

# Untersuchung der technischen Nutzungsdauer von Schlauchlinern

Ergebnisse aus Literaturrecherche,  
Interviewkampagne und Datenauswertung

Bericht im Projekt SEMA Berlin 3

Autor: Lukas Guericke  
Mitwirkende: Nicolas Caradot  
Elke Eckert  
Kirsten Jørgensen  
Nic Lengemann  
Alexander Ringe  
Daniel Sauter  
David Steffelbauer

Date: **03.09.2024**

## Inhalt

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	3
TABELLENVERZEICHNIS.....	4
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>5</b>
<b>HAFTUNGSAUSSCHLUSS .....</b>	<b>6</b>
<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>6</b>
1. EINLEITUNG & MOTIVATION.....	7
2. METHODISCHES VORGEHEN DIESER STUDIE .....	11
3. LITERATURRECHERCHE.....	12
3.1. AUSGANGSLAGE.....	12
3.2. HERSTELLUNG UND EINBAU VON LINERN.....	12
3.3. MESSGRÖßEN VON LINERN .....	13
3.3.1. MATERIALEIGENSCHAFTEN.....	13
3.3.2. GEOMETRIEEIGENSCHAFTEN .....	15
3.3.3. BESTÄNDIGKEIT GEGENÜBER BETRIEBLICHEN BELASTUNGEN .....	15
3.4. QUALITÄTSPRÜFUNG VON LINERN.....	16
3.4.1. PRÜFUNGEN IM KANAL .....	16
3.4.2. PROBENAHME .....	16
3.4.3. LABORPRÜFUNGEN.....	17
3.5. AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN UND PROBLEMANALYSEN IM ZUSAMMENHANG MIT LINERN.....	18
3.5.1. AUSHÄRTUNG VON LINERN.....	18
3.5.2. GEOMETRISCHE INTEGRITÄT VON LINERN .....	21
3.5.3. FALTENBILDUNG UND OBERFLÄCHENUNREGELMÄßIGKEITEN .....	23
3.5.4. PROBLEME MIT ANBINDUNGSSTELLEN DER ANSCHLUSSKANÄLE.....	23
3.6. AKTUELLE AUSSAGEN ZUR NUTZUNGSDAUER VON LINERN.....	23
3.6.1. DEFINITION DER NUTZUNGSDAUER VON LINERN.....	23
3.6.2. EINSCHÄTZUNG DER NUTZUNGSDAUER VON LINERN .....	24
3.7. ZWISCHENFAZIT.....	25
4. INTERVIEWS.....	28

4.1.	METHODIK INTERVIEWS .....	28
4.1.1.	INTERVIEWDAUER UND -STRUKTUR .....	28
4.1.2.	AUSWAHL DER INTERVIEWKONTAKTE.....	28
4.2.	ERGEBNISSE DER INTERVIEWS .....	29
4.2.1.	VERWENDUNG VON LINERN DURCH BEFRAGTE BETREIBER .....	29
4.2.2.	FUNKTION VON LINERN.....	30
4.2.3.	SCHADENSANALYSEN .....	30
4.2.4.	QUALITÄTSSICHERUNGSMABNAHMEN AUS INTERVIEWS.....	32
4.2.5.	FOLGESANIERUNGEN BEREITS MITTELS SCHLAUCHLINING SANIERTER HALTUNGEN....	33
4.2.6.	AUSSAGEN ZUR NUTZUNGSDAUER VON LINERN.....	34
4.3.	ZWISCHENFAZIT.....	35
5.	DATENAUFBEREITUNG DER BERLINER WASSERBETRIEBE .....	37
5.1.	METHODIK DER DATENAUFBEREITUNG .....	37
5.2.	ERGEBNISSE DER DATENAUFBEREITUNG .....	38
5.3.	ZWISCHENFAZIT.....	39
6.	ZUSÄTZLICHE ERKENNTNISSE.....	43
6.1.	PROTOKOLLIERUNG DES EINBAUPROZESSES .....	43
6.2.	ERFASSUNG VON LINERSCHÄDEN IN OPTISCHEN BEFAHRUNGEN.....	43
7.	GESAMTFAZIT.....	44
8.	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN.....	47
	REFERENZEN .....	50
	REFERENZEN VON STANDARDS UND MERKBLÄTTERN .....	52

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Angenommene Überlebenskurven zur Modellierung des Alterungsverhaltens von Berliner Linern; kalibriert über markierte Punkte bisheriger Annahmen des Projekts SEMA Berlin 2.....	8
Abbildung 2: Härtungsprozess eines eingebauten Liners mittels eines UV-Lampenzugs .....	20
Abbildung 3: Aufteilung der Länder, dargestellt als ISO 3166-1 Alpha-2-Codes (links) und Organisationsarten (rechts) der insgesamt 21 Interviews.....	29
Abbildung 4: Häufigkeit der Nennungen von möglichen Nutzungsdauerbeeinflussenden Problemen im Zusammenhang mit Linern (Mehrfachnennungen möglich) .....	31
Abbildung 5: Einschätzung der Nutzungsdauer von Linern aus den 21 geführten Interviews .....	34

Abbildung 6: Faktoren, die die Nutzungsdauer des zusammengesetzten Systems von Liner und Altrohr beeinflussen können .....	36
Abbildung 7: Verteilung der Linerlängen (aufgerundet auf ganze km; Ordinate) der ausgewerteten Liner für die Lineraltersgruppen zum Zeitpunkt der Inspektion (Abszisse); Abbildung BWB .....	38
Abbildung 8: Zustandsverteilungen (Ordinate) der ausgewerteten Liner für die Lineraltersgruppen zum Zeitpunkt der Inspektion (Abszisse); Abbildung BWB .....	39
Abbildung 9: Vorschlag überarbeiteter und für die Berliner Wasserbetriebe annehmbarer Überlebenskurven zur Modellierung des Alterungsverhaltens von Linern; kalibriert über markierte Punkte aus aktualisierten Datenauswertungen, Annahmen und Schlussfolgerungen dieser Forschungsarbeit .....	41

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wesentliche Materialeigenschaften von Linern mit den jeweiligen Prüfverfahren nach Wicke [2017], weiterführende Informationen in Wicke [2017] und dem DWA-A 143-3.....	14
Tabelle 2: Geometrieigenschaften von Linern nach Wicke [2017], weiterführende Informationen in Wicke [2017] und dem DWA-A 143-3.....	15
Tabelle 3: Betriebliche Belastungsfähigkeit von Linern nach Wicke [2017], weiterführende Informationen in Wicke [2017] und dem DWA-A 143-3.....	16
Tabelle 4: Begrenzungen für Reststyrol aus Literatur / Regelwerken in Massenprozent bezogen auf das Laminat / ein Probestück und bezogen auf den Harzanteil; mit * markierte Werte sind Umrechnungen unter Annahme eines mittleren Harz-/Faseranteils von 50 %.....	19
Tabelle 5: Definition der SEMA-Zustände bezogen auf den Zeithorizont und die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs.....	37
Tabelle 6: Vorschlag der Kalibrierungspunkte auf Grundlage früherer Schlussfolgerungen und getroffener Annahmen .....	41

## **Zusammenfassung**

Der vorliegende Forschungsbericht befasst sich mit den derzeitigen Unsicherheiten bezüglich der technischen Nutzungsdauer und des Alterungsverhaltens der gängigsten Renovierungsmethode in Kanalnetzen, dem Cured in Place Pipe (CIPP) Schlauchlining. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer fundierten Datengrundlage für eine Schlauchliner-Überlebenskurve für die Anwendung in Alterungsmodellen. Das methodische Vorgehen umfasst (i) eine Literaturrecherche, (ii) Interviews mit Kanalsanierungs-Expert:innen sowie (iii) eine Auswertung von Daten der Berliner Wasserbetriebe zur Erstellung einer aktualisierten und geeigneten Datengrundlage für die Überlebenskurven. Dabei zeigen sich in der Auswertung der Literatur und den Interviews mehrheitliche Schätzungen der Nutzungsdauer von Schlauchlinern von über 50 Jahren. Die Untersuchung zeigt jedoch auch, dass diese von vielen Faktoren beeinflusst ist und ein Mangel an belastbaren Daten besteht. Weitere Untersuchungen an langjährig betriebenen Schlauchlinern sind daher zwingend notwendig. Der Einbau, insbesondere der Aushärtungsprozess hat sich als Haupteinfluss für Defekte und Mängel an Schlauchlinern gezeigt. Eine Standardisierung der Schadenserfassung und Zustandsbeurteilung von schlauchlinerspezifischen Schäden sowie die Etablierung zerstörungsfreier Inspektionsmethoden sind erforderlich, um das Alterungsverhalten zukünftig besser zu verstehen. Empfehlungen umfassen die Verbesserung der Datenerhebung während des Betriebs, Ein- und Ausbaus von Schlauchlinern, die Erweiterung der Qualitätssicherung beim Einbau, sowie die Untersuchung von Schadenseinflüssen auf die Nutzungsdauer und den Erfahrungsaustausch zwischen Betreibern.

## Haftungsausschluss

Die in dieser Publikation enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zum Zeitpunkt der Erstellung als korrekt befunden. Die Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH (KWB) übernimmt jedoch keine Haftung für Personen-, Sach- oder sonstige Schäden, die direkt oder indirekt aus der Nutzung oder dem Vertrauen auf dieses Dokument entstehen. Die KWB gGmbH übernimmt keine Garantie für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität der bereitgestellten Informationen. Es wird keine Gewähr dafür übernommen, dass die Informationen für spezifische Zwecke geeignet sind. Mit der vorliegenden Haftungsausschlussklausel wird weder bezweckt, die Haftung der KWB gGmbH entgegen den einschlägigen nationalen Rechtsvorschriften einzuschränken noch sie in Fällen auszuschließen, in denen ein Ausschluss nach diesen Rechtsvorschriften nicht möglich ist.

## Danksagung

Wir möchten uns aufrichtig bei allen unseren Interviewpartner:innen bedanken, die durch ihre wertvollen Beiträge und Erkenntnisse zur Gestaltung unseres Forschungsberichts beigetragen haben. Die Ergebnisse dieser Interviews sind von entscheidender Bedeutung für unsere Schlussfolgerungen und Empfehlungen für zukünftige Arbeiten. Ihre Mitarbeit hat maßgeblich zum Erfolg unserer Recherchen beigetragen, und wir schätzen Ihre wertvolle Zeit und Expertise sehr.

## 1. Einleitung & Motivation

Das Kanalnetz erfüllt tagtäglich die wichtige Aufgabe, unser Schmutzwasser sowie anfallendes Regenwasser sicher aus unseren Siedlungen zu Pumpwerken, Kläranlage und Einleitstellen zu befördern. Doch genau wie jedes andere Bauwerk auch haben Entwässerungskanäle nur eine begrenzte technische Nutzungsdauer. Ist ein Kanal beschädigt und muss saniert werden, kann dieser in einem aufwendigen Verfahren mithilfe einer offenen Baugrube oder grabenlos mittels unterirdischen Vortriebes erneuert werden. In einigen Fällen ist eine solche Erneuerung die einzig technisch mögliche Sanierungsoption. In vielen Fällen jedoch können alternativ zur Erneuerung grabenlose Renovierungsverfahren zum Einsatz kommen. Laut einer Umfrage der Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) von Berger et al. (2020) zeichnet sich innerhalb der vergangenen 20 Jahre ein stetiger Rückgang der Erneuerungen von Entwässerungsanlagen und seit 2013 eine zunehmende Verwendung von Renovierungsverfahren ab. Das dabei derzeit am häufigsten verwendete Verfahren ist laut der Umfrage der Einsatz von Schlauchlinern (auch genannt Schlauchlining oder Inlinerverfahren). Beim Schlauchliningverfahren wird ein in Reaktionsharz getränkter flexibler Schlauch aus Trägermaterial über die Einsteigschächte in den zu sanierenden Kanal eingebracht und ausgehärtet, sodass ein Kunststoffrohr im Kanalrohr entsteht (engl.: CIPP = Cured in Place Pipe). Durch den grabenlosen Einbau von Schlauchlinern werden verglichen mit Erneuerungen in offener Bauweise nicht nur wochenlange Baustellen mit ggf. auch Straßensperrungen und Störungen von Anrainern verhindert. Es kommt durch den schnelleren und unkomplizierteren Einbau auch zu einer erheblichen Einsparung an Baukosten.

Der Einbau von Schlauchlinern erfolgt in Deutschland auf kommunaler Ebene seit Mitte der 80er Jahre u.a. mit dem ersten Einbau im Hamburger Kanalnetz im Jahr 1983 und im Berliner Kanalnetz im Jahr 1986. Was damals mit ersten Pilotanwendungen im Rahmen der Einführung eines neuen Sanierungsverfahrens als Alternative zur teuren Erneuerung begann, hat sich mittlerweile aufgrund der bisher positiven Erfahrungen zu einem etablierten Kanalsanierungsverfahren entwickelt, mit bedeutenden wirtschaftlichen Auswirkungen. Binnen eines Tages eine Haltungssanierung mittels Schlauchlining fertigzustellen zu können, hat zu signifikanten Steigerungen der Sanierungsleistung im städtischen Umfeld geführt. Die Umsetzung der heute erforderlichen Sanierungslängen aus den Strategien der Kanalnetzbetreiber ausschließlich über Erneuerungen wäre für die meisten deutschen Städte aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten und der wochen- bis monatelang andauernden Baustellen mit Straßensperrungen inzwischen praktisch nicht mehr möglich.

Trotz des allgemeinen Trends zu immer mehr Renovierungen ist nach wie vor nicht fundiert nachgewiesen, von welcher technischen Nutzungsdauer bei Schlauchlinern ausgegangen werden kann, da bis dato noch kein einziger Schlauchliner das Ende seiner Nutzungsdauer erreicht hat. Daher ist es umso dringlicher, bei dem stetig zunehmenden Anteil von Linern in den Kanalnetzen ein Verständnis für das Alterungsverhalten der vielen Schlauchliner zu entwickeln, da auch sie perspektivisch saniert werden müssen. Die gegenwärtig weitverbreitete Verwendung neuer Materialien und Verfahren im Schlauchlining für Kanalnetze, deren Alterungsverhalten noch nicht umfassend erforscht ist, erfordert zudem eine gründliche Untersuchung, um zukünftige finanzielle Risiken beim Kanalnetzerhalt für die kommenden Generationen zu minimieren.

Wie bereits das Projekt SEMA-Berlin 2<sup>1</sup> (KWB, 2020) zeigte, kann das bisherige Alterungsverhalten von Kanalnetzen bei guter Datenlage mit hoher Genauigkeit in einem Modell (SEMAplus) abgebildet werden und stellt die zum heutigen Stand der Technik beste Möglichkeit dar, die zukünftige Zustandsentwicklung zu simulieren. Diese Alterungsmodellierung erfolgt im Wesentlichen auf der Grundlage kalibrierter Überlebenskurven für Materialkohorten in Form von Gompertz-Verteilungen (Riechel, 2021). Mithilfe dieser Überlebenskurven kann für jeden Zeitpunkt der Nutzungsdauer kohortenscharf die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Zustands für eine Kanalhaltung berechnet werden. Die Bestimmung der Überlebenskurven jeder Kohorte erfordern dabei präzise Kalibrierungswerte, idealerweise über die gesamte Nutzungsdauer verfügbare Zustandsdaten. Abbildung 1 zeigt die Überlebenskurven für Schlauchliner im Berliner Kanalnetz, die auf der Grundlage von Zustandsdaten von Berliner Schlauchlinern und weiterer Annahmen im Projekt SEMA-Berlin 2 2019 kalibriert wurden. Diese Überlebenskurven sind Teil des SEMAplus Strategiesimulators, mit dem die Berliner Wasserbetriebe im Rahmen ihrer strategischen Sanierungsplanung die erforderlichen Sanierungslängen und -verfahren als Grundlage für ihre Investitionsplanungen seit 2020 berechnen. Die Simulationen der Kanalnetzentwicklung in Berlin haben ergeben, dass das Alterungsverhalten der Schlauchliner einer von mehreren entscheidenden Faktoren für die Ausrichtung der Kanalsanierungsstrategie ist. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Überlebenskurven und Investitionsplanung. Um so wichtiger ist es daher, eine möglichst genaue Kalibrierung der Überlebenskurven für Schlauchliner vornehmen zu können.

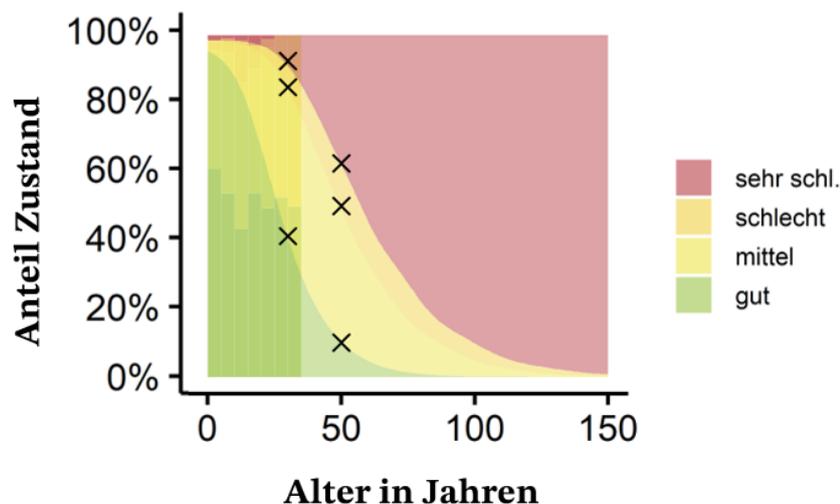


Abbildung 1: Angenommene Überlebenskurven zur Modellierung des Alterungsverhaltens von Berliner Linern; kalibriert über markierte Punkte bisheriger Annahmen des Projekts SEMA Berlin

Die Nutzung von Alterungsmodellen zur Planung des Kanalnetzerhalts wird gemäß Regelwerk lediglich als eine Möglichkeit genannt und spezifiziert die Art der technischen Umsetzung der Modellierungen nicht weiter (DWA-M 143-14). Die Nutzung von Überlebenskurven zur Simulation des Alterungsverhaltens ist dabei nur eine mathematische Option unter vielen.

<sup>1</sup> Seit 2016 entwickeln die Berliner Wasserbetriebe gemeinsam mit der Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH in mehreren SEMA-Projekten (SEMA Berlin 1 bis 3) Simulatoren zur Abbildung der Alterung des Kanalnetzes und einzelner Kanalhaltungen, die SEMAplus-Simulatoren.

Man findet daher in den Regelwerken keine Angaben zu Überlebenskurven im Allgemeinen bzw. Schlauchlinern im Besonderen. In den Regelwerken finden sich bezüglich des Alterungsverhaltens von Kanälen lediglich die materialspezifischen Angaben zur technischen Nutzungsdauer.

Der Begriff „technische Nutzungsdauer“ dieses Berichts beschreibt, anlehnend an die Definition des DWA-A 143-3, die Dauer, für die ein Schlauchliner ohne Kosten für Instandsetzungsmaßnahmen einen sicheren Kanalbetrieb gewährleisten muss. Schlauchliner sind bei mangelfreiem Einbau im Rahmen der bauaufsichtlichen Zulassungen auf eine technische Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgelegt. Diese Nutzungsdauer entstammt den Eignungsnachweisen, die für diesen Zeithorizont ausgelegt sind (RSV-M 1.1). Daher ist aufgrund mangelnder belastbarer Daten im DWA Arbeitsblatt DWA-A 143-3 eine „wirtschaftlich angemessene Nutzungsdauer“ von 50 Jahren festgelegt worden, an der sich die allgemeine Einschätzung derzeit orientiert. Zum heutigen Tag gibt es in Deutschland noch keinen einzigen Schlauchliner, der ein Alter von 50 Jahren oder mehr aufweist. Zudem haben sich die verwendeten Materialien und Einbauverfahren beim Schlauchlining innerhalb der vergangenen Jahrzehnte weiterentwickelt, sodass ein 30-Jahre alter Schlauchliner nur bedingt mit einem 5-Jahre alten Liner vergleichbar ist und somit die Übertragbarkeit möglicher Schadenserkenntnisse genau geprüft werden muss. Somit lässt sich zusammenfassen: es besteht eine Unsicherheit bezüglich der Einschätzung der gesicherten Eintrittswahrscheinlichkeit der bisher in den bautechnischen Zulassungen und Regelwerken angenommenen 50 Jahre Nutzungsdauer von Schlauchlinern aufgrund

- der Festlegung der technischen Nutzungsdauer in den Regelwerken als Expertenschätzung ohne vollständige Datengrundlage,
- nach wie vor fehlende Daten zum Alterungsverhalten über die gesamte technische Nutzungsdauer von Linern und
- der technologischen Weiterentwicklung mit vermutlichen Auswirkungen auf das Alterungsverhalten von Linern.

Diese Unsicherheit gibt Anlass zur genaueren Untersuchung des Alterungsverhaltens bzw. der technischen Nutzungsdauer und Zustandsentwicklung von Schlauchlinern, welche Gegenstand dieses Berichts ist.

Der vorliegende Bericht baut auf den Erkenntnissen einer im Jahr 2017 stattgefundenen Literaturrecherche (Wicke, 2017)<sup>2</sup> und Datenauswertung auf Basis des Berliner Kanalnetzes (Riechel, 2017) am Kompetenzzentrum Wasser Berlin sowie einer erneuten Literaturrecherche, einer Interviewkampagne und einer aktuellen Datenauswertung aus dem Jahr 2023 der Berliner Wasserbetriebe auf. Im Fokus der Untersuchungen stehen die technische Nutzungsdauer von Schlauchlinern sowie die maßgeblichen Einflussfaktoren. Dazu zählen relevante Schäden im Zusammenhang mit Schlauchlinern und mögliche Präventivmaßnahmen. Die folgenden Kapitel dieses Berichts fassen drei Methodenschwerpunkte der Untersuchungsreihe zusammen:

1. eine umfassende Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung aufbauend auf den Erkenntnissen von Wicke (2017),
2. die Auswertung einer breit angelegten Interviewkampagne und

---

<sup>2</sup> Der in Wicke (2017) verwendete Begriff „Lebensdauer“ entspricht nicht der Definition der technischen Nutzungsdauer und wird daher in diesem Bericht nicht genutzt mit Ausnahme von Verweisen wie beispielsweise in Kap. 3.1.

3. eine Datenanalyse bereits langjährig betriebener Schlauchliner.

Die Erkenntnisse aus den Methodenschwerpunkten werden durch zusätzliche Erkenntnisse aus parallel zu dieser Studie durch die Berliner Wasserbetriebe geführte, vertiefende Fachgespräche mit anderen Betreibern und Fachexperten der DWA-Arbeitsgruppe ES 8.6<sup>3</sup> ergänzt (vgl. Kap. 6).

Die in den kommenden Abschnitten präsentierten Informationen und Erkenntnisse sollen einen Überblick über den derzeitigen Stand von Forschung und Praxis über die technische Nutzungsdauer von Schlauchlinern geben. Darüber hinaus sollen die Erkenntnisse dieses Berichts als Grundlage für die Überarbeitung der in Abbildung 1 dargestellten Alterungskurven bei den Berliner Wasserbetrieben sowie für weitergehende Forschungsarbeiten dienen und entsprechende Handlungsempfehlungen für eine zukünftig noch bessere Abschätzung des Alterungsverhaltens und der Nutzungsdauer von Schlauchlinern geben.

Zur Vereinfachung wird in diesem Bericht der Begriff „Nutzungsdauer“ anstatt der „technischen Nutzungsdauer“ und „Liner“ synonym für „Schlauchliner“ verwendet. Auch werden vereinfachend im Folgenden die Schlauchliner Überlebenskurven der einzelnen SEMAplus-Zustandsbereiche als Liner-Überlebenskurve bezeichnet.

---

<sup>3</sup> DWA-Arbeitsgruppe ES-8.6 „Auskleidung von Abwasserleitungen und -kanälen mit örtlich hergestellten und erhärtenden Rohren“ im DWA-Fachausschuss ES-8 „Sanierung“

## 2. Methodisches Vorgehen dieser Studie

Das Ziel dieser Studie besteht darin, eine fundiertere Datengrundlage für die Erstellung einer Liner-Überlebenskurve (ÜLK) zu entwickeln, die in den SEMAplus Alterungsmodellen für das Berliner Kanalnetz angewendet werden kann. Da keine weiteren Überlebenskurven (ÜLK) für Schlauchliner außer der aus den SEMA Berlin-Projekten bekannt sind, und das Alterungsverhalten von Linern gewöhnlich über Angaben zur technischen Nutzungsdauer behandelt wird, erfolgt eine Analyse der Annahmen zur technischen Nutzungsdauer, die bei Betreibern und in den Regelwerken verbreitet Anwendung finden.

Die Beziehung zwischen Nutzungsdauer und ÜLK ist äußerst komplex. Die technische Nutzungsdauer ist dabei eine starke Vereinfachung eines statistisch komplexen, zeitlich variablen Zusammenhangs wie der ÜLK. Die Frage, wie man von einer Zahl zu einem zeitlichen Zustandsverlauf kommt, ist nicht nur bezogen auf das Alterungsverhalten bisher nicht definiert. Daher wurde für die Erstellung der Liner-ÜLK bei den Berliner Wasserbetrieben die folgende Annahme zum Bezug zwischen Nutzungsdauer und ÜLK getroffen:

Gemäß den Festlegungen aus dem Projekt SEMA-Berlin 2 sind zum Zeitpunkt „Ende der technischen Nutzungsdauer“ 50 % der gelinerten Haltungen in einem sanierungsbedürftigen Zustand, was den SEMAplus-Zustandsklassen „sehr schlecht“ und „schlecht“ entspricht.

Da es seit 2019 zu neuen Erkenntnissen im Bereich der Lineralterung gekommen ist und mittlerweile mehr Daten zum Zustand von Linern und dem Einbau vorliegen, erfolgt die Überprüfung bzw. Anpassung der Liner-ÜLK als Ergebnis dieser Studie. Für eine genaue Kalibrierung von ÜLK ist im Allgemeinen die Verwendung einer zustandsbezogenen Datenbasis über die gesamte Nutzungsdauer hinweg notwendig, die im Fall der Liner noch nicht vollständig existieren. Die Analyse der Nutzungsdauer stellt daher einen zusätzlichen Anhaltspunkt für die Kalibrierung der Liner-ÜLK dar, an der sich weitere, erforderliche Annahmen für Modellierung der ÜLK orientieren. Die methodische Vorgehensweise dieser Studie besteht darin, in einem dreiteiligen Verfahren zu einer Datengrundlage für die Erstellung der allgemeinen Liner-ÜLK zu gelangen.

Im ersten Schritt werden in einer Literaturrecherche alle Einflussfaktoren für den Alterungsprozess von Linern identifiziert und auf ihre Signifikanz für den Alterungsprozess von Linern beurteilt. Weitergehend wird der vorhandene Datenbestand und die Optionen für nachträgliche und zukünftige Datenerhebungen auf der Grundlage aktueller Erkenntnisse soweit möglich bewertet.

Im zweiten Schritt erfolgt die Auswertung einer Interviewkampagne von Expert:innen aus Forschung und Praxis zu den Themen Nutzungsdauer bzw. ÜLK von Linern.

Im dritten Schritt wird geprüft, ob in der Literatur oder bei den Befragten bereits ÜLK für Liner existieren, die die Berliner Wasserbetriebe in Verbindung mit der Auswertung der Datenaufbereitung von bekannten Zuständen der Liner im eigenen Kanalnetz zur Aktualisierung der unter den beschriebenen Annahmen kalibrierten Liner-ÜLK in den SEMAplus Simulatoren anwenden könnten.

Die Faktorenanalyse, die Ergebnisse der Befragung und die aktualisierte Analyse von Linerzuständen im eigenen Kanalnetz bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung der Modellierung der Liner-ÜLK bei den Berliner Wasserbetrieben. Zusätzlich dazu werden weitere Erkenntnisse aus parallel zu dieser Studie erfolgten Fachgesprächen zwischen den Berliner Wasserbetrieben und anderen Betreibern bzw. Fachexperten der DWA-Arbeitsgruppe ES 8.6 und bei der Empfehlung für weitere Forschungsaktivitäten berücksichtigt.

## 3. Literaturrecherche

### 3.1. Ausgangslage

Bereits im Jahr 2017 wurde am KWB eine umfangreiche Literaturrecherche von Dr. Daniel Wicke mit dem Titel „Untersuchung der Lebensdauer von Schlauchlinern“ (siehe Anmerkung in Einleitung & Motivation zur Begriffseinordnung) durchgeführt. Wicke (2017) untersuchte, ob Liner eine Lebensdauer von 50 Jahren oder sogar mehr erreichen können. Aus der Untersuchung wurden folgende Schlüsse gezogen:

- Steigender Trend der Qualität und Qualitätssicherung beim Einbau von Linern
- Verwendete Materialien der Liner im Kanalbetrieb wurden generell als robust und langlebig bewertet
- Abnutzungserscheinungen an Linern im Betrieb waren in den meisten Fällen auf Einbaufehler zurückzuführen
- Laborseitige Studien schätzten eine „Lebensdauer“ von über 50 Jahren als sehr wahrscheinlich ein, sofern ein korrekter Einbau erfolgt ist (Allouche et al., 2014)

Die Arbeit endet mit dem Fazit, dass die angenommene „Lebensdauer“ von 50 Jahren in der Literatur unterstützt wird, doch aufgrund fehlender Langzeitdaten genaue Aussagen zur „Lebensdauer“ nicht gemacht werden können. Ziel der vorliegenden Literaturrecherche ist eine Einbeziehung der neuen Literatur zur Nutzungsdauer von Linern seit Wicke (2017).

### 3.2. Herstellung und Einbau von Linern

Liner werden aus einem Verbundwerkstoff hergestellt, der aus den Hauptkomponenten Träger-/Verstärkungsmaterial und Harz besteht. Die tragenden und verstärkenden Fasern werden aus Glasfasern, Synthese-/Polymerfasern (Nadelfilz) oder einer Kombination aus Glas- und Synthesefasern gebildet (Bosseler and Schlüter, 2003). Für das Harzmaterial, das für die Verbindung und Stabilität der Fasern sorgt, werden hauptsächlich ungesättigte Polyesterharze (UP), oder seltener bei hohen chemischen und thermischen Anforderungen Vinylesterharze (VE) sowie oft bei Hausanschlüssen Epoxidharze (EP) verwendet (Wicke, 2017). Dazu können Liner noch Füllstoffe, wie z.B. Quarzsand enthalten und mit einer Innen- sowie Außenfolie versehen sein. Bei heutigen Einbauten von Linern werden nach Buchner et al. (2021) in der Regel drei Aushärtungssysteme verwendet:

- Glasfaserliner mit UV-initiiertem Härten (durch einen fahrbaren Lampenzug),
- Synthesefaserliner (Nadelfilzliner) mit Wärme-initiiertem Aushärten (durch Warmwasser oder Wasserdampf) oder
- ein Glasfaserliner mit einer Kombinationshärtung aus UV- und Wärme-Initiatoren

Glasfaser Schlauchliner mit UV-initiiertem Härten werden zunehmend zum Standardverfahren im Schlauchlining. Sie weisen deutlich bessere mechanische Eigenschaften auf als herkömmliche Nadelfilzliner auf und Ji et al. (2020) konnten innerhalb einer laborseitigen Studie bei Verwendung von Glasfaserlinern mit UP-Harzen Festigkeiten erlangen, die die Mindestanforderungen des Standards der „American Society for Testing and Materials“ ASTM F1216 um das 8- bis 13-fache übertrafen. Dies erlaubt es, Glasfaserliner in geringeren Wändicken als Nadelfilzliner einzubauen. Trotz der vielversprechenden mechanischen Materialeigenschaften der UV-gehärteten Glasfaserliner stellt der Härtenprozess mittels UV in der Praxis jedoch wegen der

Risiken von Aushärtungsdefiziten eine Herausforderung dar. Gründe hierfür entstammen den vielzähligen Einflussparametern des Lichthärtungsprozesses, die das Kap. 3.5.1 genauer beleuchtet. Die unterschiedlichen verwendeten Materialien und Einbauverfahren (insbesondere Härtungsmethoden) haben zur Folge, dass eine Betrachtung der Nutzungsdauer für diese unterschiedlichen Linerarten differenziert erfolgen muss.

Zu den oben genannten Materialverbunden (Glasfaser- oder Nadelfilzliner) sind keine Studien bekannt, die das Alterungsverhalten als Kanalliner beschreiben. Da aber faserverstärkte Kunststoffe generell in vielen Bereichen zur Anwendung kommen (z.B. im Flugzeugbau oder Sportbereich), gibt es Veröffentlichungen von materialtechnischen Untersuchungen zu verwandten Verbundstoffen. Studien zum Alterungsverhalten von faserverstärkten Kunststoffen (Gibhardt et al., 2022; Meng and Wang, 2016; Xu et al., 2020) betonen deren hohe Sensitivität gegenüber UV-Strahlung, Temperatur und Feuchtigkeit und untersuchten die Zusammenhänge. Hierbei zeigt sich aber eine eingeschränkte Übertragbarkeit auf Liner im Kanal, da sich die Untersuchungen auf hohe Temperaturbereiche über 30 °C beziehen, die ebenso wie UV-Strahlung normalerweise im Kanalbetrieb nicht vorkommen, abgesehen vom Aushärtungsprozess des Liners. Damit könnten lediglich Informationen zu den Auswirkungen starker Feuchtigkeit wie beispielsweise Angaben zum Verhalten von Verbundmaterialien im Schiffsbau auf das Milieu im Kanal übertragbar sein. Da die beschriebenen Alterungsprozesse stets eine Kombination aus mehreren Faktoren bilden (z.B. die Interaktion zwischen UV-Strahlung, Temperaturänderungen und mechanischer Belastung), sind diese Informationen dann doch nicht für die Ableitung des Alterungsverhalten von Schlauchlinern nutzbar. Demnach sollten die für den Einsatz von Linern spezifischen Einflussfaktoren eingehender untersucht werden. Dies erfolgt in den folgenden Kapiteln.

### **3.3. Messgrößen von Linern**

Die folgenden messbaren Größen dienen der Bewertung der Liner-Qualität und können entweder im Labor oder in situ, d.h. an Ort und Stelle im Kanal gemessen werden.

#### **3.3.1. Materialeigenschaften**

Liner weisen wie andere Kunststoffe auch ein viskoelastisches Materialverhalten auf. Dies bedeutet, dass sie unter Lasteinwirkungen verzögerte und auch bleibende Verformungen aufweisen können, was die Standsicherheit beeinträchtigen kann. Daher ist es wichtig, bei der Untersuchung der mechanischen Materialeigenschaften von Linern zwischen Kurzzeit- und Langzeitkennwerten zu unterscheiden. Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften gehört zu den Materialeigenschaften auch die Wasserdurchlässigkeit. Tabelle 1 fasst die wesentlichen Materialeigenschaften eines Liners zusammen. Die weiteren Materialeigenschaften wie Reststyrolgehalt, die Dichte des Verbundmaterials, das Infrarotspektrum sowie die Bestimmung des Aushärtegrades werden im Abschnitt 3.4.3 genauer erklärt und sind in der folgenden Tabelle 1 nicht enthalten.

Tabelle 1: Wesentliche Materialeigenschaften von Linern mit den jeweiligen Prüfverfahren nach Wicke (2017), weiterführende Informationen in Wicke (2017) und dem DWA-A 143-3

Eigenschaft	Kurzbeschreibung	Prüfverfahren
Biegefestigkeit	Punkt des Liner-Versagens aufgrund hoher Spannung	Dreipunkt-Biegeversuch
Kurzzeit-Elastizitätsmodul	Spannungs-Dehnungs-Verhältnisse im Liner	Dreipunkt-Biegeversuch
Langzeit-Elastizitätsmodul	Spannungs-Dehnungs-Verhältnisse im Liner	Scheiteldruckversuch (24h)
Kriechneigung	Verformungsverhalten eines Liners unter konstanter Last	Kriechneigungsversuch (24h)
Wasserdurchlässigkeit	Dichtheit des Liners	Dichtheitsprüfung

Die genannten mechanischen Eigenschaften eingebauter Liner sind für eine DIBt-konforme Ausführung<sup>4</sup> mit ihren Mindestwerten einzuhalten (siehe auch Kap. 3.4.3). Nicht eingehaltene mechanische Materialeigenschaften (insbesondere nach Einbau) bieten keine Gewährleistung der Einhaltung einer zu erwartenden Nutzungsdauer. Mehrere laborseitige Studien untersuchten langjährig betriebene Liner auf ihre mechanischen Kurzzeitkennwerte und weitere Eigenschaften, um einen möglichen Zusammenhang zum Alterungsverhalten zu analysieren. Allouche et al. (2014) untersuchten Proben von vier verschiedenen Linerstandorten mit jeweils 25, 23, 21 und 5 Jahre alten Nadelfilzlinern. Bei den Laboruntersuchungen zeigte sich, dass einige Proben ein verringertes E-Modul aufwiesen verglichen mit dem ursprünglichen Wert kurz nach dem Einbau. Die Autoren der Studie gingen jedoch nicht von einem direkten Zusammenhang dieser verringerten Festigkeitswerte mit den allgemeinen Alterungsprozessen aus. Sie sahen eine Nutzungsdauer von 50 Jahren und sogar darüber hinaus als sehr wahrscheinlich an. Eine weitere Studie beschrieben in Hoppe (2008) untersuchte die Proben von zwei Nadelfilzlinern mit einem Alter von jeweils 25 und 19 Jahren und einem Glasfaserliner mit einem Alter von 12 Jahren. Die Untersuchung zeigte keine bis sehr geringe Abweichungen der ursprünglichen mechanischen Kurzzeitkennwerte kurz nach Einbau unabhängig vom verwendeten Material bzw. von der Herstellungsart. Bosseler et al. (2024) beschreiben eine Prüfkampagne von 18 Nadelfilzlinern, die zwischen 8 und 26 Jahren im Betrieb waren. 11 dieser 18 getesteten Linerproben konnten die geforderten Mindestwerte der Biegefestigkeit einhalten, jedoch haben nur drei der 18 Liner die Dichtheitsprüfung bestanden. Keiner der getesteten Nadelfilzliner hat beide Prüfungskriterien erfüllt. Dabei sind die Mängel eher auf den Einbauprozess zurückzuführen und weniger auf Alterungsprozesse. Dies zeigt auch die Analyse von Linerabnahmen in Bosseler et al. (2009), wobei 9 von 15 untersuchten Linern nach Einbau die mechanischen Kurzzeitkennwerte, Dichtheit oder Wanddicke nicht einhielten. Darunter befanden sich vier Nadelfilzliner (davon drei mit nicht bestandener Abnahmeprüfung) und elf Glasfaserliner (davon sechs mit nicht bestandener

<sup>4</sup> Einhaltung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

Abnahmeprüfung). Eine Untersuchung des allgemeinen Alterungsverhaltens von glasfaserverstärkten Kunststoffen mit künstlicher Alterung im Labor (Laurikainen, 2017) zeigte, dass der E-Modul des untersuchten VE-Harzes trotz optisch sichtbarer Alterungserscheinungen kaum bis keine Veränderungen aufwies.

Obwohl die Biegefestigkeit und der Kurzzeit-E-Modul die am häufigsten gemessenen Daten sind (Allouche et al., 2014) und auch bei oben erwähnten Langzeituntersuchungen eingebauter Liner gemessen werden, konnte in bisherigen Studien keine direkte Korrelation zwischen Alterungsprozessen und diesen mechanischen Kennwerten nachgewiesen werden. Es bleibt zu untersuchen, ob aufgrund der relativ geringen Probenanzahl und/oder überlagernder Faktoren wie unterschiedlicher Einbauqualitäten keine Korrelation zu beobachten war oder tatsächlich kein relevanter Zusammenhang zwischen Alterungsprozessen und mechanischen Kennwerten besteht.

### 3.3.2. Geometrieigenschaften

Geometrische Eigenschaften von Linern sind relevant für die Gewährleistung der Standsicherheit und Betriebssicherheit und umfassen die Wanddicke, den Ringspalt zwischen Liner und Altrohr sowie mögliche Vorverformungen. Alle drei geometrischen Eigenschaften lassen sich in situ messen. Die Wanddicke und der E-Modul definieren zusammen die Steifigkeit eines Liners. Die in Tabelle 2 gelisteten geometrischen Eigenschaften fokussieren sich in erster Linie auf Einbaumängel. Unzureichende Wanddicken oder Vorverformungen an eingebauten Linern sowie das Auftreten von Ringspalten können Mängel darstellen, die die statische Sicherheit und damit die zu erwartende Nutzungsdauer gefährden (Genauerer dazu in Kap. 3.5). Allerdings lassen sich Daten solcher Mängel bisher nur qualitativ bewerten und eignen sich daher nicht für die Kalibrierung neuer Überlebenskurven von Linern.

Tabelle 2: Geometrieigenschaften von Linern nach Wicke (2017), weiterführende Informationen in Wicke (2017) und dem DWA-A 143-3

Eigenschaft	Kurzbeschreibung	Prüfverfahren
Wanddicke	Mittlere Verbunddicke eines Liners	Messung an Probe
Ringspalt	Abstand zwischen Liner und Altrohr	Impakt-Echo-Verfahren, Messung bei Probenahme
Vorverformungen	Falten, Abflachungen oder Ovalisierungen, die den Beulwiderstand vermindern	Optische Inspektion, Rundheitsmessung, Laserringprojektionsverfahren

### 3.3.3. Beständigkeit gegenüber betrieblichen Belastungen

Zu der Beständigkeit gegenüber den aus dem Betrieb entstehenden Belastungen zählen die Materialbeständigkeit gegenüber Abrieb sowie die Hochdruckspülfestigkeit von Linern. Beide Eigenschaften (siehe Tabelle 3) sind intensitätsabhängig und können mithilfe von Laborversuchen simuliert bzw. ermittelt werden (Wicke, 2017). Aufgrund der Intensitätsabhängigkeit lassen sich diese Messgrößen nicht auf tatsächlich im Kanal auftretende Spül- oder Abriebschäden

übertragen. Eine haltungsscharfe Erfassung dieser Schäden in situ könnte im Rahmen von optischen Inspektionen erfolgen. Eine mögliche Identifikation von Abnutzungserscheinungen aus dem Betrieb können gute Indizien für eine Alterungsabschätzung des betreffenden Kanals darstellen.

Tabelle 3: Betriebliche Belastungsfähigkeit von Linern nach Wicke (2017), weiterführende Informationen in Wicke (2017) und dem DWA-A 143-3

Eigenschaft	Kurzbeschreibung	Prüfverfahren
Abriebfestigkeit	Verschleißfestigkeit gegenüber Sedimenten	Optische Inspektion, Darmstädter Kipprinne
Spülfestigkeit	Widerstandsfähigkeit von Linern gegenüber Hochdruckspülungen	Hochdruckspülfestigkeitprüfung nach DIN 19523

### 3.4. Qualitätsprüfung von Linern

#### 3.4.1. Prüfungen im Kanal

Zum heutigen Stand ist es gängige Praxis, bei Abnahme eines Linereinbaus neben einer Probenahme mit Laboruntersuchung, eine optische Inspektion sowie eine Dichtheitsprüfung durchzuführen (Wicke, 2017). Jedoch zeigen die vorangegangenen Abschnitte, dass bereits neuere in situ-Prüfverfahren für umfassendere Zustandsbeurteilungen existieren, die in Wicke (2017) genauer beschrieben sind. Über die optische Inspektion als Standarderfassungsverfahren gemäß Regelwerk können zusätzlich zu den gängigen Schäden nicht renovierter Kanäle (z.B. Risse, Wurzeln, Hindernisse etc.) auch linerspezifische Schäden wie Oberflächenunregelmäßigkeiten (z.B. Falten), defekte Hausanschlüsse sowie Verformungen und Verfärbungen erfasst werden (DIN EN 13508-2 bzw. DWA-M 149-2, Schadenskode BAK). Es besteht in Fachkreisen dabei weitestgehende Einigkeit darüber, dass sich die Einbauqualität derzeit am besten umsetzbar über eine Probenahme mit anschließender Laboruntersuchung neben der Erfassung und Auswertung prozessbegleitender Parameter des Linereinbauvorgangs prüfen lässt.

#### 3.4.2. Probenahme

Die Probenentnahme des Liners bei den Berliner Wasserbetrieben erfolgt unmittelbar nach seiner Abkühlung auf Umgebungstemperatur nach erfolgter Aushärtung, im Bereich der Zwischen- und Endschächte. Dabei ist zu beachten, dass die entnommene Probe repräsentativ für den Aushärtungsgrad innerhalb des Rohrbereichs ist. Probestücke von UV-gehärteten Linern müssen direkt nach ihrer Entnahme lichtundurchlässig verpackt werden, um eine Kontamination durch Sonneneinstrahlung und eine damit verbundene künstliche Weiterhärtung der Probe im Vergleich zum eingebauten Liner im Kanal zu vermeiden. Aufgrund der im Überstand des Schachtbereiches entnommenen Probe direkt nach Linereinbau bleibt das Verschließen der Probenahmestelle erspart. Sofern eine spätere Probenahme im Laufe der Nutzungsdauer im Haltungsanfang bzw. Kanal erfolgt, muss die fehlenden Probeentnahmestelle am eingebauten Liner durch eine örtliche Reparaturmaßnahme (beispielsweise Verspachtelung oder Harzinjektion) verschlossen werden.

### 3.4.3. Laborprüfungen

Die Laborprüfung gemäß DWA-A 143-3 beinhaltet eine Dichtheitsprüfung (in Anlehnung an DIN EN 1610) und den Dreipunkt-Biegeversuch zur Prüfung der mechanischen Kurzzeitkennwerte, der standardmäßig radial durchgeführt wird (nach DIN EN ISO 178, DIN EN ISO 11296-4). Sofern die vorgegebenen Sollwerte der mechanischen Kennwerte nicht erreicht werden, erfolgt eine Prüfung der Kriechneigung sowie der Aushärtung. Hierbei wird der 24-Stunden-Kriechneigungsversuch (in Anlehnung an DIN EN ISO 899-2, DIN EN 761) durchgeführt, um das Langzeitverhalten zu überprüfen. Zusätzlich wird bei Verwendung von UP- und VE-Harzen der Reststyrolgehalt (nach DIN 53394-2) bestimmt und bei Epoxidharzen die Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC-Analyse) nach ISO 11357-2 angewendet. Dabei werden diese Messungen in der heutigen Praxis oftmals als Mittelwert über die Linerwanddicke ermittelt. Aufgrund der oft an der Außenseite des Liners liegenden Härtingsdefizite besteht die Gefahr, dass die wahren Härtingsdefizite durch den Mittelwert überdeckt werden. Sollten die Sollwerte auch nach diesen Prüfungen nicht erreicht werden, kann die Möglichkeit einer Zweitbeprobung in Erwägung gezogen werden. Der Reststyrolgehalt darf nach DIN 53394-2 den Grenzwert von 2 Mass. % bezogen auf das Laminat bzw. 4 Mass. % bezogen auf den Harzanteil (siehe Tabelle 4) nicht überschreiten.

Ab dem Zeitpunkt der Probenahme, die direkt nach Linereinbau durchzuführen ist, dauert es nach Einsendung der Probe in ein Prüflabor etwa 6-8 Tage bis zur Übermittlung des Prüfberichts über die Beurteilung der geschilderten Prüfungen (Buchner et al., 2021). Allerdings hat dieser Prozess zwei entscheidende Nachteile. Zum einen bestehen keine Möglichkeiten zur Nachbesserung des Linereinbaus nach Abschluss des Einbauvorgangs, also weder zum Zeitpunkt der Probenahme noch beim Erhalt des Laborberichts. Zum anderen garantiert eine bestandene Laborprüfung eines eingebauten Liners keine vollständige Aushärtung des Liners, da der Aushärtungsgrad nur geprüft wird, wenn der Dreipunkt-Biegeversuch nicht bestanden ist (siehe oben). Dazu stellten Buchner et al. (2021) in der Praxis kaum bis keine Korrelation zwischen mechanischen Kurzzeitkennwerten (Biegefestigkeit und Kurzzeit-E-Modul) und Reststyrolgehalt fest. Demgegenüber stehen die Ergebnisse einer Vergleichsstudie mit vollständig und unvollständig ausgehärteten Linern, die geringere E-Module bei mangelnder Aushärtung feststellte (Nuruddin, 2020). Auf Basis des aktuellen Kenntnisstands können von verminderten mechanischen Kurzzeitkennwerten keine unmittelbaren Rückschlüsse auf Aushärtungsdefizite gezogen werden. Das Verständnis des Zusammenhangs könnte durch zusätzliche Untersuchungen unter definierten Bedingungen verbessert werden. Zur Sicherstellung der vollständigen Aushärtung eines eingebauten Liners sollte demnach neben den mechanischen Kurzzeitkennwerten in allen Fällen immer auch der Aushärtungsgrad im Labor bestimmt werden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Verpackung, die Lagerung und den Transport der Probe zum Labor wäre eine Aushärtungskontrolle während des Einbaus besser geeignet und präventiv angelegt. Genaueres zur in situ Aushärtungskontrolle folgt in Kap. 3.5.1.3. Diese Maßnahmen erlauben eine größere Sicherheit bei der Vorhersage der Nutzungsdauer sowie der Erstellung von Überlebenskurven. Die Wichtigkeit der Aushärtung für die Nutzungsdauer von Linern und der Kalibrierung entsprechender Überlebenskurven ist in Kap. 3.5.1 und Kap. 4.2.3.

### **3.5. Aktuelle Herausforderungen und Problemanalysen im Zusammenhang mit Linern**

Aufbauend auf den im vorangegangenen Kapitel gezeigten Eigenschaften von Linern folgt in diesem Unterkapitel eine Darstellung von möglichen Defiziten und Herausforderungen an Linern aus der aktuellen Literatur der vergangenen 5 Jahre. Zu den nutzungsdauerverkürzenden Schäden und Herausforderungen im Zusammenhang mit Linern zählen Aushärtungsdefizite, fehlende geometrische Integrität von Linern, Faltenbildungen und Oberflächenunregelmäßigkeiten sowie nicht fachgerecht hergestellte Anbindungsstellen.

#### **3.5.1. Aushärtung von Linern**

##### **3.5.1.1. Materialspezifische Voraussetzungen zur UV-initiierten Aushärtung**

Der Härtingsprozess beim Einbau von Linern wird von der Wahl des Harzsystems (siehe Kap. 3.2) bestimmt. Dieses setzt sich aus mehreren Bestandteilen zusammen, darunter das eigentliche Harz, der Härter sowie verschiedene Füllstoffe und Zusatzstoffe. Ein wichtiger Steuerparameter styrolhaltiger Harze (in der Regel in UP- und VE-Harzen enthalten) ist der Gehalt an Styrol. Im unvernetzten Zustand liegt der Styrolgehalt optimalerweise zwischen 40-55 %. Styrol ist ein Monomer und erfüllt die entscheidende Funktion der Imprägnierung und Quervernetzung der Fasern zu einem Polymer während des Härtingsprozesses (Buchner et al., 2021).

Während der Härting des Linermaterials erfolgt eine zunehmende Vernetzung der Monomere zu Polymeren. Mit fortschreitender Härting wird es jedoch schwieriger für die Monomere, noch freie Reaktionspartner zu finden. Das hat zur Folge, dass im fertigen, ausgehärteten Polymer zwangsläufig Restmonomere verbleiben. Ein niedriger Restmonomergehalt stellt keinen Qualitätsmangel dar (Buchner et al., 2021). Für einen möglichst niedrigen Restmonomergehalt im Endprodukt ist der Harz-/Faser-Anteil beim Einbau entscheidend. Dieser liegt bei einem in Harz getränkten Liner vor Einbau in der Regel zwischen 40-60 % (Kopietz, 2023).

Eine vollständige Aushärtung des Materials ist möglich, sofern die genaue Zusammensetzung des Harzes bekannt ist und die Härtingsbedingungen optimal gestaltet werden können. Allerdings stellen Baustellenbedingungen oft eine Herausforderung dar, da sie häufig sehr wechselhaft und nicht immer ideal sind. Tabelle 4 stellt einen Vergleich der Reststyrolbegrenzungen nach Aushärtung des Liners dar. Die DWA begrenzt in ihrem Merkblatt DWA-M 144-3 den Reststyrolgehalt auf 8 Mass. % bezogen auf den Harzanteil bzw. auf 4 Mass. % bezogen auf ein Probestück. Dieser Grenzwert ist fachlich umstritten. Er wird von den Verfasserinnen und Verfassern des RSV-M 1.1 als zu hoch eingeschätzt und erfordere eine Überarbeitung. Aufgrund der Überarbeitung durch die DWA und der strengen Einstufung durch die AVK, bietet sich zum heutigen Stand des Wissens der Grenzwert der DIN 53394-2 zur Anwendung für die Praxis an. Darüber hinaus rät Kopietz (2023) sich bei der Begrenzung des Reststyrolgehalts auf den reinen Harzanteil zu beziehen, um eine Beeinflussung des Grenzwertes durch die variablen Harz-Faser-Verhältnisse zu verhindern. Diese Betrachtung macht den Grenzwert genauer.

Tabelle 4: Begrenzungen für Reststyrol aus Literatur / Regelwerken in Massenprozent bezogen auf das Laminat / ein Probestück und bezogen auf den Harzanteil; mit \* markierte Werte sind Umrechnungen unter Annahme eines mittleren Harz-/Faseranteils von 50 %

Regelwerk / Literatur	Begrenzung Reststyrol bezogen auf Laminat	Begrenzung Reststyrol bezogen auf Harzanteil
DWA-M 144-3	4 Mass. %	8 Mass. %
DIN 53394-2	2 Mass. %	4 Mass. %*
Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V. (AVK): Handbuch Faserverbundkunststoffe (Kunststoffe eV, 2010)	1 Mass. %*	2 Mass. %

### 3.5.1.2. Auswirkungen von Aushärtungsdefiziten

Die Auswirkungen von Aushärtungsdefiziten UV-gehärteter Liner auf den Alterungsprozess wurden in der Studie von Nuruddin et al. (2020) aus den USA aufgezeigt. Es wurden im Feldversuch eine Gruppe von Linern vollständig ausgehärtet, während eine zweite Gruppe nicht vollständig ausgehärtet wurde. Bei den unvollständig ausgehärteten Linern zeigte sich ein höherer Anteil flüchtiger Bestandteile, eine schlechtere Temperaturbeständigkeit sowie geringere Scherfestigkeit und ein geringerer E-Modul verglichen mit den vollständig ausgehärteten Linern. Weiterhin hat die Untersuchung gezeigt, dass die Feuchtigkeitsaufnahme von Wasser und Salzlösungen sich bei vollständig ausgehärteten Linern nach dem Fick'schen Diffusionsgesetz, das den Zusammenhang zwischen Konzentrationsgradienten und Stofftransport beschreibt, verhält. Für die unvollständig ausgehärteten Liner war dieses Gesetz nicht anwendbar aufgrund von Unterbrechungen in der Materialstruktur sowie stärkerer Hydrolyseanfälligkeit. Somit weisen unvollständig ausgehärtete Liner abweichende und unkalkulierbare Feuchtigkeitseinlagerungen im Laminat auf, was wiederum zu Undichtigkeiten, verringerter Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Belastungen und schnellerem Materialversagen unter Belastungen führen kann. Die Studie hat damit gezeigt, dass die konventionellen Berechnungsansätze und physikalischen Annahmen, die von einem vollständig ausgehärteten Linerprodukt ausgehen, durch Aushärtungsdefizite teilweise an Gültigkeit verlieren und die damit verbundene erwartbare Nutzungsdauer deutlich verkürzt ausfallen kann. Eine Quantifizierung der Nutzungsdauerverkürzung hängt vom Ausmaß des Aushärtungsdefizits ab und stellt bisher eine große Unsicherheit dar. Auch Buchner et al. (2021) weist auf den wesentlichen Einfluss des Härtingsgrades auf die Hydrolysebeständigkeit und dem davon abhängigen Langzeitverhalten eines Liners hin.

In Buchner et al. (2021) werden Aushärtungsmängel an Linern am Fallbeispiel der Stadt Hamburg thematisiert. In der Stadt Hamburg werden jährlich etwa 10-12 km der Kanäle mittels Schlauchlining renoviert. Dabei handelt es sich aktuell hauptsächlich um gemauerte Eiprofile mit einer Höhe von bis zu 1,30 m. Der Betreiber Hamburg Wasser berichtet, dass in ca. 90 % der Linerinstallationen die mechanischen Mindestkennwerte (E-Modul, Biegefestigkeit) eingehalten werden konnten. Bei den etwa 10 % der nicht bestandenen Materialprüfungen liegt die Vermutung nahe, dass diese Liner nicht vollständig ausgehärtet waren. Aus diesem Grund führt Hamburg Wasser seit dem Jahr 2020 eine Aushärtungskontrolle mittels dielektrischer

Impedanzspektroskopie bei jedem Liner durch. Die Ergebnisse zeigen, dass bei etwa 20 % der UV- oder kombinationsgehärteten Glasfaserliner (unabhängig vom Hersteller) der Grenzwert von 2 % Reststyrolgehalt überschritten wird, der bei Hamburg Wasser als zulässiger Maximalwert festgelegt ist. Besonders betroffen sind hierbei Kreisprofile bis DN 500, bei denen mehr als 50 % der Liner diesen Grenzwert überschreiten. Nichtsdestotrotz betont Hamburg Wasser, dass kein grundlegendes Aushärtungsproblem an seinen Linern besteht und die Erfahrungen mit Linern in Hamburg weiterhin positiv sind (Buchner et al., 2021). Die Aushärtungsdefizite zeigen ein Optimierungspotenzial für den Einbauprozess und damit für die Sicherstellung eines langlebigen Linerprodukts auf.

Aushärtungsdefizite stehen in heutigen Debatten immer im Zusammenhang mit dem komplexen UV-Härtungsprozess von Glasfaserlinern. Dagegen sind laut Literatur Aushärtungsdefizite an wärmegehärteten Nadelfilzlinern bisher nicht bekannt. Wahrscheinlich ist das darauf zurückzuführen, dass durch die gleichmäßige Temperatur über den gesamten Querschnitt infolge Wasservollfüllung über den gesamten Querschnitt und gesamte Länge an jeder Stelle im Liner gleiche Einbaubedingungen herrschen. In der Theorie sind damit keine Einbaufizite aufgrund ungleichmäßiger Bedingungen möglich.

### 3.5.1.3. Qualitätssicherung bei der Aushärtung

Bei der wärme-initiierten Härtung sind die Temperaturverläufe des Warmwassers bzw. des Wasserdampfs gemessen an der Außenseite des Schlauchs im Schachtbereich wichtig, um den Härtungsprozess zu überwachen. Bei der UV-initiierten Härtung kommen dagegen neue Steuerparameter (wie beispielsweise Lichtintensität, Lampenzuggeschwindigkeit, Anzahl der Lagen im Liner etc.) zum Einsatz. Letztere erfolgt mithilfe von UV-Lampenzügen, die eine genau mit dem Hersteller abgestimmte Lichtintensität (gleichmäßig im gesamten Querschnitt: Sohle – Kämpfer – Scheitel) und Geschwindigkeit beim Durchziehen aufweisen müssen. In Abbildung 2 ist dieser Härtungsprozess eines eingebauten Liners mithilfe von UV-Lampenzügen schematisch dargestellt. Die Überwachung und Prozesssteuerung erfolgt über die Messung der Innentemperatur des Liners mithilfe eines Infrarotsensors der UV-Anlage (Buchner et al., 2021).

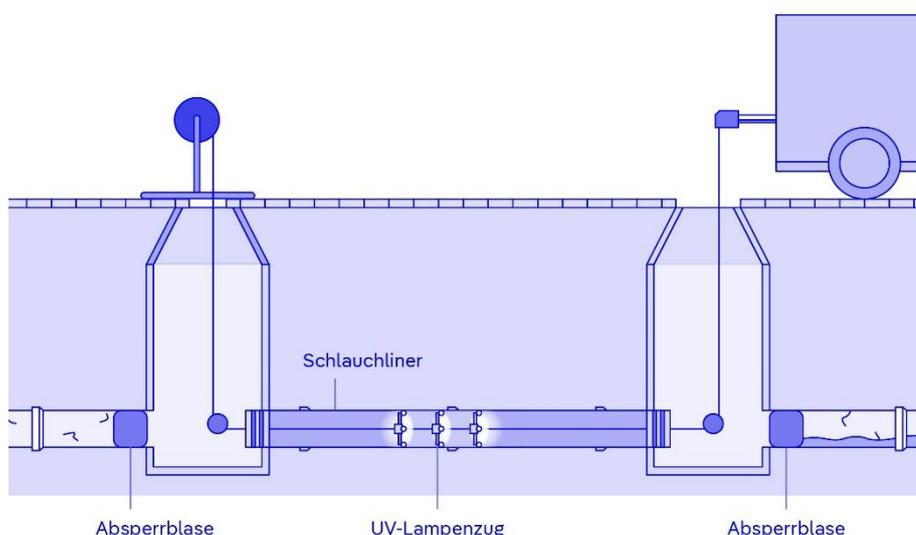


Abbildung 2: Härtungsprozess eines eingebauten Liners mittels eines UV-Lampenzugs

Eine laborseitige Bestimmung des Aushärtungsgrades kann laut Buchner et al. (2021) über die Glasübergangstemperatur erfolgen. Diese stellt den Temperaturpunkt dar, in dem eine Linerprobe erweicht bzw. härtet. Dieses Verfahren ist zur Messung des Polymeranteils und damit auch zur Bestimmung des Restmonomergehalts gut geeignet, allerdings lässt sich dieses Verfahren nicht in situ während des Einbauprozesses einsetzen. Zur Bestimmung des Aushärtungsgrades während des Einbauprozesses konnte Hamburg Wasser die dielektrische Impedanzspektroskopie erfolgreich in situ anwenden, um ggf. in den Prozess eingreifen zu können (Buchner et al., 2021). Die Impedanzspektroskopie, oder auch dielektrische Analyse genannt, ist eine Methode, um die Vernetzung von Monomeren und Härtung zu Polymeren zu untersuchen. Sie misst die Mobilität der Polymermoleküle während des Härtungsprozesses im elektrischen Wechselfeld. Da diese Messmethode Aufschluss über den Vernetzungsgrad der Polymere und damit den Aushärtungsgrad des zu untersuchenden Liners gibt, konnten diese Daten den Härtungsprozess für Hamburg Wasser optimieren und somit zu höherer Sicherheit einer vollständigen Aushärtung bei neu eingebauten Linern beitragen. Ob sich dies positiv auf die Überlebenskurven von Linern auswirkt ist unklar, aber mit Sicherheit lässt sich sagen, dass damit ein Risikofaktor verkürzter Nutzungsdauer beseitigt ist.

### **3.5.2. Geometrische Integrität von Linern**

Die im Folgenden beschriebenen Einflussfaktoren zur geometrischen Integrität eines Liners innerhalb des Altrohrs bieten zunächst keinen direkten und messbaren Zusammenhang zu dessen Alterungsverhalten. Jedoch können die folgenden Einflussfaktoren Mängel am Liner verursachen, die sich stark fallabhängig auf die Alterung auswirken können. Daher sind im Folgenden die wesentlichen Fehlerquellen für einen mangelnden Einbau beschrieben, auf die es zu achten gilt.

#### **3.5.2.1. Konfektionierung und Dehnverhalten**

Der Einsatz von Linersystemen zeichnet sich besonders durch ihre hohe Flexibilität und Dehnfähigkeit aus. Um jedoch einen passgenauen Einbau eines Liners in den Kanal zu gewährleisten, muss dieser vom Hersteller bereits vor Einbau maßgeschneidert bereitgestellt werden. Beim Einbau von Linern können sowohl Überkonfektionierung als auch Unterkonfektionierung Probleme verursachen. Bei Überkonfektionierung, also einer übermäßigen Dimensionierung des Liners kann es durch Materialüberschuss zur Faltenbildung kommen. Ist ein Liner zu stark unterkonfektioniert (zu klein), kann dieser aufgrund fehlenden Gegendrucks durch die Altrohrwandung seine Grenzdehnung überschreiten. Neben der möglichen Ausbildung eines zu großen Ringspalts zwischen Liner und Altrohr, kann eine Überschreitung der Grenzdehnung zur Bildung äußerer Reinharzschichten führen (siehe Kap. 3.5.2.3 für Darstellung weiterer Problemzusammenhänge). Liner werden bewusst unterkonfektioniert hergestellt, da sie eine Dehnfähigkeit aufweisen. Dabei ist die Dehnfähigkeit des Liners definiert als der Bereich zwischen der Mindestdehnung und der Grenzdehnung (Leddig-Bahls, 2019). Die Dehnfähigkeit von Linern wird laut Vogel (2018) von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu zählt zunächst der Lineraufbau, insbesondere das gewählte Trägermaterial, welches verschiedenartig aufgebaut sein kann (genäht, gewickelt oder gelegt) sowie die Art des Trägermaterials (synthetische Fasern oder Glasfasern). Die Profilform des Liners wirkt sich ebenfalls auf die Dehnfähigkeit aus. So kann das Dehnverhalten bei Sonderprofilen im Vergleich zu Kreisprofilen beispielsweise durch Reibungseffekte an den steilen Seitenflanken eines Eiprofils stark abweichen. Weiterhin beeinflussen die Profilmaße, insbesondere der Umfang des Profils, die Wanddickenbereiche des Liners seine Dehnungseigenschaften maßgeblich. Letztendlich setzen die Installationsvorgaben bei der Aufstellung des Liners im Kanal die Rahmenbedingungen für eine optimale Dehnung.

Hierbei gilt es die vorgegebenen Druckstufen und Verweilzeiten unter Druck beim Aufstellen des Liners im Kanal zu beachten. Als möglicher Auslöser für Einbaumängel (Ringspalte und Faltenbildungen) kann eine unpassende Konfektionierung und ein unzureichendes oder übermäßiges Dehnverhalten somit einen untergeordneten Einfluss auf das Alterungsverhalten des Liners aufweisen.

### **3.5.2.2. Altrohrgeometrie**

Der präzise Einbau eines Liners erfordert genaue Kenntnis über den Innendurchmesser des Altrohrs entlang seiner Länge vor der Konfektionierung des Liners. In der heutigen Praxis ist die Erfassung dieses Durchmessers in der Regel lediglich auf die Messung in den Anfangs-, Zwischen- und Endschächten beschränkt (Leddig-Bahls, 2019). Eine angemessene Einbauqualität kann nur gewährleistet werden, wenn eine qualitativ hochwertige Kalibrierung in der Praxis umgesetzt wird. Übermäßig hohe Toleranzen der Kanalprofilmaße entlang des Haltungsverlaufs können eine Ursache für Faltenbildungen und zu große lokale Ringspalte sein (Vogel, 2018). Diese wiederum können zu Einschränkungen der Nutzungsdauer führen, wie im Folgenden geschildert.

### **3.5.2.3. Ringspalt**

Trotz der Anforderung, dass ein Liner eng an der Kanalwand des Altrohrs anliegen soll (RSV-M 1.1), können dennoch Hohlräume zwischen dem eingebauten Liner und dem Altrohr, sogenannte Ringspalte entstehen, die bei der optischen Inspektion meist unentdeckt bleiben. Verursacht wird der Ringspalt unter anderem durch die bereits erwähnten Eigenschaften: unzureichende Dehnung, zu hohe Altrohrtoleranzen, reaktiver sowie thermischer Schrumpf bei der Härtung insbesondere bei Verwendung eines Preliners oder einer Außenschutzfolie ohne Klebeverbindung zum Altrohr (Vogel, 2018) oder geometrische Abweichungen des Altrohrs. Bei unzureichender Dehnung des Liners kann es bei einer Ringspaltausbildung zu einer übermäßigen Laminatverdichtung an der Linerinnenseite und zur Harzauspressung an der Außenseite des Liners kommen. Zwar könnte eine Laboruntersuchung für dieses Phänomen sogar erhöhte Materialkennwerte im Vergleich zur DIBt-Zulassung ergeben, jedoch kann es laut Vogel (2018) unvorhersehbare Auswirkungen auf die Standsicherheit und Nutzungsdauer des Liners sowie auf sein Verformungsverhalten haben.

Ein Ringspalt könnte aufgrund fehlender Verkrallung des Liners am Altrohr sogar zur Bewegung des Liners führen. Diese Bewegungsmöglichkeit kann, wenn der Kraftabtrag durch Bewegungen über das Altrohr nicht möglich ist, zu Spannungsspitzen an den Anbindungen führen. Diese wiederum können Schäden an Schacht- und Anbindungspunkten sowie Folienrisse durch Überdehnung des Liners verursachen (Vogel, 2018). Außerdem verursacht ein Ringspalt das Risiko einer möglichen verringerten Beulstabilität, da die Stabilität der Linerbettung durch den Ringspalt unzureichend gegeben ist. Somit ist der Liner stärker anfällig gegenüber dem äußeren Wasserdruck und es können sich bleibende Verformungen bzw. Ausbeulungen am Liner einstellen. Bei der Linerstatik müssen daher zu große Ringspalte berücksichtigt werden. Die Ringspaltmessung ist zum heutigen Stand der Technik nicht zerstörungsfrei und für genauere Ergebnisse nur mit hohem Aufwand durchführbar. Die Ungewissheit über die tatsächliche Größe eines vorhandenen Ringspalts führt oft dazu, dass dieser im statischen System nicht immer zuverlässig verifiziert werden kann (Vogel, 2018). Das Arbeitsblatt DWA-A 143-2 schlägt zur Sicherheit vor, einen Ringspalt mit einer Breite von bis zu 0,5 % des Linerradius innerhalb der statischen Berechnung anzunehmen.

Wie bereits geschildert, sind Ringspalte sowie deren Größe nur schwer messbar. Somit stellt die Ringspaltproblematik zum heutigen Stand vordergründig eine theoretische Ursache für Folgeschäden an Linern und damit verbundenen verkürzten Nutzungsdauern dar. Die Ermittlung eines statistischen Zusammenhangs ist daher bisher nicht möglich. Praxisbeispiele von aufgetretenen Schäden an Linern und verkürzte Nutzungsdauern, die direkt auf einen Ringspalt zurückzuführen waren, sind bisher nicht öffentlich bekannt.

### **3.5.3. Faltenbildung und Oberflächenunregelmäßigkeiten**

Falten und Oberflächenunregelmäßigkeiten können je nach Ausprägungsgrad mögliche Beeinträchtigungen des Betriebs darstellen. Weiterhin kann es bei Falten zu Aushärtungsdefiziten im Faltenbereich und lokaler Undichtigkeiten aufgrund unzureichender Laminatstreckung sowie erhöhten Verschleiß im Faltenbereich bei Hochdruckspülvorgängen kommen. Insbesondere Längsfalten stellen zudem eine Gefährdung der Beulsicherheit des Liners dar. Hierbei können diese Falten als Vorverformungen angesehen werden, sodass eine beulsichere Kreisform nicht mehr gegeben ist. Allerdings stellt das Vorhandensein von Falten und Oberflächenunregelmäßigkeiten im Liner nicht immer einen Mangel bzw. eine Betriebseinschränkung dar. Grenzwerte sowie eine differenzierte Betrachtung der Falten sind notwendig und können mithilfe der Regelwerke DWA-A 143-3 bzw. DWA-M 144-3, der DIN EN ISO 11296-4, des RSV-M 1.1 oder der Bewertungsmethodik von Leddig-Bahls (2019) erfolgen. Je nach Klassifizierung der betrachteten Falte stellt diese beispielsweise im Fall einer Längsfalte mit verringerter Beulsicherheit ein hohes und im Fall einer Querfalte mit möglichen Spül- oder Verschleißschäden ein geringeres Risiko einer verkürzten Nutzungsdauer dar.

### **3.5.4. Probleme mit Anbindungsstellen der Anschlusskanäle**

In Langzeitbetrachtungen ist es eine wiederkehrende Beobachtung, dass Schäden an den Anbindungsstellen auftreten, und das unabhängig vom verwendeten Linersystem. Diese Schäden werden oft durch Abrisse der Anbindungen verursacht. Der Hauptgrund hierfür liegt in den Bewegungsmöglichkeiten der Liner, die wiederum auf verschiedene Faktoren zurückzuführen sind. Hierzu zählen neben dem Vorhandensein eines Ringspalts das Fehlen einer ausreichenden Verkrallung oder Fixierung des Liners im Altrohr sowie Beanspruchungen durch wechselnde Grundwasserstände und temperaturbedingte Belastungen (Vogel, 2018). Dazu ist z.B. die Realisierung der Anbindung mithilfe eines Hutprofils zwischen Anschlusskanal und Liner als statisch steif ausgeführt. Somit tragen sich Spannungen aus Linerbewegungen über den Anschluss ab. Eine Entlastung der Anbindungsstelle könnte durch Ausbildung eines statischen Gelenks am Anbindungspunkt zum Liner erfolgen. Die praktische Realisierung einer solchen Anbindungslösung ist zum heutigen Tag noch nicht bekannt. Da Anbindungspunkte aufgrund von Substanzverlust nicht beliebig oft wiederhergestellt werden können, stellen diese bei regelmäßigem Reparaturbedarf einen einschränkenden Faktor für die Nutzungsdauer von Linern dar.

## **3.6. Aktuelle Aussagen zur Nutzungsdauer von Linern**

### **3.6.1. Definition der Nutzungsdauer von Linern**

Das RSV-M 1.1 (Kap. 10.4) definiert die Nutzungsdauer („Betriebseignungsdauer“) von Linern als die Summe aus der statisch angenommenen technischen Nutzungsdauer und der „technischen Restnutzungsdauer“. Die Restnutzungsdauer kann somit durch verschobene Erneuerungsinvestitionen über die Abschreibungsdauer hinaus als Kostenvorteil für Netzbetreiber

gesehen werden. Das Ende der Nutzungsdauer eines Liners ist in vielen Fällen nicht klar definierbar. Unter anderem könnte laut RSV-M 1.1 ein Ende der Nutzungsdauer durch Eintritt einer der folgenden Fälle geschehen:

- Mangelnde Betriebseignung
- Sichtbare Beschädigungen wie Undichtigkeiten, Risse oder Laminatschäden
- Verformungen, die auf Probleme beim Verbund mit dem Altrohr und dem Boden hindeuten

Probleme mit Anbindungen sind allerdings laut DWA-A 143-3 von der Nutzungsdauer eines Liners ausgenommen, da sie unter die örtlichen Reparaturmaßnahmen fallen und somit wie übliche Reparaturen als nutzungsdauererreichende Maßnahmen zählen.

### **3.6.2. Einschätzung der Nutzungsdauer von Linern**

Vom Ausgangspunkt einer erwartbaren Nutzungsdauer für Liner von 50 Jahren (Wicke, 2017) hat die nachfolgende Literatur diese Annahme ebenso angenommen. Das DWA-A 143-3 wurde 2014 herausgegeben und schätzte die „wirtschaftlich angemessenen Nutzungsdauer, die der Liner ohne Kosten für die Instandsetzung leisten muss“, auf 50 Jahre ein. Anbindungsstellen benötigen indessen ggf. Reparaturmaßnahmen. Das im Jahr 2021 erschienene RSV-M 1.1 (Kap. 10) beruft sich ebenso auf eine 50-jährige Nutzungsdauer, deutet jedoch darauf hin, dass die tatsächliche Nutzungsdauer die anfänglich statisch angesetzten 50 Jahre auf Basis von Untersuchungen langjährig in Betrieb befindlicher Liner erwartungsgemäß überdauere. Diese Aussage wird auch von Vogel (2022) aufgegriffen und betont. Leider wird bei diesen Aussagen nicht zwischen Materialien und Herstellungsverfahren unterschieden.

Ebenso wurde in der Studie von Berglund et al. (2018) von einer Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgegangen, die auf Basis vorangegangener Studien (Alam et al., 2015; Allouche et al., 2014; Araujo and Yao, 2014; Macey et al., 2013) zur Untersuchung einer 50-jährigen Nutzungsdauer festgelegt wurde. Ji et al. (2018) erwähnt ebenfalls die 50 Jahre Nutzungsdauer als derzeitigen Industriestandard für Liner. Die Autoren argumentieren aber, dass das aktuell über Regressionsverfahren ermittelte Langzeitverhalten von Linern auf einer konservativen Einschätzung basiert. Die Autoren stützen ihre Argumentation auf eine frühere Studie von Nassar and Yousef (2002), die das Langzeitknickverhalten von Linern analysierte. Diese Studie ergab experimentell und analytisch eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 80 %, dass Liner unter externem hydrostatischem Druck einen Zeitraum von 50 Jahren überdauern. Innerhalb dieser Studie wurden weder Material noch Herstellungsverfahren genannt, dafür aber, dass im Allgemeinen die konventionelle Nutzungsdauereinschätzung mithilfe der Least-Square Regression zu pessimistisch ausfällt. Demnach ist die Aussage der Studie für unterschiedliche Materialien und Einbauverfahren übertragbar, sofern weiterhin die 50 Jahre Nutzungsdauer mithilfe der Least-Square Regression geschätzt werden. Eine weitere experimentelle Studie von Wong (2016) untersuchte die mechanischen Eigenschaften von bereits langjährig im Betrieb befindlicher Liner. Im Ergebnis zeigte sich, dass die untersuchten Liner ihre mechanischen Eigenschaften über bis zu 30 Jahre hinweg die Mindestanforderungen (ASTM F1216 and WIS 4-34-04) erfüllen. Hicks et al. (2022) beziffert die Standard-Nutzungsdauer von Linern ebenfalls mit 50 Jahren, die allerdings auch in einigen Fällen überschritten werden könnte. Die Autoren von Hicks et al. (2022) deuten darauf hin, dass genaue Einschätzungen der Nutzungsdauern der einzelnen Materialkomponenten eines Linersystems dazu beitragen könnten, zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen und Folgesanierungen besser vorhersagen zu können. Keine der erwähnten Literaturquellen, die die Nutzungsdauer von Linern einschätzten, bezogen sich dabei

auf Materialien (Glasfaser- oder Nadelfilzliner) oder Einbau- bzw. Aushärtungsverfahren (z.B. Warmwasser-, Dampf- oder UV-Härtung). Fraglich ist hierbei, ob diese Faktoren für die Nutzungsdauereinschätzung und das Alterungsverhalten von Linern relevant sind und in den Studien lediglich vernachlässigt wurden, oder ob diese tatsächlich keine Auswirkung auf das Alterungsverhalten haben.

### 3.7. Zwischenfazit

Die zu erwartende Nutzungsdauer von Linern wird in der Literatur weiterhin auf 50 Jahre geschätzt. Die Datengrundlage für diese Schätzung baut hauptsächlich auf laborseitigen Studien auf, die in mehreren Fällen im Zusammenhang mit Einbaumängeln zu verstehen sind. Aufgrund mangelnder Differenzierung zwischen Materialien und Einbauverfahren und einer Verallgemeinerung innerhalb der meisten Studien ist die Repräsentativität der 50 Jahre Nutzungsdauer als Schlussfolgerung fraglich.

Die Art der Untersuchung langjährig betriebener Liner hängt von den Zielen einer solchen Untersuchungskampagne ab. Diese Untersuchungsziele können beispielsweise sein:

1. Zustandserfassung von Linern nach ihrem Einbau (Momentaufnahme)
2. Erfassung aller aktuellen Linerzustände im Gesamtnetz nach mehrjährigem Betrieb (Momentaufnahme)
3. Untersuchung alterungsbedingter Zustandsentwicklungen seit Einbau (Ermittlung eines Zustandsgradienten)

Während dieser Bericht auf die Untersuchung des Alterungsverhaltens von Linern abzielt, verfolgen nicht alle dargestellten Studien das gleiche Ziel. So fokussieren Bosseler et al. (2024) in ihren Untersuchungen eine Zustandserfassung nach Einbau (1) sowie nach mehrjährigem Betrieb (2). Beide Zustände werden in der Studie jedoch nicht zur Ableitung eines Gradienten des Alterungsverhaltens verwendet (3).

Daher ist zu betonen, dass mit der Zielstellung der Untersuchung des Alterungsverhaltens, wie es der Bericht vorsieht, ein Vergleich zwischen ursprünglichen und aktuellen Linerzuständen zwingend notwendig ist. Von allen untersuchten Laborstudien im Bericht haben zwei Studien eine solche Vergleichsanalyse des Alterungsverhaltens mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

Allouche et al. (2014) untersuchten Proben von vier verschiedenen Linerstandorten mit 25, 23, 21 und 5 Jahre alten Nadelfilzlinern und stellten fest, dass einige Proben ein verringertes E-Modul im Vergleich zu den ursprünglichen Werten kurz nach dem Einbau aufwiesen. Die zweite Studie von Hoppe (2008) untersuchte zwei Nadelfilzliner (25 und 19 Jahre alt) und einen Glasfaserliner (12 Jahre alt) und zeigte keine bis sehr geringen Abweichungen der mechanischen Kurzzeitkennwerte unabhängig vom Material oder der Herstellungsart.

Obwohl die Biegefestigkeit und der Kurzzeit-E-Modul, wie auch in den beiden Studien am häufigsten gemessen werden (Allouche et al., 2014), konnte bisher keine gesicherte Korrelation zwischen Alterungsprozessen und diesen mechanischen Kennwerten nachgewiesen werden. Dies hat jedoch den Grund, dass die Anzahl an Studien sowie Gesamtzahl untersuchter Liner keine belastbaren Größen darstellen und darüber hinaus die in den Studien untersuchten Liner keine schwerwiegenden altersbedingten Schäden aufwiesen. Somit ist ergänzend zu optischen Inspektionen die Probenahme mit anschließender Laboruntersuchung der mechanischen Kennwerte zum heutigen Stand des Wissens eine wichtige Untersuchungsmethode zur Zustandsbewertung von langjährig betriebenen Linern. Sowohl Allouche et al. (2014) als auch

Bosseler et al. (2024) empfehlen im Rahmen ihrer Handlungsempfehlungen mehr Beprobungen langjährig betriebener Liner mit anschließender Laboruntersuchung durchzuführen, um eine belastbarere Datengrundlage zu erhalten.

Dazu fassen Bosseler et al. (2024) die relevanten Untersuchungen im Rahmen der Nutzungsdauer von Linern in Tabelle 3 innerhalb ihrer Studie zusammen. Darunter wurden neben anderen relevanten Messungen die folgenden zwei Laboruntersuchungen von Linerprobestücken als wertvolle Datengrundlage zur Bewertung des Alterungsfortschritts für langjährig betriebene Liner eingestuft:

- Dreipunkt-Biegeversuch (laut Bosseler et al. (2024) möglicherweise alterungsrelevant)
- 24-Stunden Kriechneigungsversuch (laut Bosseler et al. (2024) möglicherweise alterungsrelevant und über dessen Ergebnisse können sich Aussagen über das Langzeitkriechverhalten über 10.000 h und somit dem verbleibenden Alterungspotential ableiten lassen)

Wie zu Beginn dieses Textes erwähnt, ist bei solchen Untersuchungen der direkte Vergleich aktueller Untersuchungen langjährig betriebener Liner mit den Laborwerten bei der Abnahme essenziell. Dabei ist eine konsequente Protokollführung sowie -verwahrung bzw. Datenmanagement von Inspektionen, Laboruntersuchungen und in situ-Messungen von Linern über die Nutzungsdauer hinweg eine Grundvoraussetzung. Nur durch den Vergleich der Materialkennwerte mit früheren Proben (idealerweise aus der Abnahmephase) können Alterungserscheinungen identifiziert und die weitere Dauer der Betriebstauglichkeit eines Liners abgeschätzt werden.

Somit hat die Literaturrecherche keine neue Datengrundlage für eine Überarbeitung der Liner-Überlebenskurven geliefert. Jedoch gibt es neue Ansatzpunkte, über die sich zusätzlich zu den oben genannten Ansätzen alterungsrelevante Zusammenhänge ableiten und entsprechende Daten erheben ließen. Eine Basis hierfür bieten die dargestellten Untersuchungen zu verschiedenen Schadensbildern mit ihren Auswirkungen auf die Nutzungsdauer bzw. das Alterungsverhalten von Linern. Die untersuchte Literatur deutet darauf hin, dass der mangelfreie Einbau von Linern durch eine Vielzahl an Faktoren gefährdet ist. In der untersuchten Literatur der letzten 6 Jahre wurden besonders Probleme in den Fokus genommen, die für optische Inspektionen weniger offensichtlich sind und sogar in Laboruntersuchungen in vielen Fällen unentdeckt bleiben können. Dazu zählen vordergründig die Probleme: Aushärtungsdefizite und Ringspaltausbildung. Die Autoren von Buchner et al. (2021) stellen den Grad der Aushärtung als „den wesentlichen Einflussfaktor für die Hydrolysebeständigkeit und das Langzeitverhalten der Liner“ dar. Auch Vogel (2018) hebt hervor, dass sich eine mangelnde Vernetzung der ausgehärteten Harzmatrix zu einer geringeren Hydrolysebeständigkeit und damit zur Wasseraufnahme führen kann. Der Liner kann also mangelnde Standsicherheit und Dichtheit aufweisen. Obwohl in der Literatur die Relevanz dieser Probleme deutlich dargestellt und auch deren Vorkommen in der Praxis belegt ist, gibt es bisher noch keine Belege für Versagensfälle und verkürzte Nutzungsdauern, die ausschließlich auf diese Probleme zurückzuführen waren. Dies liegt vor allem an der Komplexität der diversen Einflussparameter, die zu einem Versagensfall führen und das oftmals junge Alter der Liner. Bisher ist laut Literatur noch kein alterungsbedingtes Linerversagen oder generell das Versagen eines Liners bekannt. Es gilt dennoch als sehr wahrscheinlich, dass Mängel an Linern, wie Aushärtungsdefizite oder Ringspalte ein schnelleres Versagen begünstigen. Oder anders gesagt, gilt es als unwahrscheinlich, dass ein mangelhaft eingebauter Liner die zu erwartende Nutzungsdauer von 50 Jahren erfüllt.

Aus der Literatur zeigt sich, dass die Anzahl an Studien mit belastbaren Daten zur Ermittlung der Nutzungsdauer und Überlebenskurven von Linern mangelhaft ist. Dagegen wiesen materialtechnische Veröffentlichungen zu faserverstärkten Kunststoffen im Allgemeinen bestehende Laboruntersuchungen zum Alterungsverhalten auf. Die Erkenntnisse dieses vielseitig einsetzbaren Verbundwerkstoffs lassen sich aber aufgrund der im Labor getesteten Extrembedingungen schwer auf den Anwendungsfall eines Liners im Kanal übertragen. Es sind demnach mehr Studien langjährig betriebener Liner mit Probenahme und laborseitiger Materialuntersuchung notwendig. Solchen umfassenden Bestandsuntersuchungen steht allerdings entgegen, dass eine Probenahme betriebener Liner nicht zerstörungsfrei durchgeführt werden kann. Dazu bietet eine optische Inspektion ohne Auffälligkeiten keinen Grund, den offensichtlich intakten Liner durch eine Probenahme zu beschädigen. Weiterführende Forschung zu zerstörungsfreien Inspektionstechniken und ihre Integration in den Qualitätssicherungsprozess bei Linerinstallationen am Beispiel von Buchner et al. (2021) kann hierbei eine Lösung zur Datengewinnung bieten.

## 4. Interviews

### 4.1. Methodik Interviews

In diesem Teil der Forschungsarbeit zur Nutzungsdauer von Linern wurden Interviews mit Expert:innen durchgeführt. Diese Interviews dienten dazu, praktische Einblicke in die Herausforderungen und Erfahrungen im Zusammenhang mit Linern zu gewinnen. Darüber hinaus sollte die Interviewkampagne eine Ergänzung zur Literaturrecherche bilden, da viele Erfahrungen nicht veröffentlicht wurden. Die Interviewkampagne wurde gemäß einer vordefinierten Methodik strukturiert, die im Folgenden erläutert wird.

#### 4.1.1. Interviewdauer und -struktur

Die geplanten Interviews hatten eine durchschnittliche Dauer von etwa 45 Minuten. Um den Prozess effizient und einheitlich zu gestalten, wurde ein Interviewleitfaden erstellt. Dieser Leitfaden gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

1. **Vorstellung des Forschungsprojekts:** Es wurde zu Beginn eine Übersicht über das Forschungsprojekt gegeben, einschließlich seiner Ziele und Hintergründe.
2. **Vorstellung der Interviewten und ihrer Organisation:** Dieser Teil umfasst die Erhebung von Informationen über die Interviewten und ihre Organisation, um den Kontext ihrer Erfahrungen einordnen zu können.
3. **Ursachen für Defekte und Mängel an Linern:** Hier wurden die Interviewten nach ihren Erfahrungen zu Schäden an Linern, deren Hauptursachen und Relevanz auf die Nutzungsdauer befragt.
4. **Erfahrungen zur Nutzungsdauer von Linern:** Es folgte eine Abfrage zur Einschätzung der Nutzungsdauer, einschließlich der bewältigten Herausforderungen.
5. **Empfehlungen für weiterführende Recherchen:** Es wurde nach Empfehlungen für weitere Forschungen und nützlichen Ressourcen wie Kontakten, Literaturquellen und Daten gefragt.
6. **Für Betreiber:** Falls die Interviewten Betreiber repräsentierten, gab es einen speziellen Themenblock, der sich auf Fragen zur Erhebung von Kanalnetzdaten, Anteil der Liner an der Renovierung im Gesamtnetz, Risikobewertungen und ähnliche Aspekte konzentrierte.

Die gesammelten Interviewdaten wurden anschließend analysiert, um Muster, Erkenntnisse und Zusammenhänge zwischen genannten Schäden sowie Präventivmaßnahmen zu identifizieren, die zur Beantwortung der Forschungsfragen der Nutzungsdauer von Linern beitragen.

#### 4.1.2. Auswahl der Interviewkontakte

Im Rahmen der Vorbereitung der Interviewkampagne entstand eine Liste von insgesamt 85 potenziellen Interviewpartner:innen, die im Bereich der Forschung, als Entwässerungsbetreiber, beratende Firmen oder Hersteller mit Linern zu tun haben. Dies geschah auf der Grundlage bestehender sowie der Erschließung neuer Kontakte. Von diesen 85 Partner:innen wurden 68 kontaktiert, um ihnen eine Intervieweinladung zuzuschicken bzw. um eine Vermittlung potentieller Interviewpartner:innen anzufragen. Von den 68 kontaktierten Personen konnten 17 bei der Vermittlung von weiteren Kontakten behilflich sein, obwohl sie selbst nicht für ein Interview zur Verfügung standen.

Insgesamt wurden 21 Interviews erfolgreich durchgeführt. Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, Interviewpartner:innen auszuwählen, die über umfangreiche Erfahrung mit Linern verfügen. Vor den Interviews wurden Interviewanfragen per E-Mail verschickt, die Informationen und Erwartungen enthielten sowie den Interviewleitfaden zur Vorbereitung. Auf diese Weise konnten die kontaktierten Personen besser beurteilen, ob sie über die erforderliche Expertise zur Beantwortung der Fragen verfügen. Bei der Auswahl der Interviewpartner:innen wurde darauf geachtet, eine breite Vielfalt in Bezug auf die Herkunft sicherzustellen. Obwohl versucht wurde, eine gute geographische Mischung zu gewährleisten, stammte der Großteil der Interviewten aus der DACH-Region (siehe Abbildung 3 links: DE, AT, CH). Neben weiteren Interviewten aus dem Europäischen Raum hat auch ein Interview mit einem Partner aus dem US-amerikanischen Raum stattgefunden. Zudem wurde angestrebt, eine vielfältige Auswahl an Organisationstypen einzubeziehen. Dies sollte sicherstellen, dass keine voreingenommene Meinung oder Haltung einer bestimmten Gruppe vorherrscht und ein möglichst breites Meinungsspektrum in die Studie einfließt. Wie Abbildung 3 (rechts) zeigt, war der größte Anteil der Interviewten Betreiber. „Consulting“ fasst Unternehmen zusammen, die Betreiber und Kommunen beraten und/oder Dienstleistungen zur Kanalnetzmodellierung anbieten. Des Weiteren wurden Prüflabore, Forschungsinstitute und ein Glasfaserliner-Hersteller befragt. Durch diese gezielte Auswahl konnte ein breites Spektrum an Perspektiven in die Studie integriert werden.

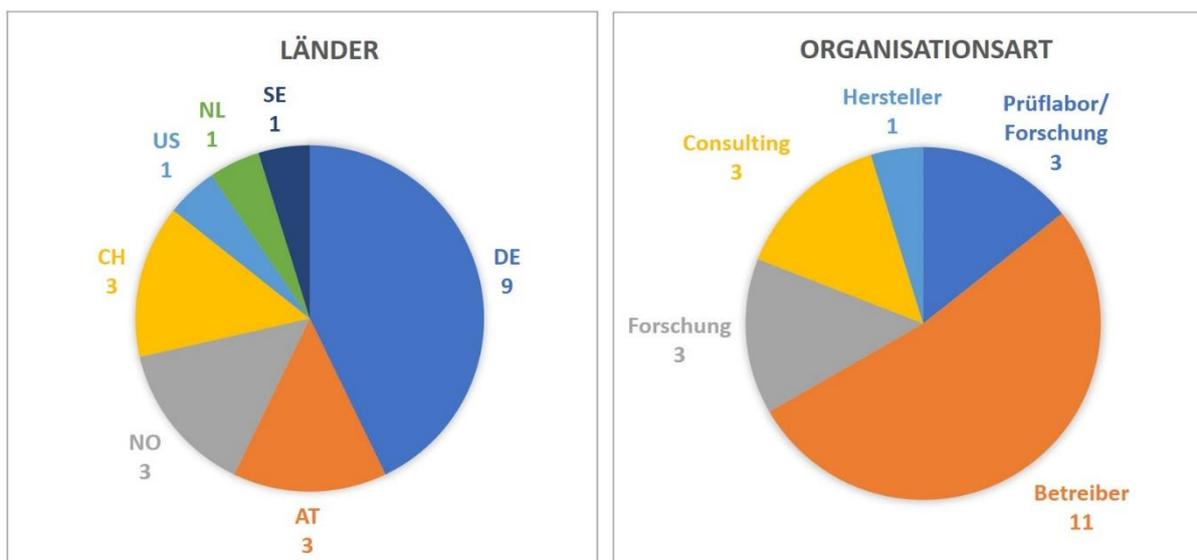


Abbildung 3: Aufteilung der Länder, dargestellt als ISO 3166-1 Alpha-2-Codes (links) und Organisationsarten (rechts) der insgesamt 21 Interviews

## 4.2. Ergebnisse der Interviews

### 4.2.1. Verwendung von Linern durch befragte Betreiber

Etwa die Hälfte von den bereits vorgestellten Interviewpartner:innen waren Betreiber. Die 11 befragten Betreiber waren aus Deutschland (2), Österreich (2) und der Schweiz (3) sowie Schweden (1), Norwegen (2) und den Niederlanden (1). Die Betreiber wurden nach ihrem Gesamtanteil bis heute verbauter Liner bezogen auf die jeweilige Gesamthaltungslänge im Kanalnetz befragt. Dabei reichte die Spanne der Gesamtnetzlänge der befragten Betreiber von ca. 300 km bis hin zu fast 10.000 km öffentliches Kanalnetz mit einer durchschnittlichen Gesamtnetzlänge von ca. 2.600 km

der Befragten. Von den 11 Befragten hatten 7 Betreiber einen Lineranteil von ca. 5 %, 2 Betreiber einen Anteil von ca. 15 % und ein Betreiber einen Anteil von 30 % von der jeweiligen Gesamthaltungslänge angegeben. Ein Betreiber hatte keine Aussage getroffen. Die Linerlängen der befragten Betreiber variierten zwischen 15 km und 600 km. Aus der Befragung der Betreiber ergibt sich ein durchschnittlicher Lineranteil von ca. 10 % mit einer durchschnittlichen Linerlänge von ca. 200 km. Für alle 11 befragten Betreiber ergeben sich in Summe über 2.000 km gelinerte Haltungen, die eine entscheidende Erfahrungsgrundlage aus der Praxis für die Interviews boten.

#### 4.2.2. Funktion von Linern

Wie schon Kap. 3.3 gezeigt hat, sind Liner vielseitig einsetzbar. Sie können je nach Dimensionierung entweder als Abdichtungsmaßnahme fungieren oder zur Wiederherstellung der Standsicherheit eines zu sanierenden Kanals eingesetzt werden. In den Interviews wurde dazu abgefragt, wozu die Interviewten Schlauchlining vordergründig verwenden:

- 4 der 21 Befragten gaben an, Liner ausschließlich zur Abdichtung zu verwenden, ohne dass der Liner einen zusätzlichen Beitrag zur Erhaltung der Standsicherheit des zu sanierenden Kanals leistet.
- Im Gegensatz dazu nutzen etwa 13 der 21 Befragten Liner sowohl zur Abdichtung als auch als Maßnahme zur Erhaltung der Standsicherheit des Kanals.
- Bei den verbleibenden 4 der Befragten gab es keine spezifische Aussage zur Verwendung von Linern.

Die Auswertung zur Nutzung von Linern zeigt, dass neben der Herstellung der Dichtheit bei einem Liner vom Betreiber oftmals auch die Erhaltung der Standsicherheit erwartet wird.

Die erwähnten Lineranteile sowie andere in diesem Text genannte Fakten konnten nicht geprüft werden und basieren lediglich auf den Aussagen der interviewten Mitarbeitenden der jeweiligen Betreiber. Eine in Deutschland durchgeführte Umfrage von Berger et al. (2020) ergab einen durchschnittlichen Sanierungsumfang bei den teilnehmenden Betreibern von 1 % jährlich und davon 23,9 % als Linereinbau. Nimmt man optimistisch an, dass dieser jährliche Sanierungsumfang für Liner mit 0,239 % konstant seit dem Jahr 2000 umgesetzt wird, ergibt dies einen Lineranteil von ca. 6 %. Dieser hypothetisch hochgeschätzte durchschnittliche Lineranteil fällt immer noch geringer aus, als der durchschnittliche Lineranteil von 10 % dieser Interviewkampagne. Der Grund hierfür ist, dass bei der Kontaktaufnahme für die Interviews bereits ein großer Fokus auf Betreiber mit viel Praxiserfahrung zu Linern gelegt wurde.

#### 4.2.3. Schadensanalysen

Die 21 Interviewten (nicht nur Betreiber) wurden zu ihren Einschätzungen über typische Schäden und Probleme im Zusammenhang mit Linern und deren Auswirkungen auf die Nutzungsdauer der Systeme befragt. Dabei basierte die Nennung der Schäden und Probleme auf persönlichen Erfahrungen und Einschätzungen der Interviewten und stellt keine Erhebung tatsächlich in Kanalnetzen vorkommender Schadenshäufigkeiten dar. Eher zeigt die hier beschriebene Analyse, welche Schäden und Probleme am stärksten im Fokus der verschiedenen Expert:innen standen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, wurden, mit möglichen Mehrfachnennungen, Aushärtungsdefizite ca. 48 %, Faltenbildung, Spülschäden, Beschädigung der Innenfolie und Probleme mit Anschlüssen jeweils ca. 4 %, Unterkonfektionierung ca. 19 % und Ausbeulungen/Verformungen

ca. 14 % von insgesamt 21 Befragten genannt. Außer den genannten Aushärtungsdefiziten sind alle hauptsächlich genannten Schäden und Mängel optisch feststellbar.

Ein wiederkehrendes und dominantes Thema, das sich durch diese Gespräche zog und bereits in Kap. 3.5.1 ausführlich beschrieben wurde, ist die stark im Fokus liegende Problematik der Aushärtungsdefizite. Im Vergleich zu früheren Systemen, bei denen Nadelfilzliner mit Wärme-initiiertem Härten verwendet wurden, hat sich seit den 2000er Jahren ein klarer Trend hin zur Verwendung von Glasfaserlinern mit UV-initiiertem Härten entwickelt. Dies hatte auch eine Änderung der Steuerparameter des Härtenprozesses zur Folge. Somit bringen Parameter, wie die Lichtintensität, Temperatur und Geschwindigkeit des Lampenzugs mehr Komplexität in die Sicherstellung eines vollständig ausgehärteten Linerprodukts. Neben den Haupteinflüssen Lichtintensität und der Geschwindigkeit des Lampenzugs sollen sich laut Aussage der Befragten noch weitere Einflüsse auf den Aushärtungsgrad eines eingebauten Liners auswirken, wie die Anzahl der Lagen im Liner, die Außentemperatur und Temperatur des Liners beim Einbau, möglicher Grundwassereinfluss sowie Feuchtigkeit im Kanal.

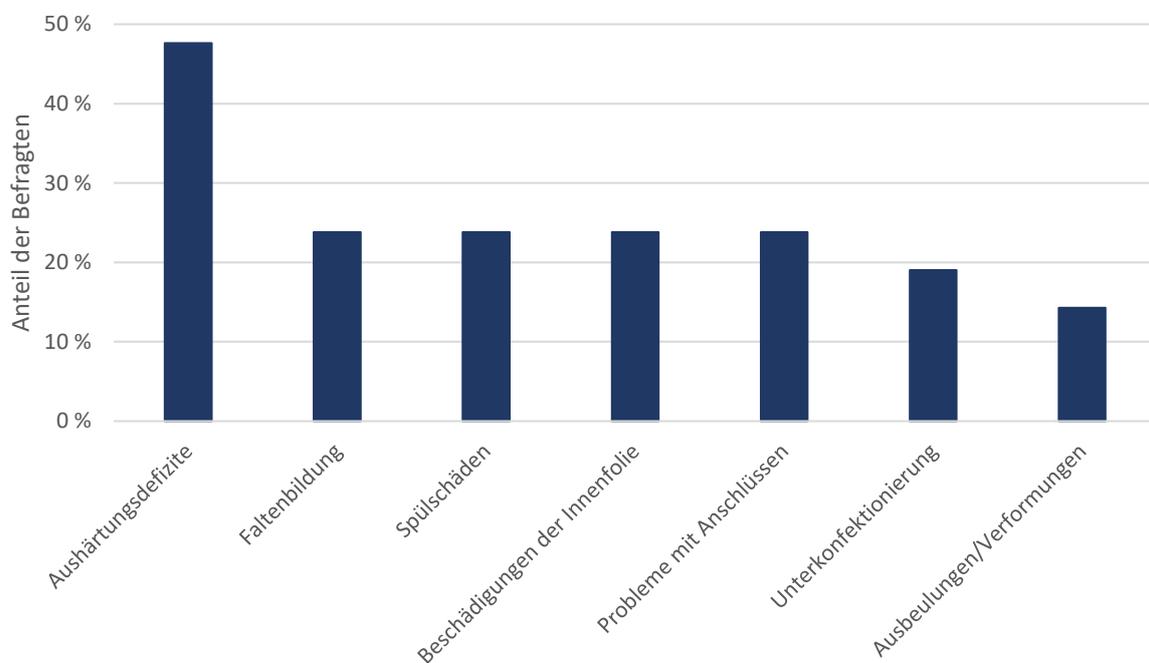


Abbildung 4: Häufigkeit der Nennungen von möglichen nutzungsdauerbeeinflussenden Problemen im Zusammenhang mit Linern (Mehrfachnennungen möglich)

Die aus mehreren Interviews geschilderten Erfahrungen deuteten darauf hin, dass der aktuelle Trend in Richtung immer leistungsfähigeren Lampenzügen geht. Dies soll höhere Geschwindigkeiten beim Durchfahren der gelinerten Haltung ermöglichen und dadurch den Härtenprozess und dafür notwendige Arbeitszeit verkürzen. Die unterschiedlichen Expert:innen aus den Interviews bewerteten im Konsens diesen Trend als nicht zielführend. Grund dafür ist, dass die Vernetzung der Monomere eine gewisse Zeit braucht, die durch höhere Lichtintensitäten und schnelleres Durchfahren in der Praxis nicht vollständig erzielt werden kann. Die Folgen sind zum einen die beschriebenen Aushärtungsdefizite an der Außenwand des Liners, oder aber, bei zu starker Aushärtung die Ausbildung einer spröden Innenseite des Liners mit möglichen Rissbildungen. Beide Extreme, die übermäßige Aushärtung sowie die Aushärtungsdefizite stellen Risiken zu verkürzten Nutzungsdauern von Linern dar. Dabei stehen Aushärtungsdefizite deutlich stärker im Fokus, da diese im Gegensatz zu einer übermäßigen

Aushärtung mit Sprödigkeit und Rissbildung an der Linerinnenseite bei der optischen Inspektion nicht erkennbar sind. Ohne die unter anderem in Kap. 3.5.1.3 erwähnte Methode zur prozessbegleitenden Härtungskontrolle sind Aushärtungsdefizite über den Verlauf einer Kanalhaltung nicht zerstörungsfrei messbar. Einzige Möglichkeiten der prozessbegleitenden Optimierung während der Aushärtung bietet derzeit nur eine Geschwindigkeitsanpassung des Lampenzugs. In Anbetracht der genannten vielzähligen Einflüsse sowie der Problematik erhöhter Lichtintensitäten wäre eine Nachregelung der Lichtintensität im laufenden Prozess dringend notwendig. Dies wäre eine geeignete Lösung, um die hohen Aushärtungsschwankungen bei der Aushärtung über den Linerquerschnitt und -verlauf zu minimieren.

#### 4.2.4. Qualitätssicherungsmaßnahmen aus Interviews

In den Interviews wurde gezielt nach Präventivmaßnahmen gefragt, die zur Sicherstellung einer langen Nutzungsdauer von Linern beitragen können. Von den insgesamt 21 geführten Interviews wurden verschiedene Vorschläge zu Präventivmaßnahmen genannt (Mehrfachnennungen möglich). Die Analyse der Interviewdaten ergab folgende Schlüsselpräventivmaßnahmen:

- Stärkere Qualitätssicherung des Einbauprozesses (ca. 33 % der Befragten)
- Präzisere Temperaturkontrollen bei der UV-Härtung (ca. 19 %)
- Spüldruckkontrolle am Spülfahrzeug, Reinigungsvorgaben befolgen & Minimierung von Spülvorgängen (ca. 33 %)
- Explizite Aushärtungskontrolle bei der Aushärtung von Linern (ca. 33 %)
- Auftragsvergabe ausschließlich an erfahrene Einbauunternehmen (ca. 28 %)
- Genaueste Inspektion des Altrohrs vor Einbau des Liners (ca. 19 %)

Die Verteilung der genannten Präventivmaßnahmen verdeutlicht die Wichtigkeit eines sorgfältigen Einbauprozesses und der Aushärtung von Linern durch erfahrene Fachkräfte sowie umfassende Qualitätssicherungsmaßnahmen, um die langfristige Nutzungsdauer dieser Technologie sicherzustellen.

Neben den bereits erwähnten Aussagen sind während der Interviews in Bezug auf Präventivmaßnahmen zur Sicherstellung einer langen Nutzungsdauer noch weitere einzelne Aussagen zu den folgenden Themen hinzugekommen:

- **Anwendung von Schlauchlining:** Es wurde empfohlen, Kanäle, die keine Kreisprofilform besitzen, aufgrund möglicher Fehleranfälligkeiten insbesondere beim Dehnverhalten und der Passgenauigkeit eher nicht mit Linern zu sanieren. Die Anwendung von Linern bei einem ermittelten Altrohrzustand (nach DWA-A 143-2) 1 oder 2 wurde empfohlen, vor allem um bei letzterem eine Verschlechterung hin zum Altrohrzustand 3 zu verhindern. Die Möglichkeit, Schlauchlining bei einem Altrohrzustand 3, also bei teilweise durch den Liner aufzunehmenden Erd-, Verkehrs- und Auflasten anzuwenden, befürwortete ein Hersteller mit Verweis auf die hohe Standsicherheit von Glasfaserschlauchlinern, während ein Betreiber und ein Interviewpartner aus dem Beratungsbereich dies aus Sicherheitsgründen ablehnten.
- **Prozesssteuerung beim Einbau:** Die Prozesssteuerung sowie die Ermöglichung eines Eingriffs und Nachregels des Prozesses beim Einbau von Linern ist entscheidend für einen mangelfreien Einbau. Der flexible Einsatz verschiedener Materialien und Härtungsmethoden ermöglicht eine gezielte Anpassung an die spezifischen

Anforderungen, wodurch die Prozesssicherheit erhöht und die Lebensdauer beeinflusst werden kann.

- **Härtung:** Die exotherme Kettenreaktion, die bei der UV-Härtung durch die UV-Strahlung initiiert wird, verliert an den äußeren Schichten an Wirksamkeit. Daher wurde betont, dass die Temperaturmessung kontinuierlich am kältesten Punkt (außen am Liner) mit Hilfe eines Temperaturkabels erfolgen sollte. Darüber hinaus sollte bei dickeren Linern mit mehr als 3 Faserschichten, Peroxide zum Weiterleiten der Reaktion eingesetzt werden. Dazu kam der Vorschlag, Liner stichprobenartig auf Reststyrol zu untersuchen.
- **Monitoring & Datenmanagement:** Innerhalb der Gewährleistungsfrist wurde vorgeschlagen, ein spezielles Monitoring (optische Inspektion und möglicherweise weitere zerstörungsfreie Methoden) durchzuführen. Die Idee, mehr Daten im Zusammenhang mit Linern zu erheben und die Verfügbarkeit von Daten zwischen verschiedenen Betreibern zu fördern, wurde genannt.
- **Anbindungspunkte:** Es wurde angemerkt, dass Hutprofile nicht immer die beste Lösung für die Anbindungspunkte der Anschlusskanäle seien, und es sollte nach optimalen Anbindungslösungen gesucht werden. Die Verwendung von Edelstahlmanschetten (Linerendmanschetten) im Anbindungsbereich der Schächte wurde zur Sicherstellung der Dichtheit und als mechanischer Schutz der Enden des Liners vor betrieblichen Einflüssen empfohlen.
- **Betrieb des Kanals:** Die durch die Einleiterbedingung vorgeschriebene dezentrale Behandlung chemisch belasteten Industrieabwassers ist auch zum Schutz der im Abwasserkanal verbauten Liner einzuhalten. Die Überwachung des Verschleißes durch Geschiebeeintrag wurde als wichtige Maßnahme hervorgehoben.

#### 4.2.5. Folgesanierungen bereits mittels Schlauchlining sanierter Haltungen

Ein weiterer Schwerpunkt der Befragungen lag auf der Frage, wie die Folgesanierung von gelinerten Haltungen durchgeführt wurde oder durchgeführt werden sollte. Dabei konnten einige Betreiber bereits erste Erfahrungen mit Folgesanierungen aufgrund von Einbaumängeln vermitteln. Hierbei gilt es zu beachten, dass im Rahmen der Interviews bisher noch kein einziger Liner auf Basis von Alterungserscheinungen das Ende seiner Nutzungsdauer erreicht hat und folgesaniert wurde. Die notwendigen Folgesanierungen waren auf Mängel und Schäden des Einbauprozesses zurückzuführen und erfolgten zeitnah zu diesem. Zusammenfassend lassen sich die nachfolgenden Schlüsse auf Basis der Befragungen ziehen:

Lokale Schäden am Liner sollten bevorzugt punktuell als Reparaturmaßnahmen ausgebessert werden (insbesondere lokale Dichtheitsprobleme an Anschlüssen). Darüber hinaus sollten Reparaturen prinzipiell wie bei anderen Materialien auch bevorzugt bei Einzelschäden angewendet werden, ohne dass es einer aufwendigeren Folgesanierung bedarf, solange eine geringe Schadensdichte die Wirtschaftlichkeit des Reparaturverfahrens garantiert. In den meisten Fällen wurde das Herausfräsen eines alten Liners erfahrungsgemäß als aufwendig bewertet und daher nicht bevorzugt. Es gab auch Erfahrungen, Liner mithilfe von Wasserhöchstdruck zu zerfasern und dann zu entfernen, was laut Erfahrungsbericht mit geringerem Aufwand verbunden ist, aber hohe Präzision und Erfahrung aufgrund der hohen Krafteinwirkung benötigt. Diese Vorgehensweisen sollten nur dann in Betracht gezogen werden, wenn das darunterliegende Altrohr noch tragfähig ist. Eine dagegen simplere und in den Interviews denkbare bevorzugte

Methode ist das Einsetzen eines neuen Liners in den alten („Liner auf Liner“), sofern dies hydraulisch und betrieblich zulässig ist und der Altrohrzustand unter dem beschädigten Liner sowie der beschädigte Liner selbst die notwendige Tragfähigkeit aufweisen. Allerdings könnte der hierfür zu führende statische Nachweis eine Herausforderung darstellen, insbesondere, wenn ein mangel- oder schadhafter Liner eine tragfähige Unterlage für einen neuen Liner bilden soll. Darüber hinaus stellt sich dann die weitere Frage nach der Nutzungsdauer des an Komplexität zunehmenden Liner-Altliner-Altrohrsystems. Denkbar wäre auch die Anwendung eines anderen ggf. besser geeigneten grabenlosen Verfahrens. Für den Fall, dass keines der bisher genannten Folgesanierungsverfahren anwendbar ist, stellt eine zeit- und kostenintensive Erneuerung der Kanalhaltung in offener oder geschlossener Bauweise die letzte verbleibende, aber zum heutigen Stand der Forschung auch erprobteste Möglichkeit einer Folgesanierung dar.

#### 4.2.6. Aussagen zur Nutzungsdauer von Linern

Liner sind für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgelegt, an denen sich die meisten Einschätzungen der Interviewten orientieren. Jedoch sind viele Interviewte auf Basis ihrer Erfahrungen einer längeren Haltbarkeit als 50 Jahre optimistisch gegenüber eingestellt. So fiel vermehrt die Einschätzung, dass Liner unter idealen Einbaubedingungen und ohne chemische Belastung oder Spülschäden im Laufe des Betriebs länger halten, als bisher angenommen. Die Mehrheit der 21 Interviewten schätzt die Nutzungsdauer von Linern auf 50 Jahre und mehr ein, mit einigen, die sogar 75 Jahre oder länger erwarten. Einige vergleichen die Haltbarkeit von Linern sogar mit neuen, werkseitig hergestellten Kunststoffrohren, die nach einigen Quellen über 100 Jahre halten können (Folkman, 2014), (Meerman, 2008), (Whittle and Tennakoon, 2005). Die Grafik in Abbildung 5 zeigt die Verteilung dieser Einschätzungen. Es gilt zu beachten, dass sich die Bezifferungen der Nutzungsdauer von Linern lediglich auf Einschätzungen der Interviewten beziehen, die auf Basis unterschiedlicher Kenntnis- und Erfahrungsstände getroffen wurden.

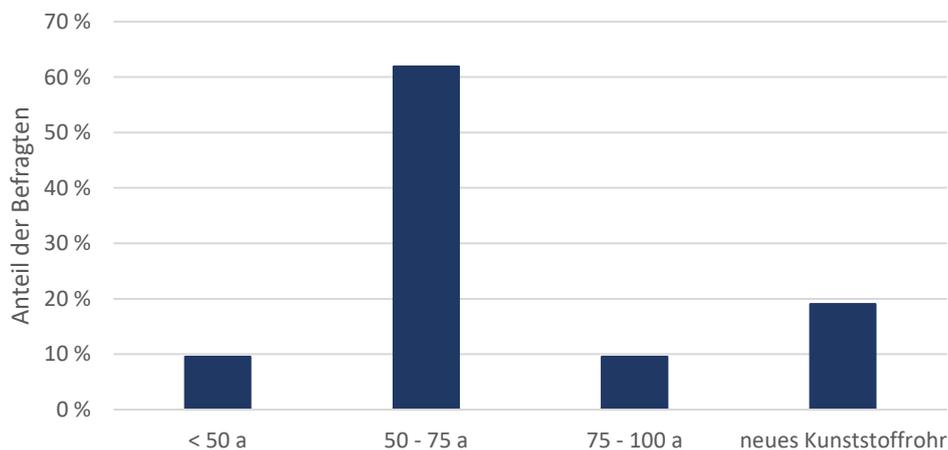


Abbildung 5: Einschätzung der Nutzungsdauer von Linern aus den 21 geführten Interviews

Die vielversprechende Haltbarkeit von Linern und der Vergleich zu Kunststoffrohren wird durch eine umfassende Betrachtung des Liner-Altrohrsystems jedoch von mehreren Interviewten in Frage gestellt. Bei der Renovierung alter Kanäle, die möglicherweise bereits 70, 100 oder mehr Jahre alt sind, muss berücksichtigt werden, dass in Altrohrzuständen 1 und 2 (gemäß DWA-A 143-2) der Liner lediglich für den äußeren Wasserdruck bemessen wird. Die höheren Erd- und Verkehrslasten werden dagegen vom Altrohr getragen. Ein Versagen des Altrohrs würde in diesen

Fällen auch zum Versagen des Liners durch Verformungen führen. Bei einer Renovierung mit Altrohrzustand 3 ist der Liner entsprechend dimensioniert, dass dieser teilweise Erd-, Verkehrs- und Auflasten aufnehmen kann. Dennoch ist laut des zugrundeliegenden statischen Modells eine vollständige Lastaufnahme des Liners im Falle eines Altrohrversagens fraglich, sodass ein hohes Verformungsrisiko mit zumindest eingeschränkter Gebrauchstauglichkeit besteht. Demnach ist laut Meinung einiger Interviewter die Frage nach der Nutzungsdauer eines Liners auch immer eine Frage nach der zu erwartenden Haltbarkeit des Altrohrs. Bei optischen Inspektionen renovierter Haltungen bringt das Unwissen über den Zustand des hinter dem Liner liegenden Altrohrs individuelle Unsicherheiten in die Abschätzung der Nutzungsdauer von Linern.

### 4.3. Zwischenfazit

Aus den Interviews hat sich keine neue Datengrundlage zum Alterungsverhalten von Linern ergeben. Jedoch können folgende Hinweise für die Entwicklung einer entsprechenden Datengrundlage festgehalten werden:

- Die 11 befragten Betreiber mit starkem Einsatz von Linern hatten durchweg gute Erfahrungen mit ihrem Linerbestand. Abgesehen von vereinzelten Versagensfällen direkt nach dem Einbau und diverser, hauptsächlich durch den Einbau entstandener Mängel, sind keine kritischen Linerzustände mit alterungsbedingtem Ende der Nutzungsdauer bekannt. Dementsprechend fiel die Befragung zur Nutzungsdauer von Linern sehr aussichtsreich mit 50 Jahren und mehr aus.
- Keiner der Befragten nutzte einen kalibrierten Modellansatz zur Abbildung des Alterungsverhaltens und der Ermittlung von Zuständen von Linern. Ein Befragter im Bereich Consulting deutete darauf hin, einen unkalibrierten, annahmebasierten Ansatz zu verwenden. Dieser durfte allerdings keine weiteren Details oder den Ansatz selbst mitteilen.
- Innerhalb der Interviews sowie der Literaturrecherche aus Kap. 3 wurden eine Vielzahl an Einflussfaktoren benannt, die sich auf die Nutzungsdauer einer gelinerten Haltung auswirken können. Abbildung 6 stellt eine Zusammenfassung dieser Einflussfaktoren aufgeteilt in die Hauptgruppen Einbau, Umwelteinflüsse, Altrohreigenschaften und Betrieb dar.
- Ein Datenmonitoring mit gleichzeitiger Prozessoptimierung beim Einbau, insbesondere im Aushärtungsprozess stellen eine geeignete Datengrundlage über den Einbauzustand, der unter volatilen Baustellenbedingungen entsteht, dar.

Die Diskussion über die Nutzungsdauer von Linern verdeutlicht die bestehende Unsicherheit, trotz häufig bereits 20- bis 30-jähriger Erfahrungen mit Linersystemen. Zwar ist der erste Liner bereits über 50 Jahre alt (Bueno, 2021), dennoch haben sich seit dem Einbau des ersten Nadelfilzliners die Materialien und Einbauverfahren stetig weiterentwickelt. Dies macht Vergleiche alter und neuer Liner kompliziert. In Interviews zeigten sich stark unterschiedliche Meinungen über die geschätzte Nutzungsdauer. Besonders stark wurden die jüngsten Probleme bei UV-gehärteten Glasfaserlinern betont, die auch bereits im Kap. 3.5.1 erklärt wurden. Obwohl Aushärtungsdefizite schon länger bekannt sind, erhielten sie aufgrund von Messkampagnen und genaueren Analysen erst seit Kurzem größere Aufmerksamkeit und wurden als relevantes Problem für eine Nutzungsdauerverkürzung erkannt. Die jüngsten Schwierigkeiten bei der Liner-Aushärtung verdeutlichen die Komplexität des Prozesses und betonen die Notwendigkeit einer

eingehenderen Untersuchung für eine fundierte Beurteilung der Nutzungsdauer und Kalibrierung der Überlebenskurven. Zusätzlich ist die Nutzungsdauer eines Liners laut einzelner Aussagen aus den Interviews stark von der verbleibenden Nutzungsdauer und des Schadensbildes des stützenden Altrohrs abhängig. Diesen Einfluss beschreibt auch Bosseler et al. (2024), jedoch ist bisher weder in der Literatur noch in den Interviews ein Linerversagensfall aufgrund von darunterliegendem Altrohrversagen bekannt.

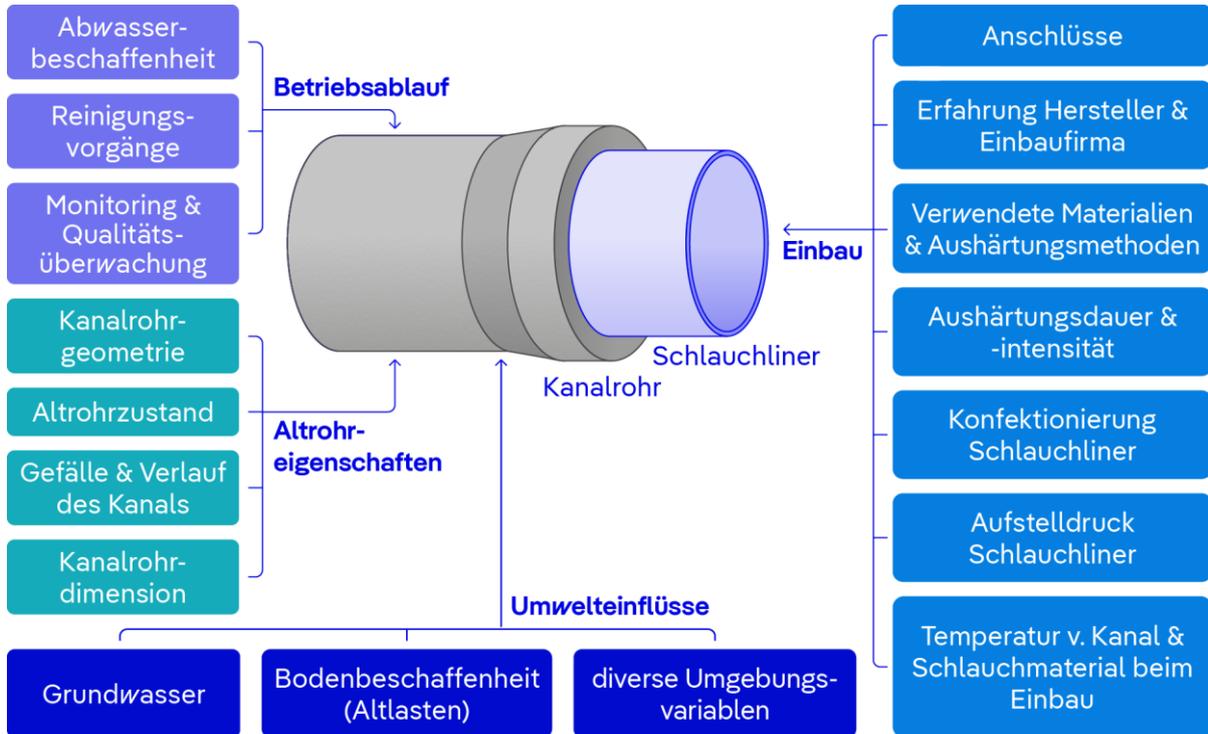


Abbildung 6: Faktoren, die die Nutzungsdauer des zusammengesetzten Systems von Liner und Altrohr beeinflussen können

## 5. Datenaufbereitung der Berliner Wasserbetriebe

### 5.1. Methodik der Datenaufbereitung

Aus der Literaturrecherche in Kap. 3 und den Interviews in Kap. 4 geht hervor, dass zur Ableitung der Alterung von Linern in Form einer Überlebenskurve keine neuen Daten verfügbar sind, außer den Daten der optischen Zustandserfassung der Betreiber über einen längeren Zeitraum und den Labortests langjährig betriebener Liner. Daher folgt in diesem Kapitel eine Aktualisierung der Überlebenskurve für Liner auf Grundlage auswertbarer optischer Zustandsdaten von Linern bei den Berliner Wasserbetrieben. In der aktualisierten Datenauswertung wurden 332 km im Berliner Kanalnetz verbauter Liner berücksichtigt, deren Schäden gemäß Schadenskatalog 11<sup>5</sup> der Berliner Wasserbetriebe erfasst und bewertet wurden. Die analysierten TV-Befahrungsprotokolle dieser 332 km gelinerter Haltungen beziehen sich dabei nicht ausschließlich auf den Liner, in einigen Fällen werden auch Schäden in sichtbaren Teilen des Altrohrs erfasst. Beispielsweise stehen in einigen Linern die Anbindung der Hausanschlüsse noch aus, weshalb bei diesen Linern Schäden am Hausanschluss des Altrohrs sichtbar sind und daher miterfasst wurden. Ein weiteres Beispiel sind Schäden des Altrohrs am Schachtanschluss, die aufgrund fehlender Linerendmanschetten in vor 2012 verbauten Linern ebenfalls erfasst wurden<sup>6,7</sup>. Schäden, die bereits vor Linereinbau im Altrohr existierten, können zwar Einfluss auf den Zustand einer renovierten Haltung haben, stellen jedoch nicht das Alterungsverhalten des Liners selbst dar, was in Protokollen nach 2012 als Schaden ausgewiesen wird. Um den Datensatz weitestgehend auf die standsicherheits- und dichtsicherheitsrelevanten Schäden und Zustände von Linern zu beschränken, kam daher eine mehrstufige Anwendung von Filtern zum Einsatz, die im Anhang detailliert beschrieben ist. Im Anschluss wurden die Zustandsbewertungen der Haltungen gemäß Schadenskatalog 11 den entsprechenden SEMAplus-Zustandsbereichen (siehe Tabelle 5) zugewiesen.

Tabelle 5: Definition der SEMA-Zustände bezogen auf den Zeithorizont und die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs

SEMAplus-Zustand	Zeithorizont	Dringlichkeit
<b>Sehr schlecht</b>	0 – 5 Jahre	Sofort
<b>Schlecht</b>	6 – 10 Jahre	Kurzfristig
<b>Mittel</b>	11 – 20 Jahre	Mittelfristig
<b>Gut</b>	> 20 Jahre	Langfristig bzw. keine

<sup>5</sup> Der Berliner Schadenskatalog ist vergleichbar mit den Anforderungen der DWA-Merkblätter. Er basiert auf dem ATV-M 143 Teil 2 (04/1999). In Anpassung an die DIN EN 13508-2 und die Fortschreibung des Merkblattes als DWA-M 149-2 (12/2013) und DWA 149-3 ist im Berliner Schadenskatalog ergänzend die Zustandsklassifizierung getrennt nach Standsicherheit und Dichtheit integriert worden.

<sup>6</sup> Der Einbau von Linerendmanschetten (Quick-Lock) erfolgt DIBt konform mit Einführung dieser Vorgabe seit 2012 bei den Berliner Wasserbetrieben für Nennweiten von DN 150 – 600. Diese Änderung im Regelwerk ist ein Beispiel der Auswirkung von Technologieentwicklung auf die Schadensbewertung.

<sup>7</sup> Eine fehlende Schachtanbindung bzw. eine fehlende Anbindung eines Hausanschlusses wird in dieser Auswertung gemäß den Vorgaben des Schadenskatalog 11 mit Standsicherheits- und Dichtsicherheitsrelevanz gewertet.

## 5.2. Ergebnisse der Datenaufbereitung

In Abbildung 7 ist die Längenverteilung der jeweiligen Lineralter zum Zeitpunkt der Inspektionen der ausgewerteten 332 km Liner dargestellt. Aus den Daten geht hervor, dass über die Hälfte der Liner (bezogen auf die Gesamtlinerlänge zum Inspektionszeitpunkt) bis zu 2 Jahre alt waren. Dies ist größtenteils auf Abnahmeinspektionen unmittelbar nach dem Linereinbau zurückzuführen<sup>8</sup>. Neben den hauptsächlich sehr jung inspizierten Linern sind jedoch auch einige ältere inspizierte im Datensatz vertreten mit ca. ca. 400 Metern (über 28 Jahre, ca. 3,4 km mit einem Alter von 23 bis 27 Jahren sowie ca. 8,1 km zwischen 18 und 22 Jahren Alter zum Inspektionszeitpunkt.

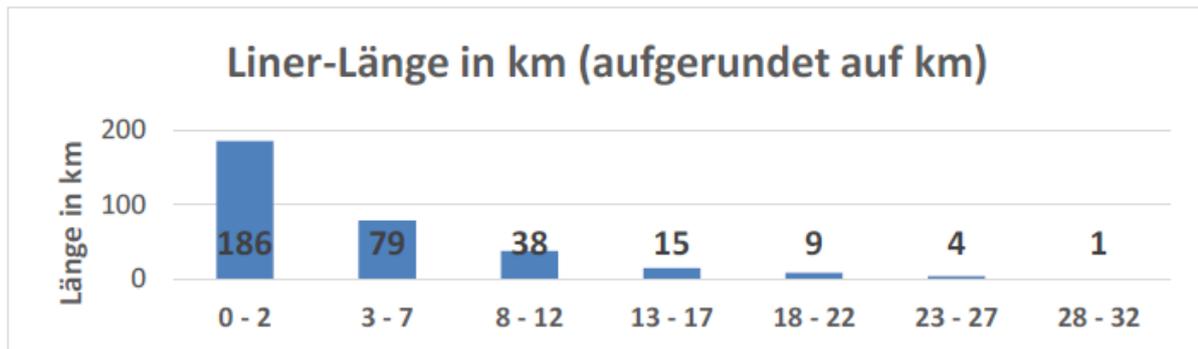


Abbildung 7: Verteilung der Linerlängen (aufgerundet auf ganze km; Ordinate) der ausgewerteten Liner für die Lineraltersgruppen zum Zeitpunkt der Inspektion (Abszisse); Abbildung BWB

Auf Grundlage der aufbereiteten Zustandsdaten wurden die in Abbildung 8 dargestellten SEMAplus-Zustandsverteilungen für die unterschiedlichen Altersgruppen ermittelt. In allen Altersgruppen der Auswertung befinden sich zusammen insgesamt lediglich 1,5 km der betrachteten Liner in einem schlechten und/ oder sehr schlechten SEMAplus-Zustand (orange bzw. rot eingefärbt), was einem sehr geringen Anteil von lediglich knapp 0,5 % der gesamten betrachteten Liner entspricht. Die häufigsten Schäden für diese beiden sanierungsrelevanten SEMAplus-Zustandsbereiche umfassen Schäden durch Undichtigkeiten, Scherben (Löcher im Liner mit sichtbaren „Linerfetzen“), Verformungen, Oberflächenschäden, Materialabtrag und auch Wurzeln, die aufgrund der nicht vollständig durchgeführten Einsichtnahme aller Befahrungsvideos noch in den Zustandsbewertungen des schlechten SEMA-Bereichs enthalten sind. Die sanierungsrelevanten Liner-Anteile in den einzelnen Altersgruppen sind somit gering. Die Schadensanalyse durch die Einsichtnahme der Befahrungsvideos hat zudem gezeigt, dass die Schadensansprache einem großen subjektiven Einfluss der Erfasser unterliegt u.a., weil die Codes des Schadenskatalogs 11 nicht für eine ausreichende Beschreibung von typischen Linerschäden konzipiert sind. Die Nutzung des Schadenskürzels „Scherbe“ für aufgerissene Löcher im Liner sind ein prominentes Beispiel hierfür. Dazu ist die Zustandsbewertung innerhalb des Schadenskatalogs 11 derzeit noch uneinheitlich für ähnliche Defekte. Die Zustandsbewertung von aufgerissenen Löchern im Liner beispielsweise steht in keinem Zusammenhang mit der von Löchern im Liner durch fehlende Hausanschlussanbindungen. Eine Erweiterung des Schadenskatalogs 11 um linertypische Schadensbilder und deren ingenieurmäßiger Zustandsbewertung wäre für eine konsistentere Zustandsbewertung der Liner erforderlich. Eine solche Erweiterung des Schadenskatalogs ist bei den Berliner Wasserbetriebe nicht vorgesehen, da

<sup>8</sup> Aufgrund des Befahrungsturnus von 10 bis 20 Jahren in Abhängigkeit der Gebietspriorisierung der Berliner Wasserbetriebe und wegen des jungen Alters der meisten verbauten Liner sind vergleichsweise wenige Liner im Rahmen der Gebietsstrategie erfasst worden.

die Berliner Wasserbetriebe derzeit den Wechsel auf den Eurocode (Schadenskatalog 12 auf Grundlage der aktuellen gültigen DWA-M 149-2/3 bzw. DIN EN 13508-2) vollziehen. Eine entsprechende Überprüfung, inwieweit der Schadenskatalog 12 linertypische Schäden besser und konsistenter abdeckt, wurde nicht vorgenommen. In Abbildung 8 ist ein Trend mit zunehmendem Anteil von Linerlängen im mittleren SEMAplus-Zustand (gelb gefärbter Anteil) bis hin zur Altersgruppe: 13-17 Jahre erkennbar. Ein Hauptgrund für diese Zustandsverschlechterung ist gemäß Datenauswertung zu über 95 % eine schadensbehaftete Sanierung durch den Liner, (ca. 165 km des mittleren Zustands der insgesamt 332 km untersuchter Liner). Hierzu zählen unter anderem die bereits erwähnten Schachttanschlussschäden, die ca. 45 km Liner betreffen. Eine

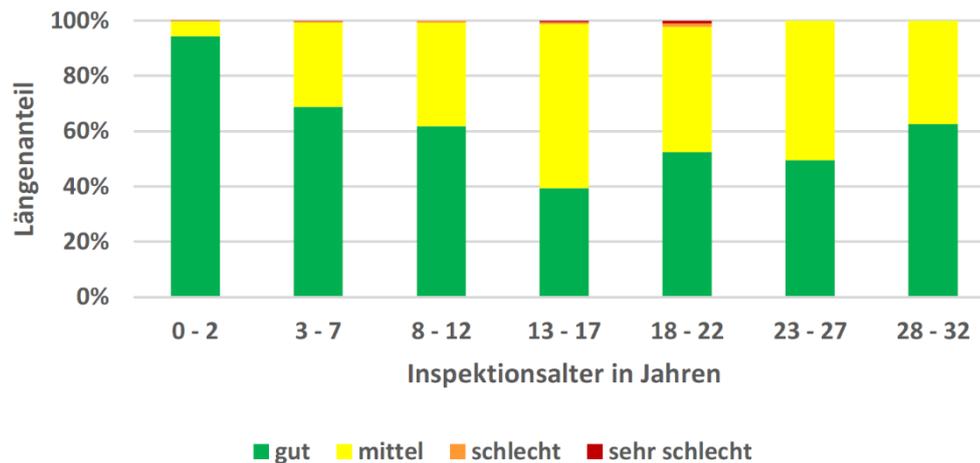


Abbildung 8: Zustandsverteilungen (Ordinate) der ausgewerteten Liner für die Lineraltersgruppen zum Zeitpunkt der Inspektion (Abszisse); Abbildung BWB

interessante Auffälligkeit in Abbildung 8 ist der Trend zunehmender Anteile an Haltungen im guten SEMAplus-Zustand über die Altersgruppen ab 18 Jahren Inspektionsalter. Die Repräsentativität der Daten dieser Altersklassen ist durch deutlich geringere Anzahlen an Linern eingeschränkt. Deshalb werden nur die Zustandsverteilungen der Liner mit einem Alter bis zu 17 Jahren als Grundlage für die Ableitung einer aktualisierten Liner Überlebenskurve genutzt. Dieser Verlauf stellt eine geeignete Grundlage für die Anpassung der in der Einleitung (Kap. 1) beschriebenen Überlebenskurven für Liner der Berliner Wasserbetriebe im Rahmen der verfügbaren Daten dar. Die von den Berliner Wasserbetrieben aus der Datenauswertung übernommenen Annahmen für diese Anpassung werden im Folgenden beschrieben.

### 5.3. Zwischenfazit

Die Datenauswertung dieses Kapitels zeigte insgesamt vorwiegend nicht sanierungsrelevante Zustände für die ausgewerteten 332 km gelinerten Haltungen auf der Grundlage von optisch erfassbaren Schäden. In Ermangelung anderer verfügbarer Daten zur Abbildung des Alterungsverhaltens von Linern wie in den Schlussfolgerungen von Kap. 2 und 3 beschrieben, werden die als repräsentativ erachteten Zustandsverteilungen bis einschließlich Klasse 13-17 Jahre Inspektionsalter als Grundlage für die Anpassung der Liner Überlebenskurve genutzt. In diesen Daten sind weitere, sehr wahrscheinlich alterungsrelevante Daten zu zusätzlichen Schäden wie Aushärtungsdefiziten und Ringspalten nicht enthalten. Ein gemäß der Datenauswertung auf Grundlage der optischen Zustandserfassung als gut bewerteter SEMAplus-Zustand könnte aufgrund von Aushärtungsdefiziten beispielsweise tatsächlich Qualitätsdefizite haben und die

erwartete Nutzungsdauer nicht erreichen, ohne dass dies aus den Daten ersichtlich wäre. Für eine qualifiziertere Zustandsbewertung ist eine zusätzliche Datengrundlage zu weiteren alterungsrelevanten Faktoren erforderlich wie beispielsweise Daten zu Kurzzeit- und ggf. auch Langzeitkennwerten, Daten zu Ringspaltweiten und Daten zum Einbauprozess (falls noch verfügbar). Im Besonderen ist hier die laborseitige Restwertanalyse der mechanischen Kennwerte zu nennen, wie vom RSV-M 1.1 vorgeschlagen und in Kap. 2.7 beschrieben. Auf Grundlage von Daten zu E-Modulen von Linern unterschiedlichen Alters ließe sich ebenfalls eine Überlebenskurve für Liner modellieren. Auch wenn sich aus optisch erfassten Zuständen keine gesicherten mechanischen Zustände ableiten lassen, entspricht das Ergebnis dieser Zustandsanalyse

- im Wesentlichen einem vernachlässigbaren sofortigen Sanierungsbedarf, der in allen Fällen als Reparaturmaßnahme umgesetzt werden könnte
- dem bisher nicht beobachteten vollständigen statischen Versagen eines einzigen Liners in Berlin.

Es ist noch bei keinem einzigen Liner auch nur zum statischen Teilversagen gekommen, wenn man von vereinzelt, missglückten Linereinbauten auf der Baustelle mit anschließendem sofortigem Linerausbau absieht.

Die in Kap. 1 erwähnten Überlebenskurven von Linern basieren auf anfänglichen Annahmen zum Alterungsverhalten von Linern. Auf Grundlage der ausgewerteten Verteilung der SEMAplus-Zustandsbereiche und der Eingrenzung auf relevante Altersklassen lassen sich erneute Kalibrierungspunkte generieren und damit idealerweise ein genauerer Modellierungsansatz des Alterungsverhaltens der Berliner Liner abbilden. Tabelle 6 zeigt die neu festgelegten Kalibrierungspunkte als Begrenzungen der jeweiligen Zustände für die Berliner Lineralterung. Diese sind in Abbildung 9 als schwarze Kreuze über den daraus angepassten Überlebenskurven markiert. Die Festlegung der Kalibrierpunkte bei 15 Jahren Lineralter ergeben sich aus den ausgewerteten Anteilen der Altersklasse 13-17 Jahre (Abbildung 8). Die weiteren Datenpunkte resultieren aus Annahmen basierend auf Abschätzungen der Expert:innen der Berliner Wasserbetriebe aufbauend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und Interviews dieses Berichts. Demnach wird angenommen, dass nach 50 Jahren 50 % der Liner in gutem und mittlerem – also nicht sanierungsbedürftigem - Zustand sind, während die anderen 50 % in schlechtem und sehr schlechtem – also sanierungsbedürftigem -Zustand sind, was der Schätzung der Nutzungsdauer von 50 Jahren entspricht (siehe Kap. 2). Somit erfolgt keine Anpassung der entsprechenden Annahme zum Zusammenhang der Nutzungsdauer und der Liner-ÜLK aus dem Projekt SEMA Berlin 2. Der Anteil im sehr schlechten Zustand beträgt nach 50 Jahren 20 % basierend auf einer früheren Studie (Nassar and Yousef, 2002), beschrieben in Kap. 3.6.2, die eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 80 % impliziert. Der Anteil im guten Zustand wurde mit 5% angenommen, da die Datenauswertung auf einen stark rückläufigen guten Zustandsbereich hinweist und sich bei Linern ab dem Altersbereich >15 Jahre ein vergleichsweise breiter mittlerer Zustandsbereich auszubilden scheint. Bei 75 Jahren wird angenommen, dass 70 % im Zustand sehr schlecht, 20 % im Zustand schlecht, 10 % im Zustand mittel und kein Liner im Zustand gut vorhanden ist. Diese Annahmen stützen sich auf der Extrapolation des Alterungsverlaufs sowie darauf, den Übergang von mittleren zu sehr schlechten Zuständen mit einer ausreichenden Breite der schlechten Zustände realistisch zu gestalten.

Tabelle 6: Vorschlag der Kalibrierungspunkte auf Grundlage früherer Schlussfolgerungen und getroffener Annahmen

Zustand	15 Jahre	50 Jahre	75 Jahre
<b>Sehr schlecht</b>	0,005	0,200	0,700
<b>Schlecht</b>	0,006	0,300	0,200
<b>Mittel</b>	0,594	0,450	0,100
<b>Gut</b>	0,395	0,050	0,000

Bei genauerer Betrachtung der aus der Kalibrierung entstehenden Überlebenskurven in Abbildung 9 zeigt sich, dass diese die Punkte der Zustandsübergänge zum Teil verfehlen. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich die Kalibrierungspunkte nicht vollständig durch die verwendeten mathematischen Formen einer Gompertz-Verteilung (Riechel, 2021) abbilden lassen. Die Unsicherheiten der abgebildeten Überlebenskurve werden von den Berliner Wasserbetrieben in der Datengrundlage, den getroffenen Annahmen und der Abweichung der mathematischen Modellierung von den Kalibrierpunkten gesehen. Die Größenordnung der Unsicherheiten lässt sich aufgrund mangelnder zusätzlicher Daten wie in diesem Bericht beschrieben derzeit noch nicht abschätzen. Die weitere Konkretisierung der Überlebenskurve soll Ziel weiterer Forschungsaktivitäten bei den Berliner Wasserbetrieben im Rahmen der geplanten Fortführung des SEMA Berlin-Projekte sein.

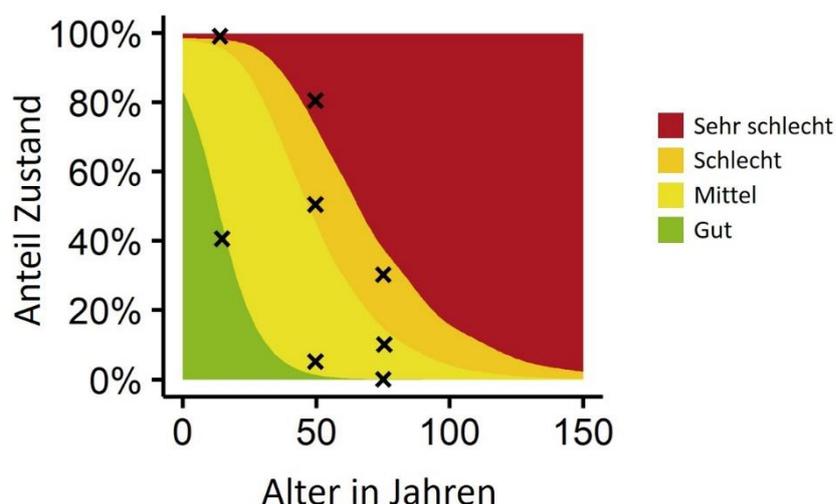


Abbildung 9: Vorschlag überarbeiteter und für die Berliner Wasserbetriebe annehmbarer Überlebenskurven zur Modellierung des Alterungsverhaltens von Linern; kalibriert über markierte Punkte aus aktualisierten Datenauswertungen, Annahmen und Schlussfolgerungen dieser Forschungsarbeit

Die in Abbildung 9 dargestellte Überlebenskurve für Liner wird bei den Berliner Wasserbetrieben innerhalb des SEMAplus Strategie-Simulators verwendet. Sie ist auf der Grundlage

berlinspezifischer Rahmenbedingungen und Grundlagen erstellt worden und stellt für die Berliner Wasserbetriebe den aktuellen Wissensstand zu Alterung der Berliner Liner dar. Sie ist nicht ohne Anpassungen auf Liner in anderen Kanalnetzen übertragbar und erhebt daher nicht den Anspruch auf allgemeine Anwendbarkeit und Gültigkeit.

## **6. Zusätzliche Erkenntnisse**

Parallel zur Bearbeitung dieser Studie gab es einen intensiven Austausch der Berliner Wasserbetriebe mit anderen Betreibern und Fachexperten der DWA-Arbeitsgruppe ES 8.6 zur Vertiefung des fachlichen Verständnisses und der Zusammenhänge bei der Klärung offener Fragen zur technischen Nutzungsdauer von Schlauchlinern bzw. zur Anpassung der Liner-Überlebenskurve (ÜLK). Aus den Gesprächen haben sich zusätzliche, wichtige Erkenntnisgewinne ergeben, die entscheidenden Einfluss auf die weitere Vorgehensweise der Berliner Wasserbetriebe bei der Überarbeitung der Liner-ÜLK nehmen. Sie sind Bestandteil der abschließenden Handlungsempfehlungen und werden im Folgenden erläutert.

### **6.1. Protokollierung des Einbauprozesses**

Zu einer mehrheitlichen Anzahl von Bestandslinern sind Daten zum Einbauprozess (Protokolle) verfügbar, über die sich Abschätzungen zu den zum Bauzeitpunkt bestehenden Einbaubedingungen und den gegebenenfalls eventuell vorhandenen Aushärtungsdefiziten vornehmen lassen. Was sich weder in der Literatur wiederfindet, noch von den Befragten während der Interviews genannt wurde, ist die standardmäßige Protokollierung der Datenerhebung während des Einbauprozesses von Schlauchlinern. Einbaudaten stellen eine wichtige Informationsquelle bezüglich der Einbauqualität und der damit zu erwartenden Nutzungsdauer von Linern dar, die bisher offensichtlich unberücksichtigt blieben. Mit dem entsprechenden Fachwissen zum Verbundwerkstoff Schlauchliner und zur Interpretation der protokollierten Daten zum Zeitpunkt des Einbaus lassen sich nachträglich Rückschlüsse auf die Aushärtungs- und damit die Einbauqualität der verbauten Liner ziehen. Die Daten zum Einbauprozess stellen somit eine zusätzliche Datengrundlage dar, deren Informationsgehalt bezogen auf die Fragen zur Nutzungsdauer und zur Liner-ÜLK weiter untersucht werden sollte.

### **6.2. Erfassung von Linerschäden in optischen Befahrungen**

Inwieweit die schwerwiegendsten nutzungsdauerverkürzenden Schäden auch optisch inspizierbar sind (vgl. Kap. 3.4.1), wird derzeit unter Fachexperten diskutiert und sollte Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein. In TV-Inspektionen erkennbare, linerspezifische Merkmale wie beispielsweise Fasern, Glitzern, austretende Harze, etc., können Aufschluss über Linerschäden geben, wenn sie bei der Inspektion erfasst werden. Auch wenn das Regelwerk (DIN EN 13508-2 bzw. DWA-M 149-2/3) für einen Teil dieser Schäden Codes für die Erfassung vorgibt, besteht gemäß Betreibererfahrung bei den Berliner Wasserbetriebe Schulungsbedarf bezüglich einer entsprechenden Erfassung durch die Inspizierenden. Zudem ist zu prüfen, inwieweit die Ansprache dieser linerspezifischen, optischen Schäden in den Regelwerken vollständig ist oder ob dabei Ergänzungsbedarf besteht.

## 7. Gesamtfazit

Die in der Einleitung geschilderte Problemstellung dieses Berichts betonte die wachsende Verwendung von Linern und die damit verbundenen Fragen zur technischen Nutzungsdauer dieser Technologie. Kommunen und Kanalnetzbetreiber stehen vor der Herausforderung, die langfristige Haltbarkeit von Linern abzuschätzen und in ihre Investitionsplanung einzubeziehen. Die Unsicherheit um die Nutzungsdauer und mögliche Risiken erfordert eine gründliche Erforschung des Alterungs- und Versagensverhaltens von Linern. Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche, Interviewkampagne und Datenanalyse lassen sich mehrere Schlussfolgerungen ziehen:

**1. Zuversicht und Unsicherheit bei der Einschätzung der Nutzungsdauer:** Die Literaturrecherche zeigt, dass die erwartete Nutzungsdauer von Linern nach wie vor auf konservativen Schätzungen von 50 Jahren beruht. Obwohl keine neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Nutzungsdauer vorliegen, zeigt sich dennoch ein starker Erfahrungszuwachs der Betreiber durch die steigende Anzahl verbauter Liner, zunehmendes Alter der verbauten Liner im Netz und entsprechende Betriebserfahrungen durch Zustandserfassungen und Beobachtung unterschiedlicher Versagensfälle. Zudem deuten die Formulierungen in der Literatur und Aussagen von Expert:innen darauf hin, dass bei mangelfreiem Einbau eine Nutzungsdauer über 50 Jahre hinaus erwartet wird. Dem stehen allerdings auch zukünftig erforderliche Untersuchungen zu zusätzlichen, bisher unberücksichtigten Schäden entgegen, die zu verkürzten Nutzungsdauern führen können. Insbesondere der optisch nicht erkennbare unsachgemäße Einbau von Linern sowie nur wenige Jahre Erfahrung mit den neueren Glasfaserlinern, darunter die jüngsten Erkenntnisse im UV-Härtungsprozess bringen weitere Unsicherheiten in die Einschätzungen der Nutzungsdauer. In diesem Kontext sind die derzeit angesetzten 50 Jahre nicht notwendigerweise gesichert. Gleichzeitig schätzen ca. 70 % der Interviewten, dass die Nutzungsdauer von Linern die 50 Jahre überdauere, sofern der Einbau mangelfrei erfolgt und das Altrohr ausreichende Stabilität aufweist. Die ursprüngliche Angabe einer Nutzungsdauer von 50 Jahren mit Übernahme in die Regelwerke sollte wissenschaftlich überprüft und ggf. angepasst werden, um den aktuellen Erkenntnissen und Entwicklungen gerecht zu werden. Dazu sind mehr Studien langjährig betriebener Liner mit Probenahme und laborseitiger Materialuntersuchung notwendig. Ebenfalls stellt sich die Frage nach den erwartbaren Versagensarten von Linern, da, verglichen mit sichtbar statischen Versagensfällen von Beton- oder Steinzeugkanälen, ein alterungsbedingtes Kollabieren eines Liners bisher nicht bekannt ist. Vermutungen durch Befragte stellen Abnutzungserscheinungen, Undichtigkeiten und Verformungen als altersbedingte Versagensarten von Linern in Aussicht.

**2. Einbauqualität hat den entscheidendsten Einfluss auf die Nutzungsdauer:** Die Literaturrecherche und Erfahrungen aus den Interviews haben gezeigt, dass der Großteil schwerwiegender Schäden und Probleme an Linern auf Fehler beim Einbau zurückzuführen ist. Dazu zählen in der aktuellen Debatte vor allem Aushärtungsdefizite, Ringspalte und kritische Falten. Besonders der Einbauprozess von Linern, welcher unter volatilen Baustellenbedingungen stattfindet, stellt eine Herausforderung für die Qualitätssicherung dar. Das Verbundwerkstoffprodukt Liner weist bei der baustellenseitigen Herstellung und Qualitätssicherung ein hohes Maß an Freiheitsgraden auf verglichen mit anderen Industriezweigen, in denen derartige Verbundmaterialien mit werkgefertigter Präzision hergestellt werden. Die Wichtigkeit eines verstärkten Monitorings insbesondere des Härtungsprozesses schon während des Einbaus stellt einen ersten Schritt in Richtung einer Qualitätskontrolle mit Eingriffs- und Optimierungsmöglichkeit dar.

**3. Mangel an belastbaren Daten:** Es gibt einen Mangel an Studien mit belastbaren Daten zur tatsächlichen Nutzungsdauer von Linern. Eine Untersuchung langjährig betriebener Liner auf Basis von optischen Inspektionen, wie es in der Datenauswertung dieses Berichts erfolgte, ist derzeit die einzige Möglichkeit einer datenbasierten, ersten Abschätzung des Alterungsverhaltens – dabei allerdings bei weitem nicht ausreichend für eine umfassende Beurteilung der Linerzustände. Die Möglichkeiten weiterführender optischer Schadenserfassungen bezogen auf alterungsrelevante Schäden sind zu untersuchen. Laborprüfungen erfolgen in den meisten Fällen anhand der dem Einbau genommenen Probestücke, und es gibt nur vereinzelte Materialprüfungen von langjährig im Betrieb befindlichen Linern. Eine erneute Probenahme stellt eine Herausforderung dar, da sie nicht zerstörungsfrei in Linern in gutem optischem Zustand durchführbar ist. Es wird empfohlen, den Einsatz zerstörungsfreier Untersuchungs- und Monitoringmethoden im Kanal weiter zu erforschen, um perspektivisch im besten Falle eine für den Betrieb leicht handhabbare Vorgehensweise zu entwickeln.

**4. Schadenserfassung und Zustandsbeurteilung braucht Standardisierung:** Für gelinerte Haltungen ist eine umfassende Zustandserfassung des Liner-Altrohr-Systems erforderlich. Es besteht die Notwendigkeit und Herausforderung, Schäden, die bereits im Altrohr vorhanden sind, auch nach einem Linereinbau monitoren zu können, wie im Kap. 0 der Datenaufbereitung dargestellt. Für optisch nicht sichtbare Schäden und Mängel, wie Altrohrdefekte sowie bereits erwähnte verdeckte Schäden an Linern, wie Aushärtungsdefizite oder Ringspalt, ist eine Schadenserfassung und Zustandsbeurteilung über die DIN 13508-2 bzw. DWA-M 149-2/-3 nicht ausreichend. Darüber hinaus sollten sich geeignete zerstörungsfreie Inspektions- / Messtechniken neben der optischen Inspektion als Standard zum Monitoring im Kanal etablieren.

**5. Kalibrieransatz der Überlebenskurven von Linern bei den Berliner Wasserbetrieben:** Die Erkenntnisse dieses Berichts dienen der Entwicklung eines Kalibrieransatzes für die Überlebenskurven von Linern zur Zustandsprognose von Linern. Basierend auf dem Fazit zur Nutzungsdauer von Linern, geht die zentrale Kalibrierungsannahme bei einem Lineralter von 50 Jahren davon aus, dass 50 % der Liner in einem nicht sanierungsbedürftigen Zustand gemäß SEMAplus Festlegungen sind, während die anderen 50 % sich in einem sanierungsbedürftigen Zustand befinden. Ob diese Überlebenskurven pauschal die Zustandsverteilung von Linern unterschiedlicher Materialien und Herstellungsverfahren abbilden, ist fraglich, ebenso wie die Genauigkeit der getroffenen Annahmen. Daher gilt es diesen ersten Vorschlag eines Kalibrieransatzes kontinuierlich zu prüfen und ggf. zu überarbeiten, sofern sich neue Erkenntnisse oder geeignete alterungsrelevante Datenquellen bieten.

**6. Erste Erprobungen der Möglichkeiten einer Folgesanierung:** In den Interviews wurden bereits Beispiele genannt, wie eine Folgesanierung einer beschädigten gelinerten Haltung nach mangelndem Einbau stattgefunden hat. Bei den Interviewten war der Konsens, dass die Wahl einer Folgesanierung stark situationsabhängig ist. Bei geeigneten Bedingungen des bestehenden Altrohr-Liner-Systems sowie genügend hydraulischer Kapazität konnte ein zweiter Liner innerhalb des alten Liners verbaut werden. In einigen Fällen musste der defekte Liner ausgebaut werden, bevor ein neuer eingebaut werden konnte. Allerdings handelte es sich bei allen Erfahrungsschilderungen um den Ausbau und Neueinbau von Linern aufgrund eines schadhafte Einbaus mit Kenntnis über den aktuellen Altrohrzustand. Eine Folgesanierung eines altersbedingt versagten Liners hat laut der Literaturrecherche und Interviews dieses Berichts bisher nicht stattgefunden. Dabei stellt die Unwissenheit zum aktuellen Altrohrzustand hinter dem Liner eine große Unsicherheit dar. Offen bleibt also die Frage, ob sich diese beiden grabenlosen Folgesanierungen auch am Ende einer langjährigen Nutzungsdauer einer gelinerten Haltung eignen.

Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass es weiteren Forschungsbedarf gibt, um das Alterungsverhalten von Linern im Laufe ihrer Nutzungsdauer besser zu verstehen und zu modellieren. Dies ist entscheidend für eine fundierte Investitionsplanung, den sicheren Betrieb und die Ermöglichung von Folgerenovierungen von Linersystemen in der Kanalisation.

## 8. Handlungsempfehlungen

**1. Auswertung der Einbauprotokolle:** Die bisher offensichtlich unberücksichtigten Daten aus den standardmäßig erstellten Einbauprotokollen sind soweit vorhanden nachträglich bezüglich der Einbaubedingungenqualität und gegebenenfalls resultierenden Aushärtedefiziten einzuschätzen. Dazu ist die Expertise zum Verbundwerkstoff Schlauchliner von Fachleuten aus der Werkstoffkunde hinzu zu ziehen. Die Einschätzung der Aushärtungsqualität sollte als Annahme bis zum Vorliegenden von bestätigenden Forschungsergebnissen für eine erste Kategorisierung zum Alterungsverhalten der Schlauchliner genutzt werden.

In Abhängigkeit der Ergebnisse der Untersuchung des Zusammenhangs von Aushärtungsdefiziten und Alterungsverhalten könnten weiterführende Rückschlüsse auf die Alterung der verbauten Liner gezogen werden (vgl. Handlungsempfehlung Datenerhebung im Betrieb von Linern).

**2. Vertiefte Analyse der optischen Schadenserfassung:** Zur Klärung der Frage, inwieweit die schwerwiegendsten nutzungsdauerverkürzenden Schäden auch optisch inspizierbar sind (vgl. Kap. 3.4.1), sollten folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

- Klärung mit Fachexperten aus der Werkstoffkunde, ob in TV-Inspektionen erkennbare, linerspezifische Merkmale wie beispielsweise herausstehende Fasern, Glitzern, austretende Harze, etc., Aufschluss über Linerschäden geben können, die Einfluss auf das Alterungsverhalten haben.
- Prüfung, inwieweit die Ansprache dieser linerspezifischen, optischen, alterungsrelevanten Schäden in den Regelwerken vollständig ist oder ob dabei Ergänzungsbedarf besteht. Gegebenenfalls provisorische Ergänzungen in der Schadensansprache definieren.
- Im Bedarfsfall entsprechende Schulung der Inspizierenden auf der Erkenntnisgrundlage der Klärung mit den Fachexperten zu optisch erkennbaren alterungsrelevanten Linerschäden.

**3. Datenerhebung im Betrieb von Linern:** Das Fazit des Berichts hat gezeigt, dass es an belastbaren Zustandsdaten langjährig betriebener Liner mangelt. Die Inspektionsintervalle mit optischer Befahrung der Liner stellen eine erste Grundlage zum Monitoring dar. Bei optisch auffälligen Linern mit Verdacht auf Alterungserscheinungen empfiehlt sich, eine Probenahme mit anschließender laborseitiger Untersuchung der mechanischen Kurz- und Langzeitkennwerte durchzuführen. Aufgrund des derzeitigen Datenmangels ist aber auch ohne Verdacht auf Alterungserscheinungen eine Beprobung im großen Stil für langjährig betriebene Liner empfehlenswert. Für eine Betrachtung von Alterungserscheinungen ist hierbei ein Vergleich der Materialkennwerte mit einer früheren Probe (im Idealfall zum Zeitpunkt der Abnahme) essenziell. Dieser Vergleich kann Aufschluss über vorhandene Alterungserscheinungen geben und eine Abschätzung erlauben, ob dieser Liner weiterhin betriebstauglich ist. Eine alleinige Auswertung der aktuellen Laborergebnisse ohne Vergleich mit früheren Daten, wie es in mehreren Studien in Kap. 3.3 durchgeführt wurde, lässt dagegen keine Differenzierung zwischen Einbaumängeln und Alterungserscheinungen zu und bietet somit keinen Mehrwert für das Verständnis des Alterungsverhaltens.

Zusätzlich sollte das Verständnis des Zusammenhangs von verminderten mechanischen Kurzzeitkennwerten und aus Einbauprotokollen ersichtlichen Aushärtungsdefiziten bezogen auf das Alterungsverhalten von Schlauchlinern durch zusätzliche Untersuchungen unter definierten Bedingungen verbessert werden.

**4. Datenerhebung beim Ausbau von Linern:** Sollten in Zukunft langjährig betriebene Liner ausgebaut werden, ist es wichtig, diese Liner zu Forschungszwecken umfangreichen Materialproben zu unterziehen und den Zustand des Altrohrs zu erfassen, sofern möglich. In diesem Fall sollte darauf geachtet werden, dass der Linerausbau so schonend wie möglich für das Altrohr geschieht. Zum Vergleich des Altrohrzustands über die Nutzungsdauer des Liners hinweg wird dazu auch der Altrohrzustand vor Einbau des Liners benötigt, sofern dieser erfasst wurde. Für eine standortübergreifende Datenerfassung eignen sich zentrale Organisationen, wie die DWA besonders gut, eine Ausgabe von Empfehlungen zur Datenerhebung sowie der Sammlung und Auswertung dieser Daten in Kommunikation mit Betreibern durchzuführen.

**5. Ausweitung der Qualitätssicherung beim Linereinbau:** Die Abnahmebefahrung und Laborprüfung nach Einbau eines Liners lassen im Falle von Mängeln keine Nachbesserungen oder Optimierungen am Liner zu, da dieser bereits ausgehärtet ist. Daher sollte bereits während des Einbaus ein Monitoring zur Qualitätssicherung eingesetzt werden. Insbesondere die kritische Phase des Aushärtungsprozesses bedarf einer umfassenden Echtzeitüberwachung, um bei Auffälligkeiten direkt in den Prozess eingreifen und diesen optimieren zu können. Die dielektrische Impedanzspektroskopie, wie sie in Buchner et al. (2021) beschrieben ist, weist vielversprechende Ergebnisse auf. Es hat sich bereits ein Markt mit Anbietern für in situ-Aushärtungsmonitoring etabliert, dessen Technik und Expertise einen großen Sprung für die Qualitätssicherung sowie Datenerhebung des Einbauprozesses bedeuten. Ein Echtzeitmonitoring des Einbauprozesses als Qualitätssicherungsmaßnahme gewährleistet die Entstehung eines qualitativ hochwertigen Linerprodukts als Grundlage für die Sicherstellung einer langfristigen Nutzungsdauer.

**6. Erforschung neuer in situ Monitoringverfahren:** Für eine umfassende Zustandsbewertung des gesamten Liner-Altrohrsystems über dessen Nutzungsdauer sind die bisher gängigen optischen Inspektionen nicht ausreichend. Grund hierfür ist, dass (a) noch nicht bekannt ist, wie Alterungserscheinungen am Liner aussehen und (b) der Liner eine optische Begutachtung des Altrohrs sowie des Altrohr-Bodensystems verhindert. Die Erforschung neuer in situ Messmethoden, die ergänzend zum optischen Monitoring von Linern bzw. Liner-Altrohr-Boden-Systemen angewandt werden können, ist daher ein wichtiger Schritt zu einer größeren Datengrundlage und umfassenderen Bewertungen. Eine Studie von Alam et al. (2018) fand einen möglichen Zusammenhang zwischen der Oberflächenhärte (insbesondere der inneren) von Linern und deren Alterung. In der Studie wird in Aussicht gestellt, die innere Oberflächenhärte im Laufe der Nutzungsdauer eines Liners in situ mithilfe von entsprechenden Kanalrobotern zu testen und darüber Aussagen über den Alterungszustand eines Liners abzuleiten. Eine gut geeignete Übersicht erprobter Kanalinspektionstechniken mit deren Vor- und Nachteilen sowie Anwendungsgebieten ist in der Publikation von Hao et al. (2012) dargestellt. Eine Erprobung eines geeigneten dieser Verfahren zur in situ-Zustandsbewertung an Liner-Altrohr-Systemen bleibt ein zu erforschendes Thema.

**7. Differenzierte Untersuchung von Linern:** Aufgrund der unterschiedlichen Ausführungsarten von Linern sollte bei Untersuchungen und daraus abgeleiteten Aussagen zur Nutzungsdauer sowie dem Alterungsverhalten immer auf die genau verwendeten Materialien und Einbauverfahren der Liner hingewiesen werden. Dadurch wird eine gesonderte Betrachtung verschiedener Verbundsysteme und repräsentativer Schäden angestrebt, wie es bisher in vielen Literaturquellen und insbesondere den genannten Regelwerken noch nicht erfolgt ist. Je nach Unterscheidungsgrad des Alterungsverhaltens der unterschiedlichen Verbundarten wären jeweils unterschiedliche Kurven für beispielsweise Nadelfilz- und Glasfaserliner denkbar. Sollte sich herausstellen, dass das Alterungsverhalten bei allen Linerarten gleich ist, kann die Differenzierung wieder verallgemeinert werden. Aktuell ist dazu jedoch nichts bekannt.

**8. Untersuchung Schadensauswirkungen auf Nutzungsdauer und Erfahrungsaustausch:**

Dieser Bericht bietet einen Überblick über den derzeitigen Wissensstand zu bekannten Schäden an Linern mit Bewertung, ob diese sich auf deren Nutzungsdauer und Alterungsverhalten auswirken. Auf Grundlage dessen sollte bei auftretenden Schäden weitergehend deren Einfluss auf das Alterungsverhalten von Linern untersucht werden. Darüber hinaus können sich auch bisher noch unerwähnte Schadensbilder im Rahmen von Untersuchungen entlarven. Statistische Untersuchungen der Linalterung unter Berücksichtigung verschiedener Linerarten, Geometrien sowie weiterer Diversifizierungsmerkmale sind für eine Modellierung des Alterungsverhaltens notwendig. Darüber hinaus sollen auch Umgebungsvariablen, die eine Alterung beschleunigen können, in Betracht der statistischen Auswertung gezogen werden. Die Auswertung sollte in der Lage sein, interne und externe Einflussfaktoren zu isolieren. Geeignete Modellansätze zur Abbildung des Alterungsverhaltens und der Zustandsprognose von gelinerten Haltungen sollten stärker in den Fokus rücken und verglichen werden. Der entsprechende Erfahrungsaustausch zwischen Betreibern sowie das Teilen bzw. Publizieren neuer Erkenntnisse von Betreibern sind hierbei von essenzieller Bedeutung und ausdrücklich erwünscht.

## **KWB Kompetenzzentrum Wasser Berlin gemeinnützige GmbH**

Grunewaldstr. 61-62, D-10825 Berlin

[www.kompetenz-wasser.de](http://www.kompetenz-wasser.de)

**Follow us:**

LinkedIn: [Kompetenzzentrum Wasser Berlin](#)

Twitter: [@kompetenzwasser](#)

## Referenzen

- Alam, S., Matthews, J., Sterling, R., Allouche, E., Selvakumar, A., Condit, W., Kampbell, E. and Downey, D. 2018. Evaluation of testing methods for tracking CIPP liners' life-cycle performance. *Cogent Engineering* 5(1), 1463594, doi:10.1080/23311916.2018.1463594.
- Alam, S., Sterling, R.L., Allouche, E., Condit, W., Matthews, J., Selvakumar, A. and Simicevic, J. 2015. A retrospective evaluation of the performance of liner systems used to rehabilitate municipal gravity sewers. *Tunnelling and Underground Space Technology* 50, 451-464.
- Allouche, E., Alam, S., Simicevic, J., Sterling, R., Condit, W., Matthews, J. and Selvakumar, A. 2014. A pilot study for retrospective evaluation of cured-in-place pipe (CIPP) rehabilitation of municipal gravity sewers. *Tunnelling and Underground Space Technology* 39, 82-93.
- Araujo, T. and Yao, B. 2014. Root cause analysis of the principal underlying factors contributing to CIPP flexural data variation. NASTT No-Dig conference Orlando.
- Berger, C., Falk, C., Hetzel, F., Pinnekamp, J., Ruppelt, J., Schleiffer, P. and Schmitt, J. 2020. Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA Umfrage 2020. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 67(12), 939-953, doi:10.3242/kae2020.12.001.
- Berglund, D., Kharazmi, P., Miliutenko, S., Björk, F. and Malmqvist, T. 2018. Comparative life-cycle assessment for renovation methods of waste water sewerage systems for apartment buildings. *Journal of Building Engineering* 19, 98-108.
- Bosseler, B., Homann, D., Brüggemann, T., Naismith, I. and Rubinato, M. 2024. Quality assessment of CIPP lining in sewers: Crucial knowledge acquired by IKT and research gaps identified in Germany. *Tunnelling and Underground Space Technology* 143, 105425.
- Bosseler, B. and Schlüter, M. (2003) Qualitätseinflüsse Schlauchliner, Stichproben-Untersuchung an sanierten Abwasserkanälen, IKT-Forschungsbericht 12. IKT - Institut für unterirdische Infrastruktur. <https://www.ikt.de/website/down/f0104langbericht.pdf>.
- Bosseler, B., Schlüter, M. and Wade, L. 2009. Abnahme von Liningmaßnahmen-Materialnachweise und Bewertung der Linerqualität (Langbericht). IKT-Institut für unterirdische Infrastruktur.
- Buchner, W., Ewert, D., Bollmann, S., von Bernstorff, D. and Sebastian, J. 2021. In-situ-Aushärtungskontrolle bei Schlauchlinern – Qualitätssicherung 2.0. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 68(8), 619-627.
- Bueno, S. 2021 Celebrating CIPP at 50, *Trenchless Technology*, <https://trenchlesstechnology.com/celebrating-cipp-at-50/>.
- Folkman, S. 2014. Validation of the long life of PVC pipes. Proceedings of the 17th International Conference on Plastics Pipes, Chicago, USA.
- Gibhardt, D., Buggisch, C., Meyer, D. and Fiedler, B. 2022. Hygrothermal Aging History of Amine-Epoxy Resins: Effects on Thermo-Mechanical Properties. *Frontiers in Materials* 9, doi:10.3389/fmats.2022.826076.
- Hao, T., Rogers, C.D.F., Metje, N., Chapman, D.N., Muggleton, J.M., Foo, K.Y., Wang, P., Pennock, S.R., Atkins, P.R., Swingle, S.G., Parker, J., Costello, S.B., Burrow, M.P.N., Anspach, J.H., Armitage, R.J., Cohn, A.G., Goddard, K., Lewin, P.L., Orlando, G., Redfern, M.A., Royal, A.C.D. and Saul, A.J. 2012. Condition assessment of the buried utility service infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology* 28, 331-344, doi:10.1016/j.tust.2011.10.011.
- Hicks, J., Kaushal, V. and Jamali, K. 2022. A Comparative Review of Trenchless Cured-in-Place Pipe (CIPP) With Spray Applied Pipe Lining (SAPL) Renewal Methods for Pipelines. *Frontiers in Water* 4, 904821.
- Hoppe, F. 2008. Lebenserwartung von Schlauchlinern. *UmweltBau Kongressausgabe*, 6-9.

- Ji, H.W., Koo, D.D. and Kang, J.-H. 2020. Short- and Long-Term Structural Characterization of Cured-in-Place Pipe Liner with Reinforced Glass Fiber Material. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(6), 2073.
- Ji, H.W., Yoo, S.S., Kim, J. and Koo, D.D. 2018. The mechanical properties of high strength reinforced cured-in-place pipe (CIPP) liner composites for urban water infrastructure rehabilitation. *Water* 10(8), 983.
- Kopietz, M. 2023. Reststyrolgehalt in Schlauchlinerproben – Messmethodik und Auswirkungen. 3R, Vulkan-Verlag GmbH (06/2023), <https://3r-rohre.de/produkt/reststyrolgehalt-in-schlauchlinerproben-messmethodik-und-auswirkungen/>.
- Kunststoffe eV, A.-I.V. (2010) *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*, Auflage 3. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN:3658027541.
- KWB 2020 SEMA-Berlin-2: Unterstützung der Kanalsanierungs- und Investitionsplanung mit Alterungsmodellen, <https://kompetenzwasser.de/de/forschung/projekte/sema-berlin-2>.
- Laurikainen, P. (2017) Characterization of the Ageing of Glass Fibre-Reinforced Polymers, Tampere University of Technology, Finland  
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/25075/Laurikainen.pdf?sequence=4>.
- Leddig-Bahls, S. 2019. Antworten auf aktuelle Qualitätsfragen im Schlauchlining. bbr - Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie 09-2019 Spezial Leitungs- und Kanalsanierung.
- Macey, C., Zurek, K., Clinch, N., Delaurier, A. and Sorokowski, R. 2013. More really old CIPP liners from Winnipeg, MB, Canada that have stood the test of time. NASTT No-Dig conference, USA Paper MM-T6-01, NASTT.
- Meerman, M. 2008. Lifetime Expectancy of PVC-U pipelines for sewer systems. International Conference Plastics Pipes XIV in 09/2008 in Budapest, Hungary, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:225065433>.
- Meng, J. and Wang, Y. 2016. A review on artificial aging behaviors of fiber reinforced polymer-matrix composites. International Symposium on Materials Application and Engineering (SMAE 2016), Chiang Mai, Thailand, MATEC Web of Conferences, 67, doi:10.1051/mateconf/20166706041.
- Nassar, R. and Yousef, M. 2002. Analysis of creep failure times of cured-in-place pipe rehabilitation liners. *Tunnelling and underground space technology* 17(3), 327-332.
- Nuruddin, M., DeCocker, K., Sendesi, S.M.T., Whelton, A.J., Youngblood, J.P. and Howarter, J.A. 2020. Influence of aggressive environmental aging on mechanical and thermo-mechanical properties of Ultra Violet (UV) Cured in Place Pipe liners. *Journal of Composite Materials* 54(23), 3365-3379, doi:10.1177/0021998320913988.
- Riechel, M. 2017. Beschreibung der Schlauchliner in Berlin und statistische Analyse zu Zustand und Schäden. Kurzbericht des Forschungsvorhabens SEMA-Berlin (Memo), Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, <https://publications.kompetenzwasser.de/de/project/sema-berlin-1/>.
- Riechel, M.S., H.; Ringe, A.; Lengemann, N.; Eckert, E.; Caradot, N.; Rouault, P. 2021. Von Daten zu Prognosen: Neue Ansätze für die strategische Kanalsanierungsplanung. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 68 (6), 467-473, doi:<https://doi.org/10.3242/kae2021.06.006>.
- Vogel, M. 2018. Schlauchlining – bewährt, aber nicht trivial. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 65(11).
- Vogel, M. 2022. das Bessere ist der Feind des Guten. Deutscher Schlauchlinertag und Deutscher Reparaturtag 2022, Hannover, Deutschland, B\_I umweltbau, Kongressausgabe Schlauchlinertag.
- Whittle, A. and Tennakoon, J. 2005. Predicting the residual life of PVC sewer pipes. *Plastics, Rubber and Composites* 34(7), 311-317.

- Wicke, D. 2017. Untersuchung der Lebensdauer von Schlauchlinern - Ergebnisse der Literaturrecherche. Bericht des Forschungsvorhabens SEMA-Berlin (D3). Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, <https://publications.kompetenz-wasser.de/de/publication/1030/>.
- Wong, W. 2016. Long Term Performance of CIPP. ISTT No-Dig conference 2016, Beijing, China, 34.
- Xu, Y., Fang, Y., Wang, K., Liu, W. and Fang, H. 2020. Improving durability of glass fiber reinforced polymer composites by incorporation of ZnO/OMMT nanoparticles subjected to UV radiation and hygrothermal aging. Materials Research Express 7(3), 035301.

## **Referenzen von Standards und Merkblättern**

- ASTM F1216-22, "Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube," ASTM International, 2022.
- DIN EN 1610 Berichtigung 1:2016-09, "Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen; Deutsche Fassung EN 1610:2015, Berichtigung zu DIN EN 1610:2015-12," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 178:2019-08, "Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 178:2019); Deutsche Fassung EN ISO 178:2019," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 11296-4:2021-11, "Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) - Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauch-Lining," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 1228:1996-08, "Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) - Ermittlung der spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit; Deutsche Fassung EN 1228:1996," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 899-2:2023-03 - Entwurf, "Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 2: Zeitstand-Biegeversuch bei Dreipunkt-Belastung (ISO/DIS 899-2:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 899-2:2023," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 761:1994-08, "Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) - Bestimmung des Kriechfaktors im trockenen Zustand; Deutsche Fassung EN 761:1994," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 53394-2:1993-12, "Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung von monomerem Styrol in Reaktionsharzformstoffen auf Basis von ungesättigten Polyesterharzen; Gaschromatographisches Verfahren," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 1172:2022-11 - Entwurf, "Textilglasverstärkte Kunststoffe - Prepregs, Formmassen und Lamine - Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts - Kalzinierungsverfahren (ISO/DIS 1172:2022); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 1172:2022," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

- DIN EN 13121-1:2021-11, "Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter - Teil 1: Ausgangsmaterialien - Spezifikations- und Abnahmebedingungen; Deutsche Fassung EN 13121-1:2021," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 13508-2:2011-08, "Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion; Deutsche Fassung EN 13508-2:2003+A1:2011," DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DWA-A 143-2, "Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren," DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Juli 2015; Stand korrigierte Fassung September 2020.
- DWA-A 143-3, "Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Vor Ort härtende Schlauchliner - Mai 2014," DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWA-M 144-3, "Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) für die Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Renovierung mit Schlauchliningverfahren (vor Ort härtendes Schlauchlining) für Abwasserkanäle," DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., November 2012; ergänzte Fassung Dezember 2018 (E1-E5).
- DWA-M 149-2, "Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion," DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Dezember 2013; korrigierte Fassung Januar 2019.
- ISO 11357-2:2020-03, "Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur und der Glasübergangsstufenhöhe," ISO International Organization for Standardization.
- RSV-Merkblatt 1.1, "Renovierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit vor Ort härtendem Schlauchlining," Rohrleitungssanierungsverband e.V., 2021.
- WIS 4-34-04 Issue 2, "Specification for renovation of gravity sewers by lining with cured-in-place pipes," Water Industry Specifications (WIS), March 1995.

## Anhang: Ergänzungen zu den Kapiteln

### **Zu Kap. 3.1: Materialeigenschaften**

Die Kurzzeitkennwerte umfassen die Biegefestigkeit und den Kurzzeit-E-Modul. Die Biegefestigkeit stellt den Widerstand gegenüber Biegebelastungen ohne anhaltende Verformungen oder Brüche dar. Der E-Modul beschreibt dazu die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber Verformungen. Zu den Langzeitkennwerten zählen die Kriechneigung und der Langzeit-E-Modul. Das Verformungsverhalten unter konstanter Lasteinwirkung wird als Kriechneigung gemessen. Daneben erfasst der Langzeit-E-Modul die Änderungen der Materialwiderstandskraft gegenüber Verformungen durch andauernde Lasteinwirkung.

### **Zu Kap. 3.2: Einbau von Linern**

Der Einbau von Linern kann mithilfe des Inversionsverfahrens, des Einziehverfahrens oder einem kombinierten Verfahren erfolgen. Beim Inversionsverfahren wird der harzgetränkte Schlauch mithilfe von Luft- oder Wasserdruck in den Kanal invertiert. Das Einziehverfahren zieht dagegen den Liner über Seilwinden in den Kanal, gefolgt von der Aufstellung des Liners mithilfe von Luft- oder Wasserdruck. Bei dem kombinierten Verfahren folgt eine Inversion des Kalibrierschlauches nachdem der Hauptschlauch über Seilwinden in den Kanal eingezogen wurde (Bosseler and Schlüter, 2003). Der Kalibrierschlauch aus Nadelfilz dient dem Aufstellen des Hauptschlauches und dessen korrekte Positionierung.

### **Zu Kap. 3.3.1: Laborseitige Ermittlung der Langzeitverformungen von Linern**

Mithilfe der Verformungskurven des Langzeit-E-Moduls (z.B. eines 10.000-Stunden-Tests), ist es möglich von 10.000 Stunden auf Langzeitwerte, wie beispielsweise 50 Jahre zu extrapolieren. Die Kriechneigung erfasst im 24h-Versuch die Verformung unter konstanter Last und lässt somit Schlüsse auf das Langzeitverformungsverhalten von Linern zu. Darüber hinaus ist es möglich, Langzeitkennwerte für den E-Modul und die Biegefestigkeit aus den Kurzzeit-Werten des Dreipunkt-Biegeversuchs mithilfe des Abminderungsfaktors aus den DIBt-Zulassungen zu berechnen. Diese berechneten Langzeitwerte werden in der statischen Berechnung eines Liners verwendet (Wicke, 2017).

### **Zu Kap. 3.4.2: Probennahme**

Die allgemein anerkannten Regeln der Technik für die Probenahme an Linern liefert das DWA-A 143-3. Demnach beträgt die Mindestgröße eines Probestückes 35 cm in Längsrichtung (bei Kriechneigungsprüfung mind. 40 cm Länge) und eine Breite von der 20-fache Wanddicke in Umfangsrichtung. Nach einer Probenteilung müssen die Teile mindestens 50 mm Länge sowie einer Breite von der 20-fache Wanddicke in Umfangsrichtung betragen.

### **Zu Kap. 3.4.3: Laborprüfung und Zusatzprüfungen nach DWA-A 143-3**

Im Fall, dass die Höhendifferenz „zwischen dem Mittelpunkt des unbelasteten Probekörpers und der Höhe seiner Auflagerpunkte“ den 0,07-fachen Abstand zwischen den Auflagerpunkten überschreitet, wird der Dreipunkt-Biegeversuch axial oder der Scheiteldruckversuch (nach DIN EN 1228) angewendet.

Zusätzlich zu den Standardprüfungen empfiehlt das DWA-A 143-3 optionale Zusatzprüfungen im Labor; entweder eine Spektralanalyse zur Ermittlung der eingesetzten Harzqualität, oder bei Verwendung von Glasfaser-verstärkten Kunststoffen (GFK) die Bestimmung des Mineralfüllstoff- und Textilglasgehalts (nach DIN EN ISO 1172). Zur Bewertung der Prüfergebnisse macht das

Merkblatt DWA-M 144-3 entsprechende Vorgaben. Mögliche zerstörungsfreie in situ Untersuchungsmethoden, die alternativ zu einigen der genannten Laboruntersuchungen durchgeführt werden könnten, sind dem Bericht von Wicke (2017) Kap. 2.4 zu entnehmen. Neben den dem DWA-A 143-3 (Stand 2014) entnommenen Normenverweisen können für die jeweiligen Verfahren neuere Normen oder noch weitere Normen relevant sein.

### **Zu Kap. 3.5.2: Weitere Materialverformungen**

Ein weiterer Aspekt ist der Materialschrumpfung von Linern, der nach dem Härtingsprozess aufgrund von Reaktions- und Temperaturschrumpfung auftritt. Um dem Materialschrumpfung entgegenzuwirken, können Entlastungsschnitte an Zwischenschichten vorgenommen werden (Vogel, 2018). Der Reaktionsschrumpfung variiert je nach Harzsystem: UP- und VE-Harze zeigen einen deutlichen Schrumpfung, während dieser bei EP-Harzen bereits in der flüssigen Phase abgeschlossen ist und keine Auswirkungen auf das Laminat hat. Thermischer Schrumpfung tritt hingegen bei allen Materialien auf, wobei die Verwendung von Glasfasern und Füllstoffen dem Schrumpfung entgegenwirken. UP Harze werden daher mit Füllstoffen versehen, wohingegen bei EP Harzen keine Füllstoffe erforderlich sind.

Eine weitere Art der Materialverformung ist das Materialquellen. Die in Linersystemen verwendeten Harze gelten gemäß DIN EN 13121 als hydrolysebeständig. Dies bedeutet, dass sie gegenüber Abbau und Zersetzungen durch Einwirkungen von Wasser und Feuchtigkeit stabil sind. Trotzdem kann es bei geringerer Vernetzung der Harzmatrix (Aushärtungsdefiziten) zu Wasseraufnahme und Materialquellen bei Linern kommen (Vogel, 2018).

### **Zu Kap. 3.5.2.2: Kalibrierung**

Zur genauen Liner-Konfektionierung sind relevante Kenndaten notwendig, wie die minimalen, maximalen und mittleren Innenumfangsmaße. Zur Ermittlung dieser Daten sind mehrere Messungen über die gesamte Streckenlänge des Altrohrs verteilt notwendig. Die Auswertung der Messergebnisse sollte mithilfe optischer Inspektionen plausibilisiert werden können (Vogel, 2018). An Schadensstellen im Altrohr, insbesondere Vorverformungen, sollten die Vorgaben des DWA-A 143-2 Kap. 7.3.1 bei der Planung eines Linereinbaus eingehalten werden. Das Merkblatt DWA-M 144-3 empfiehlt die Kalibrierung des gesamten Altrohrs als eine besondere Leistung auszuschreiben, da als derzeitige Nebenleistung lediglich das Messen an den Schichten einer zu sanierenden Haltung vorgesehen ist (Vogel, 2018).

### **Zu Kap. 3.5.2.3: Ringspalt**

Nach erfolgter Probenahme bei Abnahme des eingebauten Liners (siehe Kap. 3.4.2) wird i.d.R. eine Ringspaltmessung am Rückschnitt der entnommenen Probe des Liners durchgeführt. Bei Verdacht eines erhöhten Ringspaltrisikos aufgrund unzureichender Repräsentativität der Messung an der Probenahmestelle sind weitere Probenahmen zur Untersuchung des Ringspalt erforderlich. Eine mögliche zerstörungsfreie Messmethode bildet zum heutigen Stand der Technik das Impakt-Echo-Verfahren, mit dem zwar festgestellt werden kann, ob ein Ringspalt vorhanden ist, dieser jedoch nicht vermessen werden (Wicke, 2017).

### **Altrohrzustände nach DWA-A 143-2**

Altrohrzustand I: Das Altrohr ist allein tragfähig und erfordert lediglich eine Liner-Anbringung zur Dichtheit des Kanals. Es trägt externe Lasten selbstständig, hauptsächlich das Grundwasser.

Altrohrzustand II: Das Altrohr ist nicht allein tragfähig und weist längsgerissene Viertelschalen auf, die sich verdreht haben und den Querschnitt ovalisieren. Ein Tragsystem bildet sich durch das Altrohr-Bodensystem, das den Kanal stützt. Der Liner muss diesem ovalen Querschnitt angepasst sein.

Altrohrzustand III: Ähnlich wie Zustand II, jedoch ist die Standsicherheit des Altrohr-Bodensystems nicht nachweisbar. Der Liner muss zusätzlich zu Grundwasserlasten zumindest teilweise auch andere Belastungen wie Erd-, Verkehrs- und Auflasten tragen, was im Vergleich zu den vorherigen Zuständen eine deutlich größere Belastung bedeutet.

## **Zu Kap. 5.1: Details zu den Filterschritten in der Datenauswertung**

Bei den Auswertungen wurden die aktuellsten Inspektionen verwendet, sodass keine Mehrfachinspektionen der untersuchten Liner im betrachteten Datensatz enthalten sind. Um die Schadensdaten weitestgehend auf die Kriterien Standsicherheit und Dichtheit des Liners einzugrenzen, wurden die Schadenscodes der Befahrungsprotokolle im Wesentlichen zwei Filterschritten unterzogen. Darüber hinaus wurden alle Befahrungsvideos mit Schäden des sofortigen Handlungsbedarfs einzeln eingesehen und die darin enthaltenen Schäden auf den Bezug zum Liner überprüft und ggfs. angepasst.

Im ersten Filterschritt wurden aus dem Datensatz die Schadensbilder entnommen, die sich über die Angaben zur Lage auf einen Hausanschluss des Altrohrs beziehen und bei denen die Anbindung der Hausanschlüsse an den Liner fehlen. Im zweiten Filterschritt erfolgte die Einsichtnahme der Befahrungsvideos ausschließlich von Haltungen mit Schäden des sofortigen Handlungsbedarfs. Es wurden schwerwiegende Schäden wie Risse, Brüche und Scherben entnommen, sofern sie das Altrohr betreffen und nicht auf den Liner selbst zurückzuführen waren. Im letzten Filterschritt wurden die Schadenscodes entnommen, die ausschließlich Auswirkungen auf die Betriebssicherheit haben.