

**Europäische Untersuchung der Leistungsfähigkeit
verschiedener Rohrleitungssysteme bzw.
Rohrmaterialien für städtische Entwässerungssysteme
unter besonderer Berücksichtigung der ökologischen
Auswirkungen während der Nutzungszeit**



S & P Consult GmbH

Konrad-Zuse-Str. 6, 44801 Bochum
Deutschland

Endbericht

Kurzfassung

Bochum, September 2006

Vorwort

Die hier vorgestellte "Untersuchung der Leistungsfähigkeit verschiedener Rohrleitungssysteme bzw. Rohrmaterialien für städtische Entwässerungssysteme unter besonderer Berücksichtigung der ökologischen Auswirkungen während der Nutzungszeit" wurde von der Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH, Deutschland durchgeführt. Ein externer europäischer Sachverständigenausschuss war maßgeblich an dem Projekt beteiligt: Durch das Einbringen der verschiedenen Ansichten über die Lage der Kanalisationssysteme in den jeweiligen Ländern wurde ein ganzheitlicher europäischer Blick auf das Projekt gewährleistet. Das spezielle Wissen der einzelnen Sachverständigen erleichterte die Angleichung der analytischen Verfahrensregeln von „STATUS Kanal“ an die spezifischen Anforderungen des Projekts. Die vom Sachverständigenausschuss durchgeführte Überprüfung des analytischen Ansatzes des Projekts führte zu repräsentativen Ergebnissen.

Der Ausschuss bestand aus folgenden Sachverständigen:

- *Nick Orman* - WRc, Swindon, U.K.;
- *Hans von der Jagt* - Kiwa Water Research, Nieuwegein, Niederlande;
- *Gilbert Sevansson* - Chalmers University, Göteborg, Schweden.

Inhaltsverzeichnis

<u>Vorwort.....</u>	<u>II</u>
<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>III</u>
<u>1 Einleitung.....</u>	<u>1</u>
<u>2 Zielsetzungen.....</u>	<u>2</u>
<u>3 Ansatz und Modell.....</u>	<u>2</u>
<u>3.1 Einleitung</u>	
<u>3.2 Datenbestand und Analyse</u>	
<u>3.3 Erstellung von Modelldaten durch die “Monte-Carlo-Simulation”</u>	
<u>3.4 Erstellung eines Risiko- und Belastungsmodell mit Hilfe von „logischen Bäumen“ und „Fuzzy-Logik“</u>	
<u>4 Erläuterung und Deutung der Ergebnisse.....</u>	<u>7</u>
<u>4.1 Modellergebnisse</u>	
<u>5 Deutsche Ergebnisse.....</u>	<u>8</u>
<u>5.1 Analyse der Daten</u>	
<u>5.2 Szenariendefinition</u>	
<u>5.3 Modellergebnisse</u>	
<u>6 Niederländische Ergebnisse.....</u>	<u>13</u>
<u>6.1 Analyse der Daten</u>	
<u>6.2 Modellergebnisse</u>	
<u>7 Schwedische Ergebnisse.....</u>	<u>16</u>
<u>7.1 Analyse der Daten</u>	
<u>7.2 Modellergebnisse</u>	
<u>8 Fazit</u>	<u>18</u>
<u>Ergänzende länderspezifische Schlussfolgerung</u>	<u>19</u>

1 Einleitung

In Deutschland sind Entwässerungssysteme systematisch seit 1842 errichtet worden. Mehr als ein Jahrhundert lang wurden begehbare Kanäle fast ausschließlich aus Kanalklinkern errichtet. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden Kanalsysteme ab Beginn des 20. Jahrhunderts mehr und mehr aus Ortbeton hergestellt. Der größere Anteil unserer Entwässerungssysteme ist nicht begehbar und besteht aus vorgefertigten Rohren verschiedenster Materialien. Erst in den letzten 50 Jahren sind Kunststoffrohre (PVC, PVC-U, PP, PE, GFK) sowie Rohre aus duktilem Gusseisen, Stahlbeton und Polymerbeton verwendet worden.

Eine Reihe von Untersuchungen hat ergeben, dass Steinzeug-, Beton- und Stahlbetonrohre in öffentlichen deutschen Kanalsystemen mit einem Längenanteil von jeweils ungefähr 45% überwiegen. Das ist historisch bedingt und trifft für Länder wie England, die auch schon sehr früh mit dem Errichten von Abwasserleitungen begonnen hatten, ebenfalls zu. In Ländern wie die skandinavischen Länder und Australien, die aufgrund großer Entfernungen und hoher Kosten später mit dem geregelten Kanalbau begonnen hatten, geht der Trend eindeutig hin zu Kunststoffrohren. Für Grundleitungen (Hausanschlussbereich) werden heutzutage fast ausschließlich Kunststoffrohre verwendet.

Seit ein paar Jahren wird eine wachsende Akzeptanz von Kunststoffrohren auch in den frühzeitig kanalisierten Ländern wie England und Deutschland beobachtet – eine Beobachtung, die sich bereits im Netzbestand bemerkbar macht. Die Hersteller geben folgende Gründe für dieses Wachstum an:

- Niedriges Gewicht (Transport, Handhabung ohne schwere Vorrichtungen) Beispiel DN 300: Beton 137 kg/m, Steinzeug 72 kg/m, Kunststoff 8 bis 10 kg/m
- Vorteilhafte Merkmale in Bezug auf Widerstand gegen aggressives Schmutzwasser und Schmutzwasserbestandteile (Korrosionsbeständigkeit)
- Flexibles Verformungsverhalten (ohne Rissbildung)
- Hydraulisch-glatte Materialien und enger dimensionierte Toleranzbereiche an Rohrverbindungen (weniger Ablagerungen, kleinerer Reinigungsaufwand)
- Ablängen und Anpassen an lokale Gegebenheiten möglich
- Maschinelle Verlegungstechnologien möglich
- Recycling- bzw. Down-cycling-Fähigkeit
- Hohe Nutzungsdauer
- Verlegen in Kurven möglich, d.h. Einsparung von Schächten
- Kanalisationen aus einheitlichem Material (einheitliche Werkstoffe für Rohre, Formstücke, Schächte)

Auch wenn alle Kunststoffrohrsysteme standardisiert oder zertifiziert wären, blieben immer noch einige Unklarheiten in Bezug auf die langfristige Beurteilung von Kunststoffrohren unter praktischen Bedingungen. Vergangene Untersuchungen der Beschaffenheit von Kanälen und

Rohrmaterialien waren bisher immer auf Beton/Stahlbeton und Steinzeug beschränkt, aufgrund ihrer dominierenden Längenanteile.

Das veranlasste das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), ein Forschungsprojekt zu fördern, das durch die Auswertung nationaler Inspektionsdaten wertvolle Informationen über Schäden und Schadenshäufigkeiten in Entwässerungssystemen aus Kunststoff geben kann.

Diese Untersuchungen bilden die Basis für dieses europäische Projekt, um die ökologischen Auswirkungen der gefundenen Schäden auszuwerten. Zusätzliche Inspektionsdaten für die Untersuchung von Beton- und Steinzeugrohrhaltungen und ihre Verlegungsbedingungen wurden in das Projekt mit einbezogen.

2 Zielsetzungen

Das Ziel der Arbeit ist eine weit reichende Analyse der Ergebnisse aus der Zustandserfassung und der ökologischen Auswirkungen. Neben den Unterschieden der verschiedenen Werkstoffe (Beton, Stahlbeton, Steinzeug und Kunststoff) im Hinblick auf ihre Schadensarten und Schadenshäufigkeiten, werden die Unterschiede der Umweltauswirkungen bestimmt. Unter Umweltauswirkungen versteht man Undichtigkeiten, die zum Wasseraustausch zwischen Grundwasserleiter und Kanal in Form von Exfiltration oder Infiltration führen, je nach Lage des Kanals in Bezug auf den Grundwasserspiegel. Das Konzentrieren auf Infiltration und Exfiltration beruht auf der Tatsache, dass die Mehrheit der Umweltauswirkungen durch ein in Betrieb stehendes Kanalsystem direkt oder indirekt durch Infiltration und Exfiltration verursacht werden. Innerhalb des Projekts wird die Überflutung der Kanalsysteme als Exfiltration betrachtet, solange die Überbelastung durch Schäden wie Inkrustation oder Sedimentation verursacht wurde. Überflutung durch schlechte Vorplanung ist für die vorliegende Studie irrelevant und wird demzufolge nicht betrachtet.

Die Analyse erfolgt in vier Schritten:

- Bestimmung und Vergleich der Anzahl und Häufigkeit von Undichtigkeiten
- Erstellen eines Modells zu Risiko und Umweltbelastung durch Undichtigkeiten
- Erstellen verschiedener Szenarien mit unterschiedlichen Randbedingungen
- Modellieren der Umweltauswirkung verschiedener Entwässerungssysteme durch unterschiedliche Szenarien

3 Ansatz und Modell

3.1 Einleitung

Im Allgemeinen ist eine exakte Berechnung von ökologischen Auswirkungen jeglicher Art nahezu unmöglich. Das verwendete Modell basiert auf zwei Hauptgrundsätzen:

- Umweltauswirkungen durch Kanalschäden werden als Auswirkungen durch Infiltration oder Exfiltration betrachtet. Daher basieren alle weiteren Betrachtungen auf den lokalen Randbedingungen und zielen nur auf lokale Auswirkungen ab.
- Alle Modelle nutzen ein relatives und beschreibendes Skalierungssystem ohne Einheiten, um Konvertierungsprobleme zu vermeiden und Vergleiche von verschiedenen Auswirkungen, die in keinen absoluten Kontext gestellt werden können und sollten, zu verhindern.

Ein geeigneter Weg, um den Kalkulationsbedarf mit Variablen verschiedener Skalierungssysteme (deskriptiv, numerisch) und Einheiten zu decken, ist Fuzzy Logik – unscharfe Logik.

3.2 Datenbestand und Analyse

Es wurden Inspektionsdaten aus verschiedenen europäischen Ländern in die Analyse mit einbezogen:

Tabelle 1: Verfügbarer Datenbestand

Land/ Region	Alle Rohre	Biegesteife Rohre	Biegeweiche Rohre	Anteil der biegeweichen Rohre
<i>Deutschland</i>	1731,72 km	1640,83 km	90,89 km	5,25 %
<i>Niederlande</i>	46,69 km	30,27 km	16,42 km	35,17 %
<i>Schweden</i>	12,43 km	3,07 km	9,36 km	75,30 %

Die Daten aus den Niederlanden und Schweden werden auf die bestehenden Schadensgruppen hin analysiert und mit den deutschen Zahlen verglichen. Dies wird der Studie als Basis zugrunde gelegt. Der Grund für die unterschiedliche Datenlage außerhalb Deutschlands ist, dass nur in Deutschland Routine-Inspektionen gesetzlich vorgeschrieben sind. In allen anderen Ländern werden Inspektionen meist auf Anfrage der Ver- und Entsorgungsbetriebe oder durch die Initiative der Stadtverwaltung durchgeführt.

Es wurden in Bezug auf die Daten der Kanalisationen drei Hauptbetrachungskriterien bestimmt: 1. die Schadenshäufigkeit von Kanalhaltungen in Bezug auf das gesamte Kanalsystem; 2. die Häufigkeit von Schäden pro Kilometer innerhalb des Kanalsystems und 3. die Häufigkeit von Schäden pro 100 m innerhalb der schadhaften Haltungen.

3.3 Erstellung von Modelldaten durch die “Monte-Carlo-Simulation”

Bei der Analyse von Umweltauswirkungen gibt es meist keine Verbindung zwischen den spezifischen, durch die Inspektionsdaten ermittelten Schadensmerkmalen des Kanals und den lokalen Randbedingungen. Da diese Verbindungen notwendig für das Modellieren von Umweltauswirkungen sind, müssen sie auf eine Weise hergestellt werden, die verlässliche Analyseergebnisse verspricht, z.B. durch die „Monte-Carlo-Simulation“. Es gibt drei Hauptgruppen von Variablen, die zu ökologischen Auswirkungen führen:

- Spezifische, durch Inspektionsdaten ermittelte Schadensmerkmale des Kanals (Ausmaß und Lage des Schadens)
- Spezifische, durch Fachwissen und hydraulische Berechnungen ermittelte Schadensmerkmale des Kanals (z.B. durchschnittliches Wassereintrittspotential des Schadens)

- Lokale Randbedingungen (z.B. Durchlässigkeit des Bodens), die durch die verschiedenen Szenarien festgelegt wurden

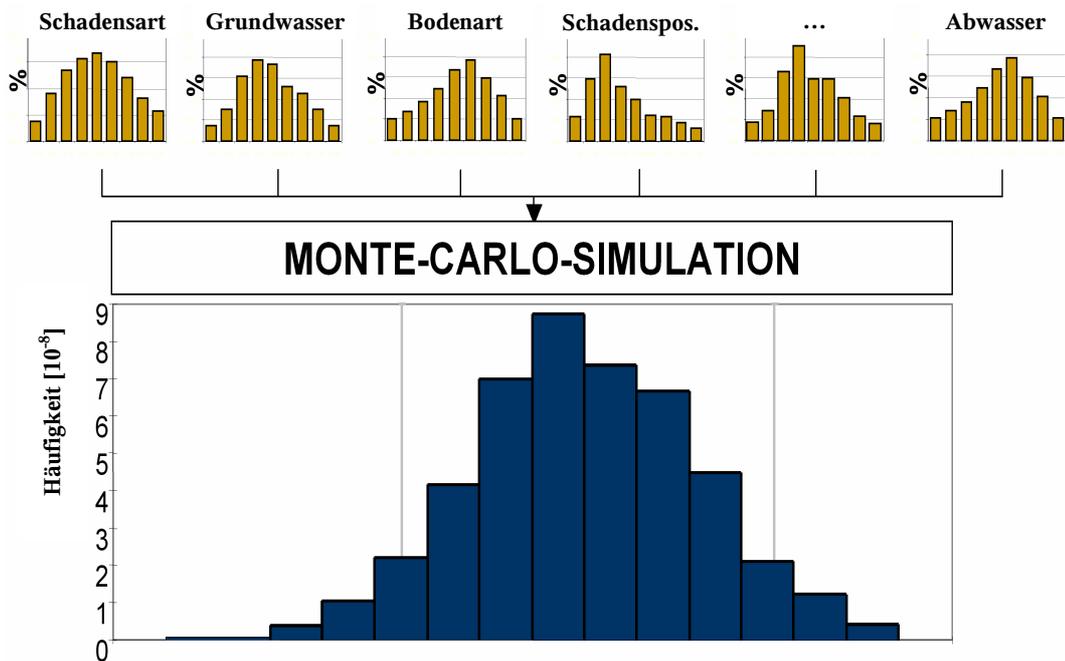


Abbildung 1: Monte-Carlo-Simulation

Das Ergebnis der Simulation ist die Schaffung der Verbindungen zwischen den lokalen Randbedingungen und den spezifischen Schadensmerkmalen des Kanals.

Bestimmung der Schäden durch Undichtigkeiten

Das durchschnittliche Leckagepotential wurde separat für biegeweiche und biegesteife Rohre festgelegt, um die Parameter für die Monte-Carlo-Simulation zu bestimmen – für den Fall, dass diese Parameter nicht aus den Inspektionsdaten hervorgehen. Die Schadensarten, z.B. BAB-Riss (Tabelle 2), werden speziellen Leckagegruppen zugeordnet, um das Leckageverhalten zu beschreiben.

Tabelle 2: Bestimmung des Leckageverhaltens von Rissen

Schadensart Code	Leckage-Art	Leckagepotential Grenzen		Leckagepotential Durchschnitt		
		Min	Max	Biegeweich	Biegesteif	
BAB-Riss						
A	nie					
B	höchstwahrscheinlich	sehr klein	sehr groß	sehr klein	klein	
C	immer	klein	sehr groß	groß	sehr groß	

Bestimmung von Szenarien

Die verschiedenen Szenarien zeigen die absoluten Umweltauswirkungen verschiedener undichter Rohrarten in einer ordinalen Skala. Die Abwasser-Klasse wird dem gewöhnlichen häuslichen Schmutzwasser gleichgesetzt, das Abwassernetz liegt innerhalb städtischer Umgebungen normaler Dichte, und das Infiltrat ist normales Grundwasser.

3.4 Erstellung eines Risiko- und Belastungsmodell mit Hilfe von „logischen Bäumen“ und „Fuzzy-Logik“

Im Fuzzy-Inferenzsystem der Studie werden folgende Faktoren dem Modell und/oder den Modellergebnissen/Zwischenergebnissen zugrunde gelegt:

- | | | | |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| - Abwasserstand | - Infiltrationspotential | - Art des Infiltrats | - Auswirkung auf Vorfluter |
| - Lage des Schadens | - Exfiltrationspotential | - Entfernung von Objekten | - Auswirkung auf Kläranlage |
| - Leckagepotential | - Bodenart | - Objekte | - Grundwasserverschmutzung |
| - Durchlässigkeit des Bodens | - Abwasserart | - Auswirkung auf den Grundwasserstand | - Bodenverunreinigung |
| - Grundwasserstand | | - Auswirkung auf die Kanalstabilität | - Bedrohung von Objekte |

Risikobäume und Auswirkungsbäume

Geeignete Wege zur Modellierung mehrseitig verbundener Faktoren mit dem Ziel, Gefahrenpotentiale zu bestimmen, sind logische Bäume, die Ursache und Wirkung einzelner Faktoren verbinden.

Der Fehlerbaum beschreibt alle möglichen Ursachen, ihre Werte, Beziehungen und Vernetzungsarten und kombiniert diese in eine übergeordnete Ursache, einen Kerngrund (Infiltrations-/Exfiltrationspotential). Der Ereignisbaum identifiziert alle möglichen Konsequenzen, die aus dem definierten Kerngrund resultieren.

Da alle Vernetzungsarten und Beziehungen durch Verfahrensregeln ausgedrückt werden können und die Vernetzungen in den meisten Fällen nicht binär verlaufen, kann das Ursache- und Wirkungsdiagramm als eine Kombination aus dem Fehlerbaum und Ereignisbaum durch ein multi-dimensionales System vereinfacht werden.

Verknüpfung von Variablen durch Fuzzy-Logik

Das Fuzzy-Verfahren folgt immer dem gleichen Ablauf.

1. „Fuzzifizierung“ der Eingangsvariablen anhand der Vektoren und Zugehörigkeitsfunktionen (für die spezifische Variable).
2. Die in Beziehung gesetzten Variablen werden mit einer Fuzzy-Inferenzmatrix verbunden, die die Regelungen darstellt, mit der diese Variablen verknüpft werden.
3. Die zwei Eingangsvariablen für diese Fuzzy-Inferenzmatrix mit ihrer jeweiligen Zugehörigkeit zum Vektor bestimmen die Regelungen, die für den weiteren Verlauf benötigt werden.
4. Durch die Anwendung der mathematischen Ergebnis- und Schwerpunkt-Methode wird ein Ergebnis-Vektor bestimmt, der schließlich in den Ergebniswert der Zieltafel „defuzzifiziert“ wird.

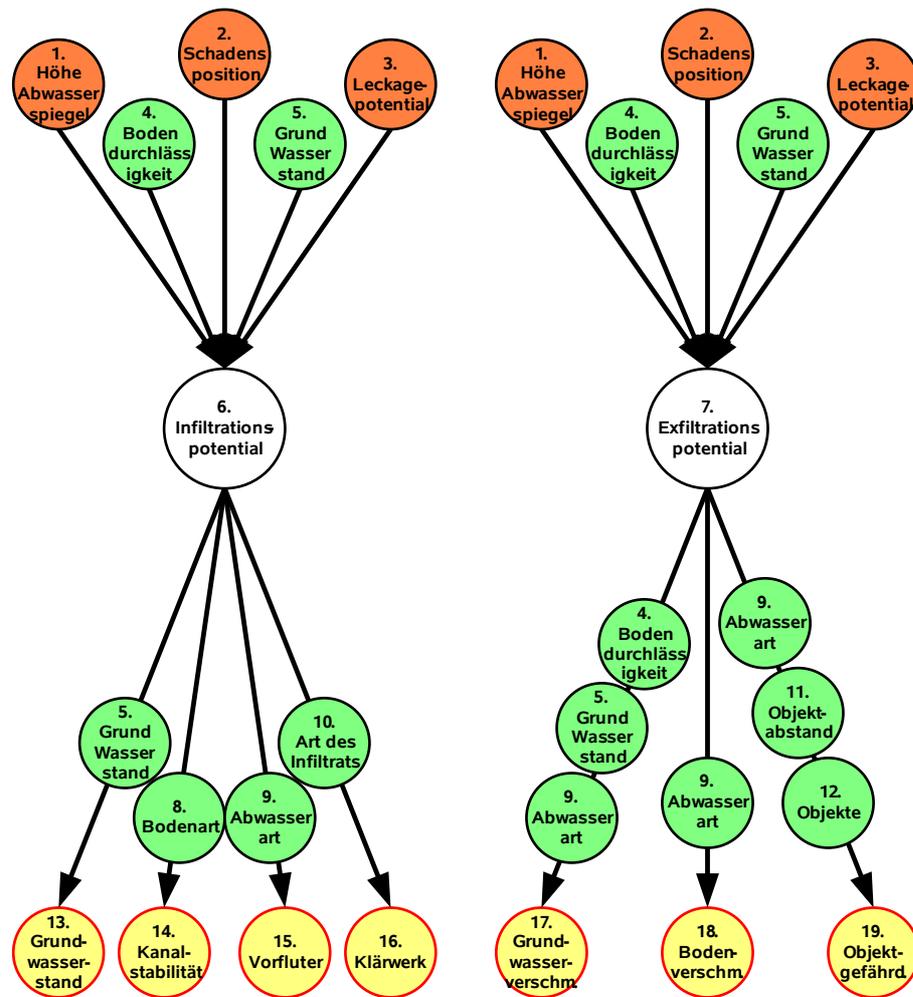


Abbildung 2: Ursache- und Wirkungsdiagramm

Diese Vorgehensweise wird für jeden Datensatz, der durch die Monte-Carlo-Simulation erstellt wurde, und für jeden Knotenpunkt innerhalb des Baumes angewendet. Die ausführlichen multidimensionalen Regelungen wurden durch zweidimensionale Matrizen bestimmt und zu ein paar hundert zutreffenden Regeln zusammengefasst.

Weitere Aspekte zur Modellierung von Umweltauswirkungen

Nutzungsdauer

Da die absolute Umweltverträglichkeit der analysierten Haltungen von der Zeit der Einwirkung abhängt, skaliert sie gemäß der Nutzungsdauer der Kanalhaltungen. Daher wechselt das Verhältnis zwischen diesen Auswirkungen und anderen Umweltgegebenheiten des Lebenszyklus dementsprechend. Die durchschnittliche Nutzungsdauer wurde in deutschen Regelwerken für alle Werkstoffe auf 80 Jahre festgesetzt. Aus diesem Grund bleiben diese Skalierungseffekte in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt.

Datenqualität

Bis zu 20% der Qualität der Netzdaten (Inspektionsdaten und Basisdaten) ist in vielerlei Hinsicht mangelhaft, z.B. unzureichende Kürzelsysteme zur Schadensbeschreibung, subjektive Bewertung, logische Fehler etc. Viele dieser Ungenauigkeiten bleiben unentdeckt, außer es findet eine Durchsicht der Inspektionsvideos statt. Dies ist jedoch kostspielig oder unzureichend aufgrund schlechter Video-Qualität oder anderer Gründe. Daher ist ein direkter Vergleich mit Ergebnissen

aus anderen Studien oder Modellen nur dann erfolgreich, wenn eine relative Skalierung beibehalten wird.

Schadensentwicklung und Prognose

Alle Stichproben sind unterschiedlichen Alters, einige der Inspektionen sind vor mehr als 10 Jahren durchgeführt worden. Innerhalb dieser Zeit haben sich die von den Prüfern festgestellten Schäden eventuell verschlechtert, oder es sind neue Schäden im Zuge der Verschlechterung des Entwässerungsnetzes aufgetreten. Um diese Datenfehler auszuschalten, müssen alle Inspektionsdaten auf den gleichen Betrachtungshorizont skaliert werden. Dies wird durch ein verlässliches Alterungsmodell erreicht. Andere Fehler können durch das Nichtvertrautsein mit der Inspektionsstrategie der Entwässerungsbetriebe entstehen. Wenn Betreiber nur alte Rohre anstelle von willkürlichen Proben für die Inspektion auswählen, stellen sich die Netze eventuell in einem schlechteren Zustand dar, als sie in Wirklichkeit sind. Beide Punkte werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Empirische Erfahrungswerte

Es ist weithin bekannt, dass ordnungsgemäß verlegte Kanäle nur geringfügige Schäden aufweisen, die aber keine Störungen bewirken. Dennoch sind aus unterschiedlichen Gründen unsachgemäße Installationen noch immer ein täglich aktuelles Problem, so dass die Frage „Was passiert, wenn...“ beantwortet werden muss. Darüber hinaus treten Schäden tendenziell öfter auf und sind in durchlässigem Boden gravierender als in weniger durchlässigem Boden. Jedoch gibt es keine Methode, diese Verbindung herzustellen, da diese Erfahrung nicht verzeichnet ist. Das ist das allgemeine Problem empirischer Forschung. Ein Weg, empirische Daten mit einzubeziehen, besteht darin, die Daten in ein Alterungs- und Prognosemodell zu integrieren.

4 Erläuterung und Deutung der Ergebnisse

4.1 Modellergebnisse

Das Modell wird mit mehreren tausend Datensätzen der Monte-Carlo-Simulation ausgestattet. Diese Eingangsvariablen werden mit dem Fuzzy-Modell weiterverarbeitet und führen zum numerischen Modellergebnis. Dieser Ergebnisdatensatz stellt die verschiedenen Kombinationen der Schäden und Randbedingungen anhand der Häufigkeit ihres Auftretens dar. Diese Häufigkeit wird durch die Szenarien und analysierten Inspektionsdaten bestimmt.

Die Ermittlung des arithmetischen Mittels für alle Variablen ergibt die **durchschnittlichen Umweltauswirkungen, die durch den durchschnittlichen Schaden eines spezifischen Rohrtyps innerhalb eines feststehenden Szenarios unter Berücksichtigung der Bandbreite verschiedener Einflüsse entstanden sind**. Die Ermittlung des arithmetischen Mittels für alle Eingangsfaktoren und die Weiterverarbeitung dieser Werte innerhalb des Modells würde den Modellierungsaufwand senken.

Die in dem Szenario definierten Randbedingungen und die Undichtigkeitsanteile, die aus den Schadensmerkmalen der Inspektion resultieren, führen bei allen Rohrtypen zu einer moderaten Umweltbelastung. Jedoch ist die Belastung nur moderat wegen der Bandbreite der möglichen Schwere der Umweltbelastung. Randbedingungen limitieren in der Tat durch ihren Einfluss auf die Modellergebnisse das mögliche Auswirkungsmaximum eines bestimmten Szenarios. Das beste Beispiel für die Mehrheit der Randbedingungen ist das absolute Fehlen von Infiltration und somit das Fehlen von ökologischen Auswirkungen durch Infiltration. Der im Beispielszenario definierte

Grundwasserstand ist immer unterhalb der Kanalhaltungen, was Infiltration verhindert. Die Schadensgruppen und -merkmale der Kanäle sind immer den Randbedingungen, die die Größe der Umweltbelastung bestimmen, untergeordnet.

Ein anderer Weg, die Modellergebnisse darzustellen, besteht darin, die einzelnen Variablen auf ein Maximum innerhalb einer Kategorie zu normieren. Für jede Kategorie (z.B. Exfiltrationsrisiko) wird der Maximalwert auf 1 gesetzt und alle anderen Unterpunkte der Kategorie entsprechend skaliert.

Diese Form der Darstellung verdeutlicht den Unterschied zwischen den verschiedenen Rohrtypen. Da diese Unterschiede nur durch die Schadensgrade und -merkmale der Kanäle bestimmt werden, haben die Randbedingungen keine Auswirkungen auf die Unterschiede zwischen den Rohrtypen. Als logische Konsequenz ist der Abstand zwischen den Kategorien fast derselbe (und muss es auch sein). Wenn es keine Belastung (durch Infiltration) gibt, ist der Unterschied zwischen den Rohrtypen ohne Bedeutung und verschwindet demzufolge.

Bei einigen lokalen Situationen reflektiert das Modellergebnis möglicherweise nicht das wahre Gewicht der verschiedenen Kategorie-Variablen. Situationen wie die vorherrschende Bedeutung eines oder mehrerer Faktoren können nicht in einem allgemeinen Modell berücksichtigt werden, sondern müssen durch die Übertragung der Modell-Ergebnisse auf einen individuellen Gewichtungsmaßstab behandelt werden, der anhand der lokalen Randbedingungen durch Entwässerungsbetriebe und Sachverständige bestimmt werden muss.

5 Deutsche Ergebnisse

5.1 Analyse der Daten

Die folgenden Daten sind der Analyse der bereitgestellten Netzdaten (insgesamt 1732 km nach vorherigen Ausschlüssen) entnommen und geben einen symptomatischen Überblick der heutigen Situation im Hinblick auf Rohrwerkstoffgruppen. Die deutschen sowie die europäischen Inspektionsdaten wurden durch den Gebrauch der Übersetzungsnormen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA, ehemals ATV-DVWK) in das EN 13508-Kodierungssystem übertragen.

Das Durchschnittsalter für biegeweiche Rohre beträgt 6,8 Jahre; für biegesteife Abwasserhaltungen beträgt es 11,5 Jahre. Dennoch können diese Unterschiede unberücksichtigt bleiben, da die Mehrheit der Schäden, die zeitabhängig sind wie Korrosion oder Verschleiß, von geringfügiger Bedeutung für diese Studie ist.

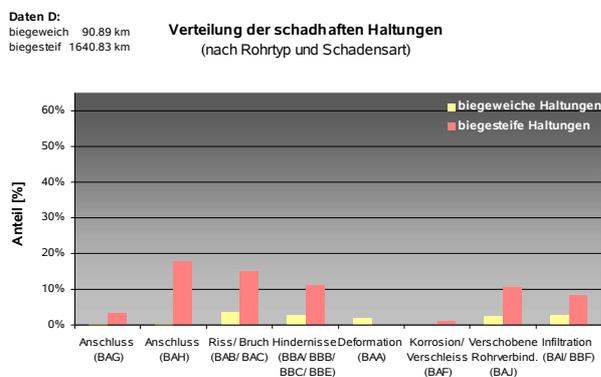


Abbildung 3: Verteilung der schadhaften Haltungen nach ihrer Schadensart

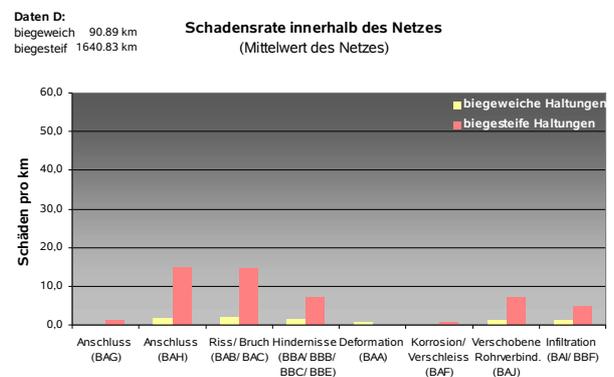


Abbildung 4: Schadensrate innerhalb des Netzes – Mittelwert des Netzes

Abbildung 3 zeigt den Prozentsatz der schadhafte Abschnitte gemäß ihrer Schadensart. Da ein Kanalabschnitt verschiedene Schadensarten haben kann, kann die Anhäufung aller Anteile einer Werkstoffgruppe mehr als 100% betragen.

Der Wert wird durch $\frac{\sum \text{Länge aller Haltungen mit Schäden}}{\sum \text{Länge aller Haltungen}}$ berechnet.

Biege weiche Rohre haben im Hinblick auf fast alle Schadensarten, die für Infiltration und Exfiltration relevant sind, einen beträchtlich niedrigeren Anteil schadhafte Abschnitte innerhalb des Netzes als biege steife Rohre.

Die Anzahl der Schäden wird in Relation zur Länge des schadhafte Teils des Netzes gesetzt:

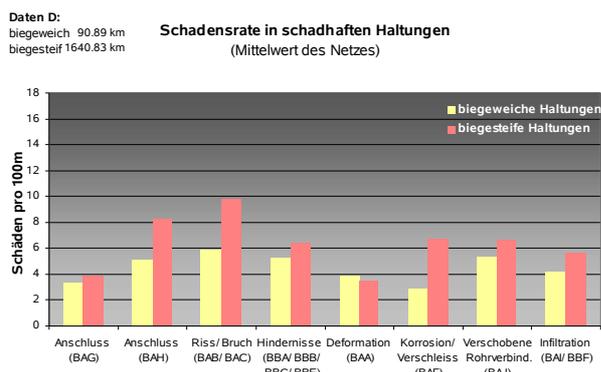


Abbildung 5: Durchschnittliche Schadensrate in schadhafte Haltungen

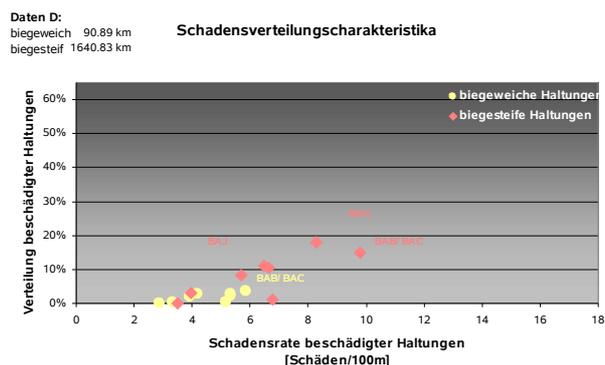


Abbildung 6: Beziehung zwischen Schadensverteilung und Schadensrate

Der bedeutsamste Unterschied zwischen den Werkstoffgruppen besteht in der Versagenshäufigkeit innerhalb des gesamten Netzes. Der Hauptaspekt bei der Beurteilung der Umweltauswirkungen durch eine bestimmte Werkstoffgruppe kann deshalb nur das individuelle Schadensverhalten im Hinblick auf Undichtigkeiten in Kombination mit den Schadensanteilen innerhalb des Netzes sein.

Die für Undichtigkeit höchst relevanten Schadensarten besonders für biege steife Rohre weisen eine hohe Auftretswahrscheinlichkeit über das gesamte Netz auf sowie eine hohe Auftretshäufigkeit innerhalb der schadhafte Abschnitte. Die Schadenshäufigkeit und Auftretswahrscheinlichkeit ist bei biege weichen Rohren deutlich niedriger, so dass sie also eine deutlich bessere Leistungsfähigkeit im Hinblick auf Undichtigkeit aufweisen.

5.2 Szenariendefinition

Die folgende Tabelle 3 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien:

Tabelle 3: Definition der Szenarien

Szenario	Abwasserstand		Durchlässigkeit des Bodens		Grundwasserstand	
1 Küstenregion Trennkanalisation	Modus Band- breite	1/3 ¼ - ½	Modus Band- breite	mittel niedrig – hoch	Modus Band- breite	Achse unter Sohle – über Scheitel
2 nördliches Tiefland Trennkanalisation	Modus Band- breite	1/3 ¼ - ½	Modus Band- breite	hoch niedrig – sehr hoch	Modus Band- breite	Achse unter Sohle – über Scheitel
3 Mittelgebirge Trennkanalisation	Modus Band- breite	1/3 ¼ - ½	Modus Band- breite	mittel sehr niedrig – sehr hoch	Modus Band- breite	Sohle weit unter Sohle – über

Szenario	Abwasserstand		Durchlässigkeit des Bodens		Grundwasserstand	
	breite		breite		breite	Scheitel
4 nördliches Tiefland Mischwasser	Modus Band- breite	1/3 1/3 - 2/3	Modus Band- breite	hoch niedrig – sehr hoch	Modus Band- breite	Achse unter Sohle – über Scheitel
5 südliches Tiefland Mischwasser	Modus Band- breite	1/3 1/3 - 2/3	Modus Band- breite	hoch sehr niedrig – sehr hoch	Modus Band- breite	Sohle unter Sohle – über Scheitel
6 Mittelgebirge Mischwasser	Modus Band- breite	1/3 1/3 - 2/3	Modus Band- breite	mittel sehr niedrig – sehr hoch	Modus Band- breite	Unter Sohle weit unter Sohle – über Scheitel
7 Mittelgebirge Mischwasser	Modus Band- breite	1/3 1/3 - 2/3	Modus Band- breite	mittel sehr niedrig – hoch	Modus Band- breite	Unter Sohle weit unter Sohle – über Scheitel

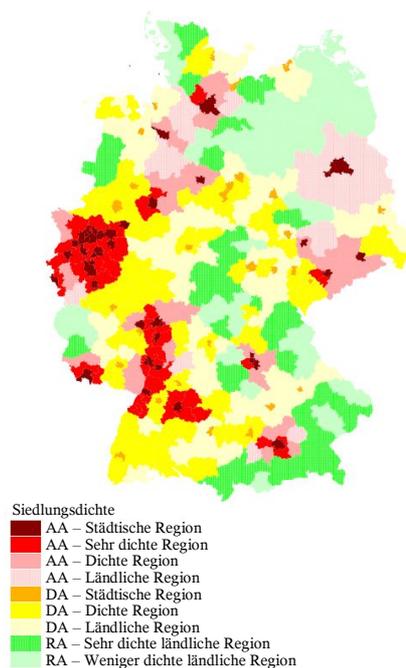


Abbildung 7: Siedlungsdichte in Deutschland

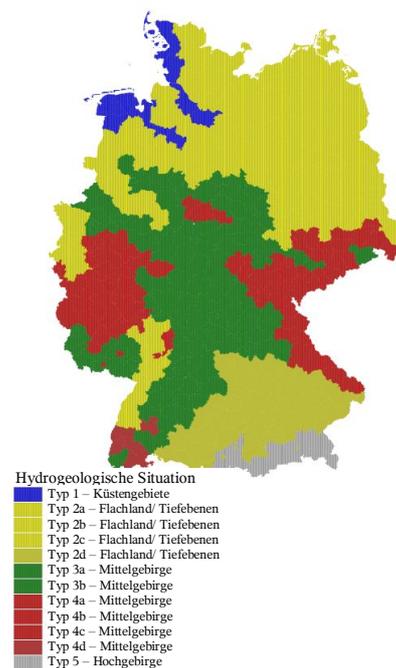


Abbildung 8: Hydro-geologische Lage in Deutschland

Diese sieben Szenarien sind eine repräsentative Darstellung der deutschen Situation, indem sie in Zonen gemäß ihrer hydro-geologischen Lage, der Bevölkerungsdichte und dem Entwässerungssystem eingeteilt werden.

Die Abbildungen zeigen die geographischen Daten, die zur Bestimmung der Szenarien verwendet wurden. In Abbildung 7 wurde die Bevölkerungsdichte als ein Indikator für den Anteil der verschiedenen Regionen an der gesamten Netzlänge genutzt. Die hydro-geologische Karte von Abbildung 8 gibt Aufschluss über die Randbedingungen in den verschiedenen Regionen. Hier können der Grundwasserstand und die Bodenart für die verschiedenen Szenarien bestimmt werden.



Abbildung 9: Mischwasseranteil in Deutschland

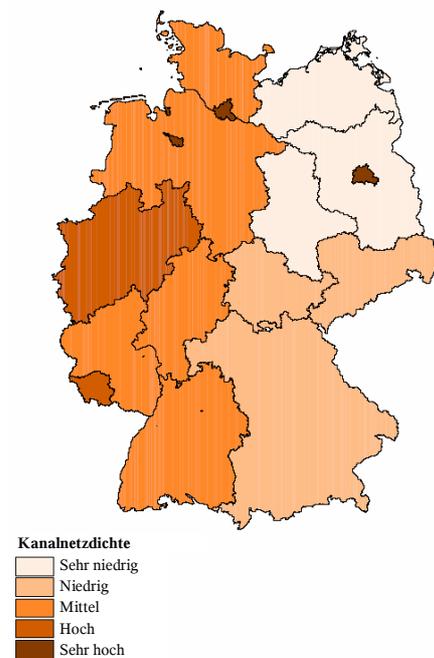


Abbildung 10: Dichte des Kanalnetzes in Deutschland

Diese geographischen Referenzdaten wurden in einem geographischen Informationssystem zusammengestellt, um die deutschen Szenarien sowie die durchschnittliche Umweltauswirkung durch Ex-/Infiltration bei biegeweichen/biegesteifen Rohrsystemen in Deutschland zu bestimmen:

Tabelle 4: Gesamtanteil der festgelegten Szenarien an den deutschen Kanalnetzen

Szenario		Gesamtanteil
1	Küstenregion – Trennkanalisation	3,69%
2	Nördliches Tiefland – Trennkanalisation	25,91%
3	Mittelgebirge – Trennkanalisation	11,40%
4	Nördliches Tiefland – Mischwasser	7,99%
5	Südliches Tiefland – Mischwasser	13,85%
6	Mittelgebirge – Mischwasser	18,56%
7	Mittelgebirge – Mischwasser	18,60%

5.3 Modellergebnisse

Die verschiedenen Szenarien haben zu unterschiedlichen Ergebnissen geführt, wodurch eine Betrachtung der Randbedingungen erforderlich wird. Um die wirklichen Unterschiede der ökologischen Auswirkungen eines Netzes aus biegesteifen oder biegeweichen Rohren zu bestimmen, müssen die Modellergebnisse, die auf der durchschnittlichen Schadensart einer Werkstoffgruppe basieren, in Beziehung zum durchschnittlichen Schadensanteil des Netzes gesetzt werden, indem dieser anhand der normierten Schadensanteile skaliert wird. Das führt zu einer drastischen Verminderung der Umweltauswirkungen bei biegeweichen Rohren.

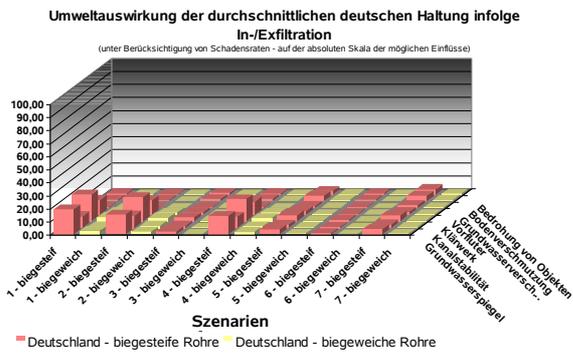


Abbildung 11: Umweltauswirkung des durchschnittlichen deutschen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Absolute Darstellung des möglichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten.

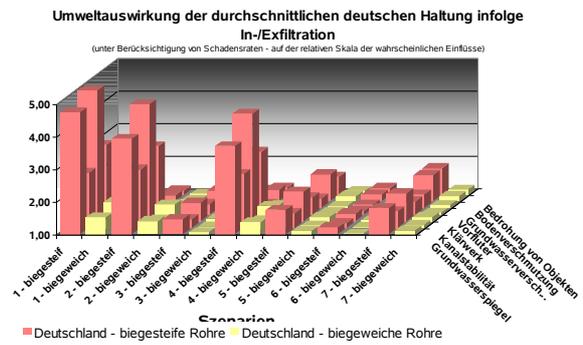


Abbildung 12: Umweltauswirkung des durchschnittlichen deutschen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Relative Darstellung des wahrscheinlichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten.

Abbildung 11 zeigt die Umweltauswirkungen durch In-/Exfiltration im Originalmaßstab; Abbildung 12 zeigt dasselbe im relativen Maßstab.

Biegeweiche Rohre zeigen eine bessere Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Umweltverträglichkeit im Zusammenhang mit In-/Exfiltration. Der durchschnittliche Schaden zeichnet sich durch einen niedrigeren Grad der Undichtigkeit aus und seine Auftretshäufigkeit ist geringer.

Tabelle 5: Skalieren der Ergebnisse

Rohrtyp	Durchschnittliche Schadensraten	Normierte Schadensraten
biegeweiche Rohre	8,45 Schäden pro km	0,17
biegesteife Rohre	50,26 Schäden pro km	1

Sind die Randbedingungen der dominierende Faktor, so bleibt die Relation des Unterschieds zwischen biegeweichen und biegesteifen Rohrleitungssystemen innerhalb der einzelnen Szenarien fast gleich. Nachdem der Netzanteil der verschiedenen Szenarien bestimmt worden ist, ist es nun möglich, die durchschnittlichen Umweltauswirkungen für Deutschland festzulegen (Abbildung 13). Laut Angaben der Netzbetreiber sind die Auswirkungen auf die Kläranlage, die Kanalstabilität und den Vorfluter am kritischsten von allen Auswirkungen. Auswirkungen auf den Grundwasserstand sind ambivalent (dichte Systeme können den Grundwasserstand erhöhen und Schäden an Gegenständen verursachen) und sind somit die dominierenden Auswirkungen, die durch In-/Exfiltration hervorgerufen werden.

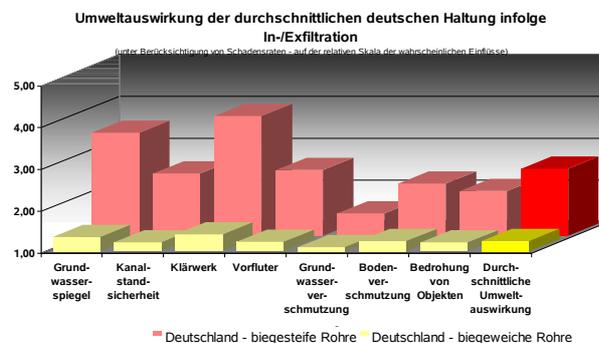


Abbildung 13: Umweltauswirkung des durchschnittlichen deutschen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Relative Darstellung des wahrscheinlichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten und der Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien in Relation zum Netzanteil.

6 Niederländische Ergebnisse

6.1 Analyse der Daten

Die niederländischen Inspektionsdaten wurden zusätzlich geprüft, um Unterschiede in der Schadensbestimmung festzustellen. Ein großer Anteil stimmt überein; die Unterschiede bei den Angaben der Ingenieure wurden durch geringfügige Interpretationsunterschiede oder fehlende Schadensbeschreibungen bewirkt, z.B. der Code für schadhafte Verbindungen ist in den Protokollen nicht verzeichnet, obwohl er auf der Video-Kassette genannt wird (Abbildung 15).

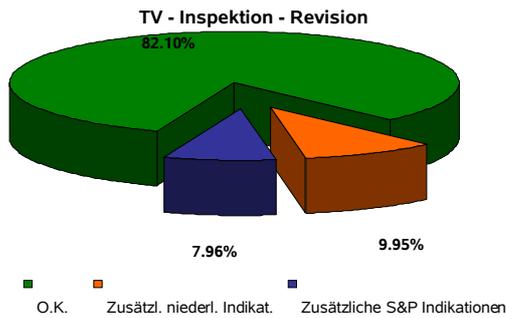


Abbildung 14: Ergebnis der Überprüfung der niederländischen TV-Inspektionen



Abbildung 15: NL BBF (Infiltration) S&P: zusätzlich BAH (schadhafte Verbindung)

Nach Angaben des niederländischen Sachverständigen van der Jagt liegt der hohe Anteil der Infiltrationsschäden (BBF) an der fehlerhaften Schadensbestimmung durch die Gutachter, da man viele dieser Schäden als schadhafte Verbindung (BAH) hätte bestimmen müssen – ein Schaden, der durch massive Verlegungsschwierigkeiten aufgrund fehlender Überwachung entsteht. Ein weiteres Schadensproblem auf Qualitätsebene ist das Problem der unsachgemäß installierten Verbindungen.

Daten NL: 16.42 km biegeweich, 30.27 km biegesteif
Verteilung der schadhaften Haltungen (nach Rohrtyp und Schadensart)

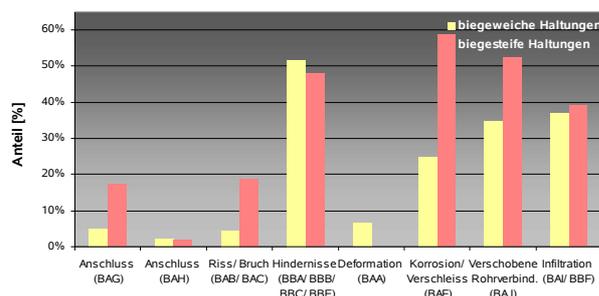


Abbildung 16: Verteilung der schadhaften Haltungen nach ihrer Schadensart

Daten NL: 16.42 km biegeweich, 30.27 km biegesteif
Schadensrate innerhalb des Netzes (Mittelwert des Netzes)

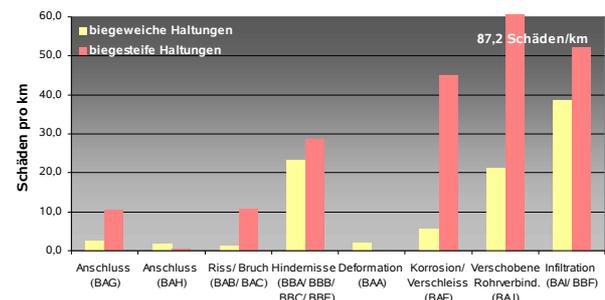


Abbildung 17: Schadensanteil innerhalb des Netzes – Mittelwert des Netzes

Daten NL:
biegeweich 16.42 km
biegesteif 30.27 km

Schadensrate in schadhafte n Haltungen
(Mittelwert des Netzes)

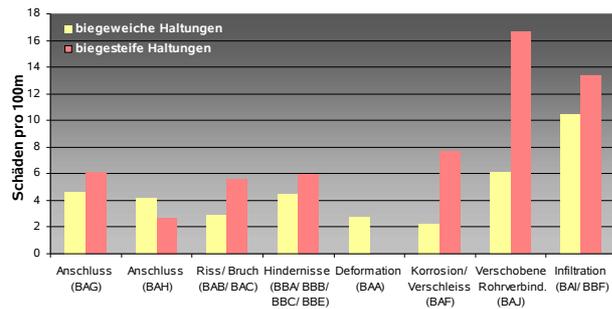


Abbildung 18: Durchschnittliche Schadensrate in schadhafte n Haltungen

Daten NL:
biegeweich 16.42 km
biegesteif 30.27 km

Schadensverteilungscharakteristika

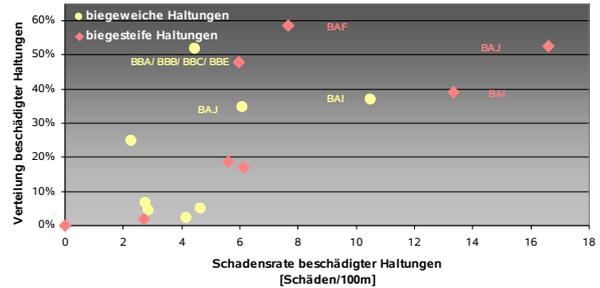


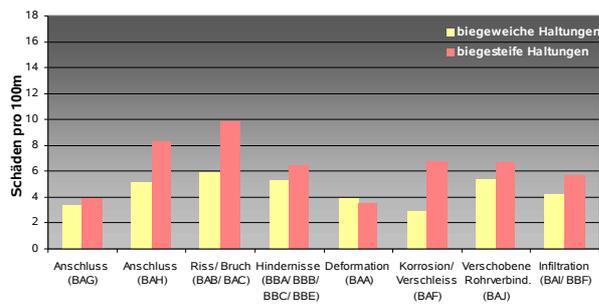
Abbildung 19: Beziehung zwischen Schadensverteilung und Schadensrate

Abbildung 16 bis Abbildung 19 zeigen die Ergebnisse der Analysen, die analog zu den deutschen Untersuchungen durchgeführt wurden.

6.2 Modellergebnisse

Daten D:
biegeweich 90.89 km
biegesteif 1640.83 km

Schadensrate in schadhafte n Haltungen
(Mittelwert des Netzes)



Daten NL:
biegeweich 16.42 km
biegesteif 30.27 km

Schadensrate in schadhafte n Haltungen
(Mittelwert des Netzes)

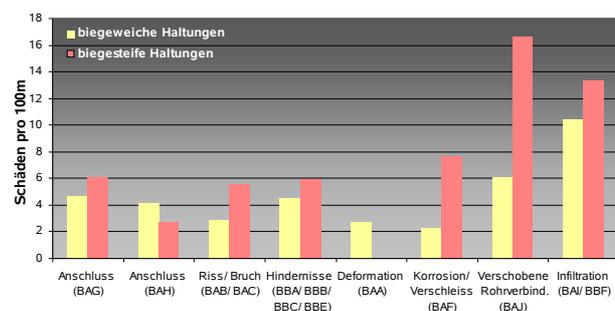


Abbildung 20: Vergleich der deutschen und niederländischen Schadensraten

Da die niederländische Datenbank für die Modellerstellung zu klein war, wurden die deutschen Daten für die Niederlande adaptiert. Beim Vergleich der Werte aus den deutschen und niederländischen Analysen wird deutlich, dass die Schadensraten der schadhafte n Abschnitte ähnlich sind außer der unsachgemäß installierten Verbindung (BAJ) und der Infiltration. Letzteres resultiert meist aus fehlerhaften Angaben oder Verlegungsfehlern aufgrund fehlender Überwachung. Nimmt man ein ähnliches Überwachungs-, Wartungs- und Sanierungsverhalten wie in Deutschland an, so würden sich die Unterschiede in Schadensmerkmalen deutlich verändern und sich den deutschen Werten annähern. Daher war eine Anpassung an die deutschen Daten durchführbar. So wurde ein direkter Vergleich der Anfälligkeit/Bedeutung der Randbedingungen für die drei niederländischen Szenarien mit der der anderen europäischen Szenarien ermöglicht.

Tabelle 6: Definition der Szenarien für die Niederlande

Szenario	Abwasserstand		Durchlässigkeit des Bodens		Grundwasserstand	
Nr. 1	Modus Band- breite	näher zur Achse Sohle – Achse	Modus Band- breite	mittel niedrig – mittel	Modus Band- breite	Achse unter Sohle – über Scheitel
Nr. 2	Modus Band- breite	näher zur Achse Sohle – Achse	Modus Band- breite	niedrig niedrig – mittel	Modus Band- breite	Sohle Über Scheitel (15%)

Szenario	Abwasserstand		Durchlässigkeit des Bodens		Grundwasserstand	
Nr. 3	Modus Band- breite	näher zur Achse Sohle – Achse	Modus Band- breite	eher niedrig sehr niedrig – niedrig	Modus Band- breite	weit unter der Rohrsohle

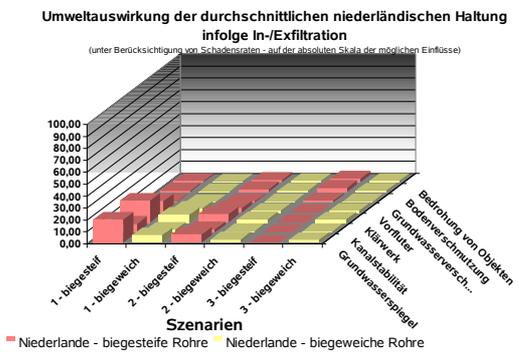


Abbildung 21: Umweltauswirkung des durchschnittlichen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Absolute Darstellung des möglichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten.

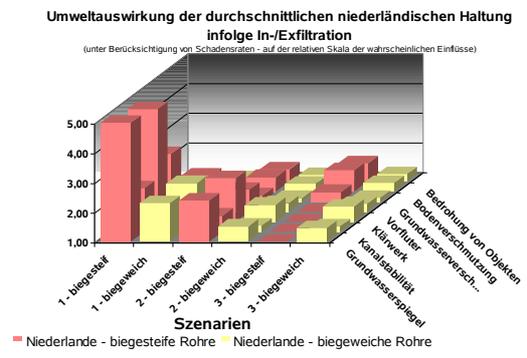


Abbildung 22: Umweltauswirkung des durchschnittlichen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Relative Darstellung des wahrscheinlichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten.

Die niederländische Analyse lässt die gleichen Ergebnisse im Hinblick auf biegeweiche Rohre erkennen wie die deutsche Untersuchung.

Tabelle 7: Skalieren der Ergebnisse

Rohrtyp	Durchschnittliche Schadensraten	Normierte Schadensraten
biegeweiche Rohre	95,91 Schäden pro km	0,41
biegesteife Rohre	234,56 Schäden pro km	1

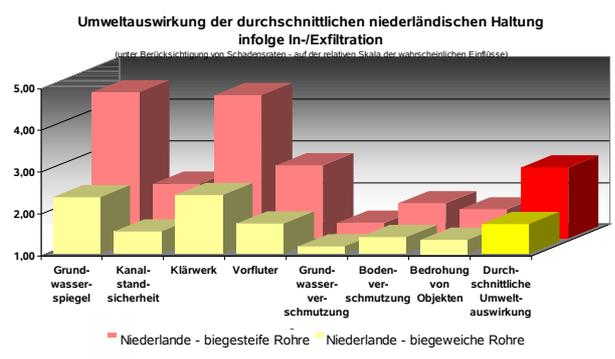


Abbildung 23: Umweltauswirkung des durchschnittlichen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Relative Darstellung des wahrscheinlichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten und der Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien in Relation zum Netzanteil.

7 Schwedische Ergebnisse

7.1 Analyse der Daten

Die schwedischen Schadensangaben in den Protokollen bestanden hauptsächlich aus reinen Textbeschreibungen anstelle eines Kodierungssystems, was die Übertragung in den EN-Code erleichterte.

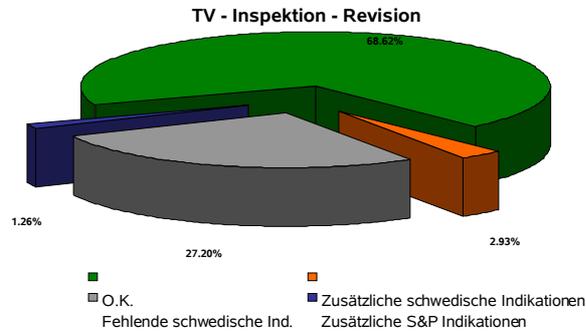


Abbildung 24: Ergebnis der Überprüfung der schwedischen TV-Inspektionen

Die hauptsächlichsten Unterschiede sind bedingt durch fehlende Protokoll-Angaben, da viele schwedische Protokolle aus Zusammenfassungen bestehen, die nur die Anzahl der Schäden pro Abschnitt angeben, ohne die Schadensmerkmale detailliert aufzulisten. Diese unzureichenden Protokolle mussten durch die TV-Überprüfung vervollständigt werden. Mit fast 3% sind die wahren Unterschiede bei der Schadensbestimmung eher gering.

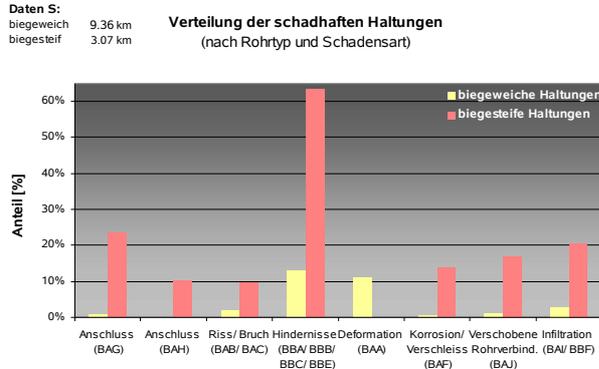


Abbildung 25: Verteilung der schadhaften Rohrabschnitte nach ihrer Schadensart

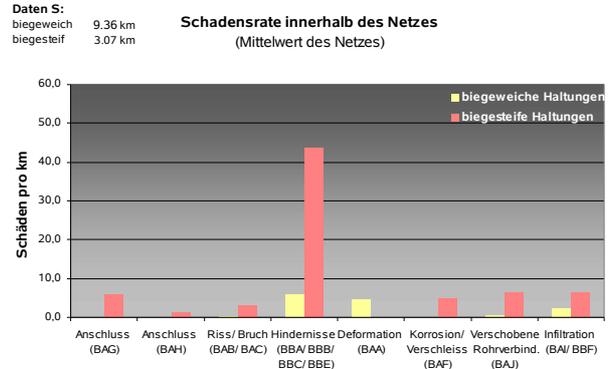


Abbildung 26: Schadensanteil innerhalb des Netzes – Mittelwert des Netzes

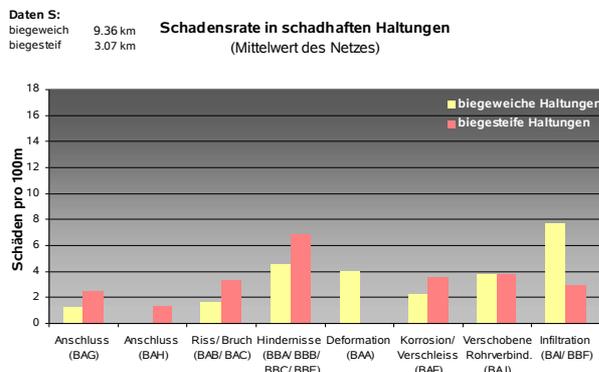


Abbildung 27: Durchschnittliche Schadensrate in schadhaften Abschnitten

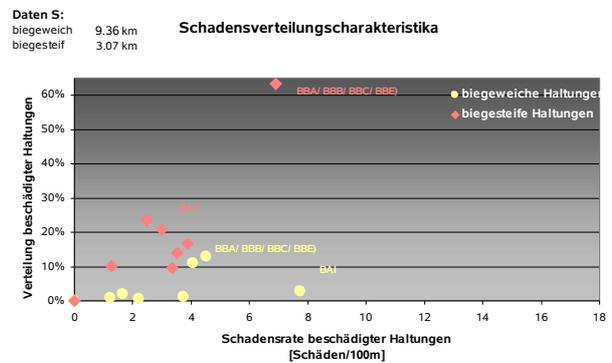


Abbildung 28: Beziehung zwischen Schadensverteilung und Schadensrate

Nach Angaben des schwedischen Sachverständigen Sevansson, ist der hohe Anteil der Hindernisse, die hauptsächlich aus Problemen durch die Sedimentierung von Papier bestanden, untypisch für schwedische Entwässerungssysteme.

7.2 Modellergebnisse

Da der schwedische Datenbestand zur Modellerstellung zu klein war, wurden die deutschen Daten auf Schweden übertragen. So war ein direkter Vergleich der Bedeutung der Randbedingungen für die drei schwedischen Szenarien mit der der anderen europäischen Szenarien möglich.

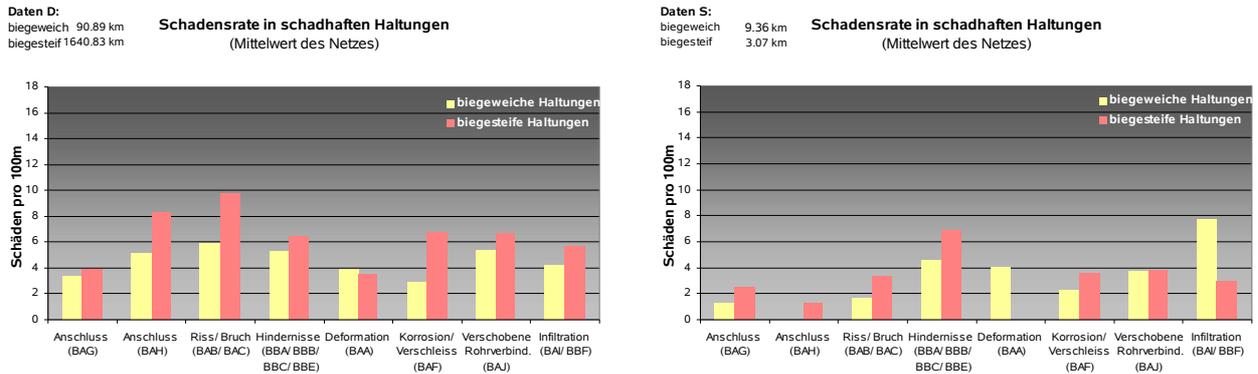


Abbildung 29: Vergleich der deutschen und schwedischen Schadensraten

Eine Angleichung der deutschen Daten ist auch für die schwedische Modellerstellung durchgeführt worden.

Tabelle 8: Definition der Szenarien für Schweden

Szenario	Abwasserstand		Durchlässigkeit des Bodens		Grundwasserstand	
	Modus	Bandbreite	Modus	Bandbreite	Modus	Bandbreite
Nr. 1	Modus	näher zur Achse	Modus	mittel	Modus	Achse
	Bandbreite	Sohle – Achse	Bandbreite	sehr niedrig – mittel	Bandbreite	unter Sohle – über Scheitel
Nr. 2	Modus	näher zur Achse	Modus	sehr niedrig	Modus	Sohle
	Bandbreite	Sohle – Achse	Bandbreite		Bandbreite	Über Scheitel (15%)
Nr. 3	Modus	näher zur Achse	Modus	eher niedrig	Modus	weit unter der
	Bandbreite	Sohle – Achse	Bandbreite	niedrig – mittel	Bandbreite	Rohrsohle

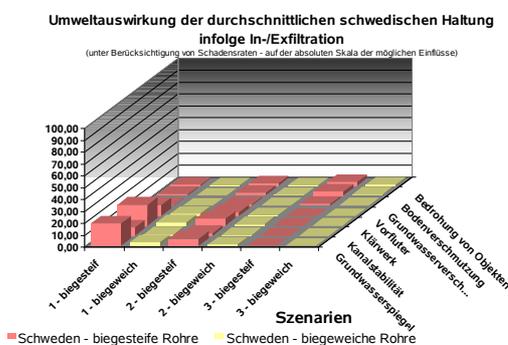


Abbildung 30: Umweltauswirkung des durchschnittlichen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Absolute Darstellung des möglichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten.

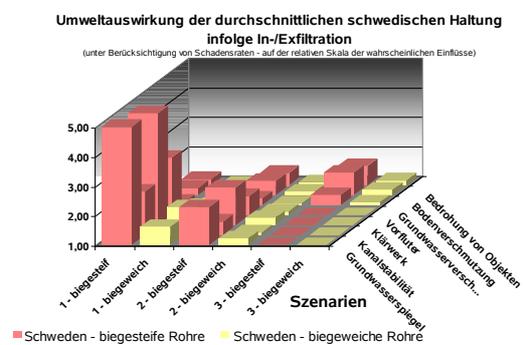


Abbildung 31: Umweltauswirkung des durchschnittlichen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Relative Darstellung des wahrscheinlichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten.

Tabelle 9: Skalieren der Ergebnisse

Rohrtyp	Durchschnittliche Schadensraten	Normierte Schadensraten
biegeweiche Rohre	13,46 Schäden pro km	0,19
biegesteife Rohre	71,74 Schäden pro km	1

Die schwedischen Analysen ergaben ähnliche Resultate für biegeweiche Rohre wie die deutschen Analysen.

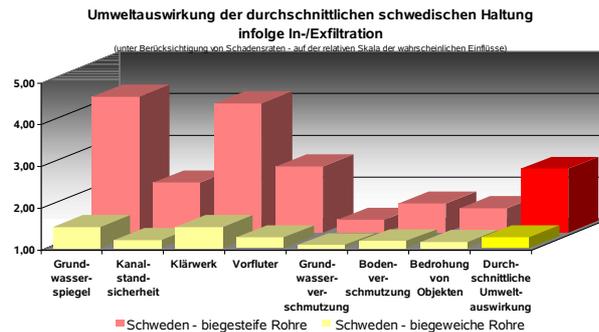


Abbildung 32: Umweltauswirkung des durchschnittlichen, In-/Exfiltration verursachenden Schadens. Relative Darstellung des wahrscheinlichen Auswirkungsgrades unter Berücksichtigung der Schadensraten und der Zusammenfassung der Ergebnisse der Szenarien in Relation zum Netzanteil.

8 Fazit

Auch wenn es eher schwierig ist, die ökologischen Auswirkungen von Entwässerungssystemen im Allgemeinen zu bestimmen, ist es durch "STATUS Kanal" und seine spezifische Modelle für ökologische Fragestellungen, im Zusammenhang mit Kanalisationen erstmalig ermöglicht worden, adäquate Ergebnisse zu erhalten, um die ökologischen Auswirkungen von In-/Exfiltration bei biegeweichen und biegesteifen Rohren zu vergleichen.

Aufgrund des Versuchs, eine allgemeine Schlussfolgerung für Rohrleitungssysteme zu ziehen, spiegeln die Ergebnisse nicht die Situation eines spezifischen lokalen Rohrleitungsnetzes wider. Um Informationen über ein lokales Rohrleitungsnetz zu erhalten, müsste dieser Ansatz auf den spezifischen lokalen Datenbestand angewendet werden. Die Erkenntnisse sollten als adäquater Indikator für die ökologische Leistung der analysierten Rohrleitungssysteme gesehen werden.

In Anbetracht der Tatsache, dass alle Entwässerungssysteme undicht sind, stellte sich die Frage, welche Rohrleitungssysteme eine bessere Leistung hinsichtlich der Leckageproblematik versprechen. Diese Probleme sind die hauptsächlichen ökologischen Fragestellungen während der Nutzungsdauer. Da die Analyse der Betriebsdauer das Ziel des Projekt war, wurde das Hauptaugenmerk auf die dominierenden Problemstellungen wie Infiltration und Exfiltration gelegt, da diese für die wesentlichen Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit Entwässerungssystemen während ihrer Betriebszeit ursächlich sind. Darüber hinaus sind fast alle Umweltauswirkungen, die während der Betriebszeit entstehen, lokale Einflüsse, die die Kunden des Netzbetreibers direkt betreffen.

Als Ergebnis dieser Untersuchung können folgende Aussagen unter Beachtung der Beschränkungen der Analyse-Daten (z.B. Altersgrenze 30 Jahre, innerer Durchmesser nicht größer als 800 mm etc.) zusammengefasst werden:

- Die Umweltbelastung eines durchschnittlichen Abschnitts durch In- oder Exfiltration der biegeweichen Rohrleitungssysteme beträgt 15% (weniger als 1/6) von der Belastung eines Abschnitts der bestehenden biegesteifen Rohrleitungssysteme. Besonders bei Szenarien mit sensiblen Randbedingungen zeigen biegeweiche Rohre eine besser ökologische Leistung als biegesteife Rohrssysteme.
- Betrachtet man die Anzahl der Schäden in Bezug auf die Länge aller verlegten Kanäle der Werkstoffgruppen, die in dieser Studie analysiert wurden, so haben biegeweiche Rohrssysteme im Durchschnitt nur 20% (1/5) der Schadensraten von biegesteifen Rohrssystemen.
- Betrachtet man die Anzahl der Schäden in Bezug auf die Länge der Kanäle aus einem speziellen Material, so sind die Schadensraten von biegeweichen Rohrssystemen im Durchschnitt um 25% (1/4) der Schadensraten von biegesteifen Rohrssystemen niedriger bei Infiltration/Exfiltration verursachenden Schadensarten, wie z.B. BAB (Risse), BAC (Bruch/Einsturz) oder BAH (schadhafte Verbindung).

Aus dieser Studie kann gefolgert werden, dass Kanalisationen aus biegeweichen Rohren aufgrund der niedrigeren Schadensraten und Schadensrisiken hinsichtlich Infiltration und Exfiltration eine deutlich bessere ökologische Leistung aufweisen. Neben diesem wesentlichen Forschungsergebnis hat die Studie gezeigt, dass unzureichende Qualität bei der Verlegung sowie unbeständige Überwachung und fehlende Qualitätskontrolle zu bedeutend höheren Schadensindikationen führen können, wodurch die Schadensraten vervielfacht werden.

Ergänzende länderspezifische Schlussfolgerung

Trotz der Tatsache, dass die niederländischen und schwedischen Datenbestände relativ klein sind und kein vollständiges Bild der landesspezifischen Entwässerungssystemen abgeben können, so geben sie doch einen akzeptablen Überblick über die landestypische Situation. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Datenanalyse eindeutige Informationen über die Auswirkung verschiedener Inspektionsstrategien, die im Falle der Niederlande vorwiegend auf Anfrage der Netzbetreiber durchgeführt werden und nicht – wie in Deutschland – auf der Basis von Gesetzen und Reglementierungen. Das führt letztlich zu bedeutend höheren Schadensraten für die geprüften Abschnitte, da nur Abschnitte mit Schäden verzeichnet sind, die schwerwiegend genug sind, um einen Inspektionsaufruf zu bewirken. Des Weiteren kann die fehlende Praxis mit TV-gestützten Abnahmeprotokollen für Bauarbeiten zu Schäden führen, die durch unzulängliche Bauarbeiten entstanden sind, und als Konsequenz daraus höhere Schadensraten.

Der relativ kleine schwedische Datenbestand besteht aus einer großen Anzahl kleinerer Abschnitte verschiedenster Beschaffenheiten aus sowohl biegesteifen als auch biegeweichen Rohren. Diese Probenauswahl hat dazu geführt, dass die schwedischen Daten repräsentativer sind, als sie bei einer Auswahl einer kleineren Anzahl von Abschnitten gewesen wären.