 2003) bzw. (DVGW-W 400-3, 2006) Aufschluss. Im Rahmen der Überarbeitung wurde das bisherige Arbeitsblatt W 392 in die Neufassung des DVGW-Arbeitsblattes W 392 und ein Beiblatt zur W 400-3 aufgesplittet. Die technischen Verfahren werden im Arbeitsblatt W 392 beschrieben. Die Dichtheit des in Betrieb befindlichen Trinkwassernetzes wird über die Aufstellung einer Jahresbilanz überprüft. Zusätzlich können Rohrbrüche durch den Einsatz von Messlitzen an der Wasserabgabestelle über die Minimummethode erkannt werden (Fuchs, 2017). Hierbei wird der Wasserverbrauch zu verbrauchsarmen Zeiten, meist bei Nacht, verglichen. Erkennt man einen plötzlichen aber dauerhaften Anstieg, ist ein Rohrbruch wahrscheinlich. Eine weitere Methode Undichtigkeiten feststellen zu können, ist die Verwendung von Geräuschloggern. Durch den hohen, stetigen Druck in Trinkwasserdruckleitungen ist eine Exfiltration hörbar. Diese Methode kann jedoch für Abwasserdruckleitungen aufgrund des üblicherweise geringeren Druckniveaus ggf. nicht verwendet werden, da die Geräusche überlagert werden können.

Die DIN EN 805 stellt die normative Grundlage für das DVGW-Arbeitsblatt W 400-2 „Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) - Teil 2: Bau und Prüfung“ dar. Die ergänzende nationale Festlegung, W 400-2, ersetzt die alte Norm DIN 19630 und DIN 4279. Das DVGW-Arbeitsblatt W 400-2 stammt aus dem Jahr 2004 und ist derzeit ebenfalls in Überarbeitung seitens der zuständigen Ausschüsse des DVGW. Der Gelbdruck ist im November 2021 erschienen, die Einspruchsfrist ist am 31.01.2022 abgelaufen.

Das DVGW-Arbeitsblatt W 400-2 enthält gegenüber der DIN 805 detailliertere Festlegungen zur Durchführung der Dichtheitsprüfung.



2.1.1 Normierte Verfahren zur Prüfung der Dichtheit von Druckleitungen

Den ursprünglichen Anstoß für die Entwicklung des 20-Min Test genannten Kurztests gab der 10-minute-test nach der englischen Norm (IGN 4-01-03, 2015). Dieser wird in Kap. 2.1.1.3 kurz vorgestellt.

Grundlage für die Entwicklung des HSA-Normalverfahrens bilden die Technischen Regelwerke für die Prüfung neuer Trinkwasserleitungen, die im Folgenden knapp beschrieben sind.

Sowohl die (DIN EN 1671, 1997) als auch die (DIN EN 1610, 2015) verweisen für die Prüfung von Druckrohrleitungen auf die DIN EN 805 „Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden“. Nach DIN EN 805 ist vor der Inbetriebnahme von Trinkwasserleitungen eine Druckprüfung mit Wasser erforderlich. Für eine Wiederholungsprüfung an in Betrieb befindlichen Leitungen werden jedoch keine Verfahren beschrieben, da die Dichtheit von Trinkwasserleitungen i.d.R. über die Aufstellung einer Jahresbilanz überprüft wird. Rohrbrüche im Trinkwasserbereich können zudem durch den Einsatz von Messlitzen an der Wasserabgabestelle mit der Minimummethode festgestellt werden (Fuchs, 2017).

Das DVGW Arbeitsblatt W 400-2 „Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) Teil 2“ ist eine ergänzende nationale Festlegung zur DIN EN 805. Sie ersetzt die alte Norm DIN 19630 und DIN 4279 und beschreibt in Abhängigkeit von Rohrmaterialien, Durchmesser und Prüfdrücken verschiedene Verfahren zur Durchführung von Druckprüfungen:

- Normalverfahren für alle Rohrmaterialien und Durchmesser
- Kontraktionsverfahren für Rohrleitungen aus PE und PVC

Diese Verfahren können jeweils mit Hilfe der Druckverlustmethode und der Wasserverlustmethode durchgeführt werden. Beide Prüfmethoden bestehen aus bis zu drei verschiedenen Phasen:

1. Vorprüfung/Sättigungsphase

Die Vorprüfung dient der Stabilisierung des zu prüfenden Leitungsabschnittes nach Abklingen der anfänglichen Setzungen. So soll die druckabhängige Dehnung und Kontraktion von flexiblen Rohren (z.B. PE- und PVC-Rohre) vor der Hauptprüfung vorweggenommen werden. Außerdem soll bei wasseraufnehmenden Rohrwerkstoffen (z.B. Faserzementleitungen) die Sättigung des Rohrmaterials bzw. der Innenauskleidung durch die Vorprüfung weitestgehend abgeklungen sein.



2. Druckabfallprüfung

Die Druckabfallprüfung dient der Bestimmung des vorhandenen Luftanteils im zu prüfenden Rohrleitungsabschnitt und wird im Anschluss an die Vorprüfung durchgeführt. Da die Kompressibilität der vorhandenen Luft stark von der Wasserkompressibilität abweicht, können zu hohe Luftanteile zur Verfälschung des Prüfergebnisses führen. Aus diesem Grund muss zunächst überprüft werden, ob eine ausreichende Luftfreiheit gegeben ist. Dafür wird dem System ein messbares Wasservolumen entnommen und der daraus resultierende Druckabfall dokumentiert. Im Anschluss kann das entnommene Wasservolumen mit einem errechneten maximal zulässigen Wasservolumen verglichen werden.

3. Hauptdruckprüfung

Die Hauptdruckprüfung darf erst durchgeführt werden, wenn die Vorprüfung durchgeführt und die Druckabfallprüfung bestanden wurde. Sie dient der Feststellung der Dichtheit des zu prüfenden Leitungsabschnitts.

2.1.1.1 Das Normalverfahren nach DIN EN 805 bzw. DVGW W 400-2

Da das im Zuge des Forschungsprojektes entwickelte HSA-Normalverfahren auf Grundlage der Druckverlustprüfung des Normalverfahrens nach DIN EN 805 beruht, wird dieses Verfahren im Folgenden genauer erläutert. Das Normalverfahren wird in Kapitel 16.7.3 der DVGW-W 400-2 detailliert beschrieben, wodurch die Angaben der DIN EN 805 verfeinert werden. Es ist für sämtliche Rohrleitungsmaterialien und Durchmesser geeignet und besteht aus drei Phasen:

- Vorprüfung

In der Vorprüfung wird der Prüfdruck durch wiederholtes Nachpumpen (spätestens nach einem Druckabfall von 1-2 bar) über einen bestimmten Zeitraum gehalten. Der Zeitraum der Vorprüfung hängt von dem Rohrwerkstoff und dem Nenndurchmesser der zu prüfenden Leitung ab. Er beträgt für Leitungen aus duktilem Guss-eisen und Stahlrohren mit Zementmörtelauskleidung 24 Stunden, für Kunststoffleitungen 12 Stunden und für Stahlrohre ohne Zementmörtelauskleidungen lediglich eine Stunde. Die teilweise langen Prüfzeiten kommen zustande, da die neu verbauten Leitungen bei Inbetriebnahme noch keine Möglichkeit der Sättigung und Anpassung an hohe Drücke hatten. Eine Übersicht der Prüfdauern kann der Tabelle 1 entnommen werden.



- Druckabfallprüfung

Nach DIN EN 805 und DVGW-W400-2 wird für die Prüfung der Dichtheit von Wasserverteilungsanlagen ebenfalls eine Druckabfallprüfung zur Sicherstellung der ausreichenden Luftfreiheit vorgesehen. Die Druckabfallprüfung wird eine Stunde nach Beginn der Vorprüfung oder spätestens im Anschluss an die Vorprüfung durchgeführt. Es wird der Druckleitung eine zu messende Wassermenge ΔV entnommen, welche zu einem Druckabfall Δp von mindestens 0,5 bar führt. Im Anschluss wird das entnommene Wasservolumen ΔV mit der maximal zulässigen Volumenänderung ΔV_{zul} verglichen. Die ausreichende Luftfreiheit der Leitung wird bestätigt, wenn das entnommene Wasservolumen ΔV kleiner als das höchstzulässige Wasservolumen ΔV_{zul} ist.

$$\begin{aligned} \Delta V_{zul} &= 100 * f * V_R * \Delta p * \left(\frac{1}{K_W} + \frac{D_i}{E_R * s} \right) \\ &= 100 * f * \left(V_R * \Delta p * \frac{1}{K_W} + V_R * \Delta p * \frac{D_i}{E_R * s} \right) = 100 * f * (\Delta V_{Norm,1} + \Delta V_{Norm,2}) \end{aligned} \quad (1)$$

ΔV_{zul}	=	Zulässiges Ablassvolumen bei maximalem Luftanteil	[m ³]
V_R	=	Rohrvolumen	[m ³]
Δp	=	Druckabfall	[bar]
D_i	=	Innendurchmesser	[mm]
E_R	=	E-Modul Rohrleitung	[kN/m ²]
s	=	Wandstärke	[mm]
K_W	=	E-Modul Wasser	[kN/m ²]

- Hauptprüfung

Mit der Hauptprüfung darf nur begonnen werden, wenn die Druckabfallprüfung bestanden wurde.

Die Prüfdauer der Hauptprüfung ist vom Rohrmaterial und Nenndurchmesser abhängig und beträgt zwischen 1 und 24 Stunden. Die jeweiligen Prüfdauern können der Tabelle 1 entnommen werden.

In der Hauptprüfung wird zunächst der Prüfdruck aufgebracht. Im Anschluss wird der Druckabfall mit dem zulässigen Druckabfall nach Tabelle 1 verglichen. Ist der dokumentierte Druckabfall kleiner als der zulässige Druckabfall ist die Dichtheit des geprüften Leitungsabschnitts nachgewiesen.



Tabelle 1: Kennwerte für die Druckprüfung nach dem Normalverfahren (DVGW-W 400-2, 2004)

Rohrwerkstoff/ Auskleidung	MDP bar	DN	Vorprüfung		Hauptprüfung		zulässiger Druckabfall bar bzw. bar/h
			Druck/STP bar	Zeit h	Druck/STP bar	Zeit h	
GGG und St mit ZM	10/16/> 16	≤ 400	15/21/> 21	24	15/21/> 21	3	0,1/0,15/0,2 bar
GGG und St mit ZM	10/16/> 16	500 bis 700	15/21/> 21	24	15/21/> 21	12	0,1/0,15/0,2 bar
GGG und St mit ZM	10/16/> 16	> 700	15/21/> 21	24	15/21/> 21	24	0,1/0,15/0,2 bar
St ohne ZM	10/16/> 16	≤ 400	15/21/> 21	1	15/21/> 21	3	0,1 bar
St ohne ZM	10/16/> 16	500 bis 700	15/21/> 21	1	15/21/> 21	12	0,1 bar
St ohne ZM	10/16/> 16	> 700	15/21/> 21	1	15/21/> 21	24	0,1 bar
PVC-U	10/16	≤ 150	15/21	12	15/21	3	0,2 bar
PVC-U	10/16	200 bis 400	15/21	12	15/21	6	0,2 bar
GFK	10	alle	15	6	15	1	0,2 bar
PE 80, PE 100, PE-X ^{a)}	10/16	≤ 150	15/21	12	13/19	3	0,1 bar/h
PE 80, PE 100, PE-X ^{a)}	10/16	200 bis 400	15/21	12	13/19	6	0,1 bar/h
PE 80, PE 100, PE-X ^{a)}	10/16	> 400	15/21	12	13/19	12	0,1 bar/h
PE 100, SDR 17 ^{b)}	10	≤ 150	12	12	10	3	0,1 bar/h
PE 100, SDR 17 ^{b)}	10	200 bis 400	12	12	10	6	0,1 bar/h
PE 100, SDR 17 ^{b)}	10	> 400	12	12	10	12	0,1 bar/h

a) außer PE 100, SDR 17

b) siehe 16.4

Die folgende Abbildung 1 zeigt den möglichen Kurvenverlauf einer Prüfung nach dem Normalverfahren der DVGW-W 400-2.

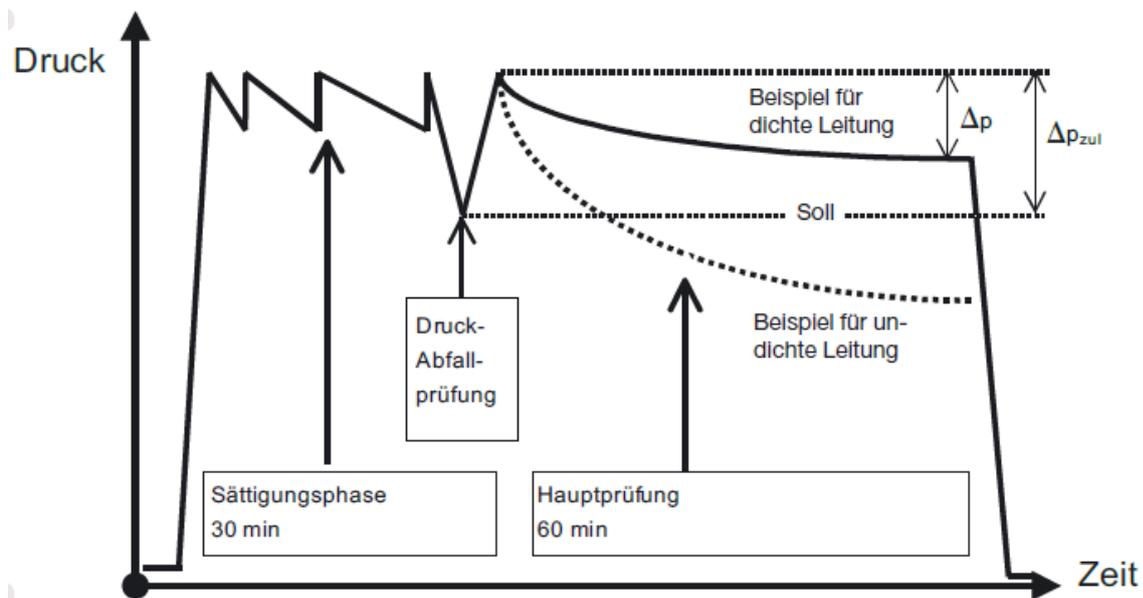


Abbildung 1: Schematischer Kurvenverlauf einer Prüfung nach dem Normalverfahren der DVGW-W 400-2 (2004)

Das Normalverfahren wurde ursprünglich für Trinkwasserleitungen entwickelt. Somit finden hohe Systemprüfdrücke Anwendung, da diese sich nach den hohen Betriebsdrücken im Trinkwasserbereich richten (siehe Tabelle 1, Spalte Hauptprüfung). Da ein derart hoher Prüfdruck zu Schäden an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen führen kann, wird das Normalverfahren lediglich zur Prüfung von Abwasserdruckleitungen im Zuge der Erstabnahme eingesetzt. Des Weiteren lassen vielfach die Armaturen von Abwasserdruckleitungen im Betrieb hohe Prüfdrücke nicht mehr zu.



2.1.1.2 Kontraktionsverfahren

Das Kontraktionsverfahren wurde als verkürztes Verfahren für die viskoelastischen Werkstoffe PE und PVC entwickelt. Es berücksichtigt die Dehnung des Leitungsmaterials unter Druck. Das Kontraktionsverfahren wird laut DVGW W 400-2 für Druckleitungen aus PE 100 SDR 17 sowie Rohrleitungen mit einem Innenvolumen $> 20 \text{ m}^3$ nicht empfohlen.

Bei der Kontraktionsprüfung ist darauf zu achten, dass die Zeiten für das Aufbringen des Prüfdrucks (10 min) und das Ablassen (2 min) eingehalten werden. Für ein Rohrvolumen $> 20 \text{ m}^3$ kann die Einhaltung der zeitlichen Begrenzung nicht gewährleistet werden. Dadurch wird empfohlen, bei großen Durchmessern und/oder langen Leitungsabschnitten das Normalverfahren durchzuführen (Hoch, et al., 2005).

Leitungen aus PVC-U werden nach der österreichischen ÖVGW-W 101 nicht mit dem Kontraktionsverfahren geprüft. In Österreich wird PVC-U, Stahl, Guss und GFK nach dem Druckverlust – Normalverfahren auf Dichtheit getestet. Dieses Verfahren ist an die Druckverlustmethode nach DIN EN 805 angelehnt.

- Vorprüfung

Die Vorprüfung beginnt mit dem luftfreien Füllen der Rohrleitung und einer 60-minütigen Entspannungszeit. Dabei sind die Absperrarmaturen geöffnet. Während des Spülvorgangs können sich durch örtliche Druckverhältnisse unterschiedliche Vorbelastungen ergeben. Diese können das Prüfergebnis beeinflussen (Hoch, et al., 2005).

Nach der Entspannungsphase wird der Prüfdruck nach Schließen der Armaturen innerhalb von 10 min aufgebracht und durch ständiges Nachpumpen 30 min gehalten (Druckhaltephase, siehe auch Abbildung 2). In dieser Phase dehnt sich das Kunststoffmaterial aus (DVGW-W 400-2, 2004)

In der nachfolgenden 60-minütigen Ruhephase dehnt sich das viskoelastische Material weiter aus. Dadurch kommt es zu einem Druckabfall Δp in der Prüfstrecke. Dieser darf nach DVGW-W 400-2 höchstens 20 % betragen. In der DIN EN 805 wird für Δp ein Wert von 30% genannt. Wenn Δp einen größeren Wert erreicht, muss die Prüfung beendet werden.

- Druckabfallprüfung

In der DIN EN 805 wurde für den Ablasstest auf einen festen Druckwert für die Druckabsenkung verzichtet. Es wurde beschlossen, 10-15% des Prüfdrucks STP als Druckabsenkung zu verwenden. Durch diesen Beschluss wird ca. 2 bar (je nach Prozentwert und Nenndruck der Leitung) abgelassen. Der feste Druckwert



für die Druckabsenkung einer PE 100 SDR 17 Leitung nach DVGW-W400-2 korrespondiert mit dem Wert der DIN EN 805 (siehe Tabelle 2). Das Arbeitsblatt wurde durch Versuche mit diesem Rohrtyp erstellt. Die angegebenen Druckabsenkungswerte der anderen elastischen Rohrmaterialien wurden über den Referenzwert der PE 100 SDR 17 Leitung berechnet. Dazu wurde folgende Formel verwendet (Hoch, et al., 2005).

$$p_{ab} * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) \approx 0,024 \quad (2)$$

p_{ab}	=	Druckabsenkung	[bar]
E_W	=	Kompressionsmodul des Wassers (2027)	[N/mm ²]
E_R	=	Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffs	[N/mm ²]
s	=	Wanddicke	[mm]
ID	=	Rohrinnendurchmesser	[mm]

Typische Rohr-E-Moduli:

- Stahl: $2,1 \cdot 10^5$ N/mm²
- Guss: $1,7 \cdot 10^5$ N/mm²
- PE 80: 800 N/mm²
- PE 100: 1200 N/mm²
- PVC: 3000 N/mm²

Die Gleichung soll für alle Werkstoffe ungefähr den Wert 0,024 ergeben.

Bei der Berechnung der Werte wurde die Toleranz der Wanddicke berücksichtigt. Es werden 50% der maximal zulässigen Toleranz der Wandung zur Wanddicke (s) addiert.

- Druckabfallprüfung nach DVGW-W 400-2:

Nach bestandener Vorprüfung wird ein bestimmter Druckabfall p_{ab} herbeigeführt. Der Druckabfall muss innerhalb von 2 Min erfolgen. P_{ab} richtet sich nach dem Rohrwerkstoff und dem Verhältnis des Durchmessers zur Rohrwanddicke (SDR). Die Werte sind Tabelle 2 zu entnehmen.



Tabelle 2: Vorzunehmende Druckabsenkung für das Kontraktionsverfahren (DVGW-W 400-2, 2004)

Rohrwerkstoff	E-Modul [N/Mm ²]	SDR	Druckabsenkung P _{ab} [Bar]
PE 80	800	11	2,2
PE 80	800	7,4	3,6
PE 100	1200	17	2,0
PE 100	1200	11	3,2
PE-XA	800	11	2,2
PE-XA	800	9,3	3,6
PVC-U	3000	21	3,8
PCV-U	3000	13,3	5,9

Das für den Druckabfall entnommene Wasservolumen V_{ab} wird gemessen. Eine ausreichende Luftfreiheit ist gegeben, wenn gilt:

$$V_{ab} \leq V_{zul} \text{ mit } V_{zul} = V_k * L \quad (3)$$

V_k	=	gerechnetes Wasservolumen der Rohrleitung nach Tabelle 3	[ml/m]
L	=	Länge der Prüfstrecke	[m]



Tabelle 3: Gerechnetes Wasservolumen V_k [ml/m] für das Kontraktionsverfahren in Abhängigkeit des Außendurchmessers OD (DVGW-W 400-2, 2004)

OD	PE 80 SDR 11	PE 80 SDR 7,4	PE 100 SDR 17	PE 100 SDR 11	PE-Xa SDR 11	Pe-Xa SDR 7,4	PVC-U SDR 21	PVC SDR 13,6
32	1,29	0,98		1,28	1,29	0,98	1,28	1,36
40	1,96	1,54		1,95	1,96	1,54	2,49	2,15
50	3,12	2,41		3,10	3,12	2,41	3,89	3,45
63	4,98	3,94		4,95	4,98	3,84	6,30	5,46
75	7,28	5,53	8,30	7,22	7,28	5,53	8,89	7,76
90	10,43	8,07	12,01	10,35	10,43	8,07	12,95	11,27
110	15,70	11,98	18,02	15,57	15,70	11,98	19,24	16,86
125	20,20	15,61	23,76	20,04	20,20	15,61	25,03	21,87
140	25,60	19,50	29,81	25,39	25,60	19,50	31,57	27,54
160	33,17	25,61	38,93	32,90	33,17	25,61	41,05	35,97
180	42,13	32,55	49,26	41,79	42,13	32,55	52,51	45,52
200	52,17	40,01	60,81	51,74	52,17	40,01	64,54	56,20
225	65,96	50,77	76,96	65,41	65,96	50,77	81,80	71,57
250	81,95	62,80	95,90	81,27	81,95	62,80	102,15	88,13
280	103,04	78,85	120,17	102,17			127,42	110,88
315	130,31	99,79	151,94	129,22			162,42	140,43
355	165,88	127,21	192,81	164,48			206,55	179,15
400	210,54	161,25	246,02	208,76			261,45	226,87

- Druckabfallprüfung nach DIN EN 805

Bei einer Druckabfallprüfung nach DIN EN 805 muss der Druck Δp durch das Ablassen von Wasser abgesenkt werden. Δp beträgt ca. 10-15% des Prüfdrucks STP. Das abgelassene Wasservolumen ΔV wird gemessen. Für $\Delta V \leq \Delta V_{\max}$ ist die Druckabfallprüfung bestanden. ΔV_{\max} wird nach der nachfolgenden Formel berechnet.

$$\Delta V_{\max} = 0,1 * f * \frac{\pi * ID^2}{4} * L * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) \quad (4)$$

ΔV_{\max}	=	höchstzulässiges Wasservolumen	[ml]
f	=	Ausgleichsfaktor für unvermeidbare Lufteinschlüsse	[f=1,2]
ID	=	Rohrinnendurchmesser	[mm]
L	=	Länge der Prüfstrecke	[m]
Δp	=	gemessene Druckabsenkung	[bar]
E_W	=	Kompressionsmodul des Wassers (2027)	[N/mm ²]
E_R	=	Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffs	[N/mm ²]
s	=	Wanddicke	[mm]

- Hauptprüfung

Durch den abrupten Druckabfall kontrahiert das viskoelastische Material. Durch das Zusammenziehen des Kunststoffes kommt es zu einer messbaren Druckerhöhung. Die Hauptprüfung ist bestanden, wenn es durch die Kontraktion des Materials während der Prüfdauer (30 min) zu einem stetigen Anstieg der Drucklinie kommt. Ein Abfall der Drucklinie würde zu einem Nichtbestehen führen (siehe Abbildung 2).

Wenn die Drucklinie kein eindeutiges Ergebnis aufzeigt, wird die Prüfung auf 90 min verlängert. Dabei darf der Druckabfall bezogen auf den höchsten Druck nicht mehr als 0,25 bar betragen. Der höchste Druckwert bezieht sich auf die gemessenen Werte während der Hauptprüfung.

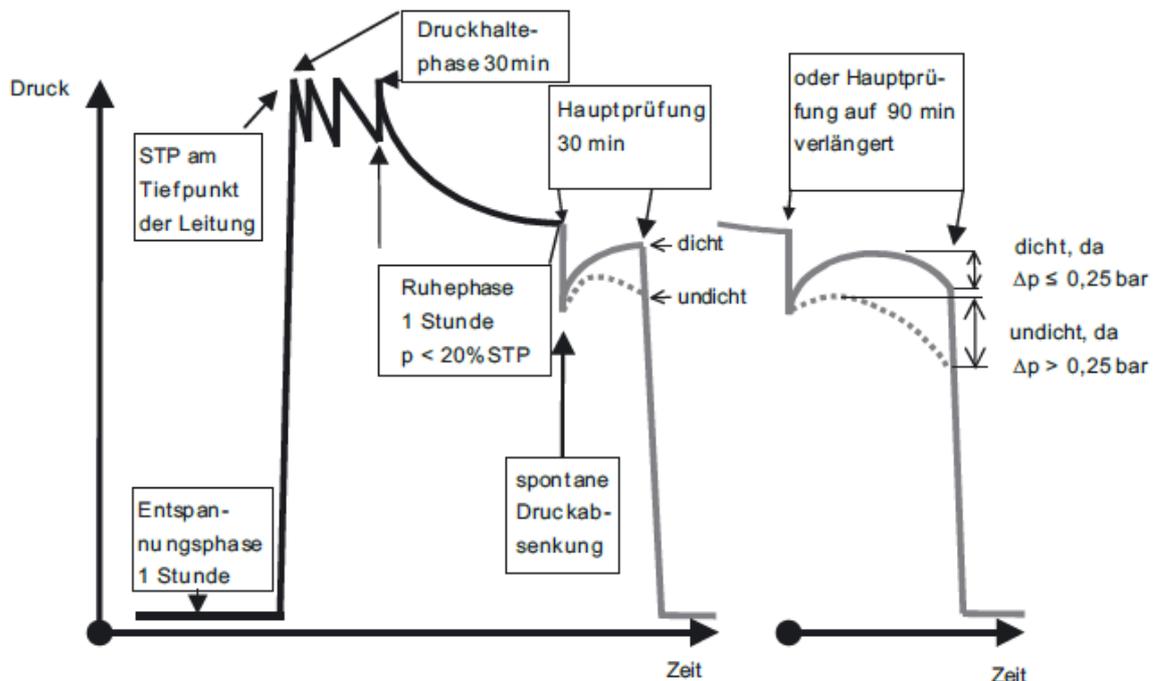


Abbildung 2: Kurvenverlauf für eine Prüfung nach dem Kontraktionsverfahren (DVGW-W 400-2, 2004)

2.1.1.3 „10-minute-test“ nach IGN 4-04-03 für erneuerte Leitungen

Die IGN 4-01-03 „Guide to pressure testing of pressure pipes and fittings for use by public water suppliers“ aus dem Jahre 2015 ist ein Leitfaden zur Durchführung von Druckprüfungen aus Großbritannien. In diesem Leitfaden werden Prüfverfahren beschrieben, welche für Guss- und Stahlleitungen dem Wasserverlustverfahren nach DIN EN 805 ähneln sowie eigene Prüfmethoden wie der Type II Test „Test for new PE and PVC pipelines“ und der sogenannte 10-minute-test „Test for renewed mains“. Da der 10-minute-test die Grundlage für den von der Hochschule Augsburg entwickelten 20-Min Test bildet, wird dieser im Folgenden näher beschrieben.

Der 10-minute-test wird in Großbritannien nach der Sanierung und Erneuerung von Leitungsnetzen angewandt, um deren Dichtheit nachzuweisen. Bei dem 10-minute-test wird der Leitungsdruck durch die Zugabe von Wasser auf den Prüfdruck erhöht und durch kontinuierliches Nachpumpen über den Prüfzeitraum konstant gehalten. Die Zugabemenge zum Aufrechterhalten des Prüfdrucks wird dabei fortlaufend dokumentiert. Zu Beginn der Prüfung muss vor allem bei viskoelastischen Materialien häufiger nachgepumpt werden. Nachdem die Ausdehnung abgeklungen ist, wird das Nachpumpintervall und die nachgepumpte Wassermenge bei dichten Leitungen auf ein Minimum reduziert (siehe Abbildung 3).

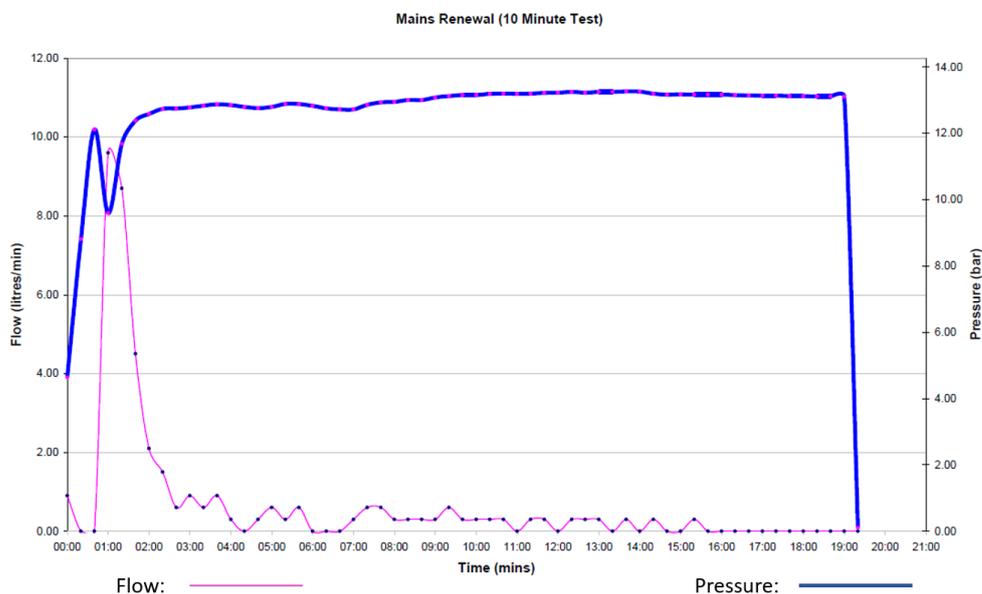


Abbildung 3: Beispielhafter Kurvenverlauf einer dichten Leitung im 10-minute-test (IGN 4-01-03, 2015)

Analysiert man das zugegebene Wasservolumen über drei gleiche Zeiträume des Tests, sollte bei dichten Leitungen ein gleichmäßiges Volumen oder eine Reduzierung des eingegebenen Volumens benötigt werden, um den Druck aufrechtzuerhalten.

Ist die Leitung undicht, so gibt es stärkere Druckschwankungen. Außerdem ist die einzubringende Wassermenge zur Aufrechterhaltung des Prüfdrucks weiterhin sehr hoch und nimmt über den zeitlichen Verlauf der Prüfung nicht ab (siehe Abbildung 4).

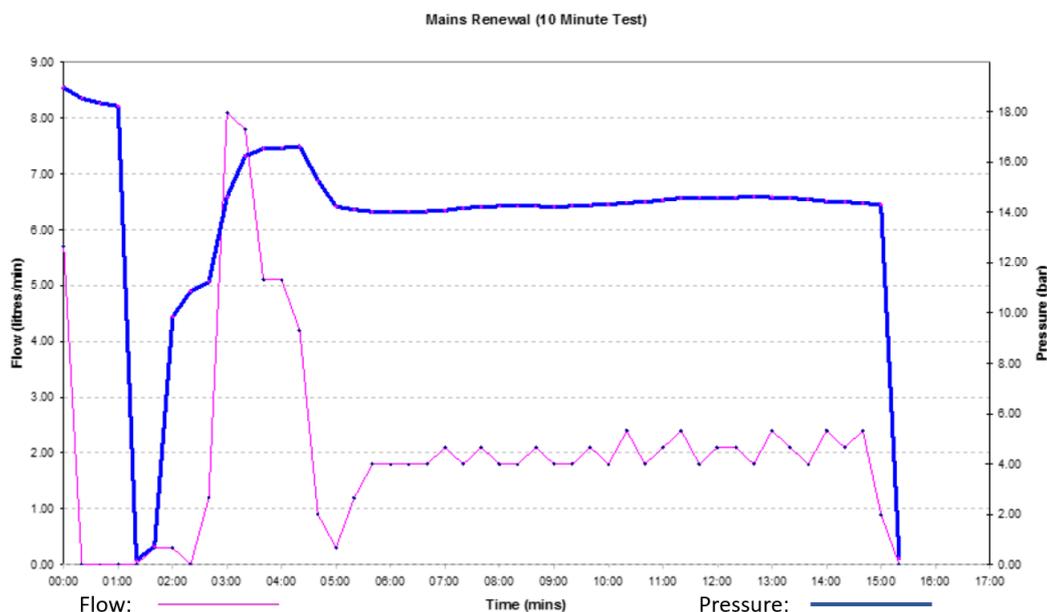


Abbildung 4: Beispielhafter Kurvenverlauf einer undichten Leitung im 10-minute-test (IGN 4-01-03, 2015)

Es wird in der IGN angemerkt, dass das Entlüften des Prüfabschnittes für den Test nicht zwingend erforderlich ist, da die Luft kaum Einfluss auf das Testergebnis nimmt. Dennoch wird die Entlüftung vor der Prüfung zur Vermeidung etwaiger Gesundheits- und Sicherheitsrisiken empfohlen.

Der 10-minute-test ist, wie eingangs erwähnt, ein Test für Wasserverteilungsanlagen, sprich für den Trinkwasserbereich. Daher ist der Prüfdruck wie auch bei den meisten normierten Prüfverfahren auf jeden Fall höher als im Abwasserbereich. Gegenüber den anderen üblichen Druckverlustverfahren hat der 10-minute-test jedoch den Vorteil, dass die Prüfdauer sehr kurzgehalten wird, sodass die geprüften Trinkwasserleitungen im speziellen nach Sanierungen schnell wieder in Betrieb genommen werden können.

Bezogen auf Abwasserdruckleitungen könnte eine Adaption dieses Verfahrens einen enormen Vorteil aufweisen, da die Vorlagebehälter der Pumpen meistens ein ausreichendes Volumen für eine Außerbetriebnahme von mindestens 20 Min aufweisen. Jedoch müssen Überlegungen angestellt werden, wie sich signifikant geringere Prüfdrücke auf die Prüfung auswirken.

2.2 Gesetz von Boyle-Mariotte

Der Anteil der Luft, welcher sich in gefüllten Abwasserdruckleitungen befindet, spielt eine erhebliche Rolle für die Druckprüfung. Luft und Wasser weisen eine sehr unterschiedliche Kompressibilität auf. Wasser kann weitgehend als inkompressibel angesehen werden, wohingegen das Volumen von vorhandenen Luftanteilen in der Abwasserdruckleitung in Abhängigkeit des Drucks stark variiert. Um den Anteil der Ausdehnung und Kompression der Luft bestimmen zu können, wird das Gesetz von Boyle-Mariotte verwendet.

Das Gesetz nach Boyle-Mariotte besagt, dass der Druck bei idealen Gasen bei einer isothermen Zustandsänderung und konstanter Teilchenzahl umgekehrt proportional zum Volumen ist:

$$p * V = const.$$

Daraus folgt:

$$p_1 * V_1 = p_2 * V_2 \quad (5)$$

Die graphische Darstellung des Gesetzes ist in Abbildung 5 ersichtlich.

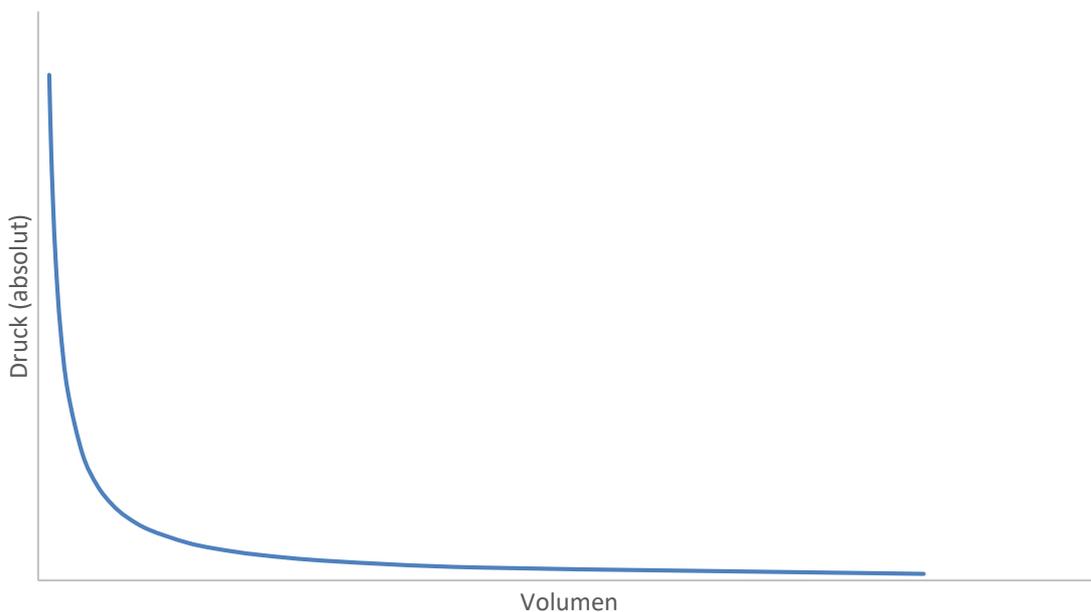


Abbildung 5: Graphische Darstellung der Zusammenhänge nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte

Somit lässt sich bei bekannten Drücken und bekanntem Startluftvolumen das Zielluftvolumen berechnen.



Geht man von einem identischen Druckabfall aus, so ergibt sich bei hohen Drücken eine deutlich geringere Volumenzunahme der Luft durch den Druckabfall, als dies bei niedrigeren Drücken der Fall ist.

Da Druckprüfungen an Abwasserdruckleitungen mit deutlich geringeren Prüfdrücken durchgeführt werden als beispielsweise im Trinkwasserbereich, spielt der in den Leitungen enthaltene Luftanteil eine wesentlich größere Rolle bei der Detektion von Undichtigkeiten. Durch die große Volumenänderung der Luft bei niedrigen Drücken ist es möglich, Leckagen und somit ein Austritt von Wasser durch Leckagen durch die Ausdehnung des Luftvolumens zu überdecken.

Eine Unterschreitung des zulässigen Luftanteils in der Leitung zum Zeitpunkt der Prüfung ist daher essentiell, um eine Verfälschung des Ergebnisses zu vermeiden.



3 Grundlagen Prüfverfahren für Abwasserdruckleitungen

Da für die Überprüfung von Abwasserdruckleitungen auf Dichtheit derzeit noch keine genormten Verfahren vorhanden sind und die Druckprüfung aus dem Trinkwasser- und Gasbereich nicht direkt anwendbar ist, wird in diesem Forschungsvorhaben die Entwicklung eines allgemeingültigen Prüfverfahrens angestrebt. Nachfolgend werden die Ansätze für die Entwicklung der Prüfverfahren vorgestellt.

Die hier vorgestellten Prüfverfahren beziehen sich auf die wiederkehrende Dichtheitsprüfung von in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen. Abwasserdruckleitungen sind charakterisiert durch die Förderung von Abwasser mittels Pumpen, v.a. in Bereichen in denen Freispiegeleleitungen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich sind.

Vereinzelt finden sich in der Praxis Abwasserdruckleitungen, welche ohne Pumpe, jedoch dem Gelände angepasst, Abwasser ableiten. Diese sogenannten „Freigefälledruckleitungen“ besitzen zwar keine Pumpstation, gehören jedoch zu Abwasserdruckleitungen und sind somit ebenfalls wiederkehrend auf Dichtheit zu überprüfen.

Eine Dichtheitsprüfung dieser Freigefälledruckleitungen mit den im Forschungsprojekt entwickelten Prüfverfahren ist unter Voraussetzung der Anforderungen an die Prüfbarkeit ohne Einschränkungen ebenfalls möglich. Jedoch kann sich das Vollen bzw. der Luftaustrag der Freigefälleleitung problematisch gestalten. Ggf. ist für das Herstellen eines prüfbaren Zustands das Molchen und der Einsatz externer Pumpen notwendig.

Neben Prüfungen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen wurden auch Prüfungen und Untersuchungen an eigens für das Projekt erstellten Testleitungen an der Hochschule Augsburg durchgeführt (siehe Kap. 3.1 und 3.2). Die erforderlichen Rahmenbedingungen der Prüfungen in der Praxis werden in Kapitel 3.3 vorgestellt, die Prüfverfahren werden im Anschluss vorgestellt (siehe Kap. 3.3.7 und 3.3.8).

3.1 Testleitung HSA

Das Vorgängerprojekt hat gezeigt, dass Untersuchungen an künstlichen Testleitungen nur bedingt auf reale, in Betrieb befindliche Leitungen übertragen werden können. Trotzdem wurde für dieses Forschungsvorhaben eine Testleitung in den Laborräumen der Hochschule Augsburg aufgebaut.

Gründe hierfür waren die Vorbereitung und Optimierung des Prüfequipments für die Durchführung von Prüfungen ohne externe Prüffirma sowie die Ermittlung des Einflusses der Materialkennwerte auf die Prüfung. Des Weiteren konnten Vorversuche

zur Entwicklung und Weiterentwicklung der beiden vorgeschlagenen Prüfverfahren durchgeführt werden.

Hierzu wurde ein für Abwasserdruckleitungen repräsentatives Material mit einem typischen Querschnitt gewählt. In Bezug auf die Leitungslänge konnte die Testleitung aus Platzgründen nicht realitätsnah nachgebaut werden. Ebenfalls aus Gründen der Durchführbarkeit ist die Leitung nicht unterirdisch verlegt.

Tabelle 4: Übersicht der Wandstärken in mm in Abhängigkeit des PE-Materials und Durchmesser nach (WAVIN, 2018)

Abwasserdruckrohre		PE100-RC+DOQ Qualität		PE100-RC		PE100	
OD mm	DN für Flanschverbindungen	Wavin TS ^{DOQ}		Wavin SafeTech RC ⁿ		PE100 Druckrohr	
		SDR 17	SDR 11	SDR 17	SDR 11	SDR 17	SDR 11
50	50	–	4,6*	–	–	–	–
63	50	–	5,8*	–	5,8	–	5,8
75	65	–	6,8*	–	6,8	–	6,8
90	80	–	8,2	5,4	8,2	5,4	8,2
110	100	–	10,0	6,6	10,0	6,6	10,0
125	100	–	11,4	7,4	11,4	7,4	11,4
140	125	–	12,7	8,3	12,7	8,3	12,7
160	150	–	14,6	9,5	14,6	9,5	14,6
180	150	–	16,4	10,7	16,4	10,7	16,4
200	200	–	18,2	11,9	18,2	11,9	18,2
225	200	13,4	20,5	13,4	20,5	13,4	20,5
250	250	14,8	22,7	14,8	22,7	14,8	22,7
280	250	16,6	25,4	16,6	25,4	16,6	25,4
315	300	18,7	28,6	18,7	28,6	18,7	28,6
355	350	21,1	32,2	21,1	32,2	21,1	32,2
400	400	23,7	36,3	23,7	36,3	23,7	36,3
450	500	26,7	40,9	26,7	40,9	26,7	40,9
500	500	29,7*	45,4*	29,7	45,4	29,7	45,4

Nach Auswertung der Leitungstypen des Vorgängervorhabens und in Abstimmung mit dem kooperierenden Ingenieurbüro fiel die Wahl auf eine Leitung aus PE-100, OD 90, SDR 11 (max. Druck 16 bar) (siehe Tabelle 4), einem heute in der Abwassertechnik geläufigen Material für Druckleitungen (WAVIN, 2018).

Ein weiterer Vorteil des gewählten Materials besteht in der unkomplizierten Montage von Formteilen und Fittings. Diese können entweder verschweißt oder mit Klemm-Schraubverbindungen montiert werden. Aufgrund der leichteren Demontage wurde bei der Testleitung eine Verbindung mit Klemmfittings gewählt.

Die Leitungsführung wurde stetig steigend gewählt, sodass nur jeweils ein Hoch- und Tiefpunkt in der Leitung auftritt. An dem Hoch- und Tiefpunkt gibt es jeweils Anschlussmöglichkeiten für das Versuchsequipment sowie die Möglichkeit, die Leitung dicht abzusperren (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Testleitung aus PE-100, OD 90, SDR 11 im Labor der Hochschule Augsburg

Zusammenfassend sind die wichtigsten Leitungseigenschaften der Testleitung in Tabelle 5 dargestellt:

Tabelle 5: Leitungseigenschaften der Testleitung

Material	PE-100
Druckstufe	SDR 11, PN 16
Außendurchmesser	90 mm
Länge	12 m
Leitungsvolumen	51 l
Steigung der Leitung	37,5 ‰
Hochpunkt der Leitung bei	108 cm über Fußbodenhöhe
Tiefpunkt der Leitung bei	58 cm über Fußbodenhöhe



An der Testleitung wurden Untersuchungen zur druckabhängigen Durchmesseränderung aufgrund der Materialdehnung vorgenommen (vgl. Abbildung 16). Zudem war die Entwicklung und Überprüfung des Prüf- und Messequipments für Prüfungen an realen Beispielleitungen an der Testleitung möglich.

Ein weiterer Untersuchungspunkt war der Wasseraustritt aus Leckagen unterschiedlicher Größen bei variierenden Drücken (siehe Kap. 5.1).

Insgesamt dienten die Untersuchungen an der Testleitung dem allgemeinen Verständnis und der Untersuchung einiger spezieller Fragestellungen im Rahmen der Entwicklung der Prüfverfahren. Für eine detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse wird auf den 2. Zwischenbericht verwiesen.

3.2 Prüfstand zur Untersuchung des Luftaustrags in Druckleitungen

Im Laufe des Projekts hat sich gezeigt, dass Luft- bzw. Gaseinschlüsse (im Folgenden wird zur leichteren Lesbarkeit von Lufteinschlüssen gesprochen) in Abwasserdruckleitungen einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis einer Druckprüfung nehmen. Die Literatur gibt nicht sehr viel Aufschluss über das Verhalten von Luft in Druckleitungen, insbesondere bei den im Abwasserbereich niedrigen Drücken. Deshalb wurde an der Hochschule Augsburg ein Versuchsstand mit durchsichtigen Rohrstücken aufgebaut.

Dieser besteht aus drei jeweils zwei Meter langen Rohrstücken mit den Durchmessern 43 mm, 67 mm und 86,4 mm, welche in Fließrichtung nach unten geneigt werden können. Der Neigungswinkel kann frei eingestellt werden. Die Rohrstücke sind zum besseren Verständnis des Luft-Wasser-Gemischs durchsichtig ausgeführt. Da das verwendete Material Plexiglas keiner Druckstufe zugeordnet werden kann und der Prüfstand zur Untersuchung des Luftaustrags nicht mit Druck beaufschlagt werden sollte, ist die Wandstärke anders als bei der Testleitung (siehe Kap. 3.1) nicht relevant. Mit dem Teststand kann das Verhalten der Luft in einem beliebig geneigten Rohr untersucht werden. Fokus lag auf dem Zusammenhang zwischen Luftaustrag, Neigung und Fließgeschwindigkeit, welcher in der Praxis wichtig ist, um Luft aus Druckrohrleitungen zu entfernen.

Des Weiteren können im Gegensatz zu realen Rohrleitungen, welche keinen optischen Aufschluss über das Fließverhalten von Wasser im Inneren zulassen, Beobachtungen zu Verwirbelungen, Luftaustrag und Lufteintrag gemacht werden. Verwirbelungen können am besten durch Einfärben des Wassers sichtbar gemacht werden. Luftein- bzw. Austrag waren mittels Ventilen und eines durchsichtigen Be- und Entlüftungsventils möglich (vgl. Abbildung 7).

Die Erkenntnisse aus den Versuchen an dem Versuchsstand zur Betrachtung von Luftanteilen gehen in Kapitel 11.3 ein.



Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Verhaltens von Luft in Druckleitungen



3.3 Rahmenbedingung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind Prüfungen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen durchgeführt worden. Begleitet wurden die Druckprüfungen durch theoretische Überlegungen und Berechnungen.

3.3.1 Generelle Festlegungen

Für die Prüfungen wurden folgende generelle Festlegungen getroffen:

- Es wurden keine Luftprüfungen durchgeführt. Sie bergen bei sich lösenden Bauteilen durch die höhere Kompressibilität von Luft ein höheres Gefährdungspotential als Wasserprüfungen. Im technischen Regelwerk ist eine Luftprüfung für Abwasserdruckleitungen nicht vorgesehen.
- Es wurden in Abstimmung mit dem LfU ausschließlich Sammelleitungen mit eigener Druckstation sowie Druckentwässerungssysteme geprüft. Hausentwässerungsanlagen/Hausanschlüsse wurden im Rahmen des Projektes nicht betrachtet.

3.3.2 Identifikation von in Betrieb befindlichen Druckleitungen

Im Vorgängerprojekt wurde deutlich, dass die Identifikation von prüfbaren Druckleitungen eine ernsthafte Herausforderung darstellt. Daher wurde noch vor Projektbeginn ein Aufruf an Netzbetreiber über die deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) gestartet. Betreibern von Abwasserdruckleitungen in ihrem Kanalsystem wurde eine kostenlose Druckprüfung im Rahmen des Forschungsvorhabens angeboten.

Des Weiteren lag eine Liste des StMUV vor, in der durch das Ministerium geförderte Abwasserdruckleitungen aufgeführt sind.



Die anschließende Kontaktaufnahme mit den Netzbetreibern durch die HSA erfolgte mittels Fragebogen. Der Fragebogen setzt sich aus einem Anschreiben und einem einseitigen Fragebogen zusammen (siehe Anhang 1). Der Fragebogen enthält die wichtigsten Kriterien, die für eine Prüfbarkeit von Abwasserdruckleitungen erforderlich sind:

- Außerbetriebnahme während der Prüfung für mindestens zwei Stunden durch Speicherung oder anderweitige Ableitung des anfallenden Abwassers
- Absperrbarkeit der Druckleitung zur Druckaufbringung durch Schieber oder Flansch, ggfs. Hochdruckabsperrblase oder Absperrteller an Leitungsanfang und –Ende
- Anschlussmöglichkeit des Prüfgeräts v.a. mittels C-Storz oder GEKA-Kupplung direkt auf die Druckleitung
- Infrastruktur für Druckprüfung: Stromanschluss und ausreichende Wassermengen zur Herstellung der Luftfreiheit durch Spülung der Leitung (z.B. Hydrant zur Bereitstellung des Wasservolumens, ausreichende Pumpenvorlage, ausreichende Pumpen)
- Equipment zur Arbeitssicherheit: ggfs. Gaswarnmessgerät und Dreibein
- Bestands-, Höhen- und Lagepläne zur Ermittlung des hydrostatischen Drucks sowie die Anzahl der Hochpunkte
- Leitungskennwerte wie Durchmesser, Material, Wandstärke, Kanal-länge, Alter etc.

Auf Grundlage der Rückläufer konnte eine Datenbank für den weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens erstellt werden. Natürlich wurden auch die Kontakte zu Netzbetreibern aus dem Vorgängerprojekt in die Datenbank aufgenommen.



3.3.3 Prüffirmen

Das Vorgängerprojekt hat gezeigt, dass es in Bayern nur wenige Firmen gibt, die Dichtheitsprüfungen an Abwasserdruckleitungen durchführen und dabei automatisch arbeitende Prüfgeräte verwenden. Fast alle Prüffirmen führen ausschließlich Prüfungen an Freispiegelkanälen durch.

Es gibt auch Baufirmen, die Dichtheitsprüfungen an Abwasserdruckleitungen durchführen - allerdings nur für ihre eigenen Bauvorhaben und nur zur Abnahme vor Inbetriebnahme.

Weitere Prüffirmen prüfen gezielt nur Trinkwasserdruckleitungen. Gerätschaften, welche für die Prüfung von Abwasserdruckleitungen eingesetzt wurden, dürfen anschließend nicht mehr für den Trinkwasserbereich verwendet werden (IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2015, p. 42). Um eine Kontamination des Trinkwassernetzes bzw. die Bereitstellung von doppeltem Prüfgerät zu vermeiden, lehnen Prüffirmen die Prüfung von Abwasserdruckleitungen daher oft gezielt ab.

Im Vorgängerprojekt wurden die Druckprüfungen mit Unterstützung von Prüffirmen durchgeführt. Dies hat zu erheblichen Kosten geführt und gleichzeitig die Terminkoordination durch volle Auftragsbücher deutlich erschwert. Durch die Pandemiebedingten Einschränkungen waren Prüfungen mit Prüffirmen über weite Strecken des Projektes nicht möglich. Daher wurden die in diesem Projekt durchgeführten Druckprüfungen weitgehend ohne Prüffirmen durchgeführt. Vereinzelt Druckprüfungen fanden mit den Prüffirmen „Ochs Rohrleitungsbau“ bzw. „Rudolf Buck Rohrleitungsprüfung“ statt. Hr. Buck konnte zudem zur Lösung vieler Probleme praktischer und technischer Fragestellungen beitragen.

3.3.4 Prüfequipment

Um möglichst viele Druckprüfungen durchführen zu können, wurde seitens der Hochschule Augsburg Prüfequipment zusammengestellt, um Druckprüfungen bei entsprechender Unterstützung der Netzbetreiber auch ohne Prüffirmen durchführen zu können. Welche Komponenten für das Equipment eingesetzt wurden, wird im Folgenden beschrieben. Zur Durchführung der Dichtheitsprüfungen ist jedoch nicht zwingend das vorgestellte Equipment erforderlich.

- **Druckbaum**

Der Druckbaum wird mittels Hochdruckschlauch an die Druckleitung angeschlossen. Für Universalität sorgt ein Adapter, sodass der Anschluss über eine „GEKA“ sowie „C-Storz“ Klauenkupplung, welche üblicherweise in Pumpwerken vorhanden ist, erfolgen kann. An den Druckbaum können wiederum mehrere Gerätschaften wie an einen „Verteiler“ angeschlossen werden, beispielsweise für künstliche Leckage, Drucklogger und Prüfpumpen. Verwendet wurden hierzu Teile aus dem Sanitärbereich, welche mit abgedichteten BSP-Rohrgewinden verschraubt wurden. An den Anschlussseiten wurde aufgrund der Variabilität auf das Schnellkupplungssystem „GEKA“ zurückgegriffen. Um auch im Betrieb einzelne Geräte tauschen zu können, wurden an allen Abzweigen Kugelhähne montiert. Durch die Schnellkupplungen ist der Druckbaum auf einen Maximaldruck von 10 bar sowie hinsichtlich des Durchflusses limitiert.

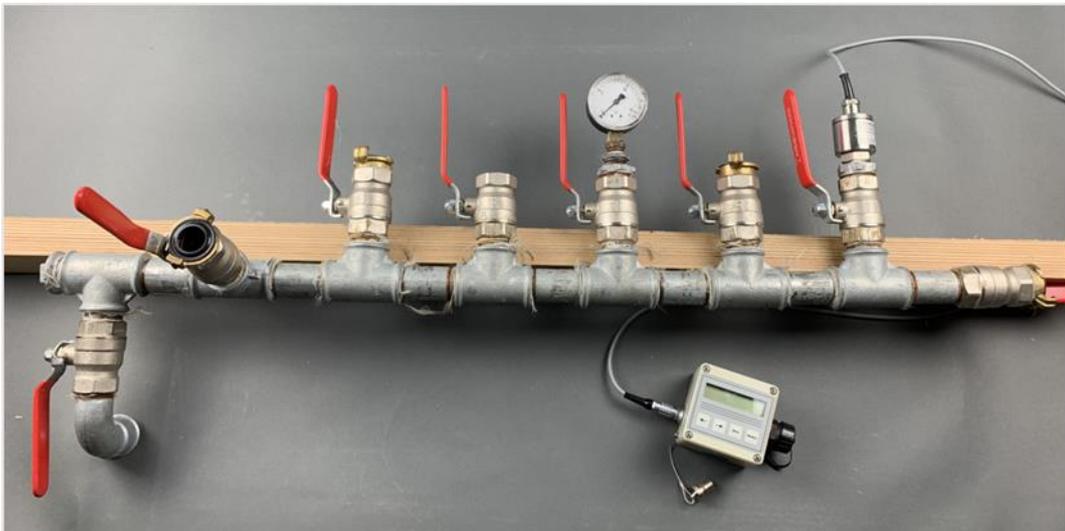


Abbildung 8: Der im Forschungsvorhaben verwendete Druckbaum der HSA

- **Drucksonde**

Zum Messen und Aufzeichnen der Drücke wird ein Datenlogger PWBlogg N6/5 mit zugehöriger Drucksonde (Genauigkeit 0,05 % bis 1 %) der Firma Wegener verwendet. Die gespeicherten Messdaten können ausgelesen und mit einem Tabellenkalkulationsprogramm graphisch dargestellt werden. Die Auflösung des Relativdrucks wird mit zwei Nachkommastellen angegeben. Die Drucksonde wurde dankenswerterweise durch die Wasser-Müller Ingenieurbüro GmbH zur Verfügung gestellt.



Abbildung 9: Verwendeter Datenlogger PWBlogg N6/5 der Firma Wegener

- **Wasserzähler**

Das Messen des Wasservolumens, welches in das System zur Druckerhöhung bzw. aus dem System zur Druckabsenkung ein- oder ausgebracht wird, erfolgt mit einem analogen Einstrahl-Etagenzähler ETK 115 T der Firma Werner Schütz mit einer Genauigkeit von bis 0,0001 m³/h bzw. mit einem digitalen Wasserzähler Modell K24 mit einer Genauigkeit von ± 1 % bei einem Durchflussbereich von 1-120 l/min. Aufgrund der Trägheit des digitalen Wasserzählers im Moment des Beginns und Ende des Durchflusses ist dieser für die Verwendung bei den im Forschungsvorhaben entwickelten Prüfverfahren nicht optimal geeignet.



Abbildung 10: Verwendete Wasserzähler: analoger Einstrahl-Etagenzähler ETK 115 T der Firma Werner Schütz (links) sowie digitaler Wasserzähler Modell K24 (rechts)



- **Prüfpumpe**

Zur Aufbringung des erforderlichen Prüfdrucks bzw. des Nachpumpvolumens beim 20-Min Test wird i.d.R. eine Prüfpumpe benötigt. In manchen Fällen ist auch das Aufbauen des Prüfdrucks durch Anschluss an eine entsprechende Brauchwasserversorgung möglich. Die Bereitstellung der benötigten Wassermengen kann außerdem über die Trinkwasserversorgung (ggfs. Hydrant) erfolgen. Hierbei muss das Wasser über einen freien Auslauf in einem Zwischenbehälter gespeichert werden, um von dort aus über Pumpsysteme in die Abwasserdruckleitung gefördert zu werden. Der direkte Anschluss der Abwasserdruckleitung an das TW-Netz unter Einsatz von Systemtrennern ist nicht zulässig. Vereinzelt wurde der Druck auch durch ein Spülfahrzeug des jeweiligen Betreibers aufgebracht. Herkömmliche Prüfpumpen für Druckprüfungen können auch eingesetzt werden. Entscheidend ist jeweils leitungsspezifisch der Prüfdruck sowie die erforderliche Wassermenge in Abhängigkeit des Leitungsvolumens.

Es wurden zwei verschiedene Arten von Pumpen verwendet:

- Handpumpe: Zum Einsatz kam eine manuelle Pumpe zur Prüfung von Heizungsinstallationen (Rothenberger RP 50-S). Mit einem Hub von 40 ml bringt sie nur kleine Wassermengen ein und ist somit gut für den Einsatz bei kleinen Leitungsvolumina geeignet. Mit einem maximalen Druck von 60 bar ist sie mehr als ausreichend für die Prüfungen. Ein weiterer Vorteil ist die manuelle und dadurch von einer Energiequelle unabhängige Bedienung.
- Hochdruckreiniger: Bei der Prüfung von Leitungen mit großem Volumen wird eine wesentlich größere Wassermenge benötigt. Hierfür wurde ein Hochdruckreiniger (Modell 330 M) der Firma Kärcher eingesetzt. Das Gerät wurde für das Forschungsvorhaben dankenswerterweise durch das Kärcher Center Frisch zur Verfügung gestellt.



Abbildung 11: Verwendete Handpumpe (links), eingesetzter Hochdruckreiniger (rechts)

Die Prüfpumpe muss in jedem Fall für das zu fördernde Wasservolumen und den entsprechenden Druck geeignet sein.

- **Künstliche Leckage**

Um die Prüfverfahren im Hinblick auf das verlässliche Erkennen von Undichtigkeiten zu überprüfen, wurden in die Leitungen künstliche Leckagen eingebaut. Bereits im Vorgängerprojekt wurde hierzu eine künstliche Leckage v.a. bestehend aus einem Nadelventil der Firma Festo: Drossel-Rückschlagventil GR-1/8-B mit freiem Durchgang 3mm entwickelt (siehe Abbildung 12). Um Verstopfungen des Nadelventils durch Feststoffe im Abwasser vorzubeugen, ist der Leckage ein Kraftstofffilter vorgeschaltet und das Wasser wird zusätzlich durch einen Ausgleichsbehälter (Volumen 7 L) geleitet (siehe Abbildung 12).

Für Untersuchungen an der Testleitung zum druckabhängigen Wasseraustritt auf unterschiedlichen Leckagegrößen wurde im Laufe des Projektes aufgrund der besseren Dosierbarkeit ein zweites Leckageventil (Abbildung 13) verwendet (siehe Kapitel 5.1). Es handelt sich um ein Dosierventil, Messing, 1/8 Zoll. Der Kraftstofffilter wurde durch einen rückspülbaren Filter ersetzt, welcher auch höheren Drücken standhält. Für die Druckprüfung realer Beispielleitungen kamen beide Leckageventile zum Einsatz.

Die Berechnung des Leckagevolumens ist Kapitel 3.3.5 bzw. 5.1 zu entnehmen.



Abbildung 12: Foto des Nadelventils zur Erzeugung einer definierten, künstlichen Leckage in den Beispielleitungen zur Überprüfung der Verfahren sowie des Ausgleichsbehälters



Abbildung 13: Nadelventil (Dosierventil) mit erhöhtem Durchfluss



3.3.5 Leckagevolumen

Um die Prüfverfahren auf das Erkennen von möglichen Undichtigkeiten hin zu überprüfen, wurden in die Leitungen künstliche Leckagen eingebaut. Die Größe der Leckage richtet sich hierbei in Anlehnung an die Dichtheitsprüfung von Freispiegelleitungen an ein zulässiges Verlustvolumen.

Nach (DIN EN 1610, 2015) richtet sich der zulässige Wasserverlust nach Prüfung mit Wasser (Verfahren „W“) zum Bestehen der Prüfung nach der benetzten inneren Oberfläche der Leitung. Die Prüfanforderung gilt dann als erfüllt, wenn die Veränderung des Wasservolumens während der 30-minütigen Prüfung nicht größer ist als $0,15 \text{ L/m}^2$.

Anders als beim Freispiegelkanal, der oft nur teilgefüllt und eher selten vollgefüllt ist, steht eine Abwasserdruckleitung i.d.R. dauerhaft mindestens unter dem hydrostatischen Druck der Leitung. Auch besteht bei Freispiegelkanälen eher die Möglichkeit, dass sich Undichtigkeiten durch Feststoffe/Partikel abdichten. Daher ist im Falle einer Leckage das Schadenspotential einer Druckleitung höher als bei einer Freispiegelleitung.

Zunächst wurde eine Leckage entsprechend $1/10$ der entsprechenden Wassermenge eines identischen Freispiegelkanals nach (DIN EN 1610, 2015) festgesetzt ($1/10$ Leckage). Dies deckt sich auch mit den Überlegungen, die in der DWA-Arbeitsgruppe ES-7.4 diskutiert wurden. Im Laufe des Projekts hat sich jedoch der Einfluss der Abhängigkeit zwischen Durchmesser der Druckleitung und zulässiger Leckage gezeigt. Daher wurde die Leckage in Abstimmung mit dem LfU durchmesserabhängig angepasst. Das entsprechend angepasste zulässige Leckagevolumen wird in Kapitel 4.1.4 erläutert.

Zur Untersuchung der Sensibilität der Prüfverfahren wurden im ersten Projektteil auch Untersuchungen mit $1/20$ Leckagen entsprechend der Hälfte der $1/10$ Leckagen durchgeführt.



3.3.6 Prüfdruck

Der Prüfdruck (PD) wird im HSA-Normalverfahren und beim 20-Min Test in der Regel am Tiefpunkt der Leitung gemessen und angegeben. Ein Prüfen ist jedoch an jedem Ort der Druckleitung möglich. Hierfür wird der Prüfdruck durch Addieren oder Subtrahieren des hydrostatischen Drucks vom maßgebenden Faktor zur Bestimmung des Prüfdrucks berechnet. Der Prüfdruck gilt gleichermaßen für das HSA-Normalverfahren wie auch den 20-Min Test.

In Anbetracht alternder in Betrieb befindlicher Abwasserdruckleitungssysteme sollen Schäden durch vermeidbar hohe Prüfdrücke, wie sie für die Prüfung neuer Trinkwasserleitungen verwendet werden, bei der wiederkehrenden Dichtheitsprüfung vermieden werden.

Um den Einfluss der in der Druckleitung vorhanden Luft zu begrenzen, ist ein entsprechender Prüfdruck und somit eine Komprimierung der Luft notwendig. Das HSA-Normalverfahren sowie der 20-Min Test sind für einen Mindestprüfdruck von 3,0 bar am absoluten Tiefpunkt der Druckleitung konzipiert. Zudem ist ein Prüfen mit einem geringeren Druck als dem allgemeinen Betriebsdruck nicht zulässig, um mindestens den Betriebszustand bei der Prüfung abzubilden. Der Betriebsdruck wird ebenfalls am Prüfort gemessen und muss den dort auftretenden Prüfdruck unterschreiten. Für alle Leitungen gilt zudem ein Mindestdruck von 1 bar an der größten Erhebung der Druckleitung.

Bei größeren Betriebsdrücken und somit auch größeren Höhendifferenzen erhöht sich der Prüfdruck entsprechend. Hierdurch wird die Druckleitung jedoch - gegenüber des regulären Betriebs - nicht über Gebühr belastet.

Einen Extremfall stellt hierbei beispielsweise eine große, flache Druckleitung mit schwacher Pumpe dar, bei der im Betrieb nahezu kein Druck herrscht. Diese Druckleitung erfährt während der Dichtheitsprüfung einen Druck, welcher im Maximalfall annähernd 3 bar über dem im Betrieb vorherrschenden Druck liegt. Hierbei sind jedoch keine Schäden zu erwarten, da Druckleitungen i.d.R. für einen Druckbereich um 10 bar, mindestens jedoch von 5 bar ausgelegt sind.

Um insbesondere bei flachen Leitungen den störenden Einfluss der Luft zu begrenzen, ist ein Prüfdruck von mindestens 3 bar am Tiefpunkt einzuhalten. Des Weiteren führen die durch einen geringen Prüfdruck resultierenden großen Luftvolumina i.d.R. dazu, dass die Druckabfallprüfung (siehe Kap. 3.3.7.2) nicht bestanden und somit die Prüfung nicht abgeschlossen werden kann. Außerdem verursachen große Luftvolumina länger anhaltende Druckschwankungen, die die Prüfverfahren nachhaltig stören können. Eine Prüfung mit einem Prüfdruck unter 3 bar am Tiefpunkt ist daher für die in diesem Forschungsvorhaben behandelten Prüfverfahren nicht vorgesehen.



Den zweiten Extremfall stellt eine Druckleitung mit einer Höhendifferenz größer 20 m dar. Da der Prüfdruck am Hochpunkt zur ausreichenden Kompression der Luft noch mindestens 1 bar betragen muss, liegt der Prüfdruck 1 bar über dem durch den hydrostatischen Druck regulär auftretenden Druck.

Die Untersuchungen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen haben klar gezeigt, dass während des Betriebs regelmäßig Druckstöße auftreten. Diese liegen im Bereich von 1 bar. Untersuchungen zu Druckstößen, deren Herkunft und deren Ausbreitung innerhalb der Druckleitung werden in Kap. 7.2 erläutert. I.d.R. sind daher keine Schäden an den Leitungen durch den Prüfdruck zu erwarten.

Im Regelfall liegt der Prüfdruck demnach bei sehr flachen Leitungen maximal bei 3 bar. Bei Leitungen mit einer Höhendifferenz in der Leitung von über 20 m liegt der Prüfdruck maximal 1 bar über dem Betriebsdruck. Bei Leitungen, deren Pumpwerk durch eine großzügige Auslegung einen Betriebsdruck von mindestens 1 bar am Hochpunkt und mindestens 3 bar am Tiefpunkt erzeugt, entspricht der Prüfdruck dem Betriebsdruck.

Sonderregelungen bzgl. des Prüfdrucks gelten für Seedruckleitungen (siehe Kap. 14.4.2) sowie für Asbestzementleitungen. Um das Risiko einer Beschädigung der AZ-Leitung durch die Prüfung zu reduzieren, wird der Mindestprüfdruck am Tiefpunkt von 3 bar auf 2 bar reduziert. Dadurch ergibt sich ein verringerter zulässiger Luftanteil für die Prüfung. Kann dieser Luftanteil nicht gewährleistet werden, so ist mit entsprechend höherem Prüfdruck zu prüfen. Trotz der Abminderung auf 2 bar am Tiefpunkt müssen die weiteren Kriterien eingehalten werden: der hydrostatische Druck in der Leitung muss unter 1 bar betragen und der reguläre Betriebsdruck muss ebenfalls unterhalb des Prüfdrucks liegen.

Ein sinnvolles Vorgehen bei der Planung sowie vor der Durchführung einer Druckprüfung wird in Kap. 11 erläutert. Auf die Möglichkeit der Anhebung des Prüfdrucks wird in Kap. 4.1.5 eingegangen.

3.3.7 HSA-Normalverfahren

Das HSA-Normalverfahren wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes entwickelt und durch eine Vielzahl von Prüfungen an in Betrieb befindlichen Leitungen sowie theoretischen Berechnungen angepasst und verifiziert.

Als Grundlage für das HSA-Normalverfahren wurde das Normalverfahren nach DIN EN 805 bzw. DVGW-W 400-2 herangezogen, da dieses Verfahren anders als z.B. das Kontraktionsverfahren für alle Rohrmaterialien zulässig ist. Das Normalverfahren wurde für die Prüfung neuer Trinkwasserleitungen entwickelt und ist auf Drücke von 15 bis 21 bar und Absperrdauern teilweise über 24 Stunden ausgelegt (siehe Kapitel 2.1).

Da Abwasserdruckleitungen üblicherweise einen Betriebsdruck kleiner 4 bar aufweisen und eine Außerbetriebnahme von in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen für derart lange Zeiträume vielfach nicht möglich ist, musste eine Anpassung des Prüfdrucks sowie der Prüfdauer erfolgen. Dies ist auch möglich, da bei in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen gegenüber neuen Druckleitungen Einflüsse des (neuen) Leitungsmaterials deutlich reduziert sind.

Das Normalverfahren besteht aus einer Vorprüfung, einer Druckabfallprüfung sowie einer Hauptprüfung. Diese Teile wurden im HSA-Normalverfahren übernommen, gekürzt und dahingehend modifiziert, dass eine Durchführbarkeit an Abwasserdruckleitungen gegeben ist.

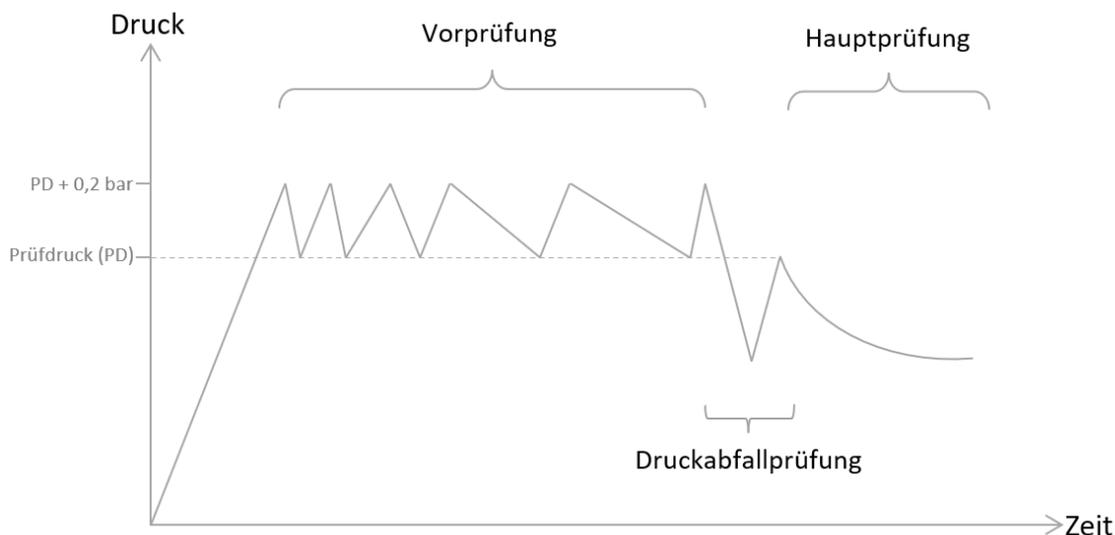


Abbildung 14: Beispielhafter Kurvenverlauf für eine Prüfung nach dem HSA-Normalverfahren



3.3.7.1 Vorprüfung

Die Vorprüfung dient der Anpassung des Leitungsmaterials an die Prüfbedingungen. Dazu zählen u.a. eine Sättigung einer möglichen Rohrauskleidung und die Vorwegnahme druckbedingter Ausdehnungen von flexiblen Rohrmaterialien. Da mit dem HSA-Normalverfahren v.a. Leitungen geprüft werden, die schon mehr als 10 Jahre betrieben wurden, und der Prüfdruck im Bereich des Betriebsdrucks liegt (i.d.R. 1,00 - 3,00 bar höher, siehe Kap. 3.3.6), ist der Stabilisierungsprozess nicht mehr so stark ausgeprägt, wie dies bei neuen Leitungen der Fall ist. Dem zusätzlichen Druck während der Prüfung ist die Druckleitung bei An- und Abfahren der Pumpen durch Druckstöße auch teilweise im Betrieb ausgesetzt. Aus diesen Gründen kann die Vorprüfung im Vergleich zu der teilweise sehr langen Dauer im klassischen Normalverfahren verkürzt werden.

Die Dauer der Vorprüfung beträgt grundsätzlich 1 Stunde. Auf die vollgefüllte und entlüftete Leitung wird der leitungsspezifische Prüfdruck + 0,20 bar aufgebracht und der Druckverlauf aufgezeichnet. Sobald ein Druckabfall von 0,20 bar, also auf Prüfdruck festgestellt wird, wird der Druck durch Nachpumpen wieder um 0,20 bar erhöht (siehe Abbildung 14).

Eine Verkürzung der Vorprüfung ist bei vergleichsweise starren Leitungsmaterialien wie Guss oder Stahl denkbar. Diese Verkürzung kann den Druckabfall in der Hauptprüfung vergrößern und sollte deshalb nur bei sehr geringem Druckabfall während dieser verkürzten Vorprüfung in Betracht gezogen werden. Sollte die Hauptprüfung aufgrund von Materialverhalten und somit einem Druckabfall durch Ausdehnung des Rohrmaterials nicht bestanden werden, so ist das unmittelbar erneute Prüfen mittels HSA-Normalverfahren ohne Verkürzung der Vorprüfung möglich. Eine Verkürzung oder Verlängerung der Vorprüfung ist in einem 30-Minuten-Raster vorgesehen, da es bei der Betrachtung von kleineren Zeiträumen zu Skalierungsfehlern bei der Einordnung des Druckabfalls kommen kann.

Das Ende der Vorprüfung ist erreicht, wenn der Druckabfall innerhalb von 30 min nicht größer als 0,1 bar wird, da dann i.d.R. ein Überschreiten des Grenzwertes in der Hauptprüfung aus Effekten der Materialdehnung vermieden werden kann. Bei biegeweichen Werkstoffen (z.B. PE) liegt die erforderliche Dauer der Vorprüfung meist bei 1 h, kann jedoch bei Bedarf verlängert werden. Bei biegesteifen Materialien wie z.B. Guss ist die erforderliche Anpassung des Leitungsmaterials oftmals nach 30 Min abgeschlossen.

Eine fehlende bzw. zu kurze Vorprüfung vergrößert den Druckabfall in der Hauptprüfung. Der Effekt aus Materialdehnung ist nach gewisser Zeit abgeklungen, eine zu lange Vorprüfung verringert den Druckabfall in der Hauptprüfung nicht über diesen Punkt hinaus. Eine Überdeckung einer Leckage durch Verlängerung der Vorprüfung ist daher nicht möglich. Die Vorprüfung wird empfohlen, um diese Effekte



auszuschließen. Die Vorprüfung kann bei Bedarf jedoch auch früher abgebrochen werden. Es besteht durch eine nicht ausreichende Vorprüfung nur das Risiko, dass eine dichte Druckleitung v.a. durch Materialdehnung einen zu großen Druckabfall in der Hauptprüfung aufweist und als undicht eingestuft wird. Eine fälschliche Bewertung einer undichten Leitung als dicht kann durch eine Verlängerung der Vorprüfung nicht erreicht werden.

Falls der zulässige Druckabfall in der Hauptprüfung nur geringfügig überschritten wird, ist grundsätzlich eine erneute Prüfung mit einer verlängerten Vorprüfung möglich, um den Einfluss des Leitungsmaterials auszuschließen. In jedem Fall ist es empfehlenswert die mit Prüfdruck beaufschlagte Druckleitung noch einmal abzufahren und optisch auf Dichtigkeit zu überprüfen (v.a. im Pumpwerk, zugänglichen Schächten sowie das verschlossene Leitungsende, siehe auch Kap. 13.2).

3.3.7.2 Druckabfallprüfung

Zu hohe Luftanteile in Abwasserdruckleitungen können dazu führen, dass die sich ausdehnende Luft einen durch austretendes Wasser verursachten Druckabfall überdeckt. Je höher der Luftanteil ist, desto geringer ist der Druckabfall bei gleichbleibendem Wasserverlust aufgrund einer Leckage (vgl. Kapitel 4.1.1). Das Beispiel in Kap. 5.3.1 beschreibt an einer durchgeführten Druckprüfung die fälschlicherweise Nichterkennung einer Leckage aufgrund eines zu großen Luftanteils.

Aus diesem Grund wird eine Druckabfallprüfung durchgeführt, welche der Überprüfung einer ausreichenden Luftfreiheit der Leitung dient. Die Druckabfallprüfung ermöglicht keine Aussage über die Dichtheit einer Leitung. Durch rasche Wasserentnahme aus der Leitung wird ein Druckabfall im Bereich von 0,5 bar erzeugt. Das entnommene Wasservolumen ist abhängig vom Luftanteil in der Leitung, der sich durch den Druckabfall ausdehnt. Aus entnommenem Wasservolumen und korrespondierendem Druckabfall kann auf den in der Leitung vorhandenen Luftanteil geschlossen werden. Ist das entnommene Wasservolumen geringer als das auf Grundlage des tatsächlichen Druckabfalls und leitungsspezifisch berechnete zulässige Wasservolumen und liegt der Luftanteil unter dem für die Prüfung zulässigen leitungsspezifischen maximalen Luftanteil, so kann die Hauptprüfung durchgeführt werden. Andernfalls ist die Prüfung abubrechen und die erforderliche Luftfreiheit herzustellen (siehe Kap. 11.3.2).

Für die leitungsspezifische Berechnung des zulässigen Luftanteils wird ein zulässiges, entspanntes Luftvolumen (entspricht Luftvolumen unter atmosphärischer Druckbedingung) am Hochpunkt der Druckleitung so festgelegt, dass mindestens einen Druckabfall von 0,21 bar in der Hauptprüfung erreicht wird. Anschließend kann durch theoretische Berechnungen ein maximal zulässiges Ablassvolumen zu



einem exakten Druckabfall bestimmt werden. Wird dieses Ablassvolumen überschritten, ist entsprechend der zulässige Luftanteil in der Leitung zu hoch und ein leakagebedingter Wasseraustritt könnte durch den vorhandenen Luftanteil überdeckt werden. In diesem Fall ist die Durchführung der Hauptprüfung nicht zulässig.

Die Berechnung des zulässigen Ablassvolumens erfolgt immer mit den tatsächlichen in der Druckabfallprüfung gegenwärtigen Drücken vor Druckabfall, nach Druckabfall und vor Beginn der Hauptprüfung. Somit führt eine geringfügige Über- oder Unterschreitung des Soll-Werts von 0,5 bar nicht zu Verfälschungen des Ergebnisses. Dies ist erforderlich, da in der Praxis ein vorgegebener Druckabfall nicht immer exakt erreicht werden kann. Durch die Berücksichtigung des tatsächlichen Druckabfalls in der Berechnung ist dies auch nicht erforderlich. Es wird die Druck- und Volumendifferenz bei Druckabfall und bei anschließendem Druckaufbau gemessen. Hierdurch ist eine zweifache Bestimmung des Luftanteils möglich. Durch die zweifache Bestimmung und Auswahl des größeren Luftanteils ist eine Sicherheit bei weiteren Berechnungen unter Verwendung des Luftanteils vorhanden (siehe Kap. 8.1.2).

Die Berechnung des zulässigen Ablassvolumens erfolgt in Kap. 4.1.6.

3.3.7.3 Hauptprüfung

Die Hauptprüfung kann durchgeführt werden, wenn durch die Druckabfallprüfung eine ausreichende Luftfreiheit nachgewiesen wurde. Dazu wird der Prüfdruck wieder aufgebracht. Im Anschluss wird nach der vorgeschriebenen Zeit von einer Stunde der Druckverlust gemessen. Überschreitet der Druckverlust am Ende der Hauptprüfung den Grenzwert nicht, ist die Dichtheit der Prüfstrecke bestätigt. In Anlehnung an die DIN EN 805, bei der ein maximaler Druckabfall von 20 kPa bzw. 0,2 bar zulässig ist, wurde der Grenzwert für den zulässigen Druckabfall in der Hauptprüfung für das HSA-Normalverfahren ebenfalls auf 0,2 bar festgelegt. Sollte jedoch ein Druckabfall von über 0,2 bar festgestellt werden, befindet sich möglicherweise eine unzulässig große Leckage innerhalb der Prüfstrecke.

Im Gegensatz zur Prüfung nach DIN EN 805, mit Prüfdrücken von üblicherweise 15 bzw. 21 bar, nehmen durch die niedrigeren Prüfdrücke und das somit weniger komprimierte Luftvolumen beim HSA-Normalverfahren, die Luftanteile einen deutlichen Einfluss auf den Druckabfall in der Hauptprüfung. Druckleitungen mit sehr kleinem Luftanteil, welcher deutlich unterhalb des festgelegten maximalen Luftanteils liegt, weisen bei identischem Wasseraustritt einen deutlich stärkeren Druckabfall auf als Leitungen mit höherem Luftanteil. Die Luft überdeckt somit unter Umständen die Leckage. Damit gleich große Leckagen auch bei unterschiedlichen Luftanteilen bewertet werden können, muss der Grenzwert der Hauptprüfung



ebenfalls leitungsspezifisch berechnet werden (siehe Kap. 4.1.8). Somit wird verhindert, dass bei Leitungen mit sehr kleinem Luftanteil in der Hauptprüfung durch Effekte der Materialdehnung oder minimale Tropfverluste an Armaturen der Druckabfall den Grenzwert übersteigt und diese Leitungen fälschlicherweise als undicht eingestuft werden.

3.3.8 20-Min Test

Neben dem HSA-Normalverfahren steht auch die Entwicklung des 20-Min Tests im Fokus dieses Forschungsvorhabens. Der 20-Min Test konnte im Rahmen des Vorgängerprojektes nur rudimentär untersucht werden, ist jedoch durch die Zeiterparnis der Prüfung gegenüber dem HSA-Normalverfahren für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen interessant, da das anfallende Abwasser während der Prüfung zwischengespeichert werden muss.

Der 20-min Test basiert auf Grundlage des in der englischen Norm beschriebenen Typ-II-Tests bzw. der in der DVGW-W 400-2 aufgeführten Wasserverlustmethode. Es handelt sich um einen Kurztest, der in nur 20 min einfach durchgeführt werden kann; evtl. sogar von den Betreibern selbst, z.B. jährlich.

Anders als beim HSA-Normalverfahren basiert der 20-Min Test auf einer Druckerhöhung durch Wassereinbringung eines definierten Wasservolumens in definierten Zeitintervallen. Bei einer ausreichend luftfreien Leitung ohne Leckage ist ein entsprechender Druckanstieg zu erwarten. Einen Überblick über das Verfahren kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

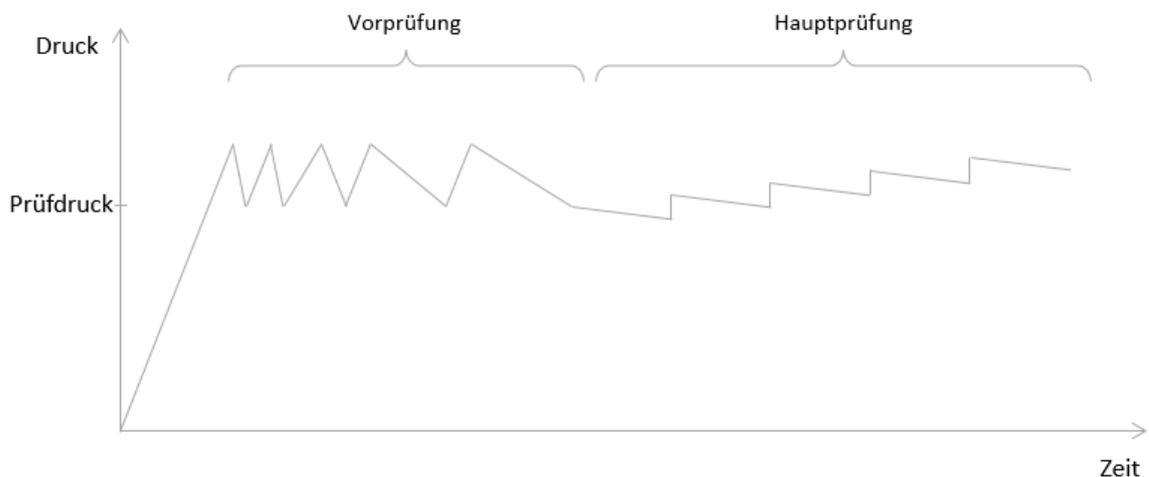


Abbildung 15: Schematischer Druckverlauf für eine Prüfung nach dem 20-Min Test

Im Gegensatz zum HSA-Normalverfahren, bei dem hohe Luftanteile zu einer Überdeckung einer Leckage führen können, führen hohe Luftanteile bei diesem Verfahren auch ohne Leckage dazu, dass der erwartete Druckanstieg trotz Wassereintrag während des Verfahrens nicht erreicht wird, da die vorhandene Luft komprimiert wird und daher kein Druckanstieg erfolgt. Weiter können Effekte aus Materialdehnung dazu führen, dass der Druckanstieg in der Hauptprüfung gering ausfällt. Eine Druckabfallprüfung ist daher nicht erforderlich. Dieses Verfahren gilt als bestanden, wenn in der Hauptprüfung der Grenzwert des Druckanstiegs überschritten



wird. Ist dies nicht der Fall, kann dies neben einer Leckage auch an zu hohen Luftanteilen oder unerwünschter Materialdehnung liegen.

Somit kann bei Nichtbestehen des 20-Min Tests im Gegensatz zum HSA-Normalverfahren keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob an der Leitung tatsächlich ein unzulässiger Wasserverlust stattfindet, oder die Einflüsse der Materialdehnung bzw. des Luftanteils das Nichtbestehen verursachen. Dieses Verfahren ist daher nur für Leitungen mit geringem Einfluss des Leitungsmaterials und niedrigen Luftanteilen einsetzbar. Der 20-Min Test kann dennoch für Druckleitungen mit begrenzter Außerbetriebnahme-Möglichkeit angewendet werden, da das Bestehen des Kurztests eine Unterschreitung der maximal zulässigen Verlustmenge bestätigt. Allerdings können ggü. dem HSA-Normalverfahren weniger Informationen gewonnen werden, weshalb die Durchführung des HSA-Normalverfahrens grundsätzlich dem 20-Min Test vorzuziehen ist.

3.3.8.1 Vorprüfung

Die Vorprüfung entspricht der des HSA-Normalverfahrens. Ziel ist ebenfalls die Elimination des Einflusses von druckbedingten Materialveränderungen in der Hauptprüfung. Bei steiferen Materialien kann eine Vorprüfung entfallen. Insbesondere bei ausgeprägter Materialdehnung wird eine Vorprüfung empfohlen, um einen entsprechenden Druckanstieg dichter Leitungen in der Hauptprüfung zu erzeugen.

Bei den Untersuchungen an den Beispielleitungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der 20-Min Test i.d.R. in Verbindung mit dem HSA-Normalverfahren durchgeführt. Daher wurde durch das HSA-Normalverfahren und die Vorprüfung eine Anpassung der Beispielleitungen an den Prüfdruck erreicht und durch die Druckabfallprüfung des HSA-Normalverfahrens konnte die ausreichende Luftfreiheit überprüft werden.

Da in diesem Forschungsprojekt der Fokus auf der Entwicklung des allgemeingültigen HSA-Normalverfahrens lag, war es aus Gründen der begrenzten Absperrzeit der Druckleitungen nur vereinzelt möglich, den 20-Min Test ohne Vorprüfung bzw. ohne vorgeschaltetes HSA-Normalverfahren durchzuführen.



3.3.8.2 Druckabfallprüfung

Da beim 20-Min Test zu große Luftanteile einer Druckerhöhung infolge der Wasserzuführung entgegenwirken, können Leckagen im Gegensatz zum HSA-Normalverfahren nicht durch Luft überdeckt werden. Aus diesem Grund wird für den 20-Min Test kein Berechnungstool zur Bestimmung des Luftanteils zur Verfügung gestellt. Eine Druckabfallprüfung entfällt somit ebenfalls. Die rechnerische Bestimmung des Luftanteils wird jedoch aus Vollständigkeitsgründen in Kap. 4.2.2 vorgestellt.

Da der 20-Min Test für Druckleitungen gedacht ist, welche nur kurz außer Betrieb genommen werden können, ist es ratsam, zusätzliche Außerbetriebnahmezeiten durch Vorprüfung und Druckabfallprüfung zu vermeiden. Falls eine Außerbetriebnahme über einen längeren Zeitraum möglich ist, wird die Verwendung des HSA-Normalverfahrens empfohlen, da hier auch Aufschluss über die Größe einer möglichen Leckage gegeben wird.

3.3.8.3 Hauptprüfung

Grundlage der Hauptprüfung ist, dass nach Aufbringen des Prüfdrucks die Wassermenge, die rechnerisch einer gerade noch zulässigen Leckage der Leitung entspricht (siehe Kap. 4.1.4), in 2-Min-Intervallen in die Leitung gepumpt wird und die Druckentwicklung in der Leitung gemessen wird. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die nachgepumpte Wassermenge genauer erfasst werden kann als der durch Druckschwankungen geprägte Leitungsdruck. In einer dichten Leitung ergibt sich durch das Nachpumpen von Wasser eine Druckerhöhung. Diese wird jedoch beeinflusst von Materialdehnung, -kompression sowie dem Einfluss unbekannter Luftanteile in der Leitung.

Die 2-minütigen Nachpumpintervalle haben sich als geeignet erwiesen, da eine Beruhigung der Leitung zwischen den Intervallen möglich ist und zugleich das nachgepumpte Wasservolumen so gering ist, dass die Druckschwankungen in der Leitung geringgehalten werden (siehe Kap. 4.2.1). Kontinuierliches Nachpumpen oder größere Intervalle haben sich als unvorteilhaft in der praktischen Umsetzung erwiesen (siehe 1. Zwischenbericht).

Die nachgepumpte Wassermenge kann beispielsweise durch eine Wasseruhr einfach und genau erfasst werden. Wichtig ist eine ausreichende Genauigkeit sowie ein ausreichend kleiner Messbereich der Messeinrichtung – v.a. bei Leitungen mit geringen Rohrvolumen und somit geringer Mantelfläche, bei denen die Nachpumpmenge sehr gering wird. Mit dem in Kap. 3.3.4 vorgestellten Prüfequipment konnten Druckleitungen ab einem Innenvolumen von ca. 2 m³ problemlos geprüft werden.



Bei kleinen Leitungen kann das eingebrachte Volumen unter anderem gut über den Kolbenhub einer passenden Handpumpe bestimmt werden. Daher war die Durchführung des 20-Min Tests im Rahmen des Forschungsvorhabens auch an kleineren Druckleitungen möglich. An der Testleitung ist die Anwendung des 20-Min Tests jedoch aufgrund des sehr geringen Nachpumpvolumens mit herkömmlichem Equipment nicht möglich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Testleitung deutlich kleiner ist als Druckleitungen in der Praxis. In jedem Fall der Anwendung muss die Genauigkeit des Wasserzählers dem Nachpumpvolumen angepasst sein.

Für den im Rahmen der Hauptprüfung zu erreichenden Druckanstieg wurde ein Grenzwert auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse des 20-Min Tests an den Beispielleitungen abgeleitet und durch Berechnungen gestützt. Die Herleitung des Grenzwertes ist Kap. 7.4.1 zu entnehmen. Der Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit einer Druckleitung mittels 20-Min Test beträgt 0,15 bar.



4 Entwicklung der Prüfverfahren

Durch den niedrigeren Druckbereich bei Abwasserdruckleitungen im Vergleich zu Trinkwasserleitungen, welche nach DIN EN 805 bzw. W 400-2 geprüft werden, treten Effekte durch Materialdehnung, Wasserkompression und Luftkompression auf, die für die Entwicklung eines eigenständigen Prüfverfahrens gesondert berücksichtigt werden müssen.

Im Verlauf des Forschungsprojekts wurden 135 Prüfungen nach dem HSA-Normalverfahren an 43 in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen durchgeführt (siehe Kap. 6). Im Verlauf der Auswertung bei vermeintlich ähnlichen Leitungen hinsichtlich des Verlaufs, des Materials bzw. des Durchmessers kam es jedoch zu zunächst unerwarteten Ergebnissen. Deshalb wurden die in der Praxis aufgetretenen Ergebnisse und die maßgebenden Einflussgrößen in einer theoretischen Betrachtung hinterfragt. Es ist zu beachten, dass im ersten Projektteil dieses Forschungsvorhabens kaum Leitungen mit Durchmessern über DN100 geprüft werden konnten. Daher wurde in diesem zweiten Projektteil ein Augenmerk auf Leitungen mit großen Durchmessern gelegt.

Betroffen sind Beispielleitungen mit großen Durchmessern, bei denen künstliche Leckagen unerwarteter Weise zunächst nicht sicher erkannt werden konnten. Die bei den Prüfungen eingesetzten künstlichen Leckagen wurden wie in Kap. 3.3.5 beschrieben eingesetzt.

Bedingt durch die im Laufe des Forschungsvorhabens gewonnenen neuen Erkenntnisse zu den beiden untersuchten Prüfverfahren, wurden beide Verfahren bis zum finalen Stand weiterentwickelt. Die Ursachen und die resultierenden Anpassungen sind für das HSA-Normalverfahren in Kapitel 4.1 bzw. für den 20-Min Test in Kapitel 4.2 aufgeführt. Eine Kurzzusammenfassung der finalen Prüfverfahren befindet sich in Kapitel 15.

4.1 Theoretische Überlegungen zur Anwendung des HSA-Normalverfahrens an Beispielleitungen mit großen Durchmessern

Das HSA-Normalverfahren stellt eine Möglichkeit der Prüfung von in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen dar. Die folgenden Punkte erläutern die theoretische Entwicklung des Verfahrens.

Die zu Beginn des Forschungsvorhabens untersuchten Druckleitungen mit Durchmessern über 100 mm lieferten teilweise nicht zufriedenstellende Ergebnisse. Deshalb wurden alle Größen, welche bei einer Druckprüfung einfließen, theoretisch betrachtet, um die Zusammenhänge besser zu verstehen.



4.1.1 Theoretische Luftvolumenbestimmung bei der Druckprüfung von Rohrleitungen nach Teschke

Im Folgenden sollen die theoretischen Ansätze zur Luftvolumenbestimmung nach Teschke und nach DIN EN 805 bzw. DVGW-W 400-2 erläutert werden. Diese Grundlagen sind erforderlich für die Herleitung der Formeln zur Berechnung des in der Druckabfallprüfung zulässigen Ablassvolumens (siehe Kapitel 4.1.7).

Der Artikel „Theoretische Luftvolumenbestimmung bei der Druckprüfung von Rohrleitungen“ von Ulf und Willfried Teschke beschäftigt sich mit der Berechnung von Luftanteilen in Druckleitungen (Teschke & Teschke, 2016). Hierbei wird die Überlegung getroffen, welche Wassermenge in eine Leitung einzubringen ist, um einen bestimmten Druckanstieg zu verursachen. Die Gesetzmäßigkeiten funktionieren jedoch in gleicher Weise auch bei einer Druckabsenkung. Da man in der Praxis die Druckabfallprüfung durchführt, wurden die Gleichungen so umgeformt, dass jenes Ablassvolumen ermittelt wird, welches zu einem bestimmten Druckabfall führt. Durch diesen Druckabfall ergibt sich eine Ausdehnung der vorhandenen Luft sowie des Wassers, wobei dieser Anteil durch den größeren E-Modul von Wasser deutlich geringer ausfällt als bei Luft. Des Weiteren kommt es zu einer Kontraktion des Rohrleitungsmaterials.

Das berechnete zulässige Ablassvolumen setzt sich demnach aus drei Volumina $\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$ zusammen, welche aus den beschriebenen Einflussfaktoren resultieren: Einfluss der radialen Rohrdehnung, Einfluss des veränderten Wasservolumens und Einfluss des komprimierten Luftvolumens.

- **Einfluss der radialen Rohrdehnung**

Ein Druckabfall führt zu einer radialen Rohrkontraktion und somit zu einer Verringerung des Rohrvolumens. Diese Veränderung des Leitungsvolumens ΔV_1 bei einem Druckabfall um Δp muss dem System entnommen werden:

$$\Delta V_{1,Teschke} = V_R * \Delta p * 100 * \frac{D_i}{E_R * s} \quad (6)$$

$\Delta V_{1,Teschke}$	=	Veränderung Leitungsvolumen	[m ³]
V_R	=	Rohrinnenvolumen	[m ³]
Δp	=	Druckabfall	[bar]
D_i	=	Innendurchmesser	[mm]
E_R	=	E-Modul Rohrleitung	[kN/m ²]
s	=	Wandstärke	[mm]

Der Zusammenhang zwischen der Änderung des Druckes und des Rohrrinnenvolumens ist linear. Das bedeutet, dass eine Verdopplung des Druckabfalls Δp zu einer Verdopplung der Rohrvolumenabnahme führt. Zusätzlich ist es nicht relevant, bei welchem Druck eine Druckabsenkung startet. Bei konstantem Druckabfall Δp ist die Veränderung des Rohrrinnenvolumens für jedes Druckniveau gleich.

Der lineare Zusammenhang zwischen Rohrdehnung und Druckveränderung konnte an der Testleitung der Hochschule nachgewiesen werden. Hierfür wurde der Druck der Druckleitung um jeweils 0,5 bar schrittweise erhöht. Die Änderung des Außendurchmessers wurde mittels Feinmessuhr bestimmt.

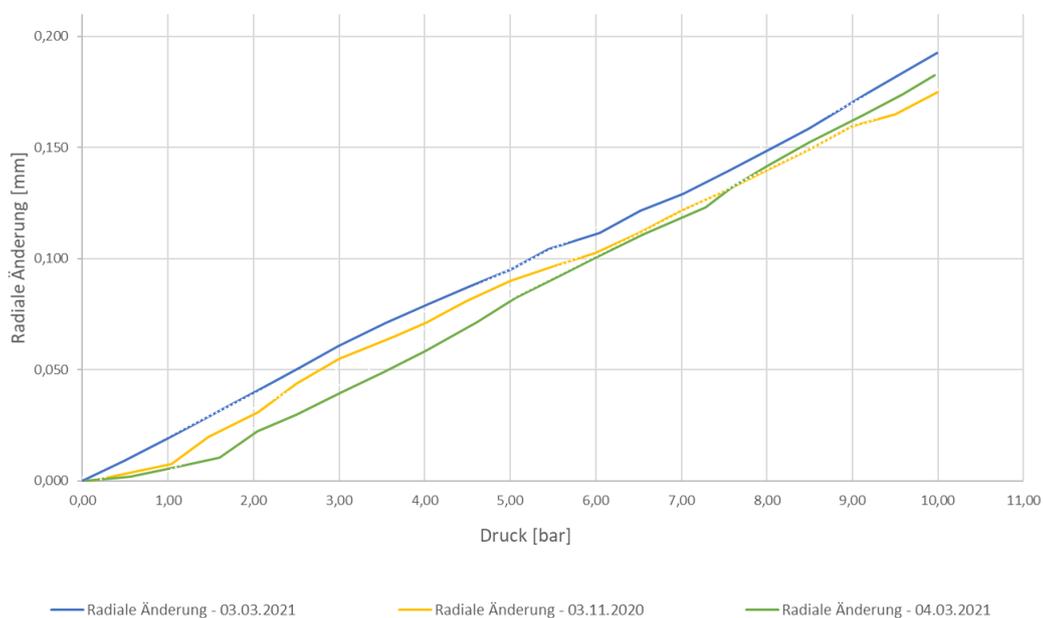


Abbildung 16: Experimentelle Bestätigung des Zusammenhangs zwischen Durchmesseränderung und Druckänderung an der Testleitung der Hochschule

In Abbildung 16 ist die druckabhängige Veränderung des Außendurchmessers aufgetragen. Der Versuch wurde drei Mal wiederholt, um mögliche Messfehler ausschließen zu können. Der lineare Zusammenhang der Messergebnisse bestätigt den theoretischen Zusammenhang aus Formel (6) (Rohrbettung wird im Versuchsstand nicht berücksichtigt).

Es ist zu beachten, dass davon auszugehen ist, dass sich die E-Moduli durch Alterungsprozesse verändern. Hierzu sind in der Literatur allerdings keine Untersuchungen zu finden. Auch durch Nachfragen z.B. beim Kunststoffrohrverband e.V. (KRV) konnten keine verlässlichen Aussagen gewonnen werden. Der Alterungsprozess wird neben dem tatsächlichen Alter der Leitung vor allem auch durch Betriebsdrücke, Anzahl der Pumpintervalle und Temperatur beeinflusst. Da diese Ein-



flüsse leitungsspezifisch sind, können keine pauschalen Aussagen getroffen werden. In Ermangelung von konkreten Daten werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Berechnungen mit den in der Literatur angegebenen E-Moduli durchgeführt.

- **Einfluss des veränderten Wasservolumens**

Die Kompressibilität von Wasser führt dazu, dass neben der radialen Kontraktion ebenfalls eine geringe Volumenzunahme des Wassers durch den niedrigeren Druck nach einer Druckabfallprüfung entsteht. Daher wird während des Druckabfalls auch diese Volumenzunahme ΔV_2 dem System entnommen. In der Regel ist das gesamte Rohr bis auf die unvermeidbaren Lufteinschlüsse mit Wasser gefüllt. Aus diesem Grund muss als Wasserausgangsvolumen das Rohrrinnenvolumen abzüglich der vorhandenen Luft im Leitungssystem verwendet werden:

$$\Delta V_{2,Teschke} = (V_R - V_{L,vor DA}) * \frac{\Delta p * 100}{K_W} \quad (7)$$

$\Delta V_{2,Teschke}$	=	Veränderung Wasservolumen	[m ³]
Δp	=	Druckabfall	[bar]
$V_{L,vor DA}$	=	Luftvolumen in der Leitung vor der Druckabfallprüfung	[m ³]
K_W	=	Kompressionsmodul von Wasser	[kN/m ²]
V_R	=	Rohrvolumen	[m ³]

Das Luftvolumen vor der Druckabfallprüfung entspricht dabei nicht dem „entspannten Luftvolumen“ (Luftvolumen unter atmosphärischer Druckbedingung). Die entspannte Luft wird vor dem Start der Druckabfallprüfung zunächst noch durch den Prüfdruck und zusätzlich je nach Höhenlage im System durch den hydrostatischen Druck vorkomprimiert:

$$V_{L,vor DA} = V_{L,entsp} * \frac{1}{p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft,hyd} + 1} \quad (8)$$

$$\Delta V_{2,Teschke} = \left(V_R - V_{L,entsp} * \frac{1}{p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft,hyd} + 1} \right) * \frac{\Delta p * 100}{K_W} \quad (9)$$

$V_{L,entsp}$	=	Entspanntes Luftvolumen unter atm. Druckbedingung	[m ³]
$p_{Luft,hyd}$	=	Hydrostatischer Druck bei Höhenlage der Luft (relativ)	[bar]
p_{PD}	=	Prüfdruck gemessen am Tiefpunkt der Leitung (relativ)	[bar]
p_{hyd}	=	Hydrostatischer Druck der Leitung (relativ)	[bar]



Auch hierbei besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Druckänderung und der Veränderung des Wasservolumens. Analog zur Rohrkontraktion ist es nicht relevant, bei welchem Ausgangsdruck eine Druckabsenkung startet.

- **Einfluss des komprimierten Luftvolumens**

Da das Kompressionsmodul von Wasser bei weitem nicht so groß ist wie das der Luft, dehnt sich die Luft beim Druckablass wesentlich stärker aus.

Der Teil ΔV_3 des entnommenen Volumens entspricht somit der Volumenänderung der Luft in der Leitung während des Druckabfalls. Die Veränderung von Luftvolumina unter verschiedenen Drücken kann nach dem Gasgesetz von Boyle-Mariotte berechnet werden (siehe Kap. 2.2). Die Gesetzmäßigkeit von Boyle-Mariotte beruht auf Absolutdrücken. Die Formeln berücksichtigen dies jedoch, sodass Relativdrücke eingesetzt werden müssen.

$$\Delta V_{3,Teschke} = V_{L,vor DA} * \frac{\Delta p}{p_{nach DA}} \quad (10)$$

$$\Delta V_{3,Teschke} = V_{L,entsp} * \frac{1}{p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft,hyd} + 1} * \frac{\Delta p}{p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft,hyd} - \Delta p + 1} \quad (11)$$

$\Delta V_{3,Teschke}$	=	Veränderung Luftvolumen	[m ³]
$p_{nach DA}$	=	Druck nach Druckabfallprüfung (absolut)	[bar]
$p_{nach DA}$	=	$p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft,hyd} - \Delta p + 1$	[bar]
$p_{Luft,hyd}$	=	Hydrostatischer Druck bei Höhenlage der Luft (rel.)	[bar]
p_{PD}	=	Prüfdruck gemessen am Tiefpunkt der Leitung (rel.)	[bar]
p_{hyd}	=	Hydrostatischer Druck der Leitung (relativ)	[bar]
Δp	=	Druckabfall während Druckabfallprüfung	[bar]

Anders als die druckbedingte Veränderung des Rohrvolumens sowie des Wasservolumens ist die Veränderung des Luftvolumens nicht nur deutlich stärker ausgeprägt, sondern auch abhängig vom Startdruck. Auf Grundlage des Gesetzes von Boyle-Mariotte sind Veränderungen des Luftvolumens bei einer Druckveränderung im Bereich der verwendeten Drücke bei der Prüfung von Trinkwasserleitungen deutlich geringer als korrespondierende Veränderungen des Luftvolumens bei gleichem Druckabfall im geringen Druckbereich von 3 bar für Abwasserdruckleitungen.



• Zusammenfassung aller Einflüsse

Da beim Druckablass die radiale Rohrdehnung und die Ausdehnung von Luft- & Wasservolumen gleichzeitig eintreten, können alle Einflüsse addiert werden.

$$\begin{aligned}
 \Delta V_{Ges, Teschke} &= \Delta V_{1, Teschke} + \Delta V_{2, Teschke} + \Delta V_{3, Teschke} \\
 &= V_R * 100 * \Delta p * \frac{D_i}{E_R * S} + (V_R - V_{L, vor DA}) * \frac{100 * \Delta p}{K_W} \\
 &\quad + V_{L, vor DA} * \frac{\Delta p}{p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft, hyd} - \Delta p + 1}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Der vorhandene entspannte Luftanteil unter atmosphärischem Druck kann nun nach Umstellung der Gleichung wie folgt berechnet werden:

$$V_{L, entsp} = (p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft, hyd} + 1) * \frac{\frac{\Delta V_{Ges}}{\Delta p * 100} - V_R * \left[\frac{1}{K_W} + \frac{D_i}{E_R * S} \right]}{100 * (p_{PD} - p_{hyd} + p_{Luft, hyd} - \Delta p + 1) - \frac{1}{K_W}} \tag{13}$$

Diese Gleichung kann sowohl für den Fall eines Druckablasses durch Wasserentnahme als auch für den Fall eines Druckanstieges durch Wassereinbringung angewendet werden.

Dennoch gibt es einige Einflüsse, die in der Formel nicht gänzlich berücksichtigt, jedoch durch eine ausreichend lange Vorprüfung des HSA-Normalverfahrens eliminiert werden:

- Die Sättigung einer möglichen Zementmörtelauskleidung wird nicht berücksichtigt.
- In die Berechnungsformeln geht der Einfluss der Temperatur lediglich in dem E-Modul des jeweiligen Stoffes ein.
- Auch die Löslichkeit der Luft in Wasser findet keine Berücksichtigung. Die Löslichkeit von Luft nimmt mit zunehmender Temperatur und abfallendem Druck ab. Somit erhöht sich die freie, nicht gebundene Luft bei geringeren Drücken (Spang, 1996).

Folgende Punkte werden durch eine Vorprüfung nicht beeinflusst:

- Bei der Durchführung von Druckprüfungen an realen Leitungen kommt es i.d.R. zu Druckschwankungen in einer Leitung, was die Bestimmung der entnommenen Wassermenge bei einem exakten Druckabfall erschwert. Dies ist jedoch für die Berechnung erforderlich, was zu Ungenauigkeiten bei



der praktischen Umsetzung der Messungen führen kann. Höhere Luftanteile und niedrige Drücke führen i.d.R. zu größeren Druckschwankungen.

- Es wird davon ausgegangen, dass die Lage der Luft und somit der hydrostatische Druck der Luft ($p_{\text{Luft,hyd}}$) bekannt ist.



4.1.2 Problematik der zulässigen Leckage- und Luftmenge in Druckleitungen

Das Luftvolumen, welches sich zur Zeit der Prüfung einer Druckleitung in dieser befindet, kann durch das Kompressionsverhalten von Luft mögliche Leckagen überdecken. Deshalb muss dieses möglichst geringgehalten werden. Um den Luftvolumenanteil in einer Druckleitung zu bestimmen, wird in der Druckabfallprüfung der Zusammenhang zwischen Volumendifferenz und Druckdifferenz herangezogen. Auf Grundlage des Gesetzes von Boyle-Mariotte sowie der theoretischen Luftvolumenbestimmung nach (Teschke & Teschke, 2016) kann dabei das in der Druckleitung befindliche Luftvolumen berechnet werden (vgl. Kap. 2.2 und Kap. 4.1.1).

In der Druckabfallprüfung wird der Prüfdruck um etwa 0,5 bar reduziert, indem der Leitung ein Wasservolumen entnommen wird. Wie schon in Kapitel 4.1.1 erläutert, resultiert das entnommene Wasservolumen aus den drei Faktoren Wasserkompression, Materialkompression und Luftkompression. Werden der entnommenen Wassermenge die Komponenten der Wasser- und Materialveränderung infolge Rohrkontraktion abgezogen, ergibt sich die Wassermenge, die der in der Leitung durch den Druckabfall expandierten Luft entspricht. Die Volumendifferenz der Luft ist abhängig vom Prüfdruck und dem hydrostatischen Druck und somit leitungs-spezifisch.

Nach Formel (30) bzw. (31) aus Kapitel 4.1.7 wird das zulässige Luftvolumen in der Leitung berechnet, welches ohne Überdruck d.h. im entspannten Zustand vorliegt. Dieses kann ebenso als prozentualer Anteil des Gesamtrohrvolumens angegeben werden. Im ersten Teil des Forschungsvorhabens wurde der maximal zulässige Luftanteil für alle Druckleitungen auf 2 % gesetzt. Bei Prüfungen von Druckleitungen mit Durchmessern über 100 mm und Luftanteilen von 2 % kam es zu unerwünschten Überdeckungen von Leckagen durch die vorhandenen Luftanteile.

Da sich Druckleitungen hinsichtlich des hydrostatischen Drucks, des Prüfdrucks, des Materials und der Materialstärke unterscheiden, muss für jede Druckleitung ein leitungs-spezifischer maximaler Luftanteil errechnet werden, bei dem eine Überdeckung der zulässigen Leckage noch sicher ausgeschlossen werden kann. Ist die Komponente aus Materialkontraktion und Wasserexpansion alleine schon ohne den Einfluss der Luft größer als die der Leckage, ist eine Überdeckung der Leckage möglich. Der Zusammenhang zwischen Leckage und Rohrdurchmesser wird im Folgenden erläutert.



- **Leckage**

Die zulässige Leckage orientiert sich an dem zulässigen maximalen Wasserverlust von Freispiegelleitungen. Im Freispiegel wird von einer regelmäßigen Undichtigkeit der Wandung ausgegangen und daher die Leckage anhand der Wandfläche berechnet (DIN EN 1610, 2015). Im ersten Teil des Forschungsprojekts wurde in Absprache mit dem LfU eine zulässige Leckage analog zu der von Freispiegelleitungen angenommen. Durch die Tatsache, dass Abwasserdruckleitungen durch den stetigen Innendruck ein höheres Schadenspotential besitzen, wurde den Abwasserdruckleitungen nur 10% der im Freispiegel erlaubten Leckage zugedacht. Im Verlauf des Forschungsprojekts kam es bei der Prüfung von Druckleitungen mit Durchmessern > 100 mm zu Unstimmigkeiten hinsichtlich der zulässigen Leckage. Die erforderliche Anpassung und rechnerische Fassung dieser wird im Folgenden erläutert (Kap. 4.1.4).

Die Formel für das zulässige Leckagevolumen der 1/10 Leckage stellt sich nach Kapitel 3.3.5 bzw. (DIN EN 1610, 2015) wie folgt dar:

$$\Delta V = 10 \% * 150 \frac{ml}{m^2} * M \text{ in } 30 \text{ min} \quad (14)$$

ΔV = Zulässiges Leckagevolumen [l]
 M = Mantelfläche [m²]

Die Mantelfläche des Rohrabschnitts berechnet sich nach:

$$M = D * \pi * L * \frac{1}{1000} \quad (15)$$

M = Mantelfläche [m²]
 D = Leitungsinwenddurchmesser [mm]
 π = Kreiszahl PI [-]
 L = Rohrleitungslänge [m]

Das zulässige 1/10-Leckagevolumen in der 60-minütigen Hauptprüfung errechnet sich daher wie folgt:

$$\Delta V = 10 \% * 150 \text{ ml/m}^2 * M * 2 \quad (16)$$

ΔV = Zulässiges Leckagevolumen in der Hauptprüfung [l]
 M = Mantelfläche [m²]



Für das minütlich aus der künstlichen Leckage austretende Wasservolumen wird das zulässige Leckagevolumen in der Hauptprüfung durch 60 geteilt. Dieses wird in den weiterführenden Simulationsberechnungen in Kapitel 5 verwendet.

Aus Formel (15) geht hervor, dass eine Verdopplung des Durchmessers eine Verdopplung der Mantelfläche und somit des zulässigen Leckagevolumens zur Folge hat. Bezogen auf das Rohrvolumen lässt sich außerdem feststellen, dass die 1/10-Leckage bei größerem Rohrdurchmesser im Verhältnis zum Rohrvolumen geringer ausfällt, als bei geringerem Rohrdurchmesser.

- **Luftanteil**

Der zulässige Luftanteil (unter atmosphärischer Bedingung) für einen Leitungsabschnitt wird als ein Prozentanteil des Rohrvolumens angegeben.

Dieses berechnet sich wie folgt:

$$V = x\% * \frac{D^2}{4} * \pi * L \quad (17)$$

V	=	Luftvolumen in der Leitung	[m ³]
x%	=	Prozentualer Luftanteil des Rohrleitungsvolumens	[%]
D	=	Innendurchmesser des Rohrabschnitts	[m]
L	=	Länge des Rohrabschnitts	[m]

Im Gegensatz zum Leckagevolumen führt hier eine Verdopplung des Durchmessers zu einer Vervierfachung des Luftvolumens, da der Durchmesser quadratisch in die Formel eingeht.

Der Zusammenhang zwischen zulässigem Leckagevolumen und Luftanteil ist in Abbildung 17 dargestellt. Das zulässige Leckagevolumen bzw. das in einem Rohrabschnitt vorhandene Luftvolumen wird in Abhängigkeit des Rohrleitungsdurchmessers aufgetragen. Die Rohrleitungslänge geht bei der Errechnung für das zulässige Leckagevolumen sowie des Luftanteils linear ein. Es kann daher gekürzt werden und ist deshalb in der nachfolgenden Abbildung nicht dargestellt.

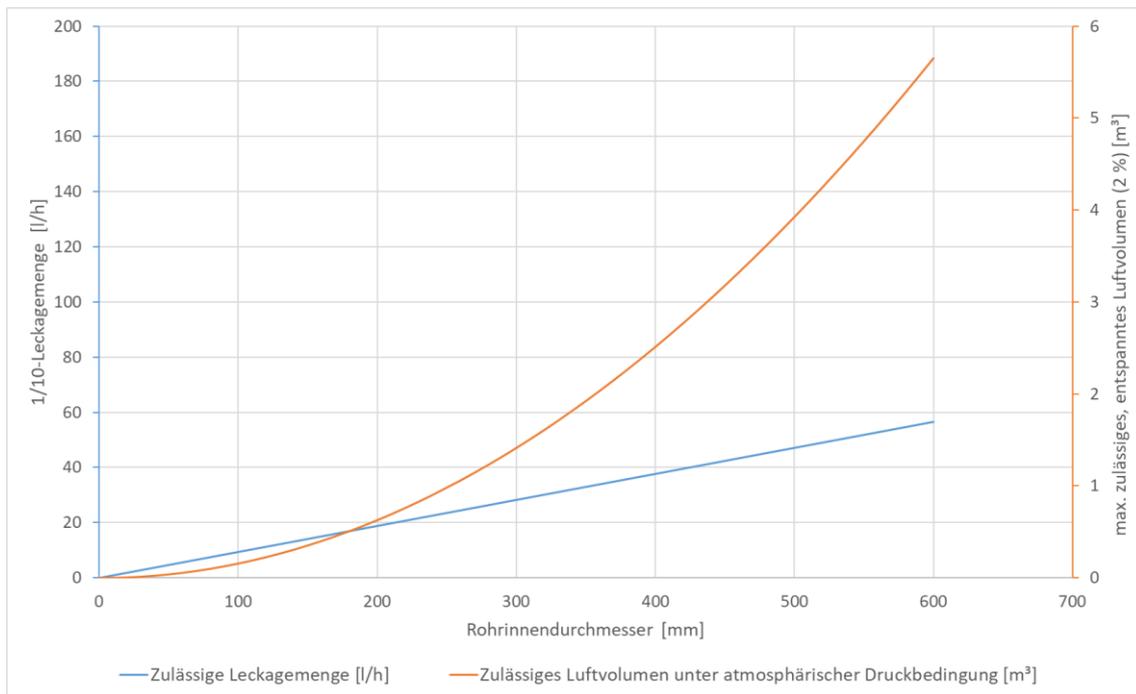


Abbildung 17: Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen 1/10-Leckagemenge und maximal zulässigem Luftvolumen (2% des Rohrvolumens) bei variablem Rohrdurchmesser

Während das zulässige Wasservolumen, welches über eine Leckage in der einstündigen Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens aus der Leitung austritt, linear mit größer werdendem Rohrdurchmesser zunimmt, steigt das in einer Leitung vorhandene Luftvolumen mit steigendem Durchmesser exponentiell an.

Dadurch ergibt sich die Problematik, dass für große Durchmesser nach der ursprünglichen Regelung ein sehr viel größeres Luftvolumen im Verhältnis zum zulässigen Leckagevolumen zulässig ist. Somit kann bei Leitungen mit großem Durchmesser durch das zulässige Luftvolumen (2 % des Rohrvolumens) eine zulässige Leckage eher überdeckt werden, als dies bei Leitungen mit kleinerem Durchmesser der Fall ist.

Im Folgenden wird die Diskrepanz bei einem festen maximalen Luftanteil bei Leitungen mit verschiedenen Durchmessern beispielhaft dargestellt. Zur einfacheren Nachvollziehbarkeit wird zunächst auf die Anteile der Wasserkompression und der Rohrdehnung verzichtet. Der Prüfdruck beträgt 3 bar (relativ), der hydrostatische Druck 2,0 bar (entsprechend 20 m Höhendifferenz) und die Luft wird am Hochpunkt der Leitung angenommen, was insbesondere bei Leitungen mit steilem Verlauf den wahrscheinlichsten Ort darstellt. Diese Konstellation stellt im Hinblick auf Prüfdruck und hydrostatischen Druck den schlechtesten Fall für eine Prüfung dar. Wird die Luft am Hochpunkt angenommen, errechnet sich der Druck, unter dem die Luft steht, aus dem Prüfdruck abzüglich des hydrostatischen Drucks. In diesem



Fall wird diese Differenz minimal und daher das druckabhängige Luftvolumen maximal. Bei einem Druckabfall durch Wasseraustritt dehnt sich das Luftvolumen entsprechend maximal aus und vermindert somit den messbaren Druckabfall in der Prüfung. Dies kann entsprechend dazu führen, dass eine vorhandene Leckage nicht erkannt wird.

Für eine beispielhafte Druckleitung mit Innendurchmesser 50 mm und einer Länge von 1.000 m ergibt sich ein Leitungsvolumen von 1,964 m³. Das nach Formel (16) berechnete zulässige Leckagevolumen (V_l) über 60 min Hauptprüfung beträgt 4,71 l. Das ursprünglicherweise zulässige Luftvolumen von 2 % errechnet sich zu 39,27 l (unkomprimiert). Vor der Hauptprüfung steht das Luftvolumen am Hochpunkt unter einem Absolutdruck von 2,0 bar (1,0 bar Prüfdruck am Hochpunkt + 1 bar Atmosphärendruck). Nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte beträgt das Luftvolumen zu Prüfungsbeginn 19,6 l.

$$p_1 * V_1 = p_2 * V_2 \quad (5)$$

$$1\text{bar} * 39,27\text{ l} = 2,0\text{bar} * V_2$$

$$V_2 = \frac{1\text{bar} * 39,27\text{ l}}{2,0\text{bar}} = 19,6\text{ l}$$

Der Druckabfall in der Hauptprüfung – bedingt durch die angenommene 1/10 Leckage, ohne Berücksichtigung von Druckveränderungen durch Wasser und Material - errechnet sich ebenfalls über Boyle-Mariotte zu 0,39 bar.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_1 - \frac{p_1 * V_1}{V_1 + V_l} \quad (18)$$

$$\Delta p = 2,0\text{bar} - \frac{2,0\text{bar} * 19,6\text{ l}}{19,6\text{ l} + 4,71\text{ l}} = 0,39\text{bar}$$

Eine 1/10 Leckage wird somit bei einem Innendurchmesser von 50 mm und einem Luftanteil von 2 % sicher erkannt.

Diese Beispielleitung stellt den beschriebenen Worstcase dar. Bei Leitungen mit einem flacheren Verlauf ergibt sich ein höherer Druck für die Luftkompression, da der hydrostatische Druck geringer ist. Somit wird die Luft zu Beginn der Hauptprüfung stärker komprimiert. Bei einem Druckabfall durch Austritt des Leckagevolumens kommt es bei gleicher Ausdehnung der Luft zu einem deutlich größeren Druckabfall. Dies liegt an der nicht-linearen druckabhängigen Volumenkompression von Luft nach Boyle-Mariotte (siehe Abbildung 5 in Kap. 2.2).

Bei einem Innendurchmesser von 400 mm ergibt sich analog zur vorherigen Berechnung (DN 50 mm) und einer Länge von 1.000 m mit einem Leitungsvolumen von 125,664 m³ ein zulässiges Luftvolumen von 2,513 m³ (2 % unkomprimiert). Das zulässige Leckagevolumen (1/10 Leckage) über eine Stunde beträgt 37,70 l.

Obwohl die Leitungsführung und somit die Drücke der beiden im Beispiel genannten Leitungen identisch sind, tritt rechnerisch bei einem Durchmesser von 400 mm in der Hauptprüfung ein Druckabfall von lediglich 0,06 bar ein, da sich im Verhältnis zur 1/10 Leckage deutlich mehr Luft in der Leitung befindet, die durch Ausdehnung den Druckabfall in der Hauptprüfung kompensiert (siehe auch Abbildung 17).

In Abbildung 18 sind für diesen Worstcase Berechnungsergebnisse für die Luftanteile von 1 %, 2 % und 3 % für Leitungsinwendurchmesser von 50 mm bis 450 mm abgebildet (hydrostatischer Druck 2,0 bar, Prüfdruck 3,0 bar am Tiefpunkt, nur Berücksichtigung von Luft und Leckage). Es ist deutlich zu erkennen, dass unter den oben genannten Randbedingungen bei einem maximalen Luftanteil von 2 % keine Möglichkeit besteht, eine Leckage bei Rohrendurchmessern größer 60 mm bei einem Grenzwert von 0,2 bar Druckabfall in der Hauptprüfung zu erkennen.

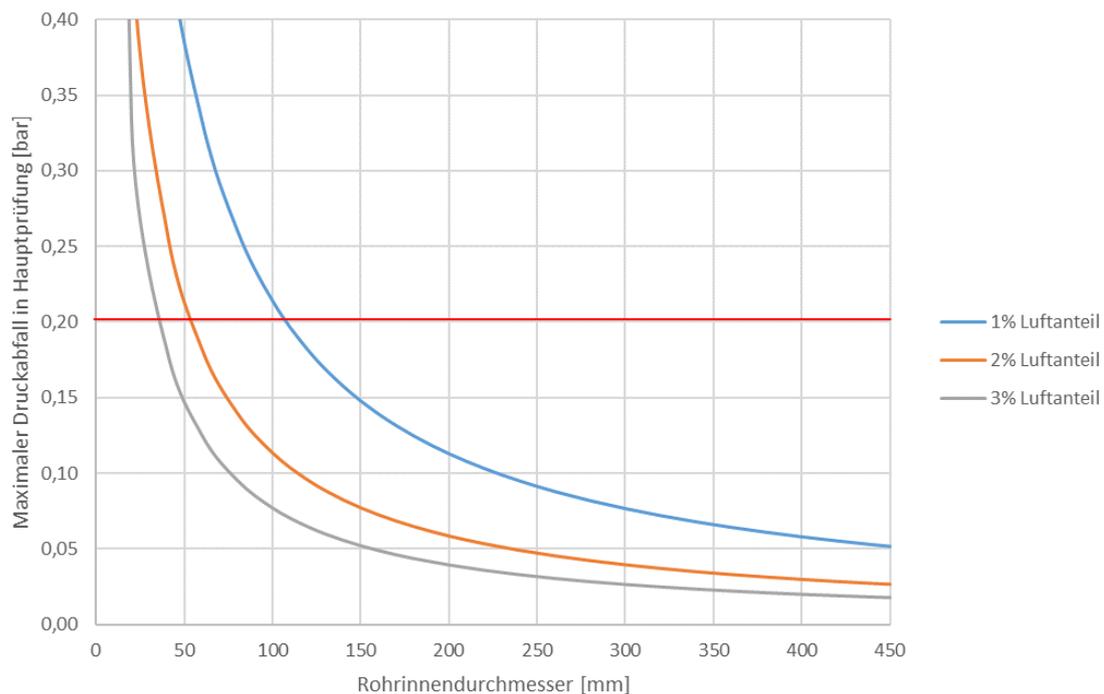


Abbildung 18: Rechnerischer Druckabfall in der Hauptprüfung aus der Ausdehnung der Luft am Hochpunkt der Leitung in Abhängigkeit des Leitungsdurchmessers bei einer 1/10 Leckage für Luftanteile von 1, 2 bzw. 3 % und einem Prüfdruck von 2 bar am Hochpunkt (absoluter Druck; 1,0 bar Prüfdruck am Hochpunkt + 1 bar Atmosphärendruck)



Der maximale Luftanteil, bei dem es gerade noch möglich ist, eine Leckage zu erkennen, d.h. einen Druckabfall von mindestens 0,21 bar zu erhalten, ist abhängig von folgenden Parametern: Prüfdruck, hydrostatischer Druck, Rohrrinnendurchmesser, Rohrmaterial, Wandstärke (vgl. Kapitel 4.1.1). Selbst bei Luftanteilen von nur 1 % liegt der durch die 1/10 Leckage verursachte Druckabfall für größere Durchmesser nur noch im Bereich unter 0,1 bar. Für eine allgemeingültige Prüfvorschrift kann jedoch ein derart kleiner Luftanteil nicht als Voraussetzung gefordert werden, da dieser in der Praxis in einigen Fällen nicht erreichbar ist. Erreichbare Luftanteile an Beispielleitungen werden in Kap. 11.3.3 vorgestellt.

4.1.3 Problematik der Materialdehnung bei Rohrleitungen mit großen Durchmessern

Wie aus Kapitel 4.1.1 bekannt, setzt sich das Wasservolumen, welches bei Druckveränderung in einer Rohrleitung ein- oder ausgebracht wird, aus drei Komponenten zusammen. In Kapitel 4.1.2 wurde die Kompression bzw. Ausdehnung der in der Rohrleitung vorhandenen Luft betrachtet, die Anteile der Materialdehnung bzw. Kontraktion und der Wasserkompression wurden zunächst vernachlässigt. Diese Betrachtung ist bei einem Luftanteil von 2% dennoch relativ genau und aussagekräftig, da die beiden Anteile aus Material und Wasserveränderung nur einen kleinen Prozentanteil des gesamten Leckagevolumens ausmachen.

In der Praxis wurden sehr weiche Materialien wie PE 80 in Durchmessern bis zu 450 mm verbaut. Dieses Material wurde beim Neubau von Druckleitungen mittlerweile von dem Nachfolgermaterial PE 100 mit höherem E-Modul ersetzt. Im Bestand ist dieses Material jedoch noch anzutreffen. Bei Rohrleitungen aus PE 80 kommt es aufgrund des im Vergleich zu anderen Rohrleitungsmaterialien geringen E-Moduls zu einem höheren Anteil der Rohrdehnung an dem abgelassenen Wasservolumen bei einer Druckänderung. Im Folgenden wird der Anteil der Einflussfaktoren Luftkompression, Materialdehnung und Wasserkompression beispielhaft bei kleinen und großen Leitungsdurchmessern bzw. weichen und steifen Leitungsmaterialien berechnet.

Als Kennwerte der Leitungen für diese Beispielrechnung werden die Innendurchmesser auf 50 bzw. 450 mm und die Rohrmaterialien PE 80 bzw. Gusseisen (GGG) betrachtet:

Variante 1: ID = 50 mm ($V_r = 1,96 \text{ m}^3$), GGG (E-Modul 170.000 N/mm^2)

Variante 2: ID = 450 mm ($V_r = 159,04 \text{ m}^3$), GGG (E-Modul 170.000 N/mm^2)

Variante 3: ID = 50 mm ($V_r = 1,96 \text{ m}^3$), PE 80 (E-Modul 800 N/mm^2)

Variante 4: ID = 450 mm ($V_r = 159,04 \text{ m}^3$), PE 80 (E-Modul 800 N/mm^2)



Alle Leitungen besitzen eine Länge von 1.000 m und einen Luftanteil von 2%. Die hier verwendeten Beispielleitungen stellen nicht den Worstcase dar. Das Gegenteil ist der Fall. Es wurde ein Prüfdruck von 3,0 bar und ein hydrostatischer Druck von 0 bar angenommen. Dies bedeutet, dass die in der Druckleitung vorhandene Luft um 3 bar vorkomprimiert ist. Durch eine Vorkomprimierung der Luft schwächt sich der Effekt der Ausdehnung der Luft und damit eine mögliche Überdeckung der Leckage ab.

Nun kann für einen Druckabfall von 0,21 bar (Kriterium einer undichten Leitung) bei genannten Kennwerten die gesamte entnommene Wassermenge aufgrund der verschiedenen Einflussfaktoren ermittelt werden:

$$\Delta V = V_{Wasserkompression} + V_{Materialdehnung} + V_{Luftkompression}$$

Die Ergebnisse dieser Beispielberechnung wurden in Tabelle 7 zusammengefasst.

- **Wasserkompression:**

Die Berechnung der Volumenänderung des Wassers in den Leitungen bei einem Druckabfall von 0,21 bar erfolgt in Abhängigkeit des Rohrvolumens und des E-Moduls:

$$V_{Wasserkompression} = V_R * \Delta p * 0,1 * \frac{1}{E_W} \quad (19)$$

ΔV = Veränderung des Wasservolumens durch Druckänderung	[m ³]
V_R = Rohrvolumen	[m ³]
Δp = Druckabfall	[bar]
E_W = Wasserkompressionsmodul	[N/mm ²]

Das Kompressionsmodul von Wasser ist analog der (DVGW-W 400-2, 2004) mit 2027 N/mm² anzusetzen.

Es ist zu beachten, dass in die Berechnung der Wasserkompression lediglich die Druckdifferenz eingeht. Anders als bei der Luftkompression spielt der Ausgangsdruck keine Rolle. Grundsätzlich ist der Anteil der Wasserkompression durch den im Vergleich zur Luft hohen E-Modul von Wasser deutlich geringer.

$$V_{Wasserkompression, Var 1+3} = 1,96 \text{ m}^3 * 0,21 \text{ bar} * 0,1 * \frac{1}{2027 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 20,3 \text{ ml}$$



Für einen Druckabfall von 0,21 bar treten unabhängig vom Leitungsmaterial bei einem Innendurchmesser von 50 mm 20,3 ml Wasser aus.

$$V_{\text{Wasserkompression, Var 2+4}} = 159,04 \text{ m}^3 * 0,21 \text{ bar} * 0,1 * \frac{1}{2027 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1,65 \text{ l}$$

Bei einem Innendurchmesser von 450 mm beträgt dieses Volumen 1,65 l. Der Unterschied zwischen den beiden errechneten Werten ist auf den entsprechenden Unterschied zwischen den Rohrrinnenvolumina zurückzuführen. Das Leitungsmaterial spielt für die Wasserkompression keine Rolle.

- **Materialkontraktion:**

Die Berechnung der Veränderung der Rohrrinnenvolumina durch die radiale Rohrkontraktion bei einem Druckabfall von 0,21 bar errechnet sich ebenfalls in Abhängigkeit des Rohrrinnenvolumens und des E-Moduls des Leitungsmaterials sowie der Leitungsdurchmesser unter Berücksichtigung der Wandstärke nach folgender Formel:

$$V_{\text{Materialdehnung}} = V_R * \Delta p * 0,1 * \frac{D}{e * E_R} \quad (20)$$

ΔV	=	In Folge der Druckveränderung austretendes Wasservolumen durch Dehnung des Rohrmaterials	[m ³]
V_R	=	Rohrrinnenvolumen	[m ³]
Δp	=	Druckabfall	[bar]
D	=	Rohrinnendurchmesser	[mm ²]
e	=	Wandstärke des Rohrs	[mm]
E_R	=	E-Modul des Rohrmaterials (siehe Tabelle 6)	[N/mm ²]

Analog zur Wasserkompression geht nur die Druckdifferenz ein. Anders als die Wasserkompression kann die Materialkontraktion einen erheblichen Einfluss auf die Druckprüfungen haben, insbesondere bei weichen Materialien.

$$V_{\text{Mat.,Var 1:50mm,GGG}} = 1,96 \text{ m}^3 * 0,21 \text{ bar} * 0,1 * \frac{50 \text{ mm}}{2,9 \text{ mm} * 170.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 4,17 \text{ ml}$$

$$V_{\text{Mat.,Var 2:450mm,GGG}} = 159,04 \text{ m}^3 * 0,21 \text{ bar} * 0,1 * \frac{450 \text{ mm}}{11 \text{ mm} * 170.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 804 \text{ ml}$$



$$V_{Mat.,Var\ 3:50mm,PE80} = 1,96\ m^3 * 0,21\ bar * 0,1 * \frac{50\ mm}{3,6\ mm * 800\ \frac{N}{mm^2}} = 716\ ml$$

$$V_{Mat.,Var\ 4:450mm,PE80} = 159,04\ m^3 * 0,21\ bar * 0,1 * \frac{450\ mm}{32\ mm * 800\ \frac{N}{mm^2}} = 58,7\ l$$

Es wird deutlich, dass das Material hier neben dem Durchmesser einen deutlichen Einfluss haben kann, wobei insbesondere die Steifigkeit des Materials einen sehr großen Einfluss hat. Im Vergleich sind die Werte aus der Wasserkompression für PE 80 unbedeutend, nicht aber für Guss: hier überschreitet die Wasserkompression den Einfluss des Materials für den Durchmesser 450 mm.

Es ist zu beachten, dass das Leckagevolumen in Abhängigkeit von der Mantelfläche berechnet wird und daher für beide Materialien gleich und nur vom Durchmesser abhängig ist. Die leitungsspezifischen Unterschiede hinsichtlich der Materialeigenschaften sind jedoch deutlich. Bei der PE-Leitung ist der Einfluss des Materials bei zu kurzer Vorprüfung so groß, dass bereits durch die Materialdehnung unter Prüfdruck auch ohne Leckage ein erheblicher Druckabfall entsteht. Umgekehrt wirkt bei weichen Rohrmaterialien die Rohrkontraktion sehr stark einem Druckabfall entgegen. Es ist u.U. nur noch ein sehr geringer Druckabfall möglich, welcher dann unter 0,2 bar liegt.

Die in diesem Forschungsprojekt zugrundeliegenden Materialkennwerte entstammen der Literatur und decken sich größtenteils mit denen der Normen W 400-2 bzw. DIN EN 805.

Tabelle 6: E-Moduli der gängigen Rohrwerkstoffe nach W 400-2 bzw. DIN EN 805

Rohrwerkstoff	E-Modul [N/mm ²]
PE 80	800
PE 100	1200
PVC	3000
Asbestzement	23.000*
Guss	170.000
Stahl	210.000

* (Faserbaustoffe, 1982)



- **Luftkompression:**

Die Luftvolumenänderung bei einem Druckabfall von 0,21 bar wird hier nach Kap. 4.1.1 für einen angenommenen Luftanteil von 2 % berechnet. In die Berechnung geht auch der Prüfdruck sowie der hydrostatische Druck ein. Durch die Vorkomprimierung durch die Wassersäule aus dem hydrostatischen Druck des Wassers ist der Ort der Luft entscheidend für die Berechnung des Druckabfalls. Der Ort der Luft wird in den Berechnungen immer am Hochpunkt der Druckleitung angenommen. Im folgenden Beispiel wird aus Gründen des besseren Verständnisses eine horizontale Druckleitung angenommen. Daher ergeben sich materialunabhängig unterschiedliche Luftvolumina für die beiden Rohrrinnenvolumina:

$$V_{Luftkompression} = V_R * x \% * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right) \quad (21)$$

$V_{Luftko.}$	=	In Folge der Druckveränderung austretendes Wasservolumen durch Ausdehnung der Luft	[m ³]
V_R	=	Rohrrinnenvolumen	[m ³]
$x \%$	=	Prozentualer Anteil der entspannten Luft am Rohrrinnenvolumen	[%]
PD	=	Prüfdruck (relativ)	[bar]
p_{hyd}	=	Hydrostatischer Druck der Leitung	[bar]
Δp	=	Druckabfall	[bar]

$$V_{Luftkomp. Var 1+3} = 1,96 \text{ m}^3 * 2 \% * \left(\frac{1}{3 \text{ bar} - 0 \text{ bar} - 0,21 \text{ bar} + 1} - \frac{1}{3 \text{ bar} - 0 \text{ bar} + 1} \right) = 0,54 \text{ l}$$

$$V_{Luftkomp. Var 2+4} = 159,04 \text{ m}^3 * 2 \% * \left(\frac{1}{3 \text{ bar} - 0 \text{ bar} - 0,21 \text{ bar} + 1} - \frac{1}{3 \text{ bar} - 0 \text{ bar} + 1} \right) = 44,06 \text{ L}$$

Im Vergleich zu den Wassermengen aus der Materialkontraktion ergeben sich hier aus den Luftanteilen teilweise geringere Volumina. Dies ist jedoch dem minimalen hydrostatischen Druck geschuldet. Im Worstcase mit einem hydrostatischen Druck von 2,0 bar und einer Vorkomprimierung von 1 bar (Relativdruck) würden sich hier deutlich größere Werte ergeben, da die Luftanteile bei einer geringeren Vorkomprimierung ein deutlich größeres Volumen einnehmen. Bei Verwendung des Worstcase würden sich der Anteil aus Luftkompression derart vergrößern, dass die Aussagekraft der folgenden Abbildung 19 gering wäre.

Fügt man nun die einzelnen Komponenten zusammen, ergeben sich vier Varianten, die in folgender Tabelle zusammengefasst sind.



Tabelle 7: Wasseraustrittsvolumina aufgeteilt auf die Faktoren Material, Wasser und Luft aus einer Beispielleitung für einen Druckabfall von 0,21 bar

Variante	ID [mm]	Material	ΔV_{Wasser} [l]	$\Delta V_{\text{Material}}$ [l]	ΔV_{Luft} [l]	ΔV_{gesamt} [l]
3	50	PE 80	0,02	0,716	0,54	1,28
1	50	Guss	0,02	0,004	0,54	0,56
4	450	PE 80	1,65	58,7	44,06	104,41
2	450	Guss	1,65	0,804	44,06	46,51

Die zulässige 1/10 Leckage ist nur von der Mantelfläche abhängig. Daher ergibt sich eine zulässige stündliche Leckage für die beiden Leitungen mit einem Innendurchmesser von 50 mm von 4,71 l bzw. für den Innendurchmesser von 450 mm von 42,41 l. Durch den angesetzten Druckverlust von 0,21 bar würden sich für die unterschiedlichen Leitungen die in Tabelle 7 angegebenen Austrittsvolumina ergeben. Sind diese Werte kleiner als die 1/10 Leckage, würde sich beim Austritt der 1/10 Leckage ein Druckverlust $> 0,21$ bar ergeben und die Leckage somit sicher erkannt werden. Dies bedeutet, dass bei den beiden Leitungen mit Innendurchmesser 50 mm trotz der Unterschiede im Leitungsmaterial die Leckage bei einem Luftanteil von 2 % erkannt worden wäre. Zu berücksichtigen ist, dass sich hier jedoch der angesetzte hydrostatische Druck von 0 bar positiv auswirkt.

Ebenfalls materialunabhängig wäre die Leckage trotz des positiv angesetzten hydrostatischen Drucks bei einem Innendurchmesser von 450 mm bei beiden Materialien nicht erkannt worden. Im Worstcase würden sich die aus der Luftkompression resultierenden Wasservolumina für einen Druckabfall von 0,21 bar deutlich vergrößern. Das aus der zulässigen 1/10 Leckage austretende Wasservolumen würde bei der Leitung 450 mm entsprechend noch deutlicher überschritten und die Leckage wäre noch weniger erkannt worden.

Die Anteile aus Luft-, Wasser- und Materialveränderungen der jeweiligen Wasservolumina am Gesamtvolumen des Wasseraustritts durch einen Druckabfall von 0,21 bar sind im nächsten Diagramm prozentual graphisch dargestellt.

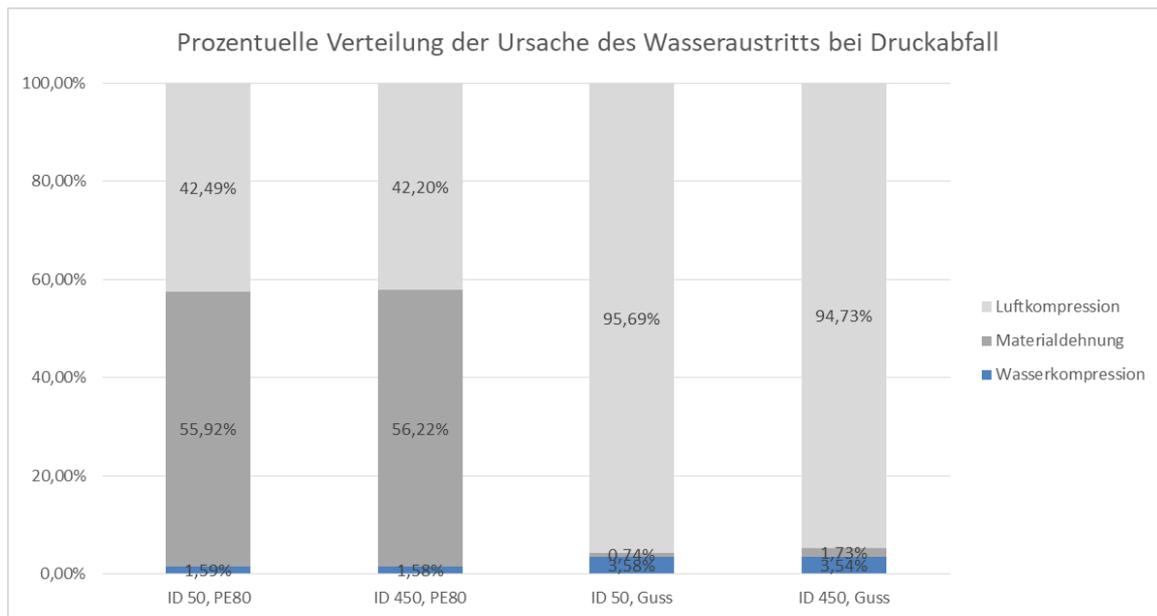


Abbildung 19: Balkendiagramm der Ursache des Wasseraustritts der drei Faktoren Material, Wasser und Luft für die Varianten 1 bis 4

In der Graphik ist zu erkennen, dass in diesem Beispiel der Wasseraustritt bei einem Druckabfall von 0,21 bar bei dem Leitungsmaterial PE 80 zu 56 % aus der Materialdehnung resultiert. Bei dem Leitungsmaterial Gusseisen kommt hingegen erwartungsgemäß nur ca. 1 % des austretenden Wassers aus der Materialdehnung.

Des Weiteren wird beim Vergleich der Anteile der austretenden Wassermenge zwischen den Materialien deutlich, dass für Gussrohre die Anteile aus Wasser und Luftkompression deutlich höher sind als die der Materialdehnung, was auf die hohe Steifigkeit von Gusseisen zurückzuführen ist.

4.1.4 Anpassung der Leckage

Aus Kapitel 4.1.3 geht hervor, dass für Leitungen aus weichen Materialien mit größeren Durchmessern bereits bei geringen Luftanteilen in der Rohrleitung kein Druckabfall über dem Grenzwert von 0,20 bar durch die in Kapitel 4.1.2 (siehe Formel (14)) beschriebene und im bisherigen Projekt angewendete 1/10 Leckage eintritt. Grundsätzlich kann durch eine Anhebung des Prüfdrucks eine Verbesserung erzielt werden, da die Luftanteile stärker komprimiert werden. Eine Anhebung des Prüfdrucks ist jedoch nicht immer umsetzbar (v.a. bei Asbestzementleitungen sowie bei Armaturen mit geringer Druckstufe). Des Weiteren schafft eine Anhebung des Prüfdrucks bei weichen Leitungsmaterialien durch die nicht unerhebliche Materialdehnung ebenfalls keine Abhilfe (vgl. Kap. 5.3.2).



Eine leitungsspezifische Absenkung des Grenzkriteriums von 0,21 bar wurde in Abstimmung mit dem Landesamt für Umwelt ausgeschlossen. U.a. spielen bei geringen Grenzwerten die Messungenauigkeiten eine zunehmende Rolle. Wie aus Tabelle 9 hervorgeht, würde dieser Grenzwert bei Leitungen mit großen Durchmessern auf unter 0,05 bar abfallen. Dieser kleine Druckabfall liegt fast im Bereich der Messungenauigkeit und natürlichen Druckschwankung, womit eine Leckage nicht mehr eindeutig bestätigt werden könnte.

Die zulässige Leckage orientiert sich, wie in Kapitel 4.1.2 bzw. Formel (16) beschrieben, an der zulässigen Leckage für Freispiegelleitungen nach (DIN EN 1610, 2015). Das zulässige, durch eine Leckage austretende Wasservolumen ist hierbei abhängig von der Mantelfläche des zu prüfenden Rohrabschnitts. Eine Alternative stellt ein Bezug des Leckageverlustvolumens in Abhängigkeit des transportierten Abwasservolumens dar. Große Abwasserleitungen dürfen auf Grundlage der 1/10-Leckage bezogen auf ihr Rohrvolumen deutlich weniger Wasservolumen durch eine Leckage verlieren als Leitungen mit kleinem Durchmesser. Dieser Zusammenhang wurde bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert. Die Abbildung 17 zeigt den Zusammenhang zwischen Rohrvolumen und zulässigem Leckagevolumen einer 1/10 Leckage.

Da mit den Ergebnissen der Simulation und der bisherigen Prüfungen an realen Abwasserdruckleitungen 1/10 Leckagen bei Rohrleitungen mit einem Innendurchmesser bis 80 mm mit einem Leitungsmaterial PE 100 bzw. PE 80 zuverlässig erkannt werden, kann dieses Verhältnis zwischen Leckagevolumen und Rohrrinnenvolumen für Leitungen mit größerem Durchmesser herangezogen werden.

In Tabelle 8 findet sich eine Zusammenstellung beispielhafter PE 80 Leitungen mit ansteigenden Durchmessern und Leckagevolumina bei unterschiedlichen Berechnungsansätzen. Das Rohrmaterial PE 80 und eine dünne Wandung (PN 7,5) wurden gewählt, da weiche Materialien einem Druckabfall entgegenwirken und somit den schlechtesten Fall darstellen. Es sind Material- und Leitungskennwerte angegeben sowie die Wassermenge einer klassisch berechneten 1/10 Leckage.



Schlussbericht

Tabelle 8: Zusammenstellung beispielhafter PE 80 Leitungen mit ansteigenden Durchmessern und sowie Leckagevolumina bei unterschiedlichen Berechnungsansätzen

mögliche Anpassung der zulässigen Leckage														
Leitung														
Material	DN	DA [mm]	DI [mm]	s [mm]	SDR	L [m]	V [m³]	Mantelfläche [m²]	1/10 Leckage [ml/min]	1/10 Leckagevolumen in 1h [l]	Anteil des 1/10 Leckagevolumens von der Mantelfläche [%]	Anteil des 1/10 Leckagevolumens am Rohrvolumen [%]	Leckagevolumen auf Rohrvolumen bezogen [ml/min]	Anteil des Leckagevolumens auf Rohrvolumen entspricht einer ... Leckage
PEHD PE80, PN7,5	50	63,0	55,8	3,6	17,5	1000,0	2,45	175,30	87,65	5,26	0,003	0,22	87,65	0,100
PEHD PE80, PN7,5	65	75,0	66,4	4,3	17,4	1000,0	3,46	208,60	104,30	6,26	0,003	0,18	104,30	0,100
PEHD PE80, PN7,5	80	90,0	79,8	5,1	17,6	1000,0	5,00	250,70	125,35	7,52	0,003	0,150376	125,35	0,100
PEHD PE80, PN7,5	100	110,0	97,4	6,3	17,5	1000,0	7,45	305,99	153,00	9,18	0,003	0,12	186,74	0,122
PEHD PE80, PN7,5	125	125,0	110,8	7,1	17,6	1000,0	9,64	348,09	174,04	10,44	0,003	0,11	241,66	0,139
PEHD PE80, PN7,5	125	140,0	124,0	8,0	17,5	1000,0	12,08	389,56	194,78	11,69	0,003	0,10	302,66	0,155
PEHD PE80, PN7,5	150	160,0	141,8	9,1	17,6	1000,0	15,79	445,48	222,74	13,36	0,003	0,08	395,79	0,178
PEHD PE80, PN7,5	150	180,0	159,6	10,2	17,6	1000,0	20,01	501,40	250,70	15,04	0,003	0,08	501,40	0,200
PEHD PE80, PN7,5	150	200,0	177,2	11,4	17,5	1000,0	24,66	556,69	278,35	16,70	0,003	0,07	618,08	0,222
PEHD PE80, PN7,5	200	225,0	199,4	12,8	17,6	1000,0	31,23	626,43	313,22	18,79	0,003	0,06	782,65	0,250
PEHD PE80, PN7,5	200	250,0	221,6	14,2	17,6	1000,0	38,57	696,18	348,09	20,89	0,003	0,05	966,62	0,278
PEHD PE80, PN7,5	250	280,0	248,2	15,9	17,6	1000,0	48,38	779,74	389,87	23,39	0,003	0,05	1212,61	0,311
PEHD PE80, PN7,5	250	315,0	279,2	17,9	17,6	1000,0	61,22	877,13	438,57	26,31	0,003	0,04	1594,43	0,350
PEHD PE80, PN7,5	300	355,0	314,8	20,1	17,7	1000,0	77,83	988,97	494,49	29,67	0,003	0,04	1950,68	0,394
PEHD PE80, PN7,5	350	400,0	354,6	22,7	17,6	1000,0	98,76	1114,01	557,00	33,42	0,003	0,03	2475,11	0,444
PEHD PE80, PN7,5	400	450,0	399,0	25,5	17,6	1000,0	125,04	1253,50	626,75	37,60	0,003	0,03	3133,74	0,500



In der dritten Spalte von rechts ist der Anteil des Leckagevolumens (1/10 Leckage) bezogen auf das Rohrvolumen angegeben. Dieses beträgt bei einem Leitungsinwenddurchmesser von 80 mm 0,15 % des Rohrvolumens. Mit zunehmendem Rohrdurchmesser nimmt dieses Verhältnis stark ab.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Druckrohrleitungen dahingehend dimensioniert sind, dass das Abwasser unabhängig vom Durchmesser in etwa den gleichen Zyklen gefördert d.h. gepumpt wird und ungefähr dieselben Fließgeschwindigkeit aufweist. Unter dieser Annahme wird durch Druckleitungen mit großem Durchmesser im Verhältnis zur Rohrquerschnittsfläche mehr Wasser befördert als in Druckleitungen mit geringerem Durchmesser.

Da Leckagen bei Durchmessern bis DN80 auch im Worstcase sicher erkannt werden können, wird dieses Verhältnis zwischen Leckage- und Rohrvolumen auch auf größere Durchmesser projiziert. Bei einer Leitung mit Durchmesser DN80 entspricht die zulässige 1/10 Leckage 0,15 % des Rohrvolumens. In der vorletzten Spalte wird 0,15 % mit den Rohrleitungsvolumina der Leitungen mit größeren Durchmessern multipliziert und die minutliche Leckage durch Division (60 min) errechnet.

In der letzten Spalte wird berechnet, welchen Anteil die angepasste zulässige Leckage an der nach (DIN EN 1610, 2015) zulässigen Leckage der Freispiegelleitungen hätte. Hier ergibt sich für DN80 entsprechend der Faktor 0,1 für die verwendete 1/10 Leckage. Für die in der Abbildung unterste Rohrleitung mit einem Nenn Durchmesser von DN450 bedeutet der Faktor 0,500 eine Verfünfachung der bisher zulässigen 1/10 Leckage. Unter Berücksichtigung der bei einem Innendurchmesser von 400 mm deutlich größeren Abwasserfracht (x 5) im Vergleich zu einer Abwasserleitung mit einem lichten Querschnitt von 80 mm ist eine Vergrößerung der bisher zulässigen Leckage jedoch vertretbar. Es ist zu berücksichtigen, dass ein Faktor < 1 in der letzten Spalte bedeutet, dass die Leckage noch geringer ist als die für diesen Querschnitt zulässige Leckage im Freispiegelkanal. Für eine Druckleitung mit einem Innendurchmesser von 400 mm würde die zulässige Leckage also trotzdem nur die Hälfte der zulässigen Leckage einer entsprechenden Leitung im Freispiegel entsprechen. Mit zunehmendem Innendurchmesser nähert sich somit die angepasste zulässige Leckage der nach (DIN EN 1610, 2015) zulässigen Leckage der Freispiegelleitungen an. Bei einem Innendurchmesser von 800 mm ergibt sich ein Faktor von 1, entsprechend der zulässigen Leckage von Freispiegelleitungen. Es ist zu berücksichtigen, dass die meisten Abwasserdruckleitungen nur geringe Durchmesser \leq DN100 aufweisen. Leitungen mit einem Nenn Durchmesser \geq DN450 sind im Rahmen des Forschungsvorhabens lediglich in zwei Fällen (2 x DN500) aufgetreten.



In Anlehnung an die im Rahmen des Forschungsvorhabens aufgetretenen Rohrdurchmesser kann das Verfahren bis zu einem Nenndurchmesser von DN500 eingesetzt werden.

Für Leitungen kleiner DN80 ist keine Anpassung erforderlich, da die 1/10 Leckagen sicher erkannt werden können.

Durch die Anpassung des zulässigen Leckagevolumens kommt es zu einem größeren Wasservolumen, welches in der Druckprüfung aus der Rohrleitung austreten darf. In der nachfolgenden Tabelle 9 sind die mittels Simulation (vgl. Kap. 5) berechneten Druckabfälle aufgrund der bisherigen und der angepassten Leckage für den Worstcase Fall berechnet. Zu beachten ist hierbei, dass bei Entwicklung der Anpassung der Leckage der Prüfdruck im Worstcase (hydrostatischer Druck in der Druckleitung 20 m) nur zu einer Komprimierung am Hochpunkt von 0,5 bar angenommen wurde. In Tabelle 9 und Tabelle 10 ist die Berechnung für diesen Fall dargestellt. Durch die Anhebung des Prüfdrucks (vgl. 3.3.6) und somit einer Vorkomprimierung der Luft um weitere 0,5 bar auf 1 bar gegenüber den Darstellungen der beiden Tabellen kann sichergestellt werden, dass auch bei Unterschreitung des nötigen Prüfdrucks sowie unklarer Leitungsführung und damit ggf. falscher Annahme des hydrostatischen Drucks eine ausreichende Vorkomprimierung der in der Druckleitung vorhandenen Luft sichergestellt werden kann.

Aus der folgenden Tabelle geht hervor, dass der ursprüngliche Grenzwert des zulässigen Luftanteils von 2% eine Identifizierung der ursprünglichen sowie der angepassten Leckage bei Leitungen mit großem Durchmesser nicht zulässt.



Tabelle 9: Vergleich des Druckabfalls bei der Simulation einer Worstcase Rohrleitung mit weichem Rohrmaterial aufgrund der 1/10 bzw. der angepassten Leckage

Rohrwerkstoff	Rohrdurchmesser [mm]	Prüfdruck [bar]	Luftanteil [%]	Leckage	Druckabfall [bar]
PE 80	90	3	2	alt	0,12
PE 80	90	3	2	neu	0,12
PE 80	450	3	2	alt	0,02
PE 80	450	3	2	neu	0,12

Neben der Anpassung der zulässigen Leckage ist demnach auch eine leitungs-spezifische Anpassung des zulässigen Luftanteils erforderlich (vgl. Kap. 4.1.6 und 4.1.7). Der zulässige Luftanteil wird minimal bei geringen Drücken am Hochpunkt und einem geringen Druckniveau von nur 3 bar, wie dies bei Leitungen mit einer Höhendifferenz von 20 m und geringem Betriebsdruck auftritt.

Mit Hilfe der Simulation (vgl. Kap. 5) ist es möglich, für die Tabelle 9 die zulässigen maximalen Luftanteile in der Druckleitung zu bestimmen, bei denen eine Erkennung der Leckage gerade noch gegeben ist. Die Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Maximal zulässige Luftanteile in Worstcase Druckleitungen mit 1/10 bzw. angepasster Leckage

Rohrwerkstoff	Rohrdurchmesser [mm]	Prüfdruck [bar]	Luftanteil [%]	Leckage	Druckabfall [bar]
PE 80	90	3	0,98	alt	0,21
PE 80	90	3	0,98	neu	0,21
PE 80	450	3	0	alt	0,14
PE 80	450	3	0,98	neu	0,21

Nach Tabelle 10 ist der maximal zulässige Luftanteil bei einer 1/10 Leckage und einem Rohrlungsdurchmesser von 450 mm < 0 %. Es wäre somit nicht möglich, in dieser Worstcase Leitung eine 1/10 Leckage zu identifizieren. Die angepasste Leckage kann jedoch erkannt werden. Bei einem Nenndurchmesser von 90 mm (ID = 80 mm) ist bei einem maximalen Luftanteil von 0,98 %, welcher in der Praxis



durch effektives Spülen erreicht werden kann, eine 1/10 Leckage erkennbar. Da die angepasste Leckage das Verhältnis des 1/10 Leckagevolumens im Bezug zum Rohrvolumen bei einem Rohrdurchmesser von 90 mm heranzieht, ist das angepasste Leckagevolumen bei einem Rohrdurchmesser von 90 mm identisch mit dem 1/10 Leckagevolumen. Mit einem Durchmesser von 450 mm und einer um den Faktor 5 vergrößerten Leckage ist der maximal zulässige Luftanteil identisch mit demjenigen bei 90 mm.

Die Anpassung des zulässigen Leckagevolumens hat somit zur Folge, dass für jeden Rohrdurchmesser mit denselben Randbedingungen (z.B. Prüfdruck und hydrostatischer Druck) derselbe maximale zulässige Luftanteil gilt. Dieser liegt im Worstcase bei 0,98 %. Luftanteile im Bereich von 1 % des Leitungsvolumens können i.d.R. an in Betrieb befindlichen Druckleitungen erreicht werden (vgl. Kap.11.3.3).

Das zulässige angepasste stündliche Leckagevolumen errechnet sich in nachfolgender Formel für Innendurchmesser ≤ 80 mm und entspricht einer 1/10 Leckage:

$$V_{L,angepasst} = 0,1 * 0,15l * \frac{1}{30min * 1m^2} * 2 * \frac{ID}{2000} * \pi * L * 60min \quad (22)$$

$\Delta V_{L,angepasst}$	=	Zulässiges stündliches Leckagevolumen	[l]
ID	=	Rohrinnendurchmesser	[mm]
L	=	Rohrlänge	[m]

Für Innendurchmesser > 80 mm errechnet sich das zulässige angepasste stündliche Leckagevolumen zu:

$$V_{L,angepasst} = 0,1 * 0,15l * \frac{1}{30min * 1m^2} * 2 * \frac{ID}{2000} * \pi * L * 60min * \frac{ID}{80mm} \quad (23)$$

In Abstimmung mit dem LfU wurde die beschriebene Anpassung der Leckage festgelegt. Die Anpassung der zulässigen Leckage ist für die Erkennung einer Undichtigkeit im Worstcase erforderlich. Dies bedeutet jedoch, dass bei Leitungen mit günstigeren Randbedingungen der Druckabfall entsprechend größer ist, und auch kleinere Leckagen sicher erkannt werden können.



4.1.5 Maximale Anhebung des Prüfdrucks

In Kap. 4.1.4 wurde bereits erwähnt, dass eine Anhebung des Prüfdrucks eine stärkere Vorkomprimierung der Luft zur Folge hat. Somit ist der in der Leitung zulässige Luftanteil (unter Atmosphärendruck) größer, da der Einfluss der Luft auf den auftretenden Druckabfall verringert wird.

Eine solche Anhebung des Prüfdrucks kann demnach in Betracht gezogen werden, wenn der maximal zulässige Luftanteil (siehe Kap. 4.1.7) trotz intensiver Bemühungen hinsichtlich des Luftaustrags (siehe Kap. 11.3.2) nicht unterschritten werden kann.

Eine Anhebung des Prüfdrucks führt jedoch zu einem erhöhten Risiko von Schäden durch die Druckprüfung. Daher sollte individuell genauestens abgewogen werden, ob eine Anhebung des Prüfdrucks in Frage kommt. Zudem verlängert sich aufgrund des höheren Drucks und der längeren Anpassung des Materials an diesen Druck i.d.R. die Vorprüfung. Eine entsprechende Speicherung des Abwassers muss somit über einen längeren Zeitraum gegeben sein, als dies mit niedrigerem Prüfdruck der Fall wäre.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass eine Erhöhung des Prüfdrucks zu einem erhöhten Wasseraustritt aus einer potentiell vorhandenen Leckage führt. Bei Verwendung von erhöhten Prüfdrücken wird daher nicht der reguläre Betriebszustand abgebildet. Ein Unterschied ergibt sich jedoch nur, wenn tatsächlich Undichtigkeiten vorhanden sind.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Prüfdruck an einer Beispielleitung maximal um 2,5 bar über den nach Kap. 3.3.6 bestimmten regulären Prüfdruck erhöht. Erfahrungen zu Prüfungen mittels HSA-Normalverfahren liegen für höhere Anhebungen des Prüfdrucks nicht vor.

Eine Anhebung des Prüfdrucks ist nur in gewissem Rahmen sinnvoll. Nach dem Gasgesetz von Boyle-Mariotte nimmt die Verringerung des komprimierten Luftvolumens bei zunehmenden Drücken exponentiell ab. Dieser Effekt wird bereits bei zusätzlichen Drücken von 3 bar bemerkbar.

Aus den genannten Gründen wird die Erhöhung des Prüfdrucks für das HSA-Normalverfahren auf maximal 3 bar begrenzt. Dies bedeutet, dass der nach Kap. 3.3.6 bestimmte Prüfdruck um maximal 3 bar erhöht werden darf. Es wird außerdem ausdrücklich darauf hingewiesen, dass mit einer Anhebung des Prüfdrucks ein erhöhtes Risiko für Schäden einhergeht.



4.1.6 Zulässiges Ablassvolumen in der Druckabfallprüfung

Wie bereits in Kap. 4.1.2 erläutert, kann die in der Druckleitung vorhandene Luft durch Dekompression (Entspannung) einem leakagebedingten Druckabfall entgegenwirken und somit diese Undichtigkeit überdecken. Um den maximal zulässigen Luftanteil in einer Leckage zu bestimmen, muss der in Kap. 4.1.4 bereits beschriebene Mindestdruckabfall bei einer gerade nicht mehr zulässigen Leckage erreicht werden. Eine Undichtigkeit wird durch einen Druckabfall von über 0,20 bar charakterisiert. Durch die nötige Genauigkeit des im Prüfverfahren verwendeten Druckloggers von zwei Nachkommastellen (vgl. Kap. 3.3.4) gilt eine Undichtigkeit ab 0,21 bar Druckabfall in der Hauptprüfung als erkannt. Durch die leitungsindividuellen Randbedingungen ist der zulässige Luftanteil in jeder Druckleitung unterschiedlich. Bei guten Randbedingungen wie z.B. einer geringen Höhendifferenz wird die in der Druckleitung vorhandene Luft stärker vorkomprimiert und dadurch ein größerer Luftanteil zugelassen.

Die Luftfreiheit wird in der Druckabfallprüfung festgestellt. Dies geschieht mithilfe des zulässigen Ablassvolumens. Um dieses zu bestimmen, gilt folgender Zusammenhang.

$$\Delta V_{zul.} = V_{Material} + V_{Wasser} + V_{Luft} \quad (24)$$

Mit:

$$V_{Luft} = x * V_R * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right) \quad (25)$$

x = prozentualer Luftanteil [%]

Da der prozentuale Luftanteil nicht gegeben ist, wird Formel (24) nach x % aufgelöst. $\Delta V_{zul.}$ entspricht dabei dem zulässigen angepassten Leckagevolumen nach Formel (22) bzw. (23). Da eine Anpassung des Leckagevolumens ab einem Innendurchmesser von 80 mm stattfindet, werden nachfolgende Formeln für einen Innendurchmesser kleiner bzw. größer 80 mm angegeben. Für das zulässige Ablassvolumen in der Druckabfallprüfung ergibt sich bei Innendurchmessern > 80 mm folgende Formel:



$$\begin{aligned}
 & \Delta V_{zul.} \\
 &= \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) * 0,1 \\
 &+ \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 60 * \frac{ID}{1000} * \pi * L * \frac{ID}{80} - \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * 0,21 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{\pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,21 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} \quad (26) \\
 &* \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)
 \end{aligned}$$

$\Delta V_{zul.}$	=	Zulässiges stündliches Leckagevolumen	[l]
ID	=	Rohrinnendurchmesser	[mm]
L	=	Rohrlänge	[m]
Δp	=	Druckdifferenz in Druckabfallprüfung	[bar]
E_W	=	Kompressionsmodul Wasser	[N/mm ²]
E_R	=	E-Modul Rohrwerkstoff	[N/mm ²]
s	=	Wandstärke	[mm]
PD	=	Prüfdruck (relativdruck)	[bar]
p_{hyd}	=	hydrostatischer Druck durch maximale Erhebung	[bar]

Diese kann wie folgt gekürzt werden:

$$\begin{aligned}
 \Delta V_{zul.} &= \pi * L * \frac{ID^2}{40000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) \\
 &+ \frac{1,5 - 21 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{1000 * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,21 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} * \pi * \frac{ID^2}{4000} * L \quad (27) \\
 &* \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)
 \end{aligned}$$

Für Innendurchmesser ≤ 80 mm lautet die Formel:

$$\begin{aligned}
 & \Delta V_{zul.} \\
 &= \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) * 0,1 \\
 &+ \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 60 * \frac{ID}{1000} * \pi * L - \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * 0,21 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{\pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,21 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} * \pi \quad (28) \\
 &* \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)
 \end{aligned}$$



Diese kann wie folgt gekürzt werden:

$$\begin{aligned} \Delta V_{zul.} = & \pi * L * \frac{ID^2}{40000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) \\ & + \frac{12 - ID * 2,1 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{ID * 100 * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,21 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} * \pi * \frac{ID^2}{4000} * L \\ & * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

4.1.7 Maximal zulässiger Luftanteil

Die Ausgabe des maximal zulässigen Luftanteils als prozentualer Volumenanteil der Rohrleitung lässt sich mittels Umformung der Formeln aus Kap. 4.1.6 durch nachfolgende Formel für Innendurchmesser > 80 mm bestimmen:

$$x = 100 * \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 60 * \pi * ID * L * \frac{ID}{80} * \frac{1}{1000} - \pi * \frac{1}{1000} * 0,21 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} * \frac{ID^2}{4} * L + \frac{ID}{E_R * s} * \frac{ID^2}{4} * L \right)}{\frac{ID^2}{4} * \pi * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,21 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} \quad (30)$$

Für Innendurchmesser ≤ 80 mm gilt folgende Berechnung:

$$x = 100 * \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 60 * \pi * ID * L * \frac{1}{1000} - \pi * \frac{1}{1000} * 0,21 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} * \frac{ID^2}{4} * L + \frac{ID}{E_R * s} * \frac{ID^2}{4} * L \right)}{\frac{ID^2}{4} * \pi * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,21 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} \quad (31)$$



4.1.8 Bestimmung des Grenzwerts in der Hauptprüfung

Für die Bestimmung des Grenzwerts für den maximal zulässigen Druckabfall in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens infolge einer zulässigen Leckage muss die Formel (26) mit der zulässigen Leckage gleichgesetzt werden. Um den Druckabfall (Δp) zu bestimmen, muss nach Δp aufgelöst werden. Dies ist mathematisch nicht möglich. Eine Lösung der Gleichung kann jedoch mittels Simulation (siehe Kap. 5) erfolgen. Das Prüfverfahren ist so konzipiert, dass sich bei dem maximal zulässigen Luftanteil (vgl. Kap 4.1.7) und der zulässigen Leckage (vgl. Kap. 4.1.4) ein Druckabfall von 0,21 bar einstellt. Geringere Luftanteile führen aufgrund des geringeren Einflusses der Luft zu einem größeren Druckabfall. Je geringer der Luftanteil in der Leitung, desto sicherer wird die Leckage erkannt. Erst ab Überschreitung des zulässigen Luftanteils in der Leitung, kann eine unerwünschte Überdeckung der Leckage erfolgen und eine Leckage unentdeckt bleiben.

Die Berechnung des zulässigen Ablassvolumens (vgl. Kap. 4.1.6) bestimmt den Luftanteil, bei dem es noch möglich ist, infolge einer zulässigen Leckage einen Druckabfall von $> 0,20$ bar hervorzurufen. Ein Druckabfall $\leq 0,20$ bar führt somit immer richtigerweise zu einer dichten Bewertung einer Druckleitung. Entsprechend führt bei einer unzulässigen Leckage eine Prüfung mit Luftanteil unterhalb des maximal zulässigen Luftanteils zu Druckabfällen in der Hauptprüfung über 0,20 bar.

Ein Druckabfall $> 0,2$ bar kann auch Leitungen mit geringen Luftanteilen und sehr geringen Wasserverlusten z.B. durch tropfende Schieber betreffen. Um diese Leitungen nicht fälschlicherweise als undicht einzustufen, erfolgt eine leitungsspezifische Anpassung des Grenzwerts in Abhängigkeit des tatsächlich vorhandenen Luftanteils. Dies erfolgt über das entwickelte Simulationstool (siehe Kap. 5).

4.1.9 Dauer der Vorprüfung

Wie bereits in Kap. 3.3.7.1 erwähnt, dient die Vorprüfung zur Stabilisierung des Rohrleitungsmaterials. Ohne diese würde der Druck in der Hauptprüfung durch Vergrößerung des Leitungsvolumens infolge Ausdehnung des Materials einen Druckabfall induzieren. Dieser Druckabfall kann dazu führen, dass dichte Druckleitungen fälschlicherweise als undicht bewertet werden. In Abbildung 20 sind die Druckverläufe während der Vorprüfungen an entlüfteten, dichten, realen Druckleitungen der biegeweichen Materialien PE 80 und PE 100 dargestellt.

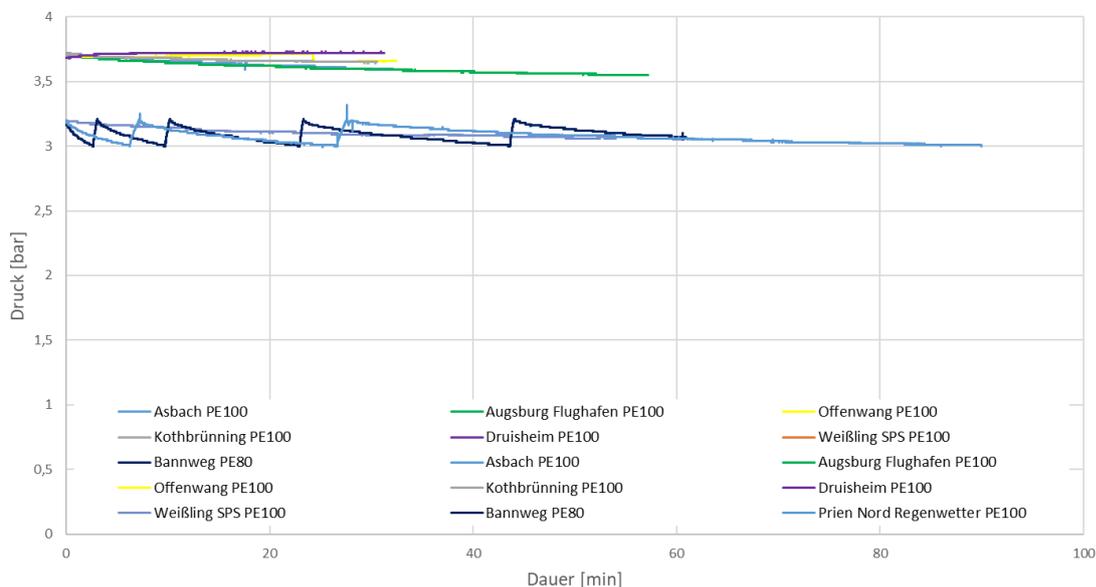


Abbildung 20: Druckabfall in der Vorprüfung von biegeweichen Leitungsmaterialien (PE 80, PE 100) unterschiedlicher realer Beispielleitungen während der der Vorprüfung

Es ist zu erkennen, dass der Druckabfall durch Materialdehnung bei einigen Druckprüfungen bereits nach 30 Min abgeklungen ist. Die Dehnung anderer Druckleitungen ist erst nach 60 Min soweit abgeklungen, dass der Fehler durch Volumenzunahme in der Hauptprüfung infolge Materialdehnung minimal ist.

Es ist anhand der dunkelblauen Druckverlaufslinie gut zu erkennen, dass sich die Intervalle verlängern, in denen Wasser nachgepumpt werden muss, um den Druck stabil zu halten. Dies ist zu erwarten, wenn der Druckabfall nur auf die druckinduzierten Veränderungen des Leitungsmaterials zurückzuführen ist.

Der Druckverlauf der Vorprüfung gibt somit durch die Intervalle des Nachpumpens bereits Informationen über die Druckleitung. Stellt sich keine Vergrößerung der In-

tervalle ein, in denen ein Nachpumpen nötig ist, so ist wie in Abbildung 21 zu erkennen, von einem gleichmäßigen Wasserverlust und somit einer Leckage auszugehen.

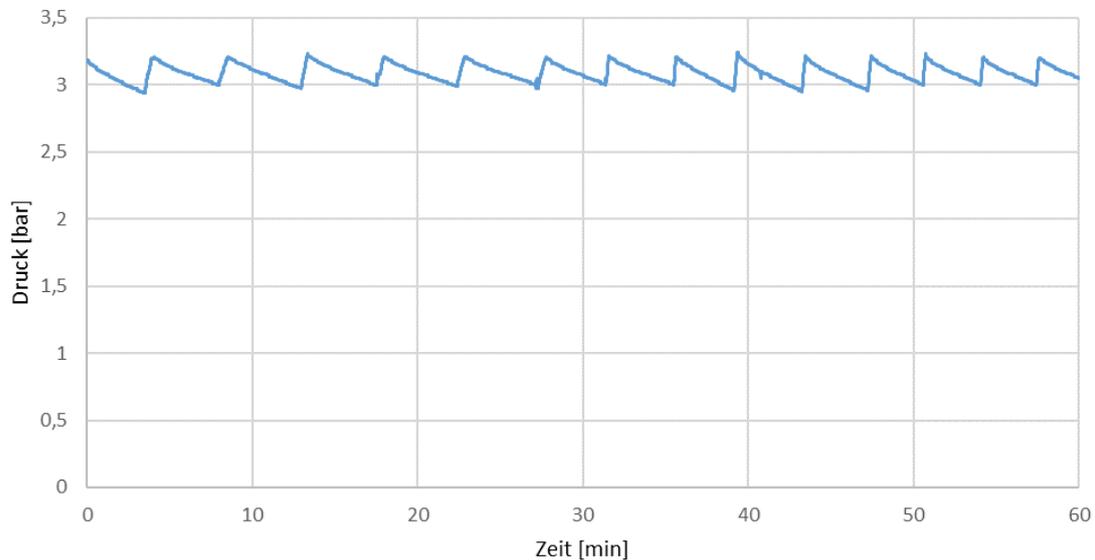


Abbildung 21: Druckverlauf in der Vorprüfung am Bannweg mit 1/10 Leckage ohne zeitliche Vergrößerung der Nachpumpintervalle

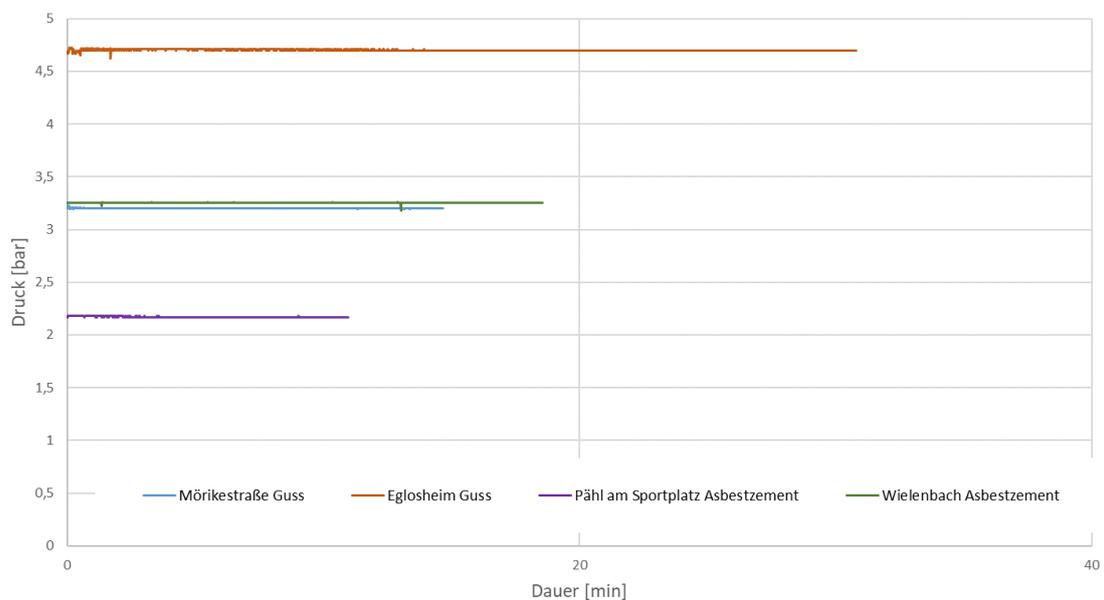


Abbildung 22: Druckverlauf in der Vorprüfung an Beispielleitungen aus biegesteifen Leitungsmaterialien (Asbestzement, Guss)

In Abbildung 22 ist der Druckverlauf der Vorprüfung bei biegesteifen Materialien wie Asbestzement oder Guss beispielhaft dargestellt. Im Gegensatz zur Abbildung



20 ist deutlich zu erkennen, dass bei dichten, luftfreien realen Druckleitungen nahezu kein Druckabfall infolge Materialdehnung auftritt. Die Vorprüfung konnte an allen dargestellten Beispielleitungen nach kurzer Zeit beendet werden. Nach den in Kap. 3.3.7.1 vorgeschlagenen 30 Min Vorprüfung für biegesteife Materialien ist üblicherweise von keiner messbaren Materialdehnung mehr auszugehen.

Die Erfordernis und Dauer der Vorprüfung ist leitungsspezifisch sehr unterschiedlich und v.a. abhängig vom Leitungsmaterial, der Differenz zwischen Betriebs- und Prüfdruck sowie dem Alter der Leitung. Daher ist über die Dauer der Vorprüfung in Abhängigkeit der Druckveränderungen in der Vorprüfung leitungsspezifisch zu entscheiden.

4.2 20-Min Test

Eine Alternative zum HSA-Normalverfahren stellt der 20-Min Tests dar. Durch Einbringen des Wasservolumens in Höhe des zulässigen Leckagevolumens wird eine mögliche Leckage detektiert. Die Entwicklung dieses Kurztests wird im Folgenden erläutert. Analog zum HSA-Normalverfahren waren auch hier entsprechende Anpassungen erforderlich.

Vorausgesetzt wird das durch die Entwicklung des HSA-Normalverfahrens erlangte Verständnis des Zusammenhangs zwischen Rohrdurchmesser und Leckage. Die Anpassung der zulässigen Leckage wird für den 20-Min Test übernommen. Entsprechend ist der 20-Min Test für alle Leitungsmaterialien bis zu einem Nenndurchmesser von 500 mm geeignet.

Der Unterschied zwischen den Verfahren besteht darin, dass im HSA-Normalverfahren der Leitung durch eine Leckage Wasser entnommen wird - beim 20-Min Test wird der Leitung in zweiminütigen Intervallen die zulässige Leckage anteilig zugegeben und der resultierende Druckanstieg gemessen.

Eine Kurzfassung des finalen 20-Min Tests ist in Kap. 15.2 zu finden. Für weitere Informationen zur grundsätzlichen Entwicklung des 20-Min Tests wird auf den 1. Zwischenbericht verwiesen.

4.2.1 Entwicklung des Nachpumpintervalls

Bei der Entwicklung des 20-Min Tests wurden zunächst verschiedene Nachpumpintervalle ausprobiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Auswirkungen verschiedener Nachpumpintervalle an einer Druckleitung mit künstlicher Leckage bei einem Prüfdruck von 3 bar.

Durch das Einbringen von Wasser in die Leitung wird üblicherweise eine Druckschwankung ausgelöst. Ein Nachpumpen im minütlichen Rhythmus wurde aufgrund der oftmals resultierenden längeren Druckschwankungen im Anschluss an das Nachpumpintervall und einer entsprechenden Überlagerung zwischen abklingender Druckschwankung und erneutem Nachpumpintervall als nicht sinnvoll erachtet. In Abbildung 23 ist zwischen den eine Minute auseinander liegenden Nachpumpvorgängen bei Minute 1 bzw. 2 und 15 bzw. 16 zu sehen, dass sich der Druck innerhalb der Leitung zwischen den beiden Nachpumpintervallen nicht beruhigen kann.

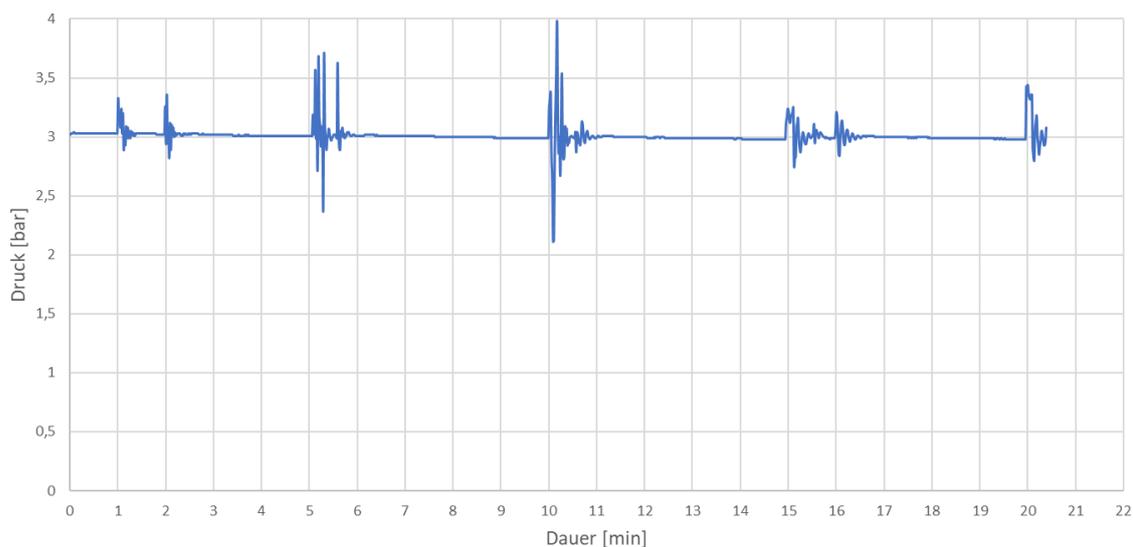


Abbildung 23: Druckverlauf bei der Variation des Nachpumpintervalls des 20-Min Tests

Die Nachpumpvorgänge bei Minute 5 und 10 zeigen deutliche Druckauschläge. Diese Ausschläge stammen von dem entsprechend großen erforderlichen Nachpumpvolumen, welches bei größeren zeitlichen Abständen zwischen den Nachpumpintervallen entsteht. Eine Verlängerung der Nachpumpintervalle ist somit ebenso nicht empfehlenswert. In Abbildung 24 ist der 20-Min Test mit dem gewählten Nachpumpintervall von 2 Min beispielhaft dargestellt. Der abgebildete 20-Min Test wurde ebenfalls an einer Druckleitung mit 3 bar und künstlicher Leckage durchgeführt.

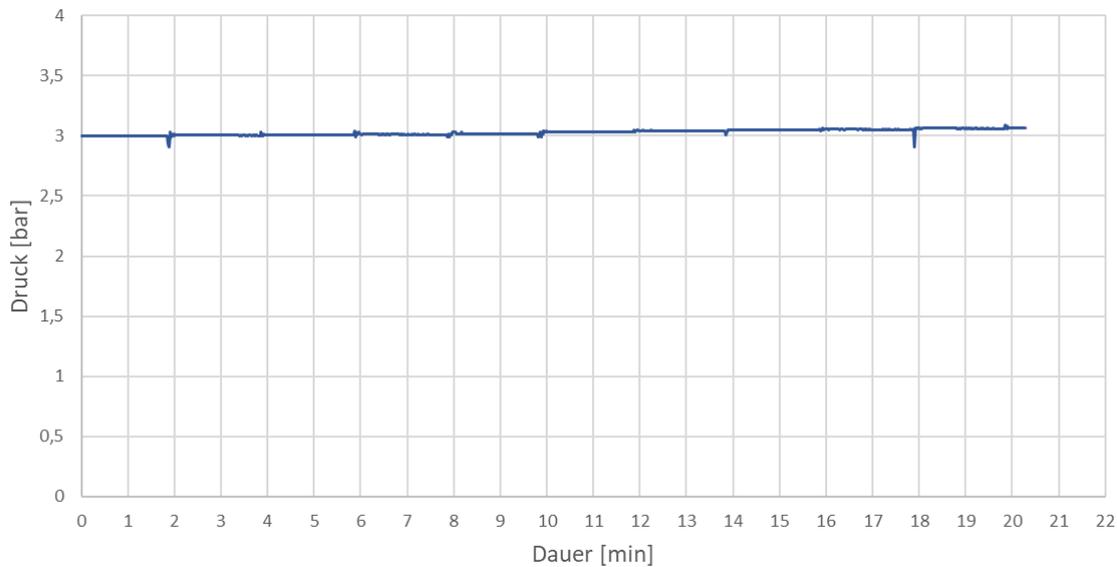


Abbildung 24: Druckverlauf des 20-Min Tests an einer Beispielleitung mit Prüfdruck 3 bar, zwei-minütigem Nachpumpintervall und künstlicher Leckage

Es ist zu erkennen, dass die Druckausschläge aufgrund des 2-minütigen Nachpumpintervalls gleichmäßig sind und durch die geringe Wassermenge rasch abklingen. Bei größeren Nachpumpintervallen wären durch das größere Nachpumpvolumen höhere Ausschläge zu erwarten. Bei einem geringeren Nachpumpintervall wäre eine vollständige Beruhigung des Leitungsdrucks ggf. nicht möglich. Daher wurde das Nachpumpintervall auf 2 Min festgesetzt.

4.2.2 Maximal zulässiger Luftanteil

Wie beim HSA-Normalverfahren vermindert der während einer Druckprüfung vorhandene Luftanteil eine Druckveränderung in der Leitung, durch die Änderung des Luftvolumens. Im HSA-Normalverfahren wird durch den in der Leitung vorhandenen Luftanteil der Druckabfall in der Hauptprüfung vermindert. Somit ist es erforderlich, einen maximal möglichen Luftanteil vorzugeben, um eine mögliche Überdeckung einer vorhandenen Leckage zu vermeiden. Beim 20-Min Test bewirken vorhandene Luftanteile dementsprechend eine Verminderung des Druckanstiegs während der Prüfung.

Durch zu viel Luft in der Leitung wird der Mindestdruckanstieg und somit der Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit einer Druckleitung nicht erreicht. Eine dichte Druckleitung kann somit fälschlicherweise als undicht bewertet werden. Dies stellt aus Sicht des Umweltschutzes die sichere Seite dar, da Leckagen nicht übersehen werden können. Aus diesem Grund wird auf die Druckabfallprüfung im 20-Min Test verzichtet. Bei Nichtbestehen des 20-Min Tests kann jedoch nicht zwischen einer



unzulässigen Leckage und zu hohen Luftanteilen in der Leitung differenziert werden. Das längere HSA-Normalverfahren gibt mehr Aufschluss über die geprüfte Leitung als der 20-Min Test.

Die Herleitung des Grenzwerts für den 20-Min Test erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse an realen Beispielleitungen in Kap. 7.4.1. Der Grenzwert beträgt 0,15 bar.

Für die Entwicklung des 20-Min Tests wurden Berechnungen zum zulässigen Luftanteil durchgeführt. Diese werden im Folgenden dargestellt. Für die Umsetzung des 20-Min Test spielen diese keine Rolle, da aus Gründen der Zeitoptimierung beim 20-Min Test auf die Druckabfallprüfung verzichtet wurde.

Die zulässige angepasste Leckage entspricht der Summe der Wasservolumina aller Nachpumpintervalle in den 20 Min des 20-Min Tests. Die Summe des eingebrachten Wasservolumens errechnet sich grundsätzlich analog zum HSA-Normalverfahren für Innendurchmesser ≤ 80 mm wie folgt:

$$V_{L,angepasst} = 0,1 * 0,15l * \frac{1}{30min * 1m^2} * 2 * \frac{ID}{2000} * \pi * L * 20min \quad (32)$$

$\Delta V_{L,angepasst}$	=	Zulässiges 20 minütiges Leckagevolumen	[l]
ID	=	Rohrinnendurchmesser	[mm]
L	=	Rohrlänge	[m]

Für Innendurchmesser > 80 mm errechnet sich das zulässige angepasste Leckagevolumen im 20-Min Test ebenfalls grundsätzlich analog zum HSA-Normalverfahren zu:

$$V_{L,angepasst} = 0,1 * 0,15l * \frac{1}{30min * 1m^2} * 2 * \frac{ID}{2000} * \pi * L * 20min * \frac{ID}{80mm} \quad (33)$$

Für die praktische Errechnung des zweiminütigen Nachpumpvolumens wird das Leckagevolumen nach (32) bzw. (33) durch zehn geteilt.

Der Luftanteil als prozentualer Wert ist wie schon beim HSA-Normalverfahren für die Durchführung der Druckprüfung nicht relevant. Im Rahmen des Forschungsvorhabens war die Bestimmung der prozentualen Luftanteile essentieller Bestandteil für die Entwicklung der Prüfverfahren. Die Luftfreiheit wird in der Druckabfallprüfung überprüft. Dies geschieht mithilfe des zulässigen Ablassvolumens. Um dieses zu bestimmen, gilt folgender Zusammenhang:



$$\Delta V_{zul.} = V_{Material} + V_{Wasser} + V_{Luft} \quad (24)$$

Mit:

$$V_{Luft} = x * V_R * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right) \quad (25)$$

x = prozentualer Luftanteil [%]

Da der prozentuale Luftanteil nicht gegeben ist, wird Formel (24) nach x % aufgelöst. $\Delta V_{zul.}$ entspricht dabei im 20-Min Test dem zulässigen Leckagevolumen nach Formel (32) bzw. (33). Für das zulässige Ablassvolumen in der Druckabfallprüfung ergibt sich bei Innendurchmessern > 80 mm folgende Formel:

$$\begin{aligned} \Delta V_{zul.} &= \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) * 0,1 \\ &+ \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 20 * \frac{ID}{1000} * \pi * L * \frac{ID}{80} - \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * 0,15 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{\pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,15 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} \\ &* \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right) \end{aligned} \quad (34)$$

$\Delta V_{zul.}$	=	Zulässiges 20 minütiges Leckagevolumen	[l]
ID	=	Rohrinnendurchmesser	[mm]
L	=	Rohrlänge	[m]
Δp	=	Druckdifferenz in Druckabfallprüfung	[bar]
E_W	=	Kompressionsmodul Wasser	[N/mm ²]
E_R	=	E-Modul Rohrwerkstoff	[N/mm ²]
s	=	Wandstärke	[mm]
PD	=	Prüfdruck (relativdruck)	[bar]
p_{hyd}	=	hydrostatischer Druck durch maximale Erhebung	[bar]



Gekürzt:

$$\Delta V_{zul.} = \pi * L * \frac{ID^2}{40000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) + \frac{0,5 - 15 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{1000 * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,15 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} \quad (35)$$

$$* \pi * \frac{ID^2}{4000} * L * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)$$

Für Innendurchmesser ≤ 80 mm lautet die Formel:

$$\Delta V_{zul.}$$

$$= \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right) * 0,1$$

$$+ \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 20 * \frac{ID}{1000} * \pi * L - \pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * 0,15 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{\pi * \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,15 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} * \pi \quad (36)$$

$$* \frac{ID^2}{4} * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)$$

Gekürzt:

$$\Delta V_{zul.} = \pi * L * \frac{ID^2}{40000} * \Delta p * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)$$

$$+ \frac{4 - ID * 1,5 * \left(\frac{1}{E_W} + \frac{ID}{E_R * s} \right)}{ID * 100 * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,15 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} * \pi * \frac{ID^2}{4000} * L \quad (37)$$

$$* \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - \Delta p + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)$$

Die Ausgabe des Luftanteils als prozentualer Volumenanteil der Rohrleitung lässt sich mittels nachfolgender Formel für Innendurchmesser > 80 mm bestimmen:

$$x$$

$$= 100$$

$$* \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 20 * \pi * ID * L * \frac{ID}{80} * \frac{1}{1000} - \pi * \frac{1}{1000} * 0,15 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} * \frac{ID^2}{4} * L + \frac{ID}{E_R * s} * \frac{ID^2}{4} * L \right)}{\frac{ID^2}{4} * \pi * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,15 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} \quad (38)$$

Für Innendurchmesser ≤ 80 mm gilt folgende Berechnung:

$$\begin{aligned}
 x & \\
 &= 100 \\
 & \cdot \frac{0,1 * 0,15 * \frac{1}{30 * 1} * 20 * \pi * ID * L * \frac{1}{1000} - \pi * \frac{1}{1000} * 0,15 * 0,1 * \left(\frac{1}{E_W} * \frac{ID^2}{4} * L + \frac{ID}{E_R * S} * \frac{ID^2}{4} * L \right)}{\frac{ID^2}{4} * \pi * L * \frac{1}{1000} * \left(\frac{1}{PD - p_{hyd} - 0,15 + 1} - \frac{1}{PD - p_{hyd} + 1} \right)} \quad (39)
 \end{aligned}$$

4.2.3 Notwendigkeit Vorprüfung 20-Min Test

Eine Vorprüfung ist zur Stabilisierung des Leitungsmaterials vorgesehen. Ebenso wie Luftanteile in der Leitung (vgl. Kap. 4.2.2) verringert eine nicht abgeschlossene Vorprüfung den möglichen Druckanstieg im 20-Min Test. Im Gegensatz zum HSA-Normalverfahren führt ein geringerer Druckanstieg bzw. ein Druckabfall im 20-Min Test zu einer Verschiebung der Bewertung in Richtung Nichtbestehen der Dichtheitsprüfung. Das Auslassen der Vorprüfung ermöglicht somit kein Dichtprüfen einer undichten Druckleitung.

Soll eine Vorprüfung vor dem 20-Min Test durchgeführt werden, sollte überlegt werden, ob es nicht sinnvoller ist, gleich das aufschlussreichere HSA-Normalverfahren durchzuführen, da die Zeitersparnis des 20-Min Tests dann kaum mehr ins Gewicht fällt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der 20-Min Test zu Forschungszwecken ohne und anschließend mit Vorprüfung durchgeführt. Die Prüfungen wurden mit dem niedrigsten möglichen Luftanteil durchgeführt, um mögliche Druckdifferenzen zwischen den beiden Prüfungen durch Materialveränderungen zu maximieren. Eine künstliche Leckage wurde nicht angeschlossen, von einer realen Leckage ist ebenfalls nicht auszugehen. Die nachfolgende Graphik zeigt beispielhaft die Druckverläufe der korrespondierenden Prüfungen mit und ohne Vorprüfung:

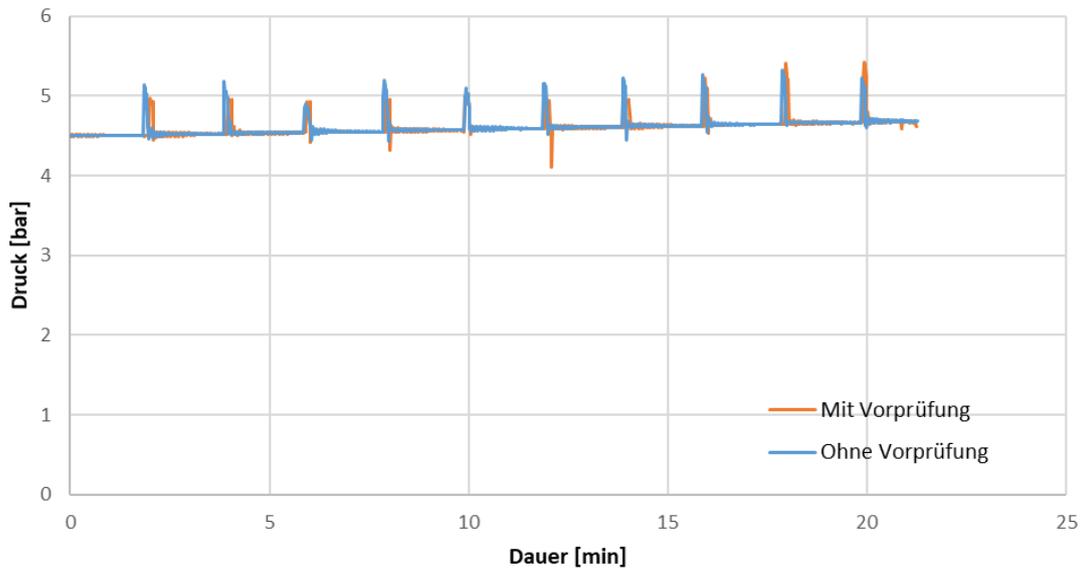


Abbildung 25: Vergleich des Druckverlaufs während des 20-Min Tests mit bzw. ohne Vorprüfung an einer Gussleitung in Ludwigsburg bei 4,5 bar Prüfdruck und einem Luftanteil von 0,21 %

Der dargestellte Druckverlauf des 20-Min Tests in Ludwigsburg wurde bei 4,5 bar und einem Luftanteil von 0,21 % an einer Gussleitung durchgeführt. Der Gussleitung mit Innendurchmesser 411 mm wurde insgesamt ein Wasservolumen entsprechend der 1/10 Leckage eingebracht. Der Druck stieg im 20-Min Test sowohl mit als auch ohne Vorprüfung von 4,50 bar auf 4,68 bar. Durch das steife Leitungsmaterial sind in der Vorprüfung keine Veränderungen zu erwarten. Deshalb kann zwischen den beiden Tests kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Ebenso wie beim HSA-Normalverfahren, in dem bei Prüfungen mit steifen Leitungsmaterialien eine kürzere Vorprüfung als bei weichen Leitungsmaterialien benötigt wird, ist der Einfluss durch Veränderungen des Rohrmaterials hier sehr gering (siehe Abbildung 22).

Die nachfolgende Graphik stellt den Druckverlauf des 20-Min Tests an einer realen Beispielleitung aus PE 100 mit und ohne Vorprüfung dar.

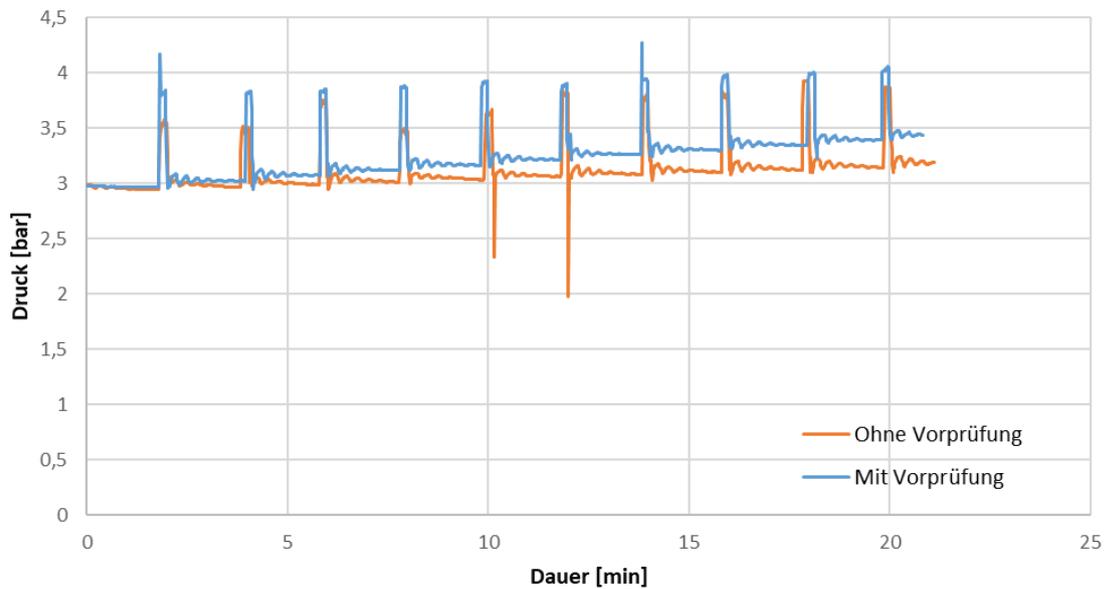


Abbildung 26: Vergleich des Druckverlaufs während des 20-Min Tests mit bzw. ohne Vorprüfung an einer Druckleitung des Materials PE 100 bei AMME (Großwallstadt) mit 3,0 bar Prüfdruck und geringen Luftanteilen im Bereich von 0,2 %

Die Prüfungen der Druckleitung in Großwallstadt mittels 20-Min Test wurden bei 3 bar und 0,25 % bzw. 0,18 % Luft durchgeführt. Ohne Vorprüfung stieg der Druck im 20-Min Test von 2,99 bar auf 3,19 bar, mit Vorprüfung von 2,99 bar auf 3,44 bar. Der Einfluss des Rohrmaterials ist deutlich erkennbar. Durch die fehlende Vorprüfung dehnt sich das Rohrmaterial während des 20-Min Tests und vergrößert somit das Rohrvolumen. Dies führt zu einem geringeren Druckanstieg, als allein durch die Wasserzufuhr zu erwarten wäre. Durch den geringen Luftanteil sind jedoch beide 20-Min Tests über 0,15 bar gestiegen und die Leitung somit als dicht zu bewerten.



4.2.4 Abbruchkriterium des 20-Min Tests

Bei Druckleitungen mit sehr geringem Luftanteil und/oder sehr steifem Leitungsmaterial ist ein starker Druckanstieg durch die Zugabe von Wasser im 20-Min Test zu erwarten. Um hierbei eine Schädigung der Druckleitung ausschließen zu können, ist der Druckanstieg zu begrenzen. In der Praxis hat sich ein Druckanstieg von 0,50 bar als sinnvolles Abbruchkriterium erwiesen. Bei einem Druckanstieg von 0,50 bar ist auch nach kürzerer Dauer als 20 Minuten von einer dichten Druckleitung auszugehen.

Wird im 20-Min Test ein Druckanstieg von 0,50 bar erreicht, wird der Test unabhängig von der Prüfdauer abgebrochen. Die Leitung kann als dicht eingestuft werden.

Ein Abbruch der Prüfung durch einen Druckanstieg von über 0,50 bar ist bei Leitungen mit geringen Luftanteilen zu erwarten. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Leitung absolut dicht ist. Es ist möglich, dass eine Leckage kleiner der maximal zulässigen Leckage auch in diesem Fall vorhanden ist.

Es ist zu berücksichtigen, dass der 20-Min Test keine Quantifizierung vorhandener Undichtigkeiten zulässt. Es kann lediglich eine Aussage darüber getroffen werden, ob der auftretende Wasserverlust durch vorhandene Leckagen unter Berücksichtigung der Sicherheit nach Kap. 8.2 die zulässige Leckage überschreitet. Auch bei Leitungen bei denen das Abbruchkriterium zu tragen kam, ist nicht auszuschließen, dass Leckagen kleiner der zulässigen Leckage trotzdem vorhanden sind.



5 Entwicklung des Simulationstools für die Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens sowie den 20-Min Test

Die Prüfungen an Beispielleitungen mit großen Durchmessern haben gezeigt, dass auch bei Luftanteilen unter 2 % Leckagen teilweise nicht sicher erkannt werden können. Im vorhergehenden Kapitel 4 wurden die Ursachen hierzu hergeleitet und nachfolgend beispielhaft veranschaulicht. Da die Gleichung für den Druckabfall infolge Leckage (26) nicht direkt nach Δp aufgelöst werden kann, wurde eine Simulation für die Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens erstellt. Um im Rahmen des Forschungsprojekts die Ergebnisse des 20-Min Tests überprüfen zu können, wurde für diese Prüfung ebenfalls eine analoge Simulation erstellt.

Diese Excel-basierte Simulation ist Grundlage für das Exceltool, welches den Anwendern des Prüfverfahrens nach dem HSA-Normalverfahren bzw. 20-Min Test zur Verfügung gestellt wird. Dieses Exceltool speziell für die Durchführung von Druckprüfungen durch Endanwender ist auch für Laien einfach anwendbar.

Das im Folgenden vorgestellte Simulationstool diente im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Erarbeitung von Grenzwerten, Druckverläufen und der Verifizierung der Prüfergebnisse und ist daher umfangreicher und optisch auf den Bedarf des Forschungsprojekts reduziert.

Es wurde deutlich, dass die leitungsabhängigen Parameter einen negativen Einfluss auf die Druckprüfung haben können. Insbesondere der hydrostatische Druck sowie der E-Modul des Leitungsmaterials können eine große Rolle spielen. Die Parameter sind jedoch stark leitungsabhängig und können in beliebigen Kombinationen auftreten, die in der Praxis nicht alle experimentell untersucht werden können.

Daher wurde das Excel-basierte Simulationstool entwickelt, welches den Druckverlauf in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens sowie des 20-Min Tests rechnerisch abbilden kann. Hierzu wurde versucht, alle bekannten Einflüsse auf die Prüfung einzeln zu berechnen und anschließend zusammenzuführen. Durch die Einzelerfassung der Einflussgrößen können alle möglichen Beispielleitungen mit den jeweiligen leistungsspezifischen Parametern berechnet werden. Des Weiteren ist die Ermittlung und Berechnung von Extremfällen möglich. Somit konnte die Anwendbarkeit der Prüfverfahren überprüft werden.

Ziel des Simulationstools ist zum einen die Erklärung bzw. Nachbildung bereits durchgeführter Druckprüfungen an den Beispielleitungen. Zum anderen kann die Berechnung der leitungsspezifischen maximal zulässigen Luftanteile durchgeführt werden, was für die sichere Erkennung von Leckagen notwendig ist.



Des Weiteren kann das Simulationstool vorbereitend bei zukünftigen Prüfungen an Beispielleitungen eingesetzt und somit schneller die relevanten Ergebnisse experimentell ermittelt werden.

Im Simulationstool berücksichtigte variable Einflussfaktoren sind:

- Leitungslänge
- Prüfdruck
- Hydrostatischer Druck
- Leitungsmaterial
- Leitungsinwenddurchmesser
- Leitungswandstärke
- Luftanteil
- Leckagegröße

Zunächst wurde eine Verifizierung der Simulation durch den Vergleich der theoretischen Ergebnisse des Simulationstools mit den Prüfergebnissen der Prüfungen an realen Druckleitungen durchgeführt. Im Anschluss wurden Simulationen der Hauptprüfung unter Worstcase-Umständen durchgeführt, mit dem Ziel die theoretische Verlässlichkeit des Prüfverfahrens unter ungünstigsten Bedingungen zu analysieren.

Für die Berechnung wird vorausgesetzt, dass zu Beginn der Hauptprüfung die Effekte der Materialdehnung – welche durch den aufgebrachten Prüfdruck sowie durch die vorgeschaltete Vorprüfung hervorgerufen wurden – vollständig abgeklungen sind. Diese finden in der Simulation der Hauptprüfung somit keinen Einfluss. Des Weiteren sind der Prüfdruck und die zu diesem Druck zulässige Leckage zum Start der Hauptprüfung bekannt. Diese berechnet sich wie in Kap. 4.1.4 beschrieben. Durch Austritt von Wasser aus der Leckage sinkt der Druck in der Leitung. Des Weiteren konnte an realen Leitungen beobachtet werden, dass durch den Druckabfall auch das minütliche Leckagevolumen kontinuierlich abnimmt. Ein Verringern des Leckagevolumens lässt wiederum den Druckabfall in der Hauptprüfung sinken. Dieser Einfluss wurde in der Simulation ebenfalls berücksichtigt.



5.1 Simulation des Leckagevolumens

Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen Druck und dem aus der Leckage austretendem Wasservolumen sind in der Literatur nach unserem Kenntnisstand nicht beschrieben. Deshalb wurde an der Testleitung der Hochschule Augsburg die Druckabhängigkeit der Leckage untersucht. Diese Abhängigkeit wurde dann in der Simulation der Hauptprüfung berücksichtigt.

Die künstliche Leckage wird bei Prüfdruck eingestellt und für den Zeitraum der Prüfung nicht verstellt oder angepasst. Dies entspricht dem Verhalten einer möglichen Undichtigkeit in einer Abwasserdruckleitung. Das austretende Wasservolumen verringert sich mit abnehmendem Druck, somit wirkt sich die Leckage bei geringeren Drücken weniger aus. Dies bedeutet, dass eine tatsächlich vorhandene Leckage mit denselben Eigenschaften der künstlichen Leckage, die bei einem Prüfdruck von 3,0 bar durch ein Prüfverfahren erkannt werden kann, unter tatsächlichen Betriebsbedingungen bei niedrigerem Betriebsdruck geringer ausfällt. Das Prüfverfahren weist hier eine zusätzliche Sicherheit auf, die umso größer ist, je geringer der Betriebsdruck gegenüber dem Prüfdruck ist.

Die Druckabhängigkeit der Leckage führt auch dazu, dass das durch die (künstliche) Leckage austretende Wasservolumen in der Hauptprüfung mit fallendem Druck ebenfalls abnimmt und damit einen Druckabfall abmindert.

Um den Zusammenhang zwischen Leckagegröße bzw. austretendem Wasservolumen und dem Prüfdruck zu erforschen, wurden an der Testleitung an der Hochschule diverse Tests durchgeführt. Hierfür wurde die Testleitung über den Druckbaum an das Trinkwassernetz mit zwischengeschaltetem Druckminderer angeschlossen. Dadurch konnte der benötigte Druck innerhalb der Testleitung über das Trinkwassernetz aufgebaut und mit Hilfe des Druckminderers konstant gehalten werden. Sowohl Druckminderer als auch die Leckageeinheit wurden an den Druckbaum angeschlossen. Dies wirkt sich positiv auf die Konstanthaltung des Drucks aus. Durch den Druckminderer und den dadurch konstanten Druck im System werden die Einflüsse möglicher Materialveränderungen der PE-Leitung auf die Untersuchungen ausgeschlossen (siehe Abbildung 27). Des Weiteren wurde eine Versuchsreihe mit Hilfe einer vorgeschalteten Handpumpe und Drücken bis zu 7,50 bar durchgeführt.



Abbildung 27 Versuchsaufbau für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Differenzdruck und Leckagevolumen

Somit entsteht ein konstanter Differenzdruck, der gleich der Differenz des Drucks innerhalb und außerhalb der Testleitung ist und somit dem relativen Druck in der Leitung entspricht. Der Differenzdruck wird mit dem digitalen Drucklogger gemessen. Die Leckage wurde bei definiertem Druck auf eine beliebige Leckagegröße eingestellt und das Leckagevolumen innerhalb einer Minute gemessen. Durch die konstante Aufrechterhaltung des Drucks innerhalb der Testleitung wegen des Druckminderers bleibt das Leckagevolumen ebenfalls konstant. In einer Testreihe wurde der Druck innerhalb der Testleitung zwischen 0 bar und 7,50 bar variiert und das minütlich aus der Leckage austretende Volumen gemessen. Für jede Testreihe wurde der Druck variiert, die Größe der Leckage jedoch während der Testreihe nicht verstellt.

Aus den Prüfungen an realen Abwasserdruckleitungen geht die Vermutung hervor, dass mit abnehmendem Differenzdruck das Leckagevolumen ebenfalls sinkt.



Um einen ungewollten Einfluss des bisher verwendeten Nadelventils (sog. alte Leckage) in der Leckageeinheit auszuschließen, wurden die Versuche mit einem weiteren Ventil (Dosierventil) wiederholt (siehe Kapitel 3.3.4).

Um sicherzustellen, dass das Leckagevolumen sich nicht über die Zeit der Überprüfung durch ein Verstellen des Nadelventils verändert, wurde bei zwei Prüfungen nach der Prüfung erneut der Ausgangsdruck eingestellt und das Leckagevolumen mit dem zu Beginn der Prüfung eingestellten Leckagevolumen abgeglichen. Beide oben genannten möglichen Abweichungen (Ventilausführung sowie Verstellen des Nadelventils) traten nicht ein. Die Ergebnisse der Überprüfung beider Leckageventile sind in Abbildung 28 dargestellt. Die unterschiedlichen manuell eingestellten Leckagegrößen bei unterschiedlichen Druckverhältnissen sind farblich dargestellt.

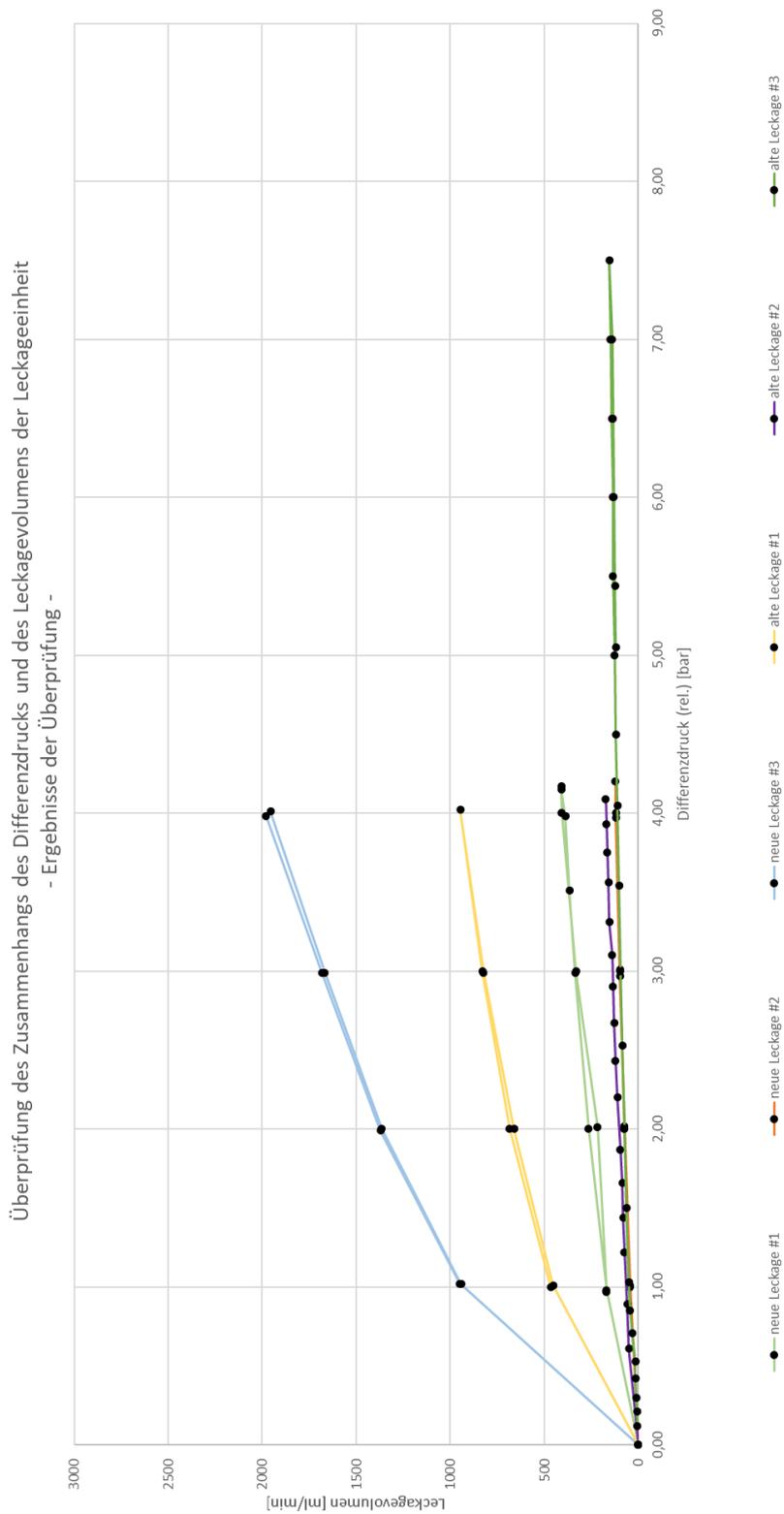


Abbildung 28: Ergebnisse der experimentellen Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Differenzdruck und austretendem Leckagevolumen



Aus Abbildung 28 geht hervor, dass zwischen Differenzdruck bzw. relativem Druck in der Leitung und Leckagevolumen ein quadratischer Zusammenhang besteht. Im Vorgängerprojekt wurde ein linearer Zusammenhang vermutet. Um die Berechnung der Leckage im Rahmen der Simulation zu ermöglichen, musste hierfür eine Formel gefunden werden.

Mathematisch kann der quadratische Zusammenhang zwischen Differenzdruck bzw. relativem Druck in der Leitung (p) und dem minütlich aus der Leckage austretenden Wasservolumen mit folgender Formel beschrieben werden:

$$\frac{\Delta V}{\sqrt{p}} = a \quad (40)$$

ΔV	=	Minütliches Leckagevolumen	[ml/min]
p	=	Differenzdruck der Leckage bzw. relativer Druck in der Leitung	[bar]
a	=	Einheitenloser konstanter Faktor der Leckage	[-]

Für jede Testreihe – entsprechend einer bestimmten Leckagegröße – kann der einheitenlose konstante Faktor a der Leckagegröße berechnet werden.

Für jede eingestellte Leckagegröße gilt somit:

$$\frac{\Delta V}{\sqrt{p}} = \textit{konstant}$$

Mittels dieses Faktors und der umgestellten Formel kann das für die jeweils eingestellte Leckage druckabhängige Leckagevolumen ermittelt und graphisch aufgetragen werden.

$$\Delta V = a * \sqrt{p} \quad (41)$$

a	=	Einheitenloser konstanter Faktor der Leckage	[-]
p	=	Differenzdruck der Leckage bzw. relativer Druck in der Leitung	[bar]
V	=	Minütliches Leckagevolumen bei Differenzdruck	[ml/min]

Die nach Formel (41) berechneten druckabhängigen Leckagevolumina sind in Abbildung 29 graphisch aufgetragen. Es wird deutlich, dass die gemessenen und die berechneten Ergebnisse gut zueinander passen. Daher wurde die ermittelte Formel zur Berechnung des druckabhängigen Leckagevolumens für das Simulationstool verwendet.

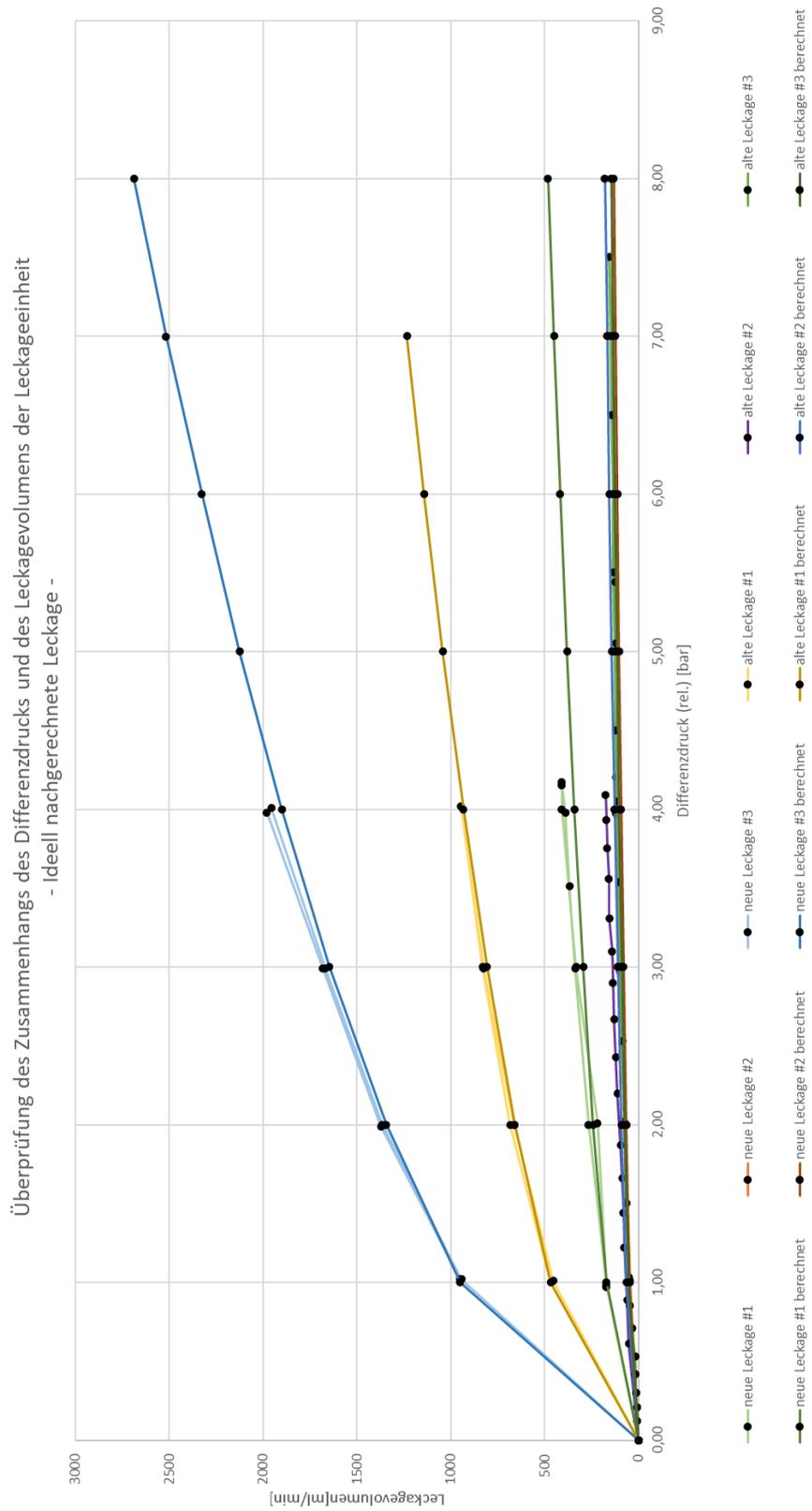


Abbildung 29: Vergleich der Ergebnisse der experimentellen Ermittlung mit den berechneten Ergebnissen



Aus der Abbildung geht des Weiteren hervor, dass das aus der Leckage austretende Volumen bei Drücken über 3 bar annähernd linear verläuft. Ein Prüfen mit Drücken unter 3 bar führt bei Wasseraustritt und somit einer Druckabsenkung zu einer exponentiellen Verkleinerung des minütlich austretenden Leckagevolumens. Somit verringert sich der Druckabfall aufgrund einer Leckage bei abnehmendem Leitungsdruck durch die extreme Verkleinerung des Leckagevolumens über die Prüfzeit. Eine Leckage kann demnach leichter übersehen werden.

5.2 Aufbau der Simulation

Mit dem Programm Excel wird unter Berücksichtigung aller Eingangsparameter der Druckverlauf in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens bzw. des 20-Min Tests minutengenau berechnet. Eine Berechnung in einem kleineren Zeitintervall liefert keine genaueren Ergebnisse. Die Ergebnisse der Simulation können mit den Ergebnissen bisheriger Prüfungen an realen Abwasserdruckleitungen verglichen werden. Zudem ist es möglich, für kommende Prüfungen Vorhersagen zu treffen und diese zu überprüfen. Eine Überprüfung des Druckverlaufs mittels Simulation ist nur für durchgeführte Prüfungen mit künstlichen Leckagen möglich, da bei diesen die austretende Wassermenge bekannt ist. Prüfungen ohne künstliche Leckage haben in der Simulation und idealerweise auch in der Praxis durch die Vorwegnahme der Randeffekte durch Rohrdehnung und Saugen der Rohrauskleidung durch die Vorprüfung keinen Druckabfall. Die Berechnung des leitungsindividuellen Grenzwerts des HSA-Normalverfahrens ist, wie in Kap. 4.1.8 beschrieben, mathematisch nicht lösbar. Mit Hilfe der Simulation ist eine Näherung und somit Lösung möglich.



5.2.1 HSA-Normalverfahren

Im Folgenden wird der Aufbau der Simulation für das HSA-Normalverfahren beschrieben.

- **Eingabewerte**

In der Eingabe werden alle für die Hauptprüfung wichtigen Parameter eingegeben. Diese sind gelb hinterlegt. In Tabelle 11 sind alle Eingabewerte und deren Beschreibung aufgeführt. In Tabelle 12 ist beispielhaft die Eingabemaske des Simulationstools dargestellt. In der Eingabe können – bei Bedarf - bis zu fünf unterschiedliche Leitungsabschnitte eingegeben werden, wenn diese nur gemeinsam geprüft werden können. Eine Begrenzung der maximalen Prüflänge ist aus technischer Sicht für sehr lange Druckleitungen erforderlich (siehe Kap. 9). Diese Fälle wurden in der Simulation zunächst nicht berücksichtigt.

Tabelle 11: Eingabeparameter der Oberfläche der Simulation des HSA-Normalverfahrens

Parameter	Beschreibung
Δh	Höhendifferenz der Rohrleitung zur Berechnung des hydrostatischen Drucks zwischen Prüfort und maximaler Erhebung der Druckleitung
Prüfdruck (am Prüfort)	Prüfdruck am Prüfort (Relativdruck)
Rohraußendurchmesser	Außendurchmesser der Rohrleitung
Wandstärke	Dicke der Wandung der Rohrleitung
Rohrlänge	Länge der Prüfstrecke
Luftanteil (entspannt)	Prozentualer Luftanteil am Gesamttinnenvolumen der Rohrleitung zur Berechnung des Luftvolumens [I] Dieser wird über die Druckabfallprüfung bzw. den anschließenden Aufpumpvorgang berechnet.
Material	Dropdownliste der Rohrleitungsmaterialien
Wasserkompressionsmodul	Kompressionsmodul des Wassers = 2.027 N/mm ²
Kriterium für Nichtbestehen einer Druckprüfung	Grenzwert für das Nichtbestehen der Druckprüfung, auf 0,21 bar festgelegt



Tabelle 12: Eingabemaske der Simulation des HSA-Normalverfahrens (gelbe Felder kennzeichnen Eingabefelder)

Eingabe

Eingabewerte für die Simulation der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens		
	Wert	Einheit
Δh (maximale Höhe der Luft über Prüfort)	5,00	m
p_{hyd}	0,50	bar (rel.)
Atmosphärendruck	1013	mbar
Atmosphärendruck	1,013	bar (rel.)
Prüfdruck (am Prüfort)	3,00	bar (rel.)
Material X	Rohraußendurchmesser	90 mm
	Wandstärke (ggf. ohne ZM-Auskleidung)	8,2 mm
	Rohrinnendurchmesser (ggf. ohne Berücksichtigung ZM-Auskleidung)	73,6 mm
	SDR	11,0 -
	Rohrlänge	2000,00 m
	Rohrinnenvolumen (ggf. mit Berücksichtigung ZM-Auskleidung)	8,51 m ³
	Wandfläche (ggf. ohne Berücksichtigung ZM-Auskleidung)	462,44 m ²
	Leckagegröße	0,10 -
	Leckagevolumen	231,22 ml/min
	Material	PE100 -
Emodul Material	1200 N/mm ²	
Gesamtleckage	231,22 ml/min	
Gesamtrohrvolumen	8,51 m ³	
Luftanteil (0%-100%), ohne zusätzlichen Druck	2,000 %	
Luftvolumen (entspannt)	170,18 l	
Luftvolumen (unter Prüfdruck am Hochpunkt)	49,07 l	
Wasserkompressionsmodul	2027 N/mm ²	
Kriterium für Durchfall einer Druckprüfung:	0,21 bar	
Maximal Zulässiger Luftanteil [%]	8,02 %	

*SDR:

Standard Dimension Ratio (Verhältnis zwischen Außendurchmesser und Wandstärke

*ZM:

Zementmörtel



- **Berechnung**

Die Berechnung des Druckabfalls der Hauptprüfung errechnet für jede Minute der Prüfung einen Druck. Bei der Simulation wird zwischen relativen und absoluten Drücken unterschieden, da die Prüfgeräte einen Relativdruck zwischen Umgebung und Innendruck der Rohrleitung am Tiefpunkt angeben, wohingegen das Gesetz von Boyle-Mariotte (siehe Kapitel 2.2) mit Absolutdrücken arbeitet. Der Absolutdruck errechnet sich aus dem Relativdruck addiert zu dem Umgebungsdruck (=Atmosphärendruck), welcher zur Vereinfachung standardmäßig mit 1,013 bar angenommen wird. Eine Anpassung des Atmosphärendrucks ist im Simulationstool möglich.

Es wird der sich minütlich ändernde Prüfdruck durch den jeweiligen Druckabfall neu berechnet. Die Oberfläche der Berechnung des Simulationstools ist in Tabelle 13 abgebildet.

Minütlich tritt aus der Rohrleitung das Volumen der Leckage aus. Dadurch vergrößert sich das Luftvolumen entsprechend. Hierbei werden jedoch auch die Anteile der Veränderung der Einflussgrößen Material und Wasser ebenfalls berücksichtigt. Das Volumen, um das sich das Luftvolumen vergrößert, ist daher ein druckabhängiger Anteil des ausgetretenen Leckagevolumens. Die Berechnung wird im Folgenden beschrieben.



Tabelle 13: Berechnung des minütlichen Druckabfalls im HSA-Normalverfahren

Berechnung des minütlichen Druckabfalls

Faktor a der Leckage= 133,50

Zeit [min] (Beginn der z Min)	Druck am Prüfort (rel.)	Druck am Prüfort (abs.)	Luftvolumen bei PD am Hochpunkt [l]	Luftanteil am Hochpunkt unter PN 1:1	Leckage [ml/min] (eingestellt bei PD)
0	3,00	4,01	49,07	0,58	231,22
1	2,99	4,00	49,23	0,58	230,79
2	2,98	3,99	49,38	0,58	230,37
3	2,97	3,98	49,54	0,58	229,94
4	2,96	3,97	49,70	0,58	229,52
5	2,95	3,96	49,85	0,59	229,10
6	2,93	3,95	50,01	0,59	228,68
7	2,92	3,94	50,16	0,59	228,26
8	2,91	3,93	50,32	0,59	227,84
9	2,90	3,92	50,48	0,59	227,43
10	2,89	3,90	50,63	0,60	227,01
11	2,88	3,89	50,79	0,60	226,60
12	2,87	3,88	50,94	0,60	226,19
13	2,86	3,87	51,10	0,60	225,79
14	2,85	3,86	51,26	0,60	225,38
15	2,84	3,85	51,41	0,60	224,98
16	2,83	3,84	51,57	0,61	224,57
17	2,82	3,83	51,72	0,61	224,17
18	2,81	3,82	51,88	0,61	223,77
19	2,80	3,81	52,04	0,61	223,38
20	2,79	3,80	52,19	0,61	222,98
21	2,78	3,79	52,35	0,62	222,59
22	2,77	3,78	52,50	0,62	222,19
23	2,76	3,77	52,66	0,62	221,80
24	2,75	3,76	52,82	0,62	221,42
25	2,74	3,75	52,97	0,62	221,03
26	2,73	3,74	53,13	0,62	220,64
27	2,72	3,74	53,29	0,63	220,26
28	2,71	3,73	53,44	0,63	219,87
29	2,70	3,72	53,60	0,63	219,49
30	2,69	3,71	53,75	0,63	219,11
31	2,68	3,70	53,91	0,63	218,74
32	2,68	3,69	54,07	0,64	218,36
33	2,67	3,68	54,22	0,64	217,98
34	2,66	3,67	54,38	0,64	217,61
35	2,65	3,66	54,53	0,64	217,24
36	2,64	3,65	54,69	0,64	216,87
37	2,63	3,64	54,85	0,64	216,50
38	2,62	3,63	55,00	0,65	216,13
39	2,61	3,63	55,16	0,65	215,77
40	2,60	3,62	55,31	0,65	215,40
41	2,59	3,61	55,47	0,65	215,04
42	2,59	3,60	55,63	0,65	214,68
43	2,58	3,59	55,78	0,66	214,32
44	2,57	3,58	55,94	0,66	213,96
45	2,56	3,57	56,09	0,66	213,60
46	2,55	3,56	56,25	0,66	213,25
47	2,54	3,56	56,41	0,66	212,89
48	2,53	3,55	56,56	0,66	212,54
49	2,53	3,54	56,72	0,67	212,19
50	2,52	3,53	56,87	0,67	211,84
51	2,51	3,52	57,03	0,67	211,49
52	2,50	3,51	57,18	0,67	211,14
53	2,49	3,51	57,34	0,67	210,80
54	2,49	3,50	57,50	0,68	210,45
55	2,48	3,49	57,65	0,68	210,11
56	2,47	3,48	57,81	0,68	209,77
57	2,46	3,47	57,96	0,68	209,43
58	2,45	3,47	58,12	0,68	209,09
59	2,45	3,46	58,27	0,68	208,75
60	2,44	3,45	58,43	0,69	208,42



Bei Minute Null liegt am Prüfort der Prüfdruck vor. Über den Prüfdruck und das zulässige minütliche Leckagevolumen – durch eine 1/10 Leckage oder angepasste Leckage verursacht – wird der leckagespezifische Faktor a nach Formel (40) berechnet.

Zunächst wird die prozentuale Verteilung zwischen den drei Anteilen Material, Wasser und Luft berechnet. Hierfür wird für den Prüfdruck (später für den jeweiligen aktuellen Leitungsdruck) und einen minimalen Druckabfall von 0,01 bar die jeweilige Volumenänderung für die Anteile aus Material, Wasser und Luft getrennt errechnet. Die Excel-Oberfläche der Berechnung ist in Tabelle 13 zu sehen. Dies erfolgt über die in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Formeln 19, 20 und 21.

Der berechnete prozentuale Anteil für Luft wird anschließend mit dem aktuellen Leckagevolumen multipliziert und dem Luftvolumen am Hochpunkt zugeschlagen. Über das Gesetz von Boyle-Mariotte kann, unter Annahme der Luft am absoluten Hochpunkt der Leitung, anschließend aus dem neu berechneten Luftvolumen der sich jeweils neu einstellende Druck am Prüfort zurückgerechnet werden. Dieser bildet den Startdruck für die Berechnung der nächsten Minute. Diese minütliche Berechnung erfolgt entsprechend für die gesamte Dauer der Hauptprüfung von 60 min.

Das Leckagevolumen der 1. Minute entspricht der 1/10 Leckage bzw. der angepassten Leckage. Für alle weiteren Minuten wird das austretende Leckagevolumen durch den neu berechneten Druck am Tiefpunkt und dem vorab berechneten Faktor a der Leckage berechnet (siehe Formel (42)). Der Faktor a bleibt über die komplette Simulationsdauer konstant, da dieser nur von der Leckagegröße bei Prüfbeginn (siehe Formel (40)) abhängt.

$$\Delta V = a * \sqrt{p} \quad (42)$$

ΔV	=	Aktuelle Leckage	[ml/min]
a	=	Faktor der Leckage	[-]
p	=	Aktueller Differenzdruck	[bar]

Die Berechnung des Luftvolumens in Abhängigkeit des eingegebenen prozentualen Luftanteils, welches durch den Prüfdruck abzüglich des hydrostatischen Druck am Hochpunkt der Rohrleitung komprimiert vorliegt, erfolgt nach Formel (43). Dies ist durch die unterschiedlichen hydrostatischen Drücke stark leitungsabhängig.



$$V_{\text{Luft am HP unter PD-phyd}} = \frac{x\% * V_R * p_{\text{Atm.}}}{PD - p_{\text{hyd}} + p_{\text{Atm.}}} \quad (43)$$

$V_{\text{Luft am HP unter PD-phyd}}$	=	Komprimiertes Luftvolumen am Hochpunkt	[m ³]
$x\%$	=	Prozentualer Luftanteil	[%]
V_R	=	Rohrinnenvolumen	[m ³]
$p_{\text{Atm.}}$	=	Atmosphärischer Umgebungsdruck	[bar]
PD	=	Relativer Prüfdruck	[bar]
p_{hyd}	=	Hydrostatischer Druck am Tiefpunkt	[bar]

Das für die jeweilige Minute anfallende Leckagevolumen infolge Luftkompression bzw. –ausdehnung aus Tabelle 14 wird dem komprimierten Luftvolumen aus Tabelle 13 aufgeschlagen. Über das Gesetz von Boyle-Mariotte kann nun durch das vergrößerte Luftvolumen der Druck zum Zeitpunkt nach einer Minute berechnet werden. Die Formel hierfür lautet:

$$p_{\text{aktuell}} = \frac{p_{\text{vor}} * V_{\text{vor}}}{V_{\text{aktuell}}} \quad (44)$$

p_{aktuell}	=	Druck zum aktuellen Zeitpunkt [bar] (absolut)	[bar]
p_{vor}	=	Atmosphärendruck (1 bar)	[bar]
V_{vor}	=	Luftvolumen entspannt in Rohrleitung	[l]
V_{aktuell}	=	Luftvolumen in der aktuellen Minute	[l]

Die Berechnung des Drucks kann so für jede Minute fortgesetzt werden. Es ist zu beachten, dass sich durch den sinkenden Druck das Wasservolumen verringert, welches minütlich aus der Leckage austritt. Diese Eigenschaft wird durch die Formel aus Kapitel 5.1 berücksichtigt. Die Berechnung in der Simulation hierzu ist in Tabelle 14 dargestellt.



Tabelle 14: Berechnung der prozentualen Verteilung des Leckagevolumens aufgrund von Materialdehnung, Wasserkompression und Luftkompression

Berechnung

Berechnung des Anteils der Rohrdehnung, Wasserkompression bzw. Luftkompression an der Leckagemenge

Rohrdehnung [ml]	Anteil der Rohrdehnung an der Ablassmenge [%]	Minütliche Leckagemenge infolge Rohrdehnung [ml]	Prozentuelle Verteilung			Luftkompression [ml]	Anteil der Luftkompression an der Ablassmenge [%]	Minütliche Leckagemenge infolge Luftkompression [ml]
			Wasserkompression [ml]	Anteil der Wasserkompression an der Ablassmenge [%]	Minütliche Leckagemenge infolge Wasserkompression [ml]			
63,64	30,61	70,77	4,20	2,02	4,67	140,09	67,37	155,78
63,64	30,48	70,34	4,20	2,01	4,64	140,38	67,51	155,81
63,64	30,35	69,91	4,20	2,00	4,61	141,67	67,65	155,84
63,64	30,22	69,48	4,20	1,99	4,58	142,77	67,79	155,87
63,64	30,09	69,06	4,20	1,98	4,56	143,67	67,93	155,90
63,64	29,96	68,64	4,20	1,98	4,53	144,58	68,06	155,93
63,64	29,83	68,22	4,20	1,97	4,50	145,48	68,20	155,95
63,64	29,71	67,81	4,20	1,96	4,47	146,39	68,33	155,98
63,64	29,58	67,40	4,20	1,95	4,45	147,31	68,47	156,00
63,64	29,46	66,99	4,20	1,94	4,42	148,22	68,60	156,02
63,64	29,33	66,59	4,20	1,93	4,39	149,14	68,73	156,04
63,64	29,21	66,18	4,20	1,93	4,37	150,06	68,87	156,05
63,64	29,08	65,79	4,20	1,92	4,34	150,99	69,00	156,07
63,64	28,96	65,39	4,20	1,91	4,31	151,92	69,13	156,08
63,64	28,84	65,00	4,20	1,90	4,29	152,85	69,26	156,10
63,64	28,72	64,61	4,20	1,89	4,26	153,78	69,39	156,11
63,64	28,60	64,22	4,20	1,89	4,24	154,72	69,52	156,12
63,64	28,48	63,84	4,20	1,88	4,21	155,66	69,65	156,13
63,64	28,36	63,45	4,20	1,87	4,19	156,60	69,77	156,13
63,64	28,24	63,08	4,20	1,86	4,16	157,55	69,90	156,14
63,64	28,12	62,70	4,20	1,85	4,14	158,50	70,03	156,15
63,64	28,00	62,33	4,20	1,85	4,11	159,45	70,15	156,15
63,64	27,88	61,96	4,20	1,84	4,09	160,40	70,28	156,15
63,64	27,77	61,59	4,20	1,83	4,06	161,36	70,40	156,15
63,64	27,65	61,23	4,20	1,82	4,04	162,32	70,52	156,15
63,64	27,54	60,86	4,20	1,82	4,01	163,28	70,65	156,15
63,64	27,42	60,51	4,20	1,81	3,99	164,25	70,77	156,15
63,64	27,31	60,15	4,20	1,80	3,97	165,21	70,89	156,14
63,64	27,20	59,80	4,20	1,79	3,94	166,19	71,01	156,14
63,64	27,08	59,44	4,20	1,79	3,92	167,16	71,13	156,13
63,64	26,97	59,10	4,20	1,78	3,90	168,14	71,25	156,12
63,64	26,86	58,75	4,20	1,77	3,87	169,12	71,37	156,11
63,64	26,75	58,41	4,20	1,76	3,85	170,10	71,49	156,10
63,64	26,64	58,07	4,20	1,76	3,83	171,08	71,61	156,09
63,64	26,53	57,73	4,20	1,75	3,81	172,07	71,72	156,08
63,64	26,42	57,39	4,20	1,74	3,79	173,06	71,84	156,06
63,64	26,31	57,06	4,20	1,74	3,76	174,06	71,95	156,05
63,64	26,20	56,73	4,20	1,73	3,74	175,05	72,07	156,03
63,64	26,10	56,40	4,20	1,72	3,72	176,05	72,18	156,01
63,64	25,99	56,07	4,20	1,71	3,70	177,05	72,30	155,99
63,64	25,88	55,75	4,20	1,71	3,68	178,06	72,41	155,97
63,64	25,78	55,43	4,20	1,70	3,66	179,06	72,52	155,95
63,64	25,67	55,11	4,20	1,69	3,64	180,07	72,64	155,93
63,64	25,57	54,80	4,20	1,69	3,61	181,09	72,75	155,91
63,64	25,46	54,48	4,20	1,68	3,59	182,10	72,86	155,89
63,64	25,36	54,17	4,20	1,67	3,57	183,12	72,97	155,88
63,64	25,26	53,86	4,20	1,67	3,55	184,14	73,08	155,83
63,64	25,16	53,55	4,20	1,66	3,53	185,16	73,19	155,81
63,64	25,05	53,25	4,20	1,65	3,51	186,19	73,29	155,78
63,64	24,95	52,95	4,20	1,65	3,49	187,22	73,40	155,75
63,64	24,85	52,65	4,20	1,64	3,47	188,25	73,51	155,72
63,64	24,75	52,35	4,20	1,63	3,45	189,28	73,62	155,69
63,64	24,65	52,05	4,20	1,63	3,43	190,32	73,72	155,66
63,64	24,55	51,76	4,20	1,62	3,41	191,36	73,83	155,63
63,64	24,46	51,47	4,20	1,61	3,39	192,40	73,93	155,59
63,64	24,36	51,18	4,20	1,61	3,38	193,45	74,04	155,56
63,64	24,26	50,89	4,20	1,60	3,36	194,49	74,14	155,52
63,64	24,16	50,61	4,20	1,59	3,34	195,54	74,24	155,49
63,64	24,07	50,32	4,20	1,59	3,32	196,60	74,34	155,45
63,64	23,97	50,04	4,20	1,58	3,30	197,65	74,45	155,41
63,64	23,88	49,76	4,20	1,57	3,28	198,71	74,55	155,37

Für die Berechnungen wurde die Leckage am Prüfort angenommen. Da dies meist der Tiefpunkt ist, herrscht dort der größte Druck (hydrostatische Druck), es handelt sich demnach um den schlechtesten Fall (siehe Abbildung 29). Bei den Prüfungen an den Beispielleitungen war dies i.d.R. der Fall. Für die Berechnung wird der Wasseraustritt entsprechend der maximal zulässigen Leckage angesetzt.

Sollte eine Leckage tatsächlich an einem anderen Ort in der Leitung auftreten, ist hier der Druck um den Unterschied des hydrostatischen Drucks entsprechend niedriger. Bei identischer Leckagegröße würde aus der weiter oben gelegenen Leckage entsprechend weniger Wasser austreten. Tritt aus einer höher liegenden Leckage tatsächlich ein gleich großes oder größeres Wasservolumen als das der maximal zulässigen Leckage aus, ist das äquivalente Loch dieser Leckage entsprechend größer. Das Volumen, welches aus der Leckage austritt – unabhängig von Größe und Lage der Leckage – geht in die Berechnung des Luftanteils ein.



Aus diesem wird wiederum der Druckabfall in der Leitung berechnet. Daher ist für die Berechnung die Lage der Leckage in der Rohrleitung irrelevant.

Es ist zu berücksichtigen, dass aus einer realen Leckage – unabhängig von der Lage der Leckage – bei einer Prüfung mehr Wasser austritt als dies im regulären Betrieb der Fall wäre, da der Prüfdruck an jedem Punkt der Leitung mindestens dem Betriebsdruck entspricht, i.d.R. über dem Betriebsdruck liegt.

In der Berechnung wird die Druckdifferenz der Leckage (innen bzw. außen) mit dem relativen Druck in der Leitung angesetzt. Dies bedeutet, dass außerhalb des Rohres nur der atmosphärische Druck angesetzt wird. Für die künstliche Leckage ist dies zutreffend. Bei erdverlegten Leitungen könnte hier ein größerer Außen- druck auftreten (z.B. durch Grundwasser, Porenwasser oder Erddruck). Dies würde jedoch zu einer Verringerung der Druckdifferenz und damit der Leckage führen.

- **Ausgabe**

Als Ergebnis der Berechnung bzw. der Simulation wird der berechnete Druckabfall bzw. der Differenzdruck in der Hauptprüfung ausgegeben. Dieser wird automatisch bei Erkennen einer Leckage bzw. Differenzdrücken über 0,21 bar grün hinterlegt. Bei Unterschreiten des Grenzwerts wird durch eine rote Hinterlegung das fälschliche Übersehen der Leckage gekennzeichnet.

Zusätzlich zu dem Druck wird das durch die Einflüsse aus Rohrdehnung, Wasser- und Luftkompression hervorgerufene Wasseraustrittsvolumen angezeigt. Die Summe dieser Wasservolumina ergibt das Volumen, welches in der Hauptprüfung durch die künstliche Leckage aus der Rohrleitung austritt. Diese kann mit der in der Praxis aus der Rohrleitung ausgetretenen Wassermenge verglichen werden. Somit sind Rückschlüsse auf ein mögliches Zusetzen der Leckage und damit verbundenen kleineren realen Druckabfällen möglich.

Tabelle 15: Ausgabeoberfläche der Simulation des HSA-Normalverfahrens

Ausgabe

Startdruck am TP (rel.)	3,00	bar
Enddruck (rel.)	2,44	bar
Luftanteil (entspannt) Kontrolle	2,033	%
Druckdifferenz in Hauptprüfung	0,56256	bar
Leckagevolumen durch Luftkompression	9511,91	ml
Anteil Luftkompression an Gesamtleckagevolumen	71,09	%
Leckagevolumen durch Rohrdehnung	3629,46	ml
Anteil Rohrdehnung an Gesamtleckagevolumen	27,12	%
Leckagevolumen durch Wasserkompression	239,39	ml
Anteil Wasserkompression an Gesamtleckagevolumen	1,79	%
Summe Leckagevolumen	13380,76	ml

Durch die Auftrennung des aus der Leckage austretenden Wasservolumens ist die Darstellung der prozentualen Verteilung der Ursache des Wasseraustritts nach den Anteilen aus Rohrdehnung, Wasser- und Luftkompression möglich (vgl. Tab. Tabelle 15).

Dies wird in der Ausgabeoberfläche in folgendem beispielhaften Diagramm dargestellt:

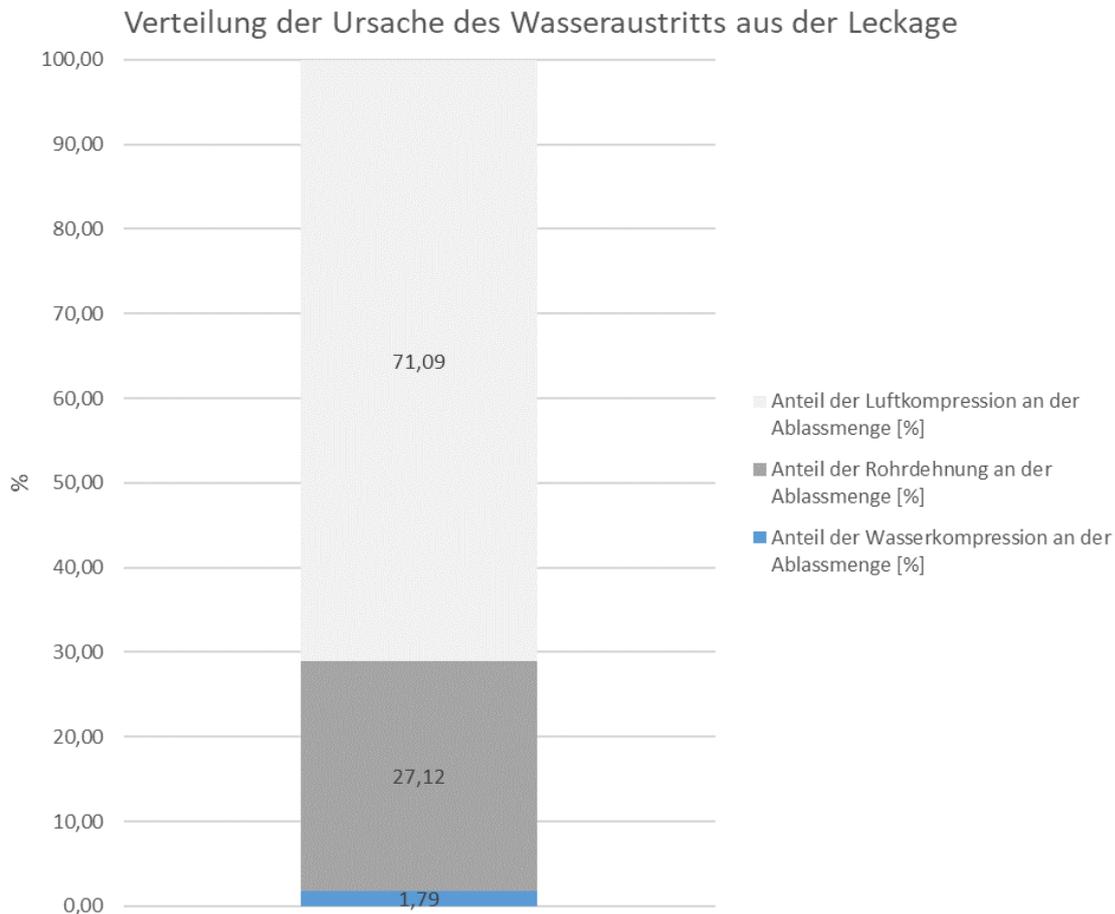
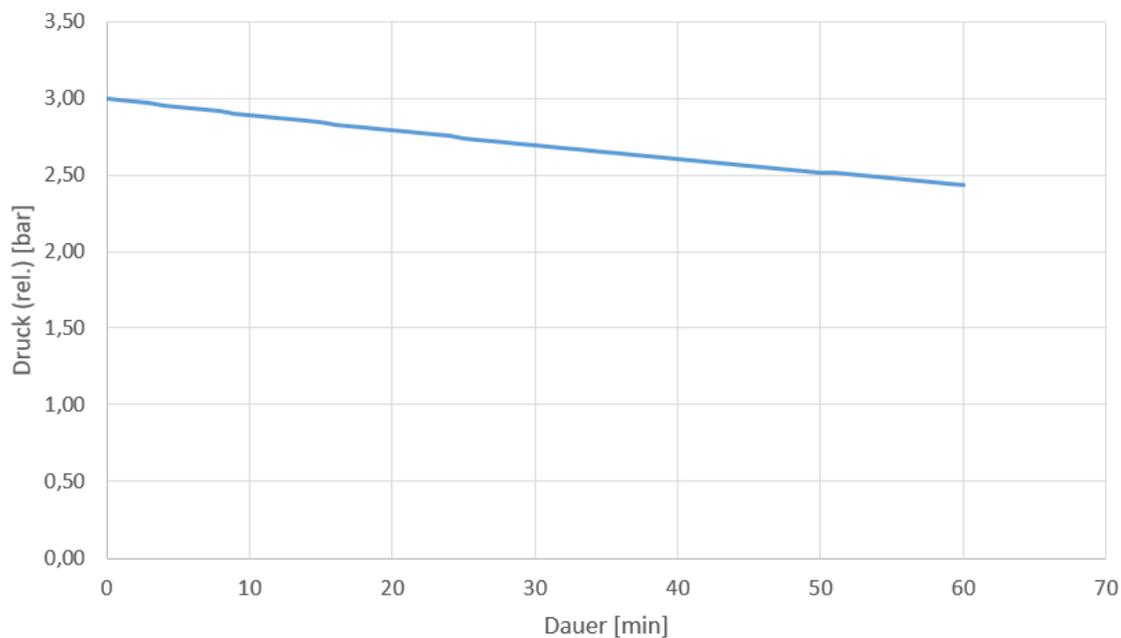


Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung der prozentualen Verteilung des aus der Leckage austretenden Wasservolumens in der Hauptprüfung

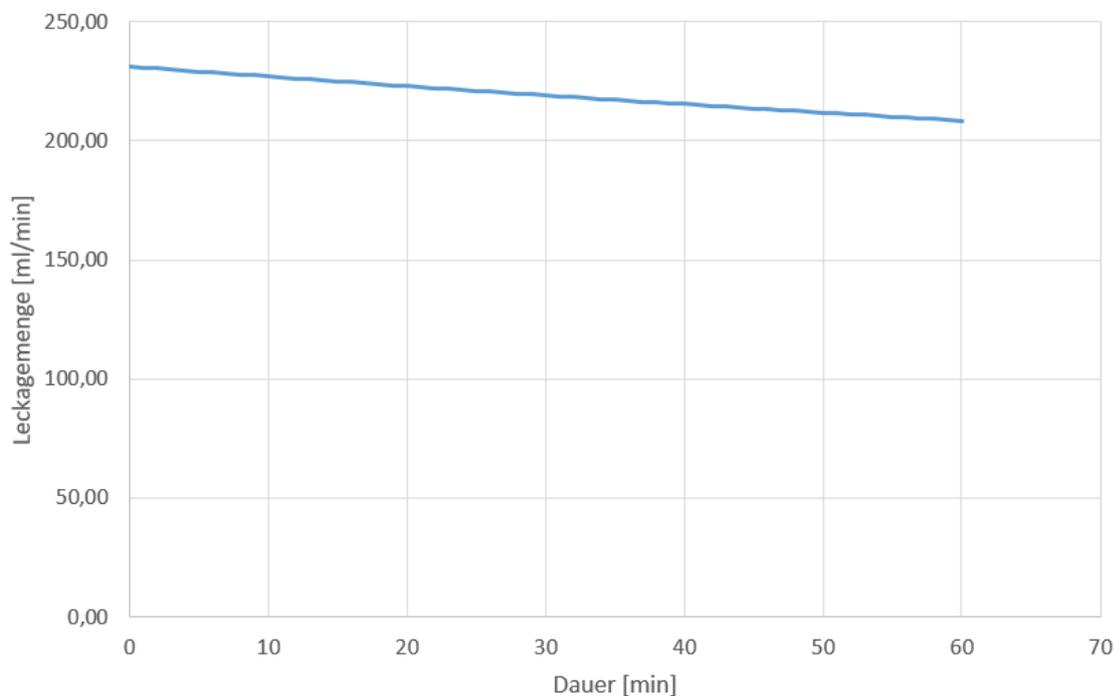
Zusätzlich zur Vergleichbarkeit der Wasservolumina aus der Simulation mit den realen Wasservolumina bei durchgeführten Druckprüfungen kann der Druckverlauf und das zu jedem Zeitpunkt austretende Wasservolumen aus der Simulation mit den realen gemessenen Werten verglichen werden. Der Druckverlauf in der Hauptprüfung mit berechnetem Start- und Enddruck wird in Abbildung 31 dargestellt. Die Abnahme des aus der Leckage austretenden Wasservolumens ist in Abbildung 32 zu sehen.



Startdruck [bar] (rel.) Enddruck [bar] (rel.)
3,00 2,44

Abbildung 31: Berechneter Druckverlauf (relativer Druck, bar) in der Hauptprüfung

Der in Abbildung 31 dargestellte Druckverlust in der Hauptprüfung ist gut zu erkennen. Der absolute Druckverlust stellt sich bei 0,56 bar ein.



Startleckage [ml/min]	Endleckage [ml/min]
231,22	208,42

Abbildung 32: Berechnetes Wasservolumen, welches minütlich in der Hauptprüfung aus der Leckage austritt

Neben der Berechnung des Druckabfalls - auf Grundlage der Eingabe aller Parameter aus Tabelle 11 - ist es über die eingebaute Excel-Solverfunktion möglich, für den Grenzwert der Druckdifferenz von 0,21 bar (entspricht einer gerade noch möglichen Erkennung einer Leckage) den maximal möglichen Luftanteil oder die kleinstmögliche erkennbare Leckage zu berechnen.



5.2.2 20-Min Test

Im Folgenden wird der Aufbau der Simulation für den 20-Min Test beschrieben. Die Simulation des 20-Min Tests beruht weitgehend auf der des HSA-Normalverfahrens.

- **Eingabewerte**

In der Eingabe werden alle für die Hauptprüfung wichtigen Parameter eingegeben. Diese sind gelb hinterlegt. In Tabelle 16 sind alle Eingabewerte und deren Beschreibung aufgeführt. In Tabelle 17 ist beispielhaft die Eingabemaske des Simulationstools dargestellt. In der Eingabemaske können bis zu fünf unterschiedliche Leitungsabschnitte eingegeben werden.

Tabelle 16: Eingabeparameter der Oberfläche der Simulation des 20-Min Tests

Parameter	Beschreibung
Δh	Höhendifferenz der Rohrleitung zur Berechnung des hydrostatischen Drucks zwischen Prüfort und maximaler Erhebung der Druckleitung
Prüfdruck (am Prüfort)	Prüfdruck am Prüfort (Relativdruck)
Rohraußendurchmesser	Außendurchmesser der Rohrleitung
Wandstärke	Dicke der Wandung der Rohrleitung
Rohrlänge	Länge der Prüfstrecke
Luftanteil (entspannt)	Prozentualer Luftanteil am Gesamttinnenvolumen der Rohrleitung zur Berechnung des Luftvolumens [I]
Leckage	An bzw. Ausschalten der Leckage
Material	Dropdownliste der Rohrleitungsmaterialien
Wasserkompressionsmodul	Kompressionsmodul des Wassers = 2.027 N/mm ²



Tabelle 17: Eingabemaske der Simulation (gelbe Felder sind Eingabefelder)

Eingabe

Eingabewerte für die Simulation der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens		
	Wert	Einheit
Δh (maximale Höhe der Luft über Prüfort)	5,00	m
P_{hyd}	0,50	bar (rel.)
Atmosphärendruck	1013	mbar
Atmosphärendruck	1,013	bar (rel.)
Prüfdruck (am TP)	3,00	bar (rel.)
Material X	Rohraußendurchmesser	90,0 mm
	Wandstärke (ggf. ohne ZM-Auskleidung)	8,2 mm
	Rohrinnendurchmesser (ggf. ohne Berücksichtigung ZM-Auskleidung)	73,6 mm
	SDR	11,0 -
	Rohrlänge	2000,00 m
	Rohrinnenvolumen (ggf. ohne Berücksichtigung ZM-Auskleidung)	8,51 m ³
	Wandfläche (ggf. ohne Berücksichtigung ZM-Auskleidung)	462,44 m ²
	Leckagegröße	0,10 -
	Leckagevolumen	231,2 ml/min
	Material	PE100 -
	Emodul Material	1200,0 N/mm ²
	Gesamtleckage	231,2 ml/min
	Leckage	Aus -
	Nachpumpvolumen (2 minütlich)	462,4 ml/2min
	Gesamtrohrvolumen	8,51 m ³
	Luftanteil (0%-100%), ohne zusätzlichen Druck	2,000 %
	Luftvolumen (entspannt)	170,18 l
	Luftvolumen (unter Prüfdruck am Hochpunkt)	49,07 l
	Wasserkompressionsmodul	2027 N/mm ²
Kriterium für Durchfall einer Druckprüfung:	0,21 bar	



- **Berechnung**

Die Berechnung des Druckanstiegs im 20-Min Test erfolgt für jede Minute der Prüfung. Bei der Simulation wird ebenso wie im HSA-Normalverfahren zwischen relativen und absoluten Drücken unterschieden, da die Prüfgeräte einen Relativdruck zwischen Umgebung und Innendruck der Rohrleitung angeben, wohingegen das Gesetz von Boyle-Mariotte (siehe Kapitel 2.2) mit Absolutdrücken arbeitet. Der Absolutdruck errechnet sich aus dem Relativdruck addiert zu dem Umgebungsdruck (=Atmosphärendruck), welcher zur Vereinfachung standardmäßig mit 1,013 bar angenommen wird. Eine Anpassung des Atmosphärendrucks ist im Simulationstool möglich.

Es wird der sich minütlich ändernde Druck aufgrund des jeweiligen Druckanstiegs durch die Wasserzugabe neu berechnet. Die Oberfläche der Berechnung des Simulationstools für den 20-Min Test ist in Tabelle 18 abgebildet.

Alle zwei Minuten wird der Rohrleitung Wasser zugegeben. Dadurch verkleinert sich das Luftvolumen entsprechend. Hierbei werden jedoch auch die Anteile der Veränderung der Einflussgrößen Material und Wasser berücksichtigt. Das Volumen, um das sich das Luftvolumen verkleinert, ist daher ein druckabhängiger Anteil des zugeführten Wasservolumens. Die Berechnung wird im Folgenden beschrieben.



Tabelle 18: Berechnung des minütlichen Druckanstiegs im 20-Min Test

Berechnung des minütlichen Druckverlaufs

Faktor a = 0,00

Minute [min]	Druck am Prüfort (rel.)	Druck am Prüfort (abs.)	Luftvolumen bei PD am Hochpunkt [l]	Luftanteil am HP unter PD [%]	Nachpumpmenge [ml/2min]	Leckage [ml/min] (eingestellt bei PD)
0	3,00	4,01	49,0723	0,58	0,00	0,00
0	3,00	4,01	49,0723	0,58	0,00	0,00
1	3,00	4,01	49,0723	0,58	0,00	0,00
1	3,00	4,01	49,0723	0,58	0,00	0,00
2	3,02	4,04	48,7608	0,57	462,44	0,00
2	3,02	4,04	48,7608	0,57	0,00	0,00
3	3,02	4,04	48,7608	0,57	0,00	0,00
3	3,02	4,04	48,7608	0,57	0,00	0,00
4	3,05	4,06	48,4505	0,57	462,44	0,00
4	3,05	4,06	48,4505	0,57	0,00	0,00
5	3,05	4,06	48,4505	0,57	0,00	0,00
5	3,05	4,06	48,4505	0,57	0,00	0,00
6	3,07	4,08	48,1416	0,57	462,44	0,00
6	3,07	4,08	48,1416	0,57	0,00	0,00
7	3,07	4,08	48,1416	0,57	0,00	0,00
7	3,07	4,08	48,1416	0,57	0,00	0,00
8	3,09	4,10	47,8339	0,56	462,44	0,00
8	3,09	4,10	47,8339	0,56	0,00	0,00
9	3,09	4,10	47,8339	0,56	0,00	0,00
9	3,09	4,10	47,8339	0,56	0,00	0,00
10	3,11	4,13	47,5276	0,56	462,44	0,00
10	3,11	4,13	47,5276	0,56	0,00	0,00
11	3,11	4,13	47,5276	0,56	0,00	0,00
11	3,11	4,13	47,5276	0,56	0,00	0,00
12	3,14	4,15	47,2227	0,55	462,44	0,00
12	3,14	4,15	47,2227	0,55	0,00	0,00
13	3,14	4,15	47,2227	0,55	0,00	0,00
13	3,14	4,15	47,2227	0,55	0,00	0,00
14	3,16	4,17	46,9190	0,55	462,44	0,00
14	3,16	4,17	46,9190	0,55	0,00	0,00
15	3,16	4,17	46,9190	0,55	0,00	0,00
15	3,16	4,17	46,9190	0,55	0,00	0,00
16	3,19	4,20	46,6167	0,55	462,44	0,00
16	3,19	4,20	46,6167	0,55	0,00	0,00
17	3,19	4,20	46,6167	0,55	0,00	0,00
17	3,19	4,20	46,6167	0,55	0,00	0,00
18	3,21	4,22	46,3158	0,54	462,44	0,00
18	3,21	4,22	46,3158	0,54	0,00	0,00
19	3,21	4,22	46,3158	0,54	0,00	0,00
19	3,21	4,22	46,3158	0,54	0,00	0,00
20	3,23	4,25	46,0162	0,54	462,44	0,00
20	3,23	4,25	46,0162	0,54	0,00	0,00

Bei Minute Null liegt am Prüfort der Prüfdruck vor. Über den Prüfdruck und das zweiminütige Nachpumpvolumen steigt der Druck. Es ist möglich, eine Leckage im 20-Min Test zu simulieren. Da durch eine Leckage jedoch das gleiche Wasservolumen aus der Leitung austritt wie nachgepumpt wird, bleibt der Druck stabil.

In der Simulation des 20-Min Tests wird zunächst die prozentuale Verteilung zwischen den drei Anteilen Material, Wasser und Luft berechnet. Hierfür wird für den Prüfdruck (später für den jeweiligen aktuellen Leitungsdruck) und einen minimalen



Druckanstieg von 0,01 bar die jeweilige Volumenänderung für die Anteile für Material, Wasser und Luft getrennt errechnet. Die Excel-Oberfläche der Berechnung ist in Tabelle 19 zu sehen. Dies erfolgt über die in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Formeln 19, 20 und 21.

Der berechnete prozentuale Anteil für Luft wird anschließend mit dem aktuellen Nachpumpvolumen multipliziert und das Luftvolumen am Hochpunkt vermindert. Über das Gesetz von Boyle-Mariotte kann anschließend aus dem neu berechneten Luftvolumen der sich neu einstellende Druck zurückgerechnet werden. Dieser bildet den Startpunkt für die Berechnung der nächsten Minute. Da nur alle zwei Minuten Wasser nachgepumpt wird, ändert sich der Druck in dieser Zeit nicht, vorausgesetzt es ist keine Leckage aktiviert. Diese minütliche Berechnung erfolgt entsprechend für die gesamte Dauer des 20-Min Tests von 20 min.

Erfolgt eine Simulation mit Leckage, so wird diese analog zu Kap. 5.2.1 berücksichtigt.

Das zweiminütlich nachgepumpte Wasservolumen wird infolge Luftkompression dem komprimierten Luftvolumen abgezogen. Mittels dem Gesetz von Boyle-Mariotte kann über Formel (43) dem verringerten Luftvolumen zum Zeitpunkt nach dem Nachpumpen ein Druck zugewiesen werden. Die Berechnung des Drucks kann so für jede Minute fortgesetzt werden.

Tabelle 19: Berechnung der prozentualen Verteilung des Nachpumpvolumens aufgrund von Materialdehnung, Wasserkompression und Luftkompression

Berechnung

Berechnung des Anteils der Rohrdehnung, Wasserkompression bzw. Luftkompression an der Leckagemenge

Prozentuale Verteilung								
Rohrdehnung [ml]	Anteil der Rohrdehnung an der Ablassmenge [%]	Minütliche Leckagemenge infolge Rohrdehnung [ml]	Wasserkompression [ml]	Anteil der Wasserkompression an der Ablassmenge [%]	Minütliche Leckagemenge infolge Wasserkompression [ml]	Luftkompression [ml]	Anteil der Luftkompression an der Ablassmenge [%]	Minütliche Leckagemenge infolge Luftkompression [ml]
63,64	30,61	0,00	4,20	2,02	0,00	140,09	67,37	0,00
63,64	30,61	0,00	4,20	2,02	0,00	140,09	67,37	0,00
63,64	30,87	0,00	4,20	2,04	0,00	138,31	67,09	0,00
63,64	30,87	0,00	4,20	2,04	0,00	138,31	67,09	0,00
63,64	31,14	0,00	4,20	2,05	0,00	136,55	66,81	0,00
63,64	31,14	0,00	4,20	2,05	0,00	136,55	66,81	0,00
63,64	31,40	0,00	4,20	2,07	0,00	134,82	66,52	0,00
63,64	31,40	0,00	4,20	2,07	0,00	134,82	66,52	0,00
63,64	31,67	0,00	4,20	2,09	0,00	133,10	66,24	0,00
63,64	31,67	0,00	4,20	2,09	0,00	133,10	66,24	0,00
63,64	31,94	0,00	4,20	2,11	0,00	131,39	65,95	0,00
63,64	31,94	0,00	4,20	2,11	0,00	131,39	65,95	0,00
63,64	32,22	0,00	4,20	2,12	0,00	129,71	65,66	0,00
63,64	32,22	0,00	4,20	2,12	0,00	129,71	65,66	0,00
63,64	32,49	0,00	4,20	2,14	0,00	128,05	65,37	0,00
63,64	32,49	0,00	4,20	2,14	0,00	128,05	65,37	0,00
63,64	32,77	0,00	4,20	2,16	0,00	126,40	65,07	0,00
63,64	32,77	0,00	4,20	2,16	0,00	126,40	65,07	0,00
63,64	33,04	0,00	4,20	2,18	0,00	124,77	64,78	0,00
63,64	33,04	0,00	4,20	2,18	0,00	124,77	64,78	0,00
63,64	33,32	0,00	4,20	2,20	0,00	123,16	64,48	0,00



- **Ausgabe**

Als Ergebnis der Berechnung bzw. der Simulation wird der berechnete Druckanstieg bzw. der Differenzdruck in der Prüfung ausgegeben. Zusätzlich zu dem Druckanstieg wird dessen Verteilung auf die Faktoren aus Rohrdehnung, Wasser- und Luftkompression angezeigt.

Tabelle 20: Ausgabeoberfläche der Simulation des 20-Min Tests

Ausgabe

Startdruck am TP (rel.)	3,00 bar
Enddruck (rel.)	3,23 bar
Druckdifferenz in Hauptprüfung	0,233 bar
Anteil Luftkompression	66,09 %
Anteil Rohrdehnung an Gesamtleckagevolumen	31,82 %
Anteil Wasserkompression an Gesamtleckagevolumen	2,10 %
Summe	100,00 %

Die prozentuale Verteilung der genannten Faktoren (aufgrund der Wasserzugabe im 20-Min Test) kann als Zusatzinformation wie in Abbildung 33 dargestellt, angezeigt werden.

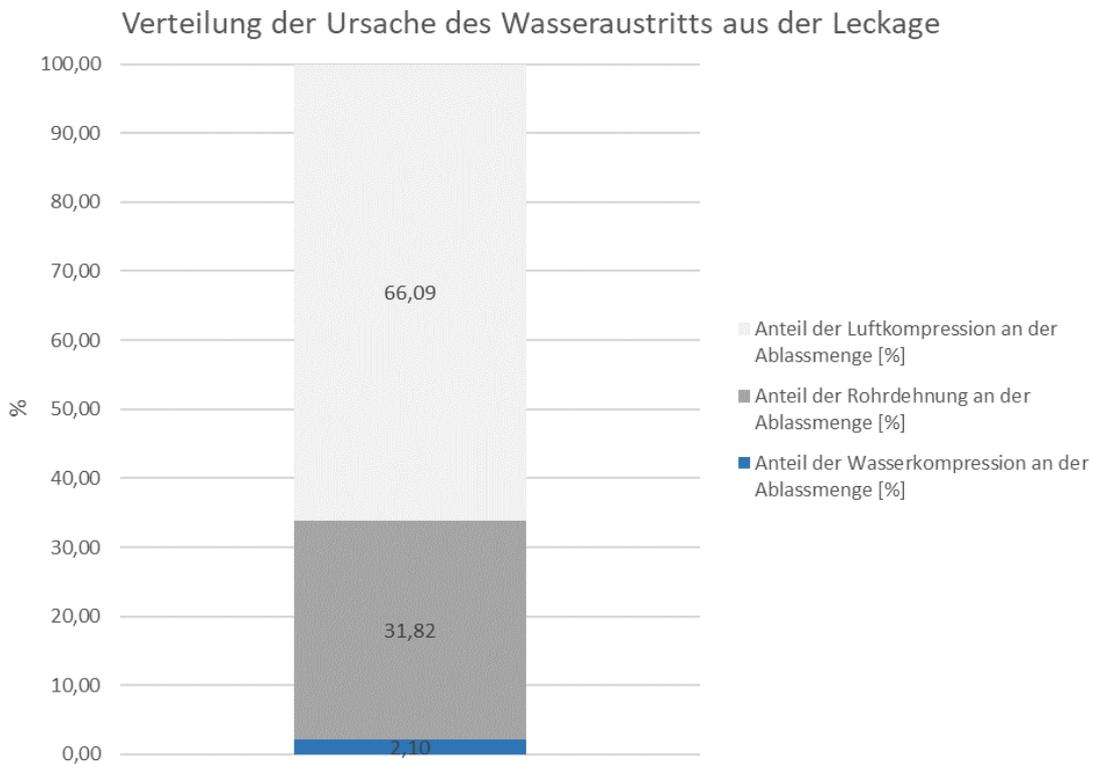
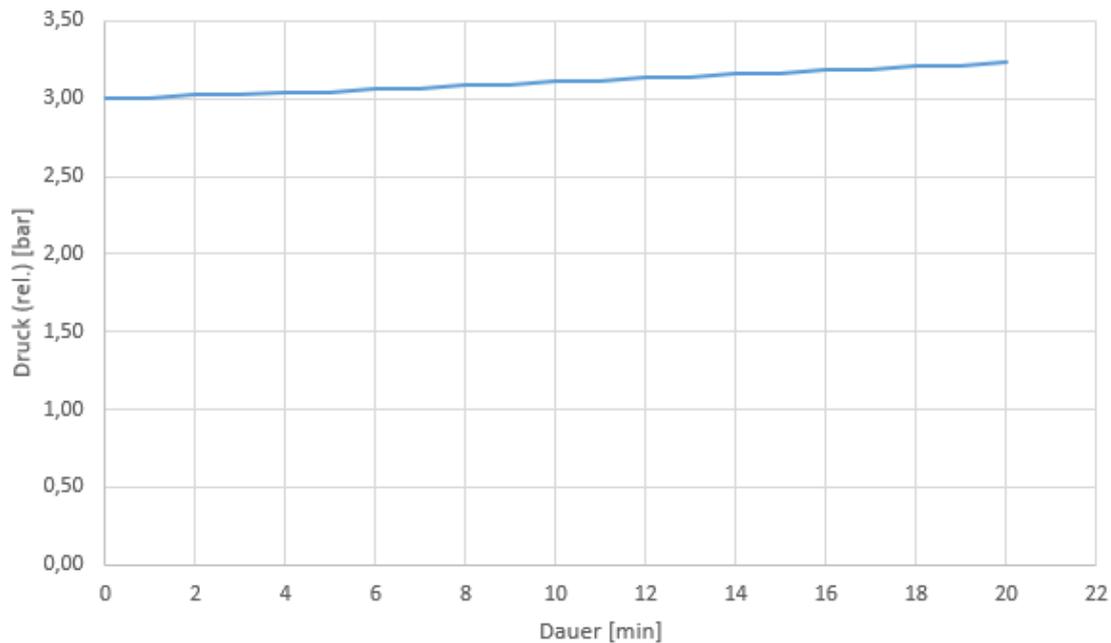


Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung der prozentualen Verteilung des Druckanstiegs aufgrund Wasserzugabe durch Nachpumpen im 20-Min Test

Mit Hilfe der Simulation kann der Druckverlauf zu jedem Zeitpunkt mit den realen, gemessenen Werten verglichen werden. Der Druckverlauf im 20-Min Test mit berechnetem Start- und Enddruck wird in Abbildung 34 dargestellt. Ein mögliches Leckagevolumen ist in Abbildung 35 dargestellt.

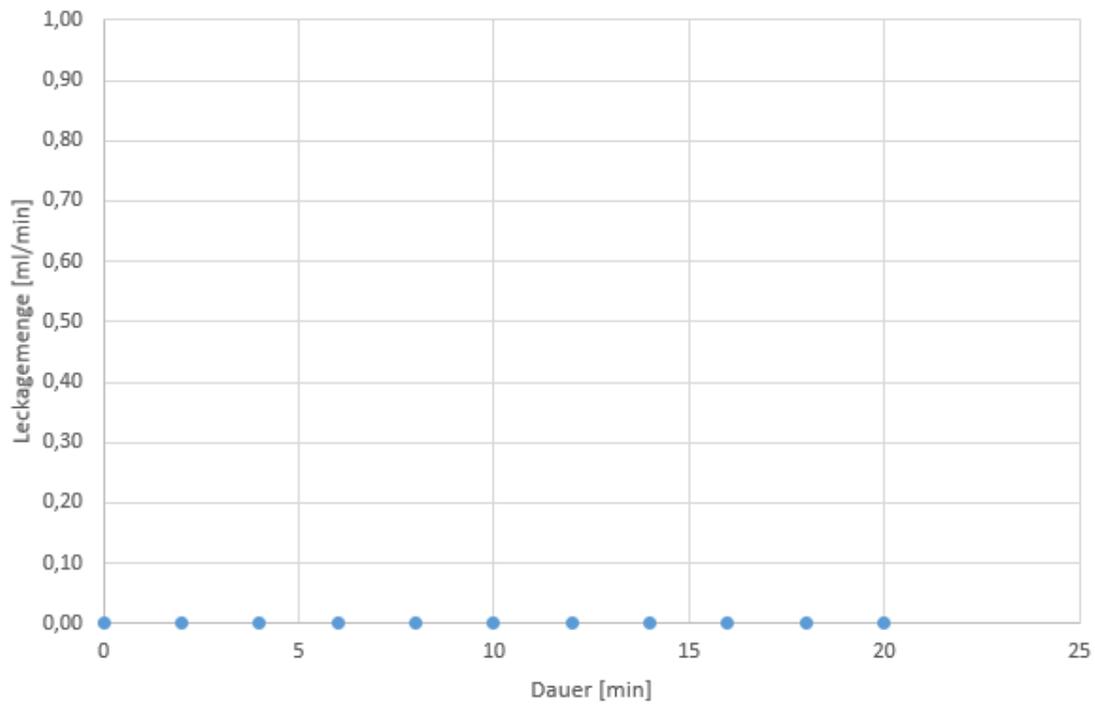


Startdruck [bar] (rel.) Enddruck [bar] (rel.)
3,00 3,23

Abbildung 34: Berechneter Druckverlauf im 20-Min Test

Der in Abbildung 34 dargestellte Druckverlauf im 20-Min Test ist stetig steigend, da keine Leckage eingestellt wurde und alle zwei Minuten das entsprechende zulässige Leckagevolumen nachgepumpt wurde.

Das Wasservolumen, welches aus einer möglichen Leckage austritt, wird in Abbildung 35 dargestellt.



Startleckage [ml/min] Endleckage [ml/min]
0,00 0,00

Abbildung 35: Berechnetes Wasservolumen, welches im 20-Min Test aus einer möglichen Leckage austritt

Neben der Berechnung des Druckverlaufs auf Grundlage der Eingabe aller Parameter aus Tabelle 16 ist es über die eingebaute Excel-Solverfunktion möglich, den Druckanstieg im 20-Min Test zu simulieren.



5.3 Extremfallbetrachtung

Bei den Druckprüfungen an realen Druckleitungen wurde festgestellt, dass durch den Einfluss der Luft, des Leitungsverlaufs und des Leitungsmaterials die gemessenen Druckabfälle variieren. Um Fälle betrachten zu können, bei denen ein Druckabfall sehr gering ausfällt, wurden diese einer Extremfallbetrachtung mittels Simulation unterzogen.

5.3.1 HSA-Normalverfahren

Es wird, wie in Kapitel 4.1.2 bereits beschrieben, der Worstcase für den Ort der Luft angenommen. Dieser befindet sich am Hochpunkt der Leitung, da das Luftvolumen dort dem niedrigsten Druck ausgesetzt ist und somit nach Boyle-Mariotte (siehe Kap. 2.2) das größte Volumen und daher den größten Einfluss auf eine Druckveränderung in der Hauptprüfung hat. Der Leitungsverlauf hat ebenfalls einen Einfluss durch den hydrostatischen Druck in der Leitung.

Durch die Möglichkeit einer Vorhersage des Druckverlaufs in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens können Extremfälle, d.h. Fälle, bei denen ein minimaler Druckabfall zu erwarten ist, betrachtet werden. Die Einflussgrößen für einen minimalen Druckabfall werden im Folgenden erläutert.

- **Luftanteil**

Ist der Luftanteil in einer Druckleitung bei der Hauptprüfung hoch, kann dieser aufgrund der Ausdehnung des Luftvolumens den Druckabfall durch Wasseraustritt aus einer Leckage überdecken. Der Einfluss des Luftvolumens ist abhängig von dem Druck, der auf die Luft wirkt. Es können mehrere Fälle unterschieden werden.

Ist der Startdruck hoch, so ist der Luftanteil stark komprimiert und das Luftvolumen entsprechend klein. Durch Wasseraustritt dehnt sich das Luftvolumen aus und es findet eine nach Boyle-Mariotte entsprechend große Druckänderung statt. Dies ist bei hohen Prüfdrücken der Fall, beispielsweise bei den Prüfungen nach Norm im Trinkwasserbereich. Eine Leckage kann deutlich erkannt werden – weitgehend unabhängig von der Lage der Luft in der Leitung, da der hydrostatische Druck im Vergleich zum Prüfdruck gering ist.

Im Abwasserbereich sind nur geringe Prüfdrücke üblich. Daher spielt der hydrostatische Druck und die Lage der Luft in der Leitung unter Umständen eine größere Rolle.



Ist nur ein geringer hydrostatischer Druck in der Leitung vorhanden – dies ist bei Leitungen mit flachem Verlauf der Fall – so wird die Luft durch den Unterschied zwischen hydrostatischem Druck und Prüfdruck komprimiert. Luftanteile am Hochpunkt werden hierbei am wenigstens komprimiert. Durch den flachen Leitungsverlauf treten jedoch keine großen Druckunterschiede in Abhängigkeit der Lage der Luft auf.

Bei Leitungen mit einem steilen Verlauf und entsprechend hohem hydrostatischem Druck ist die Differenz zum Prüfdruck entsprechend gering. Insbesondere bei steileren Leitungsverläufen ist jedoch die Luft am Hochpunkt zu vermuten, an dem die minimale Kompression auftritt. Durch den Pump- und Spülvorgang werden die Luftanteile wahrscheinlich an den Hochpunkt gefördert, wo sie vermutlich bleiben, wenn der Leitungsverlauf nach dem Hochpunkt ebenfalls steil abfällt. Ist der Leitungsverlauf nach dem Hochpunkt flach, ist die Lage der Luft nicht abzuschätzen. Allerdings ergeben sich durch den flachen Verlauf der Leitung nach dem Hochpunkt praktisch keine Druckunterschiede – die exakte Lage der Luft ist unerheblich.

Der schlechteste Fall ist somit ein minimaler Prüfdruck (3,0 bar) und ein hoher hydrostatischer Druck (2,0 bar), da hier die Luft am Hochpunkt – dem wahrscheinlichsten Aufenthaltsort der Luft in der Leitung - nur um 1,0 bar komprimiert wird.

Der minimale Prüfdruck von 3,0 bar wird i.d.R. nur überschritten, wenn der hydrostatische bzw. der Betriebsdruck über 2,0 bar liegt. In diesen Fällen wird der Prüfdruck üblicherweise mit 1,0 bar am Hochpunkt zuzüglich des hydrostatischen Drucks zum Prüfort berechnet. Es tritt demnach typischerweise eine geringe Differenz (i.d.R. 1,0 bar) zwischen hydrostatischem Druck und Prüfdruck auf. Entscheidend für den Einfluss des vorhandenen Luftanteils ist somit immer die Differenz zwischen hydrostatischem Druck und Prüfdruck am Prüfort. Wird die Druckprüfung an einem 20 m tiefer liegendem Punkt der Leitung durchgeführt, erhöht sich der Prüfdruck nach Kap. 3.3.6 um 2 bar. Jedoch steigt auch der hydrostatische Druck am Prüfort um 2,0 bar an, wodurch die Differenz zwischen hydrostatischem Druck und Prüfdruck am Prüfort gleichbleibt. Eine Erhöhung des Prüfdrucks bei gleichbleibender Differenz zum hydrostatischen Druck führt also nicht zu einer Verbesserung der Sichtbarkeit von Leckagen. Lediglich bei einer Anhebung des Prüfdrucks bei gleichbleibendem hydrostatischem Druck kommt es zu einer Verbesserung der Sichtbarkeit von Leckagen.

- **Leitungsmaterial**

Ebenfalls Einfluss auf den Druckverlauf in der Hauptprüfung hat das Leitungsmaterial. Durch das austretende Wasservolumen dehnen sich Wasser und Luft aus während sich das Rohrleitungsmaterial zusammenzieht (Kontraktion). Ist das

Rohrleitungsmaterial sehr weich, d.h. es hat einen niedrigen E-Modul, so ist der Anteil des durch die Leckage austretenden Wasservolumens durch die Kontraktion des Rohres sehr hoch. Den für die Prüfungen ungünstigsten Fall stellen daher weiche Leitungsmaterialien wie PE 80 bzw. PE 100 dar.

5.3.1.1 Systematische Berechnungen zum Worstcase Fall

Durch Anpassung der Leckage (vgl. Kap. 4.1.4) werden alle Rohrdurchmesser hinsichtlich des Zusammenspiels aus Luftvolumen und Leckagevolumen gleich behandelt. Das Ausmaß der Vorkomprimierung der in der Druckleitung vorhandenen Luftanteile wird, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, durch den Prüfdruck und hydrostatischen Leitungsdruck beeinflusst. Die kleinste mögliche Differenz zwischen Prüfdruck und hydrostatischem Druck liegt im HSA-Normalverfahren und 20-Min Test bei 1,00 bar. Bei geringer Vorkomprimierung können sich bereits geringere Luftanteile in der Leitung nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte (vgl. Kap. 2.2) derart stark ausdehnen, dass die Leckage fälschlicherweise nicht identifiziert werden kann. Um die Prüfbarkeit von Druckleitungen unterschiedlicher Materialien, Durchmesser, Wandstärken und hydrostatischer Drücke gewährleisten zu können, wurden mit Hilfe der Simulation alle denkbaren Variationen der geläufigen Materialien und Durchmesser an 1029 Beispielen simuliert. Hierbei ist der in Kap. 4.1.4 beschriebene Worstcase (mit angepasster Leckage) einer Druckleitung aus biegeweichem Material mit geringer Wandung und steilem Verlauf (Druck am Hochpunkt lediglich 1 bar) bestätigt worden.

Nachfolgend ist die Simulation einer Druckleitung aus PE 80 mit geringer Wandstärke (SDR 17) bei verschiedenen hydrostatischen Drücken und Luftanteilen von 1%, 2% und 3 % dargestellt. Diese Druckleitung stellt mit Hinblick auf das Material den Worstcase dar.

In Abbildung 36 ist für verschiedene Durchmesser auf der Hochachse der maximal mögliche Druckabfall gegenüber dem Prüfdruck aufgrund einer angepassten Leckage aufgetragen. Der Luftanteil in der Simulation betrug beispielhaft 1 %. Da sich der Prüfdruck nach dem hydrostatischen Druck richtet (vgl. Kap. 3.3.6), ist auf der Rechtsachse das Verhältnis zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (p_{hyd}) aufgetragen.

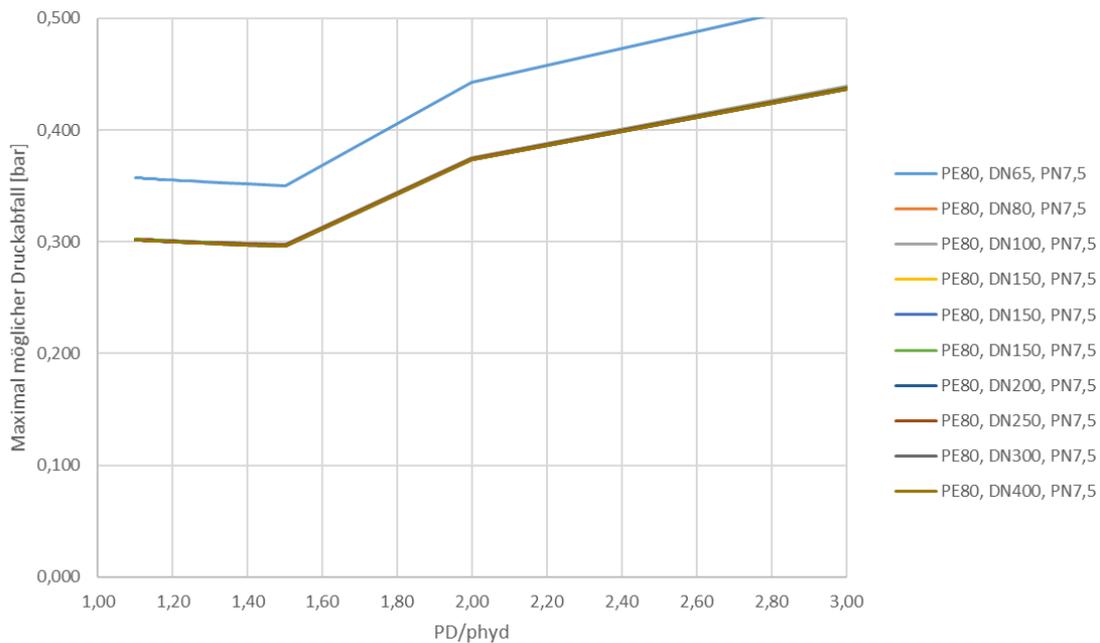


Abbildung 36: Maximal möglicher Druckabfall einer PE 80 Druckleitung SDR 17 mit 1 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (ρ_{hyd})

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit sinkendem Verhältnis zwischen Prüfdruck und hydrostatischem Druck eine Verringerung des maximalen Druckabfalls stattfindet. Ein kleines Verhältnis wird bei geringer Erhöhung des Prüfdrucks gegenüber dem hydrostatischen Druck erzielt. Beispielsweise wird der Prüfdruck bei einem hydrostatischen Druck von 10 bar auf 11 bar festgelegt, wenn der Betriebsdruck nicht höher liegt. Die Kombination aus weichem Material, dünner Wandung und steilem Verlauf stellt den absoluten Worstcase dar. Dieses Verhältnis entspricht einem Wert von 1,1. Eine entsprechende Druckleitung mit flachem Verlauf hingegen hat bei einem minimalen hydrostatischen Druck i.d.R. einen Prüfdruck von 3 bar. Das Verhältnis geht somit bei hohen Betriebsdrücken theoretisch gegen unendlich. Interessant sind somit die Werte links in der Abbildung, welche gleichzeitig den geringst möglichen, minimalen Druckabfall darstellen.

Durch Anpassung der Leckage ab einem Innendurchmesser von 80 mm verliert eine Druckleitung mit kleinerem Durchmesser auf den Durchmesser gesehen mehr Wasser. Der sich einstellende Druckabfall ist somit auch größer. Dies ist in der Abbildung im hellblauen Graph für eine Leitung DN65 zu erkennen. Jedoch ist für alle Varianten bei 1 % Luft eine Erkennung einer Leckage gegeben. Da der Druckabfall durch die Anpassung der Leckage ab einem Innendurchmesser von 80 mm für alle Durchmesser > 80 mm gleich ist, überlagern sich diese Graphen in der Darstellung.

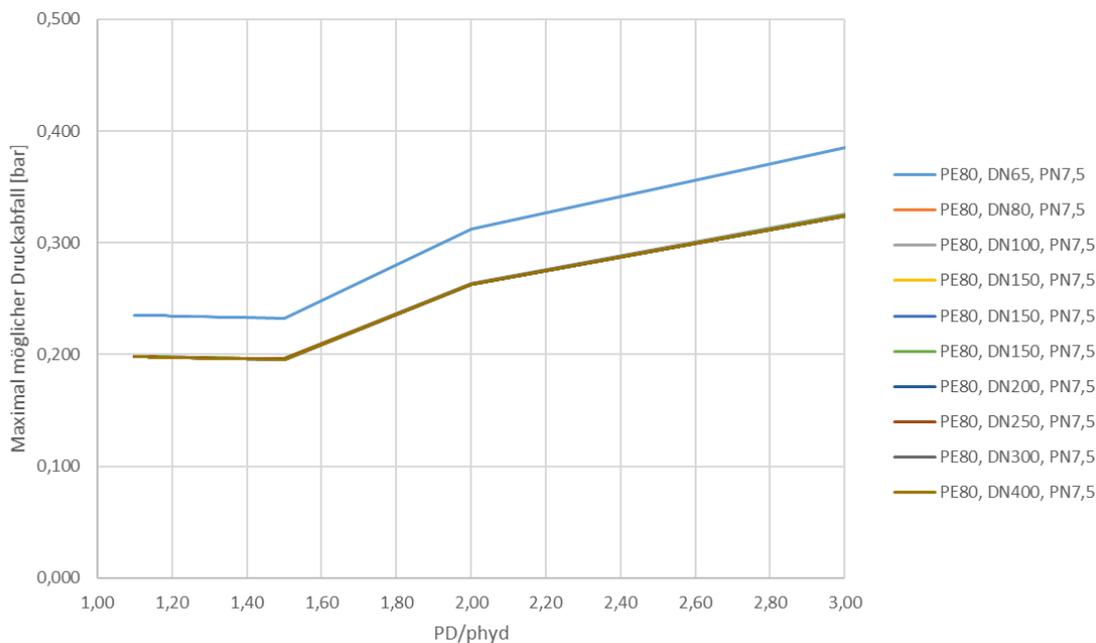


Abbildung 37: Maximal möglicher Druckabfall einer PE 80 Druckleitung SDR 17 mit 2 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (ρ_{hyd})

Durch eine Verdopplung des Luftvolumens auf 2 % stellt sich erwartungsgemäß für alle berechneten Varianten ein geringerer Druckabfall ein, wie in Abbildung 37 dargestellt. Eine sichere Identifizierung der Leckage ist auch mit einem Luftanteil von 2 % für alle Durchmesser ab einem PD/ρ_{hyd} -Verhältnis von über 1,5 möglich. Es handelt sich um Fälle mit einer stärkeren Vorkomprimierung der Luft (= flacher Leitungsverlauf bzw. hoher Betriebsdruck). Insbesondere für Leitungen mit größeren Durchmessern und einer nur geringen Kompression durch den Prüfdruck am Hochpunkt ist ein Luftanteil von 2 % bereits zu hoch, um eine Leckage noch sicher identifizieren zu können. Dies unterstreicht die Relevanz des Simulationstools, da der zulässige Luftanteil für die Prüfung stark leitungsabhängig ist. Bei Prüfungen im Trinkwasserbereich tritt dieses Problem durch die hohen Prüfdrücke über dem hydrostatischen Druck und die entsprechende starke Kompression der vorhandenen Luftanteile nicht auf.

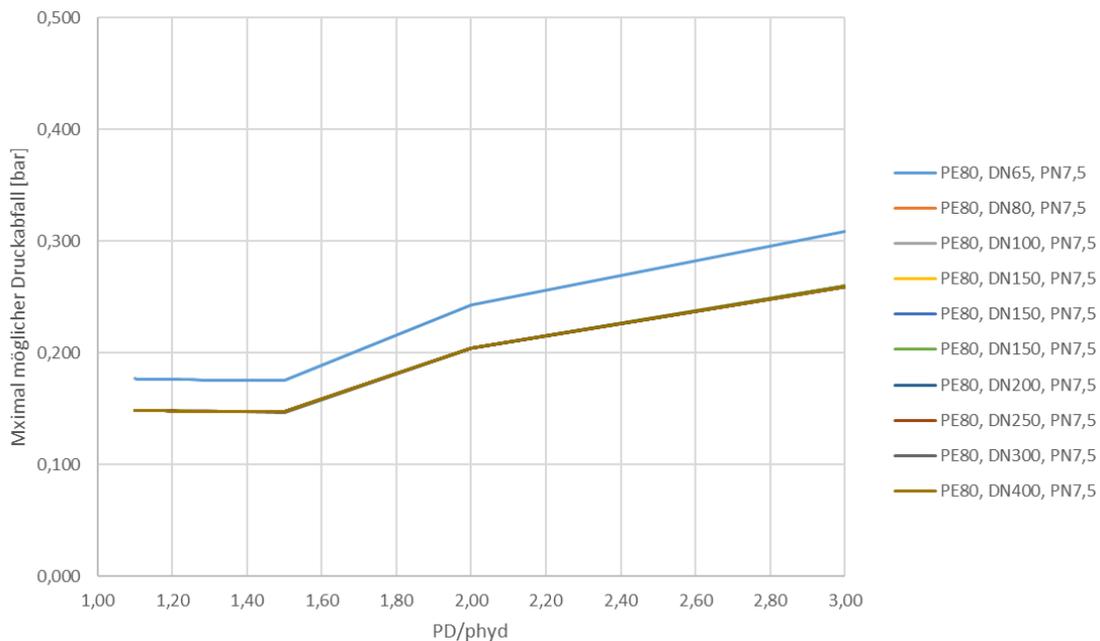


Abbildung 38: Maximal möglicher Druckabfall einer PE 80 Druckleitung SDR 17 mit 3 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (p_{hyd})

In Abbildung 38 ist der maximale Druckabfall für einen Luftanteil von 3 % dargestellt. Deutlich zu erkennen ist im Gegensatz zu 1 % bzw. 2 % Luftanteil, dass sich der maximal mögliche Druckabfall infolge einer Leckage deutlich verringert und zu nicht unerheblichen Anteilen unter dem Grenzwert von 0,2 bar liegt. Erst ab einem Verhältnis zwischen Prüfdruck und hydrostatischem Druck von 2 ist eine Leckage bei 3 % Luft erkennbar. Dies ist beispielsweise bei einem hydrostatischen Druck von 1,5 bar und Prüfdruck von 3 bar der Fall.

Deutlich steifere Leitungsmaterialien kompensieren einen Druckabfall weniger als weiche Leitungsmaterialien. Dieser Zusammenhang kann anhand der Simulation für eine Gussleitung beispielhaft erfasst werden.

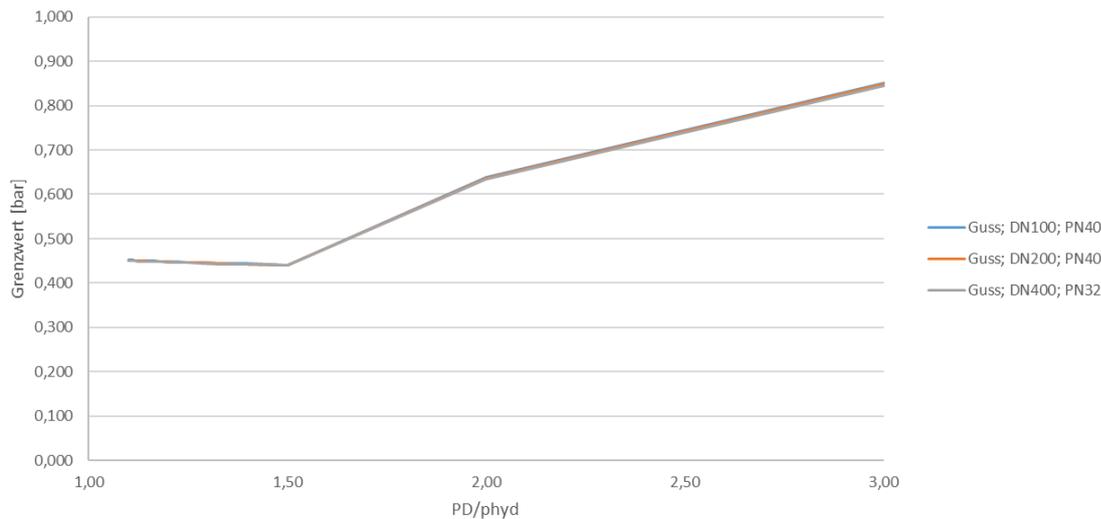


Abbildung 39: Maximal möglicher Druckabfall einer Druckleitung aus Guss, PN40 bzw. PN32 mit 1 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (p_{hyd})

Obwohl in der simulierten Gussleitung aus Abbildung 39 der gleiche Luftanteil enthalten ist, wie in Abbildung 36 für das Material PE 80, stellt sich ein deutlich größerer möglicher Druckabfall ein, deutlich über dem Grenzwert von 0,2 bar.

Die Ergebnisse der Simulationen der Druckabfälle für alle gängigen Materialien mit einem Luftanteil bis 3 % sind dem Anhang 2 beigefügt.

5.3.1.2 Einfluss der Luft auf die Prüfung der Leitung am großen Alpsee

Beispielhaft konnte das Verhalten der Überdeckung von Leckagen durch Luft an der Druckleitung unter dem großen Alpsee beobachtet werden (siehe Kap. 14.2.6). Da die Druckleitung im Spülbohrverfahren unter dem großen Alpsee verlegt wurde, besitzt diese keine Hochpunkte, sondern weist einen Leitungsverlauf unterhalb Start- und Endpunkt auf. Der Prüfdruck wurde aufgrund des Betriebsdrucks von 3 bar zunächst mit 3 bar festgelegt. Die hydrostatischen Verhältnisse hätten eine Druckprüfung mit 1 bar am Prüfort (Pumpwerk) zugelassen. Da in der Druckabfallprüfung des HSA-Normalverfahrens mit 3 bar Prüfdruck ein großer Luftanteil festgestellt wurde, ist der Prüfdruck in Absprache mit dem Netzbetreiber auf 3,5 bar angehoben worden (vgl. Kap. 5.3.2). Der auf Grundlage des Simulationstools für diesen Prüfdruck berechnete maximal zulässige Luftanteil liegt bei 12,42 %. Dieser hohe zulässige Luftanteil liegt an der vergleichsweise hohen Komprimierung durch den Prüfdruck. Durch den im Landbereich flachen Leitungsverlauf vor der Unterquerung des großen Alpsees konnten die vorhandenen Luftanteile durch Spülen nur schlecht entfernt werden: der Luftanteil in der Leitung nach dem Spülen lag mit 13,47 % trotz erhöhtem Prüfdruck über dem zulässigen Luftanteil von 12,42 %.

Bei der Prüfung mit dem erhöhten Prüfdruck von 3,5 bar (wegen der Luftein-schlüsse) wurde die künstliche Leckage dabei etwas zu klein eingestellt. Im Zu-sammenspiel mit dem zu großen Luftanteil stellte sich dadurch ein Druckabfall von nur 0,16 bar ein. Bei den Prüfungen an anderen realen Beispielleitungen kam es ebenfalls vereinzelt zu einer Reduzierung des austretenden Leckagevolumens aus der künstlichen Leckageeinheit, v.a. durch Verblockungen mit Abwasserpartikeln. Daher wurde – sofern möglich – das durch die künstliche Leckage entnommene Wasser gemessen. Dies ermöglicht eine anschließende Überprüfung und ggfs. Bewertung der künstlichen Leckage. In Abbildung 40 ist der durch die Luft abge-minderte sehr flache Druckverlauf der Druckprüfung mit künstlicher Leckage in der Hauptprüfung zu sehen.

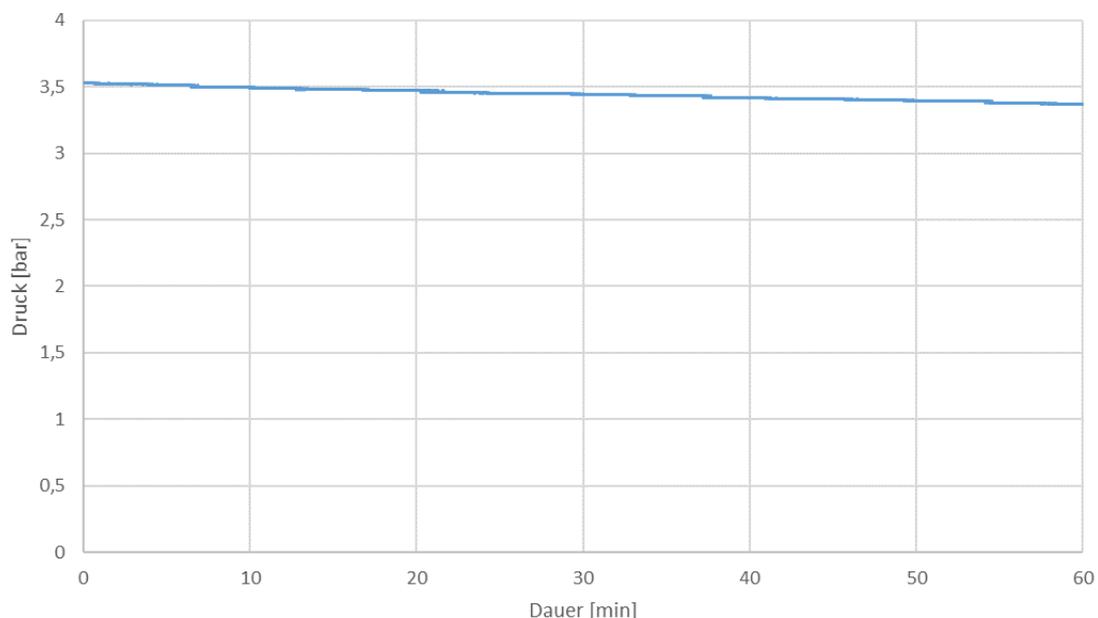


Abbildung 40: Druckverlauf der Hauptprüfung der Druckleitung unter dem großen Alpsee mit künstlicher Leckage bei einem Prüfdruck von 3,5 bar und einem vorhandenen Luftanteil von 13,47 %

Der in der Hauptprüfung aufgezeichnete Druckabfall mit der reduzierten Leckage konnte durch die Simulation mit einem Druckabfall von 0,15 bar bestätigt werden.

Anschließend wurde noch eine weitere Simulation unter Annahme der tatsächlichen Leckage durchgeführt. Es ergab sich ein Druckabfall von 0,19 bar, welcher knapp unter dem Kriterium der Bewertung einer Undichtigkeit liegt. Somit wäre selbst mit richtig eingestellter Leckage diese Undichtigkeit aufgrund der Überschreitung des maximal zulässigen Luftanteils nicht erkannt worden. Die Durchführung der Hauptprüfung wäre nach der nicht bestandenen Druckabfallprüfung jedoch ohnehin unzulässig gewesen und wurde in diesem Fall nur für Forschungszwecke durchgeführt.



5.3.2 Anhebung des Prüfdrucks bei Überschreitung des zulässigen Luftanteils

Wie im vorangegangenen Beispiel aufgezeigt, gibt es die Möglichkeit den Prüfdruck unter Berücksichtigung von Kapitel 4.1.5 zu erhöhen, um bei einer Überschreitung des zulässigen Luftanteils bzw. des zulässigen Ablassvolumens in der Druckabfallprüfung trotzdem prüfen zu können. Dies hat zur Folge, dass der vorhandene Luftanteil in der Druckleitung stärker vorkomprimiert wird und nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte (vgl. Kap. 2.2) weniger Einfluss auf eine Verminderung des Druckabfalls hat – und somit auf die potentielle Überlagerung einer Leckage.

Eine Anhebung des Prüfdrucks kann immer dann erfolgen, wenn die Druckleitung und deren Armaturen durch einen erhöhten Prüfdruck keinen Schaden nehmen. Zudem verlängert sich aufgrund des höheren Drucks und der längeren Anpassung des Materials an diesen Druck i.d.R. die Vorprüfung. Eine entsprechende Speicherung des Abwassers muss somit über einen längeren Zeitraum gegeben sein, als dies mit niedrigerem Prüfdruck der Fall wäre.

Eine Anhebung des Drucks fand beispielsweise an der Druckleitung in Wielenbach statt. Zu diesem Zeitpunkt des Forschungsvorhabens wurde noch keine Anpassung der Leckage vorgenommen, die Prüfung wurde demnach mit einer 1/10 Leckage durchgeführt, obwohl die Leitung einen Durchmesser von DN200 aufweist. Die Druckdifferenz in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens wäre bei Anwendung der angepassten Leckage in jedem Fall größer ausgefallen.

Der Prüfdruck wurde aufgrund des hydrostatischen Drucks von 1,89 bar auf den Mindestdruck am Tiefpunkt der Druckleitung (Pumpwerk), auf 3 bar festgesetzt. Die Luft am Hochpunkt der Druckleitung wurde somit um 1,11 bar vorkomprimiert. Der vorhandene Luftanteil lag bei 1,22 %, der Druckabfall in der Hauptprüfung bei 0,16 bar. Um den Einfluss der Luft zu verringern, konnte in Absprache mit dem Netzbetreiber der Prüfdruck auf 3,5 bar angehoben werden. Vor Durchführung der Prüfung mit erhöhtem Prüfdruck erfolgte eine Abwasserförderung, da das vorhandene Rückstauvolumen erreicht war. Der bei der erneuten Prüfung vorhandene Luftanteil betrug mit 1,71 % etwas mehr als in der vorangegangenen Druckprüfung. Trotzdem stellte sich mit dem erhöhten Prüfdruck von 3,5 bar gegenüber der vorangegangenen Prüfung ein größerer Druckabfall von 0,23 bar ein.

In Abbildung 41 ist der Druckverlauf in der Hauptprüfung mit einem Prüfdruck von 3,0 bar bzw. 3,5 bar in Wielenbach dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass der Druckverlust in der Druckprüfung mit 3,5 bar stärker ausfällt als mit 3,0 bar. Die Kurve des Druckverlaufs verläuft mit erhöhtem Prüfdruck steiler, was trotz des etwas höheren Luftanteils aufgrund der stärkeren Luftkompression auf einen geringeren Einfluss der Luft zurückzuführen ist.

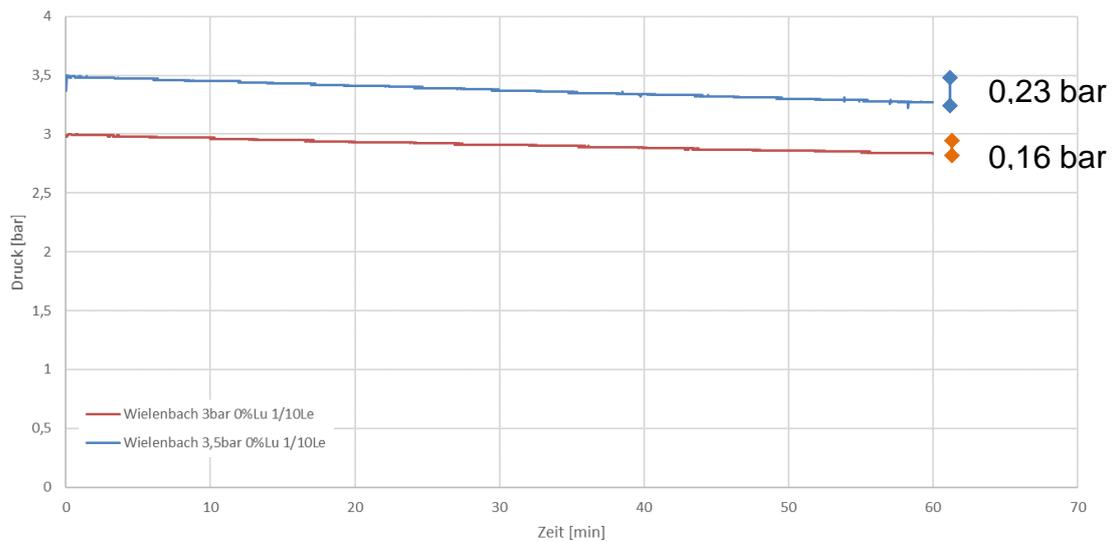


Abbildung 41: Druckverlauf der Hauptprüfungen in Wielenbach mit 3,0 bar Prüfdruck bzw. auf 3,5 bar erhöhtem Prüfdruck mit 1/10-Leckage

Die Beispiele verdeutlichen, wie unterschiedlich der zulässige Luftanteil bei unterschiedlichen Prüfdrücken und Leitungsverläufen sein kann. Daher sind die Berechnungen mittels Simulationstool von entscheidender Bedeutung. Bei den für Abwasserdruckleitungen typischen niedrigen Betriebsdrücken ist es essentiell, die in der Leitung vorhandenen Luftanteile zu kennen und zu bewerten. Andernfalls können vorhandene Leckagen leicht durch zu hohe Luftanteile überdeckt werden. Daher ist der maximal zulässige Luftanteil einzuhalten – ist dies nicht ohne Weiteres möglich, stellt die Anhebung des Prüfdrucks nach Kap. 4.1.5 eine Möglichkeit dar, die Prüfung dennoch durchzuführen. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht bei allen Leitungen möglich. Im Simulationstool werden bei Eingabe eines erhöhten Prüfdrucks automatisch die erhöhten zulässigen Luftanteile berechnet und ausgegeben.



5.4 Verifizierung der Ergebnisse der Simulation

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Vielzahl an Druckprüfungen, in Betrieb befindlicher Druckleitungen, mit gezielter Variation der Luftanteile und teilweise gezielter Variation der Prüfdrücke durchgeführt. Die Variationen wurden durchgeführt, um vertiefte Erkenntnisse zu den Druckprüfungen zu gewinnen und eine Vielzahl an Messdaten zu generieren. Mithilfe dieser realen Messdaten konnte die entwickelte Simulation überprüft werden. Da die Berechnung des leitungsindividuellen Grenzwerts für das HSA-Normalverfahren auf den unter Kap. 4.1 hergeleiteten physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht, war es notwendig, die simulierten Ergebnisse anhand der Ergebnisse der Druckprüfungen an realen Druckleitungen zu überprüfen.

Im Anschluss konnte das verifizierte Simulationstool verwendet werden, um im Vorfeld von Druckprüfungen bereits Erkenntnisse zu gewinnen und interessante Variationen festzulegen. Der tatsächlich gemessene Druckabfall der Hauptprüfung kann durch die theoretische Simulation bestätigt werden. Zusätzlich können anhand verschiedener Luftanteile die dazugehörigen theoretischen Druckabfälle simuliert werden. Der Luftanteil kann bis zur Überdeckung einer Leckage gesteigert werden. Dieser Ansatz kann bei realen Prüfungen an den Beispielleitungen aus betrieblichen Gründen – v.a. aufgrund der maximalen Dauer einer Außerbetriebnahme – nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt werden.

Die Verifizierung der Simulation anhand vorhandener Messdaten von Druckprüfungen in Betrieb befindlicher Abwasserdruckleitungen ist in den folgenden Abschnitten für das HSA-Normalverfahren (siehe Kap. 5.4.1) sowie für den 20-Min Test (siehe Kap. 5.4.2) zusammengefasst. Zum besseren Verständnis sind die Gegenüberstellungen der Ergebnisse der Druckprüfungen und der Simulation nach Prüfverfahren getrennt. Alle relevanten Abbildungen dieses Kapitels sind zur besseren Lesbarkeit dem Anhang beigelegt.

Eine detaillierte Zusammenstellung aller Ergebnisse erfolgt v.a. in Kap. 7.

5.4.1 Verifizierung des HSA-Normalverfahrens

Der Druckabfall des HSA-Normalverfahrens ist im Idealfall von Effekten der Materialdehnung infolge der Druckaufbringung in der Vorprüfung bereinigt. In Kap. 5.4.1.2 sind die gemessenen Druckabfälle in der Hauptprüfung aller Druckprüfungen nach dem HSA-Normalverfahren ohne Leckage aufgetragen. Die Verifizierung der Ergebnisse der Simulation kann durch Gegenüberstellung der berechneten Druckabfälle mit den an realen Druckleitungen gemessenen Druckabfällen erfolgen. In den nachfolgenden Abbildungen wird der gemessene Druckabfall in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens infolge einer künstlicher Leckage an realen Druckleitungen mit dem berechneten Druckabfall der Simulation verglichen. Grundlage der Simulation sind neben den Leitungseigenschaften die tatsächlich gemessenen Wasserverlustvolumina und Luftanteile.

5.4.1.1 HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckage

In Abbildung 42 sind die Ergebnisse aller Prüfungen nach dem HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckage abgebildet. Die Abbildung enthält die gemessenen und simulierten Druckabfälle in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens sowie den rechnerisch ermittelten maximal zulässigen Druckabfall zum Bestehen der Dichtheitsprüfung. Des Weiteren ist der in der Druckleitung zum Zeitpunkt der Prüfung vorhandene Luftanteil sowie der maximal zulässige Luftanteil für die Durchführung der Hauptprüfung dargestellt.

Die Aufstellung der Ergebnisse sämtlicher Prüfungen nach dem HSA-Normalverfahren, inkl. Druckprüfungen mit realer Leckage ist für die Bewertung der Simulation nicht zielführend. Das aus einer realen Leckage austretende Wasservolumen ist unbekannt und findet somit (fälschlicherweise) keine Berücksichtigung in der Simulation. Für eine Auflistung sämtlicher durchgeführter Prüfungen nach dem HSA-Normalverfahren mit künstlichen und realen Leckagen wird auf den Anhang 3 verwiesen.

In der Graphik ist mit dem blauen Balken der gemessene Druckabfall während der Druckprüfung aufgetragen, während der orangene Balken den mittels Simulation errechneten Druckabfall wiedergibt. Der Unterschied der beiden Balken nimmt mit zunehmendem Luftanteil ab. Fehler bei der Bestimmung des Luftanteils führen durch den großen Einfluss des Luftvolumens zu Differenzen zwischen den simulierten und den gemessenen Druckabfällen. Da bei geringen Luftanteilen der Einfluss aus Rohrdehnung und Wasserkompression zum Großteil dem Druckabfall infolge Leckage entgegenwirkt, können geringe Abweichungen vom ohnehin sehr kleinen Luftanteil das Ergebnis der Simulation stark verfälschen. Besonders im Bereich unter 2 % Luft ist zu erkennen, dass es zu Abweichungen des simulierten und tatsächlichen Druckabfalls kommt.



Zusätzlich zu den Druckabfällen ist in Abbildung 42 jeder Druckleitung ein individueller durch die Simulation errechneter maximal zulässiger Druckabfall zugewiesen. Eine individuelle Betrachtung jeder Druckleitung ist erforderlich, da die Leitungseigenschaften (Rohrdurchmesser, Wandstärke, Leitungsführung) großen Einfluss auf die Berechnung des Druckabfalls haben. Der maximal zulässige Druckabfall tritt bei dem in der Druckabfallprüfung errechneten Luftanteil und einer exakt eingestellten angepassten Leckage auf.

Deutlich sichtbar ist, dass in nahezu allen Fällen der simulierte, sowie der gemessene Druckabfall unter dem maximal zulässigen Druckabfall liegen. Durch eine Verringerung des Durchflusses der Leckage aufgrund von Feinanteilen des Abwassers wurde in allen Druckprüfungen das zulässige Gesamtvolumen der Leckage unterschritten. Deshalb fällt der Druckabfall geringer aus, als maximal erlaubt. Mittels Simulation ist das aus der Leckage ausgetretene Wasservolumen berücksichtigt worden. Mit diesem Wasservolumen errechnet sich der Druckabfall der Simulation. Der simulierte und der tatsächliche Druckabfall liegen mit Ausnahme von fünf Fällen immer entweder über oder unter dem Grenzwert des Druckabfalls. Bei diesen fünf Fällen liegt der simulierte und der tatsächliche Wert sehr nahe zusammen, der Grenzwert dazwischen.

Bei Luftanteilen unter 2 % liegt die mittlere Abweichung des simulierten Druckabfalls gegenüber dem tatsächlichen Druckabfall bei lediglich 0,08 bar. Für Anteile über 2 % verringert sich die mittlere Abweichung sogar auf 0,03 bar.

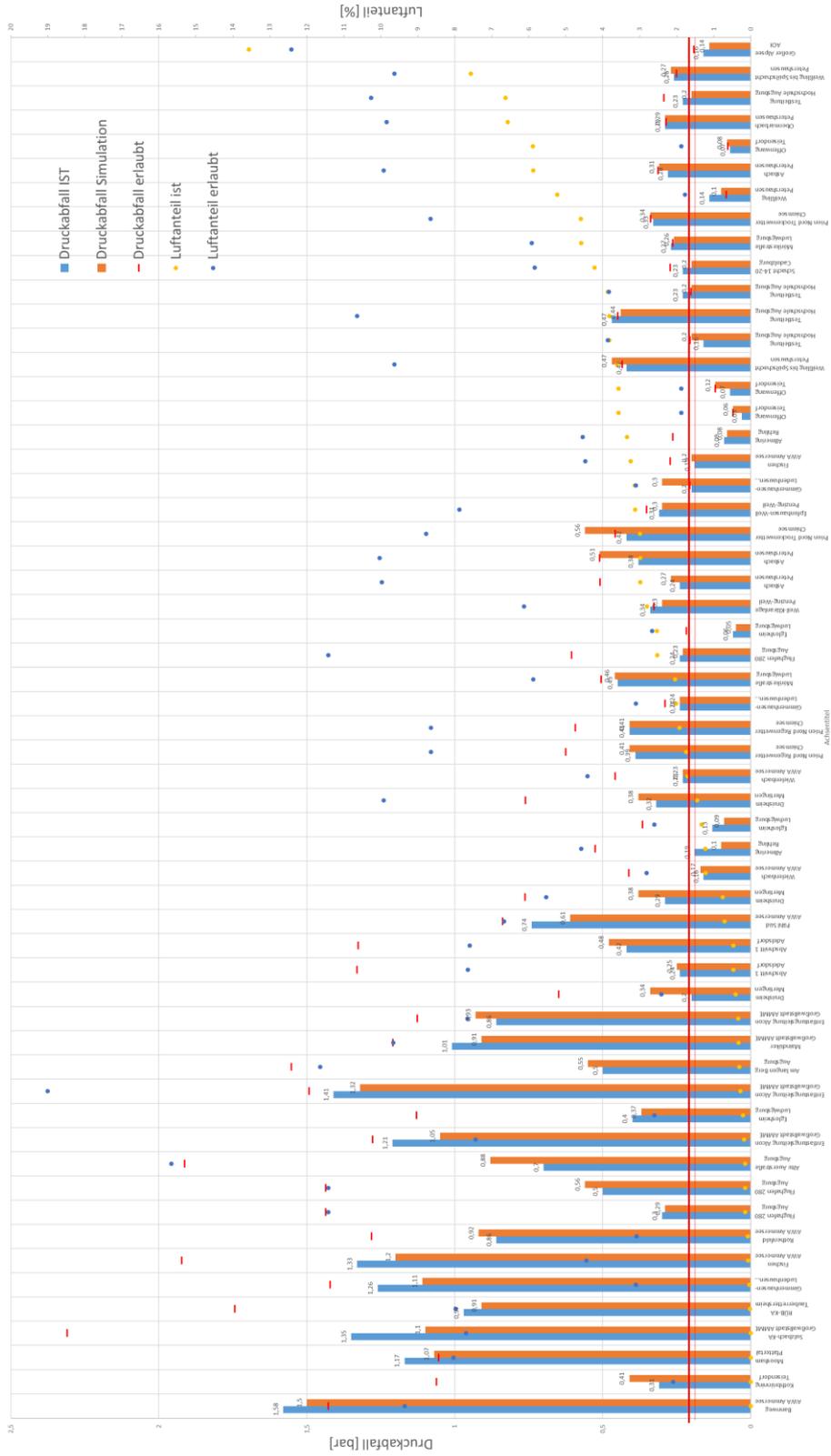


Abbildung 42: Vergleich der gemessenen und simulierten Druckabfälle aller durchgeführten Hauptprüfungen des HSA-Normalverfahrens mit künstlicher Leckage in Abhängigkeit der Luftanteile (bereinigt um reale Leckagen); siehe auch Anhang 4

Auch bei Luftanteilen, welche größer als der maximal erlaubte Luftanteil sind, kann mittels Simulation ein Druckabfall errechnet werden. Dieser liegt ebenso wie der gemessene Druckabfall unter der Grenze von 0,20 bar, bewertet somit richtigerweise eine undichte Druckleitung dicht. Diese Druckprüfung mit einem überschrittenen erlaubten Luftanteil wäre in der Praxis durch das Nichtbestehen der Druckabfallprüfung abgebrochen worden. Die Prüfung zeigt jedoch, dass auch in diesem Bereich der Druckabfall der Simulation sehr gut mit den gemessenen Druckabfällen übereinstimmt. Der Aussage über den Druckabfall aus der Simulation kann damit für die tatsächlich durchgeführten Druckprüfungen vertraut werden. Mögliche Abweichungen werden durch einen Sicherheitsaufschlag des vorhandenen Luftanteils (siehe Kap. 8.1.2) beachtet.

In Abbildung 43 ist die Abweichung des berechneten Druckabfalls und des tatsächlich gemessenen Druckabfalls aller Druckprüfungen aus Abbildung 42 dargestellt. Es geht deutlich hervor, dass Abweichungen über 0,15 bar nur drei Mal vorkommen. Die Mehrheit von 39 Prüfungen weist eine Differenz von maximal 0,06 bar auf. Bei diesen Unterschieden handelt es sich um vernachlässigbare geringe Abweichungen.

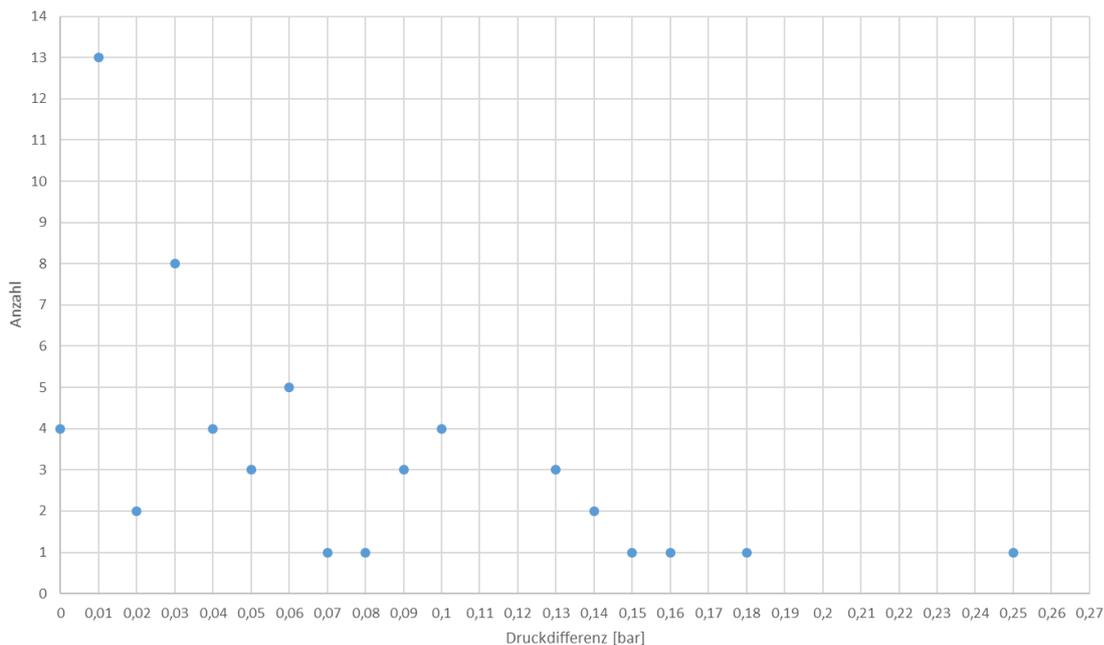


Abbildung 43: Druckdifferenz zwischen tatsächlich gemessenen und simulierten Druckabfällen



5.4.1.2 HSA-Normalverfahren ohne künstliche Leckage

Nachdem in Abbildung 42 die Druckabfälle der Druckprüfungen nach dem HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckage vorgestellt wurde, zeigt die folgenden Abbildung 44 (siehe auch Anhang 6) die entsprechenden Druckprüfung ohne Leckagen. Diese sind ebenfalls bereinigt um diejenigen Druckprüfungen, welche reale Leckagen aufwiesen. Durch den unbekanntem Wasseraustritt aus einer realen Leckage kann dieser keine Berücksichtigung in der Simulation finden und würde diese verfälschen. Diese Druckprüfungen sind somit nicht zur Verifikation der Simulation geeignet. Zur Vollständigkeit wurden die Ergebnisse sämtlicher Druckprüfungen ohne künstliche Leckage inklusive der Druckprüfungen mit realer Leckage in Anhang 5 zusammengestellt.

In der Simulation ist für den Fall einer Druckprüfung ohne Leckage, aufgrund der Idealisierung der in der Vorprüfung abgeklungenen Rohrdehnung, der Druckabfall gleich Null. Daher wird in Abbildung 44 kein simulierter Druckabfall dargestellt.

Trotzdem wurden, wie in Abbildung 44 dargestellt, in der Realität Druckabfälle registriert. Es handelte sich um die nicht abgeklungene Rohrdehnung, welche vermutlich durch eine Verlängerung der Vorprüfung hätte eliminiert werden können. Für eine Bewertung der Dichtheit muss der vorhandene Druckabfall (blauer Balken) mit dem maximal zulässigen Druckabfall (roter Strich) verglichen werden. Der zulässige Druckabfall sinkt richtigerweise mit zunehmenden Luftvolumen, durch den abmindernden Einfluss der Luft. Die Druckprüfungen wurden aufsteigend nach vorhandenem Luftanteil (orange Markierung) sortiert. Umgekehrt sinkt der maximal zulässige Druckabfall von links nach rechts. Ebenso nimmt der real gemessene Druckabfall bei den Druckprüfungen dichter Abwasserdruckleitungen mit zunehmendem Luftanteil ab. Dies bestätigt den aus der Simulation hervorgehenden Grenzwert für den maximal zulässigen Druckabfall. Der Druckabfall infolge nicht vollständig abgeklungener Materialdehnung wird ebenfalls durch die während der Druckprüfung in der Druckleitung vorhandene Luft verringert.

Es ist deutlich zu erkennen, dass korrekterweise keine dichte Leitung bei der Druckprüfung als undicht eingestuft worden ist. Der gemessene Druckabfall der Druckprüfungen ist in allen Fällen deutlich unterhalb des jeweiligen maximal zulässigen Druckabfalls.

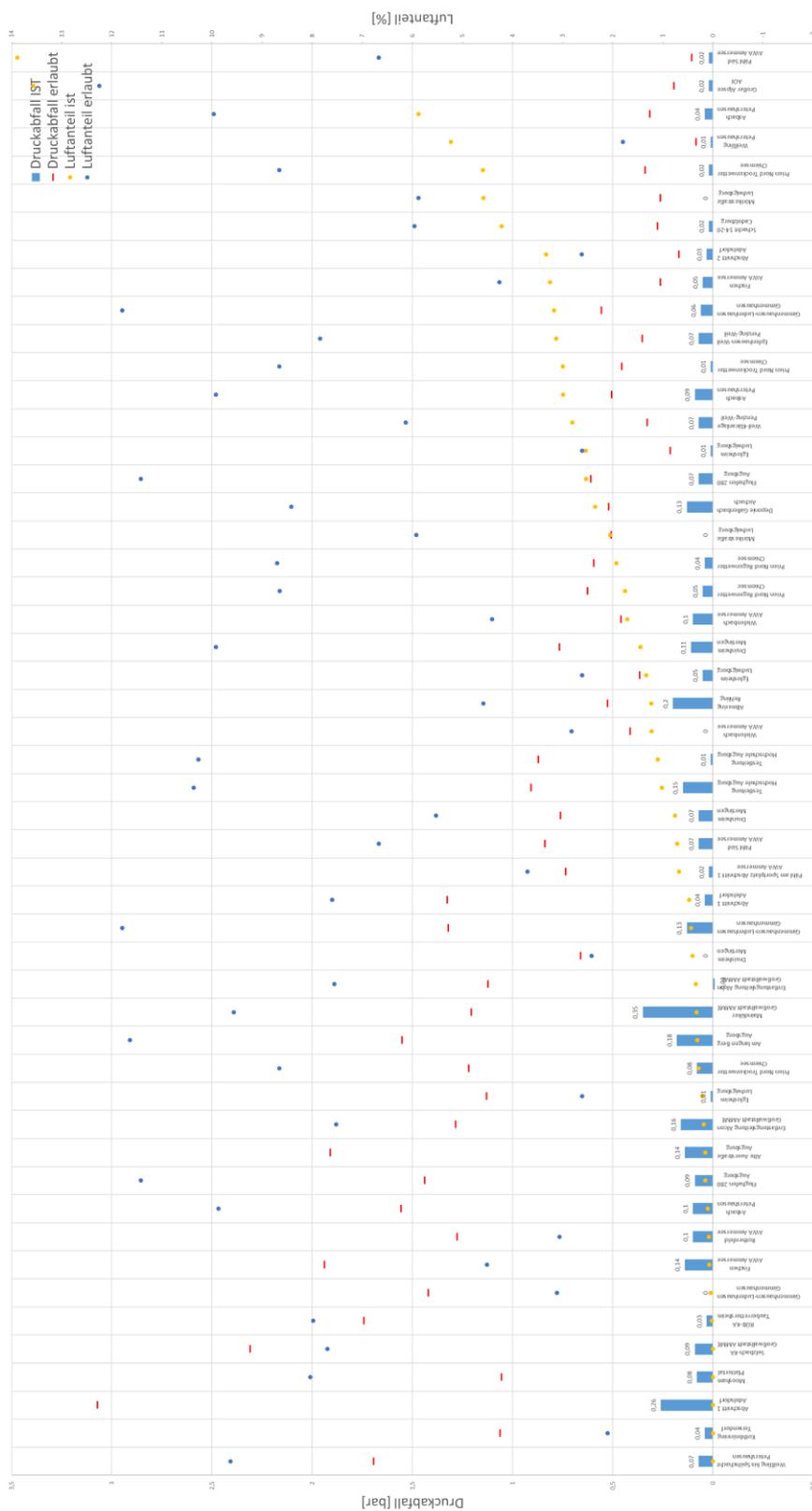


Abbildung 44: Gemessene Druckabfälle sowie berechnete maximal zulässige Druckabfälle (Grenzwert) aller durchgeführten Hauptprüfungen des HSA-Normalverfahrens ohne künstliche Leckage, bereinigt um reale Leckagen, mit leitungsindividuellem Grenzwert (siehe Anhang 6)



Aus den 51 in Abbildung 44 dargestellten Druckprüfungen lag der gemessene Druckabfall nur bei zwei Prüfungen über 0,2 bar anstelle der zu erwartenden 0,0 bar. Elf der Prüfungen weisen eine Abweichung über 0,1 bar auf. Bei sechs Prüfungen wurde auch an der realen Leitung kein Druckabfall in der Hauptprüfung gemessen (= 0 bar). Hier stimmt der Messwert mit der Simulation exakt überein. Bei den meisten Prüfungen handelt es sich nur um geringe Abweichungen.

Die bestehenden Abweichungen zwischen Simulation und gemessenem Druckabfall können für Luftanteile über 0,3 % als sehr gering eingestuft werden. Die sich ergebenden Abweichungen bei geringeren Luftanteilen sind nicht gravierend, fallen jedoch aufgrund des geringen Einflusses der Luft und somit großen Einflusses aus Materialdehnung, welche Unsicherheiten bietet, größer aus. Um das aus Abweichungen von insbesondere geringen Luftanteilen entstehende Fehlerpotential zu verringern, wird der Luftanteil für die Berechnung des Grenzwerts künstlich erhöht (siehe Kap. 8.1.2).



5.4.2 Verifizierung des 20-Min Tests

Die Verifizierung der Simulation des 20-Min Tests erfolgt analog zu der des HSA-Normalverfahrens. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der 20-Min Tests mit, sowie ohne Leckage dargestellt.

5.4.2.1 20-Min Test mit künstlicher Leckage

In Abbildung 45 (siehe auch Anhang 8) sind die Druckdifferenzen aller durchgeführten 20-Min Tests mit künstlicher Leckage aufgeführt. Auf die Darstellung von Druckprüfungen mit realen Leckagen wird verzichtet, da diese wie schon beim HSA-Normalverfahren durch das unbekannte ausgetretene Wasservolumen keine korrekte Simulation des Druckabfalls zulassen. Zur Vollständigkeit ist die Zusammenstellung aus Abbildung 45 (siehe auch Anhang 8) zusätzlich der Prüfungen mit realen Leckagen dem Anhang 7 beigelegt.

Laut Simulation sollte sich bei einer perfekten Durchführung des Prüfverfahrens nach dem 20-Min Test keine Druckdifferenz einstellen, da durch die Zuführung des gleichen Wasservolumens welches der Leitung durch die Leckage entnommen wird keine Änderung ergibt. Wie schon bei den künstlichen Leckagen des HSA-Normalverfahrens kann es vorkommen, dass sich das Ventil mit Feinanteilen des Abwassers zusetzt und somit weniger Wasservolumen durch die künstliche Leckage austreten kann. Ebenso ist es möglich, dass sich die Leckage im Verlauf der Druckprüfung durch Auflösen einer vorherigen Verblockung wegen der Druckstöße beim Nachpumpen vergrößert. Eine weitere Erklärung für die Differenzen zwischen der Simulation und den realen Ergebnissen der Druckprüfung ist, dass es sich um relativ kleine Wasservolumina handelt, welche der Druckleitung eingebracht bzw. entnommen werden. Effekte aus Messungenauigkeiten, Messfehlern der Wasseruhr bei Start und Ende jedes Nachpumpvorgangs, sowie dem Materialverhalten nehmen einen entsprechend großen Einfluss auf das Ergebnis der Druckprüfung, welche in der Simulation unberücksichtigt bleiben.

Analog zum HSA-Normalverfahren sinkt die Druckdifferenz durch größere Luftanteile. Dies ist sehr gut in Abbildung 45 zu erkennen.

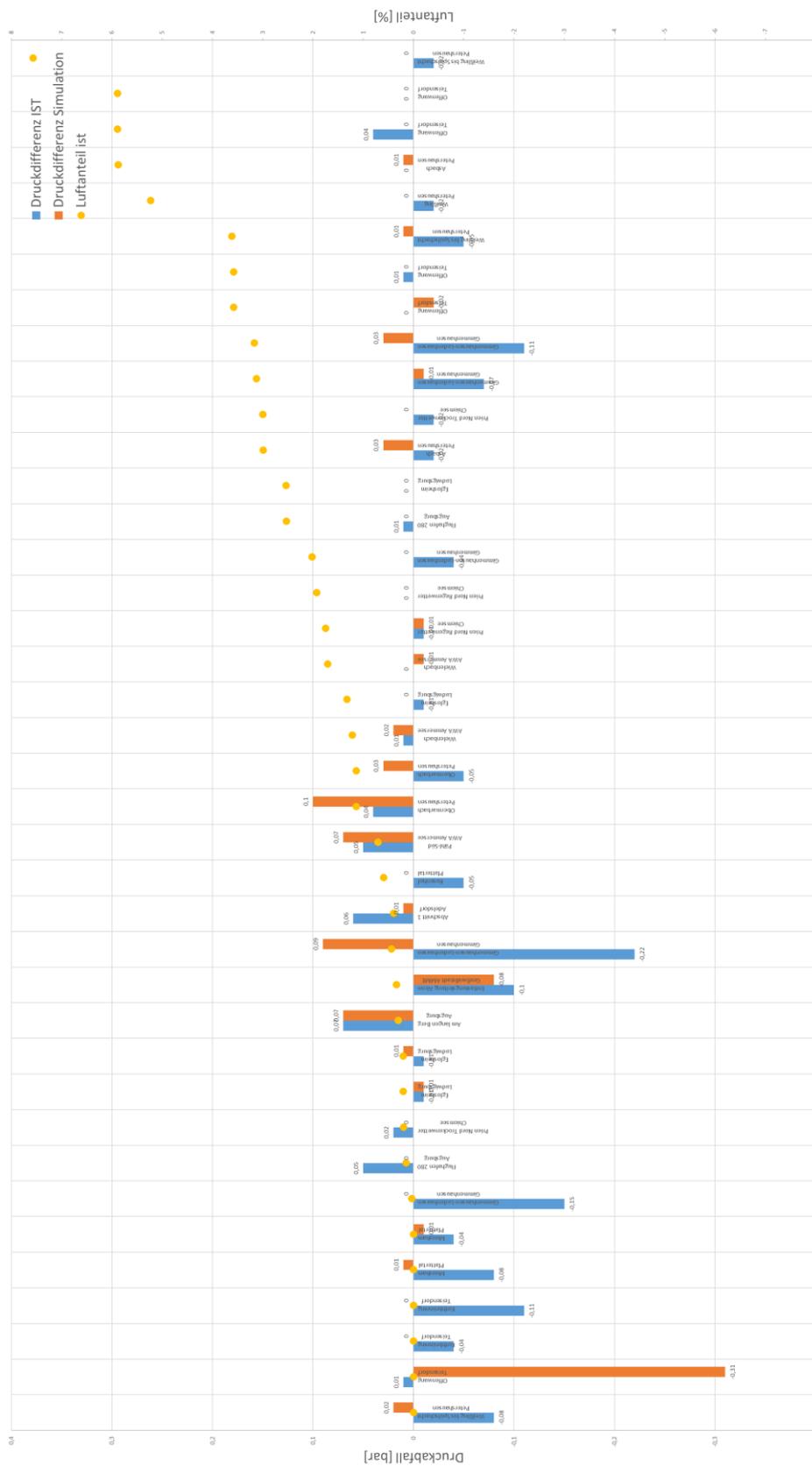


Abbildung 45: Gemessener sowie simulierter Druckanstieg aller durchgeführten 20-Min Tests, mit künstlicher Leckage (bereinigt um reale Leckagen); siehe auch: Anhang 8



In 14 Fällen ist bei den realen Prüfungen auch tatsächlich kein Druckanstieg aufgetreten. In 11 Fällen ist bei der realen Prüfung ein geringer Druckanstieg von maximal 0,07 bar gemessen worden. In allen anderen Fällen ist der gemessene Druck während der Druckprüfung gefallen. Bei keiner der aufgeführten Prüfungen mit künstlicher Leckage kam es demnach zu einem Druckanstieg von 0,15 bar (Kriterium für dichte Leitung). Somit wurde korrekterweise keine der Leitungen als dicht eingestuft. Der maximal aufgetretene Druckanstieg von 0,07 bar liegt deutlich unterhalb des Dichtheitskriteriums.

Von den simulierten Ergebnissen hat sich bei 13 Prüfungen ein geringfügiger Druckanstieg von maximal 0,1 bar ergeben. Bei sechs Prüfungen entspricht der gemessene Wert exakt dem simulierten Wert.

Wie eingangs erwähnt, kann sich die künstliche Leckage während des 20-Min Tests verstellen. Da v.a. zu Beginn des Projekts bei vielen Prüfungen mit künstlicher Leckage diese nicht aufgefangen und protokolliert wurde, entspricht das in der Simulation angenommene Leckagevolumen nicht dem tatsächlichen Leckagevolumen bei den realen Prüfungen. Aus diesem Grund kommt es in Abbildung 45 in vielen Fällen zu größeren Abweichungen zwischen simuliertem und tatsächlichem Druckabfall bzw. -anstieg.

In den Fällen, in denen die Menge der künstlichen Leckage protokolliert bzw. aufgefangen wurde, stimmen die Ergebnisse des simulierten und tatsächlichen Druckabfalls bzw. -anstiegs hingegen sehr gut überein (siehe Abbildung 45: Am langen Berg, Alcon, Ludwigsburg Eglosheim, Pähl Süd, Wielenbach, Prien Nord RW).



5.4.2.2 20-Min Test ohne künstliche Leckage

Die Anwendung des 20-Min Tests wird als Prüfverfahren immer ohne künstliche Leckage zur Anwendung kommen. In Abbildung 46 (siehe auch Anhang 10) sind die Ergebnisse aller 20-Min Tests ohne künstliche Leckage abgebildet. Leitungen mit realen Leckagen werden in Abbildung 46 bzw. Anhang 10 nicht dargestellt. Aus Vollständigkeitsgründen sind die Ergebnisse aller 20-Min Tests ohne künstliche Leckage inklusive der Prüfungen mit realer Leckage in Anhang 9 beigelegt.

Durch das Nachpumpen des der zulässigen Leckage äquivalenten Wasservolumens steigt der Druck in der Druckleitung während des 20-Min Tests, wenn keine unzulässige Leckage vorhanden ist. Mittels Simulation kann ein leitungsspezifischer Druckanstieg berechnet werden. In Abbildung 46 ist deutlich der Zusammenhang zwischen Luftanteil und Druckanstieg zu erkennen. Die Prüfungen sind nach vorhandenem Luftanteil in der Leitung aufsteigend sortiert. Ein großer Luftanteil mindert den Druckanstieg infolge Wasserzugabe stärker ab, als ein kleiner Luftanteil. Druckanstiege in Druckleitungen mit einem Luftanteil gegen 0 % werden zum Großteil von der Dehnung des Rohres und der Kompression des Wassers kompensiert. Da die Dehnung des Rohrs, sowie die Wasserkompression einen Druckanstieg wesentlich geringer abmindern können, als die Kompression von Luft, sind bei geringeren Luftanteilen größere Druckanstiege zu erwarten. Die Abschätzung der Dehnung des Rohrmaterials wird auf Grundlage des Rohrquerschnitts, sowie des E-Moduls getroffen. Mit zunehmendem Alter verändert sich das E-Modul der Rohrwerkstoffe, sodass der nahezu ausschließlich über die Rohrdehnung abgeminderte Druckanstieg der Simulation sich von dem tatsächlichen Druckanstieg unterscheidet. Dies ist deutlich bei den Druckanstiegen der Druckprüfungen mit einem Luftanteil unter 1 % zu beobachten. In den meisten Fällen überschätzt die Simulation den Druckanstieg. Dies wäre auf einen tatsächlich höheren E-Modul des Rohrmaterials zurückzuführen, als in der Simulation angenommen. Da beim 20-Min Test ein fester Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit infolge eines Druckanstiegs vorgesehen ist (siehe Kap. 7.4.1), bietet ein geringerer gemessener Druckanstieg als simulierter Druckanstieg eine zusätzliche Sicherheit. Speziell bei großen vorhandenen Luftvolumina stimmen die Ergebnisse der Simulation und der Messwerte gut überein. Bei kleinen Luftanteilen sind große Druckanstiege möglich. Bei nur zwei Prüfungen lag der gemessene Druckanstieg um 0,02 bar über dem simulierten Wert. In allen anderen Fällen lag der simulierte Wert über dem gemessenen Druckanstieg und bietet somit eine zusätzliche Sicherheit. In einigen Fällen stimmt der gemessene und simulierte Druckanstieg sogar exakt überein.

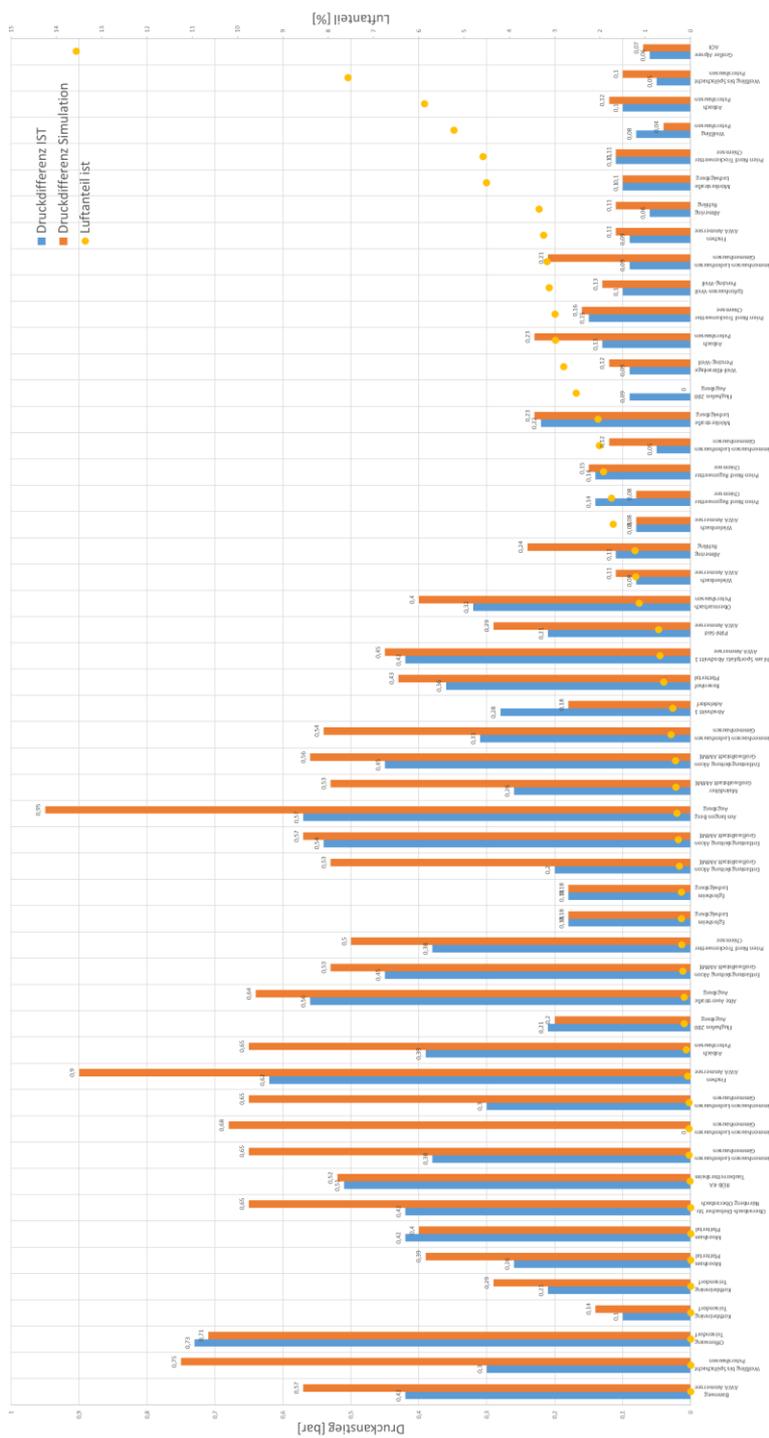


Abbildung 46: Gemessener sowie simulierter Druckanstieg aller durchgeführten 20-Min Tests, ohne künstliche Leckage (um reale Leckagen bereinigt); siehe Anhang 10



6 Auswertung der Ergebnisse aus der Luftanteilsberechnung

Da der vorhandene Luftanteil innerhalb der jeweiligen Druckleitung einen erheblichen Einfluss auf den Leckage-induzierten Druckabfall während einer Druckprüfung nimmt (siehe Kapitel 4.1.6), sollen im Folgenden die Ergebnisse der Luftanteilsberechnungen genauer beleuchtet werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden insgesamt 46 in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen, bzw. Leitungsabschnitte im Hinblick auf eine mögliche Durchführung von Druckprüfungen untersucht. Von 46 möglichen Prüfstrecken konnte in vier Fällen kein Prüfdruck aufgebaut werden, sodass sich die Durchführung einer Druckprüfung unmöglich gestaltete. Die Ursache wurde dabei in allen Fällen auf große Undichtigkeiten der Leitung oder des Absperrorgans zurückgeführt.

Somit konnten an insgesamt 42 in Betrieb befindlichen Druckleitungen 135 Druckprüfungen nach HSA-Normalverfahren und 108 Druckprüfungen nach 20-Min-Test durchgeführt werden.

6.1 Auffälligkeiten und Fehlerquellen bei der Berechnung vorhandener Luftanteile

Die Berechnung des vorhandenen Luftanteils erfolgt im HSA-Normalverfahren über die Druckabfallprüfung, bzw. den darauffolgenden Aufpumpvorgang. Da an den 42 Prüfstrecken mehrere Druckprüfungen sowie Aufpump- und Ablassvorgänge bei verschiedenen Luftzuständen durchgeführt wurden, kann der Luftanteil über mehrere Eingangswerte berechnet werden.

Auf Grundlage sämtlicher Prüfprotokolle wurden alle möglichen Luftanteilsberechnungen der jeweiligen Leitung bei entsprechendem Luftzustand ausgewertet, um die Streuung der Ergebnisse zu ermitteln. Insgesamt wurden 468 Luftanteilsberechnungen für 76 verschiedene Luftzustände an 42 Prüfstrecken durchgeführt.

In Anhang 11 sind die Ergebnisse sämtlicher berechneten Luftanteile graphisch zusammengestellt. Des Weiteren wurde ein Mittelwert sämtlicher berechneten Luftanteile ermittelt sowie der tatsächlich für die Auswertung der Druckprüfungen gewählte Luftanteil markiert. Zur besseren Anschaulichkeit wurden die Ergebnisse zudem in Gruppen für gewählte Luftanteile zwischen 0-2 %, 2-4% und über 4% unterteilt.



6.1.1 Fehlerquellen in der Luftanteilsberechnung

Bei der Berechnung der 468 Luftanteile stellten sich einige Ergebnisse als kritisch dar. Bei der anschließenden Untersuchung dieser Ergebnisse konnten folgende Fehler bzw. Fehlerquellen identifiziert werden:

- Negative Luftanteile
- Fehler durch Druckschwankungen und Messungenauigkeiten
- Fehler durch Messungenauigkeiten bei der Ermittlung der Wassermengen
- Falsche Annahme der Leitungseigenschaften

Eine ausführliche Beschreibung und Erläuterung der genannten Fehler bzw. Fehlerquellen kann dem Anhang 12 entnommen werden.

Die kritischen Ergebnisse der Zusammenstellung aus Anhang 11 wurden daraufhin nochmals auf die beschriebenen Fehlerquellen untersucht. In einigen Fällen stellte sich heraus, dass der Luftanteil über eine sehr kleine Druckdifferenz berechnet wurde. Des Weiteren wurde in wenigen Fällen der hydrostatische Druck fälschlicherweise überschätzt. Offensichtliche Messungenauigkeiten wurden ebenfalls in wenigen Fällen festgestellt.

Aus diesem Grund wurden insgesamt 27 Berechnungsergebnissen eliminiert und negative Luftanteile auf 0 % gesetzt. Die bereinigte Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse befindet sich in Anhang 13.

6.1.2 Unterschiede in der Luftanteilsberechnung durch Aufpump- und Ablassvorgängen

Neben den in Anhang 12 beschriebenen Fehlerquellen konnte durch die Auswertung der berechneten Luftanteile eine weitere Besonderheit festgestellt werden.

Dabei wurde an Kunststoffleitungen mehrfach beobachtet, dass bei gleicher Druckdifferenz und gleichem Druckniveau im Aufpumpvorgang ein größeres Wasservolumen eingebracht wird, als in der entsprechenden Druckabfallprüfung abgelassen werden muss. Daher fallen die Ergebnisse in der Luftanteilsberechnung für einen Druckablassvorgang geringer aus als für den darauffolgenden Aufpumpvorgang. Laut Aussage der Firma „Rudolf Buck Rohrleitungsprüfung“ konnte dieses Verhalten auch in der Praxis an Trink- sowie Abwasserdruckleitungen beobachtet werden. Dieses Verhalten führt rechnerisch zu größeren Luftanteilen bei Berechnung auf Grundlage der Druckerhöhung.

Da das Verhalten bisher nur an PE-Leitungen aufgefallen war, wurde dieses in Rehling-Allmering (Leitungsmaterial PE 100) durch die wiederholte Durchführung



eines Druckablasstests und anschließenden Aufpumpvorgang bei gleichbleibendem Druckniveau verifiziert. Der nachfolgenden Tabelle 21 kann entnommen werden, dass der berechnete Luftanteil auf Grundlage des Druckablasstests geringer ausfällt als im Aufpumpvorgang, da geringere Wasservolumina bei ähnlichen Druckdifferenzen benötigt werden.

Tabelle 21: Ergebnisse der Luftanteilsberechnung anhand mehrfach durchgeführter Druckablasstests und Aufpumpvorgängen in Rehling-Allmering (PE 100)

Verfahren	Zusatzinfo	Druck 1 [bar] (rel.)	Druck 2 [bar] (rel.)	Wasservolumen [l]	Luftanteil [%]
Wasser einbringen	Aufpumpvorgang	2,49	3,01	2,52	1,14
Wasser einbringen		2,45	3,02	2,78	1,14
Wasser einbringen		2,46	2,98	2,52	1,11
Wasser ablassen	Druckablasstest	2,97	2,49	2,1	0,97
Wasser ablassen		3,01	2,45	2,5	1,00
Wasser ablassen		3,01	2,46	2,42	0,98

Einen Grund für diese Diskrepanz könnten bei Druckleitungen aus Kunststoff Unterschiede im Dehnungs- und Kompressionsverhalten liefern. Es wäre denkbar, dass sich das Rohrmaterial im Druckablasstest unter größerer Verzögerung zusammenzieht als es sich im Aufpumpvorgang ausdehnt, sodass eine geringere Ablassmenge für den selben Druckabfall benötigt wird.

Eine weitere Erklärung können Leckagen in der Leitung liefern. Liegen Undichtigkeiten vor, muss für einen Druckanstieg eine größere Wassermenge eingebracht werden, um die während des Aufpumpvorgangs ausströmende Wassermenge zu kompensieren. Im Druckablasstest wird hingegen weniger Wasser für den selben Druckabfall abgelassen, da während des Ablassvorgangs zusätzlich Wasser an der Undichtigkeit austritt.

Dieses Verhalten, in Bezug auf mögliche Leckagen, ist unabhängig vom Leitungsmaterial und konnte in Waltenhofen an einer Gussleitung (kaum Materialdehnung) bereits nachgewiesen werden. Anhand der Tabelle 22 wird deutlich, dass bei ähnlichen Druckdifferenzen im Druckablasstest geringere Wasservolumina als im Aufpumpvorgang abgelassen beziehungsweise aufgepumpt werden.

Tabelle 22: Ergebnisse der Luftanteilsberechnung anhand mehrfach durchgeführter Druckablasstests und Aufpumpvorgängen an undichter Leitung in Waltenhofen (GGG)

Verfahren	Zusatzinfo	Druck 1 [bar] (rel.)	Druck 2 [bar] (rel.)	Wasservolumen [l]	Luftanteil [%]
Wasser ablassen	Druckablasstest	1,8	1,4	2,5	0,006
Wasser ablassen		1,7	1,18	3,38	0,007
Wasser ablassen		1,8	1,23	3,7	0,007
Wasser einbringen	Aufpumpvorgang	1,22	1,82	4,45	0,014
Wasser einbringen		1	1,96	6,95	0,012
Wasser einbringen		1,1	1,87	5,63	0,013

Da die Leitung in Rehling-Allmering keine Undichtigkeiten aufweist und die Unterschiede zwischen den Luftanteilen an dichten Kunststoffleitungen aufgefallen ist,



wird jedoch vermutet, dass sich das Materialverhalten beim Aufpumpen und Druckablassen unterscheidet.

Zusammenfassend lässt sich auf Grundlage der im Forschungsprojekt durchgeführten Luftanteilsberechnungen feststellen, dass die beschriebenen Unterschiede insbesondere an PE-Leitungen auftreten. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass an PE-Leitungen bei der Durchführung des HSA-Normalverfahrens in den meisten Fällen der Aufpumpvorgang als ausschlaggebender Wert gewählt wird.

6.2 Streuung der berechneten Luftanteile

Im folgenden Kapitel wird die Streuung der Ergebnisse sämtlicher berechneten Luftanteile beleuchtet.

In Anhang 13 befindet sich ein Überblick über die Streuung sämtlicher bereinigter Ergebnisse von Luftanteilsberechnungen. Der gewählte vorhandene Luftanteil beruht dabei in den allermeisten Fällen auf dem Druckablass- bzw. dem Aufpumpvorgang in der Druckabfallprüfung des HSA-Normalverfahrens bzw. des 20-Min Tests. Da für das HSA-Normalverfahren vorgesehen ist, den Luftanteil ebenfalls durch den Druckablass- bzw. anschließenden Aufpumpvorgang zu ermitteln, können die gewählten, vorhandenen Luftanteile also repräsentativ für Ergebnisse der Luftanteilsberechnungen in zukünftigen Druckprüfungen gesehen werden.

Um zu verdeutlichen, wie groß die maximale Abweichung der berechneten Luftanteile vom gewählten, vorhandenen Luftanteil ausfallen kann, wurde zusätzlich das nachfolgende Balkendiagramm erstellt.

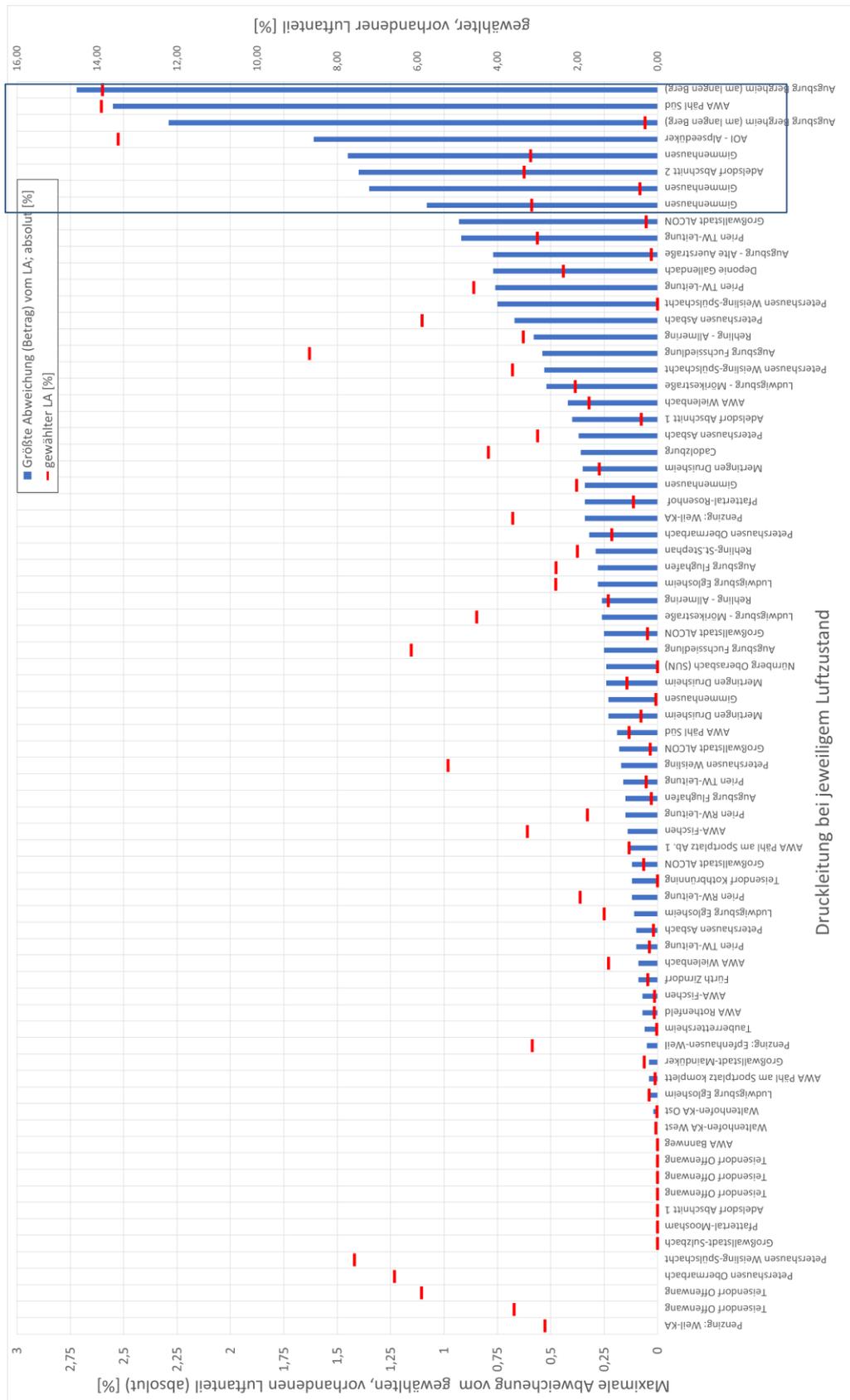


Abbildung 47: maximale Abweichung vom gewählten Luftanteil (Absolutwerte) sowie dazugehöriger gewählter Luftanteil



In Abbildung 47 wird die maximale Abweichung (absolut) der berechneten Luftanteile vom gewählten, vorhandenen Luftanteil durch die blauen Balken dargestellt. Der dazugehörige gewählte, vorhandene Luftanteil ist rot markiert.

Die Abbildung verdeutlicht, dass in 74 % aller Fälle die maximale Abweichung (absolut) vom gewählten Luftanteil unter 0,5 % liegt.

Eine Abweichung (absolut) von 1 % wurde lediglich in 8 Fällen überschritten (siehe Abbildung 47: blaue Markierung). In Bergheim, Pähl-Süd und am Alpseedüker lag der gewählte, vorhandene Luftanteil ohnehin weit über 10%. Dadurch kommt es zu starken Druckschwankungen während der Druckabfallprüfung. Es ist also nicht auszuschließen, dass derart große Abweichungen durch Messungenauigkeiten entstanden sind. In Bergheim handelt es sich zudem um eine sehr kleine Leitung ($V_L=0,22 \text{ m}^3$, $L=105,84 \text{ m}$). Daher mussten minimale Wassermengen mit der Handpumpe eingebracht werden. Da der Wasserzähler bei zu kleinen Wassermengen fehlerhafte Mengen anzeigen kann und die Handpumpe zusätzliche Ungenauigkeiten fördert, stellt dies die wahrscheinlichste Erklärung für die große Abweichung vom gewählten Luftanteil dar. In Gimmenhausen sowie Adelsdorf wurde noch der fehlerhafte digitale Wasserzähler eingesetzt (siehe Anhang 12). Die Abweichung der berechneten Luftanteile kann daher darauf zurückzuführen sein, dass die protokollierten Wassermengen in Gimmenhausen und Adelsdorf fehlerhaft sind.

Grundsätzlich lässt sich anhand der Abbildung feststellen, dass sich durch die Berechnung von Luftanteilen über Formel (30) und (31) (siehe Kap. 4.1.7) auch bei unterschiedlichen Druckniveaus und Druckdifferenzen durchaus einheitlich berechnen lässt, wie hoch der in der Druckleitung vorhandene Luftanteil ausfällt. Aufgrund der in Anhang 12 beschriebenen Fehlerquellen kann es zwar zu Abweichungen kommen, jedoch treten solche nur in seltenen Fällen auf.

7 Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen

Die Anwendung der in den vorherigen Kapiteln dieses Berichts beschriebenen Prüfverfahren an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen ist essentieller Bestandteil dieses Forschungsvorhabens. Die Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

Im Projektzeitraum wurden 155 Prüfungen auf Grundlage des HSA-Normalverfahrens durchgeführt sowie 108 Prüfungen des 20-Min Tests. Hier stand das HSA-Normalverfahren und die Entwicklung des 20-Min Tests im Vordergrund. Es wurden Prüfungen an den gebräuchlichen Durchmessern und Materialien durchgeführt. Diese umfassten die Materialien PE 80, PE 100, PVC, Asbestzement und Guss mit Außendurchmessern von 63 mm bis 500 mm. Reale Leckagen konnten entdeckt und teilweise durch abschnittsweises Prüfen einem Rohrabschnitt zugeordnet werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass von den annähernd 50 Leitungen lediglich drei Leitungen tatsächlich signifikante Schäden aufwiesen. In zwei Fällen haben die Netzbetreiber explizit um eine Prüfung gebeten, da an beiden Leitungen bereits Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden und deren Erfolg durch die Druckprüfung überprüft werden sollte. In einem Fall jedoch wurde die Undichtigkeit erst bei der Durchführung der Druckprüfung festgestellt. In einer Reihe von Druckprüfungen wurden Undichtigkeiten an Armaturen festgestellt, die jedoch behoben werden konnten. Es handelt sich zum einen um geringe Verluste, zum anderen entsteht durch Verluste an Armaturen i.d.R. kein Gefahrenpotential für die Umwelt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Beispielleitungen hauptsächlich durch Meldung der Netzbetreiber in das Forschungsvorhaben aufgenommen wurden, daher sind die Ergebnisse hinsichtlich der Schadensrate nicht zwingend repräsentativ.

Durch die durchgeführten Druckprüfungen wurden keine Schäden an den überprüften Druckleitungen verursacht.

Neben der Entwicklung der Prüfverfahren konnten Erkenntnisse über die Auswirkung von Luftspülungen und der Fortpflanzung von Druckstößen erlangt werden. Neben der Variation der Luftanteile wurde die Dauer der Vorprüfung sowie nach Möglichkeit die Variation des Prüfdrucks untersucht. Im Verlauf des Forschungsvorhabens wurden auch die zulässige Leckage (siehe Kap. 3.3.5) sowie die Grenzwerte der beiden Hauptprüfungen (HSA-Normalverfahren + 20-min Test - siehe Kap. 4.1.8 und 4.2) angepasst. Anhand der gewonnenen Ergebnisse konnte das Simulationstool entwickelt und verifiziert werden (siehe Kap. 5.4).

Die relevanten Abbildungen der folgenden Kapitel sind zur besseren Lesbarkeit zusätzlich im Anhang beigefügt.



7.1 Durchgeführte Dichtheitsprüfungen

Insgesamt liegen die Ergebnisse von Prüfungen an insgesamt 47 Druckleitungen bzw. Abschnitten nach dem HSA-Normalverfahren sowie nach dem 20-Min Test vor. Prüfungen konnten an folgenden in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen durchgeführt werden (in alphabetischer Reihenfolge):

- Adelsdorf, Zeckern Abschnitt 1
- Adelsdorf, Zeckern Abschnitt 2
- Aichach, Deponie Gallenbach
- Ammersee, Bannweg
- Ammersee, Fischen
- Ammersee, PADL1
- Ammersee, Pähl am Sportplatz
- Ammersee, Pähl am Sportplatz – Abschnitt 1
- Ammersee, Pähl Süd
- Ammersee, Rothenfeld
- Ammersee, Unering
- Ammersee, Wielenbach
- Augsburg, Alte Auerstraße
- Augsburg, Am langen Berg
- Augsburg, Flughafen 280
- Augsburg, Fuchssiedlung
- Augsburg, HS Testleitung
- Cadolzburg, Überleiter Fürth Schacht 14-20
- Chiemsee, Prien Nord Regenwetter
- Chiemsee, Prien Nord Trockenweiter
- Fürth, Zirndorf
- Füssen, Waltenhofen Kläranlage Leitung 1
- Füssen, Waltenhofen Kläranlage Leitung 2
- Großwallstadt, Alcon
- Großwallstadt, Maindüker
- Großwallstadt, Sulzbach Kläranlage
- Ludwigsburg, Eglosheim
- Ludwigsburg, Mörikestraße
- Mertingen, Druisheim
- Mintraching, Moosham
- Mintraching, Rosenhof
- Nürnberg, Oberasbach
- Obere Iller, Großer Alpsee
- Penzing, Epfenhausen-Weil



- Penzing, Weil-Kläranlage
- Petershausen, Asbach
- Petershausen, Obermarbach
- Petershausen, Weißling
- Petershausen, Weißling Spülschacht
- Rehling, Allmering
- Rehling, Au
- Rehling, St. Stephan
- Rott (bei Gimmenhausen), Gemeinde Reichling
- Schönau, St. Bartholomä
- Tauberrettersheim, RÜB-Kläranlage
- Teisendorf, Kothbrünning
- Teisendorf, Offenwang

Alle im Forschungsprojekt durchgeführten Druckprüfungen sind mit allen Kenndaten in einer Übersichtstabelle zusammengestellt. Diese befindet sich zur besseren Einsetzbarkeit und Lesbarkeit im Anhang 14 des Berichts. Insbesondere zu Beginn des Projektes wurde die eigens für das Projekt installierte Testleitung an der HSA für gezielte Untersuchungen verwendet. Durch den veränderten Fokus auf Leitungen mit größeren Durchmessern wurden im weiteren Verlauf des Vorhabens kaum weitere Prüfungen an der Testleitung vorgenommen (siehe Kap. 3.1). Die Vorstellung der Ergebnisse aller Druckprüfungen an realen Abwasserdruckleitungen erfolgt getrennt nach Prüfverfahren in den Kapiteln 7.3 (HSA-Normalverfahren) bzw. 7.4 (20-Min Test).

Die oben genannte Übersichtstabelle enthält außerdem die wichtigsten Informationen der geprüften Leitungen sowie den hydrostatischen Druck, Prüfdruck, Aussagen zu Leckage und zusätzlich eingebrachter Luft sowie zum Bestehen von Druckabfallprüfung und Hauptprüfung. Des Weiteren wird die Aussage des Prüfverfahrens über die Dichtheit der geprüften Druckleitung bewertet.

Die Leitungslängen der geprüften Beispielleitungen lagen zwischen 106 m (Testleitung HSA: 12 m) und annähernd 3.500 m. Somit kann auch eine große Bandbreite an Leitungslängen abgedeckt werden. Entsprechend bedingt durch die größeren Durchmesser ergeben sich Leitungsvolumina zwischen 0,22 m³ und 283,46 m³. Die Leitungsaußendurchmesser variierten zwischen 63 mm und 500 mm. Als Leitungsmaterialien wurden PE 80, PE 100, PVC, Asbestzement und Guss geprüft. Dies repräsentiert den Bestand an Druckleitungen in Bayern. Die Häufung eines Materials findet nach Erfahrungen dieses Forschungsprojekts regional durch Einflüsse der Zulieferer, des Ingenieurbüros, des Baujahrs sowie bereits vorhandener Leitungen statt.

Einige Druckleitungen wiesen einen Materialmix auf, konnten jedoch durch die Simulation gut eingeschätzt werden. Schwierigkeiten gab es bei einer Vielzahl der Druckleitungen durch fehlende (Höhen)Pläne.

Wie bereits im Vorgängerprojekt konnten keine Faserzement-Leitungen für mögliche Prüfungen identifiziert werden. Selbst unter den nicht prüfbaren Leitungen waren keine Leitungen dieses Materials vorhanden.

7.2 Druckluftspülung und Fortpflanzung von Druckstößen

Neben der Entwicklung der beiden Prüfverfahren HSA-Normalverfahren und 20-Min Test wurden die im Betrieb auftretenden Druckstöße untersucht. Neben einer Untersuchung der Auswirkungen von Druckstößen beim Betrieb und während der Prüfung, wurden Druckstöße aufgrund Pumpenanlauf bzw. Pumpenstopp, dem Schließen von Rückschlagklappen und einer Druckluftspülung der Druckleitung betrachtet.

- Druckstoß bei Pumpvorgang

In Abbildung 48 ist beispielhaft die Aufnahme des Drucks einer Pumpstation über mehrere Stunden zu sehen. Deutlich zu erkennen ist der hydrostatische Druck von 2 bar sowie der Betriebsdruck von 2,6 bar. Weiterhin sind regelmäßig Druckstöße zu Beginn und Ende eines jeden Pumpvorgangs von bis zu 3,6 bar zu erkennen. Da im Betrieb diese Druckspitzen auftreten, ist durch die Aufbringung des Prüfdrucks von 1 bar über Betriebsdruck i.d.R. nicht von Schäden durch die Druckprüfung auszugehen. Nichtsdestotrotz ist in jedem Fall zu prüfen, dass die Druckleitung inklusive Armaturen dem Prüfdruck ohne Schäden standhalten kann.

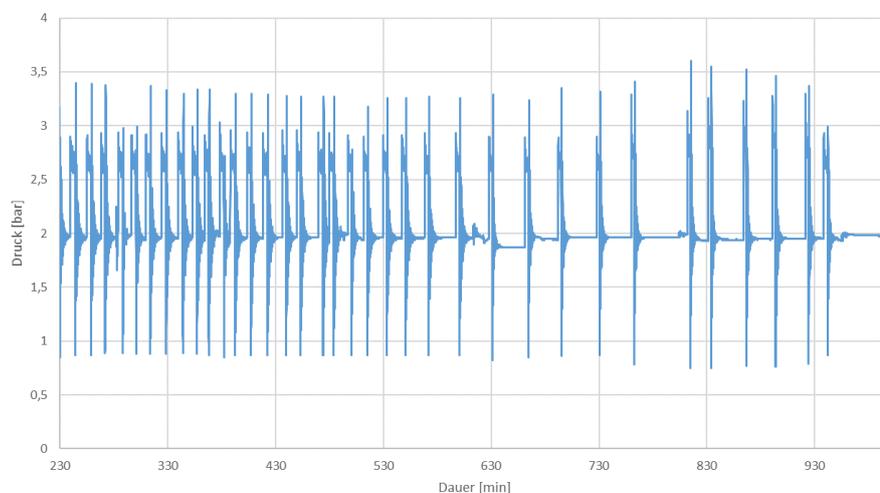


Abbildung 48: Aufnahme der Druckstöße im Druckverlauf an der Abwasserdruckleitung in Wienbach zwischen 06.07.2020 und 07.07.2020

- Druckstoß bei Luftspülung

Ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Abwasserdruckleitungen wird in regelmäßigen Abständen mit Druckluft gespült, um lange Standzeiten des Abwassers und somit die Bildung von Schwefelwasserstoff zu vermeiden. Auch wiederkehrende Reinigungen (z.B. gegen Ablagerungen) sind dadurch möglich.

Die im Forschungsprojekt geprüften Druckleitungen hatten zu 45 % (18 von 40) eine Druckluftspülung oder wurden mittels pneumatischem Pumpwerk betrieben. Moderne Druckluftspülungen besitzen einen Sanftanlauf, um Druckstöße zu vermeiden.

In Abbildung 49 ist exemplarisch die Druckerhöhung durch eine Druckluftspülung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Druck in der Druckleitung während des Startvorgangs der Druckluftspülung nur unwesentlich um 0,03 bar von 2,17 auf 2,20 bar ansteigt. Der Drucklogger war dabei im Pumpwerk positioniert. Durch den Wasseraustrag am Ende der Druckleitung sinkt nach der Druckluftspülung die Wassersäule (nicht mehr dargestellt), welche auf die Druckleitung wirkt. Durch die gesunkene Wassersäule würde der Drucklogger nach der Druckluftspülung einen Druck unter 2,17 bar anzeigen.

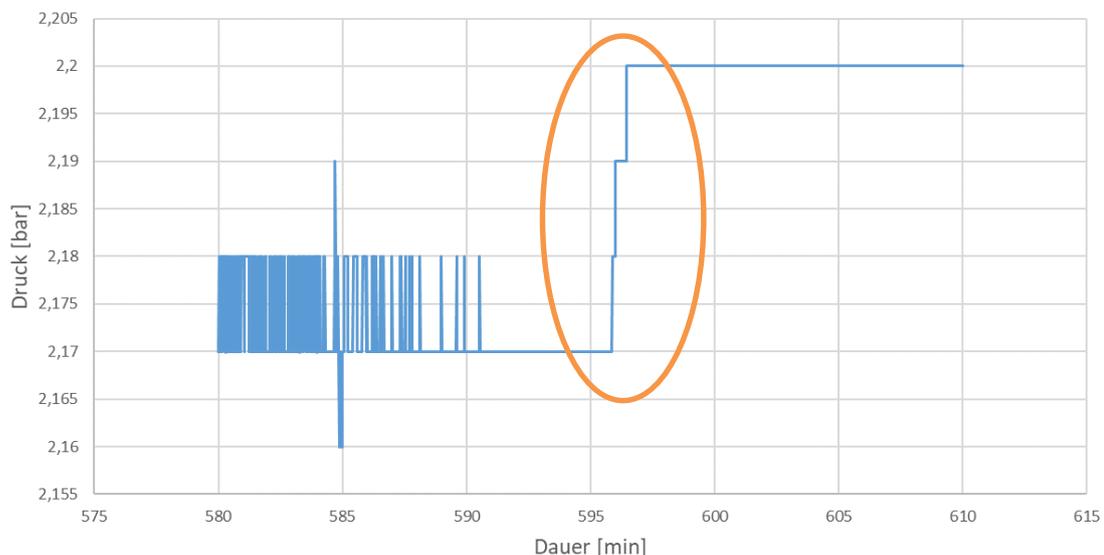


Abbildung 49: Druckverlauf während einer Luftspülung am Pumpwerk Druisheim

- Fortpflanzung von Druckstößen

Um die Ausbreitung von Druckstößen innerhalb der Druckleitung zu berücksichtigen, wurde an einer Druckleitung ein Drucklogger am Prüfbaum am Anfang sowie am Ende der Druckleitung während eines 20-Min Tests installiert. Die Druckleitung war beinahe luftfrei, somit ist von keiner Dämpfung möglicher Druckstöße durch in der Leitung vorhandene Luft auszugehen. In Abbildung 50 sind die synchronisierten Graphen der Druckverläufe beider Drucklogger aufgetragen.

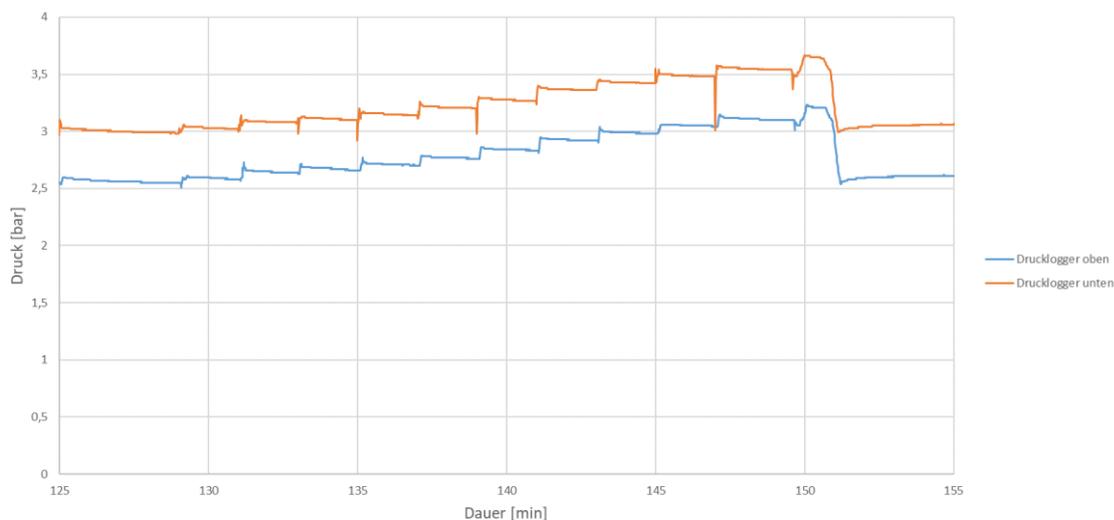


Abbildung 50: Synchronisierter Vergleich des Druckverlaufs während eines 20-Min Tests mit zwei Druckloggern am Anfang bzw. Ende der Druckleitung Am langen Berg

Es ist deutlich zu erkennen, dass beide Graphen um den hydrostatischen Druck vertikal verschoben sind, was zu erwarten ist. Druckstöße beim Nachpumpen werden nur minimal verringert am Ende der Druckleitung detektiert. Es ist somit während einer Druckprüfung davon auszugehen, dass Druckstöße und Drücke innerhalb einer Druckleitung überall gleich auftreten, nur um den hydrostatischen Druck verändert. Bei großen Luftanteilen in der Druckleitung wird dieser Effekt vermutlich abgedämpft.



7.3 Ergebnisse des HSA-Normalverfahrens an realen Abwasserdruckleitungen

In Abbildung 51 (siehe auch Anhang 15) ist der jeweilige Druckabfall in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens aller im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Prüfungen in Abhängigkeit des Luftanteils dargestellt. Neben dem Leitungsnamen ist der Luftanteil [%] und der Druckabfall [bar] angegeben. Die Luftanteile in der Leitung wurden größtenteils auf Grundlage der Druckabfallprüfung des HSA-Normalverfahrens berechnet (siehe Kap. 3.3.7.2). Eine Abgrenzung der Druckabfälle findet farblich deutlich statt: blau markierte Punkte stellen eine Druckprüfung mit künstlicher Leckage und somit einen größeren Druckabfall dar als die in orange dargestellten Punkte der Druckabfälle der Druckprüfungen ohne künstliche Leckage.

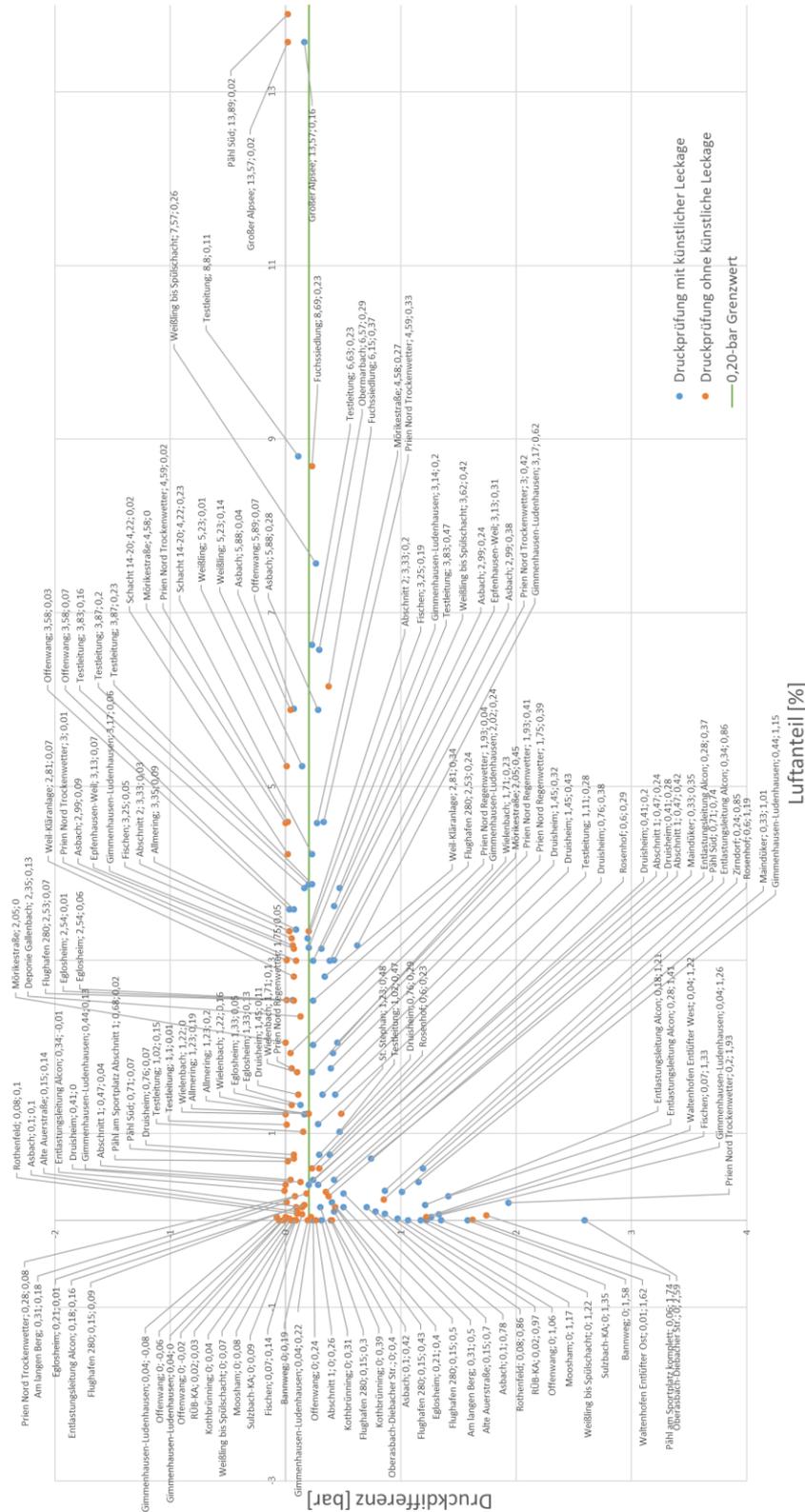


Abbildung 51: Darstellung aller im Forschungsprojekt durchgeführten HSA-Normalverfahren in Abhängigkeit des Luftanteils unter Angabe des Leitungsnamens sowie des Luftanteils [%] und dem Druckabfalls in der Hauptprüfung [bar] (siehe Anhang 15)



In diesem Forschungsprojekt wurden 155 Druckprüfungen mit dem HSA-Normalverfahren durchgeführt. Es fand eine Variation hinsichtlich der Luftanteile und der Leckagegröße statt. Um Druckleitungen unabhängig ihres Innendurchmessers bewerten zu können, fand eine Anpassung der zulässigen Leckage statt (siehe Kap. 4.1.4). Weiterhin ist es durch das unterschiedliche Verhalten der, im Gegensatz zu Prüfverfahren aus dem Trinkwasserbereich, wenig komprimierten Luft nicht möglich, einen festen maximalen Luftanteil festzusetzen. Auch die Garantie der Luftfreiheit (vorher bis zu 2%) wurde aufgrund des grundlegend anderen Verhaltens der Luft modifiziert. Der maximal zulässige leitungsindividuelle Luftanteil wurde so gewählt, dass in jedem Fall bei einer unzulässigen Leckage ein Druckabfall von 0,20 bar überschritten wird. Für kleinere Luftanteile steigt dementsprechend der Grenzwert an. Die Berechnung dieses neuen Grenzwerts erfolgt mit Hilfe des in der Druckabfallprüfung bestimmten Luftvolumens über die im Forschungsvorhaben entwickelte Simulation. Eine Bewertung der Dichtheit ist für das HSA-Normalverfahren an eine Über- bzw. Unterschreitung des mittels Simulation errechneten Grenzwerts gekoppelt. Sicherheiten werden bei der Betrachtung der Ergebnisse nicht eingerechnet, dies erfolgt in Kap. 8.1.2.

In Abbildung 52 (siehe Anhang 16) sind die Druckabfälle in der Hauptprüfung aller Druckprüfungen nach dem HSA-Normalverfahren ohne künstliche bzw. reale Leckage in Abhängigkeit des vorhandenen Luftanteils aufgetragen. Ebenso ist der rechnerisch ermittelte maximal zulässige Luftanteil aufgetragen, bei dem es noch möglich ist, mit dem Wasserverlust einer maximal zulässigen Leckage einen Druckabfall von über 0,20 bar zu ermöglichen. Die eingezeichnete horizontale Markierung bei 0,20 bar stellt den aus DIN EN 805 übernommenen gültigen Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit mit maximal zulässigem Luftanteil dar. Der Druckabfall einer Druckprüfung nach dem HSA-Normalverfahren infolge einer zulässigen Leckage liegt in allen Fällen unter dem markierten leitungsindividuell simulierten maximal zulässigen Druckabfall. Für alle Druckprüfungen, bei denen der Luftanteil ausreichend gering ist, gilt, dass die Leitung in jedem Fall als dicht eingestuft werden kann, wenn der Druckabfall in der Hauptprüfung maximal 0,20 bar beträgt.

Liegt der leitungsindividuell berechnete zulässige Druckabfall (siehe Abbildung 52: rot) über der grün markierten Grenzlinie bei 0,20 bar, bedeutet dies, dass der vorhandene Luftanteil den maximal zulässigen Luftanteil unterschreitet, wodurch der Grenzwert für den zulässigen Druckabfall erhöht wurde.

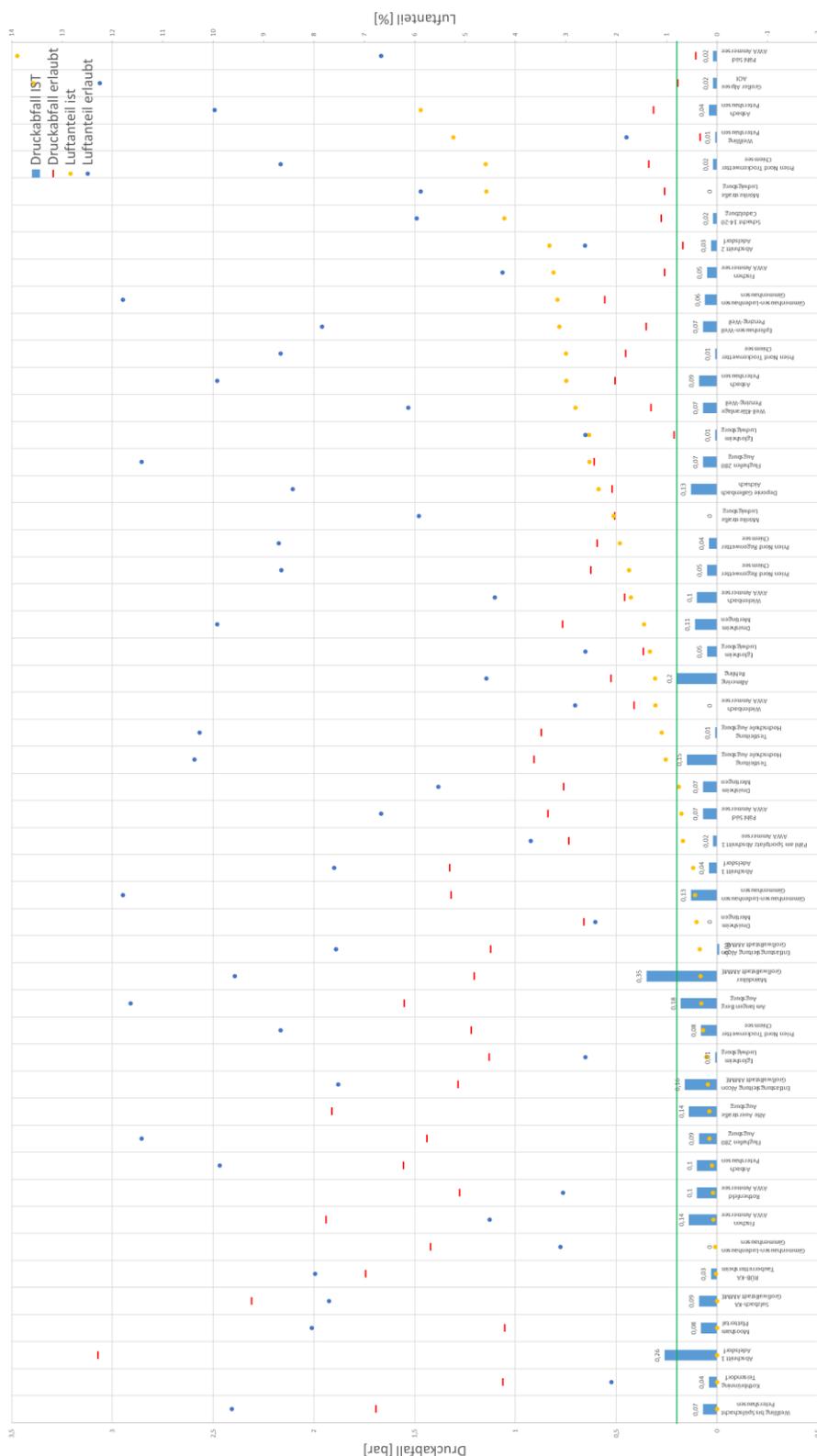


Abbildung 52: Darstellung des: a) Druckabfalls in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens ohne reale bzw. künstliche Leckage [blauer Balken] b) Grenzwerts des max. zulässigen Druckabfalls [rot] c) Kriteriums für eine undichte Bewertung bei max. zulässigem Luftanteil [grün] (siehe auch Anhang 16)



Abbildung 52 verdeutlicht, dass bei geringen Luftanteilen auch ohne Leckage bereits Druckabfälle über 0,20 bar, infolge von Effekten wie der Materialdehnung und ggf. geringen Wasserverlusten, auftreten können. Dies bestätigt, dass die Festlegung eines fixen Grenzwerts nicht zielführend ist. Der für jede Druckprüfung individuell berechnete Grenzwert sinkt durch den Einfluss der Luft mit zunehmendem Luftanteil ab. Es zeigt sich, dass bei dichten Druckleitungen der Druckabfall immer deutlich unterhalb des Grenzwerts lag, somit wurden keine dichten Druckleitungen fälschlicherweise als undicht bewertet. Bei geringen Luftanteilen ist es somit möglich, durch den großen Druckabfall bereits kleinste Leckagen zu erkennen. So konnten im Verlauf des Projekts auch sporadisch tropfende Schieber erkannt werden.

Eine Ausnahme stellen vier Druckprüfungen dar. Hier übersteigt der vorhandene Luftanteil den zulässigen Luftanteil; richtigerweise liegt der berechnete individuelle Grenzwert für den Druckabfall bei beiden Druckprüfungen unter 0,20 bar. Der vorhandene Druckabfall liegt unter dem Grenzwert, was darauf hindeuten würde, dass die Druckleitungen dicht sind. Es ist zu beachten, dass die Druckprüfungen jedoch ungültig sind. Im Verlauf des Prüfverfahrens wäre die Druckabfallprüfung nicht bestanden worden und eine Hauptprüfung hätte nicht begonnen werden dürfen. Die Hauptprüfungen wurden hier aus rein wissenschaftlichem Interesse durchgeführt.

Stimmen der vorhandene Luftanteil und der maximal zulässige Luftanteil überein, so ist ein maximaler Druckabfall gleich dem Mindestdruckabfall von 0,20 bar zu erwarten, wie in der Abbildung zu sehen.

Alle in Abbildung 52 geprüften Druckleitungen konnten richtigerweise als dicht eingestuft werden. Durch den tatsächlichen, sehr geringen Druckabfall kann den Druckleitungen die Dichtheit bestätigt werden.

In Abbildung 53 (siehe auch Anhang 17) sind analog zu Abbildung 52 die Druckabfälle der Druckprüfungen mit künstlicher Leckage in Abhängigkeit des vorhandenen Luftanteils abgebildet. Druckprüfungen von Leitungen mit realen Leckagen finden aufgrund der unmöglichen Quantifizierbarkeit des ausgetretenen Wasservolumens in dieser Auswertung keine Berücksichtigung. Der Einfluss der Luft, auf den Druckabfall in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens, zeigt sich deutlich. Eine Abnahme des beobachteten Druckabfalls infolge der zulässigen Leckage geht mit zunehmendem Luftanteil einher. Über die Einstellung der maximal zulässigen Leckage wurde versucht, den maximal zulässigen Druckabfall zu generieren. Ab Luftanteilen von 2 % wurde dieses Ziel sehr gut erreicht. Bei geringeren Luftanteilen gibt es eine größere Differenz zwischen eingetretenem und berechnetem Druckabfall. Grund dafür ist der große Einfluss aus Rohrdehnung und Messfehlern. Diese kommen zu tragen, da durch die gute Entlüftung der Leitung nur mehr sehr



geringe Luftanteile den sonst großen Einfluss verloren haben. Durch die Bestimmung des Luftanteils in der Druckabfallprüfung kann – unter Zuhilfenahme der Simulation – jeder Druckprüfung ein maximal zulässiger Druckabfall (infolge zulässiger Leckage) zugeordnet werden. Die zulässige Leckage wird während einer Druckprüfung künstlich am Druckbaum der Prüfarmatur angeschlossen (z.B. durch das Nadelventil). Diese Wassermenge wird zu Beginn der Vorprüfung eingestellt und am Beginn der Hauptprüfung ggf. nachjustiert. Häufig verkleinerte sich der Durchfluss der Leckage v.a. durch Zusetzen aufgrund von Schwebstoffen im Abwasser. Damit fiel in 89 % der Fälle das entnommene Wasservolumen geringer aus, als es durch die angepasste Leckage berechnet wurde. Ein kleineres Leckagevolumen als das maximal Zulässige, führt dabei zu einem geringeren Druckabfall als dem maximal zulässigen. In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass trotz erheblicher Bemühungen die exakte Leckage nur zwei Mal, also in 4 % der Fälle exakt getroffen werden konnte. In vier weiteren Fällen war die Leckage etwas zu groß eingestellt und es konnte nur ein größerer Druckabfall als der maximal zulässige Druckabfall registriert werden. Bei der Mehrzahl der Druckprüfungen trat jedoch durch eben genannte Gründe ein geringeres Wasservolumen aus der künstlichen Leckage aus, als dies erlaubt gewesen wäre. Somit besitzen die meisten Druckprüfungen einen geringeren gemessenen Druckabfall, als dies durch den mittels Simulation ermittelten Maximaldruckabfall zulässig wäre. Diese Druckprüfungen sind somit richtigerweise als dicht zu bewerten, da die Leckagen tatsächlich kleiner als die maximal zulässige Leckage waren.

Eine Überprüfung und Bestätigung dieser Bewertung der Ergebnisse erfolgte durch den Vergleich der tatsächlichen Leckagen mit den zulässigen Leckagen. Durch das ausgetretene Wasservolumen war es möglich, mittels Simulationstool den Druckabfall zu bestätigen, welcher nicht genau dem maximal zulässigen Druckabfall entspricht. Diese Bestätigung stützt die Annahmen des entwickelten Prüfverfahrens. Durch einen zusätzlichen Aufschlag auf den vorhandenen Luftanteil als Sicherheit sinkt der maximal zulässige Luftanteil und somit der maximal zulässige Druckabfall (siehe Kap. 8.1.2).

Es ist zu beachten, dass die Problematik der künstlichen Leckage nur die Entwicklung des Prüfverfahrens betrifft. Bei der Anwendung des Verfahrens im realen Betrieb kommen keine künstlichen Leckagen mehr zum Einsatz.

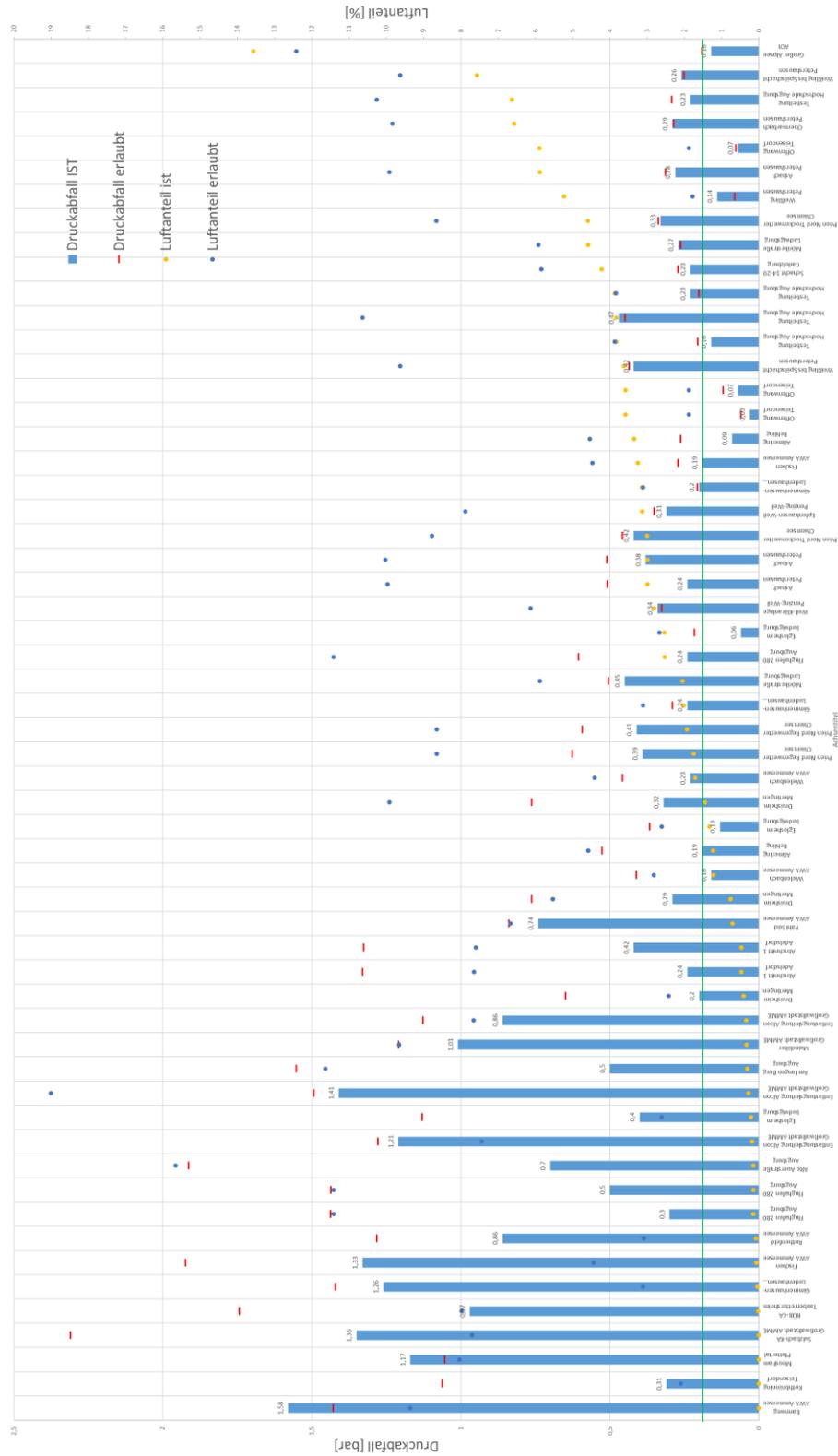


Abbildung 53: Darstellung des: a) Druckabfalls in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens ausschließlich mit künstlicher Leckage [blauer Balken] b) Grenzwerts des max. zulässigen Druckabfalls [rot] c) Kriteriums für eine undichte Bewertung bei max. zulässigem Luftanteil [grün] (siehe auch Anhang 17)



Eine grobe Einschätzung der Dichtheit kann über das Verhältnis zwischen realem Druckabfall und maximal zulässigen Druckabfall erfolgen. Durch die insgesamt geringen Abweichungen (bei richtig eingestellter Leckage) zwischen dem berechneten maximal zulässigen Druckabfall und dem Druckabfall der Druckprüfung zeigt sich eine Eignung des Prüfverfahrens zur Bestimmung der Dichtheit von Abwasserdruckleitungen nach dem HSA-Normalverfahren

7.4 Ergebnisse der 20-Min Tests an realen Abwasserdruckleitungen

Der 20-Min Test konnte in diesem Forschungsprojekt entwickelt und anschließend zusammen mit dem HSA-Normalverfahren an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen erprobt werden.

In Abbildung 54 (siehe auch Anhang 18) sind die Druckdifferenzen aller im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten 20-Min Tests in Abhängigkeit des vorhandenen Luftanteils abgebildet. Neben dem Leitungsnamen ist der Luftanteil [%] und der Druckabfall [bar] angegeben. Die Luftanteile in der Leitung wurden größtenteils auf Grundlage der Druckabfallprüfung des direkt vor oder nach dem 20-Min Test durchgeführten HSA-Normalverfahrens berechnet (siehe Kap. 3.3.7.2). Eine Abgrenzung der Druckabfälle findet farblich deutlich statt, blau markierte Punkte stellen eine Druckprüfung mit künstlicher Leckage und somit einem Druckabfall dar. Die orange dargestellten Punkte sind Druckanstiege der Druckprüfungen des 20-Min Tests ohne künstliche Leckage.

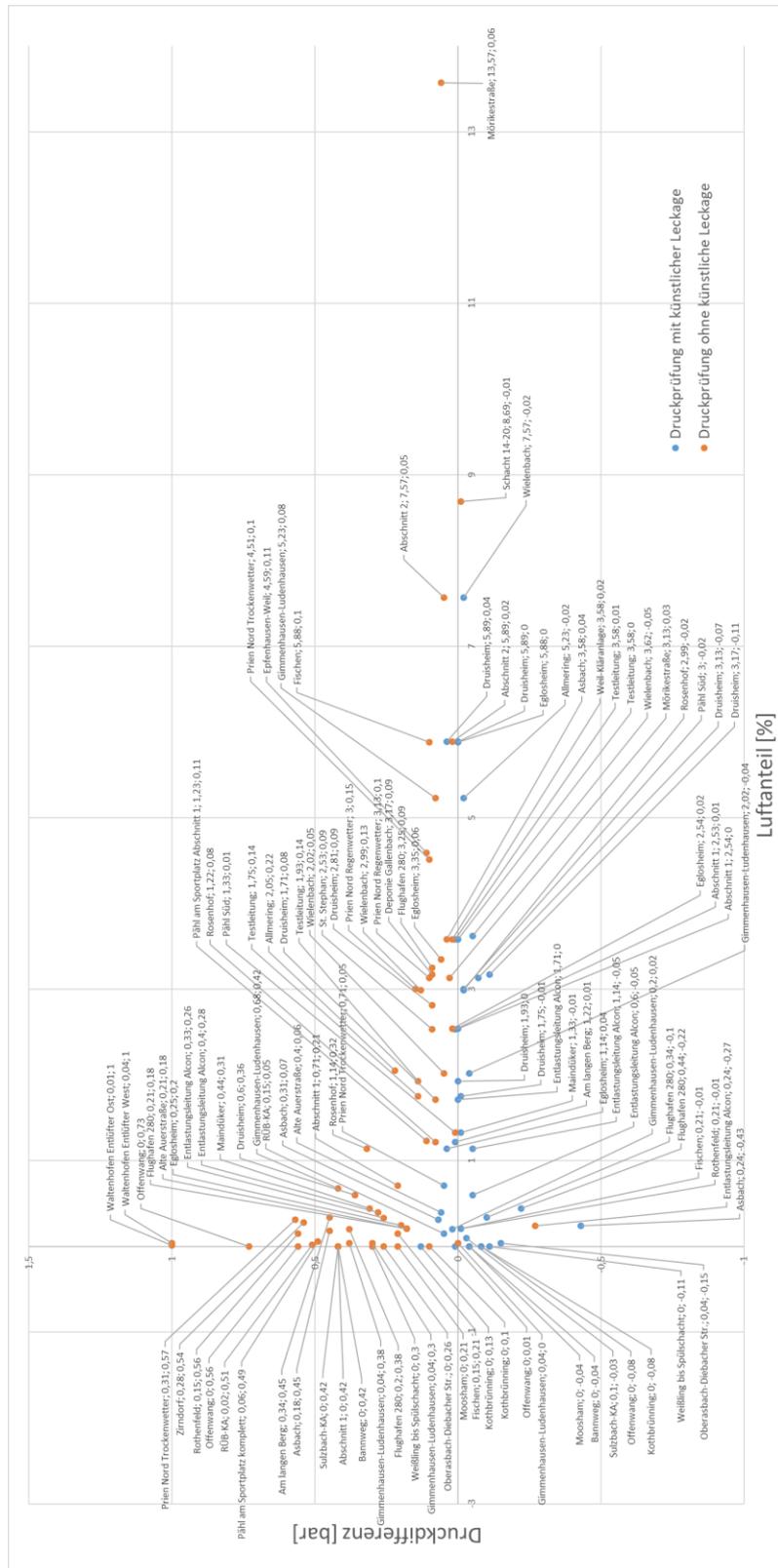


Abbildung 54: Darstellung aller im Forschungsprojekt durchgeführten 20-Min Tests in Abhängigkeit des Luftanteils unter Angabe des Leitungsnamens sowie des Luftanteils [%] und dem Druckabfalls in der Hauptprüfung [bar] (siehe Anhang 18)



Die sich einstellenden Druckdifferenzen im 20-Min Test sind in Abbildung 55 (siehe auch Anhang 19) in Abhängigkeit des vorhandenen Luftanteils abgebildet. Bei den Druckprüfungen war ein Ziel, eine künstliche maximal zulässige Leckage einzustellen. In der Praxis war es nicht immer möglich, diese Leckage exakt einzustellen. Tatsächlich kam es hauptsächlich zu einer Reduzierung der Leckage v.a. durch Zusetzen bzw. Verblocken der Leckageeinheit durch Abwasserpartikel. In einigen Fällen kam es jedoch auch zu Erhöhungen, beispielsweise durch die Druckstöße der Nachpumpintervalle. Dies führte zu Abweichungen bei den gemessenen Druckdifferenzen.

Aus Abbildung 55 wird ersichtlich, dass – analog zum HSA-Normalverfahren – eine Verringerung der Druckdifferenz mit zunehmendem Luftanteil stattfindet.

In den meisten Fällen konnte bei der Durchführung des 20-Min Tests der erwartete Druckabfall gemessen werden. Dieser lag bei bis zu -0,22 bar. Durchschnittlich lag der Druckabfall im Bereich von -0,024 bar.

Vereinzelt wurde (in 11 der 39 betrachteten Fälle) trotz künstlicher Leckage ein geringer Druckanstieg gemessen. Dieser belief sich auf maximal 0,07 bar. Hier könnte ein Zusetzen der künstlichen Leckage ursächlich sein.

Theoretisch dürfte es keinen Druckanstieg geben, da bei diesem Verfahren die nachgepumpte Wassermenge der durch die Leckage austretenden Wassermenge entspricht. Eine solch präzise Einstellung der künstlichen Leckage ist jedoch nicht immer möglich. Des Weiteren können Effekte wie beispielsweise aus Materialdehnung und -kontraktion nicht vollständig ausgeschlossen werden (siehe Kap. 4.2.3). Daher ist auch hier eine gewisse Sicherheit erforderlich.



Abbildung 56 (siehe auch Anhang 20) zeigt alle Druckdifferenzen der 20-Min Tests ohne künstliche Leckage in Abhängigkeit des vorhandenen Luftanteils. 20-Min Tests mit realen Leckagen werden nicht dargestellt, da dies dem Verständnis der Ergebnisse des Prüfverfahrens nicht zuträglich ist. Deutlich zu erkennen ist hier, ebenso wie beim HSA-Normalverfahren, dass mit steigendem Luftanteil in der Druckleitung die Veränderung des Drucks geringer ausfällt.

Mit Ausnahme eines 20-Min Tests stellte sich an allen, in Abbildung 56 dargestellten, als dicht geprüften Druckprüfungen, ein Druckanstieg ein. Der erwartete Druckanstieg wird durch die Faktoren Wasserkompression, Materialdehnung und Luftkompression abgemindert. Einzig die Prüfung der Druckleitung „Gimmenhausen“ verzeichnet weder Druckanstieg noch Druckabfall. Die Durchführung des 20-Min Tests wurde mit einem erhöhten Prüfdruck von 6 bar durchgeführt. Vor dem 20-Min Test wurde die Druckleitung nur mit einem Prüfdruck von 4 bar beaufschlagt. Durch die fehlende Vorprüfung mit 6 bar wurde durch die Dehnung des Rohrmaterials der Druckanstieg kompensiert. Da die Luftkompression den größten Einfluss auf eine Verringerung des Druckanstiegs besitzt, findet mit Luftanteilen unter 1 % ein großer Druckanstieg statt. Der maximal gemessene Druckanstieg betrug 0,73 bar. Um durch den Druckanstieg keine Schädigung während des 20-Min Tests an Druckleitungen hervorzurufen, hat sich ein Abbruchkriterium von 0,5 bar als sinnvoll erwiesen (siehe Kap. 4.2.4).

Ab einem Luftanteil von 2 % erreichte lediglich noch eine Prüfung einen Wert von 0,15 bar. Im Mittel konnte nur ein Druckanstieg von 0,09 bar verzeichnet werden.



7.4.1 Grenzwert 20-Min Test

Um mit dem 20-Min Test eine Bewertung der Dichtheit einer Druckleitung, über eine besondere Druckprüfung, vornehmen zu können, ist ein Kriterium für die Bewertung erforderlich. Im HSA-Normalverfahren wird der Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit für jede Druckleitung individuell unter Berücksichtigung des vorhandenen Luftanteils simuliert. Da der 20-Min Test als Kurztest konzipiert wurde, wird besonderer Fokus auf die kurze Prüfdauer und ein möglichst einfaches Verfahren gelegt. Manche Abwasserdruckleitungen können im Betrieb teilweise nur für kurze Zeit außer Betrieb genommen werden, weshalb die Prüfdauer eine wichtige Rolle spielt. Bei der Entwicklung des 20-Min Tests wurde die Prüfdauer minimiert, indem auf die Druckabfallprüfung und somit die Bestimmung des Luftanteils verzichtet wurde. Auch die Vorprüfung ist bei diesem Test optional, wenngleich empfohlen. Anders als beim HSA-Normalverfahren, bei dem mit zunehmenden Luftanteil ein Druckabfall abgemindert und somit Leckagen überdeckt werden können, führt ein steigender Luftanteil beim 20-Min Test zu geringeren Druckanstiegen. Da der Druckanstieg als Kriterium für die Dichtheit herangezogen wird, ist es nicht möglich, mit großen Luftanteilen Leckagen fälschlicherweise zu überdecken. Bei hohen Luftanteilen ist jedoch der Nachweis der Dichtheit mit dem 20-Min Test nicht erbringbar. Es kann bei diesem Kurztest auch nicht zwischen zu hohen Luftanteilen und einer tatsächlichen Leckage unterschieden werden, wenn der Grenzwert in der Prüfung nicht erreicht wird.

Eine individuelle Grenze für die Bewertung der Dichtheit mittels Druckanstieg kann aufgrund des unbekanntenen Luftanteils nicht erfolgen. Es wird auf Grundlage der Ergebnisse des 20-Min Test ein fester Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit ermittelt.

Abbildung 57 (siehe auch Anhang 21) zeigt alle Druckanstiege der 20-Min Tests ohne jegliche Leckage (künstlich oder real) beschränkt auf das angepasste Nachpumpvolumen. Prüfungen mit geringeren Nachpumpvolumina (vor der Anpassung der Leckage) finden in dieser Auswertung keine Berücksichtigung.

Deutlich zu erkennen ist auch hier der abnehmende Druckanstieg bei zunehmendem Luftanteil. Da aus Gründen des Umwelt- und Gewässerschutzes keine undichte Druckleitung als dicht, jedoch dichte Druckleitungen als undicht bewertet werden dürfen, ist es sicherer einen Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit mit steigendem Druckanstieg zu setzen. Beim 20-Min Test wird der Druckleitung, Wasser in Höhe des zulässigen Leckagevolumens zugegeben, womit sich mit einer Leckagegröße entsprechend dem zulässigen Leckagevolumen weder ein Druckanstieg noch ein Druckabfall einstellen sollte. Ein Grenzwert bei 0 bar wäre somit denkbar. Da es durch äußere Einflüsse und kleine Messfehler auch bei einer maximal zulässig undichten Druckleitung zu einem Druckanstieg kommen kann, stellt jede Festlegung des Grenzwerts über 0 bar Druckanstieg eine Sicherheit dar. In Abbildung 57 ist ein Grenzwert für die Bewertung der Dichtheit bei 0,15 bar grün eingezeichnet. Neben zwei Ausnahmen mit erhöhten Luftanteilen von 1,23 % und 2,02 % und dem Sonderfall der Druckleitung „Gimmenhausen“ sind alle Druckprüfungen nach dem 20-Min Test mit Luftanteilen unter 2,8 % richtigerweise als dicht bewertet worden.

Da es aus Sicht des Umweltschutzes nicht vorkommen darf, dass undichte Druckleitungen fälschlicherweise als dicht bewertet werden, darf der Grenzwert von 0,15 bar auch bei undichten Druckleitungen nicht zu einer gegenteiligen Bewertung führen. In Abbildung 58 (siehe auch Anhang 22) sind sämtliche Druckdifferenzen aller 20-Min Tests mit künstlicher sowie realer Leckage aufgetragen. Der Grenzwert des Druckanstiegs von 0,15 bar wird von keiner der Druckprüfungen erreicht. Die größte Annäherung an den Grenzwert bildet die Prüfung am Bannweg mit 0,13 bar Druckanstieg. Es ist jedoch zu beachten, dass bei dieser Prüfung die zulässige Leckage deutlich unterschritten wurde, vermutlich durch Zusetzen der Leckageeinheit. Dies konnte durch ein nachträgliches Messen des ausgetretenen Wasservolumens bestätigt werden. Somit ist die Nachpumpmenge größer ausgefallen als die ausgetretene Leckagemenge, wodurch ein gewisser Druckanstieg zu erwarten war.

Mit dem Grenzwert von 0,15 bar Druckanstieg im 20-Min Test kann die Bewertung einer dichten Druckleitung sicher erfolgen. Alle Druckanstiege geringer als 0,15 bar bzw. alle Druckabfälle sind einer unzulässig großen Leckage bzw. einem zu großen Luftanteil zuzuschreiben. Eine fehlerhafte Bewertung als „undicht“ hat keine nachteiligen Folgen für die Umwelt. Durch eine Prüfung mit dem HSA-Normalverfahren kann diese „Fehleinschätzung“ behoben werden.

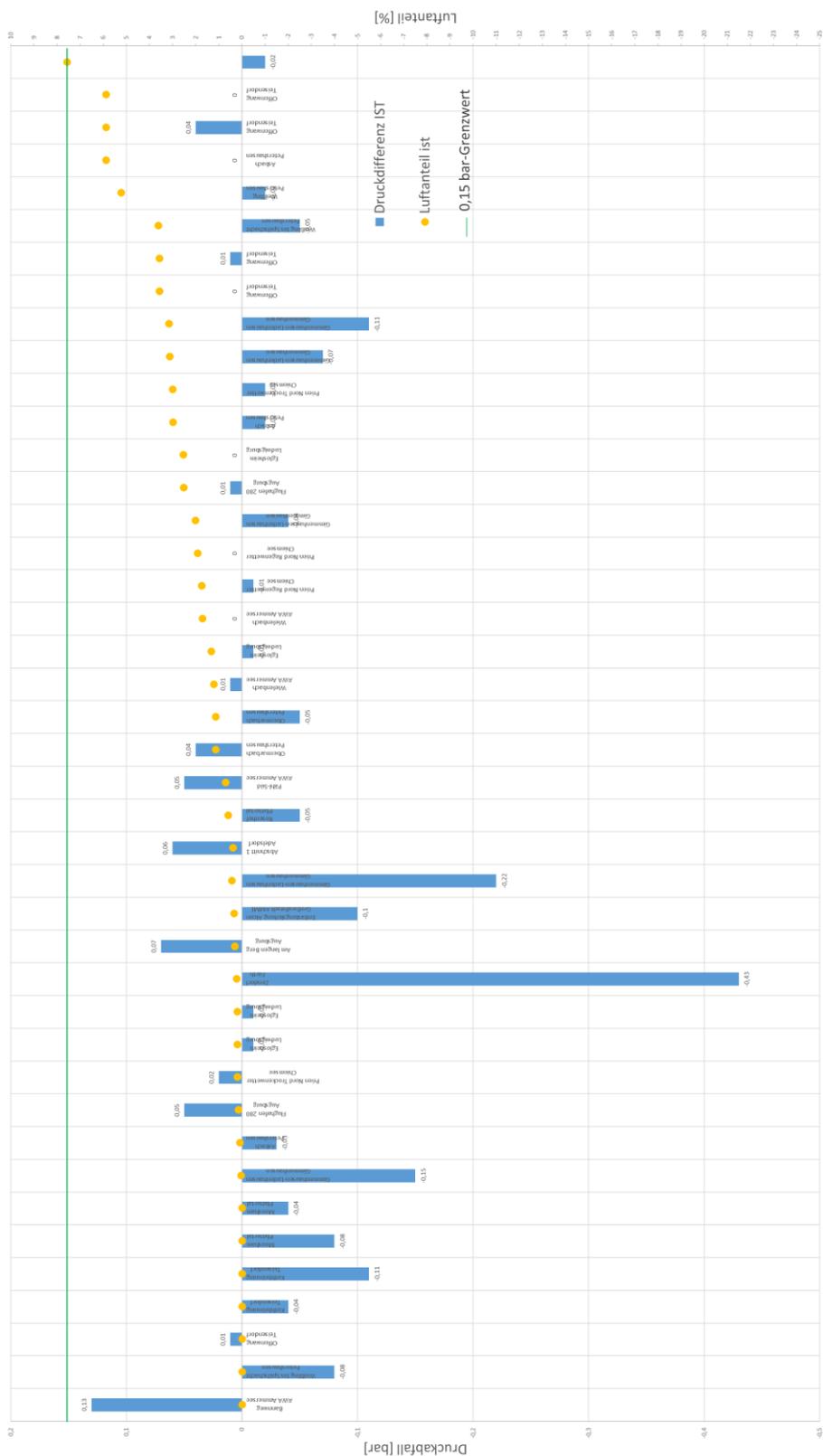


Abbildung 58: Ergebnisse und Grenzwert der 20-Min Tests mit künstlicher Leckage (siehe Anhang 22)



8 Sicherheiten

In der Praxis hat sich gezeigt, dass eine Reihe von Faktoren einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Dichtheitsprüfungen von Abwasserdruckleitungen im Betrieb haben können. Hier sind neben Messungenauigkeiten v.a. die durch Alterung der Leitungsmaterialien unbekanntes Veränderungen der Rohreigenschaften, Ungenauigkeiten bei der Luftanteilsbestimmung sowie Fehler und Ungenauigkeiten bei der Durchführung der Prüfverfahren zu nennen.

Um sicher zu vermeiden, dass durch Ungenauigkeiten unzulässige Leckagen nicht als solche identifiziert werden, werden im Folgenden Sicherheiten in den Prüfverfahren vorgestellt.

8.1 Sicherheiten HSA-Normalverfahren

Wie in Kap. 6 beschrieben, kann es bei den Luftanteilsberechnungen durch unterschiedliche Fehlerquellen zu Abweichungen vom tatsächlichen Luftanteil kommen. Des Weiteren besteht auch in der Simulation des maximal zulässigen Druckabfalls die Gefahr, dass dieser durch falsche Annahmen etwas zu hoch ausfällt. Da der in der Leitung vorhandene Luftanteil eine erhebliche Auswirkung auf die Grenzwerte hat, werden im Folgenden der Sicherheitsfaktor für das HSA-Normalverfahrens erläutert, um zu vermeiden, dass vorhandene, unzulässige Leckagen durch das HSA-Normalverfahren nicht erkannt werden.

8.1.1 Einfluss der Lage der Luftanteile in der Leitung

Durch den Dichteunterschied steigt Luft in Wasser nach oben. Dieses Verhalten gilt ebenso für Luft in Druckleitungen, welche i.d.R. an deren Hochpunkt steigt. Es kann jedoch durch einen an das Gelände angepassten Verlauf bei Abwasserdruckleitungen zu lokalen Hochpunkten kommen, welche nicht den absoluten Hochpunkt der Rohrleitung darstellen.

In der Simulation bzw. bei der Berechnung des Grenzwerts des Druckabfalls für das HSA-Normalverfahren wird unter der Annahme das sich die Luft am absoluten Hochpunkt der Leitung befindet gerechnet. Mit der Druckabfallprüfung wird ebenfalls unter dieser Annahme ein Luftanteil am absoluten Hochpunkt bestimmt.

Der Einfluss der Luft wird durch deren Lage in der Druckleitung bestimmt. Insbesondere der auf die Luft wirkende hydrostatische Druck verringert oder erhöht deren Einfluss enorm. Theoretisch gibt es einen Fall, bei dem sich die Luft am Tiefpunkt der Druckleitung befindet. Diese ist dann auf Grund der durch die auf ihr



lastenden Wassersäule stark vorkomprimiert. Bei gleichem entspannten Luftvolumen besitzt diese Luft einen deutlich kleineren Einfluss auf den Wasseraustritt infolge Druckablass bzw. -aufbau in der Druckabfallprüfung. Auch was eine mögliche Überdeckung einer Leckage angeht, ist eine Lage der Luft am Tiefpunkt günstiger, als wenn die Luft am Hochpunkt ist und kaum einer Vorkompression durch die Wassersäule unterliegt. Der Luftanteil am Tiefpunkt kann jedoch durch erheblich größere entspannte Luftvolumen als am Hochpunkt dasselbe Ablassvolumen im Druckablass erzeugen. Soweit die Grundlagen dieser Problematik.

Eine Überprüfung des Aufenthaltsortes der Luft kann im Verlauf der Druckprüfung nicht erfolgen. Hierdurch entsteht die Möglichkeit der Fehleinschätzung im Rahmen der Prüfung.

Um den potentiellen Fehler abzuschätzen, der sich aus der unbekanntem Lage der Luft ergibt, wurden Extrembeispiele berechnet. Diesen liegen wie in der Realität bei der Druckabfallprüfung folgende Faktoren zugrunde:

- Hydrostatischer Druck am Prüfort
- Ablassvolumen
- Durchmesser der Druckleitung
- Wandstärke
- Länge
- Druckverlust in der Druckabfallprüfung
- Prüfdruck am Prüfort (=Druck vor Druckablass)

Um das Problem zu veranschaulichen, wurde folgendes Beispiel aufgestellt:

- das Prüfequipment befindet sich am Tiefpunkt der Druckleitung
- das Ablassvolumen beträgt 10 l
- die Druckleitung hat eine Höhendifferenz von 10 m
- der Druckablass beträgt 1 bar
- der Prüfdruck am Tiefpunkt beträgt 4 bar (Relativdruck)
- Material und Rohrdimension werden aus diesem Beispiel ausgenommen

Der Aufenthaltsort der Luft ist während der Druckabfallprüfung nicht bekannt. In diesem Beispiel wird in der Druckabfallprüfung zur Erzeugung des Druckabfalls von 1 bar die Wassermenge von 10 l entnommen. Der Ort der Wasserentnahme spielt durch die vernachlässigbare Wasserkompression keine Rolle. Für dieses Beispiel wurde das entsprechende Luftvolumen für den Fall berechnet, dass sich die Luft während der Druckabfallprüfung komplett am Hoch- bzw. am Tiefpunkt befindet. In Tabelle 23 ist nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte das Verhalten eines Luftvolumens am Tiefpunkt bzw. Hochpunkt der Druckleitung bei einer Druckdifferenz von 1 bar dargestellt. Bei einer Druckabfallprüfung von 4 bar auf 3 bar

(Relativdruck) entsprechend 5 bar auf 4 bar (Absolutdruck) am Tiefpunkt der Druckleitung erfährt die Luft genau diese Druckveränderung. Am Hochpunkt wird jedoch durch die fehlende Auflast der 10 m Wassersäule lediglich eine Druckveränderung von 4 bar auf 3 bar (Absolutdruck) bzw. 3 bar auf 2 bar (Relativdruck) für die Luft registriert. In beiden Fällen ergibt sich eine Volumendifferenz von 10 l.

Tabelle 23: Beispielrechnung für verschiedene Orte der Luft in der Druckabfallprüfung

Absolutdruck [bar]	Luftvolumen [l] am Tiefpunkt	Luftvolumen [l] am Hochpunkt
9	22,2	13,3
8	25,0	15,0
7	28,6	17,1
6	33,3	20,0
5	40,0	24,0
4	50,0	30,0
3	66,7	40,0
2	120,0	60,0
1	200,0	120,0
0,5	400,0	240,0

Da in der Druckabfallprüfung unabhängig vom Aufenthaltsort der Luft dasselbe Wasservolumen entnommen wird, kann für die beiden betrachteten Fälle des Ortes der Luft das jeweilige entspannte Luftvolumen bei 1 bar Absolutdruck (entspricht 0 bar Relativdruck) abgelesen werden.

Die prozentualen Luftanteile werden beim HSA-Normalverfahren immer als unkomprimierte Luftanteile unter Atmosphärendruck (= 1 bar Absolutdruck, 1013 mbar) angegeben. Im Beispiel befindet sich die Luft am Hochpunkt, damit ergibt dies ein unkomprimiertes Luftvolumen von 120 l. Für den Fall der Luft am Tiefpunkt liegt das unkomprimierte Luftvolumen bei 200 l. Dieser Zusammenhang zwischen Druck und Luftvolumen ist in Abbildung 59 graphisch dargestellt. Die orange Kurve stellt das Verhalten der Luft bei der im Beispiel vorgestellten Druckleitung am Hochpunkt, die blaue Kurve für die Luft am Tiefpunkt dar.

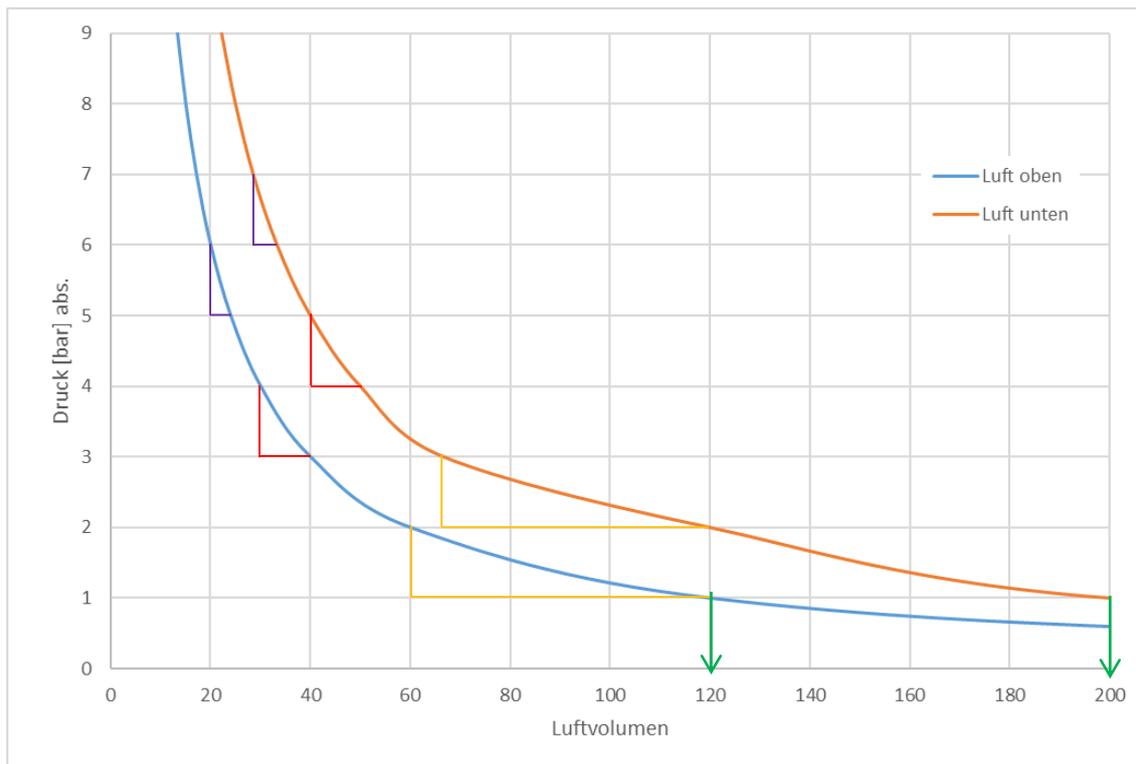


Abbildung 59: Verhalten des Luftvolumen in Abhängigkeit des Aufenthaltsorts der Luft für das Beispiel

In der Abbildung ist in rot die sich bei einem Druckablass von 1 bar einstellende Luftvolumenveränderung von 10 l für die beiden Lagen der Luft eingezeichnet. Die Längen der waagrechten Geraden sind identisch. In gelb ist bei identischen Randbedingungen die Volumenveränderung für eine Druckveränderung um 1 bar von 3 bar auf 2 bar Absolutdruck am Tiefpunkt eingezeichnet. Für den gleichen Druckabfall stellen sich jedoch unterschiedliche Volumendifferenzen ein. Für die Annahme der Luft am Hochpunkt entsteht eine größere Volumendifferenz als befände sich die Luft am Tiefpunkt. Entgegengesetzt verhält es sich bei einem Druckablass von 1 bar bei einem höheren Druck (in violett dargestellt): es stellt sich für den gleichen Druckverlust von 1 bar bei der Annahme der Luft am Hochpunkt eine kleinere Volumendifferenz ein als wenn sich die Luft am Tiefpunkt befindet.

Aus der Abbildung geht auch hervor, welches Volumen die Luft in unkomprimiertem Zustand bei Atmosphärendruck (= 1 bar Absolutdruck) einnehmen würde. Dies ist mit grünen Pfeilen dargestellt.

Um den Fehler der sich aus der unbekanntem Lage der Luft ergibt, abschätzen zu können, wurde eine Berechnung fiktiver, typischer Druckleitungen (Variante 1 – 6) angestellt und der Druckabfall oben (= Luft komplett am Hochpunkt) bzw. Druckabfall unten (= Luft komplett am Tiefpunkt der Leitung) verglichen. In der klassischen Berechnung des HSA-Normalverfahrens wird angenommen, dass sich die Luft immer komplett am Hochpunkt befindet. Der Unterschied zwischen den beiden



Werten in der Tabelle gibt somit den Fehler an, der bei der Simulation bzgl. des Druckabfalls in der Hauptprüfung gemacht wird, wenn sich die Luft - anders als angenommen – komplett am Tiefpunkt befindet. Dies stellt somit den schlechtesten Fall dar, da in der Praxis nicht davon auszugehen ist, dass sich die Luft vollständig am Tiefpunkt befindet. Es handelt sich demnach um eine Maximalfallbetrachtung.

Bei allen Varianten wird mit einem Leitungsabschnitt von 1.000 m Länge, einem Prüfdruck von 3 bar und einem Druckabfall bei der Druckabfallprüfung von 0,5 bar gerechnet.

Bei Variante 1, 2 und 3 handelt es sich jeweils um eine Leitung DA 90 mm mit identischer Wandstärke und einem hydrostatischen Druck von 2 bar (entsprechend einem Höhenunterschied von 20 m). Diese drei Varianten unterscheiden sich nur durch das jeweils abgelassene Wasservolumen und somit um den vorhandenen Luftanteil. Die Variante 4 (ebenfalls mit DA 90, jedoch höhere Wandstärke) besitzt einen Höhenunterschied von 0 m (flache Leitung). Die Varianten 5 und 6 weisen Außendurchmesser von 315 bzw. 429 mm auf bei einem Höhenunterschied 10 m. Das entnommene Wasser in der Druckabfallprüfung und dementsprechend die Luftanteile sind demzufolge unterschiedlich.

Tabelle 24: Beispielrechnung für die Abschätzung eines möglichen Fehlers durch unterschiedliche Annahmen des Ortes der Luft

Leitung (Fiktiv)	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
DA	mm	90	90	90	90	315	429
s	mm	8,2	8,2	8,2	12,5	28,6	14,5
ID	mm	73,6	73,6	73,6	65	257,8	400
Rohrlänge	m	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Wandfläche	m ²	231,2	231,2	231,2	204,2	809,9	1256,6
Rohrvolumen	m ³	4,25	4,25	4,25	3,32	52,20	125,66
Leckagegröße	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,32	0,50
Prüfdruck TP	bar (rel.)	3	3	3	3	3	3
Max. Erhebung	m	20	20	20	0	10	10
Max. Erhebung	bar	2	2	2	0	1	1
Druck am HP	bar (rel.)	1	1	1	3	2	2
Leckage	ml/min	115,6	115,6	115,6	102,1	1305,0	3141,6
Leckage	l/h	6,9	6,9	6,9	6,1	78,3	188,5
Druckablass	bar	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Druckablass	l	17,5	6,9	4,0	4,0	30,0	50,0
Luftanteil oben entspannt	%	2,468	0,978	0,564	3,375	0,862	0,597
Luftanteil unten entspannt	%	11,517	4,565	2,633	3,375	1,609	1,114
Druckabfall oben	bar	0,233	0,500	0,733	0,718	1,029	1,290
Druckabfall unten	bar	0,214	0,500	0,794	0,718	1,086	1,400
Fehler	bar	0,019	0,000	0,062	0,000	0,057	0,111

Für die Varianten 1, 2 und 3 unterscheidet sich das für den Druckabfalltest entnommene Wasservolumen. Je höher das entnommene Wasservolumen, desto größer ist der entsprechenden Luftanteil in der Leitung. Variante 2 zeigt den Sonderfall, in dem im Druckablass das gleiche Wasservolumen entnommen wird, wie



in der Hauptprüfung durch eine zulässige Leckage. Der Druckabfall in der Hauptprüfung entspricht in diesem Fall genau dem der Druckabfallprüfung. Dies entspricht dem in Abbildung 59 rot markierten Fall. In Variante 1 ist das entnommene Wasservolumen für einen Druckabfall von 0,5 bar größer als das in einer Stunde austretende zulässige Wasservolumen einer Leckage. In Variante 2 ist das für den Druckabfall von 0,5 bar entnommene Wasservolumen kleiner als das der Leckage über die Dauer der Hauptprüfung von 1 Std.

Im Sonderfall von Variante 2 ergibt sich der gleiche Druckabfall in der Hauptprüfung – unabhängig davon, ob sich die Luft am Hoch- oder Tiefpunkt befindet. Für größere für den Druckfalltest entnommene Wasservolumen (Variante 1) beträgt der Unterschied im Beispiel 0,019 bar, wenn sich die Luft vollständig am Tiefpunkt der Leitung aufhält. In der Simulation, die von einem Aufenthaltsort der Luft am Hochpunkt ausgeht, wird der Druckabfall überschätzt, wenn sich die Luft nicht komplett am Hochpunkt befindet. Hier wird der Druckabfall unterschätzt, wenn der Luftanteil nicht vollständig am Hochpunkt vorliegt.

In Variante 3 ist das entsprechende Wasservolumen geringer als im Sonderfall der Variante 2. Anders als bei Variante 1 wird der Druckabfall in der Hauptprüfung unterschätzt, wenn sich die Luft am Tiefpunkt befindet. Der Fehler liegt bei 0,062 bar und liegt somit deutlich unter 10 %.

Besitzt eine Rohrleitung keine Höhendifferenz (flache Leitung), so existiert weder Hoch- noch Tiefpunkt und es stellt sich wie in Variante 4 gezeigt kein Unterschied ein.

Die Varianten 5 und 6 stellen große Druckleitungen mit extrem kleinem Luftanteil dar. Ein geringer Luftanteil wurde gewählt, da sich bei der Prüfung mit geringen Luftanteilen eine große Druckdifferenz in der Hauptprüfung einstellt. Dieser Effekt nimmt mit zunehmendem Luftanteil in der Leitung ab. Der anteilige Fehler bleibt jedoch gleich. In Variante 5 mit einem Außendurchmesser von 315 mm beträgt der Fehler 0,057 bar und liegt annähernd bei 5 % des Druckabfalls. Für den sehr großen Durchmesser von 429 mm tritt der maximale Unterschied von 0,111 bar auf, was ebenfalls einem Fehler von deutlich unter 10 % entspricht.

In der Realität werden so geringe Luftanteile nur selten erreicht. Zudem ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich die Luft nach intensivem Spülen zum Luftaustrag noch vollständig am Tiefpunkt befindet. Je weiter die Luft vom Tiefpunkt entfernt ist, desto geringer wird der Fehler, da für die Simulation angenommen wird, dass sich die Luft vollständig am Hochpunkt befindet. Bei flachen Leitungen tritt dieses Problem kaum auf, da der hydrostatische Druck sehr gering ist. Bei Leitungen mit großen Höhenunterschieden liegt oft ein steiler Verlauf vor, der wiederum begünstigt, dass sich die Luft am Hochpunkt sammelt.



Zugute kommt dem Verfahren, dass Druckabfallprüfung und Hauptprüfung bei dem gleichen Druck gestartet werden und somit einen möglichen Fehler durch gleichen Startwert begrenzen. Des Weiteren ist es vorteilhaft, dass der Druckabfalltest nur im Bereich von 0,5 bar liegt. In diesem Bereich ist der Fehler durch eine Fehleinschätzung des Aufenthaltsorts der Luft minimal.

Die Simulation berechnet den Druckabfall anhand des Druckablasstests unter Annahme der Luft am absoluten Hochpunkt der Druckleitung. Die Verifizierung der Ergebnisse (siehe Kap. 5.4.1) hat eine vergleichsweise gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Simulation sowie der Messergebnissen ergeben. Eine systematische Fehlannahme hätte hier zu deutlichen Unterschieden zwischen gemessenen und simulierten Ergebnissen führen müssen. Die getroffene Annahme der Luft am Hochpunkt scheint daher vertretbar.

8.1.2 Sicherheitsaufschlag auf berechneten Luftanteil

In Kap. 6 wurde bereits beschrieben, dass es bei der Berechnung des vorhandenen Luftanteils durch unterschiedliche unvermeidbare Unsicherheiten zu abweichenden Ergebnissen kommen kann. Da der berechnete Luftanteil die Grundlage für die Ermittlung des maximal zulässigen Druckabfalls in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens bildet, bietet die Streuung des Luftanteils ein erhöhtes Fehlerpotential.

Aus diesem Grund sollen insbesondere bei der Bestimmung des Luftanteils zusätzliche Sicherheiten geschaffen werden.

Zum einen wird im HSA-Normalverfahren der vorhandene Luftanteil in der Druckabfallprüfung nicht nur über den Druckablassvorgang, sondern auch über den darauffolgenden Aufpumpvorgang berechnet. Im Anschluss ist immer der größere Luftanteil für das weitere Vorgehen im HSA-Normalverfahren zu wählen. Somit wird eine zusätzliche Sicherheit geschaffen, da ein höherer Luftanteil zu einem geringeren maximal zulässigen Druckabfall in der Hauptprüfung führt. Zudem werden die in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Unterschiede der Luftanteilsberechnung zwischen Aufpump- und Ablassvorgang berücksichtigt.

Um Fehler durch die in Kapitel 6.2 beschriebene Streuung in der Luftanteilsberechnung auszuschließen, wird ein weiterer Sicherheitsfaktor vorgesehen. Durch die Auswertung der maximalen Streuungen aus der Luftanteilsberechnung stellte sich heraus, dass die maximale Abweichung vom gewählten Luftanteil in 74 % aller Fälle unter 0,5 % (absolut) liegt (siehe Kap. 6.2). Um der Streuung in der Berechnung der Luftanteile entgegenzuwirken, wird daher ein 0,5 %-Sicherheitsfaktor eingeführt. Dem Maximalwert der berechneten Luftanteile aus Druckablassvorgang



und Aufpumpvorgang muss somit immer ein Sicherheitsfaktor von +0,5 % zuaddiert werden. Dies erfolgt automatisch durch das Exceltool. Durch die Erhöhung des Luftanteils um 0,5 % (absolut) wird der maximal zulässige Druckabfall in der Hautprüfung entsprechend verringert. Ergibt die Druckabfallprüfung bzw. Aufpumpvorgang beispielsweise einen Luftanteil von 0 %, wird dennoch der Sicherheitsfaktor von 0,5 % zuaddiert.

Als weitere Sicherheit soll ein Warnhinweis in das HSA-Normalverfahren integriert werden. Liegt der tatsächliche Druckabfall in einer bestandenen Hauptprüfung über der Grenze von 50% des maximal zulässigen Druckabfalls (bereits inkl. beschriebenem 0,5%-Sicherheitsfaktor des Luftanteils), wird ein Warnhinweis im Exceltool ausgegeben. Der Warnhinweis informiert den Netzbetreiber darüber, dass zwar kein unzulässiger Wasserverlust stattfindet, aufgrund des Druckabfalls dennoch eine Undichtigkeit innerhalb der Abwasserdruckleitung nicht ausgeschlossen werden kann. Dadurch soll vermieden werden, dass Leckagen, welche geringfügig unter der maximal zulässigen Verlustmenge liegen, ignoriert werden. Durch den Warnhinweis wird dem betroffenen Betreiber verdeutlicht, dass trotz des Bestehens der Dichtheitsprüfung eine Exfiltration von Abwasser möglich sein könnte. Dadurch wird ein Bewusstsein für Druckleitungen mit erhöhtem Schadensrisiko geschaffen. Ein akuter Handlungsbedarf entsteht dadurch nicht, jedoch könnten Maßnahmen wie beispielsweise die Entwicklung eines Havariekonzeptes, Verkürzung des Prüfintervalls sowie die Entwicklung möglicher Sanierungskonzepte spätestens jetzt ergriffen werden.

8.1.2.1 Einfluss des Sicherheitsaufschlags auf Prüfungen mit künstlicher Leckage

Um die Sinnhaftigkeit der genannten Sicherheiten anhand von Praxisbeispielen zu bestätigen, wurden sämtliche Druckprüfungen mit und ohne die entsprechenden Sicherheiten ausgewertet. Im Folgenden werden zunächst sämtliche Druckprüfungen nach HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckage genauer betrachtet. In der nachfolgenden Abbildung 60 sowie dem Anhang 23 kann dabei zu jedem HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckage der vorhandene Luftanteil abgelesen werden. Der gemessene Druckabfall, der simulierte Druckabfall sowie der maximal zulässige Druckabfall mit und ohne 0,5 %-Sicherheit ist ebenfalls dargestellt. Des Weiteren wurde die Warngrenze bei 50 % des maximal zulässigen Druckabfalls entsprechend gekennzeichnet.

Zunächst wird überprüft, wie oft der tatsächliche Druckabfall (blauer Balken) den maximal zulässigen Druckabfall ohne Sicherheiten (roter Strich) überschreitet. Dies bedeutet, dass die künstliche Leckage auch ohne zusätzliche Sicherheit erkannt wurde. Die künstliche Leckage sollte der angepassten Leckage entsprechen, um genau den Grenzfall abzubilden. Jedoch fiel die künstliche Leckage in den allermeisten Fällen deutlich kleiner aus als gewünscht (v.a. durch Zusetzen der Leckage, Druckabfall während der Hauptprüfung). Aufgrund der „zu kleinen“ künstlichen Leckage sind zwar entsprechende Druckabfälle zu erwarten, eine Überschreitung des maximal zulässigen Druckabfalls ohne Sicherheiten jedoch nicht. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen wider. Bei 75 Prüfungen mit künstlicher Leckage wurde der maximal zulässige Druckabfall ohne Sicherheiten in lediglich 17% aller Fälle (13 Fälle) überschritten. Bei den weiteren Prüfungen wurde zwar ein entsprechender Druckabfall festgestellt, dieser lag jedoch aufgrund des zu kleinen Leckagevolumens unterhalb des Grenzwerts ohne Sicherheiten.

Durch die zusätzliche 0,5%-Sicherheit wird der Anteil der als undicht erkannten Leitungen auf 40 % (30 Fälle) erhöht, da durch die zusätzliche Sicherheit bereits Leckagen erkannt werden, welche nahe der angepassten zulässigen Leckage liegen.

Von den 75 Prüfungen mit künstlicher Leckage wäre in 27 Fällen (Anteil von 36%) ein Warnhinweis ausgegeben worden. Ein Warnhinweis sollte unbedingt erfolgen, da tatsächlich eine künstliche Leckage montiert wurde, die jedoch kleiner war als die angepasste zulässige Leckage.

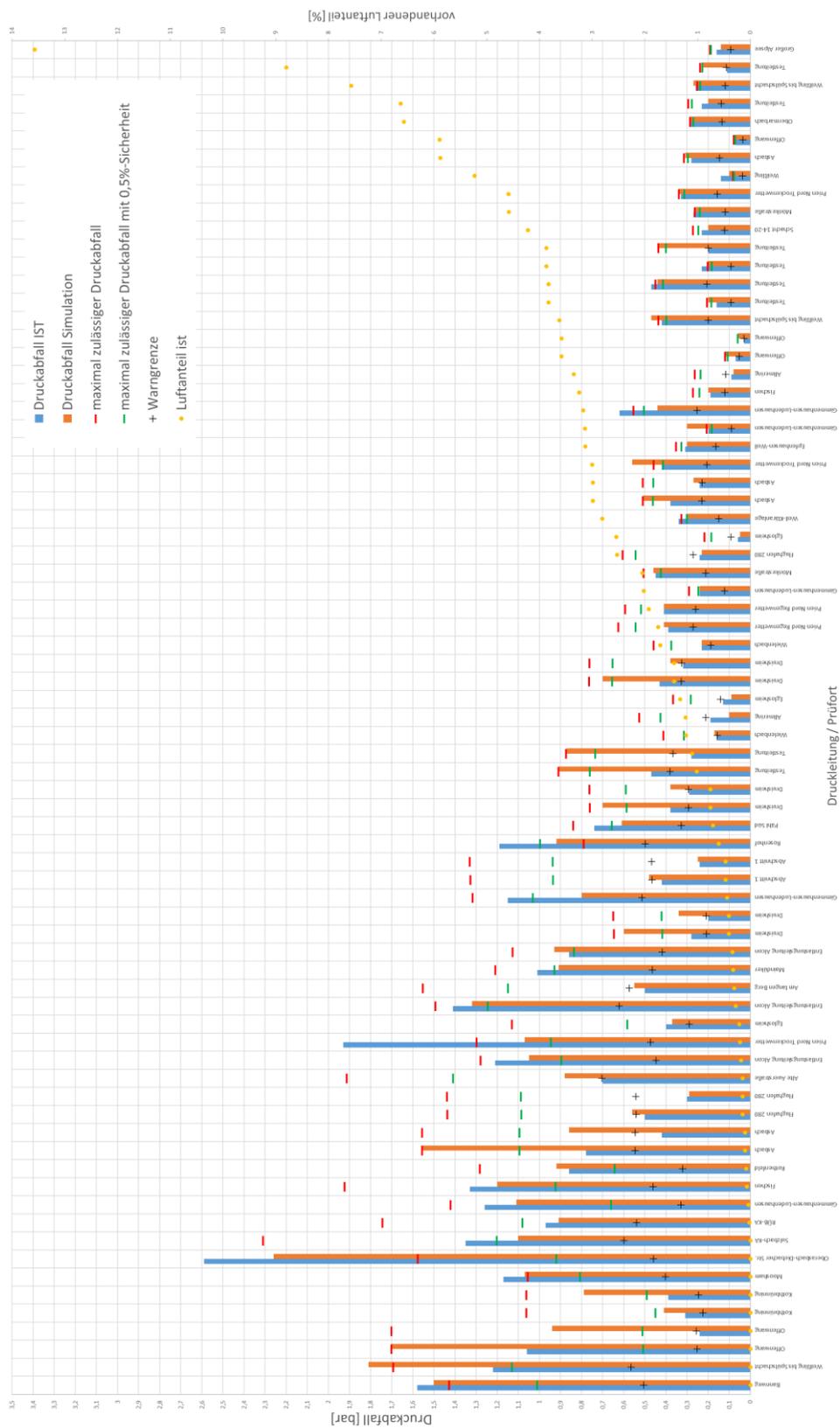


Abbildung 60: Gegenüberstellung der zulässigen Druckabfälle mit und ohne Sicherheitsfaktoren sowie des vorhandenen Luftanteils von HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckage (siehe Anhang 23)



In 18 der 75 Fälle wäre kein Warnhinweis erfolgt. In 6 dieser 18 Prüfungen mit künstlicher Leckage verkleinerte sich die künstliche Leckage erheblich. Aus den Prüfprotokollen geht hervor, dass sich die künstliche Leckage derart stark verstellte, dass das tatsächlich ausgetretene Wasservolumen unter 50 % der angepassten Leckage lag. In zwei weiteren Fällen wurde bewusst lediglich die Hälfte der angepassten Leckage eingestellt, um den Einfluss der Leckage zu untersuchen. Die künstliche Leckage lag also ebenfalls unter 50% der zulässigen Leckage. Bei den restlichen 10 Fällen handelt es sich um Prüfungen an Leitungen mit großem Leitungsdurchmesser, die noch mit 1/10-Leckagen, teilweise sogar 1/20-Leckagen durchgeführt wurden und somit ebenfalls eine viel geringere Leckage aufwiesen als die später entwickelte angepasste zulässige Leckage.

In der Summe trat somit bei allen 18 Fällen aus der künstlichen Leckage eine erheblich geringere Menge als zugelassen aus. Daher ist es korrekt, dass die Prüfung bestanden wurde und auch kein Warnhinweis erfolgte.

8.1.2.2 Einfluss des Sicherheitsaufschlags auf Prüfungen ohne künstliche Leckage

Im Folgenden soll außerdem überprüft werden, ob Leitungen ohne künstlich angebrachte Leckage im Zuge des HSA-Normalverfahren ebenfalls fälschlicherweise einen Warnhinweis erhalten hätten oder die Prüfung durch die Sicherheitsfaktoren nicht bestanden hätten. Hierzu wurden die Ergebnisse aller Druckprüfungen ohne künstliche Leckage nach HSA-Normalverfahren analog zu Abbildung 60 dargestellt (siehe Abbildung 61, bzw. Anhang 24).

Bei einer Leitung ohne Leckage ergibt die Simulation in der Hauptprüfung keinen Druckabfall.

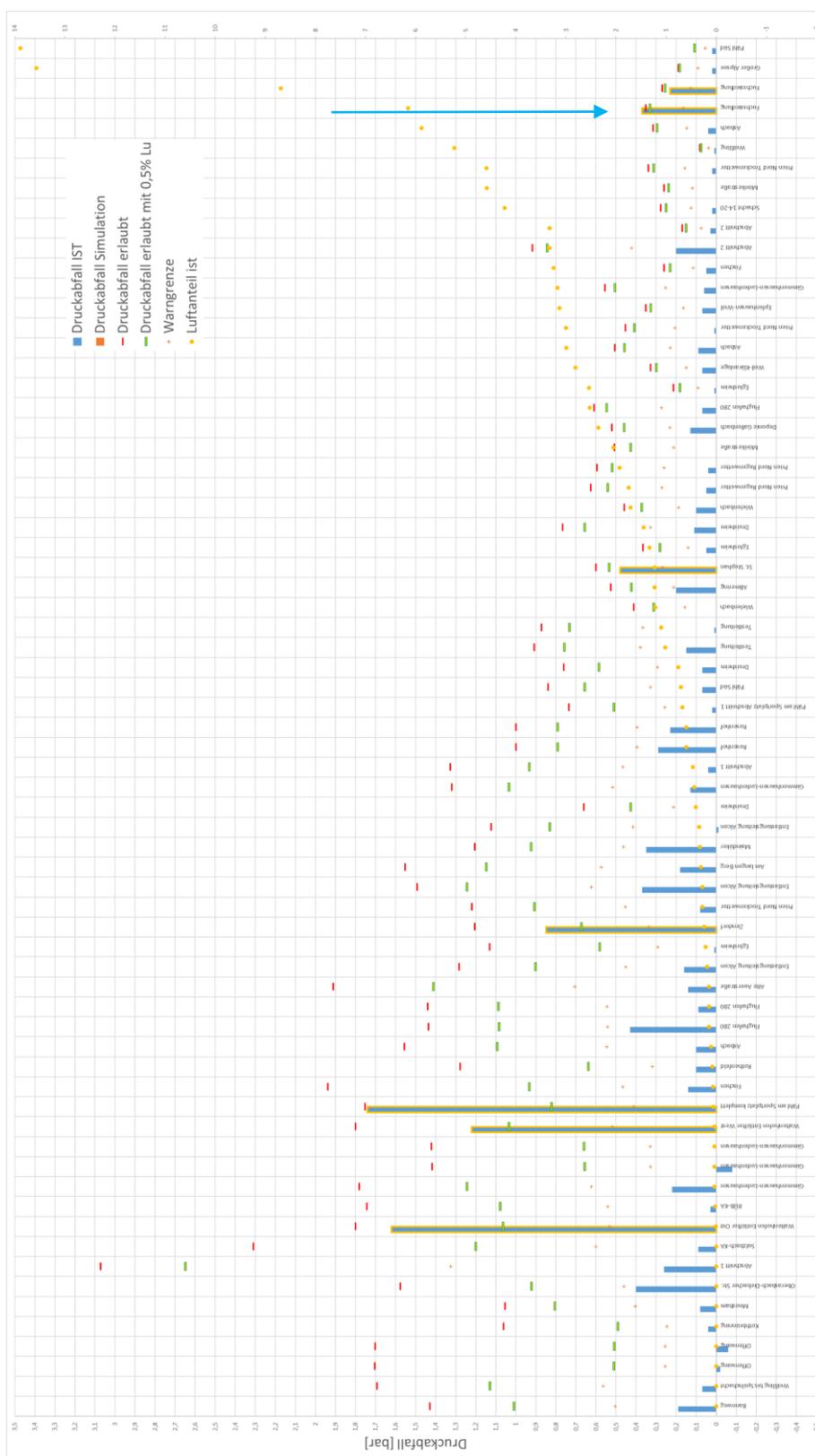


Abbildung 61: Gegenüberstellung der zulässigen Druckabfälle mit und ohne Sicherheitsfaktoren sowie des vorhandenen Luftanteils von HSA-Normalverfahren ohne künstliche Leckage (siehe Anhang 24)



Anhand von Abbildung 61 (siehe auch Anhang 24) wird deutlich, dass bis auf die Prüfung in der Fuchssiedlung (blauer Pfeil) keine andere Leitung auch ohne den Sicherheitsfaktor als undicht eingestuft worden wäre. Hier ist zu beachten, dass es sich um ein Druckentwässerungssystem handelt, an dem auch eine Reihe Hausanschlüsse angeschlossen waren. Teilweise musste gegen die Rückschlagklappen der Hausanschlüsse geprüft werden, da keine Schieber vorhanden waren. Es wird vermutet, dass hierdurch tatsächlich Undichtigkeiten vorhanden waren.

Durch die eingeführte 0,5%-Sicherheit wären jedoch fünf Leitungen undicht eingestuft worden, zwei weitere Leitungen hätten dazu einen Warnhinweis erhalten (siehe Abbildung 61: gelb umrandet). Die fünf Leitungen, welche als undicht eingestuft worden wären, wiesen jedoch alle erhebliche reale Leckagen auf. In Waltenhofen wurden an beiden Leitungen erhebliche Undichtigkeiten an der Absperrblase erkannt, welche in etwa im Bereich der angepassten Leckage lagen. In Fürth Zirndorf wurde im Nachhinein eine erhebliche Undichtigkeit in Form eines Radialrisses festgestellt. Auch in Pähl am Sportplatz ist das Nichtbestehen auf eine tatsächliche Undichtigkeit zurückzuführen. In Rehling St. Stephan sowie der Fuchssiedlung in Augsburg lagen an den Absperrorganen ebenfalls erhebliche Undichtigkeiten vor, welche durch das HSA-Normalverfahren korrekterweise erkannt wurden. Es kam somit in keinem Fall vor, dass eine Leitung fälschlicherweise durch die zusätzliche Sicherheit als undicht deklariert wurde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Anwendung des beschriebenen 0,5%-Sicherheitsfaktors sowie des Warnhinweises nicht damit zu rechnen ist, dass dichte Leitungen fälschlicherweise undicht geprüft werden. Darüber hinaus werden Leckagen, welche geringfügig unter der angepassten Leckage liegen, mit Hilfe des 0,5%-Sicherheitsfaktors sicher erkannt. Da v.a. Messungenauigkeiten, Unsicherheiten bzgl. der Lage der Luft sowie Unsicherheiten bei der Bestimmung des Luftanteils nicht vermeidbar sind, erscheint ein Sicherheitsfaktor sinnvoll, um keine tatsächlich unzulässige Leckage zu übersehen.

Des Weiteren werden Betreiber durch den Warnhinweis auf mögliche Schäden aufmerksam gemacht, die geringer als die angepasste Leckage ausfallen. Dadurch kann der Betreiber abschätzen an welchen Leitungen in näherer Zukunft ggf. Handlungsbedarf in Form von Sanierungsarbeiten entstehen könnte.



8.2 Sicherheiten 20-Min Test

Im 20-Min Test wird die Sicherheit durch den zum Bestehen der Prüfung erforderlichen Druckanstieg von 0,15 bar geschaffen.

Wenn das an einer Leckage der Druckleitung austretende Wasservolumen im 20-Min Test der nachgepumpten Wassermenge entspricht, und Veränderungen aus Luft- und Wasserkompression sowie aus der Materialdehnung vernachlässigbar gering sind, ist keine Veränderung des Drucks zu erwarten. Die Wasserkompression ist i.d.R. vernachlässigbar gering. Der 20-Min Test ist nur für Leitungen ohne erheblichen Einfluss des Materials sowie der Luft geeignet. Durch signifikante Materialdehnung sowie Kompression erheblicher Luftanteile wird ein Druckanstieg im 20-Min Test kompensiert. Auch eine dichte Leitung kann unter diesen Bedingungen nicht als dicht eingestuft werden. Hierdurch wird jedoch vermieden, dass beim 20-Min Test durch Einflüsse aus Material und Luft eine Leckage fälschlicherweise übersehen wird. Dichte Leitungen mit geringen Einflüssen aus Material und Luft können auch sicher als dicht eingestuft werden (siehe Kap. 7.4).

Ein Anstieg des Drucks an Leitungen mit künstlicher Leckage wurde trotzdem in geringem Umfang beobachtet. Dies ist v.a. darauf zurückzuführen, dass im Rahmen der unvermeidbaren Ungenauigkeiten eine größere Wassermenge nachgepumpt wurde als vorgesehen. Durch die 10 Pumpintervalle während eines Tests sind geringe Ungenauigkeiten sowie Messungenauigkeiten durch Druckschwankungen praktisch nicht zu vermeiden.

Da der 20-Min Test erst ab einem Druckanstieg von 0,15 bar als bestanden gilt, ist somit bereits durch den benötigten Druckanstieg eine zusätzliche Sicherheit von streng genommen 0,15 bar vorgesehen.

Daher werden für den 20-Min Test keine zusätzlichen Sicherheitsfaktoren eingeführt.



9 Maximale Prüfabschnitte und Nenndurchmesser

Die Prüfung von Abwasserdruckleitungen basiert auf einer zulässigen Leckage. Diese errechnet sich, wie in Kap. 4.1.4 beschrieben, anhand der Wandfläche und des Durchmessers der Druckleitung. In Anlehnung an die im Rahmen des Forschungsvorhabens geprüften Rohrdurchmesser kann das Verfahren bis zu einem Nenndurchmesser von DN500 eingesetzt werden (siehe Kap. 4.1.4).

Ebenfalls geht die Länge der zu prüfenden Druckleitung ein. Anders als im Freispiegelbereich, wo üblicherweise mit einer Vielzahl an Schadstellen zu rechnen ist, ist bei Abwasserdruckleitungen vermutlich eher von nur einer Schadstelle auszugehen. Daher vergrößert sich der zulässige Wasserverlust dieser einen Schadstelle mit Zunahme der Abschnittslänge.

Das Leckagevolumen wäre im Extremfall bei einer „endlosen“ Druckleitung so groß, dass selbst ein Totalabriss nicht mittels HSA-Normalverfahren bzw. 20-Min Test detektierbar wäre. Zudem ist für die Anwendbarkeit des 20-Min Tests das Nachpumpvolumen, welches der zulässigen Leckage entspricht, innerhalb der Nachpumpintervalle von 2 Min in die Druckleitung einzubringen und Druckschwankungen müssen in dieser Zeit abklingen. Dies ist bei sehr großen Wassermengen problematisch.

Um große Druckleitungen mittels der im Forschungsprojekt vorgestellten Verfahren sinnvoll prüfen zu können, bedarf es einer Einschränkung des maximal zulässigen Prüfabschnitts. Da im Projektverlauf auch großvolumige Druckleitungen geprüft werden konnten, wurden diese Druckleitungen für eine Obergrenze herangezogen. Das maximal zulässige Leckagevolumen innerhalb eines Prüfabschnitts wurde in Absprache mit dem LfU auf 3,5 l/min begrenzt. Es ist davon auszugehen, dass Druckleitungen wenigstens in gewissen Abständen mit Absperrarmaturen ausgestattet sind. Daher wird die maximale Prüfabschnittslänge zusätzlich zum maximalen Leckagevolumen auf eine Länge von 4 km begrenzt. Dies begrenzt auch eine mögliche Leckageortung wenigstens auf einen Abschnitt. In Abbildung 62 sind alle im Forschungsprojekt untersuchten Abwasserdruckleitungen anhand deren Länge und Innendurchmesser aufgetragen. Des Weiteren ist in blau die vorgeschlagene Grenze für zulässige Prüfabschnitte mit einer maximalen Länge von 4 km und einem maximalen Wasseraustritt von 3,5 l/min innerhalb des Leitungsabschnitts eingezeichnet. Mit zunehmendem Durchmesser der Rohrleitung vermindert sich entsprechend die zulässige maximale Länge für den prüfbaren Leitungsabschnitt, um den maximalen Wasseraustritt je Leitungsabschnitt einhalten zu können.

Es ist deutlich zu erkennen, dass Prüfabschnitte dreier Druckleitungen die Bedingungen des maximalen Leitungsabschnitts überschreiten. Diese Leitungen hätten entsprechend nicht geprüft werden dürfen. Dies sind die Leitungen Großwallstadt

Sulzbach-Kläranlage, Fürth Zirndorf und Ludwigsburg Eglosheim. Alle genannten Druckleitungen hätten mehrfach die Möglichkeit eines Absperrorgans innerhalb der Druckleitung gehabt und somit auch in Abschnitten geprüft werden können.

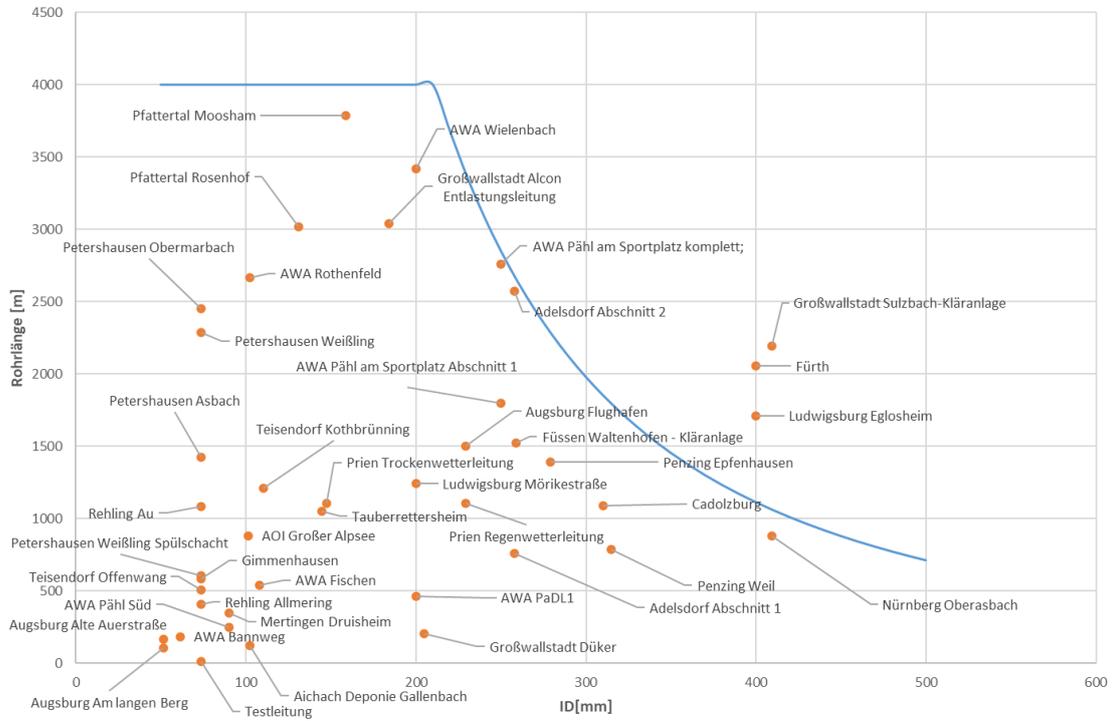


Abbildung 62: Maximale Prüfabschnitte für die Prüfverfahren HSA-Normalverfahren und 20-Min Test, mit Markierung der im Forschungsprojekt untersuchten Druckleitungen

Durch Umstellung von Formel (22) nach der Leitungslänge in Abhängigkeit des Innendurchmessers für Innendurchmesser ≤ 80 mm und einer maximalen Leckage von 3,5 l/min kann der maximal prüfbare Abschnitt wie folgt errechnet werden:

$$L_{max.} = \frac{3,5 \frac{l}{min} * 60min}{0,1 * 0,15l * \frac{1}{30min * 1m^2} * 2 * \frac{ID}{2000} * \pi * 60min} \quad (45)$$

ID = Rohrlinnendurchmesser [mm]
 Lmax. = Maximaler Prüfabschnitt [m]

Für Innendurchmesser > 80 mm errechnet sich der maximal zulässige Prüfabschnitt durch Umstellung von Formel (23) wie folgt:

$$L_{max.} = \frac{3,5 \frac{l}{min} * 60min}{0,1 * 0,15l * \frac{1}{30min * 1m^2} * 2 * \frac{ID}{2000} * \pi * 60min * \frac{ID}{80mm}} \quad (46)$$



Für $\Delta V_{L,angepasst}$ (siehe Formel (22)) bzw. (23)) wird die für einen Leitungsabschnitt maximal zulässige Leckage eingesetzt. Diese entspricht $3,5 \text{ l/min} \cdot 60 \text{ min}$, und somit 210 l/h . Der maximale Prüfabschnitt ist weiterhin auf 4.000 m begrenzt.

Zudem kann mithilfe des Innendurchmessers und der zugehörigen maximalen Leitungslänge ein maximal zulässiges Rohrvolumen berechnet werden. Dies erfolgt mit nachfolgender Formel:

$$V_{R,max.} = \frac{ID^2}{4} * \pi * L_{max.} * 10^{-6} \quad (47)$$

$\Delta V_{R,max.}$	=	Maximal zulässiges Rohrvolumen	[m ³]
ID	=	Rohrinnendurchmesser	[mm]
$L_{max.}$	=	Maximaler Prüfabschnitt	[m]

Ab einem Innendurchmesser von 220 mm wird das Rohrvolumen pro Prüfabschnitt durch die Begrenzung der maximal zulässigen Leckage je Prüfabschnitt auf 140 m^3 begrenzt. Eine Tabelle mit den maximal erlaubten Prüfabschnittsvolumina bzw. Längen in Abhängigkeit des Innenrohrdurchmessers ist dem Anhang 25 zu entnehmen.



10 Prüfung neuer Abwasserdruckleitungen

Neue Abwasserdruckleitungen werden zur Abnahme üblicherweise nach den für Trinkwasserdruckleitungen geltenden Normen DIN EN 805 sowie DVGW W 400-2 geprüft (siehe Kap. 2.1). Der Prüfdruck für Trinkwasserleitungen liegt üblicherweise bei 16 bar bzw. 21 bar. Das Rohrmaterial neuer Abwasserdruckleitungen ist i.d.R. auch auf diese Drücke ausgelegt. Die Armaturen von Abwasserdruckleitungen sind aufgrund der deutlich geringeren Beanspruchung im Betrieb jedoch nicht selten in der Druckstufe PN 10 dimensioniert. In diesen Fällen wird die Druckprüfung mit einem Prüfdruck von z.B. 12 bar (oder 13 bar) nach DIN EN 805 sowie DVGW W 400-2 durchgeführt.

Eine Prüfung neuer Abwasserdruckleitungen ist theoretisch auch mit dem HSA-Normalverfahren möglich. Da neue Leitungen unter Belastung mit hohem Druck eine deutliche Dehnung erfahren, welche erst langsam abklingt, würde eine Vorprüfung sehr lange dauern.

Üblicherweise werden Druckleitungen mit biegeweichem Material mittels Kontraktionsverfahren geprüft. Hierbei führt eine Verkürzung der Vorprüfung zu einer nicht vollständigen Dehnung des Rohres. Im Kontraktionsverfahren wird jedoch schnell Druck abgelassen und der anschließende Druckanstieg gemessen. Auch bei nicht abgeschlossener Dehnung in der Vorprüfung wird der Druck nach rascher Druckabsenkung steigen. Dieses Verfahren wird deshalb aufgrund der Zeitersparnis weiterhin angewendet. Bei biegesteifen Rohrmaterialien kann die Dichtheit mittels (beschleunigtem) Normalverfahren überprüft werden, da hier durch die Steifigkeit der Materialien in der Vorprüfung von keiner nennenswerten Rohrdehnung auszugehen ist.

In Abbildung 63 ist beispielhaft der Druckverlust der neuen Testleitung über eine Dauer von 67 Stunden aufgetragen. Es ist ein deutlicher Druckabfall zu erkennen, welcher sich abschwächt, aber am Ende der Aufnahme immer noch nicht abgeschlossen ist. Da der Druck bei diesem Versuch mit 4 bar deutlich niedriger ist als die bei der Neuprüfung von Abwasserdruckleitungen verwendeten Drücke, kann davon ausgegangen werden, dass eine Stabilisierung des Drucks dort deutlich länger dauern würde. Dies deckt sich mit Aussagen der Prüffirmen zu Prüfungen an neuen Trinkwasserleitungen in der Praxis.

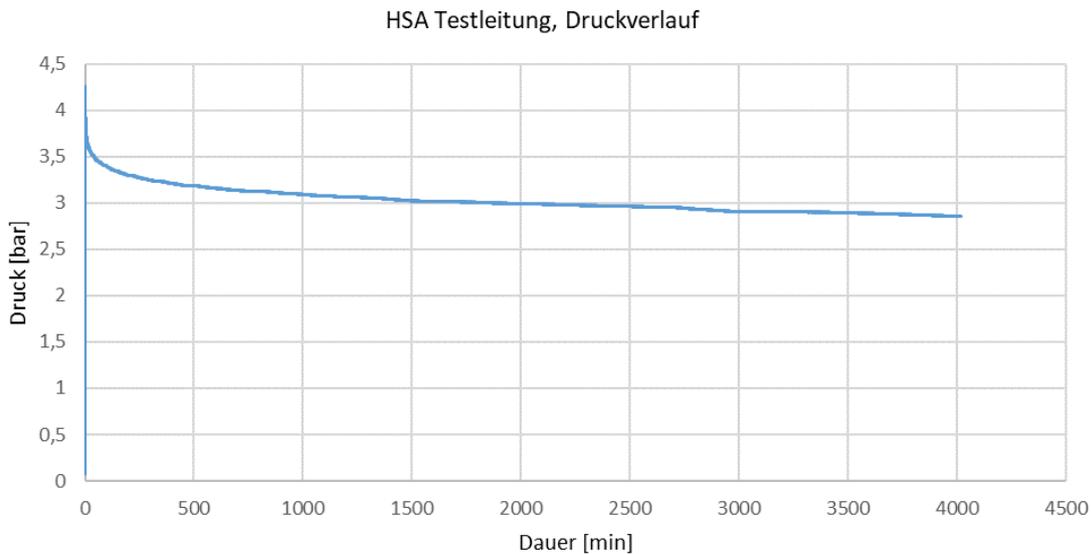


Abbildung 63: Druckverlust der abgesperrten Testleitung über 67 Stunden

Eine Prüfung nach Norm-Verfahren – jedoch mit verringertem Prüfdruck auf unter 10 bar – ist grundsätzlich nicht zu empfehlen. Die Problematik der Luftanteile sowie deren Auswirkung wird bei den Norm-Verfahren durch die hohen verwendeten Drücke kompensiert. Bei Einsatz der Norm-Verfahren mit geringeren Drücken ohne Anpassungen kann es leicht zu Fehlinterpretationen durch die bei niedrigen Drücken ausgedehnten Luftanteile kommen. Das Kontraktionsverfahren für biegeweiße Materialien basiert auf Kontraktion des Leitungsmaterials durch plötzlichen Druckabfall. Dies ist bei niedrigeren Drücken nicht im vollen Umfang zu erwarten; auch hier wäre eine Anpassung erforderlich.

An neuen Abwasserdruckleitungen werden vielfach Armaturen der Druckstufe PN 10 eingesetzt. Je nach Hersteller können Armaturen der Druckstufe PN 10 i.d.R. mit 13 bar beaufschlagt werden. Bei diesem Druck ist der Einfluss der Luft wesentlich geringer als bei den im Forschungsvorhaben zur Anwendung kommenden Drücken für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen. Die Prüfung nach bereits genannten Norm-Verfahren bei Prüfdrücken von mindestens 13 bar ist somit für neue Abwasserdruckleitungen im Regelfall möglich.

Eine Anwendung des HSA-Normalverfahrens für die Prüfung neuer Leitungen wird aufgrund der zu erwartenden sehr langen erforderlichen Vorprüfung im Bereich von Stunden und Tagen ausdrücklich nicht vorgeschlagen.

Beim 20-Min Test ist bei der Prüfung neuer Leitungen kein zum Bestehen der Prüfung erforderlicher Druckanstieg zu erwarten, da die Materialdehnung neuer Leitung einem Druckanstieg entgegenwirkt. Die Anwendung des 20-Min Tests wird für die Prüfung neuer Leitungen daher ebenfalls ausdrücklich nicht empfohlen.



11 Empfehlungen für eine reibungslose Durchführung von Druckprüfungen in der Praxis

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde deutlich, dass sich ein Großteil der Abwasserdruckleitungen im Bestand in einem nicht prüfbareren Zustand befindet. Vielfach waren kleinere, teilweise auch größere bauliche Maßnahmen erforderlich, um die Leitungen in einen prüfbareren Zustand zu versetzen. Im Folgenden werden Maßnahmen und Empfehlungen zur Ermöglichung und Durchführung von Druckprüfungen an Abwasserdruckleitungen gegeben.

11.1 Sichtung der Unterlagen und Bestimmung der Leitungseigenschaften

Im Vorfeld einer jeden Druckprüfung müssen zunächst ausführliche Informationen zu den Leitungseigenschaften zusammengestellt werden. So muss für die Berechnung des Luftanteils und des zulässigen Druckabfalls das Leitungsmaterial sowie die Wandstärke und der Rohrdurchmesser bekannt sein. Hinzu kommt, dass der maximale hydrostatische Druck, also die maximale Höhendifferenz der Leitung bekannt sein muss. Außerdem muss der hydrostatische Druck am Prüfort bekannt sein. Dieser Kennwert kann durch vorhandene Planunterlagen (z.B. Längsschnitt) bestimmt werden. Liegen unzureichende Planunterlagen vor, muss der Leitungsverlauf durch den Geländeverlauf entlang der Leitungstrasse abgeschätzt werden (z.B. mit Hilfe des Bayernatlas). Dieser Verlauf sollte mit den Höhenangaben der auf der Leitungstrasse liegenden Revisionsschächten abgeglichen werden. Informationen zum Leitungsverlauf sind zudem immens wichtig, um ein schlüssiges Entlüftungskonzept im Vorfeld der Druckprüfung entwickeln zu können (siehe Kap. 11.3.2)

Für die Bestimmung des Prüfdrucks muss außerdem der Betriebsdruck bekannt sein. Dieser kann durch die Auswertung der Pumpendaten ermittelt werden. Liegen diesbezüglich keine Unterlagen vor, kann über einen der Pumpe nachgeschaltet angeschlossenen Drucksensor (z.B. Prüfgerät) der vorhandene Leitungsdruck bei maximalem Pumpbetrieb ermittelt werden.



11.2 Bauliche Voraussetzungen für die Prüfbarkeit von Abwasserdruckleitungen

Um die Dichtheitsprüfung an Abwasserdruckleitungen durchführen zu können, müssen verschiedene Voraussetzungen eingehalten werden. Diese sind im Folgenden aufgeführt.

- **Verschließbarkeit der Druckleitung**

Wichtigste Voraussetzung für die Prüfung ist das Verschließen des Leitungsendes. Selbiges gilt auch für den Anfang der Druckleitung im Pumpwerk, um den Prüfdruck aufzubringen. Gerade bei älteren Druckleitungen lässt sich nicht ausschließen, dass die vorhandenen Rückschlagarmaturen Undichtigkeiten aufweisen, weshalb die Prüfung gegen eine Rückschlagklappe grundsätzlich nicht empfohlen werden kann. Die Leitung sollte nach der Pumpe mittels Schieber abgesperrt werden. In der Regel existieren entsprechende Absperrarmaturen nach der Pumpe.

Die Verschließbarkeit des Leitungsendes ist hingegen oftmals nicht gegeben, jedoch für die Prüfung zwingend erforderlich. Um an solchen Leitungen dennoch eine Prüfung zu ermöglichen, kommen verschiedene Methoden zum Abschließen des Leitungsendes in Betracht.

Es ist zu beachten, dass die Leitung durch die Absperrereinheit zunächst noch zur Herstellung einer ausreichenden Luftfreiheit gespült werden muss (siehe Kap. 11.3.2). Hierfür ist ein ausreichender Durchgang der Absperrereinheit sicherzustellen. Es ist auch zu berücksichtigen, dass mindestens zu Beginn des Spülvorgangs Abwasser mit abwassertypischen Feststoffen aus der Leitung austritt. Auch hierfür muss der Durchgang geeignet sein.

Zum einen kann die Verschließbarkeit des Leitungsendes z.B. durch die Montage von (Erd-) Schiebern oder angeflanschten Kugelhähnen erreicht werden.



Abbildung 64: Anschluss eines Kugelhahns mittels Flansch

Bei überstehenden Rohrenden kann dieses üblicherweise auch mit Hilfe einer Rohrkupplung (z.B. GRIP- oder Plassonkupplung) verschlossen werden.



Abbildung 65: Anschluss eines Kugelhahns mittels Plasson

Bei mit der Schachtwand plan abgeschnittenen Leitungsenden gestaltet sich die Montage einer Kupplung oder Flanschplatte hingegen problematisch.

Absperrblasen aus dem Freispiegelbereich sind für Druckprüfungen an Abwasserdruckleitungen aufgrund des geringen zulässigen Drucks dieser Absperrlemente von üblicherweise 1 bis 2 bar im Regelfall nicht einsetzbar.

Im Einzelfall können spezielle Hochdruckblasen oder Absperrteller eingesetzt werden, die jedoch leitungsspezifisch und kostenintensiv sind. Des Weiteren ist auch hier ein ausreichend großer Durchgang für das Spülen der Leitungen nötig, um die erforderlichen Spülgeschwindigkeiten für den Austrag der Luft zu erreichen.



Abbildung 66: Modifiziertes Absperrorgan zum Verschluss der Leitung Zirndorf

Für einen ausreichenden Luftaustrag muss der üblicherweise mittig angeordnete Durchgang des Absperrorgans baulich so angepasst werden, dass die am Rohrscheitel angesammelte Luft auch ausgetragen werden kann (siehe Abbildung 66). Dies ist insbesondere bei größeren Durchmessern erforderlich.

Das Risikopotential durch ein Verrutschen der (Hochdruck-)blase bzw. des Absperrtellers ist jedoch nicht zu unterschätzen. Entsprechende Sicherungsmaßnahmen sind zu treffen (siehe Abbildung 67). Andere Verschlussmöglichkeiten sind nach Möglichkeit vorzuziehen.



Abbildung 67: Einbausituation des Absperrorgans am Leitungsende Zirndorf

Bei Leitungsenden, die unterhalb des Wasserspiegels in einem Schacht oder Gerinne einbinden, kann beispielsweise ein vorgelagerter Erdschieber die Verschlussbarkeit herstellen. Grundsätzlich stellen Erdschieber eine gute Option zur Verschlussbarkeit des Leitungsendes dar. Die Funktion der Erdschieber ist jedoch vorab zu prüfen, insbesondere bei Erdschiebern, bei denen die Wartungsintervalle nicht eingehalten wurden.



- **Anschlussmöglichkeit des Prüfequipments**

Für den Anschluss des Prüfequipments ist ein Anschluss in Form einer GEKA-Kupplung, eines Typ-C-Storz oder eines mindestens $\frac{3}{4}$ -zölligen Gewindes notwendig. Des Weiteren ist für die Prüfung feststofffreies Wasser, wie z. B. Trink- oder Brauchwasser, erforderlich und i.d.R. Lichtstrom. Beim Einsatz von Trinkwasser muss der „Anschluss“ an die Druckleitung über einen freien Auslauf erfolgen, da ein direkter Anschluss an das Abwassernetz auch mit Systemtrenner unzulässig ist. Für den Brauchwasseranschluss sind ggfs. entsprechende Systemtrenner einzusetzen.

Der Anschluss des Prüfequipments bietet sich meistens im Pumpwerk an, kann grundsätzlich jedoch auch an anderen zugänglichen Stellen der Druckleitung innerhalb des abgesperrten (Prüf-) Bereichs erfolgen.

- **Ausreichendes Rückstauvolumen**

Während des Spülens sowie für die Dauer der Prüfung selbst muss eine Außerbetriebnahme der Leitung erfolgen. Hierfür ist der Abwasseranfall während der Außerbetriebnahme mit dem vorhandenen Speichervolumen abzugleichen. Idealerweise kann die Leitung über mehrere Stunden (mindestens 1,5-2 h) außer Betrieb genommen werden. Die erforderliche Außerbetriebnahmedauer richtet sich nach dem gewählten Prüfverfahren. Zusätzlich zur Dauer des Prüfverfahren ist ggfs. für die Spülung der Leitung zur Herstellung der Luftfreiheit (siehe Kap. 11.3.2) bereits eine Speicherung des anfallenden Abwassers erforderlich. Üblicherweise werden Dichtheitsprüfungen im Mischsystem daher bei Trockenwetter durchgeführt.

Sollte kein ausreichendes Rückstauvolumen zur Verfügung stehen, können ggfs. Saugwägen zum Transport des Abwassers während der Prüfung eingesetzt werden.



11.3 Gewährleisten einer ausreichenden Luftfreiheit

Im HSA Normalverfahren und im 20-Min Test kann die Druckleitung sowohl mit Abwasser als auch mit Brauch-/Trinkwasser geprüft werden. Eine Entleerung der in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitung oder eine Reinigung der Druckleitung ist für die Prüfverfahren nicht erforderlich. Unabhängig vom Füllmedium (Brauch-/Trinkwasser oder Abwasser) ist ein vollgefüllter Zustand für die Prüfung erforderlich.

Eine ausreichende Luftfreiheit der Leitung ist Grundvoraussetzung für die Durchführung einer Druckprüfung. Ein zu hoher Luftanteil kann eine vorhandene Leckage durch Ausdehnung der Luft überdecken und somit ein falsches Prüfergebnis erzeugen. Eine ausreichend geringe Luftmenge in der Druckleitung ist beim HSA-Normalverfahren durch die Druckabfallprüfung nachzuweisen. Ohne den Nachweis einer ausreichenden Luftfreiheit darf die Dichtheitsprüfung nicht durchgeführt werden (siehe Kap. 4.1.6 & 4.1.7). Beim 20-Min Test ist kein Nachweis der ausreichenden Luftfreiheit erforderlich, jedoch kann nur bei ausreichend geringen Luftanteilen in der Leitung der 20-Min Test bestanden werden.

Neben dem Austrag von Luft aus Abwasserdruckleitungen (siehe Kap. 11.3.2) für die Druckprüfungen ist auch die Vermeidung von Luftanteilen im Betrieb (siehe Kap. 11.3.1) von Relevanz.

11.3.1 Betriebliche/Bauliche Maßnahmen zur Vermeidung von Luftanteilen

Neben der Prüfbarkeit hat die in Abwasserdruckleitungen vorhandene Luft auch einen erheblichen Einfluss auf den Betrieb von Anlagen. So können Gase in geschlossenen Leitungssystemen zu erheblichen Betriebsproblemen führen. Diese werden im Arbeitsblatt (DWA-A 113, 2020) wie folgt beschrieben:

- Durch die Erhöhung des Strömungswiderstands und damit verbundener Verschiebung des Arbeitspunkts der Pumpe kommt es zu höheren Energiekosten, längeren Laufzeiten und geringeren Fördermengen
- Große Druckanstiege bei wechselndem Austritt von Wasser und Luft
- Vibrationen und Schwingungen
- Im Scheitelpunkt erhöhte Korrosionsgefahr
- Verfälschte Durchflussmessung
- Dekompression von Luftanteilen mit Schallgeschwindigkeit
- Explosionsgefahr durch endzündbare Gasansammlungen

Daher sollte vermieden werden, dass sich Gase innerhalb der Leitung ansammeln können. Die folgenden Maßnahmen sollen einer Ansammlung von Gasen in Abwasserdruckleitungen entgegenwirken:

- **Vermeidung von ungewolltem Lufteintrag in die Druckleitung**

Einen möglichen Grund für den ungewollten Eintrag von Luft in Druckleitungen stellt oftmals der Absturz des Zulaufs in einen Pumpensumpf dar (Pothof, 2011). Wenn die Fallhöhe des Wassers in den Pumpensumpf zu hoch ist, kommt es zum Eintrag von kleinen Luftbläschen in das Wasser, welche wiederum durch die Pumpe direkt in das Leitungssystem eingespeist werden können (siehe Abbildung 68).



Abbildung 68: Darstellung des Lufteintrages in den Pumpensumpf durch freien Auslauf im Pumpensumpf (links: Laborsituation, rechts: realer Pumpensumpf) (Pothof, 2011)

Um diesen ungewollten Lufteintrag zu vermeiden, kann die Fallhöhe reduziert werden oder ein Rutschsystem analog folgender Abbildung 69 eingesetzt werden. Durch die Rutsche wird der freie Fall des Abwassers vermieden und somit der Lufteintrag minimiert.



Abbildung 69: Rutschsystem zur Vermeidung des ungewollten Lufteintrags in Druckleitungen (Hamburg Wasser)

Der durch die Abwasserrutsche auftretende Effekt der Kreisströmung des Abwassers kann außerdem ggf. genutzt werden, um Schwimmschlamm auf der Oberfläche durch weitere Umlenklebleche direkt zur Pumpe zu leiten und somit den Aufbau einer Schwimmschlammdecke zu vermeiden.

Der gezielte Austrag von unvermeidbaren Luftanteilen aus Druckleitungen kann im Betrieb durch das Einhalten der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit (siehe Kap. 11.3.2) und durch den gezielten Einsatz von Be- und Entlüftungsventilen erreicht werden.

- **Einsatz von Be- und Entlüftungsventilen**

Bei der baulichen Ausführung muss ein schlüssiges Konzept für den Einsatz von Be- und Entlüftungsventilen auf Grundlage der Planunterlagen erstellt werden. Informationen und Hinweise zur Erstellung eines Entlüftungskonzept können der Literatur entnommen werden (DWA-A 113, 2020).

Aus den Literaturhinweisen geht hervor, dass die Positionierung von Be- und Entlüftungsventil i.d.R. insbesondere im Bereich von lokalen Hochpunkten und stark abfallenden Leitungsabschnitten sinnvoll sein kann. Des Weiteren sollte das Be- und Entlüftungsventil laut Herstellerangaben in Fließrichtung etwa 30 cm tiefer als der lokale Hochpunkt positioniert werden. Außerdem ist ein ausreichend großer



Entlüftungsdom unter dem Entlüftungsventil vorzusehen, um wandernde Gasblasen einzufangen (DWA-A 113, 2020).

- **Pneumatische Pumpwerke und Druckluftspülanlagen**

Pneumatische Pumpwerke oder Druckluftspülanlagen sind bereits im Vorfeld von Druckprüfungen außer Betrieb zu nehmen, um einen weiteren ungewollten Lufteintrag zu vermeiden.

11.3.2 Methoden zum Austrag von Luftanteilen

Im Folgenden werden verschiedene Methoden zum Austrag von unvermeidbaren Luftanteilen aus Abwasserdruckleitungen erläutert, welche insbesondere im Vorfeld von Druckprüfungen eingesetzt werden können:

- **Spülen der Abwasserdruckleitung**

Wie bereits erwähnt, kann der erforderliche Luftaustrag ggf. durch Spülen der Leitung bei Überschreitung der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit erreicht werden. Diese sind nicht zu verwechseln mit den Mindestgeschwindigkeiten, die gegen Sedimentation der Abwasserfeststoffe bei der Dimensionierung verwendet werden. Für den Erfolg der Spülung sind die Spülgeschwindigkeit und das Spülwasservolumen maßgebend. Grundsätzlich lässt sich die Luft umso besser austragen, desto höher die Fließgeschwindigkeit ausfällt und desto länger gespült wird. Es sollte somit auf Grundlage der maximalen Spülgeschwindigkeit entschieden werden, ob die Leitung durch naheliegende Trinkwasseranschlüsse mit freiem Auslauf, Brauchwasser-Hydranten (mit Systemtrenner), Brauchwasseranschlüsse (mit Systemtrenner), Spülwägen oder durch die vorhandenen Pumpen gespült wird. Der Verschluss des Leitungsendes muss für den Spülvorgang entsprechend durchgängig sein, damit die Leitung unmittelbar nach dem Spülen verschlossen werden kann. Sollte das Einspeisen von Luft über Be- und Entlüftungsventile aufgrund auftretender Unterdrücke in entsprechenden Leitungsbereichen befürchtet werden, sind diese im Vorfeld zu verschließen.

Für die Spülung der Leitung zum Luftaustrag mittels der installierten Pumpen kann beispielsweise das Abwasser aus der Pumpenvorlage verwendet werden. Oftmals können zwei oder mehrere Pumpen gleichzeitig für die Spülung betrieben werden, um eine möglichst hohe Geschwindigkeit zu erreichen. Der Vorlagebehälter sollte dabei nach Möglichkeit maximal aufgestaut werden. Idealerweise steht das doppelte Leitungsvolumen für die Spülung zur Verfügung. Reicht das Rückhaltevolumen nicht aus, kann während des Spülvorgangs zusätzlich ggfs. Brauch- oder Trinkwasser in den Vorlagebehälter eingespeist werden.



Die erforderliche Spülgeschwindigkeit für die Selbstentlüftung richtet sich nach Durchmesser und Gefälle der Leitung. In der Literatur sind Formeln zur Berechnung der erforderlichen Selbstentlüftungsgeschwindigkeit angegeben (Aigner, 2015). Im DWA Merkblatt (DWA-A 116-3, 2013) wird außerdem folgende Formel zur Berechnung der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit nach Aigner und Thumerich (2002) verwendet:

$$V_s = \sqrt{1,5 * g * \frac{D_i * \sin \beta}{1,64 * \sin \beta + 0,06}} \quad (48)$$

Die Ergebnisse beispielhafter Spülgeschwindigkeiten auf Grundlage von Formel (48) sind zur Orientierung in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 25: erforderliche Selbstentlüftungsgeschwindigkeiten bei einer um 15° nach unten geneigten Leitung

Innendurchmesser ID [mm]	Spülgeschwindigkeit für Luftaustrag [m/s]
100	0,89
250	1,40
400	1,77

Mit Hilfe des in Kap. 3.2 beschriebenen Prüfstands zur Untersuchung des Luftaustrags konnten die mit Hilfe der Formel (48) berechneten Selbstentlüftungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Neigungswinkeln experimentell bestätigt werden.

Je größer das für die Spülung zur Verfügung stehende Wasservolumen, desto besser können Luftanteile ausgetragen werden. Als Richtwert kann das doppelte bis dreifache Leitungsvolumen herangezogen werden. Insbesondere bei Leitungen mit großem Leitungsvolumen kann die Bereitstellung des doppelten Leitungsvolumens sowie ausreichender Spülgeschwindigkeiten für den Luftaustrag problematisch sein.

Bei Leitungsdurchmessern bis DN100 kann ggfs. über Brauchwasser-Hydranten mit C-Schlauch und Systemtrenner gespült werden. Bei größeren Leitungsdurchmessern kann i.d.R. keine ausreichende Spülgeschwindigkeit mehr erreicht werden.



- **Molchen der Abwasserdruckleitung**

Als Alternative zur Spülung ist das Molchen der Druckleitung zur Herstellung der Luftfreiheit gut geeignet. Dabei wird ein Kunststoffmolch mit Hilfe der Pumpen durch die Leitung gedrückt. Hierfür müssen jedoch die entsprechenden Armaturen zum Einbringen des Molches am Leitungsanfang und Auffangen am Leitungsende vorhanden sein. Beim Molchen besteht insbesondere bei Querschnittsverjüngungen (z.B. durch extreme Ablagerungen) die Gefahr des Steckenbleibens. Jedoch bieten Hersteller mittlerweile verschiedene Ausführungen von Molchen an, welche die Gefahr des Steckenbleibens reduzieren und dennoch den Austrag von Luft ermöglichen (z.B. Eismolch). Es werden auch Molche mit Ortungssystemen angeboten, um ggfs. die Lage der Leitung oder eines steckengebliebenen Molchs bestimmen zu können.

Besonders große Gefälle über längere Druckleitungsabschnitte und Höhendifferenzen (>30 m) können beim Molchen dazu führen, dass ein erfolgreicher Luftausstrag nicht möglich ist. Bewegt sich der Molch aufgrund des hydrostatischen Drucks der dahinterliegenden Wassersäule schneller als Wasser nachgefördert werden kann, führt dies ggf. zu einem unerwünschten Ansaugen von Luft über den Molch.

- **Befüllen leerer Abwasserdruckleitungen**

Abfallende Leitungsabschnitte mit am Hochpunkt installierten Be- und Entlüftungsventilen führen i.d.R. zu einer Entleerung der Leitungsabschnitte. In diesen Fällen kann die Leitung ggf. vom Tiefpunkt des leeren bzw. teilgefüllten Abschnittes aus befüllt werden. Die verdrängte Luft sollte dabei über das am Hochpunkt liegenden Be- und Entlüftungsventil ausgetragen werden.

Sowohl für das komplette Befüllen von Abwasserdruckleitungen als auch für einzelne teilgefüllte Abschnitte empfiehlt es sich, für die Befüllung der Leitung die Füllgeschwindigkeiten des nationalen österreichischen Anhangs zur DIN EN 805 (ÖVGW-W 101, 2014) zu berücksichtigen (siehe Tabelle 26). Beim Befüllen wird außerdem zu kurzen Pausen geraten, um den Entlüftungsprozess zu optimieren.

Tabelle 26: Darstellung der empfohlenen Füllgeschwindigkeiten nach (ÖVGW-W 101, 2014)

DN	l/s	DN	l/s	DN	l/s
40	0,1	100	0,3	300	3
50	0,1	150	0,7	400	6
65	0,15	200	1,5	500	9
80	0,2	250	2	600	14

Im Anschluss an das Befüllen von Leitungen bzw. Leitungsabschnitten sollte die Leitung bei ausreichender Fließgeschwindigkeit gespült werden.

- **Restliche Luftanteile über Entlüftungsmöglichkeit auspressen**

Im Forschungsprojekt stellte sich heraus, dass sich oftmals Lufttaschen an lokalen Hochpunkten sammeln, welche durch Spülen nicht ausgetragen werden konnten. Sollte an den entsprechenden lokalen Hochpunkten eine Anschlussmöglichkeit befinden, bietet es sich an, einen Kugelhahn mit angeschlossenem Schlauch anzubringen. Im Anschluss kann Druck auf die Leitung gebracht werden, wodurch die Luft am Hochpunkt komprimiert wird. Durch anschließendes Öffnen des Kugelhahns an den lokalen Hochpunkt wird die Luft aus der Leitung gepresst. Dieser Vorgang muss mehrfach wiederholt werden, bis ausschließlich Wasser aus der Leitung austritt.

Diese Methode eignet sich insbesondere auch für den Luftaustrag an Leitungen mit einem U-förmigen Längsschnitt wie beispielsweise Düker oder Seedruckleitungen. Existiert eine Entlüftungsmöglichkeit am Hochpunkt vor dem absteigenden Ast, kann die vorhandene Luft wie oben beschrieben „ausgepresst“ werden. Mit dem beschriebenen Verfahren konnten an mehreren U-förmigen Dükerleitungen größere Luftanteile am Hochpunkt vor dem absteigenden Ast ausgetragen werden.



11.3.3 Gegenüberstellung der im Forschungsprojekt erzielten minimalen Luftanteile an realen Druckleitungen

Wie erfolgversprechend der Luftaustrag mit den in Kap. 11.3.2 genannten Möglichkeiten ist, wird anhand der folgenden Abbildung verdeutlicht. Diese zeigt die kleinsten erreichten Luftanteile sämtlicher im Forschungsprojekt geprüfter Druckleitungen und den leitungsspezifischen, maximal zulässigen Luftanteil bei angestrebtem Prüfdruck. Die Art des Luftaustrags an der jeweilig geprüften Abwasserdruckleitung ist ebenfalls aufgetragen. Der bei der entsprechenden Druckleitung kleinste erreichte Luftanteil sowie der maximal zulässige Luftanteil bei angestrebtem Prüfdruck kann über die vertikale Achse abgelesen werden.

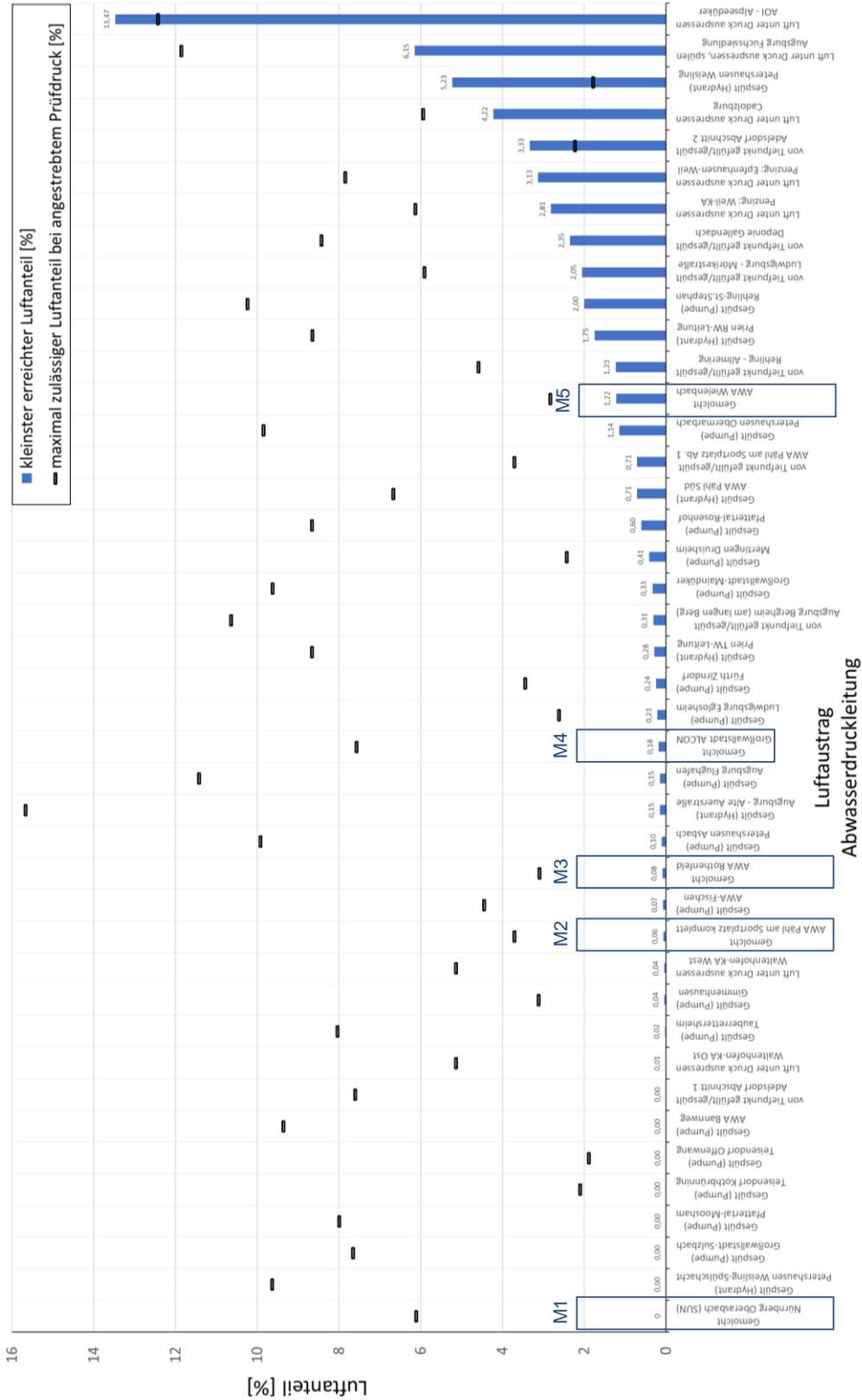


Abbildung 70: Darstellung der im Rahmen des Forschungsvorhabens erreichten minimalen Luftanteile der Beispielleitungen in aufsteigender Reihenfolge



Auf Grundlage der 42 geprüften Druckleitungen wird ein Überblick über in der Praxis erzielbare Luftanteile gegeben. So konnte an 67 % der geprüften Druckleitungen ein Luftanteil von unter 1 % erreicht werden. Ein Luftanteil von 3 % wurde lediglich in 6 der 42 Beispielleitungen (entsprechend 14 %) überschritten.

Entscheidend für die Anwendbarkeit des HSA-Normalverfahrens ist der leitungs-spezifische maximal zulässige Luftanteil. Dieser wurde nur in drei Fällen überschritten. Somit waren in diesen Fällen zusätzliche Maßnahmen zur Herstellung der Luftfreiheit erforderlich. An über 93 % aller Druckleitungen konnte eine für die Druckprüfung ausreichende Luftfreiheit hergestellt und die Prüfung entsprechend durchgeführt werden.

Im Zuge der Druckprüfungen konnte außerdem die Erfahrung gesammelt werden, dass das Molchen einer Abwasserdruckleitung besonders bei komplizierten Leitungsverläufen eine gute Möglichkeit zum Entlüften der Druckleitung darstellt. Dadurch konnte in Nürnberg und Großwallstadt (Alcon) (siehe Abbildung 70: M1 und M4) durch die vorhandenen Molchschleusen bei vertretbarem Aufwand ein Luftanteil von unter 0,2% hergestellt werden. An den Leitungen in Pähl, Rothenfeld und Wielenbach (siehe Abbildung 70: M2, M3 und M5) scheiterte zunächst der Versuch, die Leitungen mittels Spülen ausreichend zu entlüften. Durch anschließendes Molchen konnte der vorhandene Luftanteil jedoch in allen drei Fällen stark verringert werden, sodass eine anschließende Durchführung des HSA-Normalverfahrens ermöglicht wurde.

Die Übersicht der kleinsten erreichten Luftanteile unterstreicht somit, dass eine ausreichende Luftfreiheit in den allermeisten Fällen hergestellt werden kann. Zuvor sollte jedoch auf Grundlage der Planunterlagen ein schlüssiges Entlüftungskonzept entwickelt werden. Sollte trotz sämtlicher Entlüftungsmöglichkeiten keine Prüfung zulässig sein, kann außerdem eine Erhöhung des Prüfdrucks (siehe Kap. 4.1.5 & 5.3.2) oder ggfs. ein nachträglicher Einbau einer Molchschleuse und/oder eines Be- und Entlüftungsventil diskutiert werden.



11.4 Umgang mit Druckleitungen aus Asbestzement

Asbestzement ist ein Baustoff, welcher hauptsächlich in den 1950er und 1960er Jahren verbaut wurde. Bei der Herstellung von Zementmörtelrohren wurden zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften Asbestfasern eingesetzt. Die Erkenntnis, dass Asbestfasern bei inhalativer Aufnahme hoch kanzerogen wirken, wurde erst Jahre nach dem Einbau der Leitungen gewonnen. Daher ist die Neuverlegung von Asbestzementrohren seit dem 01.01.1995 nicht mehr zulässig. Der Betrieb von Asbestzementrohrleitungen ist nach Erkenntnissen der WHO und des Bundesgesundheitsamtes jedoch nicht mit gesundheitlichen Risiken verbunden. Aus diesem Grund wird heutzutage noch immer eine beträchtliche Anzahl (ca. 5% der in Betrieb befindlichen öffentlichen Kanälen) an altbestehenden AZ-Leitungen betrieben (Dr.-Ing. Johann Müller, 2021).

Insbesondere bei Baumaßnahmen zur Herstellung der Prüfbarkeit und bei der Durchführung von Druckprüfungen an Asbestzementleitungen wird darauf hingewiesen, dass einschlägige Arbeitsschutzvorschriften wie die (TRGS-519, 2014) „Asbest Abbruch-, Sanierungs-, oder Instandhaltungsarbeiten“, zu beachten sind und für die Planung bzw. Durchführung von Baumaßnahmen an Asbesthaltigen Materialien das zuständige Gewerbeaufsichtsamt zu kontaktieren ist.

12 Instandhaltungsmaßnahmen und Havariekonzepte

Im Zuge des Forschungsprojekts „Risikobewertung von Druckleitungen der Siedlungswasserwirtschaft in österreichischen Seen“ (Pressl, et al., 2015) wurden Maßnahmenkonzepte zur Risikominimierung an Seedruckleitungen entwickelt. Diese wurden zwar speziell für Seedruckleitungen entwickelt, können jedoch größtenteils auch auf den Umgang mit normalen Abwasserdruckleitungen übertragen werden.

Vor dem Hintergrund des gegenüber Freispiegelleitungen erhöhten Schadenspotentials von Abwasserdruckleitungen und der in der Praxis üblicherweise nicht vorhandenen Redundanz, wird die Erstellung von leitungsspezifischen Havariekonzepten sowie die Umsetzung von betrieblichen Überwachungsstrategien für die Betreiber von Abwasserdruckleitungen, insbesondere von seeverlegten Abwasserdruckleitungen empfohlen.

- **Überwachungsstrategien für den Betrieb**

Um eine Schadstelle möglichst schnell identifizieren zu können, und somit eine längere Exfiltration von Abwasser zu vermeiden, sollten nach (Pressl, et al., 2015) verschiedene Überwachungsstrategien genutzt werden. Empfehlungen für eine derartige Überwachungsstrategie wurde in Form eines 5-Stufenplans ausgearbeitet:

1. Auswertung vorhandener Pumpendaten
2. Elektronische Druckmessung
3. Durchflussmessung
4. Druckprüfung
5. Optische Inneninspektion

Die Durchführung der einzelnen Maßnahmen muss nicht zwingend der aufgeführten Reihenfolge entsprechen. Nach örtlichen Gegebenheiten ist vom Betreiber der Abwasserdruckleitungen zu entscheiden, welche Maßnahmen in welcher Regelmäßigkeit sinnvollerweise umgesetzt werden können. Eine ausführliche Beschreibung des 5-Stufenplans befindet sich in Anhang 26.

Grundsätzlich kann jede der aufgeführten Überwachungsstrategien sowohl an erdverlegten als auch seeverlegten Abwasserdruckleitungen in Betracht gezogen werden. Durch die kontinuierliche bzw. regelmäßige Kontrolle von Messdaten (Punkt 1., 2., 3. & 4.) können Leckagen frühzeitig identifiziert werden und der Schaden ggf. schnell behoben werden. Eine Nachrüstung entsprechender Messeinheiten und die regelmäßige Zustandserfassung mittels Druckprüfungen und Inneninspektionen empfiehlt sich. Es empfiehlt sich, leitungsspezifisch zu prüfen, ob die Umsetzbarkeit der genannten Strategien bei vertretbarem Kosten- und Zeitaufwand umsetzbar ist.

Neben der Empfehlung eines Einsatzes der Überwachungsmethoden des 5-Stufenplans werden in Kap. 14.3.6 ergänzende Informationen und Empfehlungen zu Instandhaltungsmaßnahmen an seeverlegten Druckleitungen beschrieben.

Die Durchführung von Druckprüfungen bildet ebenfalls eine Überwachungsstrategie. Dementsprechend können Netzbetreiber das HSA-Normalverfahren, bzw. den 20-Min Test auch in kürzeren Abständen durchführen, um sicherzustellen, dass keine ungewollte Exfiltration von Abwasser über einen längeren Zeitraum stattfindet.

- **Ablaufprozess/Havariekonzept bei vermuteter Leckage**

Um möglichst schnell auf vermutete Leckagen reagieren zu können, sollte der Netzbetreiber bereits im Vorfeld einen entsprechenden Ablaufprozess entwickeln. Dadurch können entsprechende Maßnahmen schnellstmöglich in die Wege geleitet werden.

Ein Vorschlag für einen Ablaufprozess, welcher im Zuge des österreichischen Forschungsprojektes speziell für Seedruckleitungen entwickelt wurde, kann dem Anhang 27 entnommen werden.

Einige der dort aufgeführten Punkte können auch auf landbasierte Abwasserdruckleitungen übertragen werden. Jedoch sollte der Ablaufprozess für jede Leitung individuell entwickelt werden, da nur eine intensive Auseinandersetzung mit den örtlichen Randbedingungen zu effektiven Ablaufprozessen führt.

Als finaler Punkt steht i.d.R. ein erfolgreich durchgeführtes Sanierungsvorhaben im Ablaufprozess. Entsprechende Sanierungsmöglichkeiten werden in Kap. 13.4 aufgeführt.

- **Alternative Abwasserbeseitigung bei Schäden an Abwasserdruckleitungen**

Ein zentraler Punkt im Ablaufprozess bei einer festgestellten Leckage ist, dass eine alternative Beseitigung der anfallenden Abwassermengen eingerichtet wird. Grundsätzlich können dabei verschiedene Methoden angewendet werden. In jedem Fall sollte nach Möglichkeiten zur potentiellen Zwischenspeicherung von Abwasser im Schadensfall gesucht werden. Die jeweiligen alternativen Abwasserbeseitigungsmaßnahmen werden im Folgenden erläutert.

1. Überführung zum nächsten Übergabeschacht oder zu einer geeigneten Kläranlage mittels Saugwägen

Diese Methode kann prinzipiell nur bei geringen anfallenden Abwassermengen angewendet werden. Über einen längeren Zeitraum ist die Überführung mittels Saugwägen nur bis zu einem gewissen Abwasseranfall möglich (Betreiberabhängig,



etwa 100 m³/d). Des Weiteren sind die Pumpschächte in einigen Fällen aufgrund der geographischen Lage oder unzureichend befestigten Wegen schlecht erreichbar.

2. Umgehung mittels (provisorischer) Landleitung: „fliegende Leitung“

Bei dieser Methode wird das anfallende Abwasser entweder in ein naheliegendes Kanalnetz oder einen ausreichend dimensionierten Kanalstrang gepumpt. Aus diesem Grund wird häufig eine provisorisch eingerichtete, oberirdische Leitung („fliegende Leitung“) verkehrsgerecht installiert und eingesetzt. (Pressl, et al., 2015)

3. Provisorisch errichtete Abwasserreinigungsanlage (ARA)

Die provisorische Abwasserreinigungsanlage stellt grundsätzlich die effektivste Art der alternativen Abwasserbeseitigung dar. Auch hier existieren Einschränkungen. Neben den technischen Schwierigkeiten bei der Realisierung müssen die nicht unerheblichen Kosten gerechtfertigt sein. Oftmals lohnt sich diese Methode daher nur bei einem höheren Abwasseranfall und längeren Sanierungsdauern. Des Weiteren müssen der notwendige Wirkungsgrad und die rasche Verfügbarkeit einer solchen Anlage gegeben sein. Außerdem ist ein ausreichendes Platzangebot sowie geeigneter Stromanschluss erforderlich.



13 Schäden an Abwasserdruckleitungen

Durch die im Zuge des Forschungsprojektes entwickelten Prüfverfahren kann an in Betrieb befindlichen Druckleitungen ermittelt werden, ob innerhalb des geprüften Leitungsabschnittes ein unzulässiger Wasserverlust aufgrund einer bzw. mehrerer Undichtigkeiten (Leckagen) auftritt.

Welche Schadensbilder die Ursache für den Wasseraustritt darstellen und wo diese innerhalb der Leitung verortet sind, lässt sich auf Grundlage der Prüfverfahren jedoch nicht feststellen. Im Folgenden werden zunächst bekannte Schadensbilder an Abwasserdruckleitungen erläutert. Im Anschluss wird ein Überblick über Methoden zur Ortung von Leckagen sowie zur allgemeinen Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen gegeben.

13.1 Bekannte Schadensbilder an Abwasserdruckleitungen

Die Undichtigkeiten können unterschiedlichste Formen aufweisen und verschiedene Ursachen haben. Bezüglich der Verteilung von Schadensbildern und deren Ursachen sind in der Literatur hauptsächlich Auswertungen für Trinkwasserdruckleitungen zu finden. Die Datenlage für den Abwasserdruckbereich ist hingegen sehr gering. Im Abschlussbericht „Inspektion und Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen und – Dükern; Phase II“ (IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2011) wurde jedoch eine ausführlichere Aufstellung der Schadensarten an Abwasserdruckleitungen auf Grundlage von Erfahrungen beteiligter Netzbetreiber sowie der Erkenntnisse des Trinkwasserbereichs aufgestellt. Im Folgenden wird ein Überblick der dort genannten Schadensarten an Abwasserdruckleitungen gegeben und durch die im Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse ergänzt.

Schadensbilder an Kunststoffleitungen:

Mit zunehmender Alterung ist bei Kunststoffrohrleitungen aus PE und PVC mit einer Festigkeitsabnahme des Werkstoffs zu rechnen. Neben dieser Festigkeitsabnahme kommt es vor allem bei PVC-Leitungen zusätzlich zu einer Versprödung des Werkstoffs und einer zunehmenden Bruchempfindlichkeit. Aufgrund der altersbedingten Festigkeitsabnahme können somit Ermüdungserscheinungen auftreten. Des Weiteren ist Kerbverhalten ein typischer Schadensmechanismus an Kunststoffrohrleitungen. So können sich beispielsweise spitze Steine der Baugrubenverfüllung in die Rohrwandung eindrücken und dadurch eine Kerbwirkung hervorrufen. (Roscher, 2008)

Das IKT führt folgende Schadensarten für Abwasserdruckleitungen aus Kunststoffen auf:

- *Undichte Rohrverbindungen*
- *Längsrisse*
- *Radialrisse*
- *Deformation bzw. Spannungsrisskorrosion insbesondere durch Punktlasten*
- *Sprödbruch*
- *Beschädigung durch Dritte*



Abbildung 71: links: undichter Flanschanschluss, Quelle: AWA; rechts: Längsrissbildung in Mainsdüker; (Zweckverband AMME)

Undichte Rohrverbindungen konnten im Zuge der durch die HSA durchgeführten Druckprüfungen mehrfach festgestellt werden. Besonders häufig führten unzureichend festgezogene Flansche zur Exfiltration von Abwasser (siehe Abbildung 71, links). Grundsätzlich ließ sich ebenfalls feststellen, dass Armaturen anfällig für Tropfverluste sind und dass derartige Wasserverluste an Rohrleitungsarmaturen bei sämtlichen Leitungsmaterialien auftreten können.

In einer Dükerleitung aus PE-HD trat im Bereich des Mains ein Längsriss auf (siehe Abbildung 71, rechts). Der Betreiber vermutet, dass dieser Schaden durch äußere Krafteinwirkung verursacht wurde.

Die Schweißverbindungen von Kunststoffrohrstücken sind bei mangelhafter Ausführung besonders anfällig für Radialrisse. Auch Flanschverbindungen können bei starken Längsbiegespannungen entlang der Flanschkehle einen Radialriss ausbilden. Geklebte PVC Muffen neigen außerdem zur Ausbildung von Sprödbrüchen, da der früher eingesetzte Kleber den Versprödungsprozess beschleunigt.

Schadensarten an Asbestzementleitungen

Da es sich bei Asbestzement um einen zementgebundenen Werkstoff handelt, stellt neben den allgemein bekannten Schadensursachen an Abwasserdruckleitungen (undichte Rohrverbindungen, Beschädigungen durch Dritte) die biogene-Schwefelsäure-Korrosion (BSK) eine der Hauptursachen für das Versagen von Kanälen dar (Technische Universität Braunschweig, Insitut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1992).

Das IKT hat ausgehend von den Erfahrungen der Netzbetreiber und Hinweisen in der Literatur folgenden Schadensarten für Asbestzementleitungen aufgelistet:

- *Korrosion innen/außen bzw. Veränderungen der Zementmatrix mit Festigkeitsverlust und Quellen der Rohrwandung*
- *Blasenbildung der Innenbeschichtung*
- *Undichte Rohrverbindung*
- *Riss- und Scherbenbildung*
- *Wandstärkenverlust*
- *Beschädigung durch Dritte*



Abbildung 72: links: Scherbenbruch hervorgerufen durch defekten Druckminderer an Druckluftspülung - rechts: Schaden durch Dritte im Zuge einer Spülbohrung; (AWA)

Wie in Abbildung 72 (links) zu sehen ist, kam es zu einem Scherbenbruch an einer Abwasserdruckleitung aus Asbestzement. Der Scherbenbruch ist aufgrund eines defekten Druckminderers an der Druckluftspülung entstanden, wodurch ein zu hoher Druck (vermutlich 10 bar) aufgebracht wurde. Nur wenige Monate später kam es zu einem weiteren Schaden an der Abwasserdruckleitung. Bei der Durchführung einer Spülbohrung zur Verlegung eines Kabelkanals wurde die Abwasserdruckleitung getroffen, wodurch es zu einem Schaden mit einem Durchmesser von ca. 30 cm kam (siehe Abbildung 72 (rechts)).



Schadensarten an metallischen Abwasserdruckleitungen

Im Zuge des Forschungsprojektes traten metallische Abwasserdruckleitungen lediglich in zwei verschiedenen Formen auf. Im Bereich von Pumphäusern werden meistens Rohrstücke aus Edelstahl verwendet, da diese strapazierfähig, korrosionsbeständig sowie leicht montier- und schweißbar sind. Aufgrund der hohen Kosten wird Edelstahl i.d.R. jedoch nur im Bereich des Pumphauses verwendet. Einige Netzverbände betreiben außerdem noch Druckleitungen aus duktilem Gusseisen.

Das IKT hat auf Basis von Betreibererfahrungen sowie Literaturangaben zu Schadensarten in Trinkwasserleitungen folgende Schadensarten für metallische Abwasserdruckleitungen (Stahl und Guss) aufgelistet:

- *Korrosion innen/außen als Flächen-, Mulden-, Loch- und Narbenkorrosion*
- *Bei Grauguss und duktilem Guss ist auch Graphitierung möglich*
- *Undichte Verbindungen*
- *Abrieb/Fehlstellen der Innenbeschichtung*
- *Fehlstellen im äußeren Korrosionsschutz*
- *Längsrisse*
- *Radialrisse*
- *Verformung*
- *Beschädigung durch Dritte*

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde von keinem der beteiligten Netzbetreiber über Beispiele für größere Schäden an metallischen Leitungen berichtet.



13.2 Erkennen einer unzulässigen Undichtigkeit an der Druckleitung – erste Handlungsempfehlung zur Ortung der Leckage

Im vorangegangenen Kapitel wurden die materialabhängigen Schadensarten an Abwasserdruckleitungen aufgeführt. Diese Schadensarten können die Ursache für das Nicht-Bestehen einer Dichtheitsprüfung nach HSA-Normalverfahren bzw. 20-Min Test darstellen. Die Prüfverfahren geben jedoch keine Aussage darüber, wo die Schadstelle(n) in der Druckleitung verortet ist/sind.

Um festzustellen, an welcher Stelle einer Druckleitung Undichtigkeiten auftreten, werden auf dem Markt verschiedene Verfahren zur Ortung von Leckagen angeboten. Diese Verfahren sind jedoch meist mit einem erheblichen wirtschaftlichen und arbeitstechnischen Aufwand verbunden. Da Leckagen u.U. bereits durch einfache Methoden geortet werden können, werden im Folgenden Erstmaßnahmen erläutert, welche zur Ortung von Undichtigkeiten durch den Betreiber oder die Prüffirma durchgeführt werden können.

Stellt der Betreiber einer Abwasserdruckleitung anhand der Druckprüfung fest, dass ein unzulässiger Abwasserverlust vorliegt, kann zunächst der Versuch unternommen werden, die Leckage(n) mittels einfacher Sicht- und Geräuschprüfung an allen zugänglichen Leitungsabschnitten zu orten.

Dabei müssen sämtliche zugänglichen Rohrabschnitte sowie Armaturen und Rohrverbindungen unter Aufrechterhalten des Prüfdrucks auf unzulässige Wasserverluste überprüft werden. Dadurch können ggf. Leckagen an verschiedenen Armaturen und Flanschverbindungen lokalisiert und behoben werden. Das verschlossene Rohrleitungsende sollte ebenfalls überprüft werden. Ist dort keine Sichtprüfung möglich, kann auf typische Wasseraustrittsgeräusche geachtet werden (zischen). Selbiges gilt für das der Pumpe nachgeschaltete Absperrorgan. Akustische Untersuchungsmethoden sind im Trinkwasserbereich stark verbreitet. Durch die im Abwasserbereich typischen niedrigen Drücke sind akustische Verfahren bedauerlicherweise deutlich weniger effektiv. Anhand der einfachen Sicht- bzw. Geräuschprüfung konnten beispielsweise an den Leitungen in Ludwigsburg (siehe Abbildung 73), Waltenhofen (AZV Füssen), Großwallstadt sowie am Bannweg (AWA) bereits ausschlaggebende Wasserverluste lokalisiert und behoben werden.



Abbildung 73: Undichter MID in Ludwigsburg

Bei der Prüfung einer Abwasserdruckleitung in Rehling-Au fiel der Druck beim Aufbringen des Prüfdrucks schlagartig ab. Da der Druck zuvor erhöht werden konnte, im Anschluss jedoch nicht mehr, wurde davon ausgegangen, dass es an der Druckleitung durch Aufbringung des Prüfdrucks zu einem größeren Schaden gekommen sein muss. Im Anschluss konnte durch Abfahren sämtlicher zugänglicher Druckleitungsabschnitte festgestellt werden, dass ein stark korrodierter Vakuumbrecher die Ursache für die große Leckage ausmachte.

Kann der Prüfdruck trotz ausreichender Luftfreiheit durch stetiges Nachpumpen nicht aufrecht gehalten werden, spricht dies für eine, oder mehrere Leckage(n) mit einer größeren Verlustmenge als das Nachpumpvolumen. Auch in diesem Fall sollte eine ausführliche Sicht- und Geräuschprüfung an sämtlichen zugänglichen Leitungsabschnitten durchgeführt werden, wie beispielsweise in Rehling-Au.

Des Weiteren kann der Trassenverlauf abgefahren werden und das Gelände hinsichtlich vegetativer Veränderungen oder sonstiger Auffälligkeiten (z.B. Vernässungen, Bewuchs, Beschilderung, Baustellen, Erdsonden, neue und alte Spartenquerungen...) überprüft werden.

Die in diesem Kapitel beschriebenen „Erst-Maßnahmen“ können – soweit möglich – auch an allen zugänglichen Abschnitten von seeverlegten Abwasserdruckleitungen durchgeführt werden.

Lässt sich die vorhandene Leckage nicht durch die genannten Maßnahmen lokalisieren, sollte die Leitung – wenn möglich – in mehrere kürzere Prüfabschnitte unterteilt und die Druckprüfung an diesen wiederholt werden. So kann die Lage der Undichtigkeit ggf. auf einen kleineren Leitungsabschnitt begrenzt werden.

13.3 Verfahren zur Ortung von Leckagen in Abwasserdruckleitungen

Sollten die genannten Erstmaßnahmen zur Lokalisierung einer unzulässigen Undichtigkeit keine gewinnbringenden Erkenntnisse liefern, muss auf alternative Möglichkeiten zur Ortung von Leckagen zurückgegriffen werden.

Im Abschlussbericht „Inspektion und Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen und – Dükern; Phase I“ (IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2011) wurde hierfür eine ausführliche Beschreibung der auf dem Markt angebotenen Möglichkeiten zur inneren Zustandserfassung von Druckleitungen erstellt und deren Anwendbarkeit an Abwasserdruckleitungen zusammengestellt. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die vom IKT untersuchten Methoden.

Sämtliche Methoden zur inneren Zustandserfassung, welche auch explizit zur Ortung vorhandener Leckagen angewendet werden können, sind grün hinterlegt. Grau hinterlegte Methoden eignen sich zwar zur Erfassung des Leitungszustands (z.B. zur Erfassung der Verformung des Rohrquerschnitts oder der Lage), jedoch sind diese nicht explizit zur Ortung von Leckagen geeignet.

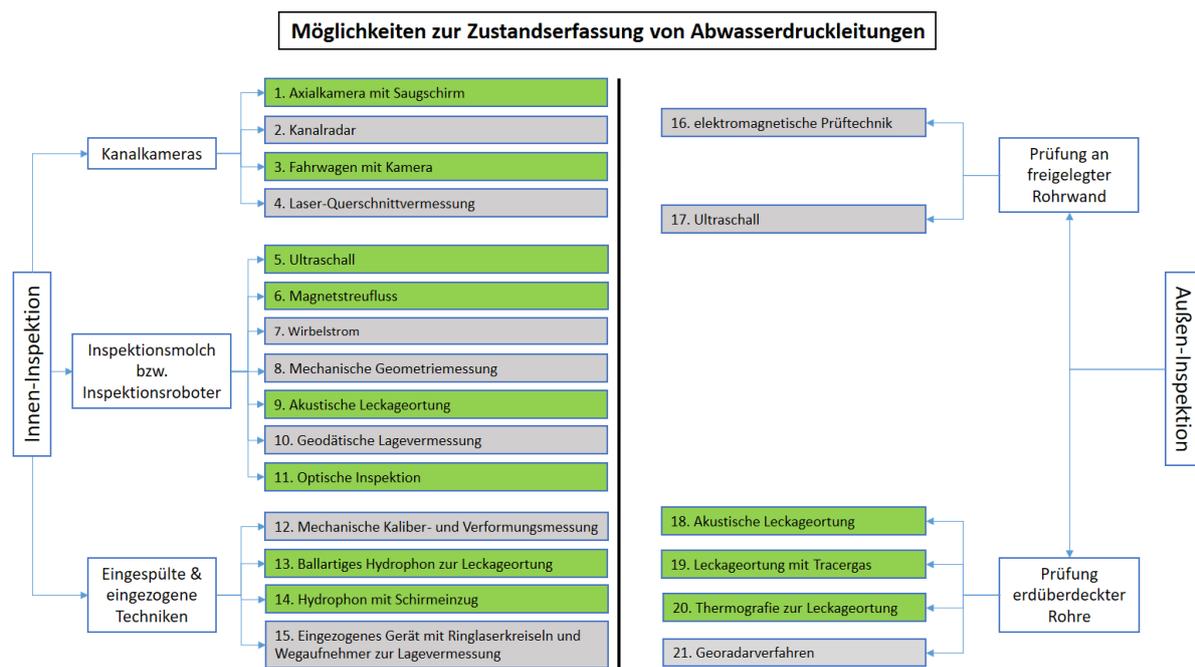


Abbildung 74: Möglichkeiten zur Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen auf Grundlage (IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2011)

In Anhang 28 sind die Anwendungsgrenzen der Leckageortungsmethoden an Abwasserdruckleitungen auf Grundlage der Rechercharbeiten und Erfahrungen des IKT zusammengefasst. Für ausführliche Beschreibungen der Methoden sowie praktische Einsatzerfahrungen wird ebenfalls auf den o.g. Bericht verwiesen.



Grundsätzlich stehen optische Verfahren (Kamerabefahrung), akustische Verfahren und Verfahren mit Tracergas zur Verfügung. Für die Einsatzmöglichkeit von Tracergas ist eine Leerung der Leitung nicht zwingend erforderlich. Das Ergebnis ist jedoch abhängig von der Durchlässigkeit des Bodenmaterials sowie der Versiegelung der Oberfläche. Beispielhaft wird im Folgenden das SmartBall-Verfahren als akustische Methode vorgestellt, da dieses Verfahren während des Forschungsvorhabens bei einem Netzbetreiber zum Einsatz kam. Es stehen weiter eine Vielzahl von Methoden zur optischen Inneninspektion zur Verfügung. Die limitierenden Faktoren für den Einsatz der Verfahren können Leitungslänge sowie Leitungsdurchmesser sein, wobei teilweise Leitungslängen von bis zu 1.000 m untersucht werden können. Das Erkennen von insbesondere kleineren Schadstellen kann durch beeinträchtigte Sichtverhältnisse (vor allem bei vollgefüllten Leitungen), die Farbe des Rohrwerkstoffs sowie durch Sielhaut und Ablagerungen erschwert werden. Für Stahl- und Gusseleitungen kann auch der Einsatz von Ultraschallprüf- sowie Magnetstreufusstechniken in Erwägung gezogen werden.

Die in Abbildung 74 aufgelisteten Verfahren zur Zustandsüberprüfung können unter Berücksichtigung der im Bericht des IKT aufgeführten Anwendungsgrenzen grundsätzlich für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen in Betracht gezogen werden. Neben den dort aufgeführten Methoden können außerdem die in Anhang 26 bzw. Kap. 12 aufgeführten betrieblichen Überwachungsstrategien zur Erfassung des Zustands seeverlegter und erdverlegter Abwasserdruckleitungen angewendet werden:

- Auswertung der Pumpendaten
- Auswertung der Druckmessung
- Auswertung der Messdaten des Durchflusses
- Regelmäßige Durchführung von Druckprüfungen zur Zustandsbewertung der Druckleitung (HSA-Normalverfahren und 20-Min Test)
- Regelmäßige Durchführung der optischen Rohrrinneninspektion (Verfahren in Abbildung 74 aufgeführt)

Als neues Verfahren zur Zustandserfassung bzw. Leckageortung in Betrieb befindlicher Abwasserdruckleitung ist auf Grundlage der Recherchearbeiten und Gespräche mit Netzbetreibern lediglich der Einsatz von Sicherheitsrohrsystemen angekommen. Dieses Verfahren wird in Kapitel 13.3.3 näher beschrieben.

Im Zuge des Forschungsvorhabens konnten lediglich an der Abwasserdruckleitung Fürth-Zirndorf Praxiserfahrungen zu Leckageortungsverfahren gesammelt werden. Dort fand das „Smartball-Verfahren“ der Firma Xylem sowie anschließend eine einfache Kamerauntersuchung mittels Fahrwagen Anwendung.

Im Folgenden wird daher das Smartballverfahren beleuchtet, welches in Abbildung 74 unter Punkt 13 aufgeführt ist. Im Anschluss wird die Umsetzung des Verfahrens anhand des Praxisbeispiels Fürth-Zirndorf beschrieben.

13.3.1 SmartBall-Verfahren der Fa. Xylem Water Solutions GmbH

Bei dem SmartBall-Verfahren der Fa. Xylem Water Solutions GmbH handelt es sich um ein akustisches Verfahren zur Leckageortung, bei dem Schallwellen in der Leitung bzw. deren Reflexion gemessen werden. Es handelt sich um ein kabelloses Instrument mit kartographischer Erfassung der Lage der Leckage und der Leitung selbst (siehe Abbildung 75). Die SmartBall Technologie ist nach Angabe der Firma für alle gängigen Leitungsmaterialien sowohl in Abwasserkanälen als auch in Trinkwasserleitungen einsetzbar.



Abbildung 75: SmartBall vor dem Einsatz in die zu untersuchende Leitung in Zirndorf am 15.07.2020

Der sog. SmartBall wird in die vollgefüllte Druckleitung eingebracht und mit einer Geschwindigkeit im Bereich von 0,15 m/s bis 0,5 m/s durch die Leitung gespült. Am Leitungsende wird der SmartBall wieder über ein vorab in der Leitung installiertes Fangnetz entnommen (siehe Abbildung 76).

Durch den SmartBall wird alle 3 s ein Ultraschallping in Form eines Chirp erzeugt, ein akustisches Signal, dessen Frequenz sich zeitlich ändert. Dieses breitet sich durch die Rohrleitung aus, wird durch die Wandung der Leitung reflektiert und durch den SmartBall-Empfänger wieder aufgezeichnet (siehe Abbildung 77).



Abbildung 76: Installiertes Fangnetz am Leitungsende und Entnahme des gepolsterten Smart-Balls nach der Untersuchung in Zirndorf

Große Luftblasen sowie Leckagen reflektieren das Chirp-Signal anders als die Wandung der Leitung und können somit erkannt werden. Über die Fließgeschwindigkeit in der Leitung kann die Position des SmartBalls nur ungefähr errechnet werden, da sich der SmartBall auch lateral bewegen kann. Um nachträglich eine möglichst genaue Lage der akustisch gemessenen Anomalien zu berechnen, wird an zugänglichen Schächten der Leitung ein Zeitstempel bei Passieren des Smart-Balls ebenfalls akustisch registriert. Die Genauigkeit hinsichtlich der Lage wird seitens der Firma mit etwa $\pm 0,6$ m angegeben (Xylem, 2019).



Abbildung 77: Aufzeichnung der akustischen Signale während der Leckageortung in Zirndorf

Die Firma gibt weiter an, dass unter optimalen Bedingungen Leckagen in Abhängigkeit des Leitungsdrucks ab einem Wasseraustritt von 0,01 l/min bei 6,2 bar Leitungsdruck erkannt werden können (Fa. Xylem GmbH, 2017). Es ist zu beachten,



dass mit abnehmendem Leitungsdruck auch die Erkennbarkeit einer Leckage abnimmt. Treten mehrere kleine Leckagen auf, können diese somit ggfs. nicht detektiert werden. Der Mindest-Rohrdurchmesser für den Einsatz des SmartBall-Verfahrens beträgt 300 mm (Xylem, 2019).

13.3.2 Einsatz des SmartBall-Verfahrens an der südlichen Druckleitung Zirndorf

Bei der Abwasserdruckleitung in Fürth-Zirndorf handelt es sich um eine Leitung aus Asbestzement der Dimension DN 400, an der aufgrund der Durchführung des HSA-Normalverfahrens eine größere Undichtigkeit festgestellt wurde (siehe auch 1. Zwischenbericht).

Zur Leckageortung wurde die Fa. Xylem Water Solutions GmbH durch den Netzbetreiber beauftragt.

Nach einem vorgelagerten Ortstermin wurde am 15.07.2020 das SmartBall-Verfahren über die gesamte Länge der Leitung durchgeführt. Nachdem das Ergebnis des ersten Laufs des SmartBall-Verfahrens nach Einschätzung der Firma nicht ganz eindeutig war, wurde das SmartBall-Verfahren wiederholt. Die erste Auswertung vor Ort lies eine akustische Anomalie an einer Stelle der Leitung erkennen. Jeder der beiden Läufe dauerte etwas über 1 h.

Im September 2020 wurde ein Bericht der Fa. Xylem Water Solutions GmbH mit der finalen Auswertung vorgelegt. In der Auswertung wird die bereits vor Ort identifizierte Anomalie als solche beschrieben.

Daraufhin wurde die Leitung komplett geleert und im November 2020 eine Kame-rabefahrung durchgeführt. Bei dieser konnte ein klaffender Riss mit einer Breite von bis zu 4 mm über den kompletten Querschnitt eindeutig identifiziert werden (siehe Abbildung 78 und Abbildung 79).



Abbildung 78: Ausschnitt aus der Dokumentation der Kamerabefahrung mit radialem, klaffenden Riss um den kompletten Umfang der Druckleitung, Kamerabefahrung am 26.11.2020 (Stadtentwässerung Fürth)



Abbildung 79: Detailliertes Schadensbild des klaffendes Risses mit einer Breite von 4 mm der südlichen Druckleitung Zirndorf, Kamerabefahrung am 26.11.2020 (Stadtentwässerung Fürth)

Durch den vergleichsweise großen Durchmesser der Druckleitung war eine Kamerabefahrung möglich und der Schaden konnte optisch eindeutig lokalisiert und identifiziert werden.



13.3.3 Zustandserfassung mittels Einsatz von Sicherheitsrohrsystemen bei der Neuverlegung von Abwasserdruckleitungen

Auf dem Markt werden Schutzmantelrohrsysteme mit integrierter Leckageortung angeboten. Die Firma Egeplast bietet das sogenannte 3L-Sicherheitsrohrsystem an. Dabei wird das Kernrohr (Medienrohr aus PE-HD) von einer elektrisch leitenden Barriere-/Detektionsschicht aus Aluminium ummantelt, welche wiederum durch eine dünnere PE-Schicht vor mechanischen Schäden geschützt wird. Treten Schäden an dieser Detektionsschicht auf, wird die Aluminium-Barrierschicht unterbrochen, wodurch sich der Widerstand der Aluminiumschicht ändert. Im Anschluss wird laut Herstellerangaben über eine mit dem Rohr verbundene Überwachungseinheit Alarm ausgelöst. Die Alarmmeldungen können direkt an die Leitstelle oder ein Smartphone gesendet werden. Der Schaden wird dabei nach Angaben des Herstellers metergenau geortet und der Leitstelle mitgeteilt.

Die Verwendung solcher Sicherheitsrohrsysteme kann nach Herstellerangaben eine dauerhafte Zustandsüberwachung gewährleisten. Des Weiteren können mögliche vorhandene Schäden direkt verortet und anschließend behoben werden. Insbesondere in Gebieten, welche eine besondere Schutzbedürftigkeit aufweisen (z.B. Seedruckleitungen oder Trinkwasserschutzgebiete), kann der Einsatz solcher Sicherheitsrohrsysteme sinnvollerweise diskutiert werden. Der Einsatz von Sicherheitsrohrsystemen kommt nur bei der Verlegung neuer Abwasserdruckleitungen in Frage.

Es besteht jedoch grundsätzlich auch die Möglichkeit, dass durch Schäden an der Detektionsschicht ein Fehlalarm ausgelöst wird, ohne dass eine tatsächliche Leckage vorliegt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind keine Praxiserfahrungen zu Sicherheitsrohrsystemen bekannt geworden.



13.4 Sanierung von Abwasserdruckleitungen

Nachdem mögliche Schadstellen an Abwasserdruckleitungen verortet wurden, muss ein Sanierungskonzept zur Behebung der Schadstelle entwickelt werden. In der Abwassertechnik umfasst der Begriff der Sanierung sämtliche Maßnahmen „zur Wiederherstellung oder Verbesserung von vorhandenen Rohrleitungssystemen, einschließlich Renovierung, Reparatur und Erneuerung“ (DIN EN 15885, 2019).

Sanierungsmaßnahmen können in offener oder geschlossener Bauweise durchgeführt werden. Für die Sanierung in offener Bauweise spricht der geringe Aufwand bei der Freilegung oberflächennah verlegten Leitungen, wie dies teilweise bei eingepflügten Leitungen der Fall ist. In den meisten Fällen jedoch bietet die Kanalsanierung in geschlossener Bauweise erhebliche Vorteile gegenüber der offenen Bauweise. So liegen in vielen Fällen unzureichende Informationen zur Lage und Verlauf der Leitungen vor, was die Planung von Baumaßnahmen in offener Bauweise erschwert. Außerdem befinden sich Abwasserdruckleitungen häufig im Bereich von Straßen, Bebauungen oder schutzbedürftigen Gebieten, wodurch Baumaßnahmen an der Geländeoberfläche zu erheblichen Beeinträchtigungen führen können. Des Weiteren stellen Sanierungen in geschlossener Bauweise in den meisten Fällen die wirtschaftlichere und umweltschonendere Methode zur Wiederherstellung oder Verbesserung vorhandener Rohrleitungssysteme dar (Asbestzementleitungen können Ausnahme abbilden).

Auf dem Markt werden mehrere Verfahren zur grabenlosen Sanierung von Abwasserkanälen angeboten, welche dementsprechend in Produktnormen festgehalten werden. Während die (DIN EN 15885, 2019) die Klassifizierung und Eigenschaften von Techniken für die Renovierung, Reparatur und Erneuerung von Abwasserkanälen/ -Leitungen beinhaltet, werden in der (DIN EN ISO 11295, 2018) explizit Klassifizierungen und Informationen zur Planung und Anwendung von Kunststoff-Rohrleitungssystemen für die Renovierung und Erneuerung aufgeführt.

Beide Normen beschreiben und unterteilen somit verschiedene Technikfamilien für die grabenlose Renovierung, Reparatur und Erneuerung von Abwasserleitungen in der bisherigen Linienführung. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über sämtliche dort aufgeführten Technikfamilien, welche nach DIN EN 15885 und DIN EN ISO 11295 für Druckrohre anwendbar sind.

Technikfamilien zur Sanierung von Abwasserdruckleitungen

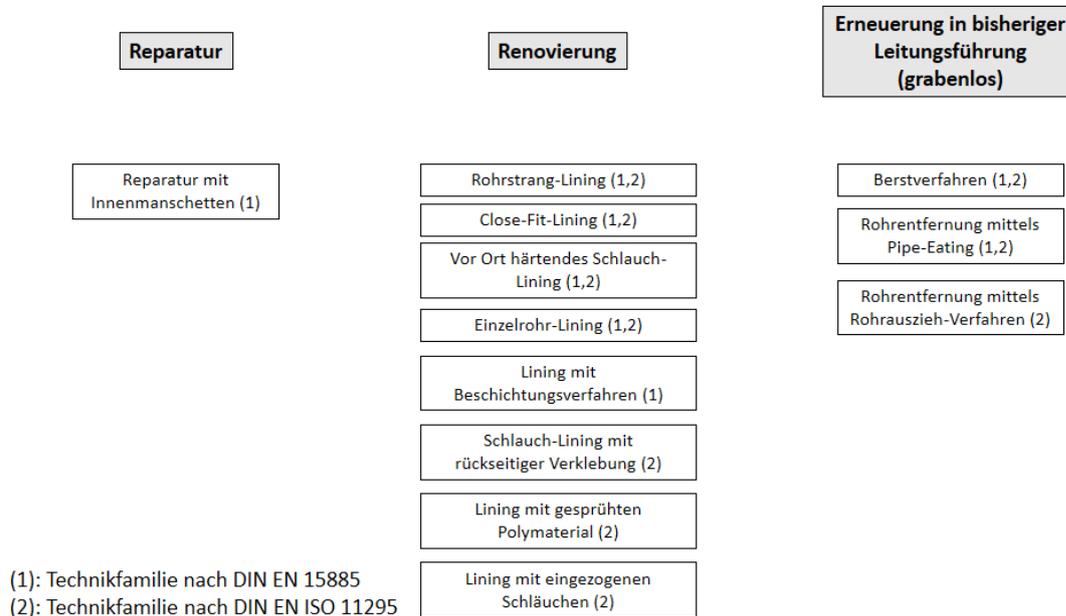


Abbildung 80: Technikfamilien zur grabenlosen Sanierung von Abwasserdruckleitungen nach (DIN EN 15885, 2019) und (DIN EN ISO 11295, 2018)

Reparaturmaßnahmen

Reparaturmaßnahmen umfassen die „Behebung örtlich begrenzter Schäden“. Somit können Reparaturmaßnahmen immer dann in Erwägung gezogen werden, wenn Einzelschäden wie z.B. Risse oder Löcher behoben werden müssen. Als grabenlose Reparaturmaßnahme für Druckrohre wird in der DIN EN 15585 dabei lediglich die Reparatur mit Innenmanschetten aufgeführt. Jedoch wird der Anwendungsbereich von Innenmanschetten demnach lediglich für die Abdichtung von Druckrohrverbindungen beschrieben. Außerdem sei der Einsatz ebenfalls nur für begehbare Druckrohre (ab DN 800) möglich (DIN EN 15885, 2019). Demnach bietet sich deren Anwendung an Abwasserdruckleitungen i.d.R. nicht an.

In vielen Fällen kann an der Schadensstelle der Leitung ein Zugang in offener Bauweise geschaffen werden, sodass das betroffene Rohrstück ggf. entfernt und im Anschluss mit Hilfe von Manschettendichtungen bzw. Reparaturschellen und -Kupplungen ersetzt werden kann. Es ist dahingehend ggf. ratsam, entsprechendes Werkzeug und passende Reparaturschellen vorrätig zu lagern.

Renovierungsmaßnahmen (geschlossene Bauweise)

Renovierungen von Abwasserkanälen werden nach (DIN EN 15885, 2019) als Maßnahmen „zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit einer vorhandenen Rohrleitung unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz“ definiert. Dementsprechend kommen als grabenlose Renovierungsmaßnahmen ausschließlich Lining-Systeme in Frage. Bei Lining-Systemen handelt es sich um Rohrsysteme, welche zur Renovierung in eine vorhandene Rohrleitung eingebaut werden, um so den vorhandenen Zustand zu verbessern. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl verschiedener Lining-Systeme, welche in einzelne Technikfamilien (siehe Abbildung 80) gruppiert werden können.

Die Verwendung von Beschichtungsverfahren bzw. gesprühtem Polymaterial eignen sich nach (DIN EN 15885, 2019) auch für Druckrohre. Jedoch muss die Beschichtung zwingend an der Rohrwandung haften bleiben und präzise aufgetragen werden. Dahingehend ist die technische Umsetzbarkeit im Abwasserdruckbereich aufgrund der überwiegend vorliegenden PE-Leitungen mit geringen Dimensionen problematisch.

Die Anwendung der restlichen in Abbildung 80 aufgeführten Lining-Systeme werden unter anderem durch die Einbaulänge (Einfluss der Reibung beim Einziehen, die maximale Zugkraft von Winden, eingeschränkter Druckaufbau beim Inversieren), die Rohrdimension, die eingeschränkte Bogengängigkeit sowie den Anschlüssen an bestehende Bauwerke (Rohrleitung oder Schacht) begrenzt.

Für eine ausführliche Beschreibung sämtlicher in Abbildung 80 genannten Renovierungstechniken sowie deren Anwendungsgrenzen wird auf die DIN EN 15885 sowie die DIN EN ISO 11295 verwiesen. Im Bericht „Inspektion und Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen und – Dükern; Phase II“ können außerdem Anwendungsgrenzen sowie Erläuterungen auf Grundlage verschiedener Herstellerangaben für die aufgeführten Technikfamilien eingesehen werden (IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2011).

Erneuerungsmaßnahmen in bisheriger Leitungsführung (geschlossene Bauweise)

Zu Erneuerungen gehören nach DIN EN 15885 Maßnahmen zur „Herstellung einer neuen Rohrleitung in der bisherigen oder einer anderen Linienführung, wobei das neue Rohrleitungssystem die Funktion des ursprünglichen übernimmt“. Grabenlose Erneuerungsmaßnahmen in bisheriger Leitungsführung können demnach nur durch das Pipe-Eating-Verfahren, Berstverfahren oder das Rohrauszieh-Verfahren durchgeführt werden. Beim Berstverfahren wird das Altrohr zerstört und in den umliegenden Bodenkörper verdrängt und im selben Vorgang das neue Rohr eingezo-gen. Das alte Rohrmaterial wird somit nicht aus dem Bodenkörper entfernt. Das



Berstverfahren kommt für AZ-Leitungen somit nicht in Frage, da die Asbestzement-scherben aus dem Bodenkörper entfernt werden müssen. Im Rohrausziehverfahren und Pipe-Eating-Verfahren wird das vorhandene Rohr hingegen aus dem Bodenkörper entfernt, sodass kein Altrohr im Bodenkörper verbleibt. Beim Pipe-Eating-Verfahren wird das Altrohr i.d.R. mit einem Bohrkopf zerstört und in den Startschacht gefördert. Da das Altrohr zerstört werden muss, eignet sich das Pipe-Eating-Verfahren für spröde Werkstoffe (z.B. Grauguss). Beim Rohrausziehverfahren wird das Altrohr durch Ziehen oder Pressen aus dem Bodenkörper entfernt und gleichzeitig durch ein neues Rohr ersetzt. Jedoch ist die Längenbegrenzung der ausziehbaren Rohrstücke (durch hohen Reibungswiderstand) so gering, dass sich die Anwendung im Abwasserdruckbereich problematisch darstellt.

Wie bereits erwähnt, können neben den Sanierungsverfahren in geschlossener Bauweise immer auch Sanierungsmaßnahmen in offener Bauweise in Betracht gezogen werden. Hierbei wird der zu sanierende Rohrabschnitt freigelegt und anschließend ausgetauscht (z.B. mittels Muffen bzw. GRIP-Kupplungen) oder der Schaden mittels Reparatur-/Sanierschellen behoben.

Im Zuge des Forschungsvorhabens konnten lediglich Praxiserfahrungen (hauptsächlich außerhalb des Projektzeitraums) auf Grundlage der Aussagen involvierter Netzbetreiber gesammelt werden. An einer Abwasserdruckleitung der AWA kam es zu zwei Schäden in Form von Scherbenbrüchen (siehe Kap. 13.1). In einem Fall wurde der Schaden durch Dritte verursacht, wodurch die Lage des Schadens bereits bekannt war. Der zweite Schaden konnte durch Anomalien an der Geländeoberfläche (Pfützenbildung auf Wirtschaftsweg mit Abwasser, Geruchsbelastung sowie Abrutschen naheliegender Böschung) festgestellt werden. In beiden Fällen wurde die Leitung im Bereich der Schadstelle freigelegt und das beschädigte Rohrstück im Anschluss durch ein Faserzementrohr ausgetauscht. Die Verbindung der Rohre wurde mit Hilfe einer GRIP-Kupplung hergestellt.

An einer Seedruckleitung am Chiemsee wurde ein bei Stegarbeiten aufgetretener Schaden mit Hilfe einer Sanierschelle behoben (siehe Kap. 14.2.1).

Es liegen keine weiteren Praxiserfahrungen zur Durchführung von Sanierungsmaßnahmen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen vor. An einer Seedruckleitung im Königssee soll statt einer Sanierung eine Erneuerung erfolgen (siehe Kap. 14.2.3.2).



14 Seedruckleitungen

Eine besondere Gruppe der Abwasserdruckleitungen bilden auf dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen. Für diesen Forschungsbericht werden Abwasserdruckleitungen, welche auf dem Seegrund verlegt wurden und keine Erdüberdeckung aufweisen, als Seedruckleitungen bzw. seeverlegte Abwasserdruckleitungen bezeichnet.

Seedruckleitungen weisen außer im Ufer- bzw. Start und Zielbereich der Druckleitung i.d.R. keine Erdüberdeckung auf, sondern sind auf der Seesohle verlegt worden. Dadurch stellen Seedruckleitungen eine gegenüber klassischen Abwasserdruckleitungen schnell umsetzbare und kostengünstige Alternative dar, wenn die entsprechenden Randbedingungen gegeben sind. Allerdings besteht die Gefahr des Aufschwimmens der Leitung, wenn sich zu hohe Luftanteile in der Leitung ansammeln. Außerdem besteht bei Seedruckleitungen aufgrund der Möglichkeit des direkten Austritts von Abwasser durch eine Schadstelle in ein stehendes Gewässer, dass als Biotop, Badegewässer, zum Vorhalt von Trinkwasser oder zu Erholungszeiten genutzt wird, ein erhöhtes Gefährdungspotential. Dieses Gefährdungspotential stellt einen besonderen Aspekt bei Seedruckleitungen dar und wird in Kap. 14.3.5 beleuchtet.

Im Folgenden werden zunächst die theoretischen Grundlagen zu seeverlegten Druckleitungen erläutert. Anschließend wird die Situation in Bayern bzgl. Seedruckleitungen vorgestellt. Abschließend werden Risikofaktoren sowie Maßnahmen zur Risikominimierung an Seedruckleitungen und die Möglichkeiten einer Druckprüfung an Seedruckleitungen beschrieben.

Die Anzahl der in Bayern vorhandenen Seedruckleitungen ist sehr gering (siehe Kap. 14.2). Entsprechend liegen kaum praktische Erfahrungen von Netzbetreibern vor. Durch die Seltenheit dieses speziellen Leitungstyps wird das Thema auch in der Literatur kaum behandelt. Eine Ausnahme bildet der Bericht zu Seedruckleitungen in Österreich von (Pressl, et al., 2015), in dem wertvolle Erkenntnisse der Situation in Österreich zusammen getragen wurden. Auch die einschlägigen (Sanierungs-)Firmen beschäftigen sich kaum mit dem Thema Seedruckleitungen, da der Markt sehr klein ist.

14.1 Einführung Seedruckleitungen

Im Bereich von großen Seen erfolgt die geordnete Abwasserableitung zur Kläranlage oftmals mittels Ringleitungen und Pumpwerken und/oder mittels seeverlegter Druckleitungen. Die Abwasserdruckleitungen werden dann direkt auf dem Seegrund verlegt. Alternativ können Leitungen auch unter dem Seegrund verlegt werden, beispielsweise durch Spülbohrverfahren. In diesen Fällen wird im Zuge dieses



Forschungsberichts jedoch nicht von seeverlegten Abwasserdruckleitungen bzw. Seedruckleitungen gesprochen, sondern von unter dem Seegrund verlegten Abwasserdruckleitungen. Anders als bei seeverlegten Druckleitungen besteht bei unter dem Seegrund verlegten Druckleitungen nicht die Gefahr des Aufschwimmens (siehe Kap. 14.3.1). Außerdem unterscheiden sich die Außendrucke und somit die Belastung des Materials (siehe Kap. 14.1.4).

Mit der Errichtung der zentralisierten Abwasserentsorgung der jeweiligen See-Anrainergemeinden wurden auch in Bayern ab Beginn der 1970er Jahre teilweise Seedruckleitungen verlegt (Pressl, et al., 2015). Der Bau von Seedruckleitungen stellte sich im Vergleich zu landbasierten Druckleitungen oftmals als schnellere und kostengünstigere Alternative dar. Durch das fortgeschrittene Alter der Seedruckleitungen werden aufgrund des hohen Gefährdungspotentials zukünftig Schäden befürchtet.



14.1.1 **Verwendete Materialien**

In bayerischen Seen wurden nach derzeitigem Wissensstand ausschließlich Druckrohre aus Polyethylen (PE-HD) verwendet. Polyethylen weist im Gegensatz zu anderen Materialien eine hohe Flexibilität und Spannungsbeständigkeit auf sowie eine hohe Beständigkeit gegenüber Chemikalien. Außerdem neigen PE-Rohre weniger dazu, Ablagerungen an der Rohrwandung zu entwickeln (Pressl, et al., 2015). Dies stellt einen positiven Nebeneffekt dar, da das Molchen von Seedruckleitungen mit Risiken verbunden ist. Hier ist v.a. die Unzugänglichkeit bei Steckenbleiben des Molchs zu nennen (kann ggf. durch Verwendung eines Eismolchs vermieden werden) sowie die Gefahr des Aufschwimmens, da durch den Molch Luftanteile in der Leitung „zusammengeschoben“ werden können.

Da PE-Rohre bei größeren Durchmessern als Stangenware (Längen bis 12 m) vorliegen, müssen die Rohrteile zunächst im Schweißverfahren miteinander verbunden werden. Dabei finden hauptsächlich zwei Verfahren Anwendung, welche im Entwurf der (DIN 1910-3, 1977) aufgeführt sind.

Stumpf-/Spiegelschweißung:

Die Verbindung der Rohrelemente wird in der Regel mittels Heizelementstumpfschweißverfahren unter Berücksichtigung der (DVS 2207-1, 2015) hergestellt. Dabei wird der Stoß zweier Rohrstücke mit einem Heizelement erwärmt und im Anschluss durch Kraftaufbringung ohne Schweißzusatz geschweißt. Die Verbindung besteht in diesem Verfahren lediglich aus dem Rohrmaterial, wodurch eine hohe Korrosionsbeständigkeit erreicht wird. Der Vorgang benötigt einen Stromzugang und kann mit Hilfe einer Stumpfschweißmaschine durchgeführt werden. Da die Stumpfschweißmaschine jedoch insbesondere bei großen Durchmessern sehr sperrig ist, kann sich die Herstellung vor Ort durchaus aufwendig gestalten. Bei dem Zusammenpressen der Rohrstöße entsteht zudem ein Schweißwulst an der Rohrrinnen- und Außenseite, welcher bei Nichtentfernen zu einem betrieblichen Hindernis führen kann. Hinzu kommt, dass sich Feuchtigkeit und Kälte negativ auf die Schweißverbindung auswirken (Pressl, et al., 2015).

Aus diesen Gründen werden die PE-Rohre für Seedruckleitungen häufig in Schweißzelten an Land zu mehreren 100 m langen Abschnitten verschweißt, wobei die Leitung schwimmend immer weiter auf den See geschoben werden kann.

Elektromuffen-Schweißung

Eine weitere Möglichkeit der Verbindung von PE-HD-Rohren bietet die Verwendung der Heizwendel-Schweißung unter Berücksichtigung der (DVS 2207-1, 2015). Hierbei wird eine Muffe mit Heizwendeln über der Rohrverbindung angebracht und anschließend mit Hilfe eines Schweißgeräts aufgeschmolzen. Dadurch entsteht eine kraftschlüssige Verbindung zwischen der Muffe und den PE-Rohren.



Auch bei diesem Verfahren besteht die Verbindung der beiden Rohre aus einem Material, was zu einer erhöhten Korrosionsbeständigkeit führt. Die Qualität der Schweißverbindung ist wie bei der Stumpfschweißung witterungsabhängig. Jedoch können einige Vorteile gegenüber der gängigen Stumpfschweißung festgestellt werden. Die Verbindungsherstellung stellt sich durch den automatisierten Ablauf deutlich einfacher dar. Außerdem entsteht kein Schweißwulst, welcher im Nachhinein entfernt werden muss. (Pressl, et al., 2015)

Die Elektromuffen-Schweißung ist erst seit wenigen Jahren verfügbar und wurde daher bei älteren bestehenden Seedruckleitungen in Bayern (siehe Kap. 14.1.4) nicht verwendet.

14.1.2 Ballastierung seeverlegter Druckleitungen

Bei zu hohen Luftanteilen können seeverlegte Druckleitungen teilweise oder ganz aufschwimmen, was zu Schäden an der Leitung und Unfällen an der Wasseroberfläche führen kann. Aus diesem Grund werden Gewichte an der Leitung montiert. Diese werden in der Regel aus Stahlbeton hergestellt und in regelmäßigen Abständen an der Leitung angebracht. Sie dienen zum einen der ausreichenden Auftriebssicherheit gegen einen vorher bestimmten Luftanteil in der Leitung und fördern zum anderen zusätzlich die Lagesicherheit der Druckleitung am Seegrund.

Die aus zwei Hälften bestehenden, armierten Betongewichte werden zunächst um das PE-Rohr gelegt und dann mit Hilfe von Metall-, bzw. Kunststoffbändern oder Schrauben festgezogen. Die Ballastierung kann je nach Anforderung in unterschiedlichen Bauformen ausgeführt werden. In der Regel werden an der Kontaktfläche zum Rohr Gummieinlagen angebracht, um dem Verrutschen der Gewichte sowie Beschädigungen der Rohrleitung entgegenzuwirken. Trotz der Einlagen konnte sowohl im Chiemsee als auch vereinzelt an österreichischen Seen eine lagemäßige Verschiebung der Betongewichte entlang der Druckleitung festgestellt werden (Pressl, et al., 2015). Auf die Verschiebung wird in Kap. 14.2.1 nochmals genauer eingegangen. (Christian Müller Tauchdienste, 2017),

Zur nachträglichen Ballastierung von seeverlegten Druckleitungen können Gewichte in Form von Trockenbetonsäcken auf der am Seegrund liegenden Leitung positioniert werden (siehe Kap. 14.2.1).

Eine weitere Option stellt die Ballastierung mittels Schutzrohren dar. Dies bietet sich insbesondere an, wenn außer der Abwasserdruckleitung noch weitere Sparten verlegt werden sollen (siehe Kap. 14.2.4).

14.1.3 Verlegung von Seedruckleitungen

In der Regel werden Seedruckleitungen aus Polyethylen schwimmend verlegt. Die Rohrstücke werden dabei zunächst an Land zu einem immer länger werdenden Rohrstrang geschweißt. Im direkten Anschluss werden die Betongewichte angebracht und die Leitung dann Stück für Stück auf den See geschoben (siehe Abbildung 81).



Abbildung 81: Anbringen der Betongewichte und anschließende treibende Lagerung am Starnberger See (AV Starnberger See)

Je nach Ballastierungsgrad kann die luftgefüllte Leitung selbstständig oder mit zusätzlichen Schwimmkörpern auf der Seeoberfläche treibend gelagert werden. Die Leitung kann im Anschluss durch begleitende Zugfahrzeuge und/oder Seilwinden lagemäßig positioniert werden. Die exakte Positionierung am Seegrund stellt sich dabei i.d.R. sehr kompliziert dar. Im Anschluss wird die Druckleitung durch das langsame Befüllen mit Wasser nach und nach versenkt.

Beim Absenkvorgang kann im Auftauchbereich eine starke Krümmung entstehen, welche das Rohrmaterial enorm beansprucht. Teilweise kann die Krümmung sogar zu einer Ovalität des Rohres führen. Um Schäden durch den Absenkvorgang zu vermeiden, soll die Verlegungsgeschwindigkeit daher mit 0,5 m/s - 1 m/s sehr gering gehalten werden, sodass der kleinste Krümmungsradius (30 bis 40-fachen Druckmesser, bei kleinen Querschnitten 50-fach) nicht überschritten wird. (Pressl, et al., 2015)



14.1.4 Differenz zwischen Innen- und Außendrücken

An erdverlegten Druckleitungen erfährt das Rohrmaterial bei großen Höhendifferenzen im vollgefüllten Zustand einen hohen Innendruck durch den hydrostatischen Druck in der Leitung. An seeverlegten Druckleitungen besteht im Gegensatz zu erdverlegten Druckleitungen die Besonderheit, dass sich der hydrostatische Innendruck durch den umliegenden hydrostatischen Wasserdruck weitgehend egalisiert. Der Differenzdruck zwischen Rohrrinnerem und Rohräußerem ändert sich somit im vollgefüllten Zustand ab dem Punkt des Eintauchens trotz großer Höhendifferenzen nicht weiter.

Ist die Seedruckleitung hingegen komplett mit Luft gefüllt, erfährt sie einen großen Außendruck durch das Seewasser. Aus diesem Grund ist die Spülung von seeverlegten Druckleitung mit Hilfe von Druckluft kritisch zu betrachten. Wird eine auf einer Tiefe von 100 m unterhalb des Wasserspiegels verlegte Abwasserdruckleitung komplett mit Druckluft freigespült, erfährt die Leitung nach der Druckluftspülung einen Außendruck von 10 bar. Der Innendruck entspricht bei einer leeren Leitung dann ggf. annähernd dem Atmosphärendruck, wodurch sich ein hoher Differenzdruck zwischen Innen- und Außendruck ergibt. Da sich die Druckstufe bei Druckrohren auf den Innendruck bezieht, kann dieser nicht direkt auf den Außendruck übertragen werden. Es muss demnach genau erörtert werden, ob das Leitungssystem mit Druckluft gespült werden kann und die entsprechende Belastung durch Außendrücke durch das Rohrmaterial kompensiert werden kann.

14.1.5 Zustandserfassung und Leckageortung an Seedruckleitungen

Einige der in Kapitel 13.3, Abbildung 74 genannten Methoden zur Zustandserfassung von Druckleitungen lassen sich an Seedruckleitungen aufgrund der besonderen Bauweise wie steile, abfallende Leitungsabschnitte, geringe Differenzdrücke sowie große Leitungslängen nicht anwenden. Durch die Möglichkeit des direkten Austritts von Abwasser in ein, möglicherweise als Badegewässer ausgewiesenes, Gewässer, besteht jedoch ein erhöhtes Gefährdungspotential. Aus diesem Grund sollte eine regelmäßige Zustandserfassung der Seedruckleitung erfolgen. Dadurch können mögliche Lageveränderungen durch leichtes Aufschwimmen, Verschiebungen der Ballastierung sowie Schäden an der Druckleitung festgestellt werden.

Im Folgenden werden einige Möglichkeiten zur Zustandserfassung genauer erläutert, welche bereits im Bereich von Seedruckleitungen in Bayern bzw. Österreich Anwendung fanden.

- **Überwachungsplan für Seedruckleitungen**

In Kap. 13.3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass mit Hilfe des im Zuge des Forschungsprojektes „Risikobewertung von Druckleitungen der Siedlungswasserwirtschaft in österreichischen Seen“ (Pressl, et al., 2015) entwickelten 5-Stufenplans zur Überwachung von Seedruckleitungen der Zustand von Abwasserdruckleitungen überprüft werden kann.

- Möglichst kontinuierliche Auswertung der Pumpendaten
- Möglichst kontinuierliche Auswertung der Druckmessung
- Möglichst kontinuierliche Auswertung der Messdaten des Durchflusses
- Regelmäßige Durchführung von Druckprüfungen zur Zustandsbewertung der Druckleitung (HSA-Normalverfahren und 20-Min Test, siehe Kap.14.4)
- Ggfs. Regelmäßige Durchführung der optischen Rohrrinneninspektion (Verfahren in Abbildung 74 aufgeführt)

Eine ausführliche Beschreibung der aufgelisteten Strategien zur Überwachung von Seedruckleitungen befindet sich in Anhang 26. Die Anwendung des Überwachungsplans wird aufgrund des erhöhten Schadenspotentials insbesondere bei Seedruckleitungen ausdrücklich empfohlen. Eine Anwendung für erdverlegte und unter dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen empfiehlt sich ebenfalls.

- **Lagemäßige Zustandserfassung mittels Tauchinspektion**

Für eine optische Außeninspektion sowie eine lagemäßige Zustandserfassung bieten sich an seeverlegten Druckleitungen u.U. speziell ausgebildete Taucher an, welche die Leitungstrasse inspizieren. Mit entsprechender Ausrüstung wird beim Tauchvorgang ebenfalls Foto- und Videomaterial zum äußeren Zustand der Druckleitung gesammelt und die Lage der Druckleitung geortet. Tauchinspektionen können ohne Dekompressionskammer bis in eine maximale Tiefe von ca. 40 Metern durchgeführt werden.

- **Lagemäßige Zustandserfassung mittels U-Boot-Befahrung oder Unterwasserdrohnen**

Zur äußeren Sichtprüfung einer Seedruckleitung kann neben einer Tauchinspektion eine Inspektion mittels U-Boot oder Unterwasserdrohne (auch Tauchroboter genannt) durchgeführt werden. Dabei wird die Leitungstrasse mit einem U-Boot oder einer Unterwasserdrohne abgetaucht und die entsprechende Lage durch Foto- und Videoaufnahmen dokumentiert. Im Gegensatz zur Tauchinspektion können mit Tauchrobotern/Drohnen oder U-Booten größere Tiefen erreicht werden. Nach Herstellerangaben der Firma Kopterflug können entsprechende Unterwasserdrohnen in Tiefen bis zu 500 m vordringen und brauchbares Bildmaterial produzieren. Das Erkennen von möglichen Leckagen ist jedoch von den vorhandenen

Sichtverhältnissen abhängig. Durch die Sichtprüfung können lediglich deutlich erkennbare Schäden an der Außenwand von Druckrohren identifiziert werden.

- **Lagemäßige Zustandserfassung mittels Side-Scan-Verfahren (Sonar)**

Mit Hilfe eines Fächer-Echolots wird eine detaillierte Kartierung der Topografie des Seegrunds (Bathymetrie) erstellt. Dabei kann auch die aktuelle Lage der Seedruckleitung festgestellt werden. Im Side-Scan-Verfahren wird ein, an einem Boot montierter, akustischer Fächer mit bis zu 400 Strahlen ausgesendet und die Entfernung jedes einzelnen Strahls mehrere Male pro Sekunde aufgezeichnet. Die Bewegung, Position und Lage des Schiffs wird ebenfalls mit verschiedenen Sensoren (GPS, Bewegungssensor, digitaler Kompass, etc.) aufgezeichnet. Die Leitungstrasse wird mit dem Boot abgefahren, sodass durch die Verarbeitung der ermittelten Daten eine hoch aufgelöste Kartierung des Seegrunds hergestellt werden kann. (Pressl, et al., 2015)

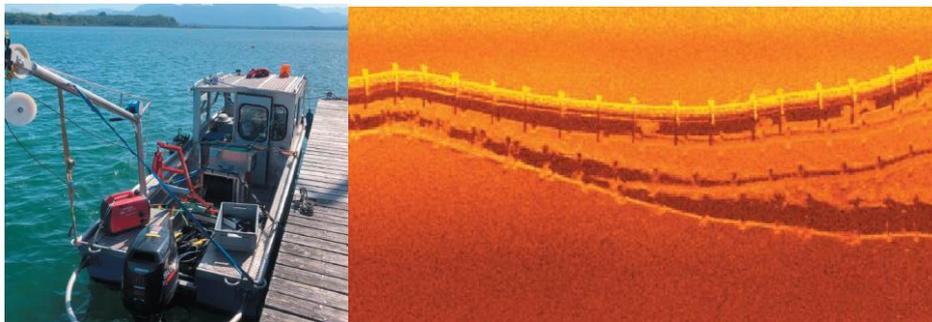


Abbildung 82: links: Side-Scan-Einsatzschiff am Chiemsee - rechts: Beispiel der bildlichen Darstellung mit Hilfe des Side-Scan-Verfahrens am Chiemsee; (Christian Müller Tauchdienste, 2017)

Mit Hilfe des Side-Scan-Verfahrens können vorhandene Schäden an Seedruckleitungen evtl. durch Auskolkungen des Seegrunds erkannt werden. Dabei muss die Leckage jedoch in Richtung des Seegrunds zeigen und der austretende Volumenstrom stark genug sein, um eine Auskolkung des Untergrunds zu verursachen.

Des Weiteren können ggf. lagemäßige Veränderungen der Leitung durch Abdrücke im Bodenmaterial am Seegrund sichtbar gemacht werden. So zeigten Untersuchungen der Druckleitung am Chiemsee, dass lagemäßige Veränderungen durch das Verfahren sehr gut sichtbar gemacht werden können. Durch das Gewicht der Druckleitung entsteht an der ursprünglichen Position der Druckleitung ein deutlicher Abdruck (siehe Abbildung 82). Dadurch kann nachvollzogen werden, ob sich die Leitung am Seegrund trotz der Auftriebssicherung bewegt hat.

Werden mit Hilfe des Side-Scan-Verfahrens Verschiebungen der Ballastierung festgestellt, kann dies außerdem als Indiz für ein teilweises Aufschwimmen der Leitung liefern.



- **Innere Zustandserfassung mittels Inspektionsmolch oder Axialkamera mit Saugschirm**

Eine optische, innere Zustandserfassung an Seedruckleitungen wurde außerdem bereits mit Hilfe eines Inspektionsmolchs und einer Axialkamera mit Saugschirm durchgeführt (siehe Kap. 13.3) (Pressl, et al., 2015). Diese Methode zur Zustandserfassung kann auch an erdverlegten bzw. unter dem Seegrund verlegten Abwasserdruckleitungen angewandt werden.

Ein Hersteller für Inspektionsmolche ist die MTA Messtechnik GmbH, welche als Leistung den sogenannten MTA Pipe-Inspector® anbietet. Dieser wird nach Herstellerangaben wie ein Molch ohne Kabel durch die Leitung gespült. Dabei nimmt der Molch aus dem Innenraum der Rohrleitung kontinuierlich Bild, Ton sowie andere Signale auf und speichert diese ab. Um möglichst gute Bildaufnahmen zu liefern, wird vor der Inspektion zu einer gründlichen Reinigung der Rohrleitung geraten und als Transportmedium klares Wasser verwendet. Außerdem soll ein konstanter Wasserdurchfluss erreicht werden, welcher die maximale Geschwindigkeit von 4 m/s nicht übersteigt. Der Einsatz des Inspektionsmolchs ist nach Herstellerangaben bei sämtlichen Leitungsmaterialien möglich, jedoch müssen Molchschleusen vorhanden sein, was bei Seedruckleitungen nur in wenigen Ausnahmefällen zutrifft (ggf. nachrüsten). Außerdem besteht bei dem Inspektionsmolch die Gefahr des Steckenbleibens. Des Weiteren können in seltenen Fällen durch den Molch vorhandene Luftanteile zusammengeschoben werden, wodurch sich Lufttaschen bilden, die bei unzureichender Ballastierung zum Aufschwimmen führen können. Bei Unklarheiten kann der Inspektionsmolch nicht angehalten werden. (Pressl, et al., 2015)

Eine weitere Methode zur inneren Zustandserfassung bietet die sogenannte Axialkamera mit Saugschirm. Dabei wird ausgehend vom Anfangsschacht (meist Pumpenschacht) ein Stahlseil mit Hilfe eines Saugschirms in die Leitung eingezogen. Im Anschluss wird am Endschacht eine Axialkamera mit dem Stahlseil verbunden. Diese kann dann wiederum bis zum Anfangsschacht durch die Leitung gezogen werden, wobei kontinuierlich Bildaufnahmen gemacht werden. Mit dieser Methode können laut Herstellerangaben Seedruckleitungen bis zu einer Länge von 1,6 km inspiziert werden. Das Verfahren kann bei sämtlichen Rohrmaterialien und Durchmessern angewandt werden. Durch das kabelgesteuerte Verfahren kann die Kamera bei Unklarheiten gestoppt werden, um die betroffene Stelle genauer zu inspizieren. Jedoch ist vor Beginn des Verfahrens eine Reinigung mit Hilfe eines Molches notwendig, da vorhandene Schwebstoffe und Ablagerungen die Sicht stark beeinträchtigen (Pressl, et al., 2015).

Auch im Rahmen des Forschungsprojekts zur Risikobewertung seeverlegter Abwasserdruckleitungen in österreichischen Seen wurden die beiden genannten



Möglichkeiten zur inneren Zustandserfassung an seeverlegten Abwasserdruckleitungen getestet. Dabei stellte sich heraus, dass die Videoaufnahmen der Axialkamera mit Saugschirm und des Pipe-Inspector® eine deutlich schlechtere Qualität der Videoaufnahmen liefern als eine herkömmliche Freispiegel-TV-Inspektion. Kleine punktuelle Zustände, wie z.B. lokal auftretende Risse, sind nicht oder nur schwer erkennbar. Dennoch kann ein guter Eindruck über den allgemeinen Zustand der Leitung gewonnen werden. Insbesondere größere Längsrisse, offensichtliche Verformungen oder große Leckagen sollten erkannt werden. Den limitierenden Faktor bildet jedoch die Größe des Schadens. (Pressl, et al., 2015)

An Seedruckleitungen im Chiemsee wurde ebenfalls eine Rohrinspektion mit Hilfe des Pipe-Inspector® durchgeführt. Die Erfahrungen decken sich mit den oben genannten.

- **Leckageortung mittels EPS-Kügelchen**

In der Literatur (Pressl, et al., 2015) wird als weitere Methode zur Ortung von möglichen Leckagen in Seedruckleitungen die Zugabe von kugelförmigem, expandiertem Polystyrol in verschiedener Dimension angegeben. Diese können bei Schäden aus dem Rohr austreten und an die Seeoberfläche steigen, wodurch die ungefähre Lage der Leckage leichter geortet werden kann. Jedoch muss beim Einsatz von EPS-Kügelchen die Leckage größer als die Dimension der Kügelchen ausfallen. Außerdem müssen die EPS-Kugeln im Anschluss an der Seeoberfläche gesammelt werden.

Zur Leckageortung mit Hilfe von EPS-Kügelchen liegen derzeit keine Praxiserfahrungen in Bayern vor.



14.1.6 Sanierungsmöglichkeiten seeverlegter Abwasserdruckleitungen

In Kap. 13.4 wurden bereits Technikfamilien zur grabenlosen Sanierung erdverlegter Abwasserdruckleitungen genannt.

Ein Einsatz der in Abbildung 80 (siehe Kap. 13.4) aufgeführten Sanierungsverfahren ist weder in Deutschland noch in Österreich an seeverlegten Druckleitungen bekannt.

Die technische Umsetzbarkeit bei der Sanierung von seeverlegten Abwasserdruckleitungen mit Hilfe von Lining-Systemen stellt einen kritischen Punkt dar. Die großen Haltungslängen schließen sowohl bei unter dem Seegrund verlegten als auch seeverlegten Abwasserdruckleitungen deren Einsatz oftmals aus. Bei Problemen während der Sanierung ist der Zugang zur entsprechenden Problemstelle der Leitung außerdem ggf. unmöglich. Hinzu kommt, dass für den Einsatz von Lining-Systemen i.d.R. eine Leerung und Reinigung der Druckleitung nötig ist. Bei unzureichender Ballastierung kann das Entleeren der Seedruckleitung zu einem unkontrollierten Aufschwimmen führen, wodurch weitere Schäden an der Leitung auftreten können. Außerdem besteht beim Molchen der Leitung die Gefahr des Steckenbleibens. Des Weiteren kann es beim Molchen zu einer Ansammlung von Luft kommen, die zum ungewollten Aufschwimmen der Leitung führen kann.

Neben den technischen Problemen bei der Umsetzbarkeit kann die Neuverlegung einer Seedruckleitung außerdem weniger aufwendig und kostengünstiger ausfallen. Nach aktuellem Stand (Frühjahr 2022) wird für den Schadensfall der Abwasserdruckleitung im Königssee (siehe Kap. 14.2.3.2) die Verlegung einer neuen Seedruckleitung diskutiert. Eine Sanierung der betroffenen Seedruckleitung ist derzeit nicht geplant. Auch im österreichischen Traunsee wurde nach Aussagen der Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft der oberösterreichischen Landesregierung die Neuverlegung einer Seedruckleitung einer Sanierung der gesamten Leitung vorgezogen, nachdem im Vorfeld vereinzelt Schäden an der Seedruckleitung auftraten. Am Fuschlsee in Österreich wurde nach Aussagen des Ingenieurbüros Steinbacher + Steinbacher in den vergangenen Jahren durch die Neuverlegung einer zweiten Seedruckleitung Redundanz geschaffen. Eine Sanierung der bestehenden Seedruckleitung wurde auch hier nicht vorgesehen.

Einzig bekannte und bereits erprobte Methode zur Sanierung von punktuellen Schäden an Abwasserdruckleitungen in bayerischen Seen stellt die Reparatur mittels Sanierschellen bzw. Außenmanschetten dar (siehe Kap. 13.4). In dieser Art und Weise wurde der Schadensfall an einer bayerischen Seedruckleitung im Chiemsee saniert. Nachdem die Abwasserdruckleitung bei Stegbauarbeiten in geringer Tiefe beschädigt wurde, konnte eine Sanierschelle in einem Taucheinsatz von außen an die Leitung angebracht werden (siehe Kap. 14.2.1). Dadurch wurde



der lokale Schaden behoben. Es ist zu beachten, dass ein Taucheinsatz ohne Dekompressionskammer nur bis in Tiefen von etwa 40 m möglich ist (siehe Kap. 14.1.5). Nach (Pressl, et al., 2015) ist die Sanierung von Schadstellen mittels Sanierschellen bzw. Kupplungen bei einem Taucheinsatz bis in eine Tiefe von 20 m ohne größere Probleme möglich. Nach Aussagen der Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft der oberösterreichischen Landesregierung wurden Schäden an der Seedruckleitung im Traunsee ebenfalls mittels Sanierschellen behoben, bevor die Neuverlegung einer Seedruckleitung durchgeführt wurde.

Zur Ermittlung möglicher Sanierungsverfahren von seeverlegten Abwasserdruckleitungen wurde zu sämtlichen bayerischen Betreibern von Seedruckleitungen, zu mehreren österreichischen Betreibern sowie zu den einschlägigen Firmen aus dem Bereich „Sanierung“ Kontakt aufgenommen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten jedoch neben dem Einsatz von Sanierschellen für lokale Schäden keine weiteren Sanierungsverfahren speziell für auf oder unter dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen ermittelt werden.

14.2 Seedruckleitungen in Bayern

Um einen Überblick über die vorhandenen Seedruckleitungen in Bayern zu gewinnen, erfolgte eine Abfrage des Landesamtes für Umwelt bei den Wasserwirtschaftsämtern mit der Bitte um Meldung von Seedruckleitungen. Durch den Austausch mit den Netzbetreibern stellte sich heraus, dass ein Großteil der Leitungen, die ursprünglich bei der Abfrage nach Seedruckleitungen gemeldet wurden, nicht auf dem Seegrund verlegt wurden:

Tabelle 27: Differenzierung der Seedruckleitungen in Bayern

Auf dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen	Abwasserdruckleitungen unter Seegrund
Chiemsee	Rottachsee
Starnberger See	Forggensee
Königssee	Großer Alpsee
Obersee am Königssee	

Die Leitungen im Forggensee, Rottachsee und großem Alpsee sind entweder komplett erdüberschüttet oder unter dem Seegrund verlegt. In Bayern existieren nach derzeitigem Kenntnisstand lediglich im Chiemsee, Starnberger See, Königssee sowie seit 2021 auch im Obersee am Königssee auf dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen (seeverlegte Abwasserdruckleitung / Seedruckleitung).

Die im Jahr 2015 erstellte Studie zur „Risikobewertung von Druckleitungen der Siedlungswasserwirtschaft in österreichischen Seen“ (Pressl, et al., 2015) ergab, dass in Österreich in insgesamt 17 Seen Druckleitungen verlegt wurden. Es lässt sich somit feststellen, dass die seeverlegte Abwasserdruckleitung in Bayern deutlich seltener vertreten ist.

Im Folgenden werden die Besonderheiten und Eigenschaften sämtlicher seequerenden Abwasserdruckleitungen in Bayern beschrieben.



14.2.1 Seedruckleitungen Chiemsee

Im Chiemsee sind insgesamt 13 Seedruckleitungen mit einer gesamten Länge von über 28 km verlegt. Da in ganz Bayern lediglich 17 seeverlegte Druckleitungen existieren, verfügt der Chiemsee mit 13 Leitungen über den überwiegenden Anteil dieser Sonderform von Druckleitungen. Die Auflistung der Leitungsparameter sowie eine Übersichtskarte befinden sich in Anhang 29 und 30.

Die Entscheidung für den Bau von Seedruckleitungen im Chiemsee fiel nach Aussage des Betreibers v.a. durch die Kosten- und Zeitersparnis. Der Bau der Seedruckleitungen wurde im Jahr 1989 zu 75 % durch den Freistaat Bayern bezuschusst. Alle Seedruckleitungen konnten innerhalb von nur drei Monaten verlegt werden. Die Leitungen sind nicht redundant ausgeführt und für den Mischwasserfall ausgelegt. Es liegt keine Ringleitung, sondern eine nicht verbundene Nord- und Südspange vor. Der Ringschluss ist aufgrund der abgestuften Durchmesser von DN115 bis DN560 nicht ohne weiteres möglich. Je Spange werden etwa 6.000 m³/d gefördert. Die Seedruckleitungen aus PE-HD, Druckstufe PN6 liegen in einer maximalen Tiefe von 52 m

Detaillierte Informationen zu den Eigenschaften und Besonderheiten der Seedruckleitung im Chiemsee können dem 1. Zwischenbericht entnommen werden.

Durch den Verband werden aktuell Diskussionen zur Schaffung einer Redundanz geführt. Eine Prüfung der Seedruckleitungen im Rahmen des Forschungsvorhabens war nicht möglich. Als Grund wurde seitens des Netzbetreibers v.a. genannt, dass eine Außerbetriebnahme einer Seedruckleitung über mehrere Stunden nicht möglich sei. Weitere Aspekte waren die baulichen Voraussetzungen sowie das Risikopotential.

In der Vergangenheit sind bereits mehrfach Probleme (Aufschwimmen, Schäden durch Dritte, Geruchsbelastung) an den Seedruckleitungen aufgetreten. Daher werden im Betrieb eine Reihe von Maßnahmen durch den Betreiber ergriffen:

- Etwa einmal wöchentlich werden die Seedruckleitungen mit Seewasser gespült, um Luftanteile aus der Leitung auszutragen. Für diese Spülung mittels Seewasser liegt eine Genehmigung vor.
- Alle zwei Jahre werden alle Seeleitungen optisch von außen untersucht. Hierfür wird die Leitung mittels Sonar-Messungen geortet und die Lage festgestellt. Bei Bedarf werden Taucher einer Spezialfirma eingesetzt. Lageänderungen der Druckleitung werden dokumentiert, Ursachen sind unbekannt.
- Für alle vorhandenen Durchmesser liegen Ersatz-Rohrstücke und Muffen beim Verband auf Lager
- Materialuntersuchungen im Hinblick auf die Alterung des Leitungsmaterials wurden durchgeführt



- regelmäßige, betriebliche Kontrolle der Pumpwerke etc. routinemäßig alle vier Wochen; geplante Ausstattung aller Pumpwerke mit Druckloggern und Wasserstandmessungen
- Einsatz von Chemikalien zur Geruchminderung aufgrund der teilweise sehr langen Aufenthaltszeiten des Abwassers in den Seedruckleitungen

Ein bekanntes Problem bei auf dem Seegrund verlegten Abwasserdruckleitungen ist die Gefahr des Aufschwimmens, wenn sich zu hohe Luftanteile in der Leitung sammeln. Die Seedruckleitungen im Chiemsee sind planmäßig bis zu einem Luftanteil von 30 % auftriebssicher. In der Vergangenheit sind bereits Teile der Seedruckleitungen Seebruck-Lambach, Mitterndorf-Gstadt, Bernau-Harras und Harras-Stock im Chiemsee aufgeschwommen. Glücklicherweise kam es durch die an der Oberfläche schwimmenden Leitungsabschnitte weder zu Schiffsunfällen noch zu Schäden an den Leitungen selbst. Durch intensives Spülen konnte jeweils die Luft ausgetragen werden, wodurch es wieder zu einem Absinken der Leitungen kam.

Am 09.07.2017 schwamm zuletzt die Seedruckleitung zwischen Harras und Stock auf. Um dem in Zukunft entgegenzuwirken wurden verschiedene Maßnahmen getroffen (Abwasser- und Umweltverband Chiemsee, 2017):

- Aufgeschwommene Leitungsabschnitte wurden mit Trockenbetonsäcken nachballastiert. Zusätzliche Gewichte wurden alle 3 – 5 m angebracht. Eine komplette Nachballastierung der Leitungen erscheint nicht möglich, da ansonsten Spannungen in der Leitung befürchtet werden.
- Die alte Pumpe lief nicht mit voller Drehzahl. Daher wurde die Transformatorstation modernisiert, sodass mit deren neuen Leistung die volle Drehzahl der Pumpe, und somit eine erhöhte Fließgeschwindigkeit erreicht werden kann (Verbesserung Luftaustrag).
- Zusätzlich wurde ein Entlüftungsventil im Nebenpumpwerk Harras installiert.

In Abbildung 83 sind die Tagesniederschläge der Wetterstation Chiemsee-Herrenchiemsee für die Tage vor dem Ausschwimmen der Seedruckleitung aufgetragen. Anhand der Niederschlagszahlen in den Tagen vor dem Aufschwimmen der Druckleitung am Chiemsee lässt sich ablesen, dass es über einen längeren Zeitraum zu starken Regenfällen kam. Um das anfallende Mischwasser abzutransportieren, arbeiteten die Pumpen in diesem Zeitraum mit einer deutlich höheren Pumpfrequenz.

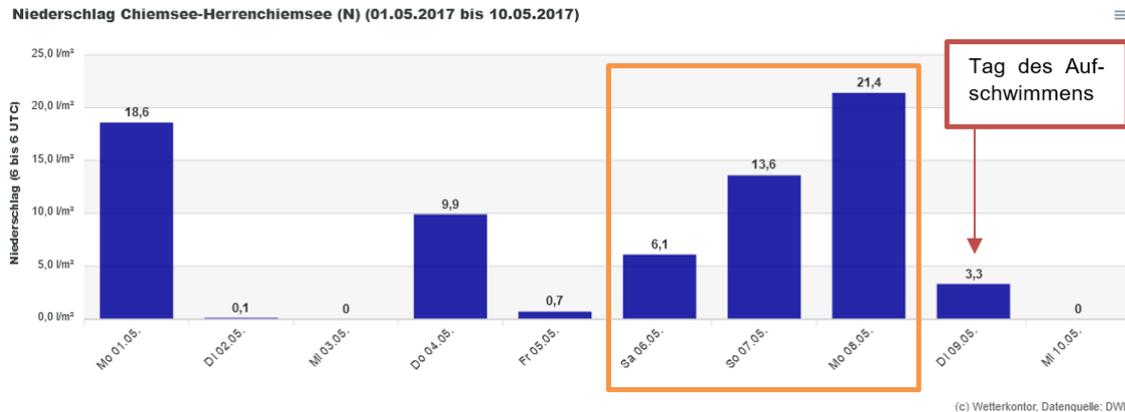


Abbildung 83: Niederschlagskarte Chiemsee-Herrenchiemsee (Wetterkontor, 2021)

Somit könnten aus dem Pumpensumpf mit turbulentem Zulauf konstant geringe Luftmengen in die Druckleitung gepumpt worden sein. Die Zeitspanne zwischen den Pumpintervallen könnte dabei ggf. zu gering gewesen sein, um der Luft ein Aufsteigen zum nächsten Entlüftungspunkt zu ermöglichen. Somit sammelt sich u.U. immer mehr Luft in der Leitung, was letztendlich zum Aufschwimmen der Leitung geführt haben könnte.

Um diesen direkten Lufteintrag in die Seedruckleitungen in Zukunft zu verhindern, kann der Zulauf zum Pumpensumpf baulich, beispielsweise wie in Kap. 11.3.1 beschrieben, optimiert werden. Daher hat sich der Abwasser- und Umweltverband im Chiemsee dazu entschieden, als Maßnahme den freien Auslauf im Pumpensumpf nachträglich nach unten zu verlängern, um die Einfallhöhe zu reduzieren und einen größeren ungewollten Lufteintrag zu vermeiden.

Die Seedruckleitungen sind mit Be- und Entlüftungsventilen ausgestattet. Kommt es jedoch zu sehr großen Luftansammlungen, kann die Luft nicht mehr vollständig über das Ventil aus der Leitung entfernt werden. Bei dem Aufschwimmen am Chiemsee wurde die Luft offenbar von einer Seedruckleitung in die anschließende Seedruckleitung weitergetragen, wodurch diese ebenfalls aufschwamm. Um dies sicher zu verhindern, wäre ein offener Schacht mit entsprechender Entlüftungsmöglichkeit erforderlich.

Im Jahr 1997/98 kam es außerdem zu einem Schadensfall an einer Seedruckleitung in Sassau. Bei Baumaßnahmen an einem Steg wurde die Leitung etwa 30 m vom Ufer entfernt beschädigt. Die Schadstelle wies dabei einen Durchmesser von etwa 3 cm auf. Aufgrund der fehlenden Redundanz musste die komplette Nordspange über einen Zeitraum von 3 bis 4 Tagen außer Betrieb genommen und das anfallende Abwasser über die Straße abtransportiert werden. Der Schaden konnte im Anschluss durch eine aus Holland angelieferte Sanierschelle beseitigt werden. Seither werden Sanierschellen in allen erforderlichen Größen vorgehalten.

Derzeit (Stand 2021) werden Überlegung bezüglich einer Erweiterung und Erneuerung der öffentlichen Abwasserableitung angestellt, auch im Hinblick auf die Schaffung einer Redundanz. Es werden seeverlegte und landverlegte Varianten untersucht. Detailinformationen zum Planungsstand liegen nicht vor.

14.2.2 Seedruckleitung Starnberger See

Der Abwasserverband Starnberger See betreibt seit 1996 eine seeverlegte Druckleitung, welche entlang des Westufers von der Pumpstation Tutzing Süd zum Übergabeschacht Nr. 309 in Garatshausen führt. Der Abwasserverband Starnberger See hat der Hochschule Augsburg eine Vielzahl an Fotos und Unterlagen zu der Seedruckleitung zur Verfügung gestellt. Aus diesen geht hervor, dass es sich bei der Abwasserleitung um eine 2.923 m lange Mischwasserleitung mit dem Nenn-durchmesser DN400 handelt. Im Landbereich besteht die Leitung über eine Länge von 129 m aus Guss (PN10, DN400), während für den seeverlegten Bereich über eine Länge von 2.794 m das Material PE-HD (PN6, DN400) gewählt wurde. Die maximale Höhendifferenz zwischen Hoch- und Tiefpunkt der Leitung liegt bei etwa 43 m.

Die 20 m langen PE-HD-Rohrstücke wurden zunächst an Land verschweißt. Im Anschluss wurden die Betongewichte angebracht und die Leitung schwimmend auf den See geschoben (siehe Abbildung 84). Daraufhin wurde die Druckleitung lagemäßig positioniert und durch das Befüllen der Leitung auf den Seegrund ab-gesenkt.



Abbildung 84: links: Lageplan der Seedruckleitung im Starnberger See; rechts: Fotodokumentation der Verlegung der Seedruckleitung im Starnberger See (AV Starnberger See)



Um Ablagerungen und Luftanteile in der Druckleitung zu vermeiden, wurde zur Pumpstation in Tutzing zusätzlich eine Seewasserzuleitung mit offenem Ende verlegt. Dadurch kann die Abwasserdruckleitung sporadisch mit drei gleichzeitig laufenden Pumpen und den damit verbundenen hohen Fließgeschwindigkeiten mit Seewasser gespült werden.

Bisher traten nach Angaben des Betreibers noch keine betrieblichen Probleme mit der Seedruckleitung im Starnberger See auf.

Es wurde bereits eine lagemäßige Zustandserfassung mit Hilfe einer U-Boot-Fahrt unternommen (siehe Kap. 14.1.5). Dabei konnten weder Veränderungen der Position der Druckleitung noch Schäden festgestellt werden.

Des Weiteren hat der Abwasserverband Starnberger See in der Vergangenheit in größeren zeitlichen Abständen Druckprüfungen an der Seedruckleitung mit einem Prüfdruck von unter 2,0 bar durchgeführt. Mit den Prüfungen war jedoch ein erheblicher Aufwand verbunden, da das Ende der Leitung zunächst mit einem Flansch verschlossen werden musste. Aus diesem Grund wurde in näherer Vergangenheit keine weitere Dichtheitsprüfung mehr durchgeführt. Eine Prüfung der Seedruckleitung durch die Hochschule Augsburg wurde aufgrund des erhöhten Aufwandes ebenfalls abgelehnt. Stattdessen wird der Füllstand vom Ablaufschacht bei ausgeschalteter Pumpe dokumentiert. Fließt dort weiter Wasser nach, muss eine Leckage vorliegen, da der Auslauf unter dem Seespiegel-Niveau liegt und somit Seewasser in die Druckleitung gepresst würde. Dieser Ansatz konnte jedoch in der Praxis noch nicht bestätigt werden.

14.2.3 Seedruckleitungen Königssee

Die folgenden Informationen wurden auf Grundlage der von der Firma Dippold und Gerold getroffenen Aussagen sowie bereitgestellten Unterlagen zusammengestellt.

Um die abwassertechnischen Verhältnisse der unmittelbar am Königssee liegenden Ortsteile St. Bartholomä und Sallet zu verbessern, wurde im Jahr 1988 die Planung zweier seeverlegter Abwasserdruckleitungen in Auftrag gegeben. Baubeginn war im September 1988. Die seeverlegten Druckleitungen konnten im November 1988 eingeschwommen werden. Der Vorhabensträger war dabei die Gemeinde Schönau am Königsee, wobei die Planung durch das Ingenieurbüro Dippold & Gerold übernommen wurde. Die Bauarbeiten wurden durch die Firma Riepl (München) durchgeführt. Der Anschluss von St. Bartholomä an das Kanalnetz der Gemeinde wurde in einer Sondervereinbarung mit der staatlichen Schlösser- und Seenverwaltung geregelt. Die Baukosten beliefen sich unter Berücksichtigung des Ausschreibungsergebnisses auf insgesamt 1.865.000 DM. Die Kosten für den Bau

der Seedruckleitungen im Königssee wurden in erheblichem Umfang durch den Freistaat Bayern gefördert. (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988) (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1989)

Beim Anschluss an das öffentliche Kanalnetz wohnten in St. Bartholomä ständig rund zehn Einwohner. Im Sommer wird die Halbinsel jedoch von einer großen Zahl an Touristen frequentiert. Dabei wurden vor Baubeginn bis zu 10.000 Besucher am Tag gezählt, welche die nähere Umgebung, die Kirche und den Gasthof besuchen. (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988)

Vor der Inbetriebnahme der Seedruckleitung verfügte St. Bartholomä über eine mechanisch-biologische Kläranlage (Scheibentauchkörper) für 350 EGW. Das gereinigte Abwasser wurde im Anschluss in einen 300 m entfernt gelegenen, aufgelassenen Brunnen gefördert und dort versickert. (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988)

In Sallet ist während des Sommers die Sallet-Alm in Betrieb, welche ebenfalls einen Gastronomiebetrieb darstellt. Im Winter (Oktober bis Mai) ist Sallet unbewohnt. Das Gästehaus in Sallet verfügte vor Anschluss an das Kanalnetz über eine 30 m³ große Dreikammergrube mit anschließender Bodenversickerung. An der Schiffsanlegestelle befindet sich außerdem eine öffentliche Toilette. Die dort anfallenden Abwässer wurden ebenfalls in eine Dreikammergrube mit einem Volumen von 6 m³ eingeleitet.

Das Hauptziel der Sanierungsmaßnahmen wurde dementsprechend so definiert, dass das anfallende Abwasser völlig vom See fernzuhalten ist. Aus diesem Grund wurden zwei seeverlegte Abwasserdruckleitungen errichtet, welche an das bestehende, öffentliche Kanalnetz anschließen und das Schmutzwasser nach Königssee (Ortsteil der Gemeinde Schönau am Königssee) fördern (siehe Abbildung 85).

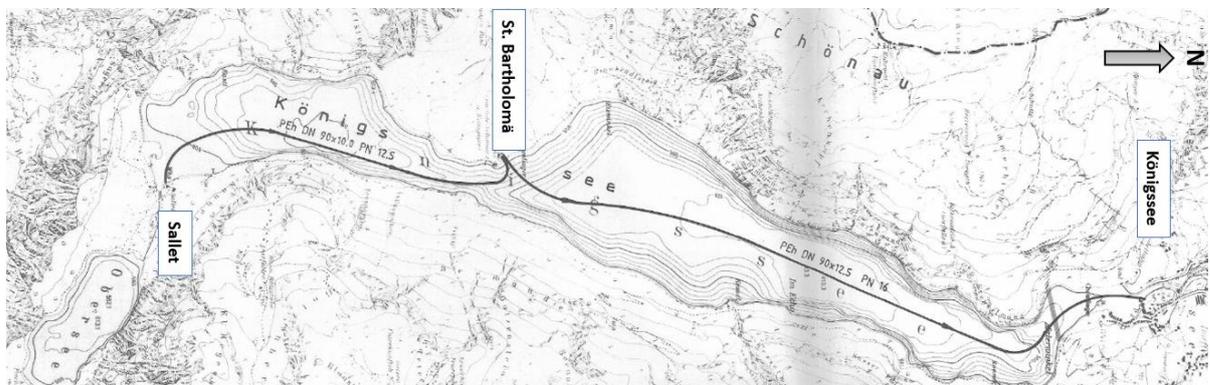


Abbildung 85: Lageplan der seeverlegten Abwasserdruckleitungen im Königssee - Entwurf (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988), teilweise modifiziert

Aus den bereitgestellten Unterlagen geht hervor, dass beide Seedruckleitungen aus PE-HD 90 x 12,5 mm (90 mm Außendurchmesser, 12,5 mm Wandstärke,

Druckstufe PN 16) gefertigt wurden. Dementsprechend wurden die Druckrohre als Trommelware mit einer Länge von 2.700 m bis 2.800 m geliefert. Durch die Anlieferung als Trommelware konnte die Seedruckleitung Sallet – St.Bartholomä in einem Stück verlegt werden, die Leitung St. Bartholomä – Königssee besteht hingegen aus zwei Teilsträngen mit einer Flanschverbindung im Seebereich. Die Ballastierung der Rohrleitung wurde so dimensioniert, dass die Seedruckleitung laut Erläuterungsbericht rechnerisch auch eine mit Luft gefüllte Leitung auf dem Seegrund halten kann. Als Ballastierung wurden zweiteilige, runde Betongewichte im Abstand von 5 m über eine Moosgummieinlage mittels Edelstahlschrauben an das Druckrohr gepresst.

14.2.3.1 Seedruckleitung Sallet - St.Bartholomä

Die Seedruckleitung zwischen Sallet und St.Bartholomä erstreckt sich über eine Länge von 2.735 m. Der Tiefpunkt der Leitung liegt ca. 100 m unter dem Seespiegel (siehe Abbildung 86).

In der Entwurfsplanung wurde außerdem festgehalten, dass die Leitung in regelmäßigen Abständen mit Druckluft oder Seewasser gespült werden kann. In der Pumpstation Sallet wurden zwei Tauchmotorpumpen mit Schneidwerk vorgesehen. Diese wurden nach Aussage des Ingenieurbüros im Jahr 2021 saniert.

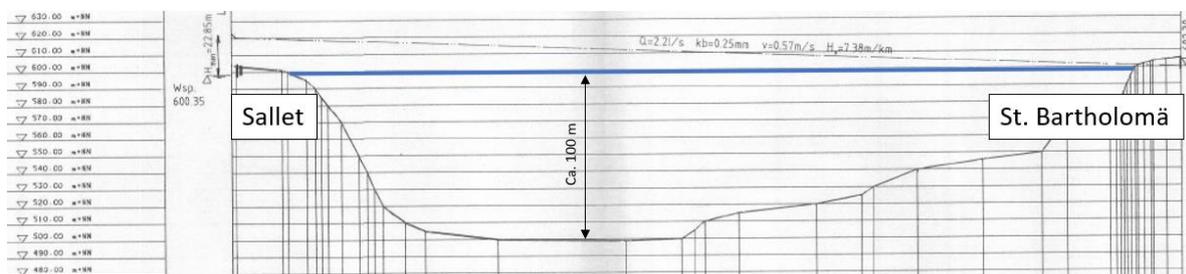


Abbildung 86: Längsschnitt der Seedruckleitung Sallet - St.Bartholomä (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988), teilweise modifiziert

Die Seedruckleitung wurde ursprünglich errichtet, um das Abwasser der Sallet Alm sowie der Toilettenanlage an der Anlegestelle Sallet über St.Bartholomä nach Schönau am Königssee zu fördern. Mittlerweile werden jedoch weitere Einrichtungen über die Seedruckleitungen im Königssee entwässert (siehe Kapitel 14.2.4). Im Winter wird die Seedruckleitung zwischen Sallet und St.Bartholomä außer Betrieb genommen. In der Pumpstation Sallet wurde außerdem ein Be- und Entlüftungsventil vorgesehen.

14.2.3.2 Seedruckleitung St.Bartholomä - Königssee

Die Seedruckleitung zwischen St.Bartholomä und dem Ortsteil Königssee ist mit rund 5.300 m wesentlich länger als die Leitung zwischen Sallet und St.Bartholomä. Das anfallende Abwasser aus Sallet und St.Bartholomä wurde zunächst in einem Vorpumpwerk gesammelt. Dort wurde das Abwasser durch eine Zerkleinerungspumpe (Mono-Muncher) zur eigentlichen Förderanlage bewegt. Mittels zweier Exzentrerschneckenpumpen konnte das Abwasser durch die Seeleitung von St.Bartholomä nach Königssee gefördert werden.

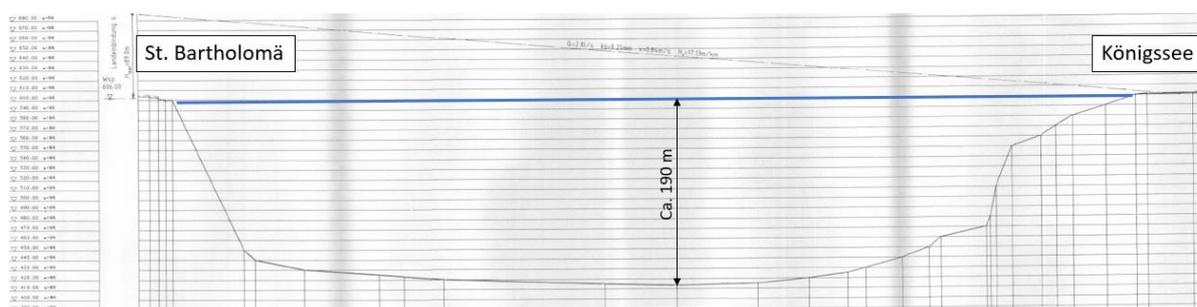


Abbildung 87: Längsschnitt der Seedruckleitung St. Bartholomä - Königssee (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988), teilweise modifiziert

Die Seedruckleitung zwischen St. Bartholomä und Königssee wurde aufgrund der enormen Tiefe der Druckleitung (ca.190 m) mit Seewasser gespült, um Feststoffe in der Druckleitung nach Königssee sicher austragen zu können. Nach Aussage des Ingenieurbüros liegt die Leitung jedoch nicht komplett auf dem Seegrund auf. Während sie lediglich in den Anfangs- und Endbereichen auf dem Seegrund liegt, schwebt sie zwischen diesen Bereichen in unbekannter Tiefe. An die Druckleitung ist auch ein Kompressor für Druckluftspülungen angeschlossen, die nach Aussagen des Ingenieurbüros regelmäßig durchgeführt wurden. In der Pumpstation St.Bartholomä wurde außerdem ein Be- und Entlüftungsventil eingebaut.

Schadensfall an der Seedruckleitung St. Bartholomä – Königssee

Im Zuge des Forschungsprojekts sollte – nach Zustimmung der Gemeinde Schönau - am 26.01.2022 eine Druckprüfung an der Seedruckleitung St. Bartholomä – Königssee durch die HSA durchgeführt werden. Um die Druckprüfung zu ermöglichen, wurde im Vorfeld ein Flansch mit Kugelhahn am Leitungsende angebracht. Im Pumpwerk St. Bartholomä wurde ein weiterer Flanschanschluss mit Kugelhahn als Anschlussmöglichkeit für das Prüfequipment durch die Gemeinde installiert.

Am Tag der Druckprüfung konnte jedoch trotz des ständigen Befüllens der geschlossenen Druckleitung mit etwa 4 m³ Wasser kein Druck aufgebracht werden.



Dies lies nach erster Einschätzung eine größere Undichtigkeit vermuten. Das verwendete Wasservolumen von 4 m³ entspricht etwa einem Viertel des gesamten Leitungsvolumens. Die Druckprüfung musste abgebrochen werden.

Im Anschluss an die abgebrochene Druckprüfung wurden durch die Gemeinde weitere Maßnahmen veranlasst, welche im Folgenden erläutert werden. Das beratende Planungsbüro Dippold und Gerold stand dabei weiterhin in engem Kontakt mit der Hochschule Augsburg.

Am 31.01.2022 wurde ausgehend vom Endschacht der Druckleitung über eine Länge von 70 m eine Kamerabefahrung durch die Firma KMT durchgeführt. Dabei konnten im Endbereich der Druckleitung über die inspizierte Länge von ca. 70 m größere Luftmengen innerhalb der Leitung festgestellt werden, was ebenfalls auf eine große Undichtigkeit hinweist da sich die Leitung bei einem Schaden im Seebereich bis auf das Niveau der Seeoberfläche selbst entleeren müsste.

Am 03.02.2022 wurde ein Pumpversuch unternommen. Dabei wurde die Leitung mit über 17 m³ Seewasser (entspricht komplettem Leitungsvolumen) gespült und am Auswurfschacht beobachtet welche Wassermenge austritt. Es stellte sich heraus, dass kein Wasser im Übergabeschacht ankommt, wodurch der vermutete Schaden bestätigt wurde. Als Sofortmaßnahme wurden daher im direkten Anschluss an den Pumpversuch die Pumpen in St. Bartholomä außer Betrieb genommen. Das anfallende Abwasser wird in einem naheliegenden Vorlagebehälter in St. Bartholomä zwischengespeichert und mit einem Güllefass und einer Fähre über den Seeweg nach Schönau am Königssee transportiert. Am 07.02.2022 wurde ausgehend von der Pumpstation St. Bartholomä über eine Länge von 70 m eine weitere Kamerabefahrung durchgeführt. Dabei konnten ähnlich wie im Endbereich der Leitung in den ersten 50 m der Druckleitung Lufteinschlüsse festgestellt werden.

Am 10.02.2022 wurde bei St. Bartholomä ausgehend von einem Zwischenschacht, welcher sich direkt am Seeufer befindet ebenfalls eine Kamerainspektion über 70 m im Seebereich durchgeführt. Dabei konnten keine Schäden, Lufteinschlüsse oder Besonderheiten festgestellt werden.

Als weitere Maßnahme wurde die Firma Kopterflug damit beauftragt, die Druckleitung ab dem 28.02.2022 mittels Unterwasserdrohnen abzutauchen (siehe Kap. 14.1.5, um den vermuteten Schaden orten zu können. Dabei konnte am 03.06.2022 eine Anomalie in einer Tiefe von ca. 173 m geortet werden. Die auf dem Seegrund liegende Druckleitung ist an dieser Stelle durch auffallend viel Schlamm überdeckt (siehe Abbildung 88). Es wird vermutet, dass sich dort eine Schadstelle befindet, an der Feststoffe aus der Druckleitung austraten und sich direkt um die Druckleitung ablagerten.



Abbildung 88: Bildaufnahme der vermuteten Schadstelle am Königssee in einer Tiefe von 172 m

Am 21.03.2022 wurde ein Saugversuch ausgehend vom Endschacht der Druckleitung durchgeführt. Dabei konnten von ca. 26 m³ gepumptem Seewasser lediglich ca. 3 m³ Wasser am Endschacht abgepumpt werden.

Zeitweise wurde das Abwasser mit Hilfe eines Pontons mit einem Fassungsvermögen von 60 m³ nach Schönau am Königssee gefördert.

Aktuell wird das Abwasser über eine provisorisch eingerichtete und an der Wasseroberfläche treibende Leitung nach Schönau am Königssee abtransportiert.

Weitere geplante Maßnahmen sind im Folgenden aufgelistet:

- Abstimmung einer Neuverlegung der Leitung mit allen Behörden.
- Ausschreibung der geplanten Baumaßnahme.
- Vergabe der Maßnahme voraussichtlich Ende Mai.
- Trassenwahl
- Verlegung der Seeleitung
- Fertigstellung der erneuerten Seeleitung noch im Jahr 2022

14.2.4 Seedruckleitung Obersee am Königssee

Der Obersee befindet sich ca. 550 m vom Südufer des Königssees entfernt. Ein Moränenwall trennt die beiden Seen, die ursprünglich einmal miteinander verbunden waren.

Im Mai 2021 begannen Bauarbeiten zum Abtransport der anfallenden Abwässer der am südöstlichen Seeufer des Obersees gelegenen Fischunkelalm sowie der am Südufer des Königssees liegenden Almen Mooslehen und Rennerlehen in Richtung Sallet. Die Abwässer der Almen werden dabei mittels landbasierter Druckleitungen aus PE-HD zu einem Übergabeschacht am Gasthaus Sallet-Alm gefördert. Für den Transport der Abwässer der Fischunkelalm wurde eine neue Seedruckleitung durch den Obersee verlegt. Vom Übergabeschacht am Gasthaus Sallet-Alm fließt das Abwasser im Freispiegelkanal zur Pumpstation Sallet, welche sich an der Bootsanlegestelle befindet. Im Anschluss wird das Abwasser dann über die bestehenden Seedruckleitungen im Königssee über St. Bartholomä nach Schönau gefördert (siehe Kap. 14.2.3).

Die folgende Abbildung gibt eine Übersicht über die örtlichen Begebenheiten.

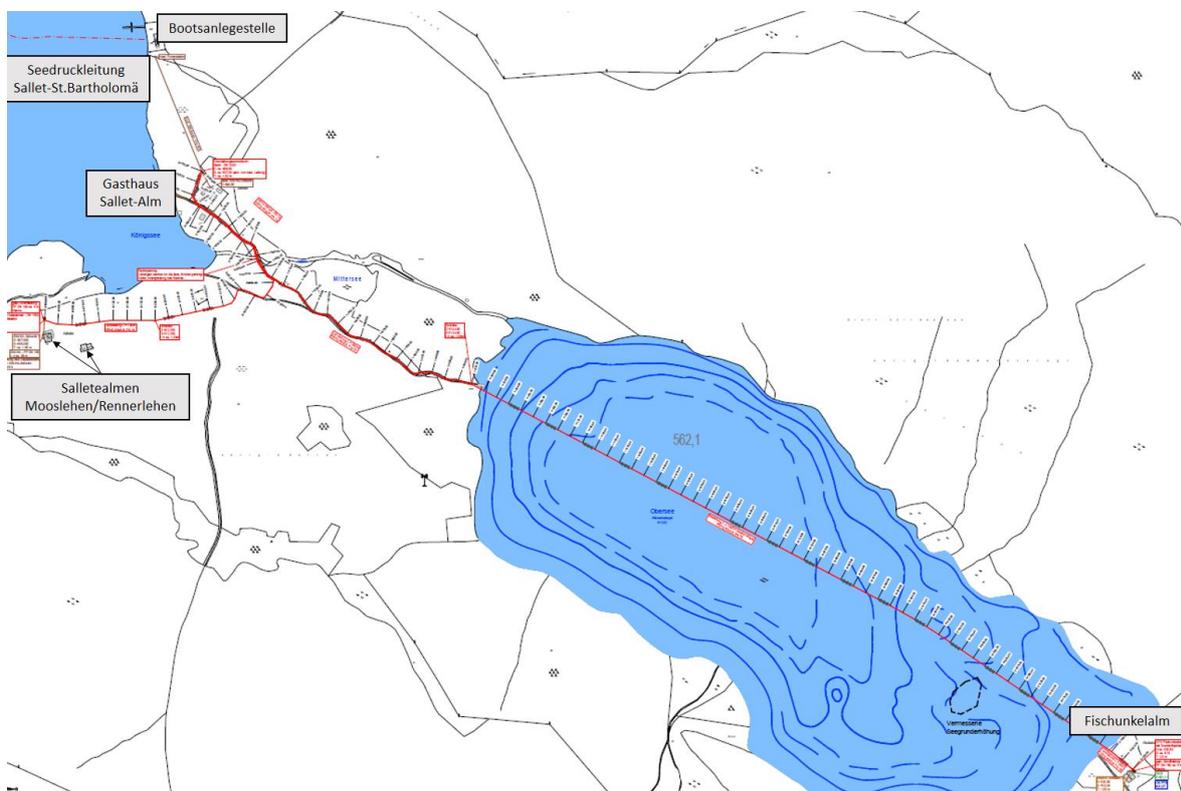


Abbildung 89: Übersichtslageplan der neuen Abwasserleitungen am Obersee (Planunterlagen Dippold und Gerold, teilweise modifiziert)

Die seeverlegte Abwasserdruckleitung aus PE-HD quert den Obersee über eine Länge von etwa 1.350 m und besitzt den Nenndurchmesser DN 50 sowie die Druckstufe PN16 (Außendurchmesser: 63 mm, Wandstärke: 5,8 mm).

Neben der Abwasserdruckleitung wurde die Fischunkelalm ebenfalls über den See an ein Niederspannungskabel sowie einen Microkabel-Leerrohr-Verbund angeschlossen. Alle drei Leitungen wurden dabei in einem PE-HD-Schutzrohr mit dem Außendurchmesser von 280 mm und einer Wandstärke von 25,4 mm gebündelt im Obersee verlegt (siehe Abbildung 90).

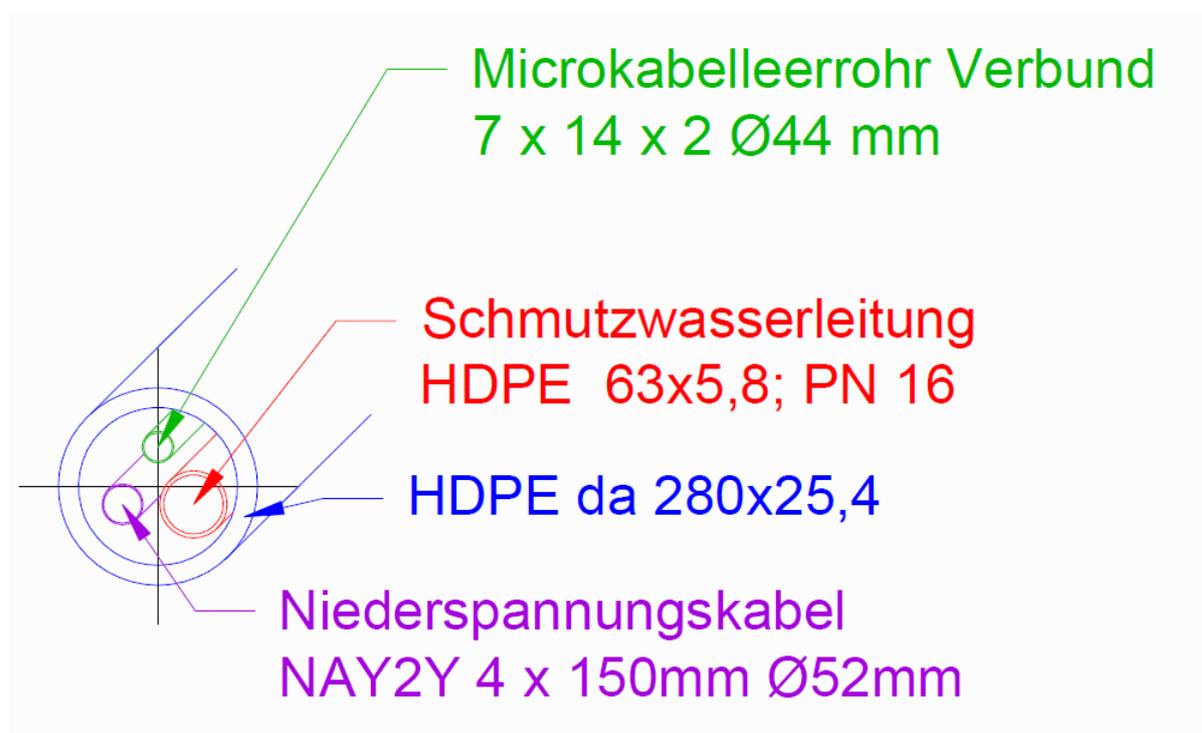


Abbildung 90: Regelquerschnitt Seeleitung im Obersee, (Planunterlagen Dippold und Gerold)

Das Abwasserdruckrohr konnte am Stück als Trommelware geliefert werden. Auch die restlichen Kabel wurden als Trommelware geliefert. Die Schutzrohrstangen wurden über Elektromuffen verbunden und mit den Kabeln und der Abwasserdruckleitung schwimmend auf den See geschoben. Zur Ballastierung wurden Laternenfundamente an der Leitung montiert. Durch Schwimmkörper und die vorhandene Luft im Zwischenraum sowie in der Schmutzwasserleitung konnte die Leitung auf dem See treiben und lagemäßig positioniert werden (siehe Abbildung 91). Im Anschluss wurde am 29.10.2021 der Zwischenraum mit Wasser gefüllt, wodurch sich die Leitung nach und nach absenkte.



Abbildung 91: An der Wasseroberfläche treibende Lagerung der Seedruckleitung Obersee am Königssee am Tag der Absenkung der Seedruckleitung

Die Baumaßnahme an der neuen Seedruckleitung war zum Ende des Forschungsvorhabens noch nicht abgeschlossen. Die Kosten der Baumaßnahmen wurden auf rund 1,7 Mio € geschätzt. Das Bauvorhaben wird zu 75% durch den Freistaat Bayern gefördert.

14.2.5 Abwasserdruckleitung Rottachsee

Nach telefonischer Rücksprache mit dem Betriebsleiter des Abwasserverbands Kempten stellte sich heraus, dass unter dem Rottachspeicher zwischen Petersthal und Moosbach eine Druckleitung aus Guss liegt.

Nach Aussagen des Betriebsleiters erfolgte die Verlegung der Druckleitung vor Einstauen des Sees. Die Leitung wurde zunächst positioniert, erdüberschüttet und im Anschluss mit Netzen gesichert. Aus diesem Grund stellt diese Abwasserdruckleitung eine unter dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitung und somit keine Seedruckleitung dar. Der Rottachspeicher wurde erst im Anschluss an die Verlegung und Überschüttung eingestaut.

Des Weiteren besitzt die Gussleitung nach Aussagen des Betriebsleiters den Nenndurchmesser DN300 und eine maximale Tiefe von etwa 23 m. Der Abwasserverband Kempten möchte darüber hinaus eine neue Leitung parallel zur A7 errichten, welche in Oy angeschlossen und die Druckleitung unter dem Rottachsee ersetzen soll, um größere Kapazitäten zu gewährleisten.

Genauere Planunterlagen oder Informationen liegen der Hochschule Augsburg nicht vor. Eine Prüfung konnte nicht durchgeführt werden.

14.2.6 Abwasserdruckleitung Großer Alpsee

Der Abwasserverband Obere Iller (AOI) betreibt eine Abwasserdruckleitung, welche den Großen Alpsee auf einer Länge von ca. 600 m unterquert. Diese wurde im Spülbohrverfahren (Horizontalbohrtechnik) hergestellt und unter dem Seegrund verlegt. Da es sich ausschließlich um eine Unterquerung des Großen Alpsees handelt, weist die Druckleitung in allen Bereichen eine Erdüberdeckung auf. (siehe Abbildung 92). Es handelt sich somit ebenfalls um keine seeverlegte Druckleitung. Die maximale Höhendifferenz zwischen Leitungshochpunkt und Tiefpunkt beträgt rund 22 m.

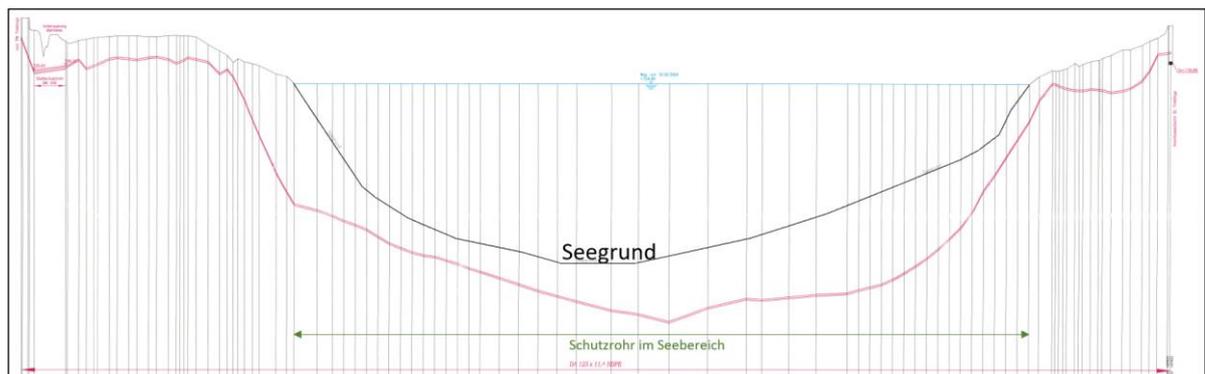


Abbildung 92: Längsschnitt der Abwasserdruckleitung im Bereich des Großen Alpsees (Stadt Immenstadt, 2005)

Lagemäßig verläuft die Druckleitung vom am Nord-West-Ufer liegenden Pumpwerk Triebblings (links in Abbildung 92) zu einem Anschlusssammler am Süd-West-Ufer. Von dort aus wird das Abwasser entlang des Seeufers bis zum Pumpwerk Hierl befördert (siehe Abbildung 93). Entlang des Seeufers befindet sich die Druckleitung zwar auch teilweise im Seebereich, jedoch ist sie in diesen Abschnitten ebenfalls dauerhaft erdüberdeckt.



Abbildung 93: Lageplan der Abwasserdruckleitung unter dem Alpsee (AOI, teilweise modifiziert)



Die Verwaltung und der Betrieb der Druckleitung unter dem großen Alpsee lagen über lange Zeit im Aufgabenbereich der Stadt Immenstadt. Erst vor einigen Jahren wurde der Zuständigkeitsbereich auf den Abwasserverband Oberer Iller (AOI) übertragen. Aus diesem Grund liegt ein Großteil der Planunterlagen nach wie vor bei der Stadt Immenstadt.

Aus den Bestandsplänen geht hervor, dass als Rohrmaterial der Werkstoff PE-HD (PE 100, Druckstufe: PN16) mit dem Nenndurchmesser DN100 verwendet wurde. Der Außendurchmesser der Druckleitung beträgt demnach 125 mm. Mit einer Wandstärke s von 11,4 mm liegt der Innendurchmesser bei 102,2 mm.

Um die Druckleitung zusätzlich vor Schäden von außen zu schützen, wurde im Seebereich ein Schutzrohr eingesetzt. Als Material für das Schutzrohr wurde ebenfalls PE-HD (PE 100, PN16, SDR11) gewählt. Da das Schutzrohr mit einem größeren Innendurchmesser von 163,6 mm (DN150) gewählt wurde, konnte die Abwasserdruckleitung einfach durch das Schutzrohr gezogen werden. Die Differenz zwischen dem Außendurchmesser der Abwasserdruckleitung und dem Innendurchmesser des Schutzrohres beträgt 38,6 mm, sodass zwischen den Leitungen ein mit Luft gefüllter Zwischenraum besteht. Die Abwasserdruckleitung liegt lediglich auf der Sohle des Schutzrohres auf.

Direkt nach dem Pumpwerk Triebblings quert die Abwasserdruckleitung außerdem die Bahnlinie Buchloe-Lindau. In diesem Bereich wurde ein Stahlschutzrohr mit dem Nenndurchmesser DN300 eingesetzt.

Eine Besonderheit der Druckleitung ist, dass sie zur Vermeidung von langen Standzeiten in regelmäßigen Abständen mit Druckluft gespült wird. Läge keine ausreichende Überdeckung vor oder wäre die Leitung auf dem Seegrund verlegt, wäre eine Druckluftspülung aufgrund der Gefahr des Aufschwimmens kritisch zu betrachten.

Bisher traten noch keine Betriebsprobleme an der Abwasserdruckleitung auf. Eine Druckprüfung der Abwasserdruckleitung wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt (siehe Kap. 14.4.3).



14.2.7 Abwasserdruckleitung Forggensee

Der Forggensee wird über eine Länge von ca. 1500 m von zwei (Redundanz) Abwasserdruckleitungen unterquert. Hierbei handelt es sich jedoch ebenfalls nicht um seeverlegte Druckleitungen, da die Abwasserdruckleitung über die komplette Länge der Querung des Forggensees erdüberdeckt ist.

Da es sich beim Forggensee um einen vom Lech durchquerten Stausee (Lechstaustufe 1) handelt, werden jährlich große Mengen an Kies aus den Alpen in den Forggensee getragen. Im Winter wird der Wasserstand des Forggensees abgesenkt. Nach ausreichender Absenkung kann der angespülte Kies in großen Mengen abgetragen werden. Um einen Verkehrsweg für die Transportwagen zu errichten, wurde ein Damm gebaut. Der Damm fungiert neben dem Transportweg auch als Überschüttung der beiden Abwasserdruckleitungen, einer Trinkwasserleitung und einer Daten-Standleitung.

Der folgenden Abbildung 94 kann die Lage der Leitungen entnommen werden. Die beiden Abwasserdruckleitungen führen unter einem Damm von einem Pumpwerk im Norden von Waltenhofen zum gegenüberliegenden Seeufer. Von dort aus fließt das Abwasser über einen Freispiegelkanal zur etwa 150 m weit entfernten Kläranlage.

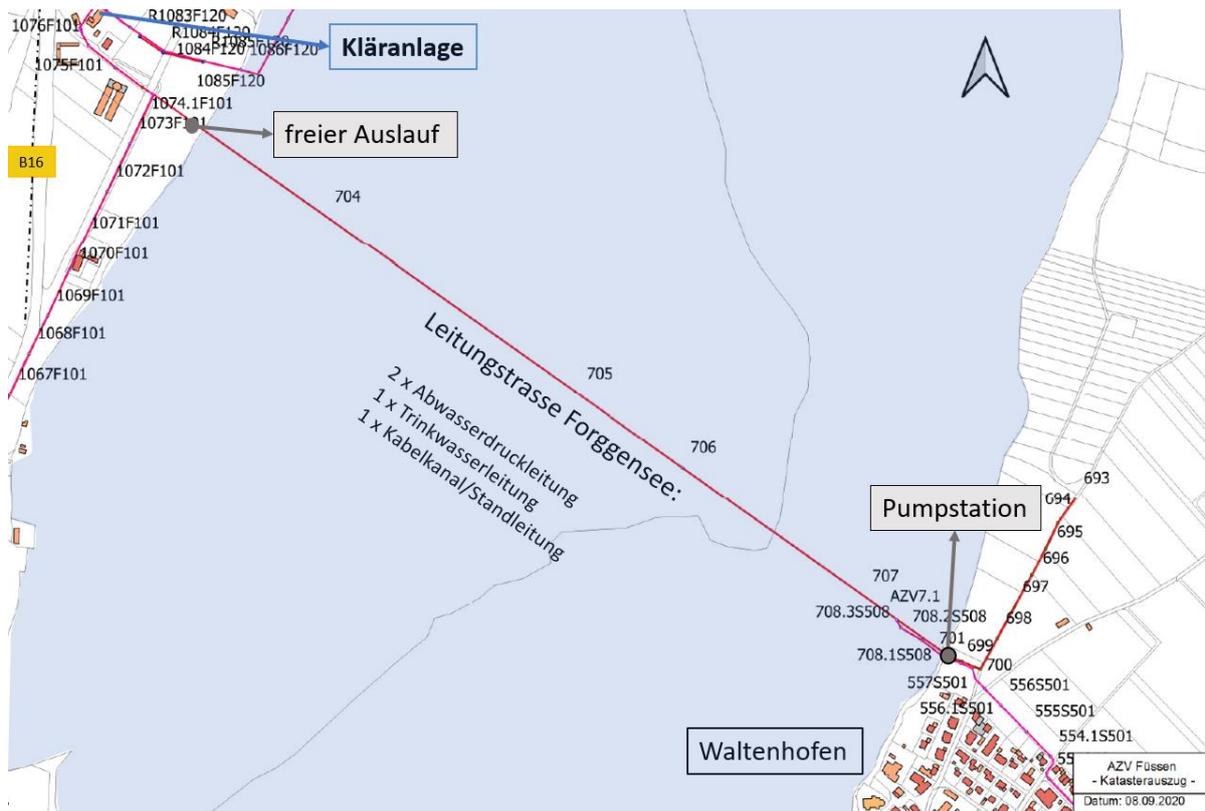


Abbildung 94: Leitungstrasse durch den Förggensee (AZV Füssen, teilweise modifiziert)

Die vier Leitungen verlaufen dabei weitestgehend parallel zueinander (siehe Abbildung 95, links). Auf der Leitungstrasse entlang des Damms wurden außerdem vier Schächte gesetzt (siehe Abbildung 95, rechts).

Ist der Förggensee aufgestaut, so füllen sich diese vier Schächte komplett mit See- wasser. Durch die Schächte wird im Winter die direkte Zugänglichkeit zur Druck- leitung ermöglicht. Der Betreiber geht davon aus, dass es sich bei den Abwasser- druckleitungen um Gussleitungen der Druckstufe PN 10 mit einem Außendurch- messer von 274 mm und einer Wandstärke von 7,5 mm sowie einer Zementmör- telauskleidung von 3 mm handelt (DN250).



Abbildung 95: links: Innenansicht des Schachts auf dem Seegrund des Forggensees; rechts: Ansicht des Schachtdeckels auf dem Kiesdamm am Seegrund, Blickrichtung Nord-Westen

Bei den Abwasserdruckleitungen unter dem Forggensee wurden bereits in der Planungsphase vorrausschauende Entscheidungen getroffen. So wurde durch den Einbau einer zweiten Seedruckleitung eine Redundanz geschaffen. Sollten betriebliche Probleme mit der in Betrieb befindlichen Druckleitung oder den angeschlossenen Pumpen entstehen, kann der Abwasserabtransport einfach über die redundante Druckleitung erfolgen. Hinzu kommt, dass die Daten-Standleitung Störfälle des Pumpwerks, auch bei einem Ausfall der Internetverbindung, direkt an die Kläranlage übermittelt. Werden Betriebsprobleme gemeldet, kann der Betreiber sofort die redundante Leitung in Betrieb nehmen, um die Pumpen bzw. die Druckleitung auf vorhandene Schäden zu untersuchen.

Im normalen Betrieb werden die Leitungen abwechselnd eingesetzt, um Schäden aufgrund einer langen Außerbetriebnahme zu vermeiden. Die Druckleitungen werden über das Pumpwerk mit jeweils einer Trockenwetterpumpe (ca. 57 l/s) und eine Regenwetterpumpe (ca. 100 l/s) betrieben.

Beide Abwasserdruckleitungen konnten im Zuge des Forschungsprojektes geprüft werden. Auf Grundlage der getroffenen Annahmen konnten die Leitungen als dicht eingestuft werden. Es ist zu beachten, dass das Absperrorgan am Leitungsende während der Prüfung nicht komplett dicht abgeschlossen werden konnte. Die Verluste am Leitungsende lagen jedoch unterhalb des zulässigen Leckagevolumens.



14.3 Probleme und Risiken beim Betrieb von Abwasserdruckleitungen im Bereich von bayerischen Seen

Wie bereits mehrfach erwähnt, stellen Seedruckleitungen eine gegenüber klassischen Abwasserdruckleitungen schnelle und kostengünstige Alternative dar, wenn die entsprechenden Randbedingungen gegeben sind. Allerdings besteht bei Seedruckleitungen aufgrund der Möglichkeit des direkten Austritts von Abwasser durch eine Schadstelle in ein stehendes Gewässer, das als Biotop, Badegewässer, zum Vorhalt von Trinkwasser oder zu Erholungsseen genutzt wird, ein erhöhtes Schadenspotential.

Im Zuge des österreichischen Forschungsvorhabens (Pressl, et al., 2015) wurde für österreichische Seedruckleitungen eine probabilistische Risikoanalyse durchgeführt. Bei dieser probabilistischen Risikoanalyse werden auf Grundlage von Störfällen und ökologischen Faktoren, Folgeereignisketten und Kombinationsergebnisse gebildet. Daraus werden dann einzelne Ereignisbäume (bestehend aus einzelnen Ereignisverzweigungen) erstellt. Am Ende wird die Schadenshäufigkeit der einzelnen Ereignisketten über Wahrscheinlichkeitsrechnungen ermittelt. Die Durchführung der probabilistischen Risikoanalyse setzt eine große Datengrundlage und enge Zusammenarbeit mit Netzbetreibern (mehrtägige Tagungen) voraus. Für die bayerischen Seedruckleitungen ist die Durchführung einer probabilistischen Risikoanalyse aufgrund der zu geringen Datengrundlage im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht möglich gewesen.

Aus diesem Grund wird im Folgenden auf Grundlage der vorliegenden Unterlagen und Aussagen Betreiber bayerischer Seedruckleitungen lediglich qualitativ erörtert, welche Risiken beim Betrieb von seeverlegten und unter dem Seegrund verlegten Abwasserdruckleitungen bestehen. Im Anschluss werden die entsprechenden Risiken individuell für die bayerischen Leitungen bewertet und deren mögliche Folgen aufgeführt. Abschließend werden die Empfehlungen und Maßnahmen zur Reduzierung des Risikopotentials seeverlegter Abwasserdruckleitungen zusammengefasst.

14.3.1 Gefahr des Aufschwimmens

Bei seeverlegten Abwasserdruckleitungen besteht im Gegensatz zu unter dem Seegrund verlegten Abwasserdruckleitungen bei zu hohen Luftanteilen innerhalb der Druckleitung die Gefahr des Aufschwimmens. Daher wird eine Ballastierung verwendet (siehe Kap. 14.1.2), um eine ausreichende Auftriebssicherheit zu gewährleisten. Bei größeren Durchmessern sind deutlich schwerere Gewichte notwendig, um eine vollständige Auftriebssicherheit zu gewährleisten. Dadurch sind einige bayerische Seedruckleitungen großer Dimension nur gegen einen bestimmten prozentualen Luftanteil des Rohrinnenvolumens gesichert.

Das Aufschwimmen einer Seedruckleitung ist zwar nicht als Schaden zu beurteilen, kann jedoch effektiven Schaden herbeiführen. Beim unkontrollierten Aufschwimmen der Druckleitung kann es zur Ovalität oder einem Abknicken der Leitung kommen (siehe Kap. 14.1.3), was wiederum zu Leckagen und der Exfiltration von Abwasser führen kann. Des Weiteren kann die an der Oberfläche treibende Abwasserdruckleitung durch die private oder öffentliche Schifffahrt beschädigt werden (z.B. durch Schiffsschraube) oder Unfälle verursachen. Wird der Luftanteil in der Leitung – beispielsweise durch Leitungsspülungen – reduziert, senkt sich die Leitung unkontrolliert wieder ab. Im Folgenden wird auf Grundlage der bereitgestellten Unterlagen und bereits aufgetretener Betriebsprobleme die Gefahr des Aufschwimmens für sämtliche bayerische Seedruckleitungen qualitativ bewertet.

- **Gefahr des Aufschwimmens am Chiemsee**

Bisher kam es in Bayern lediglich am Chiemsee zum Aufschwimmen von Abwasserdruckleitungen. Die Leitungen am Chiemsee sind aufgrund der großen Leitungsdurchmesser nur bis zu einem gewissen Luftanteil gegen Auftrieb gesichert. In Kap. 14.2.1 wurde bereits ausführlich beschrieben, welche Ursachen für das Aufschwimmen der Leitung verantwortlich gewesen sein könnten und welche Gegenmaßnahmen getroffen wurden (zusätzliche Ballastierung mit Trockenbetonsäcken, Anbringen von Be- und Entlüftungsventil in der Pumpstation Harras, Anpassung der Pumpleistung und Spülgeschwindigkeit, regelmäßige Lageortung mittels Sonar). Seitdem wurden keine weiteren Betriebsprobleme durch Aufschwimmen der Leitungen bekannt.

Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass es in Zukunft zu einem erneuten Aufschwimmen einer Seedruckleitung im Chiemsee kommt. Eine Verschiebung der Betongewichte ist in der Vergangenheit bereits aufgetreten. Es ist demnach denkbar, dass die nachträglich angebrachten Gewichte (Trockenbetonsäcke) bei entsprechender Auftriebskraft (zwischen den Gewichten) von der Leitung rutschen. Bei längeren und starken Niederschlagsepisoden kann es außerdem weiterhin zum ungewollten Eintrag von Luftanteilen kommen. Zwar wurde die Einfallhöhe in den Pumpensumpf verringert, jedoch führt dies nur zu einer Reduzierung



des ungewollten Eintrags der Luft. Eine vollständige Vermeidung der Einleitung kleinerer Luftblasen ist nicht möglich. Da die aufgeschwommenen Seedruckleitungen im Chiemsee eine sehr flache Leitungsführung (ggf. sogar mit lokalen Hochpunkten) aufweisen, könnten sich an diesen Stellen eingetragene und durch Zeretzungsprozesse entstandene zusätzliche Gasanteile ansammeln und irgendwann zu einem Aufschwimmen der Leitung führen.

Grundsätzlich hat der Betreiber aufgrund der vergangenen Erfahrungen jedoch eine intensivere Überwachung der Leitungen veranlasst (z.B. regelmäßige Lageortung). Dadurch könnte das Risiko eines baldigen Aufschwimmens ggf. im Vorfeld identifiziert und durch weitere Maßnahmen (z.B. langes, intensives Spülen mit hoher Fließgeschwindigkeit) verringert werden.

- **Gefahr des Aufschwimmens am Starnberger See**

Die seeverlegte Abwasserdruckleitung im Starnberger See ist in regelmäßigen Abständen mit Betongewichten ballastiert und liegt in einer maximalen Tiefe von ca. 43 m. Eine vollständige Auftriebssicherheit liegt nach Aussagen des Netzbetreibers nicht vor. Zur Vermeidung von Luftansammlungen wird die Leitung regelmäßig mit Seewasser gespült. Um maximal hohe Spülgeschwindigkeiten zu erreichen, werden für den Spülvorgang drei gleichzeitig laufende Pumpen verwendet.

An der Seedruckleitung im Starnberger See ist es bisher nicht zu Betriebsproblemen gekommen. Des Weiteren wurde die Lage der Leitung durch eine U-Bootfahrt überprüft. Dabei konnten keine lagemäßigen Veränderungen der Leitungsposition festgestellt werden.

Dass es an der Leitung seit nunmehr 25 Jahren zu keinen betrieblichen Problemen gekommen ist und sich die Lage der Leitung vermutlich bisher nicht geändert hat, kann davon ausgegangen werden, dass das Entlüftungskonzept am Starnberger See wirksam ist. Das Risiko des ungewollten Aufschwimmens kann dadurch als eher gering eingestuft werden. Vollständig ausschließen lässt sich ein mögliches Aufschwimmen der Leitung jedoch nicht. Ggf. kann das Zusammenspiel verschiedener negativer Einflüsse (z.B. Defekt an Pumpe führt zu Lufteintrag, extreme Wetterlagen, Spülung mit Seewasser wurde ausgelassen, ...) zu hohen Luftanteilen in der Seedruckleitung und einem Aufschwimmen führen.

- **Gefahr des Aufschwimmens am Königssee**

Die seeverlegten Abwasserdruckleitungen am Königssee aus PE-HD 90 x 12,5 wurden nach Aussagen des Ingenieurbüros Dippold & Gerold vollständig gegen Auftrieb gesichert, damit eine komplettes Freispülen der Abwasserdruckleitung möglich ist (siehe Kap. 14.2.3). (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1989)



Sofern sich die Ballastierung entlang der Seedruckleitung nicht signifikant verschiebt, wovon seitens des Ingenieurbüros ausgegangen wird, besteht für die Abwasserdruckleitungen am Königssee somit ein eher geringes Risiko des unkontrollierten Aufschwimmens.

- **Gefahr des Aufschwimmens am Obersee**

Die seeverlegte Druckleitung am Obersee befindet sich innerhalb eines Schutzrohres (siehe Kap. 14.2.4). Das Schutzrohr wurde in regelmäßigen Abständen mit insgesamt 18 Betongewichten beschwert. Der Ringspalt zwischen Schutzrohr und Abwasserdruckleitung ist außerdem komplett mit Wasser gefüllt. Bei vollgefülltem Ringspalt ist die Abwasserdruckleitung komplett gegen Auftrieb gesichert, da diese im Winter mit Druckluft komplett freigespült wird. Nach Aussagen des Ingenieurbüros wäre die Leitung auch bei einer Leerung des Ringspalts ausreichend gegen Aufschwimmen gesichert. Demnach besteht auch an der Seedruckleitung im Obersee am Königssee ein eher geringes Risiko des Aufschwimmens. Die Leitung wurde bereits mit Druckluft bestmöglich freigespült. Dabei sind keinerlei betrieblichen Probleme aufgetreten.

→ **Methoden zur Vermeidung des ungewollten Aufschwimmens von Seedruckleitungen**

Durch eine ausreichend dimensionierte Ballastierung und regelmäßige Überprüfung der Lage der Gewichte kann das Risiko eines ungewollten Aufschwimmens von Seedruckleitungen reduziert werden. Zur Überprüfung der Position der Ballastierungen und Lageänderung wurden insbesondere mit Hilfe des Side-Scan-Verfahrens positive Praxiserfahrungen gesammelt (siehe Kap. 14.1.5). Ggf. kann auch das nachträgliche Ballastieren von Seedruckleitungen (z.B. mit Trockenbetonsäcken) das Risiko des Aufschwimmens reduzieren.

Des Weiteren sollte bereits in der Planungsphase die Topographie des Seeuntergrunds genau untersucht und berücksichtigt werden. Die Gefahr des Aufschwimmens kann durch die Vermeidung lokaler Hochpunkte reduziert werden. Außerdem sollten am Seegrund längere flache Leitungsabschnitte vermieden werden. Im Optimalfall stellt sich der Längsschnitt dementsprechend U-förmig dar.

Der (ungewollte) Lufteintrag in die Leitung muss kleinstmöglich ausfallen, um die Gefahr des Aufschwimmens der Seedruckleitung zu reduzieren. Die entsprechenden Handlungsempfehlungen zur bautechnischen Ausführung von Pumpensämpfen wurden bereits in Kap. 11.3.1 erläutert und sollten insbesondere an seeverlegten Druckleitungen eingehalten werden.



Das regelmäßigen Spülen der seeverlegten Abwasserdruckleitung (z.B. mit Seewasser; Genehmigung erforderlich) bei höchstmöglicher Fließgeschwindigkeit sollte ebenfalls zum Austrag vorhandener Luftanteile regelmäßig durchgeführt werden. Ein rechnerischer Ansatz zur Ermittlung der erforderlichen Spülgeschwindigkeit zum Austrag von Luft (Aigner, 2015) kann Kap. 11.3.2 entnommen werden.

Zudem bietet es sich bei dem für Seedruckleitungen typischen U-förmigen Längsschnitt ggf. nach Möglichkeit an, Entlüftungsventile 30 cm unter dem Hochpunkt auf dem absteigenden Ast zu installieren. Vorhandene Luftanteile müssten ansonsten durch den steil absteigenden Leitungsast nach unten durch die Leitung gespült werden, was in vielen Fällen nicht möglich ist. Dadurch sammelt sich die Luft nach Pumpvorgängen immer wieder am Hochpunkt vor dem absteigenden Leitungsast. Es besteht dann die Gefahr, dass sich beispielsweise bei einsetzendem Regenwetter und kontinuierlichem Pumpeneinsatz die Luftanteile in der Leitung fortbewegen und so zu einem Aufschwimmen der Leitung führen können.

Für den einmaligen Luftaustrag (z.B. im Vorfeld einer Druckprüfung) an Leitungen mit einem U-förmigen Längsschnitt (gilt auch für unter dem Seegrund verlegte Druckleitungen und Dükerleitungen) können außerdem die in Kap. 11.3.2 beschriebenen Methoden angewendet werden. Grundsätzlich besteht lediglich an seeverlegten Abwasserdruckleitungen die Gefahr des Aufschwimmens. Abwasserdruckleitungen, welche unter dem Seegrund (z.B. im Spülbohrverfahren) verlegt wurden, vermeiden diese Gefahr. Daher kann das Verlegen von Abwasserdruckleitungen unter dem Seegrund zur Vermeidung des Aufschwimmens in Betracht gezogen werden. Jedoch ist die Verlegung unter einem stehenden Gewässer ggf. mit höheren technischen und wirtschaftlichen Ansprüchen verbunden. Am Traunsee wurden nach Aussagen der Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft der oberösterreichischen Landesregierung Abschnitte der neuerlegten Seedruckleitung im Spülbohrverfahren unter der Seesohle verlegt, um eine stetige Steigung zu ermöglichen. Dadurch soll die Gefahr von Ansammlungen von Luft sowie die Gefahr des Aufschwimmens vermieden werden.



14.3.2 Gefahr von Beschädigungen durch Dritte

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits erläutert, dass es beim Aufschwimmen von Seedruckleitungen zu Beschädigungen durch Dritte (z.B. durch Schiffsschrauben) kommen kann. Schäden durch Dritte können jedoch auch ohne das Aufschwimmen der Leitung auftreten.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Abwasserdruckleitungen durch Bauarbeiten im Bereich der Leitungstrasse beschädigt werden.

Im Bereich von Seen sind Bauarbeiten unüblich. Bei ufernahen Arbeiten, wie Stegarbeiten, ist eine Beschädigung der unter bzw. auf dem Seegrund verlegten Abwasserdruckleitung jedoch denkbar.

- **Gefahr von Schäden durch Dritte am Chiemsee**

Ein Schaden durch Stegbauarbeiten ist am Chiemsee bereits aufgetreten (siehe Kap. 14.2.1). Der Chiemsee besitzt aufgrund seiner 13 Seedruckleitungen eine Vielzahl an Landeinbindungen. Auf Grundlage von Luftaufnahmen kann festgestellt werden, dass sich im Bereich der Landeinbindungen häufig Anlegestellen der öffentlichen Schifffahrt sowie private Holzstege befinden.

Da sich in den Landeinbindungsbereichen häufig Stege befinden und es in der Vergangenheit schon einmal zu einer Beschädigung durch Stegbauarbeiten kam, ist es durchaus denkbar, dass sich eine solcher Schadensfall wiederholen könnte.

- **Gefahr von Schäden durch Dritte am Starnberger See**

Im Starnberger See ist nur eine Seedruckleitung von der Landeinbindung am Südbad Tutzing zum Freibad Garatshausen verlegt. Am Südbad Tutzing befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Leitungstrasse bereits eine größere Bootsanlegestelle des dort ansässigen Yacht-Clubs. In Garatshausen existieren hingegen lediglich vereinzelt kleinere Holzstege.

Aufgrund des im Bereich der Landeinbindung befindlichen Yachtclubs und der bereits bestehenden Holzstege ist nicht auszuschließen, dass es entweder beim Neubau oder der Sanierung von Anlegestellen - wie bereits am Chiemsee eingetreten - zu einer ungewollten Beschädigung der Abwasserdruckleitung kommen kann.

- **Gefahr von Schäden durch Dritte am Königssee und Obersee**

Die Landeinbindungen der Seedruckleitungen im Königssee befinden sich teilweise unweit von den Anlegestellen der öffentlichen Schifffahrt entfernt. Der öffentlichen Schifffahrt ist die Lage der seeverlegten Leitungen nach Aussage der



Gemeinde bekannt. Stegarbeiten würden am Königssee lediglich durch die Betreiber umliegender Almen oder durch die Schifffahrt Königssee durchgeführt, welchen das Vorhandensein der seeverlegten Leitungen bekannt ist. Dennoch lässt sich auch hier nicht ausschließen, dass es bei Bauarbeiten zu einer ungewollten Beschädigung durch Dritte kommen könnte.

Im Bereich der Landeinbindung der Seedruckleitung im Obersee befinden sich Holzstege. Am Obersee wird keine öffentliche Schifffahrt betrieben. Die seeverlegte Abwasserdruckleitung im Obersee ist im Uferbereich gut sichtbar. Ein Beschädigen der Druckleitung könnte demnach nur durch größere Unachtsamkeiten während der Durchführung möglicher Stegbauarbeiten entstehen.

→ **Methoden zur Vermeidung von Schäden Dritter an Seedruckleitungen**

Durch Bauarbeiten (i.d.R. Stegbauarbeiten) hervorgerufene Schäden an unter und auf dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen sind vermeidbar. Im Bereich der Landeinbindung ist eine genaue Erfassung der lagemäßigen Position in einem Spartenplan notwendig.

Des Weiteren sollten Grundstücksbesitzer bzw. Pächter im Bereich der Landeinbindung zwingend über das Vorhandensein der Seedruckleitungen informiert werden – mit dem Hinweis auf besondere Vorsicht bei Bauarbeiten im Bereich der Leitungstrasse.

Da durch Bauarbeiten hervorgerufene Schäden meistens im Uferbereich und somit in geringerer Tiefe auftreten, können diese i.d.R. im Zuge eines Taucheinsatzes mit einfachen Sanierschellen behoben werden (siehe Kap. 14.1.6). Es bietet sich hierfür an, entsprechendes Werkzeug und entsprechende Sanierschellen vorrätig zu lagern und Taucheinsätze ggf. zu üben.



14.3.3 Gefahr von Beschädigungen durch hohen Außendruck

Wie bereits in Kap. 14.1.4 erläutert, erfahren seeverlegte Abwasserdruckleitungen gegenüber erdverlegten Abwasserdruckleitungen einen deutlich höheren Außendruck aufgrund des umliegenden Seewassers. Während unter dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen aufgrund der Wassersäule im Leitungsinnen am Leitungstiefpunkt einen hohen Innendruck erfahren, egalisiert sich der hohe Innendruck an vollgefüllten seeverlegten Abwasserdruckleitungen durch den umliegenden hydrostatischen Druck ab dem Punkt des Eintauchens in den See.

Durch den hohen hydrostatischen Außendruck ergibt sich jedoch im luftgefüllten Zustand die Gefahr, dass der Außendruck zu einer Überlastung des Rohrmaterials führt (Schadensbild: Deformation von PE-Rohr; siehe Kap. 13.1). Nach Aussagen von Rohrherstellern beziehen sich die Druckstufen von Druckrohren lediglich auf den Innendruck. Der Außendruck stellt somit nicht den üblichen Belastungsfall dar.

Im Folgenden wird die Gefahr von Beschädigungen durch einen hohen hydrostatischen Außendruck an bayerischen Seedruckleitungen bewertet.

- **Gefahr von Schäden durch hydrostatischen Außendruck am Chiemsee**

Bei den 13 Abwasserdruckleitungen im Chiemsee handelt es sich laut Unterlagen um PE-HD Rohre der Druckstufe PN6. Die Leitungen liegen in einer maximale Tiefe von 13 m bis 52 m. Da keine der im Chiemsee vorhandenen seeverlegten Druckleitungen mit Luft gespült wird, ist die Möglichkeit einer kompletten Leerung eines Leitungssastes gering einzustufen. Zwar kam es an einigen Seedruckleitungen durch den Eintrag ungewollter Luftanteile zum Aufschwimmen der Leitungen, jedoch werden diese Lufttaschen durch das kontinuierliche Einbringen von Abwasser „eingeschlossen“. Dadurch wird die Luft durch die darüberliegende Wassersäule ebenfalls komprimiert, wodurch ein Leitungsinndruck entsteht. Hinzu kommt, dass die aufgeschwommenen Leitungen geringere Tiefen (max. 41 m) aufweisen. Die PE-HD-Rohre der Druckstufe PN6 könnten somit ggf. resistent gegen den hydrostatischen Außendruck sein. Durch das geringe Risiko der kompletten Leerung eines Leitungssastes kann das Risiko von Schäden durch hydrostatischen Außendruck gering eingeschätzt werden.

- **Gefahr von Schäden durch hydrostatischen Außendruck am Starnberger See**

Im Starnberger See handelt es sich um eine seeverlegte Abwasserdruckleitung aus dem Material PE-HD (PN6, DN400). Die maximale Höhendifferenz zwischen Hoch- und Tiefpunkt der Leitung liegt bei ca. 43 m. An der seeverlegten Druckleitung ist kein Kompressor angeschlossen. Die Leitung wird regelmäßig mit See-



wasser gespült. Eine vollständige Leerung eines Leitungssastes kann somit weitestgehend ausgeschlossen werden, wodurch das Risiko für einen Schaden durch einen auftretenden hydrostatischen Außendruck ebenfalls als gering eingeschätzt werden kann.

- **Gefahr von Schäden durch hydrostatischen Außendruck am Königssee**

Die Abwasserdruckleitungen aus PE-HD der Druckstufe PN 16 im Königssee reichen bis in eine Tiefe von 100 m bzw. 190 m. An beiden Seedruckleitungen wurde eine Druckluftspülung und ein Be- und Entlüftungsventil verbaut.

Bei einer Durchspülung der 190 m tiefen Seedruckleitung St. Bartholomä-Königssee mit Druckluft könnte sich in Kombination mit dem im Pumpwerk vorhandenen Be- und Entlüftungsventil entspannte Luft im absteigenden Leitungssast bis in größere Tiefen (bei komplettem Freispülen max. 190 m mit Luft gefüllt) ansammeln. Somit kann im Extremfall theoretisch ein Außendruck von 19 bar auftreten. Es ist grundsätzlich denkbar, dass der Schaden an der Seedruckleitung St. Bartholomä-Königssee durch die Druckluftspülung entstand, da ein Leitungssast sich bis in große Tiefen entleerte und dadurch ein zu hoher Außendruck auftrat. Bei der geplanten Neuverlegung der Seedruckleitung St. Bartholomä-Königssee hat das Planungsbüro Dippold und Gerold daher Rohrmaterialien ausgeschrieben, welche explizit auch einem hohen auftretenden Außendruck standhalten, damit in Zukunft ohne Gefahr Druckluftspülungen an der neuen Seedruckleitung durchgeführt werden können.

Die Seedruckleitung Sallet-St.Bartholomä befindet sich in einer geringeren Tiefe von 100 m. Auch hier ist das Durchspülen der Leitung mit Druckluft vorgesehen. Im Gegensatz zur Druckleitung St.Bartholomä-Königssee können im Extremfall maximale Außendrucke von 10 bar auftreten. Die Leitung weist die Druckstufe PN 16 auf.

- **Gefahr von Schäden durch hydrostatischen Außendruck am Obersee am Königssee**

Die Seedruckleitung im Obersee am Königssee aus PE-HD der Druckstufe PN16 besitzt aufgrund ihrer großzügigen Dimensionierung der Druckstufe kein erhöhtes Risiko für Schäden durch den hydrostatischen Außendruck. Die Abwasserdruckleitung wird jährlich mit Druckluft freigespült und über den Winter außer Betrieb genommen. Zwar liegt kein Längsschnitt des Leitungsverlaufs vor, jedoch besitzt der Obersee eine maximale Tiefe von 51 m. Der maximale hydrostatische Außendruck liegt im leeren Zustand der Druckleitung demnach mit maximal 5,1 bar weit unter dem Nenndruck des Rohrmaterials, sodass das Risiko von Schäden bei einer Leerung der Leitung gering einschätzen kann.



→ **Reduzierung der Gefahr von Schäden durch einen hohen hydrostatischen Außendruck an Seedruckleitungen**

Die Gefahr von Schäden durch einen hohen hydrostatischen Außendruck muss im Zuge der Planungsphase zwingend berücksichtigt werden. Insbesondere Leitungen, welche in tieferen Gewässern verlegt werden und mit Druckluft gespült werden sollen, verdienen besondere Beachtung. Durch vorrausschauende Planung und den Einsatz spezieller Rohrsysteme, welche auch hohen Außendrücken standhalten, kann das Risiko minimiert werden.

Da der hohe Außendruck bei einer Druckluftspülung eine mögliche Ursache des Schadens an der Seedruckleitung St.Bartholomä-Königssee darstellt, sollte die bestehende Abwasserdruckleitung Sallet-St.Bartholomä ebenfalls auf Dichtheit überprüft werden. Die Hochschule Augsburg steht diesbezüglich in engem Kontakt mit dem Ingenieurbüro Dippold und Gerold.

14.3.4 Gefahr von Schäden durch zunehmende Alterung seeverlegter Druckrohre

Sämtliche seeverlegte Abwasserdruckleitungen in Bayern bestehen aus dem Material PE-HD. Die Schadensbilder von Polyethylen-Rohren wurden bereits in Kap. 13.1 beschrieben. Von den beiden Schadensfällen am Chiemsee und am Königssee liegen keine Informationen und Bildaufnahmen zum genauen Schadensbild vor.

Eine zentrale Eigenschaft von PE-Rohren ist das Alterungsverhalten unter stetigem Innendruck. Dieses kann über das Zeitstand-Innendruckverhalten dargestellt werden. Das Zeitstand-Innendruckverhalten wird in langandauernden Prüfungen nach DIN EN ISO 1167-1, ISO 17457 bzw. DIN EN ISO 9080 ermittelt. Dabei werden Prüfungen an unter Innendruck stehenden Prüfkörpern (Rohrabschnitte) durchgeführt um den Einfluss einer mehrachsigen Dehnung zu erfassen. Als Ergebnis der Versuche kann das Zeitstandverhalten in einer logarithmisch skalierten Kurve dargestellt werden. (Kunststoffrohrverband, 2022)

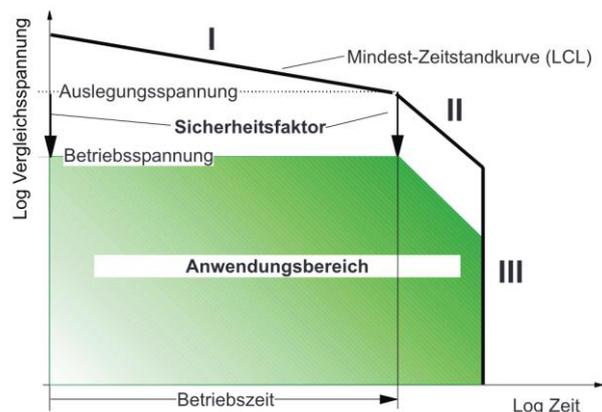


Abbildung 96: Schematische Darstellung des Zeitstandverhaltens von Polyethylen-Rohren (I: Verformungsbrüche, II: Spannungsrisse, III: Wärmealterung), (Hessel, 2007)

Das Zeitstandverhalten von PE-Rohren lässt sich nach (Hessel, 2007) mit dem Schema aus Abbildung 96 qualitativ darstellen. Die technische Nutzungsdauer wird dabei in drei Bereiche eingeteilt:

Bereich 1: Im flachen Ast beobachtet man dabei Duktilbrüche bzw. Zähbrüche. Durch den Ast wird somit die Grenzspannung des duktilen Versagens markiert. (Kunststoffrohrverband, 2022)

Bereich 2: Die Lage der steilen Kurve ist für die Langzeiteigenschaften des Rohrwerkstoffs entscheidend. Diese wird bestimmt durch den Widerstand, den das Material einer langsamen Rissfortpflanzung entgegensetzt, bestimmt. Man bezeichnet diese Werkstoffeigenschaft auch als Spannungsrisswiderstand. Der Knickpunkt, also der Übergang von der flachen Kurve zur steilen Kurve bestimmt somit



die Lebensdauer eines Rohrwerkstoffs und kann, wenn überhaupt, nur bei hohen Temperaturen und sehr langen Standzeiten beobachtet werden. (Kunststoffrohrverband, 2022)

Bereich 3: Die Begrenzung der maximalen theoretischen Einsatzdauer von PE-Rohre wird in Bereich III durch die Wärmealterung begrenzt. Mit Beginn der Wärmealterung kommt es zu einer Versprödung des Polyethylens und einer Abnahme der Widerstandsfähigkeit gegen Zugbelastungen. (Pressl, et al., 2015)

Je kühler die Umgebungstemperatur und das transportierte Medium ist, desto geringer ist die Wärmealterung. Am Seegrund verlegte Druckleitungen besitzen in größerer Tiefe (Lage im Hypolimnion oder Monimolimnion) den Vorteil, dass die Umgebungstemperatur mit 4 bis 5°C gering ausfällt und über das Jahr gesehen kaum Temperaturschwankungen auftreten. Somit stellt die Verlegetiefe im See bei Seedruckleitungen einen positiven Nebeneffekt dar, da die Temperaturen am Seegrund geringer ausfallen. (Pressl, et al., 2015)

Außerdem lässt sich der Literatur nach (Pressl, et al., 2015) und (Hessel, 2007) entnehmen, dass die tatsächliche Lebensdauer von Polyethylen-Druckrohren höher liegt als die früher angenommene Lebensdauer von 50 Jahren. Die Annahme einer Lebensdauer von etwa 100 Jahren erscheint nach (Hessel, 2007) bei seeverlegten Abwasserdruckleitungen für die ab Ende der 1980er Jahre eingeführten Polyethylen-Generationen PE 80 und PE 100 auf Grundlage verschiedener Berechnungen möglich.

Die Bauarbeiten der Leitungen im Königssee wurden Ende 1988 fertiggestellt. Die Neuverlegung der beschädigten Leitung St. Bartholomä-Königssee ist für dieses Jahr (2022) geplant. Die seeverlegten Abwasserdruckleitungen im Chiemsee wurden ebenfalls Ende der 1980er Jahre in Betrieb eingeschwommen. Die seeverlegte Abwasserdruckleitung im Starnberger See wurde im Jahr 1996 verlegt. Die neueste Leitung im Obersee am Königssee wurde Ende letzten Jahres (2021) fertig gestellt.

Die ältesten seeverlegten Abwasserdruckleitungen in Bayern befinden sich im Chiemsee (ca. 35 Jahre alt) und Königssee (34 Jahre alt) und schreiten somit auf die bisher angenommene Lebensdauer von 50 Jahren zu. Aus den bereitgestellten Unterlagen geht lediglich hervor, dass es sich bei dem verlegten Rohrmaterial in beiden Seen um PE-HD handelt. Jedoch ist nicht klar ersichtlich, ob es sich bei den Leitungen schon um die Ende der 1980er Jahre eingeführten Polyethylen-Generationen PE 80 und PE 100 handelt. Aus diesem Grund empfiehlt es sich für Netzbetreiber mit vor 1990 verlegten Abwasserdruckleitungen, die vorhandenen Bestandsunterlagen zu sichten, um Klarheit bezüglich des Rohrmaterials zu gewinnen. Insbesondere für Leitungen aus PE 80 bzw. PE 100 kann nach (Pressl, et



al., 2015) und (Hessel, 2007) angenommen werden, dass die tatsächliche Lebensdauer deutlich über den früher angenommenen 50 Jahren liegt.

Durch örtliche Randbedingungen wie UV-Strahlung, Temperatur, chemische Zusammensetzung des Wassers, Spannungen sowie Schäden und Verformungen (beispielsweise durch unbemerkte Bewegungen bzw. Aufschwimmen der Leitung) kann die Lebensdauer jedoch auch deutlich verkürzt sein. Eine konkrete Ausweisung der verbleibenden Lebensdauer von in Betrieb befindlichen Seedruckleitungen ist daher nicht pauschal möglich. Durch den Netzbetreiber am Chiemsee wurden durch eine Fachfirma Untersuchungen zur voraussichtlichen Lebensdauer der verbauten Druckleitungen angestellt. Diese konnte jedoch auch unter Zuhilfenahme einer Materialprobe nicht festgestellt werden. Es konnte lediglich der aktuelle Zustand des Rohrs festgestellt werden. Daher ist der regelmäßige Nachweis der Dichtheit sinnvoll (siehe Kap. 14.3.6).



14.3.5 Auswirkungen von Schäden und Betriebsproblemen an Seedruckleitungen

Die in den vorangegangenen Kapiteln aufgeführten Faktoren können zu Beschädigungen und Leckagen an der Rohrleitung führen. Durch die Leckage kann das Abwasser direkt in ein stehendes Gewässer gelangen, das u.U. als Biotop, Badegewässer, zum Vorhalt von Trinkwasser oder zu Erholungszecken genutzt wird. Im Folgenden werden die Auswirkungen von Schäden und Betriebsproblemen an seeverlegten Abwasserdruckleitungen auf verschiedene Faktoren erläutert.

Auswirkungen durch das Aufschwimmen von Seedruckleitungen:

Beim unkontrollierten Aufschwimmen einer Seedruckleitung kann eine starke Krümmung entstehen, welche das Rohrmaterial enorm beansprucht und sogar zu einer starken Ovalität des Rohres führen kann (siehe Kap. 14.1.3). Die enorme Beanspruchung des Rohres kann zu Schäden an der Leitung führen.

Hinzu kommt, dass eine aufgeschwommene Seedruckleitung nicht zwingend komplett an der Seeoberfläche sichtbar treiben muss. Wird die Seedruckleitung durch die Schifffahrt übersehen, kann das Queren der Leitung ebenfalls zu einem Schaden an der Abwasserdruckleitung führen (z.B. durch Schiffsschraube) bzw. an Booten und Schiffen.

Neben einem möglichen Schaden an der Abwasserdruckleitung hat das Aufschwimmen weitere Auswirkungen. So ergeben sich beispielsweise Probleme für die Schifffahrt. Wird das Aufschwimmen einer Seedruckleitung festgestellt, sollte der See im Aufschwimmbereich für die öffentliche und private Schifffahrt gesperrt werden, bis das Problem behoben ist. So können ggf. Schäden vermieden werden.

Am Starnberger See würde ein Aufschwimmen der Seedruckleitungen ggf. dazu führen, dass der Landesteg Tutzing der öffentlichen Schifffahrt gesperrt werden müsste, da dieser von der Seedruckleitung eingeschlossen ist.

Ähnlich verhält es sich mit den Anlegestellen am Chiemsee. Neben der privaten Schifffahrt wäre auch der Betrieb der öffentlichen Schifffahrt nur eingeschränkt möglich. Die meisten öffentlichen Anlegestellen (Herreninsel, Prien, Bernau, Gstadt, Seebruck) befinden sich direkt im Bereich der seeverlegten Abwasserdruckleitungen, bzw. werden von diesen eingeschlossen. Beim Aufschwimmen einer Leitung können die entsprechenden Anlegestellen demnach nicht angefahren werden.

Das Aufschwimmen der Leitung nimmt somit auch Einfluss auf den Tourismus, da die öffentliche Schifffahrt (hauptsächlich für touristische Zwecke genutzt) ausfallen



könnte. Darüber hinaus würde ein Aufschwimmen eine Verschlechterung des optischen Erscheinungsbildes sowie ggf. negative Pressestimmen zur Folge haben.

Auswirkungen durch den unbemerkten Abwasseraustritt aus Seedruckleitungen:

In Kap. 14.3.1 bis 14.3.4 wurden Betriebsprobleme und Schadensursachen genannt, welche zu einem unkontrollierten und unbemerkten Abwasseraustritt führen können. Für kommunale Abwässer sind insbesondere die Parameter Phosphor, Stickstoff und pathogene Keime zu nennen. Eine Abschätzung der Auswirkungen ist nur im Einzelfall möglich, wenn eine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist. Im Folgenden werden mögliche Auswirkungen eines unbemerkten Abwasseraustritts an seeverlegten Abwasserdruckleitungen erläutert.

Im März 2006 trat die novellierte EU-Badegewässer-Richtlinie in Kraft. Nach dieser wird die Qualität von Badeseen über die regelmäßige Überprüfung zweier Indikatorparameter bewertet. Für Binnengewässer dient die Konzentration von E. Coli und Intestinale Enterokokken als Indikator für Verunreinigungen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Grenzwerte für Binnengewässer nach neuer EU-Badegewässer-Richtlinie.

Tabelle 28: Grenzwerte für Binnengewässer nach EU-Badegewässerrichtlinie (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2016)

Parameter	Ausgezeichnete Qualität	Gute Qualität	Ausreichende Qualität
1 Intestinale Enterokokken (KbE/100 Milliliter)	200*	400*	330**
2 Escherichia coli (KbE/100 Milliliter)	500*	1000*	900**

KbE = Koloniebildende Einheiten der Mikroorganismen
 * Auf der Grundlage einer 95-Perzentil-Bewertung.
 ** Auf der Grundlage einer 90-Perzentil-Bewertung.

Durch den Austritt von Abwasser an Seedruckleitungen, kann sich die Qualität von Badeseen nach Tabelle 28 ggf. verschlechtern. Dies kann sogar zu einem Verlust der Badewasserqualität führen.

Neben der Auswirkung auf die zur Bewertung des Badegewässers untersuchten Parameter kann der direkte Austritt von Abwasser noch weitere Veränderungen im Nährstoffhaushalt des Ökosystems See mit sich bringen. So kann beispielsweise auch die dadurch verursachte Erhöhung des Phosphorgehalts in Oberflächengewässern zu einer erhöhten Algenproduktion führen, welche bei entsprechenden



Umweltbedingungen schließlich die Eutrophierung nach sich ziehen kann. (Pressl, et al., 2015)

Der Grad der Verschlechterung der Wasserqualität hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Beispielsweise nehmen Dauer und Ort des Abwasseraustritts, die Menge des ausgetretenen Abwassers, sowie die Eigenschaften des Gewässers (Größe des Sees, Seetiefe, Wasserzirkulation, Wassererneuerungszeit, ...) erheblichen Einfluss auf die Nährstoffänderungen.

Eine Verschlechterung der Wasserqualität würde außerdem negative Auswirkungen auf den Tourismus mit sich bringen. Der Chiemsee und Starnberger See besitzt viele Badestellen, welche für Urlauber besonders attraktiv sind. Der Königssee und Obersee wird hinsichtlich der extrem hohen Wasserqualität beworben. Negative Schlagzeilen könnten das Ansehen beschädigen. Der Verlust der Badewasserqualität in Bereichen der genannten hätte somit auch eine wirtschaftliche Komponente.

Des Weiteren beeinträchtigt der Abwassereintrag ggf. schutzbedürftige Gebiete in Uferbereichen oder gar im Seebereich. In den Uferbereichen sämtlicher bayerischen Seen mit seeverlegten Abwasserdruckleitungen befinden sich in unmittelbarer Nähe zur Leitungstrasse Biotope. Diese würden durch den Eintrag von Abwasser ebenfalls erheblich beeinträchtigt werden. Des Weiteren befinden sich bei den seeverlegten Abwasserdruckleitungen teilweise eingetragene Naturschutzgebiete. Am Chiemsee betrifft dies beispielsweise die Mündung der Tiroler Achen. Dieses Naturschutzgebiet wird zwar nicht unmittelbar von einer seeverlegten Abwasserdruckleitung gequert, jedoch befindet sich die südliche Landeinbindung der Seedruckleitung bei Unterhochstätt nur etwa 1 km von dem Naturschutzgebiet entfernt. Am Starnberger See befindet sich die südliche Landeinbindung der Seedruckleitung bei Tutzing etwa 1 km vom Naturschutzgebiet „Karpfenwinkel mit Streuwiesen am Starnberger See“ entfernt. Somit könnte bei entsprechenden Strömungen durchaus Abwasser aus einer Schadstelle der nahegelegenen Abwasserdruckleitung in die Naturschutzgebiete eingetragen werden. Sowohl der Königssee als auch der Obersee befinden sich nahezu komplett im Nationalpark Berchtesgaden. Darüber hinaus sind beide Seen als Biotope kartiert.

Bei einem Austritt von Abwasser durch eine Schadstelle an einer Seedruckleitung könnten – je nach Schaden - auch Feststoffe austreten, die auch eine optische Beeinträchtigung verursachen können.



Auswirkungen von Schäden bzw. Betriebsproblemen für den Betrieb der Seedruckleitungen:

Kommt es zu einem Schaden oder einem ungewollten Aufschwimmen einer seeverlegten Druckleitung muss diese schnellstmöglich außer Betrieb genommen werden. Dadurch wird auch der Betrieb des Kanalnetzes und die Abwasserentsorgung im Einzugsgebiet ganz erheblich beeinträchtigt. Keine der bayerischen Seedruckleitungen stellt einen Teil eines komplett geschlossenen Ringkanals dar. Am Starnberger See und am Chiemsee liegen vielmehr zwei Spangen vor, über die das Abwasser nur in eine Richtung zur Kläranlage gefördert werden kann. Bei einem Ringkanal wäre es grundsätzlich denkbar, im Schadensfall den Ringkanal ab der schadhaften Stelle über zwei Spangen zur Kläranlage fördern. Die meist unterschiedlichen Leitungsquerschnitte stellen hier jedoch eine weitere Schwierigkeit dar. Die Überbrückung der schadhaften Leitung mittels alternativer Abwassertransporte (siehe Kap. 12) wäre dadurch ggf. vermeidbar. Da jedoch keine der seeverlegten Abwasserdruckleitungen Teil einer geschlossenen Ringleitung darstellen, muss der Abwassertransport über die Länge der betroffenen Haltung(en) alternativ überbrückt werden. Entsprechende Alternativen sind in Kap. 12 aufgeführt.

Im folgenden Kapitel werden nochmals explizite Hinweise auf mögliche Instandhaltungsmaßnahmen und Havariekonzepte zur Reduzierung des Risikopotentials durch Schäden an seeverlegten Abwasserdruckleitungen gegeben.



14.3.6 Instandhaltungsmaßnahmen und Havariekonzepte zur Reduzierung des Risikopotentials von Seedruckleitungen

Die in den vorangegangenen Ursachen von Schäden an seeverlegten Abwasserdruckleitungen können nicht immer vermieden werden. Im Folgenden werden zunächst Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos von Schäden an Seedruckleitungen zusammengefasst.

Die folgenden Maßnahmen können im Betrieb von Seedruckleitungen regelmäßig durchgeführt werden, um das Risiko des unkontrollierten **Aufschwimmens und dadurch auftretende Schäden** zu reduzieren (siehe Kap. 14.3.1). Die Intervalle einzelner Maßnahmen sind leitungsspezifisch in Abhängigkeit des Gefährdungspotentials festzulegen.

- Regelmäßiges, intensives Spülen bei höchstmöglicher Fließgeschwindigkeit (ggf. mit Seewasser)
- Nachrüsten von Be- und Entlüftungsventilen an geeigneter Stelle
- Vermeidung des ungewollten Lufteintrags (siehe auch Kap. 11.3.1)
- In der Planung: Vermeidung langer flacher Abschnitte und lokaler Hochpunkte sowie ausreichende Ballastierung der Seedruckleitung
- Regelmäßige, lagemäßige Überprüfung der Seedruckleitung und Ballastierung (z.B. mittels Side-Scan-Verfahren → Lageänderungen geben Hinweis auf mögliche Luftanteile in Seedruckleitung)
- Ggf. nachträgliche Ballastierung (z.B. mittels Trockenbetonsäcken)

Um das Risiko von **Beschädigungen durch Dritte** (siehe Kap.14.3.2) zu reduzieren, ist die exakte Dokumentation der Lage der Abwasserdruckleitungen in Spartenplänen erforderlich. Darüber hinaus sollte die private und öffentliche Schifffahrt bzw. Grundstückseigner im Bereich von Seedruckleitungen zu besonderer Vorsicht bei Baumaßnahmen animiert und entsprechende Planunterlagen (v.a. Spartenpläne) zur Verfügung gestellt werden.

Die Gefahr von **Beschädigungen durch zu hohen Außendruck** (siehe Kap. 14.3.3) muss grundsätzlich bereits in der Planungsphase durch die ausreichende Dimensionierung der Druckstufe und Prüfung der Eignung von Druckluftspülungen berücksichtigt werden. Auf den **Alterungsprozess des Rohrmaterials** (siehe Kap. 14.3.4) kann wenig Einfluss genommen werden. Jedoch kann überprüft werden, ob es sich bei dem verlegten Rohrmaterial bereits um die ab Ende der 1980er Jahre verwendeten PE-Generationen PE80 bzw. PE100 handelt, da an diesen ggf. von längeren Lebensdauern ausgegangen werden kann.



Um die **Auswirkungen** möglicher Leckagen an Seedruckleitungen möglichst gering zu halten, empfiehlt es sich den Leitungszustand kontinuierlich, bzw. in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. Dadurch können potentielle Schäden an seeverlegten Abwasserdruckleitungen frühzeitig entdeckt und behoben werden, so dass der Zeitraum eines potentiellen Abwasseraustritts minimiert wird.

Dabei empfiehlt sich insbesondere den in Kap. 13.3 bzw. 14.1.5 beschriebenen 5-Stufenplan nach (Pressl, et al., 2015) anzuwenden:

- Möglichst kontinuierliche Auswertung der Pumpendaten
- Möglichst kontinuierliche Auswertung der Druckmessung
- Möglichst kontinuierliche Auswertung der Messdaten des Durchflusses
- Regelmäßige Durchführung von Druckprüfungen zur Zustandsbewertung der Druckleitung (HSA-Normalverfahren und 20-Min Test, siehe Kap.14.4)
- Ggf. regelmäßige Durchführung der optischen Rohrinnspektion (Verfahren in Abbildung 74 aufgeführt)

Eine ausführliche Beschreibung des 5-Stufenplans befindet sich in Anhang 26. Bedingt durch die geringe Anzahl an Seedruckleitungen in Bayern liegen nur wenige Erfahrungen vor (siehe Kap. 14.2). Das Thema wird auch in der Literatur kaum besprochen, da die Anzahl dieser sehr speziellen Leitungen gering ist. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten keine Gründe festgestellt werden, die gegen den Einsatz des 5-Stufenplans auch in Bayern sprechen.

Durch die kontinuierliche Auswertung der Pumpendaten sowie Druck- und Durchflussmessungen können Abweichungen vom „regulären“ Zustand schnellstmöglich festgestellt werden. Diese Abweichungen können je nach Lage der Messeinrichtung bereits Hinweise auf mögliche Leckagen liefern. Sind entsprechende Messeinrichtungen nicht verbaut, könnte das Nachrüsten diskutiert werden. Bei Abweichungen kann der vermutete Schadensfall ggf. durch Druckprüfungen (siehe Kap. 14.4.3) oder durch optische Rohrinspektionen (siehe Kap. 14.1.5) überprüft werden. Darüber hinaus empfiehlt es sich (sofern keine entsprechenden Messeinrichtungen vorhanden), die ankommende Abwassermenge am Auswurfschacht regelmäßig zu kontrollieren. Tritt dort kein Abwasser bzw. eine viel zu geringe Abwassermenge aus, kann dies auf das Vorhandensein einer Leckage hinweisen.

Um kleinere Schäden in geringerer Tiefe mit Sanierschellen schnellstmöglich beheben zu können, empfiehlt es sich außerdem entsprechende Taucheinsätze ggf. im Vorfeld einzustudieren. Außerdem sollte das dafür benötigte Werkzeug, bzw. die benötigten Sanierschellen vorrätig gelagert werden.

Weitere Methoden zur Zustandserfassung seeverlegter und unter dem Seegrund verlegter Abwasserdruckleitungen werden in Kap. 14.1.5 und Kap. 13.3 beschrieben.



Neben den oben genannten Überwachungsstrategien empfiehlt es sich insbesondere an Seedruckleitungen einen schlüssigen Ablaufprozess nach Kap. 12 bzw. Anhang 27 zu entwickeln. Dadurch wird das Vorgehen bei möglichen Schäden bereits im Vorfeld geplant und strukturiert, wodurch ein schnelles Handeln ermöglicht wird. Die Auswirkungen auf die Umwelt werden durch schnelles Handeln ggf. reduziert.

Ein wichtiger Punkt im Ablaufprozess stellt die alternative Abwasserbeseitigung dar. Einige alternativen Methoden zur Abwasserbeseitigung werden bereits in Kapitel 12 erläutert. Neben den dort aufgeführten Methoden kann nach (Pressl, et al., 2015) an Seedruckleitungen auch eine vorübergehende Einleitung in den See diskutiert werden. Die Methode der provisorischen Einleitung in den See von lediglich mechanisch gereinigtem Abwasser wird nur in äußersten Ausnahmefällen genehmigt. Im Hinblick auf die bayerischen Seedruckleitungen sollte die Methode der vorübergehenden Einleitung in den See unbedingt vermieden werden. Die Erarbeitung von Havariekonzepten bzw. Ablaufprozessen im Schadensfall erscheint jedoch äußerst wichtig; ggfs. kann unter besonderen Umständen die Ableitung ins Gewässer für absolute Notfälle mit den entsprechenden Behörden diskutiert werden.

Einen wichtigen Punkt in der präventiven Überwachung von Seedruckleitungen stellen die Druckprüfungen dar. Inwiefern das HSA-Normalverfahren bzw. der 20-Min Test an Seedruckleitungen angewandt werden kann, wird im folgenden Kapitel genauer erläutert.



14.4 Dichtheitsprüfungen an seeverlegten Abwasserdruckleitungen

Bezüglich der Dichtheitsprüfungen an seeverlegten Abwasserdruckleitungen gelten grundsätzlich die Regelungen, welche in der Verordnung zur Eigenüberwachung von Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen (Eigenüberwachungsverordnung – EÜV) festgeschrieben sind. Demnach müssen auch seeverlegte Abwasserdruckleitung im Betrieb auf Dichtheit geprüft werden.

Auch hier besteht das Problem, dass bisher noch kein normiertes Verfahren explizit für die Überprüfung von Seedruckleitungen im Betrieb existiert. Hinzu kommt, dass seeverlegte Druckleitungen aufgrund ihrer besonderen Bauart mit größerer Vorsicht behandelt werden müssen.

14.4.1 Dichtheitsprüfungen an seeverlegten Druckleitungen durch die Betreiber

Bezüglich einer wiederkehrenden Dichtheitsprüfung an seeverlegten Abwasserdruckleitungen bestehen in Bayern bisher keine expliziten Vorgaben. In der Vergangenheit wurden in Bayern lediglich Versuche von Dichtheitsprüfungen unternommen. Beispielsweise hat der Abwasserverband Starnberger See in der Vergangenheit bereits Druckprüfungen bei einem Prüfdruck von 2,0 bar durchgeführt. Genauere Informationen über den Ablauf der Prüfung liegen nicht vor. Laut mündlicher Aussage der Netzbetreiber wurde in der Druckprüfung der Druckverlauf über einen bestimmten Zeitraum beobachtet. Von den anderen bayerischen Betreibern von Seedruckleitungen sind keine Dichtheitsprüfungen nach der Abnahmeprüfung bekannt.

Im Folgenden wird erörtert, inwiefern die im Zuge des Forschungsvorhabens entwickelten Prüfverfahren auch an seeverlegten Abwasserdruckleitungen angewendet werden können.

14.4.2 Prüfdruck des HSA-Normalverfahrens für Prüfungen an in Betrieb befindlichen seeverlegten Abwasserdruckleitungen

Die Wahl des Prüfdrucks stellt aus Sicht des Netzbetreibers einen kritischen Punkt der Dichtheitsprüfung dar, da durch den zusätzlich aufgebrauchten Druck Schäden an der Leitung befürchtet werden.

Wie in Kapitel 3.3.6 beschrieben, wird der Prüfdruck im HSA-Normalverfahren i.d.R. am Tiefpunkt der Leitung gemessen und angegeben. Ein Prüfen ist jedoch an jedem Ort der Druckleitung möglich.



Im HSA-Normalverfahren muss der Prüfdruck immer größer als der Betriebsdruck ausfallen. Um den Einfluss der Luft zu begrenzen, ist für alle Leitungen ein Mindestüberdruck von 1 bar an der höchsten Erhebung (absoluter Hochpunkt) der Druckleitung einzuhalten. Des Weiteren wird für Abwasserdruckleitungen ein Mindestprüfdruck von 3,0 bar am absoluten Tiefpunkt der Leitung vorgesehen.

Bei seeverlegten Druckleitungen bleibt die Differenz zwischen Rohraußen- und Innendruck durch das umliegende Seewasser ab dem Eintauchpunkt in den See gleich (siehe Kap. 14.1.4). Der Außendruck nimmt mit zunehmender Tiefe durch das Seewasser in gleichem Maße zu wie der Innendruck durch das anstehende Abwasser. Somit wird das Rohr einer Seedruckleitung in gefülltem Zustand einer geringeren Beanspruchung ausgesetzt als entsprechende landbasierte Abwasserdruckleitungen, da der hydrostatische Innendruck durch den Außendruck bei Seedruckleitungen weitgehend egalisiert wird. Dieser Effekt trifft jedoch nicht auf Leitungen zu, welche unter dem Seegrund verlegt sind (z.B. Großer Alpsee).

Aufgrund des erhöhten Schadenpotentials kann bei seeverlegten Druckleitungen das Kriterium von 3 bar am Tiefpunkt der Leitung vernachlässigt werden. Jedoch muss der Einfluss der Luft durch einen Mindestdruck von 1,0 bar am absoluten Hochpunkt eingehalten werden. Da bei Seedruckleitungen der Start- und/oder Endpunkt i.d.R. den absoluten Hochpunkt der Leitung darstellen, ist hier entsprechend nur 1 bar Prüfdruck aufzubringen. Des Weiteren darf der Betriebsdruck nicht unterschritten werden.

Für Druckleitungen, welche unter dem Seegrund verlegt wurden, gilt der Prüfdruck entsprechend der Regelungen aus Kapitel 3.3.6.

Durch die Anpassung des Prüfdrucks wird somit gewährleistet, dass bei einer Druckprüfung innerhalb der seeverlegten Druckleitungen i.d.R. lediglich eine Druckdifferenz von maximal 1,2 bar (Vorprüfung) vorliegt, sofern der Betriebsdruck nicht höher ist. Somit ist aufgrund einer ordnungsgemäßen Durchführung des HSA-Normalverfahrens i.d.R. nicht mit Schäden zu rechnen.

Aufgrund des Risikopotentials an seeverlegten Druckleitungen wird empfohlen, vor der Durchführung von Druckprüfungen das Havariekonzept auf Aktualität zu prüfen. Des Weiteren sollen die im Havariekonzept empfohlenen Maßnahmen unmittelbar umsetzbar sein, sollte eine Leckage festgestellt werden.



14.4.3 Durchführung des HSA-Normalverfahrens an seeverlegten Druckleitungen in Bayern

Für die Durchführung des HSA-Normalverfahrens kann an seeverlegten Druckleitungen bis auf die Anpassung des Prüfdrucks nach Kapitel 14.4.2 der normale Ablauf übernommen werden. Die Durchführung kann somit grundsätzlich analog der Beschreibung in Kapitel 3.3.7 erfolgen, wenn dies nicht durch besondere Randbedingungen eingeschränkt wird.

Eine kostenlose Durchführung von Dichtheitsprüfungen wurde den betreffenden bayerischen Netzbetreibern angeboten. Die Netzbetreiber von Seedruckleitungen stehen dem grundsätzlich offen gegenüber, jedoch lassen die baulichen Gegebenheiten eine Druckprüfung oftmals nicht zu. Durch Bereitstellen einer alternativen Abwasserbeseitigung während der Prüfung und Umbaumaßnahmen an den Seedruckleitungen hätte die Durchführung von Druckprüfungen ermöglicht werden können. Jedoch führte auch das Thema möglicher Schäden durch die Druckprüfung und der erwartete Aufwand zu einer gewissen Zurückhaltung der Netzbetreiber.

So konnte nur eine Druckprüfung nach HSA-Normalverfahren zum Projektende am Königssee anberaumt werden. Jedoch konnte, wie in Kapitel 14.2.3.2 beschrieben, kein Prüfdruck aufgebracht werden, wodurch eine Durchführung des HSA-Normalverfahrens nicht möglich war. Es liegen daher keine Praxiserfahrungen zur Anwendung des HSA-Normalverfahrens bei Seedruckleitungen vor.

Die HSA konnte jedoch Druckprüfungen an Druckleitungen durchführen, welche unter einer Gewässersohle verlaufen. Dabei konnte am großen Alpsee, am Forgensee, in der Fuchssiedlung (Wertachdüker), Großwallstadt (Maindüker) sowie in Obermarbach das HSA-Normalverfahren durchgeführt werden. Es wurden keine Probleme mit dem Umgang des Prüfverfahrens an Dükerleitungen sowie unter dem Seegrund verlegten Druckleitungen festgestellt.

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass Seedruckleitungen grundsätzlich mit Hilfe des HSA-Normalverfahrens geprüft werden können. Bei der Wahl des Prüfdrucks muss jedoch aufgrund des erhöhten Schadenpotentials das Kapitel 14.4.2 berücksichtigt werden.

Das HSA-Normalverfahren ist nicht für neuerlegte Seedruckleitungen geeignet (siehe Kap. 10).



14.4.4 Durchführung des 20-Min Tests an seeverlegten Druckleitungen

Zur Durchführung des 20-Min Tests an Seedruckleitungen liegen ebenfalls keine praktischen Erfahrungen vor. Aufgrund des erhöhten Schadenspotentials durch den potentiell direkten Austritt von Abwasser in ein (Bade-)Gewässer wird für die Durchführung von Druckprüfungen an in Betrieb befindlichen Seedruckleitungen grundsätzlich das HSA-Normalverfahren empfohlen.

Ist keine ausreichende Außerbetriebnahme für das HSA-Normalverfahren möglich, erscheint die Anwendung des 20-Min Test unter Anpassung des Prüfdrucks nach Kap. 14.4.2 grundsätzlich möglich. Es ist zu beachten, dass keine Praxiserfahrungen zur Durchführung des 20-Min Tests an seeverlegten Druckleitungen vorliegen.

15 Zusammenfassung

Abwasserdruckleitungen machen einen Anteil von rund 10% der bayerischen Schmutz-, Misch- und Regenwasserkanäle aus (Dr.-Ing. Johann Müller, 2021). Somit stellen Abwasserdruckleitungen einen erheblichen Bestandteil des bayerischen Entwässerungssystems dar. Der Kontakt zu Netzbetreibern hat auch gezeigt, dass Entwässerungssysteme mit ungünstigen topographischen Verhältnissen und hohem Zentralisierungsgrad der Abwasserreinigung mitunter eine Vielzahl von in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen aufweisen. Obwohl das Schadenspotential von Abwasserdruckleitungen bei Undichtigkeiten gegenüber Freispiegelleitungen höher einzustufen ist, gibt es bisher keine Prüfverfahren analog der Prüfungen für Freispiegelkanäle für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen.

Entsprechend wurden die meisten in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen nach der (Bau-)Abnahme nicht erneut geprüft, auch, da sich sehr viele Leitungen nach Inbetriebnahme in einem nicht prüfbaren Zustand befinden. Die Identifikation von Leitungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens geprüft werden konnten, nahm daher einen erheblichen Zeitaufwand in Anspruch. Pandemiebedingt kam es zu weiteren Erschwernissen bei der Prüfung von in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen. Die Durchführung von Druckprüfungen wäre ohne den oft auch finanziellen Einsatz und das Engagement der Netzbetreiber nicht möglich gewesen.

Es hat sich darüber hinaus weiter gezeigt, dass i.d.R. kaum Informationen über die in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen vorhanden sind. Es fehlen vielfach verlässliche Angaben zu Leitungsverlauf (Lage- und Höhenverlauf), Material, Durchmesser, Absperrmöglichkeiten am Leitungsende, Anschlussmöglichkeiten für das Prüfgerät, Angaben zu den eingesetzten Pumpen inkl. des Betriebsdrucks sowie zum Zustand und zur Funktionalität der ggfs. vorhandenen Absperrarmatur und Be-/Entlüftungsventilen. Einen entscheidenden Punkt, der meist einer Prüfung entgegensteht, ist vielfach die Verschlussbarkeit des Leitungsendes. Hierfür waren zur Durchführung der Druckprüfungen im Rahmen dieses Projekts vielfach sogar bauliche Maßnahmen erforderlich. Im Hinblick auch auf die neue EÜV besteht somit Handlungsbedarf bei vielen Netzbetreibern.

Es konnten dennoch insgesamt 135 Druckprüfungen nach dem HSA-Normalverfahren sowie 108 Druckprüfungen mit dem 20-Min Test an insgesamt 47, in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen durchgeführt werden. Es wurden systematische Prüfungen mit und ohne künstlichen Leckagen durchgeführt, sowie – wo möglich – mit zusätzlich künstlich eingebrachten Luftanteilen. Des Weiteren konnten auch vergleichende Untersuchungen mit unterschiedlichen Prüfdrücken an einzelnen Beispielleitungen durchgeführt werden. Dieses Vorgehen wurde jedoch oft



durch die Zustimmung der Netzbetreiber, sowie aufgrund der Druckstufe der verbauten Armaturen begrenzt. Es war im Zuge der Untersuchungen möglich, Prüfungen an Leitungen mit Außendurchmessern von 63 mm bis 500 mm sowie mit allen gängigen Leitungsmaterialien PE 80, PE 100, PVC, Gusseisen und Asbestzement durchzuführen. Neben den künstlich erzeugten Leckagen konnten im Zuge der Druckprüfungen an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen vereinzelt auch tatsächlich vorhandene Leckagen entdeckt werden. Zusätzlich wurde eine Vielzahl an Versuchsreihen an den Testleitungen an der HSA durchgeführt.

Eine Kurzbeschreibung der entwickelten Prüfverfahren findet sich in Kap. 15.1 und 15.2.

Im Laufe des Forschungsvorhabens hat sich gezeigt, dass im **HSA-Normalverfahren** bei Leitungen mit Innendurchmessern über 100 mm und insbesondere bei hohen hydrostatischen Drücken zunächst unerwartete Ergebnisse auftreten. So konnte die künstlich eingebaute Leckage auch bei Luftanteilen unter 2 % in Einzelfällen nicht zuverlässig erkannt werden. Um den Zusammenhang zwischen Druckabfall, Leitungsparameter und Luftanteil nachzuvollziehen, wurde das Verfahren einer theoretischen Betrachtung unterzogen.

Zunächst wurden die zulässigen Luftanteile pauschal auf 2 % des Leitungsvolumens begrenzt, um eine 1/10 Leckage noch sicher erkennen zu können. Die Berechnung der Luftanteile erfolgt über das Leitungsvolumen, wohingegen die Leckage auf die Mantelfläche bezogen wird. Aus diesem Grund nimmt mit steigendem Durchmesser das zulässige Luftvolumen im Verhältnis zur zulässigen Leckage exponentiell zu. Diese Diskrepanz aus zulässigem Luftvolumen und zulässiger Leckage führt bei großen Durchmessern zu den bei den Prüfungen aufgetretenen Problemen in der Hauptprüfung. Daher kann dieses Kriterium für große Leitungsdurchmesser (>80 mm Innendurchmesser) nicht aufrechterhalten werden. Die Leitungslänge spielt hierbei keine Rolle.

In Abstimmung mit dem LfU wurde der maximal zulässige Druckverlust daher so angepasst, dass dieser in Abhängigkeit der Leitungsparameter sowie des vorhandenen Luftanteils für jede Leitung individuell bestimmt wird. Bei einem Druckabfall in der Hauptprüfung unter 0,20 bar kann die Leitung auf Grundlage der festgelegten zulässigen Leckage als dicht betrachtet werden (Voraussetzung: erfolgreiche Druckabfallprüfung). Die Ermittlung des maximal zulässigen Luftanteils im Prüfabschnitt bestimmt sich auf Grundlage des Druckverlusts von 0,20 bar in Kombination mit der zulässigen Leckage und wird auf Grundlage theoretischer Formeln ermittelt.

Auf Grundlage dieser theoretischen Formeln konnte zusätzlich ein Simulationstool entwickelt werden, welches den Druckverlauf der Hauptprüfung im HSA-Normal-



verfahren simuliert und die leitungsspezifische, theoretisch maximal zulässige Luftmenge automatisch errechnet. Das Simulationstool bildet die Grundlage des für die Prüffirmen entwickelten Exceltools zur Bestimmung der Dichtheit nach dem HSA-Normalverfahren für Abwasserdruckleitungen. Es können bis zu fünf unterschiedliche Materialien/Querschnitte bei Druckentwässerungssystemen in einem Prüfabschnitt enthalten sein.

Mit Hilfe des Simulationstools konnte außerdem nachvollzogen werden, dass der hydrostatische Druck der Leitungen einen großen Einfluss auf die Hauptprüfung nimmt, da dieser maßgeblichen Einfluss auf die Kompression der Luft hat. In günstigen Fällen, also bei niedrigen hydrostatischen Drücken, ist die Luft bereits durch das Aufbringen des Prüfdrucks stark komprimiert, sodass die Detektion einer Leckage eher möglich ist, als es bei hohen hydrostatischen Drücken der Fall ist. Diese Aussage bedarf jedoch einer Einzelfallbetrachtung. Mittels der Simulation wird der maximal zulässige Druckabfall berechnet. Dies geschieht leitungsspezifisch unter Berücksichtigung des vorhandenen Luftanteils und wird mit Sicherheiten versehen. Wird dieser maximal zulässige Druckabfall in der Hauptprüfung nicht überschritten, kann die Druckleitung als dicht bewertet werden.

Mit dem Simulationstool konnte auch die ungünstigste Kombination der möglichen Randbedingungen untersucht werden. Dieser Worstcase tritt bei weichen Leitungsmaterialien und großen Leitungsdurchmessern in Kombination mit einer geringen Druckdifferenz zwischen hydrostatischem Druck und Prüfdruck auf. Für Leitungen mit großen Durchmessern und entsprechend großen transportierten Abwassermengen ist daher bei ungünstigen Randbedingungen eine Anpassung des zulässigen Leckagevolumens erforderlich: das Leckagevolumen ist dann auf das Leitungsvolumen (anstelle wie bisher auf die Mantelfläche) zu beziehen. Das angepasste Leckagevolumen liegt jedoch selbst bei sehr großen Durchmessern (DN 450) bei maximal der Hälfte der Leckage, die bei einem vergleichbaren Freispiegelkanal zulässig wäre.

Außerdem ist die Verwendung eines geringeren Prüfdrucks als 3 bar am Tiefpunkt des Prüfabschnitts zu vermeiden. Bei geringeren Prüfdrücken nehmen die Unsicherheiten durch den noch größeren Einfluss der Luft zu und Undichtigkeiten können nicht in allen Fällen sicher identifiziert werden. Bedingt durch die im Betrieb regelmäßig auftretenden Druckstöße (z.B. bei Pumpvorgängen) im Bereich von über 1 bar scheint es i.d.R. vertretbar, auch für Leitungen mit geringerem Betriebsdruck, den Prüfdruck von 3 bar anzusetzen.

Das HSA-Normalverfahren ist geeignet für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen. Neue Abwasserdruckleitungen sollten wie bisher nach den Normverfahren aus dem Trinkwasserbereich geprüft werden - mit den entsprechend höheren Drücken.



Aus den jetzt vorliegenden Ergebnissen wird deutlich, dass die Fortführung dieses Projektes erforderlich war, um das HSA-Normalverfahren zu einem allgemeingültigen Prüfverfahren weiterzuentwickeln. Durch die Auswertung einer aussagekräftigen Anzahl systematisch durchgeführter Druckprüfungen konnte eine theoretische Grundlage geschaffen werden. Diese ist eminent wichtig, um sämtliche Einflussfaktoren des Verfahrens identifizieren und berücksichtigen zu können und um das somit in der Praxis anwendbare Verfahren zu entwickeln.

Der entwickelte **20-Min Test** konnte an insgesamt 108 Prüfungen an in Betrieb befindlichen Leitungen überprüft werden. Im Gegensatz zum HSA-Normalverfahren handelt es sich um ein kürzeres und einfacheres Verfahren, der Informationsgewinn ist jedoch geringer. Des Weiteren kann ein Prüfabschnitt auf Grundlage des 20-Min Tests nur als dicht eingestuft werden, wenn ausreichend geringe Luftanteile in der Leitung vorliegen und keine große Materialdehnung zu erwarten ist, da diese beiden Faktoren das Prüfergebnis negativ beeinflussen. Daher sollte der 20-Min Test nur verwendet werden, wenn die Durchführung des HSA-Normalverfahrens nicht möglich ist. Durch das Nachpumpen eines definierten Volumens und der Beobachtung des Druckanstiegs können Luftanteile in der Leitung zwar nicht bestimmt werden, es ist jedoch ebenso nicht möglich, eine undichte Leitung fälschlicherweise als dicht zu bewerten.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Prüfergebnisse stimmten weitgehend mit den Erwartungen überein. Analog zum HSA-Normalverfahren zeigten sich jedoch auch hier zu Beginn des Forschungsprojekts Unstimmigkeiten bei größeren Durchmesser. Durch die Übernahme der Anpassung des zulässigen Leckage- bzw. Nachpumpvolumens können Leckagen auch an großen Durchmessern erfolgreich detektiert werden.

Die an der HSA vorhandene **Testleitung** aus dem gängigen Material PE 100 leistete einen wertvollen Beitrag, da systematische Prüfungen im Rahmen der Entwicklung des Simulationstools vergleichsweise einfach möglich waren. Dies betrifft insbesondere die Erkenntnisse zur Berechnung des Wasseraustritts aus der Leckage in Abhängigkeit des Drucks. Vergleichende Untersuchungen zum Dehnungs-/Kompressionsverhalten der Leitung konnten ebenfalls untersucht werden. Auch durch den **Prüfstand zur Untersuchung des Luftaustrags** in Druckleitungen konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden.

Hinsichtlich der **Seedruckleitungen** hat sich gezeigt, dass in Bayern nur in vier Seen auf dem Seegrund verlegte Abwasserdruckleitungen vorhanden sind. Von diesen 17 seeverlegten Abwasserdruckleitungen befinden sich 13 im Chiemsee. Die restlichen seeverlegten Druckleitungen befinden sich in Starnberger See,



Obersee und Königssee. Weitere Druckleitungen wurden unter dem Seegrund folgender Seen verlegt: Rottachsee, Forggensee und Großer Alpsee und sind daher als erdverlegte Druckleitungen zu bezeichnen.

Neben einer Bestandsaufnahme der Leitungseigenschaften bayerischer unter bzw. auf dem Seegrund verlegten Abwasserdruckleitungen wurden mögliche Betriebsprobleme und Risiken erörtert sowie Maßnahmen für die Betreiber entwickelt.

Im Rahmen des Projekts konnte keine erfolgreiche Prüfung an Seedruckleitungen durchgeführt werden. Der Versuch einer Druckprüfung, gegen Projektende im Königssee, scheiterte, da kein Druck auf die Leitung aufgebracht werden konnte. Maßnahmen zur Ursachenforschung wurden durch den Betreiber eingeleitet. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse scheint jedoch der Einsatz beider Prüfverfahren unter den für Seedruckleitungen relevanten Anpassungen grundsätzlich möglich.

Ein weiterer Punkt stellt die **Leckageortung und Sanierung** von schadhafte Abwasserdruckleitungen dar. In diesem Forschungsprojekt konnte eine Leckagedetektion mittels des Smart Ball-Verfahrens der Firma Xylem Water Solutions GmbH bzw. eine Kamerabefahrung an einer schadhafte Abwasserdruckleitung begleitet werden. Es wurde eine Zusammenstellung für den Umgang mit schadhafte Abwasserdruckleitungen erarbeitet, welcher den Netzbetreibern Möglichkeiten zur Leckageortung und Sanierung aufzeigt.

Es liegen bisher kaum Erfahrungen zu Sanierungsverfahren an Druckleitungen vor. Diese beschränken sich üblicherweise auf den Einsatz von Sanierschellen, da zumeist nur einzelne Schäden aufgetreten sind. Durch die üblicherweise langen Leitungsabschnitte sind die Sanierungsverfahren für Druckleitungen ggü. dem Freispiegelkanal eingeschränkt und leitungsspezifisch festzulegen.



15.1 Kurzbeschreibung HSA-Normalverfahren

Im Folgenden wird knapp das chronologische Vorgehen für Prüfungen auf Grundlage des HSA-Normalverfahrens vorgestellt.

Für die Durchführung der Druckprüfungen nach dem HSA-Normalverfahren sind an technischer Ausstattung grundsätzlich ein digitaler Drucklogger, eine Prüfpumpe für den Druckaufbau sowie Wasserzähler notwendig.

Für eine Druckprüfung nach dem HSA-Normalverfahren muss eine Druckleitung für mindestens 1,5 h bis 2 h außer Betrieb genommen werden. Für einen Druckaufbau muss die Druckleitung am Leitungsende verschließbar sein. Im Pumpwerk muss ebenfalls eine Verschließbarkeit, sowie ein Zugang zur Druckleitung mittels GEKA oder C-Anschluss für die Prüfgeräte gegeben sein. Ferner ist Brauch- oder Trinkwasser für den Druckaufbau und ggfs. Strom für die Prüfgeräte vorzuhalten.

Da in einer Druckleitung für die Druckprüfung nur ein begrenzter Luftanteil vorhanden sein darf, spielt der Austrag von Luft eine entscheidende Rolle für die Prüfbarkeit von Abwasserdruckleitungen. Der Austrag kann durch Spülen erfolgen. Es zeigte sich, dass auch Molchen einen effektiven Weg des Luftaustrags darstellt. Eine Spülung und die anschließende Druckprüfung kann mit Abwasser erfolgen.

Nachdem die Druckleitung für die eigentliche Druckprüfung vorbereitet ist, beginnt der erste von drei Teilen der Druckprüfung nach dem HSA-Normalverfahren. Diese sind: Vorprüfung, Druckabfallprüfung und Hauptprüfung.

Für die Prüfung nach dem HSA-Normalverfahren wird eine Excel-basierte Berechnungsdatei zur Verfügung gestellt. Hier sind vorab Angaben zur Druckleitung einzutragen sowie im Verlauf des Prüfverfahrens weitere Ergebnisse bzw. Messungen zu ergänzen. Mit diesem **Exceltool** wird leitungsspezifisch der zulässige Luftanteil in der Leitung sowie der leitungsspezifische Grenzwert für die Hauptprüfung berechnet. Das Exceltool ist für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen aller Materialien bis zu einem Nenndurchmesser von 500 mm geeignet. Der maximal mögliche Prüfabschnitt beträgt 4.000 m. Zusätzlich ist das Volumen ab einem Innendurchmesser von 220 mm auf maximal 140 m³ pro Prüfabschnitt begrenzt.

Der **Prüfdruck** ergibt sich aus dem Maximum aus mindestens 3 bar am Tiefpunkt der Druckleitung, dem Betriebsdruck am Prüfort, sowie mindestens 1 bar am Hochpunkt. Für Seedruckleitungen und Druckleitungen aus Asbestzement gelten Sonderregelungen gemäß Kap. 3.3.6 und Kap. 14.4.2. Um eine Prüfung auch bei höheren Luftanteilen zu ermöglichen, ist eine Erhöhung des regulären Prüfdrucks um maximal 3 bar ggf. möglich.



In der **Vorprüfung** wird der Prüfdruck zuzüglich 0,2 bar aufgebracht. Bei einem Abfall des Drucks auf den Prüfdruck wird der Druckleitung erneut Wasser zugegeben, bis sich der Ausgangswert von Prüfdruck + 0,2 bar eingestellt hat. Für biege- weiche Leitungsmaterialien (PE 80, PE 100, PVC) wird dies mindestens 1 h durch- geführt. Für steife Leitungsmaterialien (Asbestzement, Guss, Stahl) liegt die Min- destdauer der Vorprüfung bei 30 min. Die Verlängerung der Vorprüfung hat keine Verbesserung der Bewertung der Dichtheit in der nachfolgenden Hauptprüfung zur Folge. Eine zu kurze Vorprüfung führt jedoch zu einer Verschlechterung. Empfoh- len wird, eine Vorprüfung erst zu beenden, wenn in 30 min ein Druckabfall von weniger als 0,1 bar gemessen wird. Verlängern sich im Laufe der Vorprüfung die erforderlichen Nachpumpintervalle, ist dies typisch für abklingende Materialein- flüsse. Bleiben die Nachpumpintervalle jedoch gleich, ist dies ein Indiz für eine Undichtheit in der Leitung.

In der nachfolgenden **Druckabfallprüfung** wird überprüft, ob eine ausreichende Luftfreiheit für die Durchführung der Hauptprüfung vorliegt. Hierzu wird der Druck in der Druckleitung durch Entnahme von Wasser um 0,50 bar $\pm 0,05$ bar spontan abgesenkt. Das hierfür entnommene Wasservolumen sowie der exakte Druck vor und nach dem Druckablass wird im Exceltool notiert und automatisch mit dem rechnerisch ermittelten, zulässigen Wasservolumen abgeglichen. Nur bei ausrei- chender Luftfreiheit darf die Hauptprüfung begonnen werden. Nur für diesen Fall berechnet das Exceltool den zulässigen Druckabfall in der Hauptprüfung. Ist die Luftfreiheit nicht ausreichend gegeben, ist die Prüfung abzubrechen und die erfor- derliche Luftfreiheit herzustellen, z.B. durch Spülen. Die Druckabfallprüfung gibt keinen Aufschluss hinsichtlich der Dichtheit der Leitung.

Anschließend wird der Prüfdruck durch Wasserzugabe wieder aufgebaut und die hierfür erforderliche Wassermenge ebenfalls im Exceltool eingegeben. Auf Grund- lage der Ergebnisse der Druckabfallprüfung wird durch das Exceltool der leitungs- spezifische, maximal zulässige Druckverlust für die Hauptprüfung errechnet.

In der **Hauptprüfung** wird – nach einer Beruhigung des Prüfdrucks infolge der Wasserzugabe am Ende der Druckabfallprüfung – der Druckverlust über die Dauer von 1 h aufgezeichnet. Liegt der Druckverlust nach einer Stunde unter dem maxi- mal zulässigen Druckverlust, so ist die Druckprüfung bestanden und der Rohr- schnitt auf Grundlage der festgelegten zulässigen Leckage als dicht zu bewerten. Beträgt der gemessene Druckverlust mehr als die Hälfte des zulässigen Druckver- lusts, wird im Exceltool automatisch eine Warnung ausgegeben. In diesen Fällen liegt eine Leckage vor, die jedoch geringer ist als die festgelegte zulässige Le- ckage. Eine Verkürzung der Prüfintervalle, die Entwicklung von Sanierungsmaß- nahmen sowie das Erstellen eines Havarieplans wird empfohlen. Liegt der Druck- abfall unter 0,20 bar, ist die Leitung in jedem Fall als dicht einzustufen.



Wird der zulässige Druckverlust nicht eingehalten, wird empfohlen den Prüfdruck aufrecht zu halten und alle Armaturen der Druckleitung auf Wasseraustritt zu überprüfen. Anschließend kann eine erneute Druckprüfung erfolgen bzw. sind entsprechende Maßnahmen zu treffen.

15.2 Kurzbeschreibung 20-Min Test

Der 20-Min Test wurde als Kurztest konzipiert, welcher für Druckleitungen mit begrenzter Außerbetriebnahme-Möglichkeit entwickelt wurde. Allerdings können ggü. dem HSA-Normalverfahren weniger Informationen gewonnen werden. Des Weiteren können nur ausreichend luftfreie Leitungen ohne signifikanten Einfluss von Materialeigenschaften erfolgreich geprüft werden. Der 20-Min Test stellt höhere Anforderungen an die Luftfreiheit, als es das HSA-Normalverfahren tut. Ist eine Prüfung mittels HSA-Normalverfahren möglich, so wird dies auch empfohlen.

Für die Durchführung der Prüfung sind an technischer Ausstattung grundsätzlich ein digitaler Drucklogger, eine Prüfpumpe für den Druckaufbau sowie Wasserzähler notwendig.

Für eine Druckprüfung mittels 20-Min Test muss eine Druckleitung für mindestens 20 Minuten außer Betrieb genommen werden. Für einen Druckaufbau muss die Druckleitung am Leitungsende verschließbar sein. Im Pumpwerk muss ebenfalls eine Verschließbarkeit und ein Zugang zur Druckleitung mittels GEKA oder C-Anschluss für die Prüfgeräte gegeben sein. Ferner ist Brauch- oder Trinkwasser für den Druckaufbau sowie ggfs. Strom für die Prüfgeräte vorzuhalten.

Da in einer Druckleitung für eine Druckprüfung nur ein sehr begrenzter Luftanteil vorhanden sein darf, spielt der Austrag von Luft eine entscheidende Rolle für die Prüfbarkeit von Abwasserdruckleitungen. Der Austrag kann beispielsweise durch Spülen oder Molchen erfolgen. Die Spülung und der anschließende 20-Min Test kann mit Abwasser erfolgen.

Der 20-Min Test kann ohne Vorprüfung durchgeführt werden. Eine Vorprüfung verbessert jedoch die Qualität der Ergebnisse.

Während des 20-Min Tests wird zunächst der Prüfdruck aufgebracht. Der Prüfdruck wird analog des HSA-Normalverfahrens bestimmt. Über ein weiteres Exceltool für den 20-Min Test kann nach Eingabe von Druckleitungsdaten das erforderliche Nachpumpvolumen errechnet werden. Das Exceltool ist für in Betrieb befindliche Abwasserdruckleitungen aller Materialien bis zu einem Nenndurchmesser von 500 mm geeignet. Der maximal mögliche Prüfabschnitt beträgt 4.000 m. Zusätzlich ist das Volumen ab einem Innendurchmesser von 220 mm auf maximal 140 m³ pro Prüfabschnitt begrenzt.



Nachdem der Prüfdruck aufgebracht wurde, wird der Stand der Wasseruhr notiert, sowie die Prüfung gestartet. Der Druckleitung wird über die Dauer der Prüfung alle 2 Min das aus dem Exceltool errechnete Wasservolumen zugeführt; insgesamt wird zehn Mal Wasser nachgepumpt. Die gesamte nachgepumpte Wassermenge ist am Wasserzähler zu überprüfen. Hat sich der Druck nach dem letzten Nachpumpen beruhigt, wird dieser notiert. Ist ein Druckanstieg von mindestens 0,15 bar erfolgt, so gilt die Druckprüfung als bestanden. Andernfalls ist die Druckprüfung nicht bestanden. Gründe hierfür können eine unzulässige Undichtigkeit, zu große Materialdehnungen infolge zu kurzer bzw. keiner Vorprüfung oder ein zu hoher Luftanteil in der Leitung sein. Nach einer Ursachenermittlung kann ggfs. eine Wiederholung des 20-Min Tests erfolgen.

Um Schäden an der Leitung zu vermeiden, ist die Prüfung unabhängig von der Prüfdauer abzubrechen, wenn ein Druckanstieg von über 0,5 bar erreicht wird. Die Leitung kann als dicht eingestuft werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass der 20-Min Test keine Quantifizierung vorhandener Undichtigkeiten zulässt. Eine Überschreitung der im Rahmen des Forschungsvorhabens festgelegten zulässigen Verlustmenge jedoch kann sicher erkannt werden.

Bei Nichtbestehen des 20-Min Tests sollte das HSA-Normalverfahren durchgeführt werden. Dadurch können aufschlussreichere Ergebnisse, sowie Gründe für das Nichtbestehen gewonnen werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Kurvenverlauf einer Prüfung nach dem Normalverfahren der DVGW-W 400-2 (2004)	18
Abbildung 2:	Kurvenverlauf für eine Prüfung nach dem Kontraktionsverfahren (DVGW-W 400-2, 2004)	23
Abbildung 3:	Beispielhafter Kurvenverlauf einer dichten Leitung im 10-minute-test (IGN 4-01-03, 2015)	24
Abbildung 4:	Beispielhafter Kurvenverlauf einer undichten Leitung im 10-minute-test (IGN 4-01-03, 2015)	25
Abbildung 5:	Graphische Darstellung der Zusammenhänge nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte	26
Abbildung 6:	Testleitung aus PE-100, OD 90, SDR 11 im Labor der Hochschule Augsburg	30
Abbildung 7:	Versuchsaufbau zur Untersuchung des Verhaltens von Luft in Druckleitungen	32
Abbildung 8:	Der im Forschungsvorhaben verwendete Druckbaum der HSA..	36
Abbildung 9:	Verwendeter Datenlogger PWBlogg N6/5 der Firma Wegener ..	37
Abbildung 10:	Verwendete Wasserzähler: analoger Einstrahl-Etagenzähler ETK 115 T der Firma Werner Schütz (links) sowie digitaler Wasserzähler Modell K24 (rechts)	37
Abbildung 11:	Verwendete Handpumpe (links), eingesetzter Hochdruckreiniger (rechts)	39
Abbildung 12:	Foto des Nadelventils zur Erzeugung einer definierten, künstlichen Leckage in den Beispielleitungen zur Überprüfung der Verfahren sowie des Ausgleichsbehälters	40
Abbildung 13:	Nadelventil (Dosierventil) mit erhöhtem Durchfluss.....	40
Abbildung 14:	Beispielhafter Kurvenverlauf für eine Prüfung nach dem HSA-Normalverfahren.....	44
Abbildung 15:	Schematischer Druckverlauf für eine Prüfung nach dem 20-Min Test	49
Abbildung 16:	Experimentelle Bestätigung des Zusammenhangs zwischen Durchmesseränderung und Druckänderung an der Testleitung der Hochschule	55
Abbildung 17:	Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen 1/10-Leckagemenge und maximal zulässigem Luftvolumen (2% des Rohrvolumens) bei variablem Rohrdurchmesser.....	63

Abbildung 18: Rechnerischer Druckabfall in der Hauptprüfung aus der Ausdehnung der Luft am Hochpunkt der Leitung in Abhängigkeit des Leitungsdurchmessers bei einer 1/10 Leckage für Luftanteile von 1, 2 bzw. 3 % und einem Prüfdruck von 2 bar am Hochpunkt (absoluter Druck; 1,0 bar Prüfdruck am Hochpunkt + 1 bar Atmosphärendruck)	65
Abbildung 19: Balkendiagramm der Ursache des Wasseraustritts der drei Faktoren Material, Wasser und Luft für die Varianten 1 bis 4	72
Abbildung 20: Druckabfall in der Vorprüfung von biegeweichen Leitungsmaterialien (PE 80, PE 100) unterschiedlicher realer Beispielleitungen während der der Vorprüfung.....	84
Abbildung 21: Druckverlauf in der Vorprüfung am Bannweg mit 1/10 Leckage ohne zeitliche Vergrößerung der Nachpumpintervalle	85
Abbildung 22: Druckverlauf in der Vorprüfung an Beispielleitungen aus biegesteifen Leitungsmaterialien (Asbestzement, Guss).....	85
Abbildung 23: Druckverlauf bei der Variation des Nachpumpintervalls des 20-Min Tests	87
Abbildung 24: Druckverlauf des 20-Min Tests an einer Beispielleitung mit Prüfdruck 3 bar, zweiminütigem Nachpumpintervall und künstlicher Leckage	88
Abbildung 25: Vergleich des Druckverlaufs während des 20-Min Tests mit bzw. ohne Vorprüfung an einer Gussleitung in Ludwigsburg bei 4,5 bar Prüfdruck und einem Luftanteil von 0,21 %	93
Abbildung 26: Vergleich des Druckverlaufs während des 20-Min Tests mit bzw. ohne Vorprüfung an einer Druckleitung des Materials PE 100 bei AMME (Großwallstadt) mit 3,0 bar Prüfdruck und geringen Luftanteilen im Bereich von 0,2 %	94
Abbildung 27: Versuchsaufbau für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Differenzdruck und Leckagevolumen.....	99
Abbildung 28: Ergebnisse der experimentellen Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Differenzdruck und austretendem Leckagevolumen	101
Abbildung 29: Vergleich der Ergebnisse der experimentellen Ermittlung mit den berechneten Ergebnissen.....	103
Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung der prozentualen Verteilung des aus der Leckage austretenden Wasservolumens in der Hauptprüfung.....	114
Abbildung 31: Berechneter Druckverlauf (relativer Druck, bar) in der Hauptprüfung.....	115
Abbildung 32: Berechnetes Wasservolumen, welches minütlich in der Hauptprüfung aus der Leckage austritt.....	116



Abbildung 33: Beispielhafte Darstellung der prozentualen Verteilung des Druckanstiegs aufgrund Wasserzugabe durch Nachpumpen im 20-Min Test	123
Abbildung 34: Berechneter Druckverlauf im 20-Min Test	124
Abbildung 35: Berechnetes Wasservolumen, welches im 20-Min Test aus einer möglichen Leckage austritt.....	125
Abbildung 36: Maximal möglicher Druckabfall einer PE 80 Druckleitung SDR 17 mit 1 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (p_{hyd})	129
Abbildung 37: Maximal möglicher Druckabfall einer PE 80 Druckleitung SDR 17 mit 2 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (p_{hyd})	130
Abbildung 38: Maximal möglicher Druckabfall einer PE 80 Druckleitung SDR 17 mit 3 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (p_{hyd})	131
Abbildung 39: Maximal möglicher Druckabfall einer Druckleitung aus Guss, PN40 bzw. PN32 mit 1 % Luftanteil für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Prüfdruck (PD) und hydrostatischem Druck (p_{hyd}).....	132
Abbildung 40: Druckverlauf der Hauptprüfung der Druckleitung unter dem großen Alpsee mit künstlicher Leckage bei einem Prüfdruck von 3,5 bar und einem vorhandenen Luftanteil von 13,47 %	133
Abbildung 41: Druckverlauf der Hauptprüfungen in Wielenbach mit 3,0 bar Prüfdruck bzw. auf 3,5 bar erhöhtem Prüfdruck mit 1/10-Leckage.....	135
Abbildung 42: Vergleich der gemessenen und simulierten Druckabfälle aller durchgeführten Hauptprüfungen des HSA-Normalverfahrens mit künstlicher Leckage in Abhängigkeit der Luftanteile (bereinigt um reale Leckagen); siehe auch Anhang 4	139
Abbildung 43: Druckdifferenz zwischen tatsächlich gemessenen und simulierten Druckabfällen	140
Abbildung 44: Gemessene Druckabfälle sowie berechnete maximal zulässige Druckabfälle (Grenzwert) aller durchgeführten Hauptprüfungen des HSA-Normalverfahrens ohne künstliche Leckage, bereinigt um reale Leckagen, mit leitungsindividuellem Grenzwert (siehe Anhang 6).....	142
Abbildung 45: Gemessener sowie simulierter Druckanstieg aller durchgeführten 20-Min Tests, mit künstlicher Leckage (bereinigt um reale Leckagen); siehe auch: Anhang 8	145
Abbildung 46: Gemessener sowie simulierter Druckanstieg aller durchgeführten 20-Min Tests, ohne künstliche Leckage (um reale Leckagen bereinigt); siehe Anhang 10	148

Abbildung 47: maximale Abweichung vom gewählten Luftanteil (Absolutwerte) sowie dazugehöriger gewählter Luftanteil	153
Abbildung 48: Aufnahme der Druckstöße im Druckverlauf an der Abwasserdruckleitung in Wielenbach zwischen 06.07.2020 und 07.07.2020.....	158
Abbildung 49: Druckverlauf während einer Luftspülung am Pumpwerk Druisheim	159
Abbildung 50: Synchronisierter Vergleich des Druckverlaufs während eines 20-Min Tests mit zwei Druckloggern am Anfang bzw. Ende der Druckleitung Am langen Berg	160
Abbildung 51: Darstellung aller im Forschungsprojekt durchgeführten HSA-Normalverfahren in Abhängigkeit des Luftanteils unter Angabe des Leitungsnamens sowie des Luftanteils [%] und dem Druckabfalls in der Hauptprüfung [bar] (siehe Anhang 15).....	162
Abbildung 52: Darstellung des: a) Druckabfalls in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens ohne reale bzw. künstliche Leckage [blauer Balken] b) Grenzwerts des max. zulässigen Druckabfalls [rot] c) Kriteriums für eine undichte Bewertung bei max. zulässigem Luftanteil [grün] (siehe auch Anhang 16)	164
Abbildung 53: Darstellung des: a) Druckabfalls in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens ausschließlich mit künstlicher Leckage [blauer Balken] b) Grenzwerts des max. zulässigen Druckabfalls [rot] c) Kriteriums für eine undichte Bewertung bei max. zulässigem Luftanteil [grün] (siehe auch Anhang 17)	167
Abbildung 54: Darstellung aller im Forschungsprojekt durchgeführten 20-Min Tests in Abhängigkeit des Luftanteils unter Angabe des Leitungsnamens sowie des Luftanteils [%] und dem Druckabfalls in der Hauptprüfung [bar] (siehe Anhang 18).....	169
Abbildung 55: Druckdifferenzen aller 20-Min Tests mit künstlicher Leckage (siehe Anhang 19)	171
Abbildung 56: Druckdifferenzen aller 20-Min Tests ohne künstliche Leckage, bereinigt um Druckprüfungen mit realer Leckage (siehe Anhang 20).....	173
Abbildung 57: Druckanstiege aller 20-Min Tests (ohne künstliche oder reale Leckage) begrenzt auf Prüfungen mit angepasstem Nachpumpvolumen (Anhang 21)	175
Abbildung 58: Ergebnisse und Grenzwert der 20-Min Tests mit künstlicher Leckage (siehe Anhang 22).....	177
Abbildung 59: Verhalten des Luftvolumen in Abhängigkeit des Aufenthaltsorts der Luft für das Beispiel	181

Abbildung 60: Gegenüberstellung der zulässigen Druckabfälle mit und ohne Sicherheitsfaktoren sowie des vorhandenen Luftanteils von HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckage (siehe Anhang 23)	187
Abbildung 61: Gegenüberstellung der zulässigen Druckabfälle mit und ohne Sicherheitsfaktoren sowie des vorhandenen Luftanteils von HSA-Normalverfahren ohne künstliche Leckage (siehe Anhang 24)	189
Abbildung 62: Maximale Prüfabschnitte für die Prüfverfahren HSA-Normalverfahren und 20-Min Test, mit Markierung der im Forschungsprojekt untersuchten Druckleitungen	193
Abbildung 63: Druckverlust der abgesperrten Testleitung über 67 Stunden	196
Abbildung 64: Anschluss eines Kugelhahns mittels Flansch.....	199
Abbildung 65: Anschluss eines Kugelhahns mittels Plasson	199
Abbildung 66: Modifiziertes Absperrorgan zum Verschluss der Leitung Zirndorf.....	200
Abbildung 67: Einbausituation des Absperrorgans am Leitungsende Zirndorf..	200
Abbildung 68: Darstellung des Lufteintrages in den Pumpensumpf durch freien Auslauf im Pumpensumpf (links: Laborsituation, rechts: realer Pumpensumpf) (Pothof, 2011)	203
Abbildung 69: Rutschsystem zur Vermeidung des ungewollten Lufteintrags in Druckleitungen (Hamburg Wasser)	204
Abbildung 70: Darstellung der im Rahmen des Forschungsvorhabens erreichten minimalen Luftanteile der Beispielleitungen in aufsteigender Reihenfolge	210
Abbildung 71: links: undichter Flanschanschluss, Quelle: AWA; rechts: Längsrissbildung in Maindüker; (Zweckverband AMME).....	217
Abbildung 72: links: Scherbenbruch hervorgerufen durch defekten Druckminderer an Druckluftspülung - rechts: Schaden durch Dritte im Zuge einer Spülbohrung; (AWA)	218
Abbildung 73: Undichter MID in Ludwigsburg	221
Abbildung 74: Möglichkeiten zur Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen auf Grundlage (IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2011).....	222
Abbildung 75: SmartBall vor dem Einsatz in die zu untersuchende Leitung in Zirndorf am 15.07.2020	224
Abbildung 76: Installiertes Fangnetz am Leitungsende und Entnahme des gepolsterten SmartBalls nach der Untersuchung in Zirndorf	225
Abbildung 77: Aufzeichnung der akustischen Signale während der Leckageortung in Zirndorf	225

Abbildung 78: Ausschnitt aus der Dokumentation der Kamerabefahrung mit radialem, klaffenden Riss um den kompletten Umfang der Druckleitung, Kamerabefahrung am 26.11.2020 (Stadtentwässerung Fürth)	227
Abbildung 79: Detailliertes Schadensbild des klaffendes Risses mit einer Breite von 4 mm der südlichen Druckleitung Zirndorf, Kamerabefahrung am 26.11.2020 (Stadtentwässerung Fürth)..	227
Abbildung 80: Technikfamilien zur grabenlosen Sanierung von Abwasserdruckleitungen nach (DIN EN 15885, 2019) und (DIN EN ISO 11295, 2018)	230
Abbildung 81: Anbringen der Betongewichte und anschließende treibende Lagerung am Starnberger See (AV Starnberger See)	237
Abbildung 82: links: Side-Scan-Einsatzschiff am Chiemsee - rechts: Beispiel der bildlichen Darstellung mit Hilfe des Side-Scan-Verfahrens am Chiemsee; (Christian Müller Tauchdienste, 2017)	240
Abbildung 83: Niederschlagskarte Chiemsee-Herrenchiemsee (Wetterkontor, 2021)	248
Abbildung 84: links: Lageplan der Seedruckleitung im Starnberger See; rechts: Fotodokumentation der Verlegung der Seedruckleitung im Starnberger See (AV Starnberger See)	249
Abbildung 85: Lageplan der seeverlegten Abwasserdruckleitungen im Königssee - Entwurf (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988), teilweise modifiziert	251
Abbildung 86: Längsschnitt der Seedruckleitung Sallet - St.Bartholomä (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988), teilweise modifiziert	252
Abbildung 87: Längsschnitt der Seedruckleitung St. Bartholomä - Königssee (Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988), teilweise modifiziert	253
Abbildung 88: Bildaufnahme der vermuteten Schadstelle am Königssee in einer Tiefe von 172 m.....	255
Abbildung 89: Übersichtslageplan der neuen Abwasserleitungen am Obersee (Planunterlagen Dippold und Gerold, teilweise modifiziert)	256
Abbildung 90: Regelquerschnitt Seeleitung im Obersee, (Planunterlagen Dippold und Gerold)	257
Abbildung 91: An der Wasseroberfläche treibende Lagerung der Seedruckleitung Obersee am Königssee am Tag der Absenkung der Seedruckleitung.....	258
Abbildung 92: Längsschnitt der Abwasserdruckleitung im Bereich des Großen Alpsees (Stadt Immenstadt, 2005)	259
Abbildung 93: Lageplan der Abwasserdruckleitung unter dem Alpsee (AOI, teilweise modifiziert)	259



Abbildung 94: Leitungstrasse durch den Forggensee (AZV Füssen, teilweise modifiziert).....	262
Abbildung 95: links: Innenansicht des Schachts auf dem Seegrund des Forggensees; rechts: Ansicht des Schachtdeckels auf dem Kiesdamm am Seegrund, Blickrichtung Nord-Westen.....	263
Abbildung 96: Schematische Darstellung des Zeitstandverhaltens von Polyethylen-Rohren (I: Verformungsbrüche, II: Spannungsrisse, III: Wärmealterung), (Hessel, 2007).....	274



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kennwerte für die Druckprüfung nach dem Normalverfahren (DVGW-W 400-2, 2004)	17
Tabelle 2:	Vorzunehmende Druckabsenkung für das Kontraktionsverfahren (DVGW-W 400-2, 2004)	21
Tabelle 3:	Gerechnetes Wasservolumen V_k [ml/m] für das Kontraktionsverfahren in Abhängigkeit des Außendurchmessers OD (DVGW-W 400-2, 2004)	22
Tabelle 4:	Übersicht der Wandstärken in mm in Abhängigkeit des PE-Materials und Durchmesser nach (WAVIN, 2018)	29
Tabelle 5:	Leitungseigenschaften der Testleitung	30
Tabelle 6:	E-Moduli der gängigen Rohrwerkstoffe nach W 400-2 bzw. DIN EN 805.....	69
Tabelle 7:	Wasseraustrittsvolumina aufgeteilt auf die Faktoren Material, Wasser und Luft aus einer Beispielleitung für einen Druckabfall von 0,21 bar.....	71
Tabelle 8:	Zusammenstellung beispielhafter PE 80 Leitungen mit ansteigenden Durchmessern und sowie Leckagevolumina bei unterschiedlichen Berechnungsansätzen	74
Tabelle 9:	Vergleich des Druckabfalls bei der Simulation einer Worstcase Rohrleitung mit weichem Rohrmaterial aufgrund der 1/10 bzw. der angepassten Leckage	77
Tabelle 10	Maximal zulässige Luftanteile in Worstcase Druckleitungen mit 1/10 bzw. angepasster Leckage	77
Tabelle 11:	Eingabeparameter der Oberfläche der Simulation des HSA-Normalverfahrens	105
Tabelle 12:	Eingabemaske der Simulation des HSA-Normalverfahrens (gelbe Felder kennzeichnen Eingabefelder)	106
Tabelle 13:	Berechnung des minütlichen Druckabfalls im HSA-Normalverfahren.....	108
Tabelle 14:	Berechnung der prozentualen Verteilung des Leckagevolumens aufgrund von Materialdehnung, Wasserkompression und Luftkompression	111
Tabelle 15:	Ausgabeoberfläche der Simulation des HSA-Normalverfahrens	113
Tabelle 16:	Eingabeparameter der Oberfläche der Simulation des 20-Min Tests.....	117
Tabelle 17:	Eingabemaske der Simulation (gelbe Felder sind Eingabefelder)	118
Tabelle 18:	Berechnung des minütlichen Druckanstiegs im 20-Min Test	120



Tabelle 19:	Berechnung der prozentualen Verteilung des Nachpumpvolumens aufgrund von Materialdehnung, Wasserkompression und Luftkompression.....	121
Tabelle 20:	Ausgabeoberfläche der Simulation des 20-Min Tests	122
Tabelle 21:	Ergebnisse der Luftanteilsberechnung anhand mehrfach durchgeführter Druckablastests und Aufpumpvorgängen in Rehling-Allmering (PE 100).....	151
Tabelle 22:	Ergebnisse der Luftanteilsberechnung anhand mehrfach durchgeführter Druckablastests und Aufpumpvorgängen an undichter Leitung in Waltenhofen (GGG)	151
Tabelle 23:	Beispielrechnung für verschiedene Orte der Luft in der Druckabfallprüfung	180
Tabelle 24:	Beispielrechnung für die Abschätzung eines möglichen Fehlers durch unterschiedliche Annahmen des Ortes der Luft.....	182
Tabelle 25:	erforderliche Selbstentlüftungsgeschwindigkeiten bei einer um 15° nach unten geneigten Leitung.....	206
Tabelle 26:	Darstellung der empfohlenen Füllgeschwindigkeiten nach (ÖVGW-W 101, 2014)	208
Tabelle 27:	Differenzierung der Seedruckleitungen in Bayern	245
Tabelle 28:	Grenzwerte für Binnengewässer nach EU-Badegewässerrichtlinie (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2016)	278



Literaturverzeichnis

Abwasser- und Umweltverband Chiemsee, 2017. *Aktenvermeckt über Aufschwimmen der Seeleitung*. Chiemsee: s.n.

Aigner, P. D. D., 2015. *bbr. bbr - Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie*, November, pp. 26-31.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2016. <https://www.bmuv.de/>. [Online] Available at: <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/badegewasser/eu-badegewasserrichtlinie> [Zugriff am 8 Mai 2022].

Christian Müller Tauchdienste, 2017. *Bericht Chiemsee Ringkanal Sidescan-Befahrung*, München: s.n.

Dieter Weismann, T. G., 2006. *Kommunale Abwasserpumpwerke, 2. Auflage*. s.l.:Vulkan Verlag.

DIN 1910-3, 1977. *Schweißen von Kunststoffen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN 15885, 2019. *Klassifizierung und Eigenschaften von Techniken für die Renovierung, Reparatur und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN 1610, 2015. *Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN 1671, 1997. *Druckentwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN 16932-2, 2018. *Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Pumpsysteme - Teil 2: Druckentwässerungssysteme*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN 805, 2000. *Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN ISO 11295, 2018. *Klassifizierung und Informationen zur Planung und Anwendung von Kunststoff-Rohrleitungssystemen für die Renovierung und Erneuerung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

Dr.-Ing. Johann Müller, P. D. B. H., 2021. *Zustand der öffentlichen Kanalisation in Bayern - Datenstand 2018*, Garching: Technische Universität München.



- DVGW-G 469, 2010. *Druckprüfverfahren Gastransport/Gasverteilung*. Bonn: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V..
- DVGW-W 392, 2003. *Rohrnetzinspektion und Wasserverluste - Maßnahmen, Verfahren und Bewertungen*. Bonn: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V..
- DVGW-W 400-2, 2004. *Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 2: Bau und Prüfung*. Bonn: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V..
- DVGW-W 400-3, 2006. *Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb und Instandhaltung*. Bonn: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V..
- DVS 2207-1, 2015. *Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen . Heizelementschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus PE*. Düsseldorf: DVS Media GmbH.
- DWA-A 113, 2020. *Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserdrucksystem*. Hennef: DWA.
- DWA-A 116-3, 2013. *Besondere Entwässerungsverfahren - Teil 3: Druckluftgespülte Abwassertransportleitungen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..
- EÜV - Eigenüberwachungsverordnung, 1995. *Verordnung zur Eigenüberwachung von Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen*. s.l.:s.n.
- Fa. Xylem GmbH, 2017. *SmartBall Tool Sheet*, s.l.: s.n.
- Faserbaustoffe, V. B. u., 1982. *Asbestzementherzeugnisse - Baufanit-Druckrohre und Verbindungselemente*, s.l.: s.n.
- Fuchs, M. H., 2017. *Endbericht - Durchführung von Dichtheitsprüfungen an bestehenden Abwasserdruckleitungen*. Augsburg: s.n.
- Hessel, D. J., 2007. 100 Jahre Nutzungsdauer von Rohren aus Polyethylen. *3R International*, pp. 242-246.
- Hoch, W., Raab, K., Schlicht, H. & Riege, D., 2005. Druckprüfung von Wasserleitungen nach DVGW-Arbeitsblatt W 400-2. *bbr Jahresmagazin*, 12, pp. 8-19.
- IGN 4-01-03, 2015. *Pressure testing of pressure pipes and fittings for use by public water suppliers*. s.l.:UK Water Industry.



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2011. *Inspektion und Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen und -dükern (Phase I)*, Gelsenkirchen: s.n.

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, 2015. *Inspektion und Zustandserfassung von Abwasserdruckleitungen und -dükern (Phase II)*, Gelsenkirchen: s.n.

Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1988. *Abwasserbeseitigung der Ortsteile Sallet und St. Bartholomä am Königssee - Erläuterungsbericht zum Bauentwurf vom 15. Januar 1988 inkl. Planunterlagen*, s.l.: s.n.

Ingenieurbüro Dippold und Gerold, 1989. *Broschüre zur Eröffnung der Seedruckleitung am Königssee*. s.l.:s.n.

Kunststoffrohrverband, 2022. www.krv.de. [Online] Available at: <https://www.krv.de/wissen/zeitstandverhalten-unter-innendruck> [Zugriff am 30 05 2022].

ÖVGW-W 101, 2014. *Dichtheitsprüfungen von Wasserrohrleitungen*. Wien: Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.

Pothof, D. I., 2011. *Co-current air-water flow in downward sloping pipes*. Enschede: Gildeprint Drukkerijen BV.

Pressl, A. et al., 2015. *Seedruckleitungen - Risikobewertung von Druckleitungen der Siedlungswasserwirtschaft in Österreichischen Seen - Studie im Auftrag des BMLFUW sowie Land Oberösterreich, Land Kärnten und Land Salzburg*, Wien: BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Pressl, A. et al., 2015. *Seedruckleitungen - Risikobewertung von Druckleitungen der Siedlungswasserwirtschaft in Österreichischen Seen - Studie im Auftrag des BMLFUW sowie Land Oberösterreich, Land Kärnten und Land Salzburg*, Wien: BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Roscher, P. D.-I., 2008. *Rehabilitation von Rohrleitungen - Sanierung und Erneuerung von Ver- und Entsorgungsnetzen*. Weimar: Universitätsverlag Weimar.

Spang, J., 1996. Druckausdehnungsgefäße in Heizungsanlagen. *IKZ-Haustechnik*, Issue 4, p. 30 ff..

Stadt Immenstadt, 2005. *Bestandslängsschnitt 5 "Sammler b"*. Immenstadt: s.n.



Technische Universität Braunschweig, Insitut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1992. *Innenkorrosion von zementgebundenen Rohren für die Schmutzwassrekanalisation*, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig.

Teschke, U. & Teschke, W., 2016. Theoretische Luftvolumenbestimmung bei der Druckprüfung von Rohrleitungen. *gwf - Wasser/Abwasser*, 11, pp. 1017-1026.

TRGS-519, 2014. *Technische Regeln für Gefahrenstoffe; Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten*. Dortmund: BAuA.

WAVIN, 2018. *Druckrohrsysteme : Für Gas, Wasser, kommunale und industrielle Abwässer. Technisches Handbuch*. s.l.:s.n.

Wetterkontor, 2021. *www.wetterkontor.de*. [Online] Available at: <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=P875&datum0=01.05.2021&datum1=24.01.2021&jr=2017&mo=5&datum=24.01.2021&t=4&part=1> [Zugriff am 25 Januar 2021].

Xylem, 2019. *Xylem*. [Online] Available at: https://www.xylem.com/siteassets/support/case-studies/case-studies-pdf/rheda-wiedenbruck_smartball.pdf [Zugriff am 16 11 2020].



Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Fragebogen an Netzbetreiber
- Anhang 2: Rechnerische Ergebnisse mit variablem Prüfdruck und variabler Leckage
- Anhang 3: Auflistung aller HSA-Normalverfahren mit künstlichen und realen Leckagen
- Anhang 4: Auflistung aller HSA-Normalverfahren mit künstlicher Leckagen (bereinigt um reale Leckagen)
- Anhang 5: Auflistung aller HSA-Normalverfahren ohne künstlicher Leckagen
- Anhang 6: Auflistung aller HSA-Normalverfahren ohne künstliche Leckagen (bereinigt um reale Leckagen)
- Anhang 7: Auflistung aller 20-Min Test mit Leckage
- Anhang 8: Auflistung aller 20-Min Tests mit Leckage (bereinigt um reale Leckagen)
- Anhang 9: Auflistung aller 20-Min Tests ohne künstliche Leckagen
- Anhang 10: Auflistung aller 20-Min Tests ohne künstliche sowie reale Leckagen
- Anhang 11: Übersicht sämtlicher berechneter unbereinigter Luftanteile
- Anhang 12: Fehler und Fehlerquellen in der Luftanteilsberechnung
- Anhang 13: Übersicht sämtlicher berechnetet bereinigter Luftanteile
- Anhang 14: Übersicht aller Prüfungen
- Anhang 15: Darstellung aller im Forschungsprojekt durchgeführten HSA-Normalverfahren
- Anhang 16: Druckabfälle in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens ohne Leckagen
- Anhang 17: Druckabfälle in der Hauptprüfung des HSA-Normalverfahrens mit künstlicher Leckage ohne reale Leckage
- Anhang 18: Darstellung aller im Forschungsprojekt durchgeführten 20-Min Tests



- Anhang 19: Druckdifferenzen in der Hauptprüfung des 20-Min Tests mit künstlicher Leckage
- Anhang 20: Druckdifferenzen in der Hauptprüfung des 20-Min Tests ohne künstliche Leckagen
- Anhang 21: Ergebnisse des 20-Min Tests ohne künstliche Leckage mit angepasstem Nachpumpvolumen und Grenzwertbestimmung
- Anhang 22: Ergebnisse des 20-Min Tests mit künstlicher Leckage und Grenzwertbestimmung
- Anhang 23: Ergebnisse des HSA-Normalverfahrens mit Leckage und mit Sicherheiten
- Anhang 24: Ergebnisse des HSA-Normalverfahrens ohne Leckage und mit Sicherheiten
- Anhang 25: Maximal zulässige Prüfabschnitte
- Anhang 26: 5-Stufenplan zur Überwachung von Seedruckleitungen
- Anhang 27: Ablaufprozess aus Sicht des Betreibers bei vermuteter Leckage oder Bruch der Leitung
- Anhang 28: Inspektionsmaßnahmen
- Anhang 29: Übersicht der Seedruckleitungen am Chiemsee
- Anhang 30: Übersichtskarte des Abwassernetzes am Chiemsee
- Anhang 31: Gründe für die Nichtanwendbarkeit des Normverfahrens nach DIN EN 805 bzw. DVGW W 400-2 an in Betrieb befindlichen Abwasserdruckleitungen

