

Anwendung des Failure Risk Index am Beispiel zweier Haupt- und Zubringerleitungsnetze

Masterarbeit zum Erwerb des
akademischen Titels Diplomingenieur der
Studienrichtung Bauingenieurwesen

Michael Kolarik, BSc

Verfasst am Institut für
Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau
der Technischen Universität Graz

Begutachter der Masterarbeit:
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fuchs-Hanusch Daniela

Mitbetreuender Assistent der Masterarbeit:
DDipl.-Ing. Friedl Franz

Graz, Oktober 2012

Kontakt:
Michael Kolarik
kolarik@sbox.tugraz.at

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am

.....

(Michael Kolarik, BSc)

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinen Eltern sowie meiner gesamten Familie, durch deren große und langjährige Unterstützung mir meine Ausbildung und auch dieses Studium ermöglicht wurden.

Weiters möchte ich mich an dieser Stelle vor allem bei Frau Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Fuchs-Hanusch Daniela und meinem Betreuer Herrn DDipl.-Ing. Friedl Franz vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz für die ausgezeichnete Betreuung während der Erstellung dieser Masterarbeit bedanken.

Kurzfassung

Anwendung des Failure Risk Index am Beispiel zweier Haupt- und Zubringerleitungsnetze

Schlagwörter: Failure Risk Index, Schadensart, Schadensrate, Schadenwahrscheinlichkeit, Schadenskonsequenz

Die Haupt- und Zubringerleitungsnetze bilden die ältesten und gleichzeitig wichtigsten Teile unserer Wasserversorgung. Für die Instandhaltung dieser Leitungsabschnitte werden aber nach wie vor intuitive und ereignisorientierte Instandhaltungsstrategien verwendet, obwohl bei Versorgungsleitungen längst verschiedenste Schadensprognosemodelle entwickelt wurden und in der Praxis angewendet werden.

In dieser Masterarbeit wird die Anwendung einer multikriteriellen Kennzahl, dem Failure Risk Index, auf zwei Haupt- und Zubringerleitungsnetzen durchgeführt.

Zentraler Bestandteil dieser Untersuchung waren die seit Beginn der Schadensdokumentation aufgezeichneten Schadensfälle, woraus Schadensraten ermittelt werden konnten. Der Failure Risk Index setzt sich aus der Schadenswahrscheinlichkeit (in Englisch: occurrence - O) und den Schadenskonsequenzen (in Englisch: severity - S) zusammen. Die verschiedenen Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit werden nach Schadensraten mit Punkten bewertet und gewichtet. Die Indikatoren der Schadenskonsequenz werden nach Experteneinschätzung gewichtet. Schlussendlich werden die beiden Gruppen O und S in einem Berechnungsverfahren zusammengeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen bilden auf Basis des Schulnotensystems die Bewertung aller betrachteten Leitungsabschnitte.

Die vorliegende Arbeit soll den Wasserversorgungsunternehmen die Möglichkeit bieten, Leitungsabschnitte nach einem genau definierten Verfahren zu bewerten und damit für die gesamte Instandhaltung – Wartung, Inspektion sowie Instandsetzung – eine Priorisierung der notwendigen Leitungsarbeiten bereitstellen.

Abstract

Application of the Failure Risk Index using the example
of two water distribution networks

Key words: Failure Risk Index, kind of failure, failure rate, occurrence of failure, severity of failure

Large-diameter water transmission mains form the oldest and at once the most significant parts of our water supply. Intuitive and event-driven maintenance strategies are used to maintain the water supply system. Although there are a number of different failure-prediction models already available which are based on calculations and facts.

The aim of this diploma thesis is the application of a multi-criteria reference number, called Failure Risk Index, used for two different water distribution networks.

Central elements of this verification were the failure statistic. The existing failure statistic was used to calculate failure rates. Failure Risk Index consists of two groups: probability of occurrence of a specific failure (O) and severity of failure (S). The different indicators of occurrence and severity are calculated and weighted. The indicators of severity of failures are weighted based on expert estimation. Finally the two groups O and S are determined in a specific calculation procedure. The results of these calculations, which are based on school grade scale, show the assessment of the considered pipe sections.

The diploma thesis at hand is ought to provide an opportunity for water utilities to define pipe sections with strictly procedures and should help the entire maintenance, inspection and repair operations to consider priorities for their work.

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Ziel	2
2	Grundlagen	3
2.1	Allgemeines zum Risiko	3
2.2	Entwicklung des Failure Risk Indexes	4
2.3	Allgemeines zur Infrastrukturerhaltung	5
2.4	Regeln der ÖVGW.....	7
2.4.1	W 100 (2007) – Wasserverteilleitungen - Betrieb und Instandhaltung	7
2.4.2	W 105 (2011) – Schadensstatistik	8
2.5	Haupt- und Zubringerleitungen	10
2.6	Räumliche und zeitliche Häufung von Schadensfällen.....	12
2.6.1	Räumliche Häufung von Schäden.....	12
2.6.2	Zeitliche Häufung von Schäden	13
2.6.3	Ergebnis der Auswertungen von <i>Goulter</i> und <i>Kazemi</i> (1988 und 1989) 14	14
3	Risikobewertung von Haupt- und Zubringerleitungen.....	15
3.1	Motivation und Definition von Risiko.....	15
3.2	Methoden zur Risikobewertung	15
3.3	Vorgehensweise beim Failure Risk Index (FRI).....	16
3.3.1	Mathematische Formulierung des Failure Risk Index	16
4	Angewandtes Berechnungsschema	20
4.1	Modifikation der allgemeinen mathematischen Formulierung.....	20
4.2	Festlegung der Indikatoren	21
4.2.1	Indikatoren für Netz A	21
4.2.2	Indikatoren für Netz B	22
4.3	Bestimmung der Schadensraten	22
4.4	Punkteverteilung.....	23
4.5	Bestimmung der Indikatorgewichtung.....	24
4.6	Ergebnisdarstellung.....	24
5	Anwendung des FRI auf das Zubringerleitungsnetz A	26
5.1	Allgemeine Beschreibung.....	26
5.2	Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit.....	27

5.2.1	Rohrmaterial	28
5.2.2	Durchmesser.....	29
5.2.3	Verlegejahr.....	31
5.2.4	Vorschäden.....	32
5.2.5	Verbindungsart.....	33
5.2.6	Herstellungsart.....	34
5.2.7	Ziegelaufleger	35
5.2.8	Druckzone.....	36
5.2.9	Versorgungsleitungen	38
5.2.10	Anschlussleitungen.....	38
5.2.11	Gasleitungen	39
5.2.12	Kanal	40
5.2.13	Baumstandorte	41
5.2.14	Hauptverkehrsstraßen	42
5.2.15	Straßenbahn mechanisch.....	43
5.2.16	Straßenbahn korrosiv	44
5.3	Indikatoren Schadensausmaß.....	45
5.3.1	Wichtigkeit.....	46
5.3.2	Querende Leitungsträger	47
5.3.3	Bäume pro Kilometer	48
5.3.4	Hauptverkehrsstraßen pro Kilometer	49
5.3.5	Straßenbahnen pro Kilometer	49
5.3.6	Schadenspotential	50
5.3.7	Belagsart.....	51
5.3.8	Anzahl von Schiebern und Klappen pro Kilometer.....	51
5.4	Gewichtung der Indikatoren.....	52
5.4.1	Gewichtung der Schadenswahrscheinlichkeits - Indikatoren	52
5.4.2	Gewichtung der Schadensausmaß - Indikatoren	52
5.5	Berechnungsergebnisse Netz A.....	53
5.5.1	Gesamtergebnis für das Haupt- und Zubringerleitungsnetz A	53
5.5.2	Rohrmaterial Asbestzement.....	56
5.5.3	Rohrmaterial Beton	57
5.5.4	Rohrmaterial Grauguss.....	58

5.5.5	Leitungen aus Grauguss mit Schraubmuffe	59
5.5.6	Rohrmaterial Duktilguss \leq 1980	60
5.5.7	Rohrmaterial Duktilguss $>$ 1980	61
5.5.8	Rohrmaterial Polyethylen	62
5.5.9	Rohrmaterial Sonstige	63
5.5.10	Rohrmaterial Stahl	64
6	Anwendung des FRI auf das Zubringerleitungsnetz B	65
6.1	Allgemeine Beschreibung	65
6.2	FRI Korrosion	66
6.2.1	Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit	66
6.2.2	Indikatoren Schadensausmaß	85
6.2.3	Gewichtung der Indikatoren	88
6.2.4	Berechnungsergebnisse Korrosion	89
6.3	FRI Längsriss Scherbenbruch	97
6.3.1	Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit	97
6.3.2	Indikatoren Schadensausmaß	112
6.3.3	Gewichtung der Indikatoren	116
6.3.4	Berechnungsergebnisse Längsriss/Scherbenbruch	117
6.4	FRI Rundriss	125
6.4.1	Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit	125
6.4.2	Indikatoren Schadensausmaß	138
6.4.3	Gewichtung der Indikatoren	142
6.4.4	Berechnungsergebnisse Rundriss	143
6.5	Vergleich der FRI Berechnungen für HZL Netz B nach Schadensart	151
7	Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick	153

Abkürzungsverzeichnis

FRI	...	Failure Risk Index
O	...	Schadenswahrscheinlichkeit (in Englisch: occurrence)
S	...	Schadenskonsequenzen (in Englisch: severity)
D	...	Entdeckungswahrscheinlichkeit (in Englisch: detection)
WVU	...	Wasserversorgungsunternehmen
VL	...	Versorgungsleitungen
HZL	...	Haupt- und Zubringerleitungen
ÖVGW	...	Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
ÖWAV	...	Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
SR	...	Schadensraten
DN	...	Nennweite, innerer Durchmesser
GIS	...	Geoinformationssystem
o.ä.	...	oder ähnliches
u.v.m.	...	und vieles mehr

Abkürzungen der Leitungsmaterialien

AZ	...	Asbestzement
B	...	Beton
GG	...	Grauguss
GGA	...	Grauguss Ahrens
GGSM	...	Grauguss mit Schraubmuffe
GGG	...	Duktilguss
GGG 1.G	...	Duktilguss der ersten Generation
GGG 2.G	...	Duktilguss der zweiten Generation
GGG 3.G	...	Duktilguss der dritten Generation
PE	...	Polyethylen
SO	...	Sonstige
ST	...	Stahl
SZ	...	Steinzeug

1 Veranlassung und Ziel

Haupt- und Zubringerleitungsnetze bilden das Rückgrat einer jeden Wasserversorgung. Mit diesen Leitungen wird das Trinkwasser von den Fassungsgebieten in die Städte und Gemeinden gebracht. Dementsprechend haben diese Leitungen die größten Durchmesser und die höchste Priorität im Netz.

Schäden an Haupt- und Zubringerleitungen können je nach Schadensbild zu großen Wasseraustritten führen. Die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass es in der Umgebung von Schadstellen zu Folgeschäden kommt. Daneben können während des Schadens und der Schadensbehebung erhebliche Versorgungsunterbrechungen in den Versorgungsgebieten auftreten.

Um derartige Schadensszenarien zu verhindern bzw. in ihrer Anzahl zu reduzieren, ist es notwendig, Instandhaltungsstrategien zu entwickeln. Dabei ist es aber weder wirtschaftlich noch technisch zielführend jede Leckage im Netz ausfindig zu machen und zu beheben. Instandhaltungsstrategien umfassen eine Vielzahl von Maßnahmen, die Risikoabschätzung mittels FRI liefert ein Informationsinstrument im gesamten Maßnahmenkatalog.

Die Anwendung einer Risikoabschätzung für Rohrleitungsabschnitte mittels FRI soll daher zu einer zielgerichteten Instandhaltung der Leitungen im HZL-Netz beitragen.

Ziel dieser Masterarbeit ist die Bewertung der Leitungsabschnitte von Haupt- und Zubringerleitungsnetzen mithilfe unterschiedlicher Indikatoren, die das Rohr und seine Umgebung beschreiben. Die Bewertungen dieser Indikatoren werden zu einer Berechnung zusammengeführt und bilden schlussendlich den FRI. Dafür ist eine umfangreiche Dokumentation der Rohrleitungen und ihrer unmittelbaren Umgebung von den WVU notwendig.

Mit dieser Arbeit sollen WVU unterstützt werden, die Instandhaltung ihrer Leitungen gezielter durchführen zu können. In weiterer Folge soll dadurch die Nutzungsdauer der Infrastruktur optimiert werden.

2 Grundlagen

2.1 Allgemeines zum Risiko

Das Schadensrisiko wird in der Technik allgemein mit der Formel Schadenswahrscheinlichkeit mal Schadenskonsequenzen berechnet. Dabei gibt es für die Berechnung dieser beiden Terme verschiedene Zugangsweisen, je nachdem welche Informationsquellen gerade zur Verfügung stehen.

Die Schadenswahrscheinlichkeit kann durch drei Methoden hergeleitet werden:

- über statistische Verfahren

Durch Auswertung der vorhandenen Informationen, wie z.B. Schadensanzahl, wird auf den Zustand der Leitungen geschlossen. Dadurch können Prognosen zum weiteren Zustand aufgestellt werden.

- durch Experteneinschätzung

Mitarbeiter von WVU haben sehr viel Erfahrung im Umgang mit Trinkwasserleitungen. Ihr Wissen kann genutzt werden um die Schadenswahrscheinlichkeiten von Leitungen festzulegen.

- über physikalische Verfahren

Bei physikalischen Methoden werden die Eigenschaften von Rohren und der Rohrumbgebung überprüft und bewertet. Dabei können beispielsweise die aufnehmbaren Spannungen des Rohres im Labor untersucht oder das Erdmaterial nach Gruppen bewertet werden.

Die Schadenskonsequenzen können ebenfalls durch drei Methoden berechnet werden:

- über statistische Verfahren

Durch Auswertung der vorhandenen Informationen, wie z.B. Schadenskosten, Schäden an Dritten oder Versorgungsunterbrechungen wird auf die Konsequenzen eines Schadens geschlossen. Dadurch können Prognosen für zukünftige Schadenskosten aufgestellt werden.

- durch Experteneinschätzung

Mitarbeiter von WVU haben sehr viel Erfahrung im Umgang mit Trinkwasserleitungen. Ihr Wissen kann genutzt werden um Konsequenzen vor Schäden festzulegen.

- durch Berechnung der hydraulischen Vulnerabilität

Die Berechnung der hydraulischen Vulnerabilität zeigt die Zustände bei Schadensfällen innerhalb und außerhalb des Leitungsnetzes. Bei der Berechnung innerhalb des Leitungsnetzes werden die Drücke und die Strömungseigenschaften simuliert. Bei der Berechnung außerhalb des Leitungsnetzes werden der Wasseraustritt und die damit verbundene Überschwemmung im Umfeld des Schadens berechnet.

Jede der beschriebenen Möglichkeiten führt zu einem Schadensrisiko. Für diese Arbeit wurde bei der Ermittlung der Schadenswahrscheinlichkeit ein statistisches Verfahren angewandt, bei dem die vorhandenen Schäden über Schadensraten zu den Gewichtungen führen. Die Schadenskonsequenzen wurden mittels Experteneinschätzung gewichtet.

2.2 Entwicklung des Failure Risk Indexes

Die Formulierung eines multikriteriellen Indexes wurde von *Zonensein et al.* (2008) übernommen, in dem Berechnungen zu Überschwemmungsrisiken durchgeführt wurden. Diese Kennzahl wurde Flood Risk Index genannt. Damit sollte es möglich werden die subjektiven oder auch intuitiven Entscheidungsfindungen der üblichen Überschwemmungsvorhersagen für Siedlungsgebiete zu bewältigen und bereits im Vorfeld von Überschwemmungsereignissen Entscheidungen zur Schadensverminderung zu treffen.

Gleichung 2-1 zeigt die mathematische Formulierung dieses Indexes. Der *Flood Risk Index* setzt sich aus zwei Termen, nämlich den Überflutungseigenschaften und den Konsequenzen, zusammen.

$$FRI = \underbrace{\left(\sum_{i=1}^n I_i^{FP} \cdot p_i^{FP} \right)}_{FP}^{q_{FP}} \times \underbrace{\left(\sum_{j=1}^m I_j^C \cdot p_j^C \right)}_C^{q_C} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

Die Überflutungseigenschaften (in Englisch: flood properties - *FP*) stellen dabei die Eigenschaften der Schwere der Überschwemmung dar. Die Indikatoren (*I*) bilden die Eigenschaften wie z.B. die Überschwemmungstiefe, -fläche, -geschwindigkeit oder auch die Wiederkehrzeiten ab.

Die Konsequenzen (in Englisch: consequences - *C*) wiederum bilden das Ausmaß der Beschädigungen einer Überflutung ab. Hier werden Kennzahlen von den betroffenen Wohn- oder Fabrikgebäuden, Krankenhäusern, allgemeine Infrastrukturanlagen, bis hin zum Verlust von Menschenleben gebildet und monetär abgebildet.

Jeder Indikator in der Berechnung erhält einen Punktwert von null bis 100 und wird innerhalb des jeweiligen Terms gewichtet, wobei die Gewichtung zwischen null und eins liegen muss. Diese Werte werden für jeden Term aufsummiert und über einen Potenzwert, der zwischen null und eins liegt, normiert.

Als Ergebnis wird eine Bewertung von überflutungsgefährdeten Flächen zwischen null und 100 ausgegeben, wobei bei null kein Risiko einer Überflutung besteht und bei 100 ein sehr hohes Risiko vorliegt. An diesen Bewertungen können sich unter anderem Einsatzkräfte orientieren, um gezielt mit der Hilfe zu beginnen. Behörden können damit ihre Stadtentwicklung steuern indem sie in stark risikobehafteten Flächen keine Gebäudegenehmigungen mehr erteilen.

2.3 Allgemeines zur Infrastrukturerhaltung

Jede Art der Infrastruktur ist ein wertvolles Allgemeingut und bildet die Grundlage der heutigen Zivilisation. Im Fall der Wasserversorgung müssen die WVU nach einschlägigen Richtlinien und Normen die Wasserversorgung und die Wasserqualität sicherstellen. Dafür ist es notwendig eine entsprechend nachhaltige und geplante Instandhaltung durchzuführen, wofür hohe Instandhaltungsbudgets notwendig sind.

In den letzten Jahren traten verstärkt die Wartung, Inspektion und Reparatur von bestehenden Anlagen in den Fokus der Infrastruktureigentümer. Die Erneuerung von Anlagen stellt die kostenintensivste Instandhaltungsvariante dar, weshalb eine Verlängerung der Nutzungsdauer mithilfe der anderen Möglichkeiten der Instandhaltung durchgeführt wird.

In Abbildung 1 wird eine optimale Nutzungsdauer und Handhabung von Anlagen durch eine sogenannte „Badewannenkurve“ dargestellt:

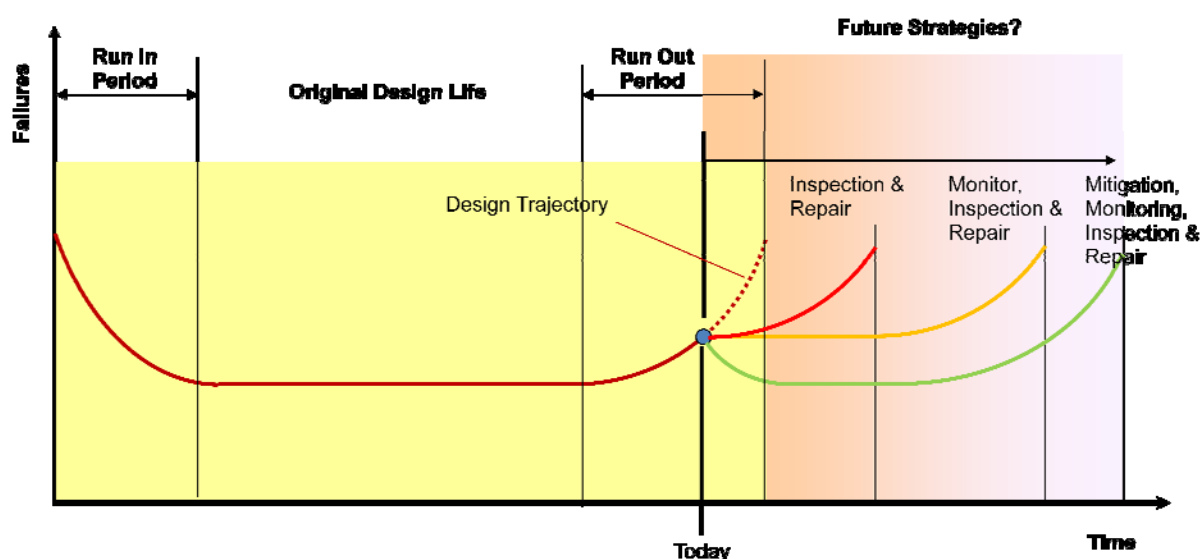


Abbildung 1: "Badewannenkurve" für den Zustand von Leitungen (Quelle: TD Williamson, 2011)

Auf der Ordinatenachse wurden die Schäden (in Englisch: failures) aufgetragen. Die Abszissenachse stellt die Zeit (in Englisch: time) dar.

Die dunkelrote Linie beschreibt den geplanten Zustands- oder Schadensverlauf (in Englisch: design trajectory) einer Trinkwasserleitung. In der Anfangs-Betriebsphase (in Englisch: run in period) treten Schäden auf, die sich aufgrund unsachgemäßer Behandlung und schlechter Verlegung ergeben haben. Dazu gehören beispielsweise falsche Lagerung und falscher Einbau oder auch Setzungen des Untergrundes. Am Ende der Anfangs-Betriebsphase vermindern sich diese Schäden und es beginnt die Phase der angestrebten und beabsichtigten Nutzungsdauer (in Englisch: original design life) der Leitungsinfrastruktur. In dieser Phase treten kaum Schäden auf. Gegen Ende der Lebensdauer startet die Auslaufphase (in Englisch: run out period). Darin steigt die Anzahl der Schäden, zum Beispiel durch Materialermüdung, Korrosion, o.ä. wieder an. Kurze Zeit später ist die ursprünglich angestrebte Nutzungsdauer eines Trinkwasserrohres zu Ende. Um die Nutzungsdauer der Leitung verlängern zu können, müssen Instandhaltungsstrategien (in Englisch: future strategies) ergriffen werden.

Durch drei Stufen der Behandlung von Leitungen kann diese Nutzungsdauer jedoch verlängert werden:

- Inspektion und Reparatur (in Englisch: inspection and repair) bei auftretenden Schäden

- Laufende Überwachung, Inspektion und Reparatur (in Englisch: monitor, inspection and repair) bei auftretenden Schäden

- Einsatz von vorbeugenden Maßnahmen zum Erhalt der Leitung, laufende Überwachung, Inspektion und Reparatur (in Englisch: mitigation, monitoring, inspection and repair) bei auftretenden Schäden

Je genauer Rohrleitungen beaufsichtigt und überwacht werden, desto früher können bei Schadensanzeichen (z.B. Materialabtrag durch Korrosion oder Verformungen der Leitungen) Gegenmaßnahmen gesetzt und damit die Lebensdauer der Leitungen erhöht werden. Für WVU ergeben sich dadurch zwar erhöhte laufende Kosten, diese würden aber durch die Investitionskosten für neue Leitungen bei weitem übertroffen werden.

2.4 Regeln der ÖVGW

Durch die Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach werden nicht nur Richtlinien und Regeln für die Errichtung, Qualitätskontrolle und Hygiene von Wasserversorgungsanlagen erstellt, sondern in den letzten Jahren auch immer mehr die digitale Erfassung der vorhandenen Infrastruktur (Richtlinie W 104 – Leitungsinformationssystem – Wasser und Abwasser; 2010) sowie der Umgang mit Schadensdaten (ÖWAV Regelblatt 40 – Leitungsinformationssystem – Wasser und Abwasser, 2010) für eine mögliche Nutzung in der Schadensvorhersage forciert.

2.4.1 W 100 (2007) – Wasserverteilerleitungen - Betrieb und Instandhaltung

In der Richtlinie *W 100 (2007) Wasserverteilerleitungen – Betrieb und Instandhaltung* sind die Aufgaben, die sich für ein WVU ergeben, dargestellt.

Der Betrieb des Netzes ist die Hauptaufgabe des Wasserversorgungsunternehmens. Dabei sollen die Kundenbedürfnisse bezüglich des Wasserbedarfs zufrieden gestellt werden.

Das zweite Aufgabengebiet stellt die Instandhaltung der Wasserversorgungsanlagen dar. Dabei wird die Instandhaltung in die drei Unterpunkte Wartung, Inspektion und Instandsetzung unterteilt.

Wartung:

Bei der Wartung soll die Funktionsfähigkeit aller Anlagenteile sichergestellt werden. Dies trifft vor allem auf die im Leitungsnetz eingebauten Armaturen – wie Schieber, Klappen, Entlüftungs- und Entleerungsventile, u.ä. zu.

Inspektion:

Die Inspektion soll den Zustand der Leitungen dokumentieren. Dafür liegen die verschiedensten Verfahren vor. Eine Möglichkeit ist die direkte Inspektion, dabei werden Geräte in die Leitungen eingebracht und der Zustand der Leitungen durch Befahren festgestellt. Eine weitere Möglichkeit ist die indirekte Inspektion, dabei wird zum Beispiel über den gemessenen Wasserverlust der Zustand der Leitungen festgestellt.

Instandsetzung:

Die Instandsetzung bildet die letzte Stufe der Rohrinstandhaltung. Dabei werden Leitungen, bei denen durch die Wartung oder Inspektion ein Instandsetzungsbedarf festgestellt wurde, rehabilitiert.

Weiters werden Leitungen instandgesetzt, bei denen ein Schaden aufgetreten ist. Dies ist die schlechteste Lösung für alle Beteiligten, da in diesem Fall nur mehr auf ein Schadensereignis reagiert werden kann.

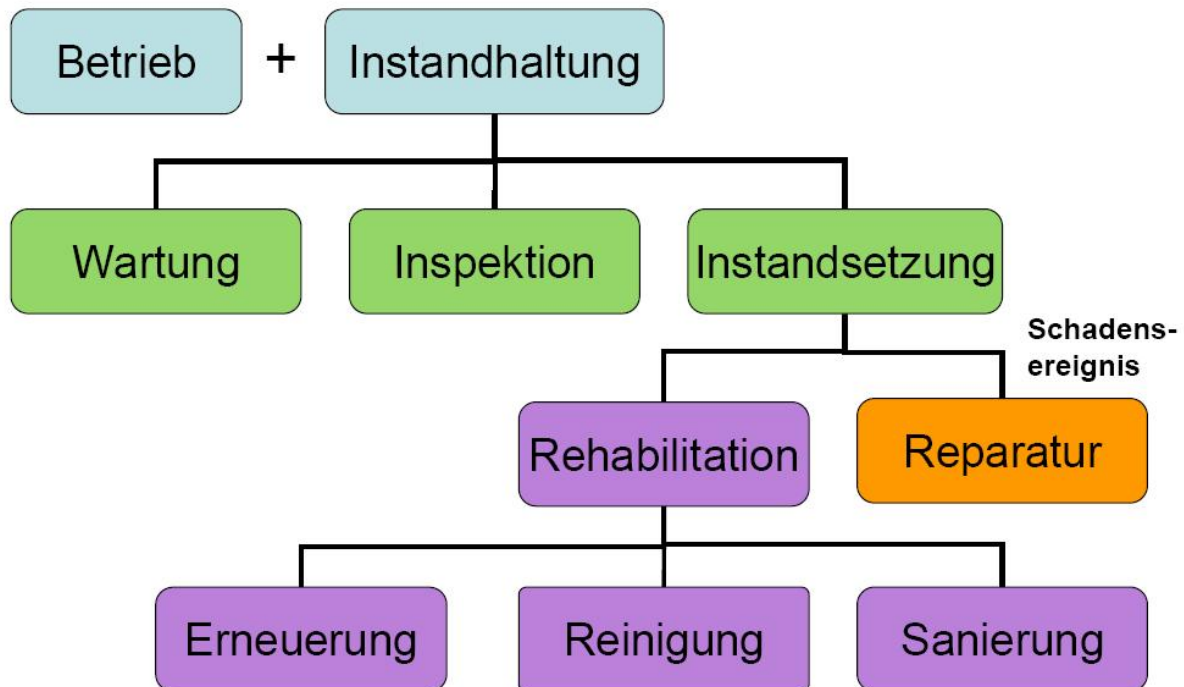


Abbildung 2: Aufgaben für Wasserversorger bei Trinkwassernetzen (Quelle: ÖVGW W 100, 2007)

2.4.2 W 105 (2011) – Schadensstatistik

In der Mitteilung *W 105 (2011) Schadensstatistik – Erfassung und Verarbeitung von Schadensereignissen* der ÖVGW wird die Erfassung und Auswertung von Schäden mit Wasseraustritt standardisiert. Ziel ist es dabei einheitliche Begrifflichkeiten und Definitionen, sowie aussagekräftige Auswertungsmöglichkeiten den Wasserversorgungsunternehmen zur Verfügung zu stellen. Dafür ist eine genaue und vollständige Charakterisierung der Schadensbilder durch den Ersteller der Dokumentation Voraussetzung.

Für die Erstellung und Interpretation der Auswertung und auch für eine zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie ist die Kenntnis der vorhandenen Infrastruktur von zentraler Bedeutung.

Ein Schaden im Sinne der Mitteilung *W 105 (2011)* beeinträchtigt die Funktion eines Rohrleitungsnetzwerkes und führt im Allgemeinen zu einem Wasserverlust bzw. zu einem Wasseraustritt.

Für eine klare Definition werden die vier wichtigsten Schadensarten im Folgenden dargestellt. Weitere Schadensarten, die von den Stadtwerken der beiden betrachteten Netze erfasst wurden, sind undichte Verbindungen und defekte Armaturen. Für

die Berechnungen in dieser Arbeit sind aber nur die nächsten vier Schadensarten von Bedeutung.

Korrosionsloch:

Löcher entstehen durch Korrosion des Rohrmaterials. In den meisten Fällen bildet sich durch Korrosion ein kleinflächiger Materialabtrag aus, bis die Wandstärke des Rohres aufgebraucht ist. In seltenen Fällen kann es aber auch zu großflächigen Korrosionsschäden kommen.



Abbildung 3: Korrosionsloch (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)

Längsriss:

Längsrisse können durch verschiedene Auslöser entstehen. Einerseits kann das Rohrmaterial durch die lange Liegedauer an Dauerfestigkeit verlieren und es kommt zu Materialermüdung. Auf der anderen Seite führen kurzfristige Überbeanspruchungen, wie zum Beispiel Punktlasten durch Straßenverkehr oder Setzungen, Frost oder auch Druckstöße im Betrieb des Wassernetzes zu dieser Art von Leitungsschaden.

Das Ergebnis der Ursachen ist ein Versagen im Bereich der Zugspannungen.

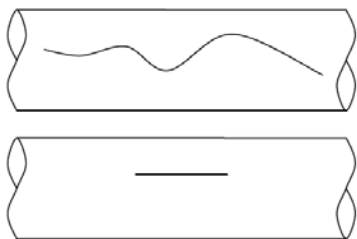


Abbildung 4: Längsriss (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)

Scherbenbruch:

Scherben- oder Schalenbrüche können Materialfehler als Auslöser des Schadens haben. Ebenso kann der Grund für diese Art des Gebrechens auch ein Druckstoß in der Betriebsführung des Wasserversorgungsnetzwerkes sein.

Das Ergebnis der Ursachen ist ein Versagen im Bereich der Zugspannungen.

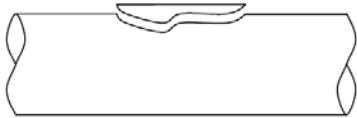


Abbildung 5: Scherbruch (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)

Rundriss:

Rundrisse, oder auch Radialrisse, Querrisse, Trennbrüche, ergeben sich am häufigsten durch Bodenbewegungen in Folge von Setzungen oder Frost.

Das Ergebnis der Ursachen ist ein Versagen im Bereich der Scherspannungen.

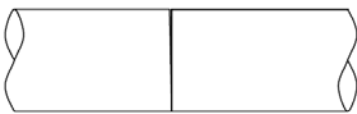


Abbildung 6: Rundriss (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)

2.5 Haupt- und Zubringerleitungen

Im Wasserversorgungsnetz einer Gemeinde sind zwei verschiedene Leitungsarten vorhanden, die grundlegend anders in der Betriebsführung betrachtet werden.

Versorgungsleitungen:

Versorgungsleitungen (VL) bilden in kleinen Durchmessern die Verästelung der Wasserversorgungsnetze. Schäden an diesen Leitungen führen zu einem lokal sehr begrenzten Versorgungsausfall, da vergleichsweise wenige Abnehmer von dieser Leitung im Einzelfall versorgt werden können. Bei Bedarf lassen sich Ersatzwasserversorgungen für die betroffenen Gebiete herstellen.

Die Reparaturarbeiten bleiben im Regelfall auf den unmittelbaren Bereich des Leitungsschadens beschränkt, da größere Schäden z.B. durch Überflutungen oder Unterspülung, in dieser Durchmesser-Klasse selten auftreten. In Großstädten können VL allerdings Durchmesser bis 200 mm erreichen, womit die Reparaturarbeiten auch umfangreicher werden können.

Für den Betrieb dieses Teils des Wassernetzes bedeutet dies, dass Schäden an Versorgungsleitungen toleriert werden. In der nachfolgenden Grafik auf der linken Seite wird der optimale Erneuerungszeitpunkt dieses Leitungstyps dargestellt. Je nach Anforderung können auch mehrere Schäden am gleichen Leitungsabschnitt noch immer die wirtschaftlichere Lösung für den Wasserversorger sein.

Haupt- und Zubringerleitungen:

Haupt- und Zubringerleitungen (HZL) stellen das Rückgrat der Wasserversorgung dar. Dabei handelt es sich in der Regel um Leitungen mit größeren Durchmessern. Bei den betrachteten Netzen werden Leitungen ab einem Durchmesser von 200 bzw. 300 mm als Haupt- und Zubringerleitungen gewertet. Diese bringen das Trinkwasser von den Gewinnungsgebieten in das Versorgungsgebiet, wo es von den VL verteilt wird.

Schäden an diesen Leitungen können, bei fehlender Redundanz, zu großflächigen Versorgungsausfällen führen. Ersatzwasserversorgungen sind in diesem Fall nur für ausgewählte Abnehmer (z.B. für Krankenhäuser) mit bestehenden Notfallplänen möglich.

Bei großen Durchmessern kann ein „Rohrbruch“ zu erheblichen Behinderungen an der Oberfläche führen. Die Folgen können von Überflutungen ganzer Straßenzügen bis hin zu Straßenunterspülungen mit Einbrüchen der Oberfläche reichen.

Der Betrieb dieser Leitungen stellt die Verantwortlichen vor die entscheidende Frage des optimalen Zeitpunktes für den Wechsel bestehender Leitungen. Nach Forschungsergebnissen von Z. Liu et al. (2012) kann bei Wasserleitungen dieser Kategorie der optimale Erneuerungszeitpunkt bereits vor dem ersten Schadensfall liegen. In jedem Fall ist ein mehrmaliger Schaden am selben Abschnitt zu vermeiden, da die Kosten für die Reparatur jene Kosten einer kompletten Erneuerung des Leitungsabschnittes übersteigen.

Abbildung 7 zeigt die unterschiedlichen Kosten- und Schadensrisikoverläufe der betrachteten Leitungsarten (Kleiner et al., 1998). Auf der linken Seite befindet sich die Abbildung für VL und rechts jene für HZL.

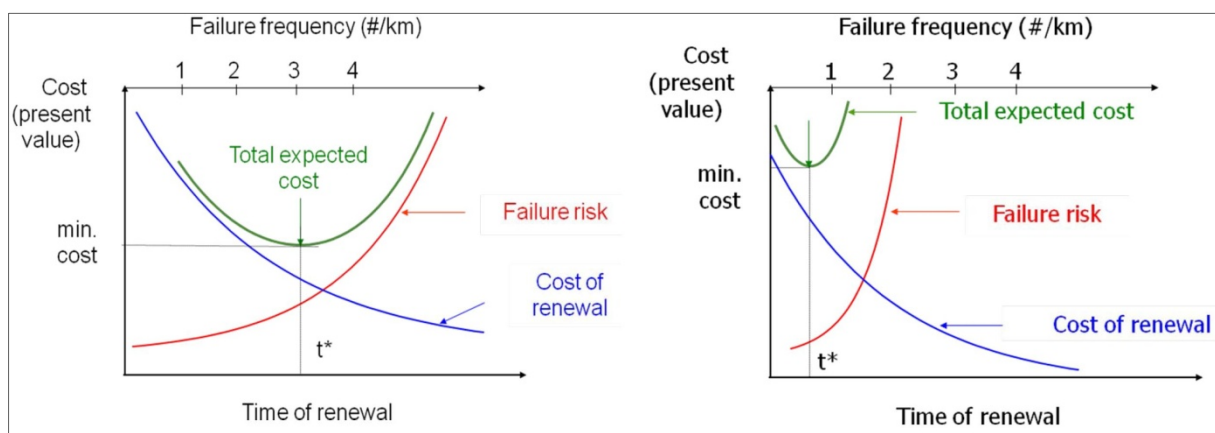


Abbildung 7: Vergleich des wirtschaftlichen Erneuerungszeitpunktes (Quelle: Kleiner et al., 1998)

Auf der Ordinatenachse wurden die Ausgaben, als Barwert (in Englisch: cost present value), für die Leitungsinfrastruktur aufgetragen. Die untere horizontale Achse stellt die Zeitachse dar, auf welcher sich der Erneuerungszeitpunkt (in Englisch: time of renewal) bewegt. Auf der oberen horizontalen Achse sind die Schadensraten (in Englisch: failure frequency), in Schäden pro Kilometer, eingetragen.

Die roten Linien zeigen das mit der Nutzungsdauer steigende Schadensrisiko (in Englisch: failure risk).

Die blauen Linien zeigen die mit der Zeit sinkenden Erneuerungskosten (in Englisch: cost of renewal).

Die grünen Linien bilden die Summen der roten und blauen Linien. Diese stellen die erwarteten Gesamtausgaben (in Englisch: total expected cost) einer Trinkwasserleitung dar. Der wirtschaftliche Erneuerungszeitpunkt befindet sich beim Minimum der erwarteten Gesamtkosten (in Englisch: minimal cost).

2.6 Räumliche und zeitliche Häufung von Schadensfällen

Bei verschiedenen Untersuchungen in Nordamerika wurde eine zeitliche und räumliche Häufung von Schäden an Trinkwasserleitungen festgestellt. Das heißt, dass nach einem Erstschaden die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist, dass auch der nächste Schaden in der Nähe des Initialschadens auftritt. Im vorliegenden Artikel haben *Goulter* und *Kazemi* (1988 und 1989) das Leitungsnetz und die dokumentierten Schäden der Stadt Winnipeg, Kanada, untersucht:

In den Jahren von 1975 bis 1985 wurden im Leitungsnetz mit einer Länge von 2.337 km insgesamt 20.213 Schäden festgestellt. Diese wurden nach den verwendeten Materialien und den aufgetretenen Schadensarten unterteilt und analysiert.

2.6.1 Räumliche Häufung von Schäden

Nach den Untersuchungen von *Goulter* und *Kazemi* (1988) entstehen 42% aller Schäden innerhalb von 20 Metern zu einem vorangegangenen Schaden. 13 Prozent der Schäden bilden sich sogar an derselben Stelle eines bereits reparierten Schadens. Dies sagt aus, dass nur die Auswirkung eines Problems durch die Reparatur beseitigt wurde, das Problem selbst jedoch weiterhin vorhanden ist.

Abbildung 8 wurde mit den Daten aus Kanada erstellt und bildet die Ergebnisse dieser Untersuchung der räumlichen Abhängigkeiten ab. Je näher man einem vorangegangenen Schaden kommt, desto deutlicher steigt die Anzahl von weiteren Schadensfällen.

Die verschiedenen Graphen zeigen zusätzlich die zeitliche Komponente. Je länger der betrachtete Zeitraum ist, desto höher wird die Schadensrate RRS^{ts} .

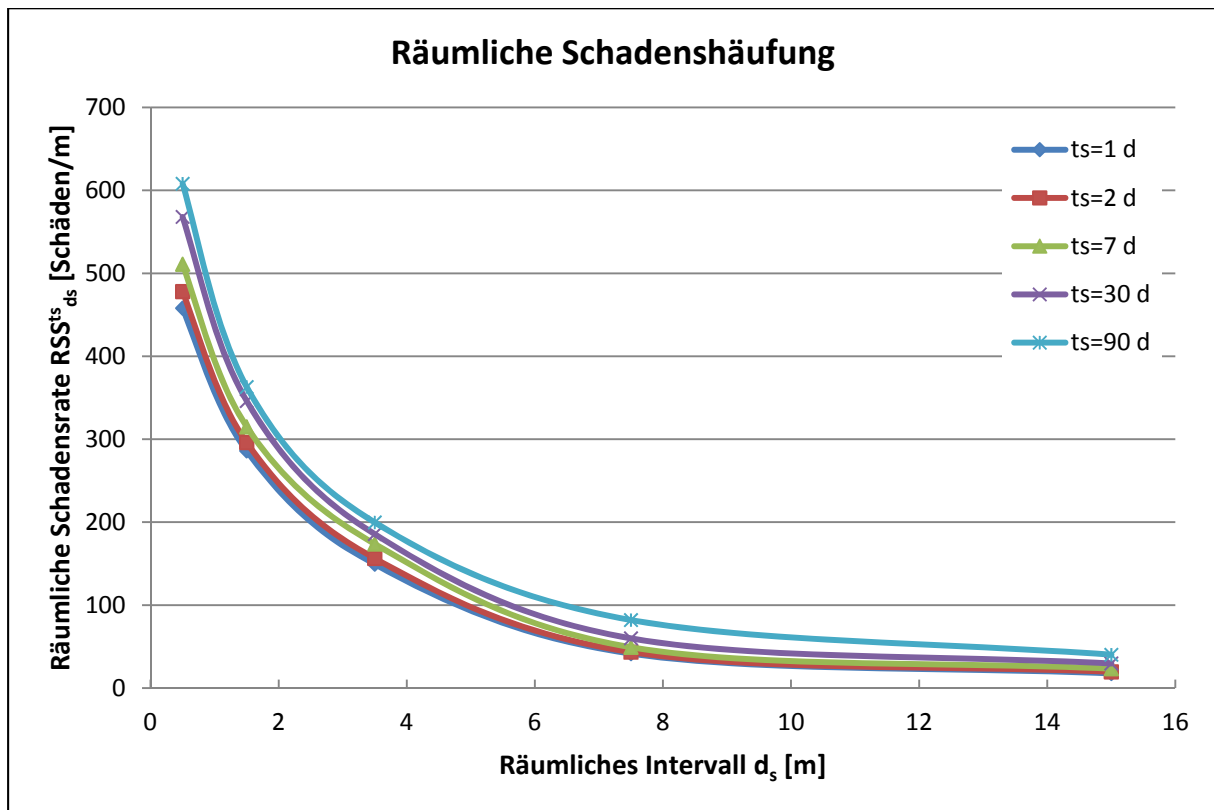


Abbildung 8: Abhängigkeit der räumlichen Nähe von Schadensfällen (Quelle: nach *Goulter & Kazemi, 1988*)

2.6.2 Zeitliche Häufung von Schäden

Die zeitliche Häufung der Schadensfälle wurde für das Leitungsnetz Winnipeg nach dem gleichen Prinzip ausgewertet. Allerdings ist die zeitliche Komponente sehr stark mit der räumlichen verknüpft, da nur Schäden innerhalb eines kleinen Gebietes sich gegenseitig beeinflussen.

Je länger ein Schaden in der Vergangenheit zurück liegt, desto geringer ist die Gefahr, dass ein weiterer auftritt.

Die Graphen in Abbildung 9 zeigen die Auswertungen von *Goulter* und *Kazemi (1988)* mit den unterschiedlichen räumlichen Intervallen. Auch hier ergibt sich der Schluss, je größer der betrachtete Abschnitt einer Leitung, desto mehr Schäden treten auf.

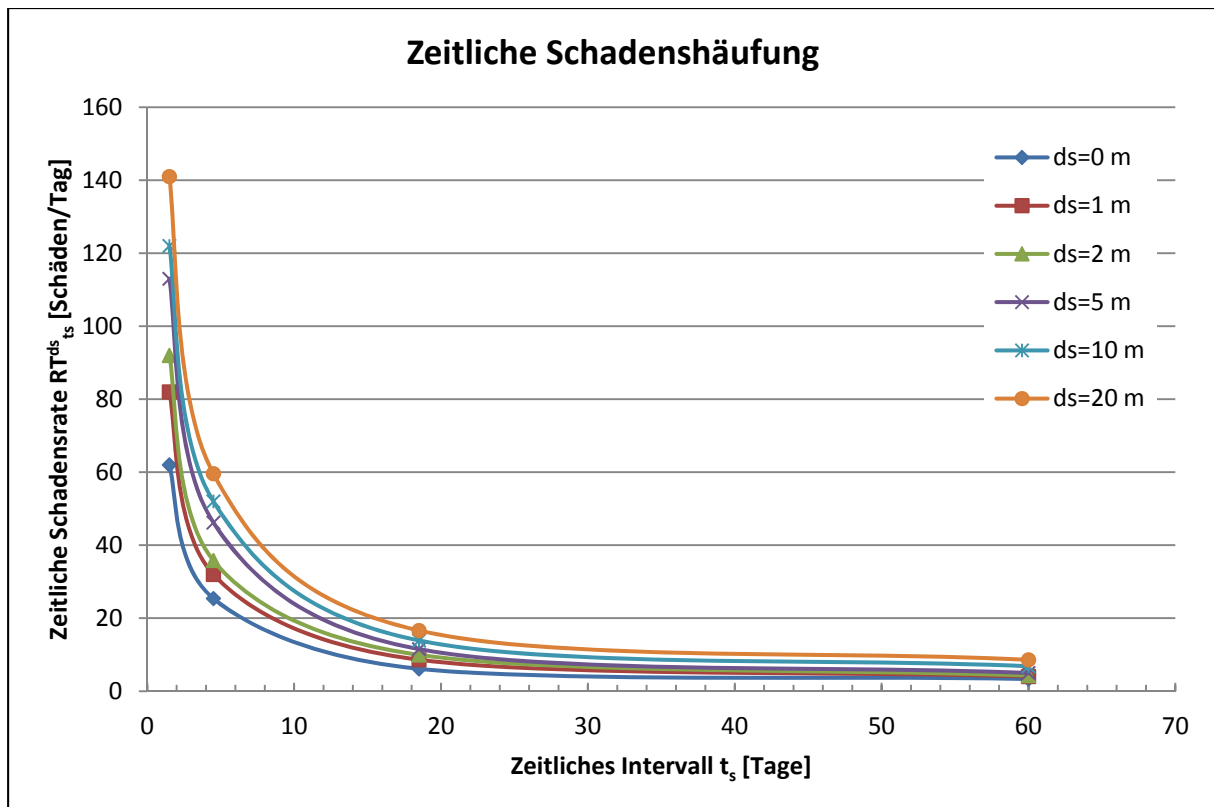


Abbildung 9: Abhängigkeit der zeitlichen Nähe von Schadensfällen (Quelle: nach *Goulter & Kazemi, 1988*)

2.6.3 Ergebnis der Auswertungen von *Goulter* und *Kazemi* (1988 und 1989)

Initialschäden führen in der Bettung und im umgebenden Erdreich zu Ausspülungen und Setzungen. Weiters führen auch die Reparaturarbeiten eines Initialschadens zu heterogenen Lagerungsdichten im umgebenden Erdmaterial. Durch die neuen Spannungs- und Bettungssituationen werden die umgebenden Leitungsabschnitte negativ beeinflusst.

Die betroffenen Leitungsabschnitte werden für den Zeitraum der Reparaturarbeiten vom restlichen Netz getrennt und abgeschiebert. Dadurch ergeben sich für die Rohrinfrastruktur Druckunterschiede und Druckstöße. Bei gealterten Anlagen vermindern sich nach *Sorge (2007)* die Materialeigenschaften (z.B. Biege- oder Zugspannungen) wodurch es nach *Goulter* und *Kazemi (1989)* zu einer ganzen Abfolge von Schäden kommen kann.

Diese Untersuchungsergebnisse werden in dieser Masterarbeit für die Bewertung von Leitungen mit Vorschäden genutzt. Näheres dazu findet sich bei den jeweiligen Indikatoren der Vorschäden.

3 Risikobewertung von Haupt- und Zubringerleitungen

3.1 Motivation und Definition von Risiko

Werden die Wörter Risiko und Unsicherheit in einer wissenschaftlichen Arbeit benutzt, dann muss zu allererst festgestellt werden, dass Risiko weder verhindert noch übertragen werden kann. Risiko ist eine unberechenbare zufällige Variable, die einem bestimmten stochastischen Ablauf folgt oder auch nicht (*Friedl und Fuchs-Hanusch, 2011*).

Allgemein kann das Risk Management als eine Disziplin angesehen werden, die mit der Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Ereignisses mit negativen Effekten lebt. Dieser allgemeine Ablauf gilt ebenso für Wasserversorgungssysteme.

Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht würde die gänzliche Beseitigung des Risikos zu nicht vertretbaren finanziellen Kosten führen. Deshalb versucht jedes Risk Management die Anzahl der Schäden und die darauf folgenden schwerwiegenden Auswirkungen zu verringern. Das Auftreten von Schäden und die damit zusammenhängenden Kosten der Lösung des Problems sind zwei Variable, die in einem hohen Maße zueinander in Beziehung stehen. Die Zusammenhänge dieser beiden Unbekannten müssen für ein exaktes Risk Assessment bestimmt werden (*Friedl et al., 2012*).

Das Ziel des Risk Assessments ist die Identifizierung von anfälligen Rohrabschnitten.

3.2 Methoden zur Risikobewertung

Wasserversorgungsnetzwerke stellen komplexe Systeme dar, weil ein Großteil der Infrastruktur unterhalb der Erdoberfläche verlegt ist. Außerdem resultieren Schäden immer aus einer großen Anzahl von zusammenhängenden Einflussfaktoren. Die Wahrscheinlichkeit eines Schadens ist von einer großen Anzahl von Einflüssen und Zuständen abhängig, wie zum Beispiel Betriebsbelastung, Spannungen und Druck, Änderungen im System aufgrund von jahreszeitlichen Veränderungen, Klimaänderungen, Anlagenalterung, Veränderungen der Bevölkerungs- und Bebauungsdichte oder auch der Landnutzung. Alle diese Parameter erzeugen eine beträchtliche Komplexität innerhalb der Entwicklung eines Schadens (*Friedl und Fuchs-Hanusch, 2011*).

In Abhängigkeit des Umfangs und der Genauigkeit der Infrastrukturanalyse kann die Beurteilung mit vielen Methoden durchgeführt werden. Diese können von einer Expertenmeinung bis hin zu vollständigen Zuverlässigkeitsanalysen reichen.

Darüber hinaus ist der Zustand eines Leitungsabschnittes nicht allein durch die beiden Extremwerte, Schaden oder kein Schaden, begrenzt. Zusätzliche Verhältnisse wie Wasserverluste, Material- und Rohrverbindungszustand stellen wichtige Informationen für die Risiko Bewertung dar.

Aufgrund dieser Anforderungen wurden Methoden entwickelt (*Friedl und Fuchs-Hanusch, 2011*), die die vorhandenen und wichtigsten Informationen zu einer Risikoanalyse zusammen führen, um Prioritäten in der Rohrleitungserneuerung zu erhalten.

3.3 Vorgehensweise beim Failure Risk Index (FRI)

In der Technik wird das Risiko im Allgemeinen in drei grundlegende Elemente unterteilt (*Friedl und Fuchs-Hanusch, 2011*):

- in die Auftretenswahrscheinlichkeit eines schwerwiegenden Ereignisses
- in seine Konsequenzen und
- in die Auffindungswahrscheinlichkeit

In einem ersten Schritt werden die verschiedenen Parameter der Auftretenswahrscheinlichkeit (in Englisch: occurrence - O), der Schwere des Schadens oder auch die Konsequenzen (in Englisch: severity - S) und der Auffindungswahrscheinlichkeit (in Englisch: detection - D) sowie deren Einflüsse untersucht und zusammengestellt. Diese Risikobewertungsmethode wurde von *Friedl und Fuchs-Hanusch (2011)* für Trinkwassersysteme in Form eines Failure Risk Index durchgeführt.

Damit lassen sich einige der Unzulänglichkeiten der herkömmlichen Risiko Bewertungsmethoden bewältigen. Die drei Bestandteile O, S und D werden durch Unterindizes dargestellt, welche die bestimmten örtlichen Eigenschaften der Anfälligkeit und Belastung widerspiegeln. Jeder Unterindex entsteht aus dem Zusammenwirken zahlreicher Faktoren, die im Weiteren als Indikatoren bezeichnet werden. Die jeweiligen Bedeutungen der einzelnen Unterindizes und Indikatoren werden über Gewichtungen abgebildet. Schlussendlich entsteht durch die gewichteten Summen und Produkte der Failure Risk Index.

Die Wahl der Indikatoren kann in Abhängigkeit der örtlichen Erfordernis, dem Vorhandensein oder der Genauigkeit von Informationen unterschiedlich ausfallen.

3.3.1 Mathematische Formulierung des Failure Risk Index

Um das Risiko in einem Zahlenwert ausdrücken zu können, muss das Zusammenwirken der Auftretenswahrscheinlichkeit (in Englisch: occurrence - O) eines Schadensereignisses seinen voraussichtlichen Konsequenzen oder seiner Schwere (in Englisch: severity - S) und der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung (in Englisch: detection - D) wiedergegeben werden (*Zonensein et al., 2008*).

Bei der Berechnung des Failure Risk Index werden die drei Unterindizes, Auftretenswahrscheinlichkeit, voraussichtliche Konsequenz und Entdeckungswahrscheinlichkeit mit den jeweiligen Normierungen, qO , qS , qD , normiert und miteinander multipliziert:

$$FRI = O^{qO} \times S^{qS} \times D^{qD} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

FRI Failure Risk Index, reicht von 0 (niedrigstes Risiko) bis 100 (höchstes Risiko)

O Unterindex *Auftreten*, in Bezug auf die Auftretenswahrscheinlichkeit, regelbar zwischen 0 und 100

S Unterindex *Schwere*, in Bezug auf die Konsequenzen, regelbar zwischen 0 und 100

D Unterindex *Entdeckung*, in Bezug auf Wahrscheinlichkeit des Auffindens eines Schadens, reicht von 0 bis 100

qO , qS , qD Normierung der Auftretenswahrscheinlichkeit, der voraussichtlichen Konsequenz und der Entdeckungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Wichtigkeit des Unterindexes. Die Normierungen müssen dabei die folgenden Einschränkungen erfüllen: (i) $0 < qO, qS, qD \leq 1$; (ii) $qO + qS + qD = 1$

Die Unterindizes (*O*, *S* und *D*) berechnen sich im Weiteren aus den gewichteten und vorher normierten Summen der einzelnen Indikatoren. Jeder Unterindex kann dabei einen Wert zwischen 0 und 100 annehmen.

$$O = \sum_{i=1}^n l_i^O \times p_i^O \times avrel_i^O \quad \text{Gleichung 3-2}$$

$$S = \sum_{j=1}^m l_j^S \times p_j^S \times avrel_j^S \quad \text{Gleichung 3-3}$$

$$D = \sum_{k=1}^u l_k^D \times p_k^D \times avrel_k^D \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit:

l_i^O normierter Indikator des Unterindex *O*, reicht von 0 bis 100

l_j^S normierter Indikator des Unterindex *S*, reicht von 0 bis 100

- l_k^D normierter Indikator des Unterindex D, reicht von 0 bis 100
- n Anzahl der Indikatoren des Unterindex O
- m Anzahl der Indikatoren des Unterindex S
- u Anzahl der Indikatoren des Unterindex D
- p_i^O Gewichtung des i-ten Indikators des Unterindex O in Abhängigkeit der jeweiligen Wichtigkeit des Indikators. Die Gewichtungen müssen dabei die folgenden Einschränkungen erfüllen: (i) $0 < p_i^O \leq 1$; (ii) $\sum_{i=1}^n p_i^O = 1$
- p_j^S Gewichtung des j-ten Indikators des Unterindex S in Abhängigkeit der jeweiligen Wichtigkeit des Indikators. Die Gewichtungen müssen dabei die folgenden Einschränkungen erfüllen: (i) $0 < p_j^S \leq 1$; (ii) $\sum_{j=1}^m p_j^S = 1$
- p_k^D Gewichtung des k-ten Indikators des Unterindex D in Abhängigkeit der jeweiligen Wichtigkeit des Indikators. Die Gewichtungen müssen dabei die folgenden Einschränkungen erfüllen: (i) $0 < p_k^D \leq 1$; (ii) $\sum_{k=1}^u p_k^D = 1$
- $avrel_i^O$ Gewichtung des i-ten Indikators des Unterindex O in Abhängigkeit der jeweiligen Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Indikators. Die Gewichtungen müssen dabei die folgenden Einschränkungen erfüllen: (i) $0 < avrel_i^O \leq 1$; (ii) $\sum_{i=1}^n avrel_i^O = 1$
- $avrel_j^S$ Gewichtung des j-ten Indikators des Unterindex O in Abhängigkeit der jeweiligen Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Indikators. Die Gewichtungen müssen dabei die folgenden Einschränkungen erfüllen: (i) $0 < avrel_j^S \leq 1$; (ii) $\sum_{j=1}^m avrel_j^S = 1$
- $avrel_k^D$ Gewichtung des k-ten Indikators des Unterindex O in Abhängigkeit der jeweiligen Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Indikators. Die Gewichtungen müssen dabei die folgenden Einschränkungen erfüllen: (i) $0 < avrel_k^D \leq 1$; (ii) $\sum_{k=1}^u avrel_k^D = 1$

Wird Gleichung 3-1 mit den Gleichungen 3-2, 3-3 und 3-4 kombiniert, ergibt sich die gesamte mathematische Formulierung des Failure Risk Index:

$$FRI = \left(\sum_{i=1}^n l_i^O \times p_i^O \times avrel_i^O \right)^{qO} \times \left(\sum_{j=1}^m l_j^S \times p_j^S \times avrel_j^S \right)^{qS} \\ \times \left(\sum_{k=1}^u l_k^D \times p_k^D \times avrel_k^D \right)^{qD}$$

Gleichung 3-5

Als Gesamtergebnis der Berechnung wird eine Zahl zwischen null und 100 ausgegeben, wobei 0 kein Risiko bedeutet und 100 das höchste Risiko für einen Schaden darstellt.

4 Angewandtes Berechnungsschema

4.1 Modifikation der allgemeinen mathematischen Formulierung

Die in Kapitel 3.3.1 dargestellte allgemeine Berechnungsmethode des Failure Risk Index kann in dieser Form in dieser Arbeit aufgrund nicht verfügbarer Daten nicht verwendet werden und wurde daher mit einigen Änderungen versehen. Als Grundlage der folgenden Analysen wurden die GIS-Daten der beiden WVU herangezogen und als zuverlässige Datenquelle angesehen. Die Veränderungen zur allgemeinen mathematischen Formulierung werden im Folgenden schrittweise dargestellt.

Die erste Modifikation wurde bereits bei den Unterindizes vorgenommen. So wurde der Unterindex D (die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung) als eigener Wert aus der Berechnung ausgeschieden, da nur bereits vorhandene Schäden an den Rohrleitungen in die Berechnung der Schadensraten einbezogen wurden. Für Zuverlässigkeit der Entdeckung zukünftiger Schadensereignisse standen in dieser Arbeit keine Informationen zu Verfügung. Alle Schäden, die bis zum Zeitpunkt der Datenübermittlung noch nicht in die elektronische Datenbank übernommen oder noch nicht gefunden wurden, finden auch in den Berechnungen keine Berücksichtigung. Somit ergibt sich der FRI aus der Schadenswahrscheinlichkeit O und dem Schadensausmaß S zu:

$$FRI = O^{qO} \times S^{qS} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Auch die zweite Abänderung hängt mit der Datensicherheit zusammen. Die Gewichtungen $avrel_i^O$ und $avrel_j^S$ wurden nicht in die Berechnungen mit einbezogen, da die vorliegenden Daten der WVU als korrekt betrachtet wurden. Die Gleichungen 4-2 und 4-3 ergeben sich damit zu:

$$O = \sum_{i=1}^n l_i^O \times p_i^O \quad \text{Gleichung 4-2}$$

$$S = \sum_{j=1}^m l_j^S \times p_j^S \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Als letzte Einschränkung werden die globalen Normierungen der einzelnen Unterindizes nicht angewendet. Die Schadenswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß gehen dadurch mit derselben Gewichtung in die Berechnungen ein. Eine gezielte Gewichtung der beiden Faktoren O und S muss von jedem WVU selbst nach den

jeweiligen Anforderungen getroffen werden. Entscheidend dabei ist die Fragestellung: „Darf bei einer Leitung aufgrund der erforderlichen Betriebssicherheit oder aufgrund der hohen Folgeschäden kein Schaden auftreten?“

Die nach den oben beschriebenen Einschränkungen und Voraussetzungen veränderte Berechnung des FRI erfolgt im Folgenden mit der Gleichung 4-4:

$$FRI = \left(\sum_{i=1}^n l_i^O \times p_i^O \right) \times \left(\sum_{j=1}^m l_j^S \times p_j^S \right) \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Die Indikatoren l können dabei Punktwerte von null bis fünf erhalten, je nachdem welche Bewertung sich ergibt. Den Gewichtungen p werden Werte zwischen null und eins zugewiesen, wobei die Summe aller Gewichtungen eins betragen muss.

Jede der beiden Klammerausdrücke kann damit einen maximalen Punktwert von fünf erreichen. Die maximal erreichbare Punkteanzahl einer Leitung kann damit 25 betragen. Die FRI Bewertung selbst reicht jedoch von eins bis fünf nach dem Schulnotensystem.

4.2 Festlegung der Indikatoren

Die Wahl der verschiedenen Indikatoren erfolgte durch Analyse der GIS-Datenbanken für die Leitungsnetze A und B. Die Qualität und der Umfang der dokumentierten Informationen waren dabei von entscheidender Bedeutung.

4.2.1 Indikatoren für Netz A

Die Schadensdokumentation für das Netz A wurde leider in weiten Teilen ungenau ausgeführt. Für die Schadensbehebung wurden standardisierte Skizzenblätter aufgestellt, in denen eine umfangreiche Beschreibung des vorgefundenen Schadens geschehen sollte. Allerdings wurden diese Skizzenblätter meist nicht ordnungsgemäß ausgefüllt, wodurch sich nachträglich keine weiteren Schlüsse über die genaue Schadenart ziehen lassen.

4.2.2 Indikatoren für Netz B

Für das WVU B liegt ein Einflusskatalog mit einer Auflistung der unterschiedlichen Einflussfaktoren vor. Dieser wurde als Grundlage für die Indikatoren dieser Arbeit verwendet, wobei eine Abänderung der vorhandenen Gruppen auf die hier verwendete fünfteilige Einstufungsskala vorgenommen wurde und die Punkte nicht nach einer physikalischen Reihung, sondern nach Schadensraten vergeben wurden.

Die GIS-Datenbank konnte durch genaue, vollständige und umfangreiche Dokumentation sehr gut für Auswertungen herangezogen werden. Informationen mit der Anmerkung „unbekannt“ wurden nur in geringer Anzahl vorgefunden.

4.3 Bestimmung der Schadensraten

Für die Bestimmung der Indikatorgewichtung können im Allgemeinen verschiedene Methoden herangezogen werden.

Als einfachste Variante können alle Indikatoren linear gewichtet werden, womit allerdings keine objektive Aussage möglich ist. Einflüsse mit großer Bedeutung werden Einflüssen mit geringer Bedeutung gleichgesetzt. Eine Verzerrung der Ergebnisse zum Besseren ist die Folge. Sind Experten, wie zum Beispiel Mitarbeiter von Wasserversorgungsunternehmen in die Untersuchung mit einbezogen, so kann die Gewichtung auch über Expertenmeinung und deren Erfahrungen mit den vorliegenden Einflüssen erfolgen.

In dieser Arbeit werden die Gewichtungen der Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit über die Schadensraten (SR) ermittelt, wobei die Schadensrate nicht direkt der Gewichtung entspricht.

Dazu werden die Schadensfälle für eine bestimmte Gruppe des Indikators erhoben und durch die gesamte Verlegelänge der Gruppe dividiert.

Beispiel: Der Indikator *Material* besteht aus den Gruppen AZ, Beton, GG, GGSM, GGG \leq 1980, GGG $>$ 1980, PE, Sonstige und ST.

Die Gruppe Grauguss (GG) hat im gesamten Versorgungsleitungsnetz 95 Schäden bei einer Verlegelänge von 56,08 Kilometern. Die Schadensrate des Indikators *Material* der Gruppe GG liegt somit bei 1,69 Schäden pro km.

Bei allen anderen Indikatoren werden die Gruppen zusätzlich nach den vorhandenen Materialien unterschieden. Diese Auswertung erfolgt für alle Gruppen aller Indikatoren.

4.4 Punkteverteilung

Für die weitere Berechnung des FRI wurde jeder Gruppe und jedem Material jedes Indikators über die Schadensrate ein Punktwert nach dem Schulnotensystem zugewiesen. Dazu wird der Wert der höchsten Schadensrate eines Indikators als Maximum herangezogen. Von diesem maximalen Wert wird nach den folgenden Punkteverteilungssystemen die Schadensrate geteilt und in Punkte für die FRI Berechnung umgelegt.

Die Punkteverteilung wurde in vier Systeme unterteilt, wobei die Bewertung mit fünf Punkten die schlechteste Bewertung ergibt:

- Für Indikatoren, bei denen allen Rohrabschnitten jeder Gruppe und jedes Materials eine Schadensrate zugewiesen werden kann, reicht die Punkteskala von eins bis fünf.
- Gruppen, die bei den jeweiligen Indikatoren nicht vorkommen, werden mit null Punkten versehen. Für die restlichen Gruppen mit Schadensraten werden die Punkte eins bis fünf vergeben.
- Rohrabschnitte die zwar im Netz vorkommen, bei denen bislang jedoch kein Schaden aufgetreten ist, werden mit einem Punkt in die Berechnung mit einbezogen. Damit soll dargestellt werden, dass zukünftig auch bei diesen Abschnitten Schäden entstehen können. Allen Gruppen, bei denen bereits Schäden vorhanden sind, werden je nach Schadensrate 2 bis 5 Punkte zugewiesen.
- Leitungsabschnitte, in welchen bereits Vorschäden aufgetreten sind, werden nicht nach den ermittelten Schadensraten mit Punkten bewertet, sondern erhalten automatisch fünf Punkte. Die Gründe hierfür liegen im frühen wirtschaftlichen Erneuerungszeitpunkt bzw. den zeitlichen und räumlichen Häufungen von Schadensfällen.

Das jeweils angewandte System wird in den Kapiteln 5 und 6 bei jedem Indikator dargestellt und beschrieben.

4.5 Bestimmung der Indikatorgewichtung

Die Bestimmung der Indikatorgewichtung erfolgt innerhalb der Schadenswahrscheinlichkeit über die SR. Die maximale Schadensrate eines jeden Indikators wird in die Berechnung einbezogen. Die Größe der Gewichtung ist schlussendlich aber für jeden Leitungsabschnitt gesondert zu betrachten. Dadurch, dass nicht jeder Indikator bei jedem Leitungsabschnitt vorliegt, kann keine allgemeine Gewichtung für die Indikatoren festgelegt werden.

Bei der Schadenswahrscheinlichkeit werden die maximalen Schadensraten aller für die aktuelle Leitung vorliegenden Indikatoren addiert. Dies ergibt den Ausgangspunktwert für die Gewichtung und dieser ist für jede Leitung unterschiedlich.

Die jeweiligen maximalen Schadensraten werden danach als Prozentwert der Summe aller maximalen Schadensraten eines Leitungsabschnittes dargestellt. Dieser Prozentwert stellt die Gewichtung für den jeweiligen Indikator dar.

Beispiel: Leitung 1 hat beim Indikator Material eine maximale Schadensrate von 2,41. Die Summe aller maximalen Schadensraten der Leitung 1 ist 98,69, demnach ist die Gewichtung des Indikators Material 2,4%.

Leitung 2 hat beim Indikator Material eine maximale Schadensrate von 2,41. Die Summe aller maximalen Schadensrate der Leitung 2 ist 57,77, demnach ist die Gewichtung des Indikators Material 4,2%.

Diese Vorgangsweise wurde für alle Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit bei jeder Leitung durchgeführt.

Für die Indikatoren des Schadensausmaßes können keine Schadensraten als Grundlage für die Gewichtung herangezogen werden. Daher erfolgt diese Gewichtung nach einer Experteneinschätzung. Näheres dazu findet sich in den jeweiligen Kapiteln der Anwendung auf die beiden Haupt- und Zubringerleitungsnetze.

4.6 Ergebnisdarstellung

Die einzelnen Punktwerte der Indikatoren der Auftretenswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes werden mit den jeweiligen Gewichtungen multipliziert und ergeben die beiden Punktezwischenwerte der Auftretenswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes. Jeder der beiden Werte kann in seinen Extremwerten zwischen einem und fünf Punkten variieren.

Die beiden Punktezwischenwerte werden miteinander multipliziert und ergeben damit den Punkteendwert eines Leitungsabschnittes. Als maximaler Punkteendwert können 25 Punkte erreicht werden.

Der Failure Risk Index selbst wird nach dem fünfstelligen Schulnotensystem ausgewiesen. Die Punkteendwerte werden in fünf Punkteschritten, nach der folgenden Abbildung, unterteilt.

Failure Risk Index	von Punkteendwert	bis Punkteendwert
1	0	<5,0
2	5,0	<10,0
3	10,0	<15,0
4	15,0	<20,0
5	20,0	25,0

Tabelle 1: Zugehörige Punkteendwerte zum Failure Risk Index

5 Anwendung des FRI auf das Zubringerleitungsnetz A

5.1 Allgemeine Beschreibung

Das Haupt- und Zubringerleitungsnetz A ist in einer GIS-Datenbank digital abgebildet. Gesamt umfasst das Netzwerk 441,7 km an HZL, wobei die Ältesten bereits im Jahr 1895 verlegt wurden. Durch Unterscheidung nach bestimmten Attributen, wie beispielsweise Material, Durchmesser, Verkehrsbelastung, u.v.m., wurden daraus 3.726 einzelne Abschnitte. Diese Abschnitte mit den zugehörigen Eigenschaften bilden als Tabelle die Grundlage der Berechnungen dieser Arbeit.

Im Zubringerleitungsnetz A sind Rohrleitungen mit einem Durchmesser von 300 bis 1.200mm vorhanden. Seit dem Jahr 1945 traten 366 Schäden aller Art auf, alle Schäden vor dem Jahr 1945 wurden nicht erfasst. Bei den Reparaturen der Schäden wurde jeweils ein Schadensdatenblatt mit der Feststellung der Schadensart und weiteren Informationen erstellt. Unter anderem wurde die Rohrleitung begutachtet und auf ihren Gesamtzustand hin überprüft.

Die genaue Anzahl einer jeden Schadensart ist in Tabelle 2 festgehalten. Leider wurde ein Großteil der Schäden in den Schadensdatenblättern nicht mit dem Wortlaut der Schadensart sondern mit „unbekannt“ beschrieben oder es wurde nicht auf die Schadensart eingegangen. Das Ergebnis dieser Aufzeichnung ist, dass rund zwei Drittel aller Schäden mit unbekannter Schadensart in der Datenbank verzeichnet sind. Außerdem liegt ein großer Teil an undichten Verbindungen vor. Löcher aufgrund von Korrosion, Risse bzw. Brüche stellen in der Datenbank untergeordnete Gruppen der Schadensart dar.

13 Schäden wurden laut Aufzeichnungen durch Fremdverschulden, also Beschädigungen vor allem durch angrenzende Bauarbeiten, verursacht. Diese Art des Leitungsschadens hat allerdings keine alterungsbedingten oder betriebstechnischen Ursachen und wird daher für die weitere Betrachtung und Berechnung ausgeschieden. Nach Abzug der Schäden durch Fremdverschulden bleiben 353 Schäden für die Berechnung erhalten.

Längsriss	Loch	Scherbenbruch	unbekannt	undichte Verbindung	Fremdbeschädigung
1	16	14	239	83	13

Tabelle 2: Anzahl der Schäden nach Schadensart

Tabelle 2 zeigt die Schwierigkeiten für eine Berechnung des Failure Risk Index nach den einzelnen Schadensarten bereits deutlich auf. In 239 Fällen konnte nicht festgestellt werden bzw. wurde nicht aufgezeichnet welche Schadensart vorlag.

Durch die geringe Anzahl von Schäden der anderen Schadensarten kann keine FRI Berechnung nach der Schadensart durchgeführt werden. Die geringe Anzahl von Schäden würde eine auf statistischen Werten beruhende Analyse wenig aussagekräftig machen.

Der Failure Risk Index wird daher für das Haupt- und Zubringerleitungsnetzwerk A als globale Kennzahl über alle Leitungen und Schadensarten, aber unterteilt nach den vorliegenden Materialien, berechnet.

5.2 Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit

Wie bereits erwähnt setzt sich die Schadenswahrscheinlichkeit aus den beiden Unterindizes Rohrleitungsparameter und Umgebungsparameter zusammen.

Im Unterindex *Rohrleitungsparameter* sind sechs Indikatoren, welche die Leitung und deren Eigenschaften beschreiben, vorhanden.

Die zehn Indikatoren des Unterindex *Umgebungsparameter* bilden den Standort, an dem der Leitungsabschnitt verlegt wurde ab und stellt das Umfeld und die möglichen Belastungen aus diesem Bereich dar.

		Indikator	Punkte
Schadenswahrscheinlichkeit	Rohrleitungsparameter	Material	1 - 5
		Dimension	1 - 5
		Verlegejahr	1 - 5
		Anzahl Vorschäden	0 - 5
		Verbindungsart	1 - 5
		Herstellungsart	1 - 5
	Umgebungsparameter	Ziegelauflager	0 - 5
		Druckzone	1 - 5
		Versorgungsleitung/km	0 - 5
		Anschlussleitung/km	0 - 5
		Gasleitung/km	0 - 5
		Kanalstrang/km	0 - 5
		Bäume/km	0 - 5
		Hauptverkehrsstraßen/km	0 - 5
Straßenbahn/km	0 - 5		
Straßenbahn korr. Wirkung	0 - 5		

Tabelle 3: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit

Die in Tabelle 3 dargestellten Indikatoren werden nachfolgend beschrieben und ihre SR und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

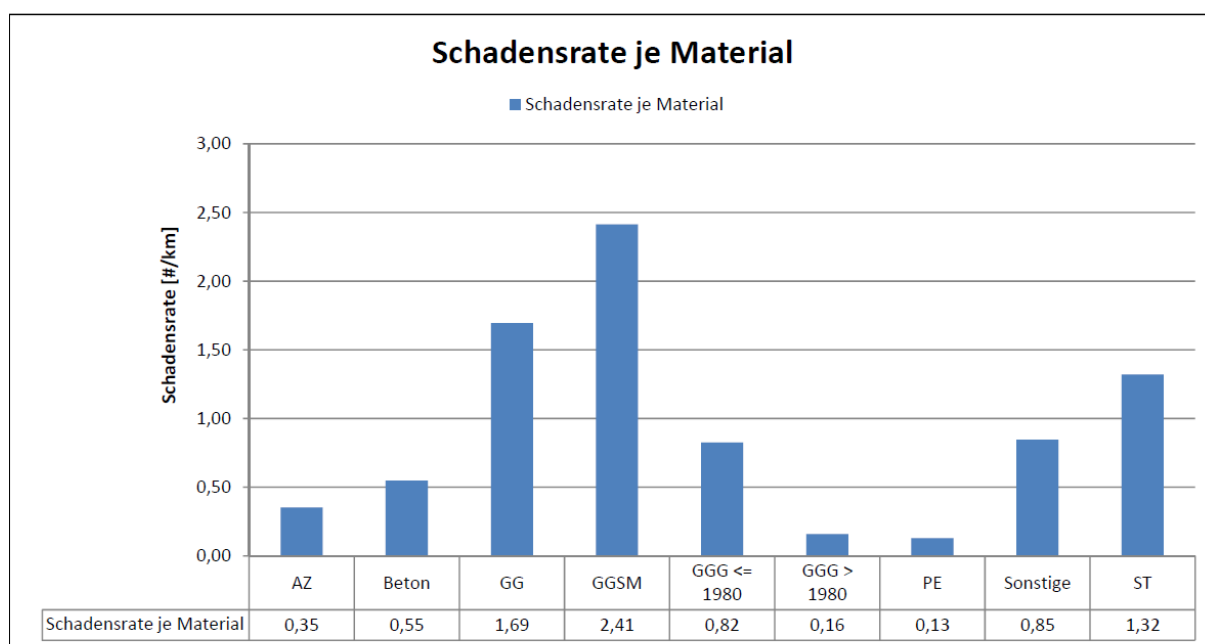
5.2.1 Rohrmaterial

Jedes Rohrmaterial ist auf die verschiedenen Schadensarten unterschiedlich anfällig. So haben die metallischen Leitungen vor allem mit Korrosionslöchern zu kämpfen. Allen Leitungen gemein ist aber die Anfälligkeit auf undichte Verbindungen.

Durch die große Anzahl an nicht bekannten Schadensarten lassen sich genauere Auswertungen über das Material jedoch nicht erzielen und es wurde bei der Berechnung nicht weiter in Schadensarten unterschieden, sondern nur der Schaden an sich gezählt.

Die höchste Schadensrate des Materials tritt bei Graugussleitungen in Verbindung mit Schraubmuffen (GGSM) auf.

Da alle Leitungen einem Material zugeordnet werden können, reicht die Punkteverteilung von eins bis fünf.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,41	0,48	0,96	1,45	1,93	1,93

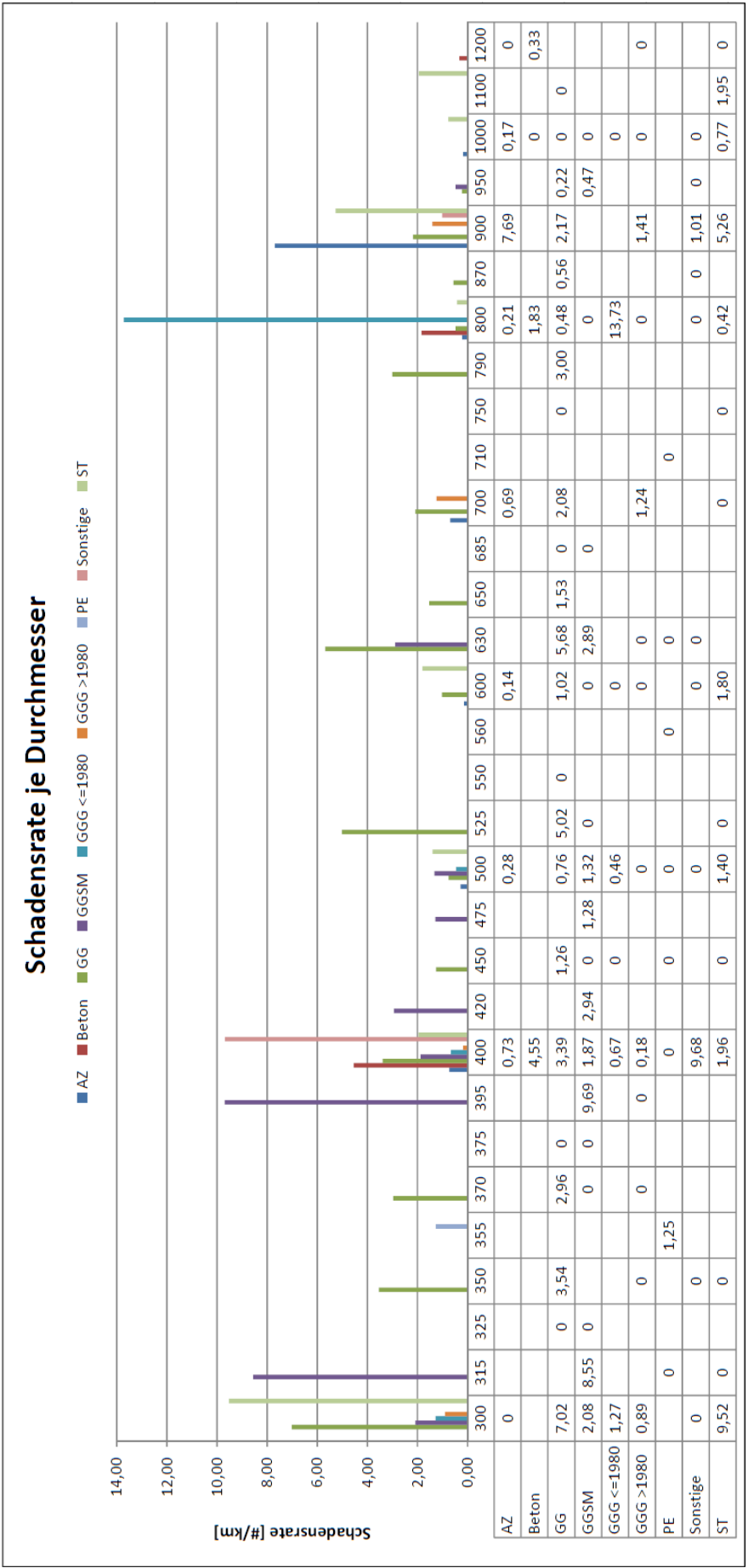
Tabelle 4: Schadensraten nach den Materialien und die Punkteverteilung

5.2.2 Durchmesser

Im Haupt- und Zubringerleitungsnetz A sind Rohre mit einem Durchmesser von 300 mm bis zu 1.200mm verlegt. Dabei ist nicht jeder Durchmesser auch in jedem Material vorhanden, weshalb die Gruppen (DN) des Indikators nochmals in die Materialien unterteilt wurden.

Leitungen mit einem Durchmesser von 400, 500, 600, 800 und 1.000 mm sind die am häufigsten verwendenden. Sie wurden auch in den meisten Materialien verlegt. Die meisten Schäden, bezogen auf einen Kilometer Länge, treten bei Duktigussleitungen, mit einem Durchmesser von 800 mm auf.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert	13,73	3,43	6,87	10,30	10,30

Tabelle 5: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung

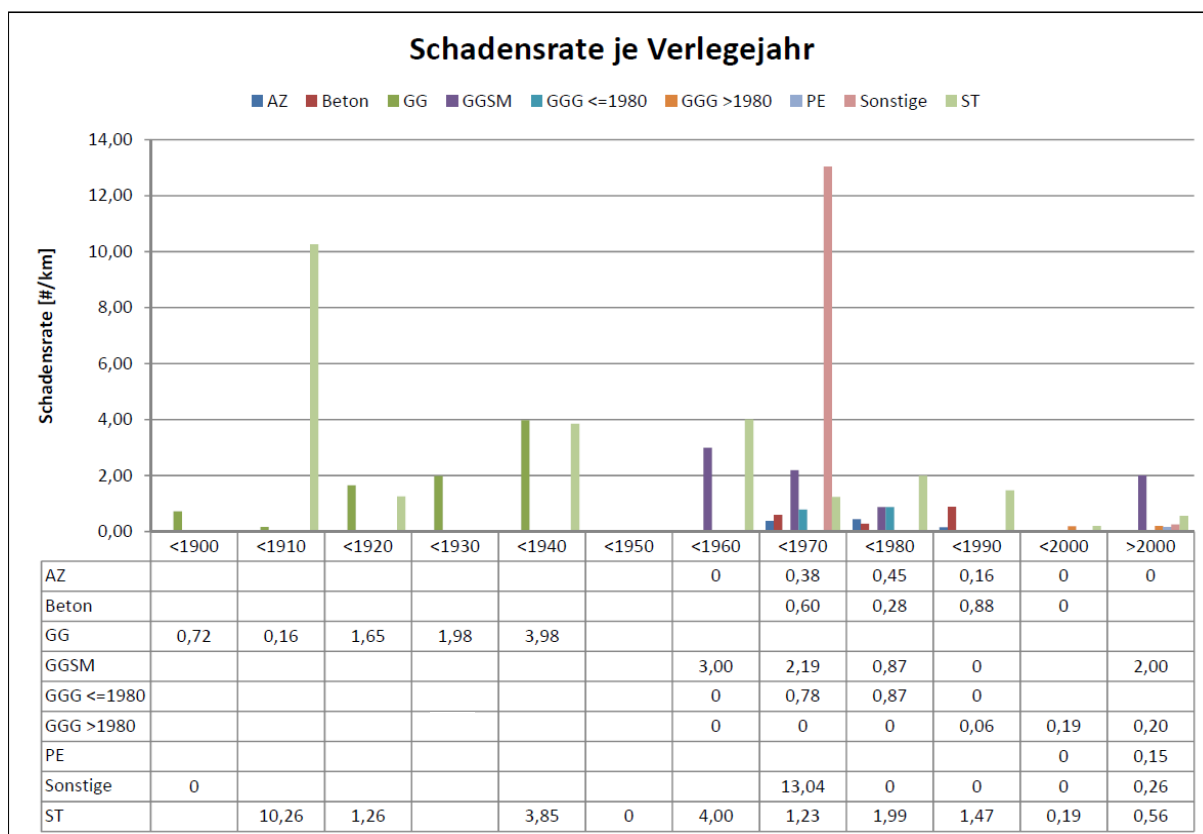
5.2.3 Verlegejahr

Die ersten Leitungen wurden bereits im Jahr 1895 verlegt. Bis in die 1960er Jahre waren es fast ausschließlich Grauguss- und Stahlleitungen.

Die höchsten SR haben Leitungen aus Sonstigen Materialien und einem Verlegejahr zwischen 1960 und 1969. Dies könnte ein Indiz für eine schlechte Verlegequalität in dieser Zeit sein.

Für die einfachere Handhabung wurden die Gruppen in Zehnjahres-Abschnitte zusammengefasst. Dabei fallen beispielsweise in die Gruppe < 1970 alle Leitungen, die in den Jahren 1960 bis 1969 verlegt wurden.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
max Wert	vorhanden	<	<	<	≥
	kein Schaden	3,26	6,52	9,78	9,78

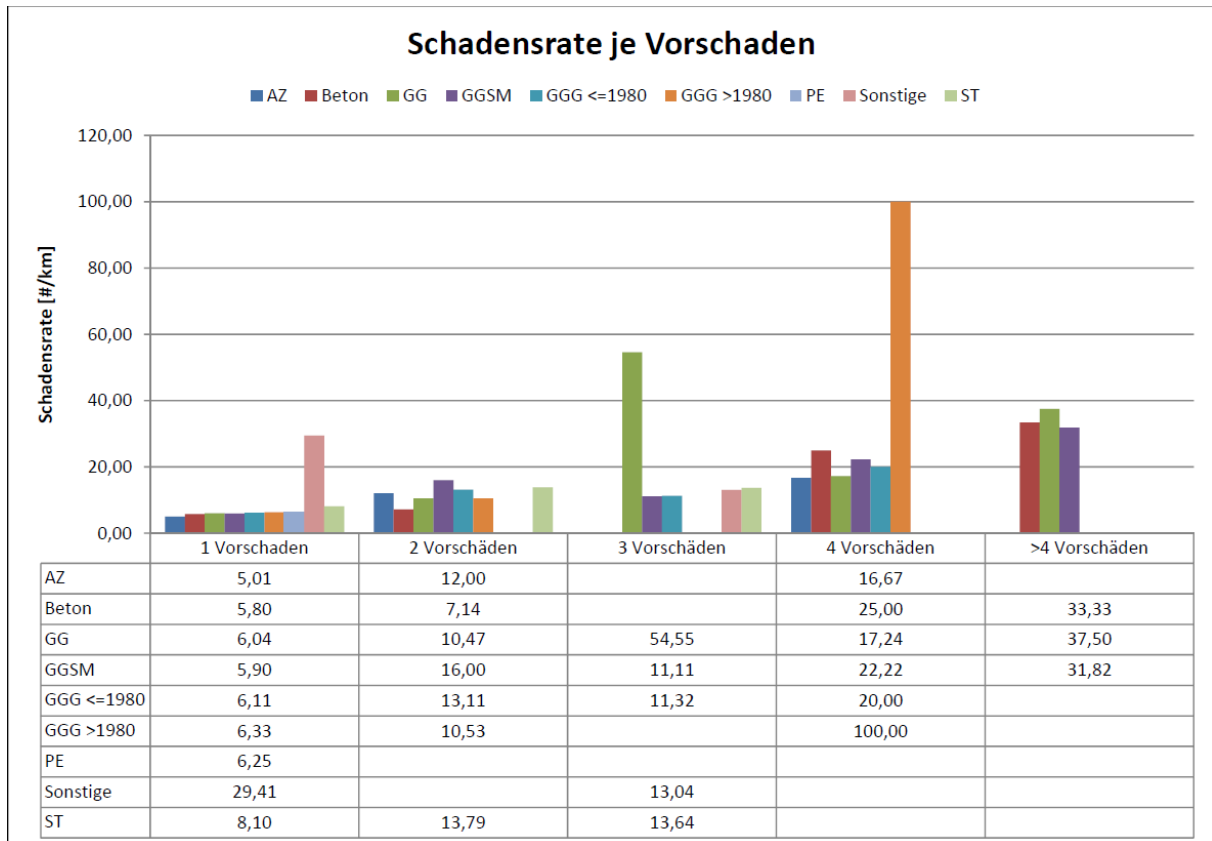
Tabelle 6: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung

5.2.4 Vorschäden

Wie bereits in *Kapitel 2.5 – Räumliche und zeitliche Häufung von Schadensfällen* beschrieben, treten nach einem Initialschaden oft im unmittelbaren Umfeld weitere Schäden auf. Die betrachteten Schadensfälle in der Tabelle zeigen Vorschäden auf dem gleichen Leitungsabschnitt.

Durch die kurzen Leitungsabschnitte bekommen die Schadensraten bei den Vorschäden hohe Werte. Die Punkteverteilung für diesen Indikator wird mit null Punkten für Leitungen ohne Schaden und mit fünf Punkten für Leitungen mit einem oder mehreren Schäden festgesetzt. Durch die hohen Schadensraten geht dieser Indikator als Schwergewicht in die Berechnung des FRI mit ein und bildet damit die Gefahr von Schadensanhäufungen bzw. den optimalen Erneuerungszeitpunkt nach bereits einem oder wenigen Schäden ab.

Die hohe Schadensrate von 100 wurde auf einem Leitungsabschnitt aus Duktilguss >1980 mit vier Vorschäden ermittelt. Dieses Material hat im gesamten Netz nur wenige Schäden, womit diese Schadensrate auf einem Abschnitt als negativer Extremwert betrachtet werden kann. In verschiedenen Untersuchungen werden „Ausreißer“ von den Ergebnissen aussortiert, für die vorliegende Berechnung wurden aber die tatsächlich vorhandenen Maximalwerte herangezogen.



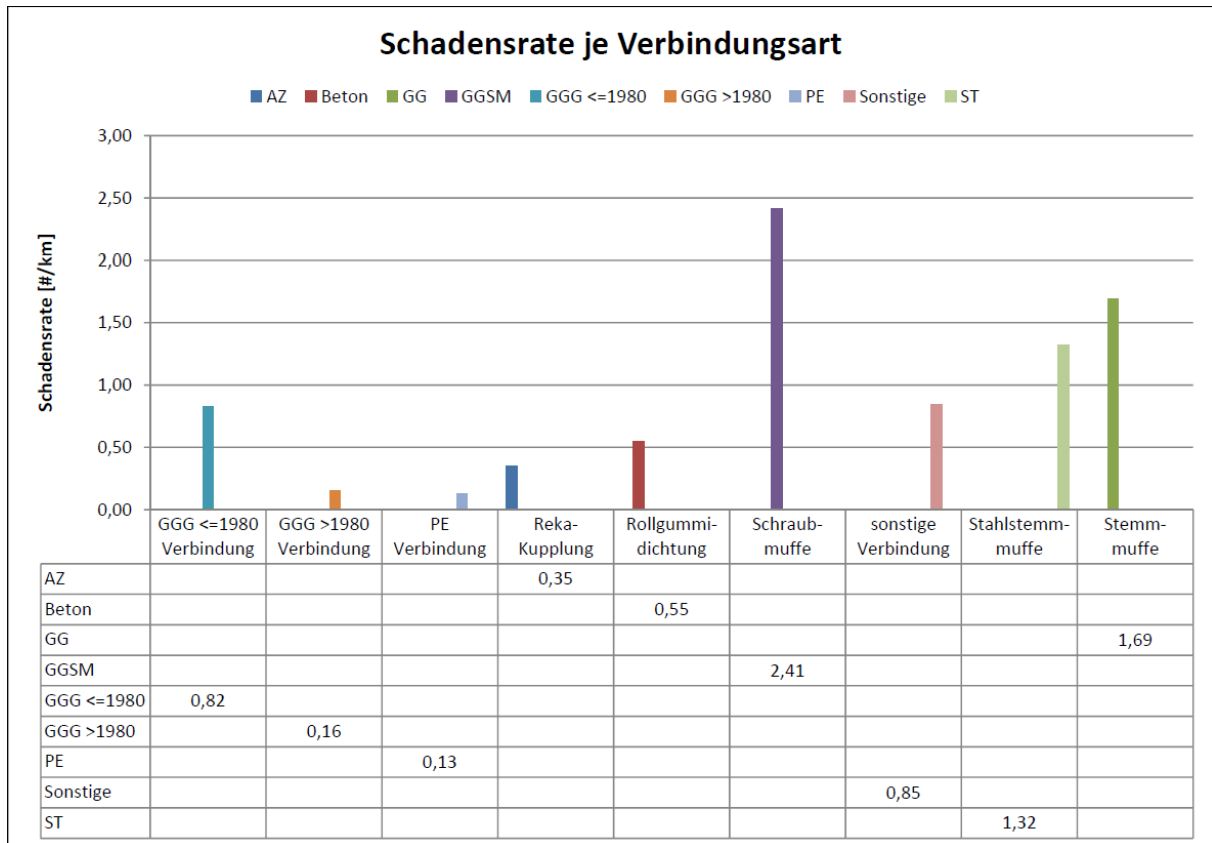
Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 100,00	20,00	40,00	60,00	80,00	80,00

Tabelle 7: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung

5.2.5 Verbindungsart

In den Aufzeichnungen des Netzes A wurden leider keine Verbindungsarten festgehalten. Um trotzdem einen Indikator für die Verbindungen darstellen zu können, wurde jedem Material eine dementsprechende Verbindungsart zugewiesen.

Da alle Leitungen einer Verbindungsart zugeordnet werden können reicht die Punkteverteilung von eins bis fünf.



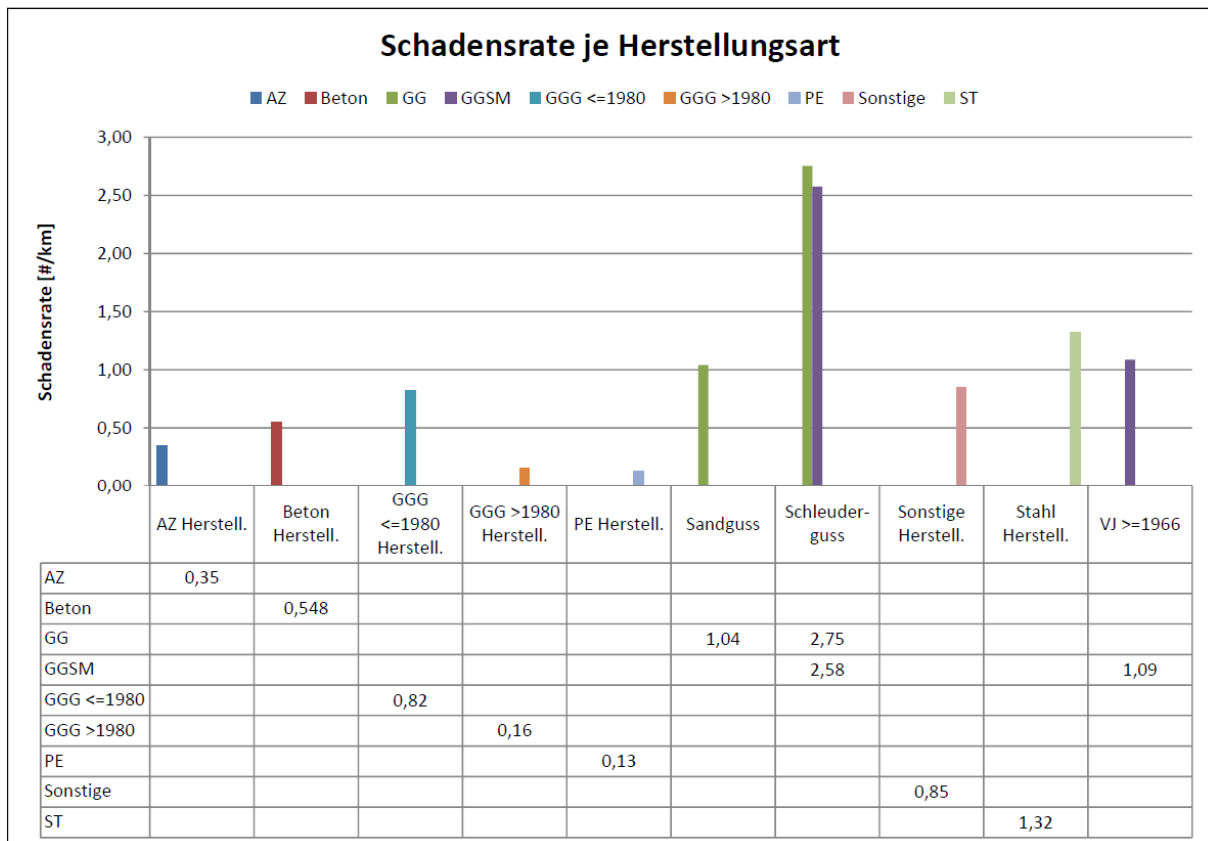
Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,41	0,48	0,96	1,45	1,93	1,93

Tabelle 8: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung

5.2.6 Herstellungsart

Ähnlich wie bei der Verbindungsart wurde auch für die Herstellungsart nach den verschiedenen Materialien unterschieden. Lediglich Rohre aus Grauguss wurden mittels zwei Verfahren – Schleuderguss und Sandguss - hergestellt und auch in den Aufzeichnungen festgehalten.

Da alle Leitungen einer Herstellungsart zugeordnet werden können reicht die Punkteverteilung von eins bis fünf.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,75	0,55	1,10	1,65	2,20	2,20

Tabelle 9: Schadensraten nach den Herstellungsarten und die Punkteverteilung

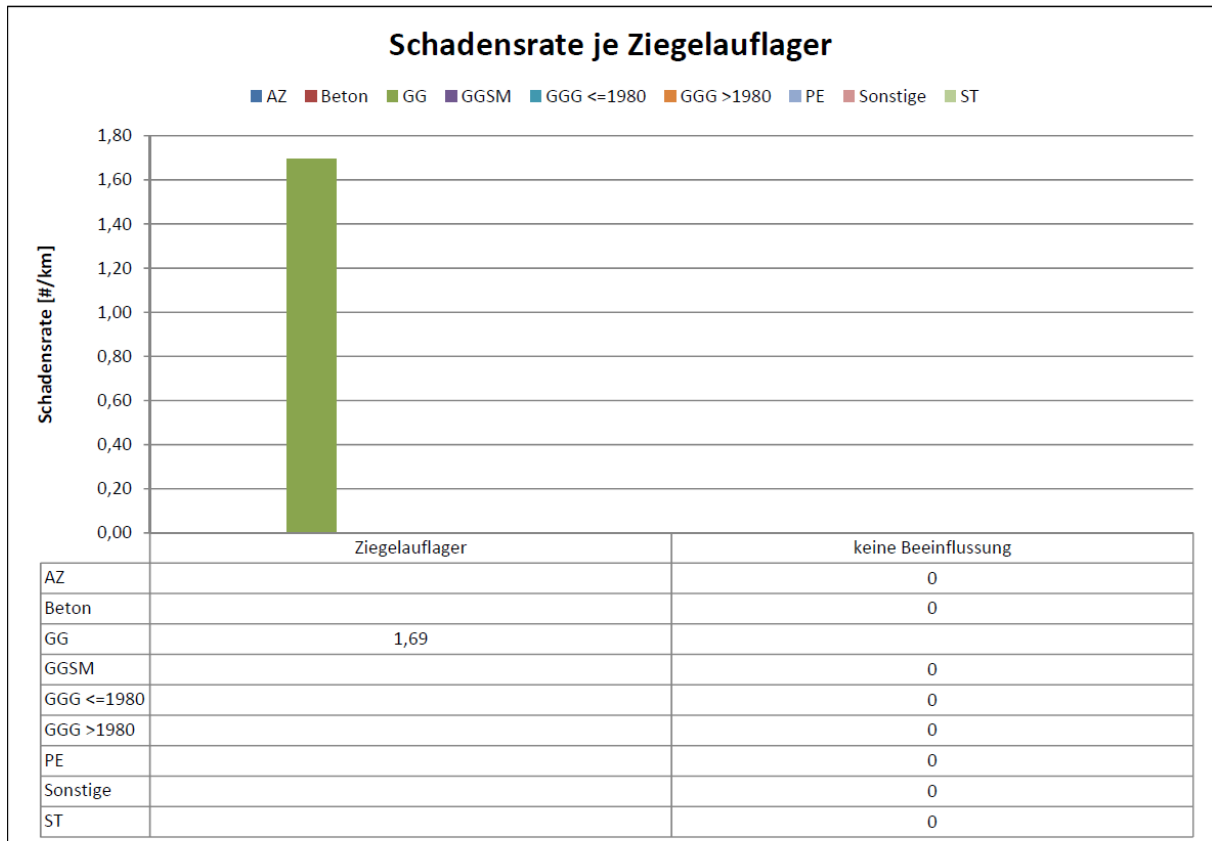
5.2.7 Ziegelaufleger

Bis ins Jahr 1936 wurden Graugussrohre im Bereich der Verbindungen auf Ziegelauflegern aufgelegt und danach hinterfüllt. Heute ergeben sich dadurch einige Probleme.

Aus statischer Sicht bildet das Rohr einen Einfeldträger aus, wobei die Ziegel die Auflager bilden. Dadurch treten Biegespannungen in den Rohren auf, die zu Rund- oder Längsrissen führen können.

Zweites kommt es im Bereich der Berührungspunkte Rohr zu Ziegel zu erhöhter Korrosionsbildung.

Alle Leitungsabschnitte, welche auf Ziegelauflegern ruhen, werden daher in der Berechnung mit fünf Punkten versehen. Bei allen anderen Einträgen findet durch diesen Indikator keine Beeinflussung statt, daher werden null Punkte vergeben.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 1,69	0,34	0,68	1,01	1,35	1,35

Tabelle 10: Schadensraten nach den Ziegelauflägern und die Punkteverteilung

5.2.8 Druckzone

Die Druckzonen werden durch einen Farbnamen und eine dazu gehörige römische Ziffer beschrieben. Dabei sind die Zonen in Einheiten gleicher Eigenschaften unterteilt. Die genauen Druckverhältnisse sind jedoch nicht bekannt.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.

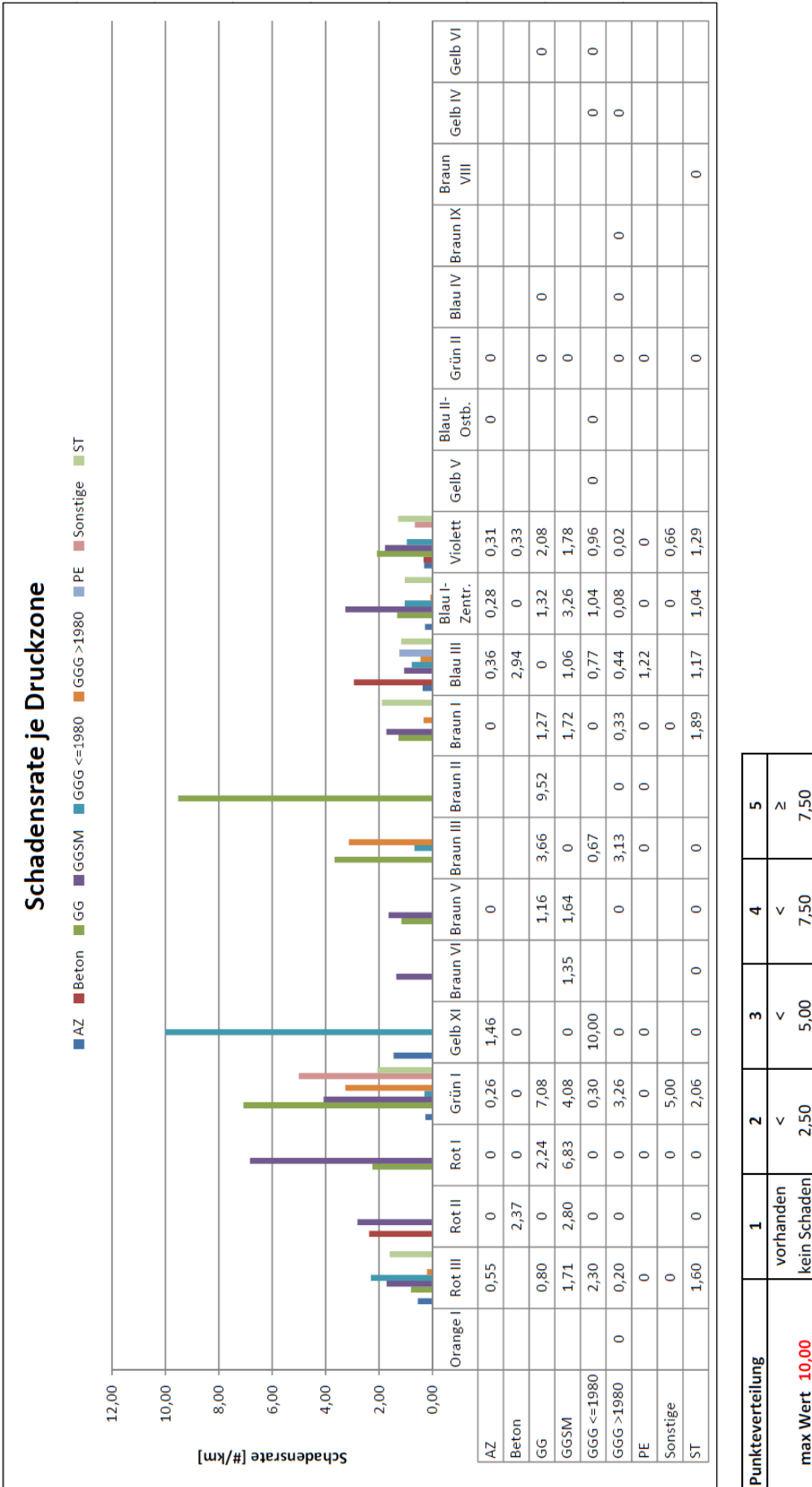
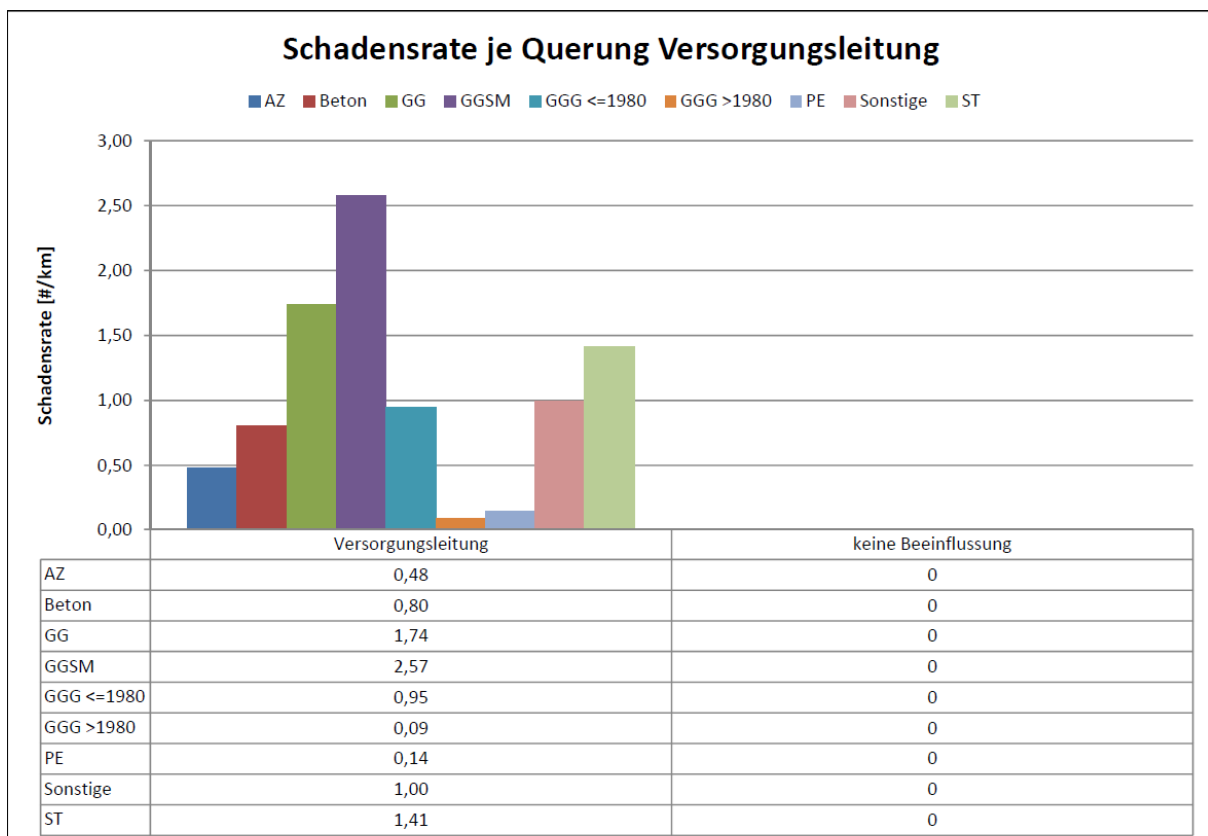


Tabelle 11: Schadensraten nach den Druckzonen und die Punkteverteilung

5.2.9 Versorgungsleitungen

Querungen von Versorgungsleitungen können für Haupt- und Zubringerleitungen zu veränderlichen Bettungszuständen z.B. durch Grabungsarbeiten oder Wasseraustritt führen, wodurch es zu Setzungen und damit zu Spannungen in den Rohren kommen kann.

Abschnitte, bei denen Querungen auftreten, werden je nach Schadensrate mit einem bis fünf Punkte belastet. Bei Abschnitten ohne Querung tritt keine Beeinflussung auf, daher werden null Punkte vergeben.



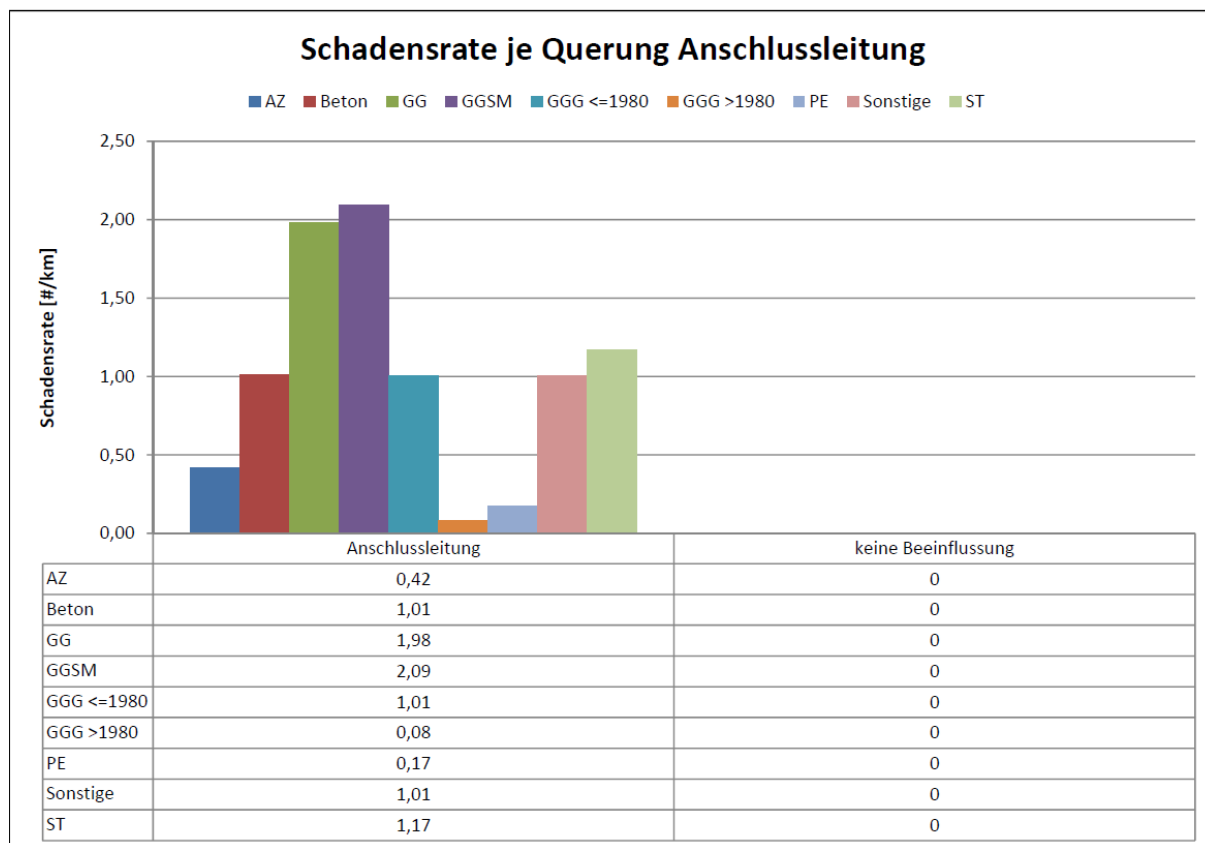
Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,57	0,51	1,03	1,54	2,06	2,06

Tabelle 12: Schadensraten nach der Belastung durch Versorgungsleitungen und die Punkteverteilung

5.2.10 Anschlussleitungen

Wie auch bei den Versorgungsleitungen können auch Querungen von Anschlussleitungen für Haupt- und Zubringerleitungen zu veränderlichen Bettungszuständen z.B. durch Grabungsarbeiten oder Wasseraustritt führen, wodurch es zu Setzungen und damit zu Spannungen in den Rohren kommen kann.

Abschnitte, bei denen Querungen auftreten, werden je nach Schadensrate mit einem bis fünf Punkten belastet. Bei Abschnitten ohne Querung tritt keine Beeinflussung auf, deshalb werden null Punkte vergeben.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,09	0,42	0,84	1,25	1,67	1,67

Tabelle 13: Schadensraten nach der Belastung durch Anschlussleitungen und die Punkteverteilung

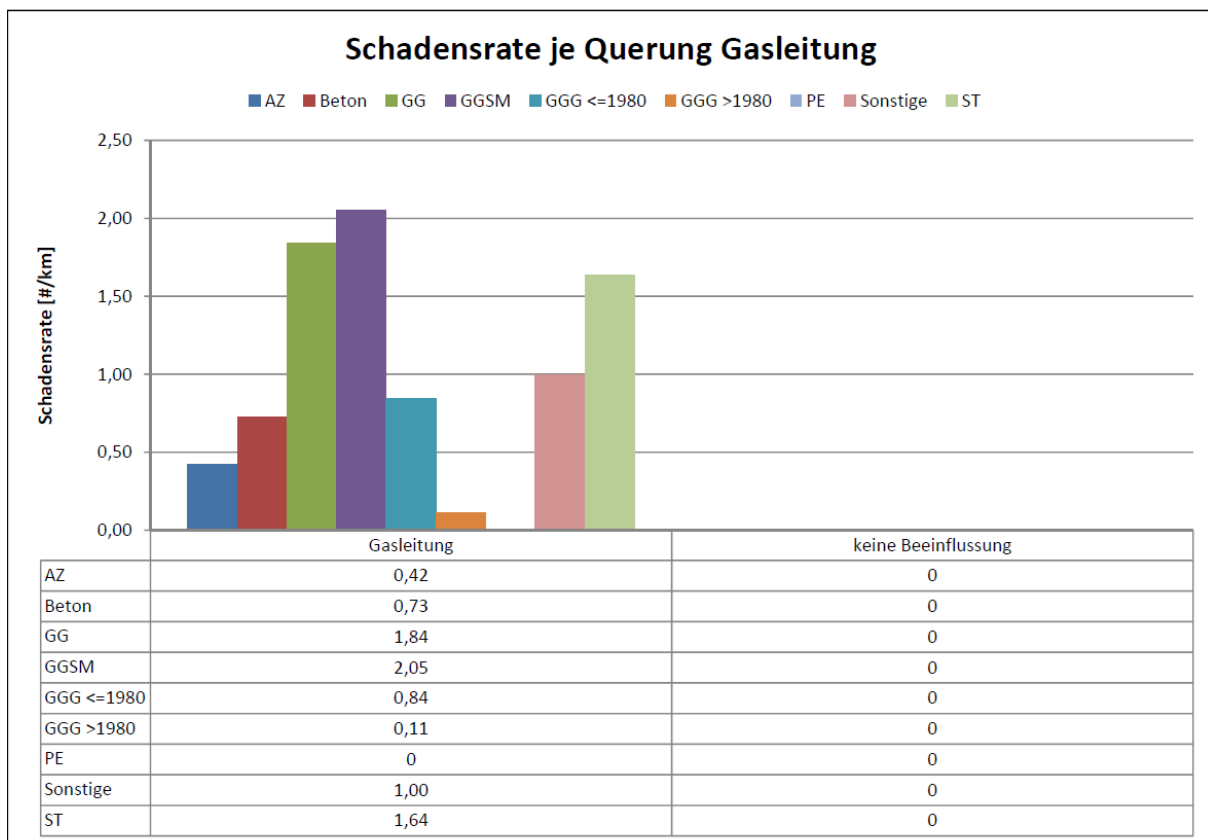
5.2.11 Gasleitungen

Gasleitungen haben neben den Bettungsproblemen aufgrund von Grabungsarbeiten und den dadurch auftretenden Setzungen einen weiteren Konfliktbereich. Gasleitungen aus Metall haben meist einen kathodischen Korrosionsschutz. Dabei wird an der Gasleitung eine Spannung angelegt – im Regelfall zwei Volt Gleichstrom. Treten Beschädigungen an der Beschichtung des Gasrohres auf, kann eine nahe gelegen Wasserleitung aus Metall als Opferanode dienen. Dadurch können Korrosionslöcher entstehen.

Da beim Haupt- und Zubringerleitungsnetz A dieser kathodische Schutz von Gasleitungen nicht angeführt wurde, kann kein eigener Indikator dafür erstellt werden. Die Problematik des kathodischen Schutzes soll an dieser Stelle lediglich angeführt werden.

Für die Berechnung wurden nur die Schadensraten aufgrund von Leitungsquerungen erhoben. Graugussleitungen mit Schraubmuffen haben mit 2,05 am meisten Schadensfälle im Bereich von querenden Gasleitungen.

Leistungsabschnitte, die nicht in der Nähe von Gasleitungen liegen, haben durch diese auch keine Beeinflussung zu befürchten, darum werden hier null Punkte vergeben. Bei allen Abschnitten in der Nähe von Gasleitungen (mit Ausnahme der PE Leitungen) wurden je nach Schadensrate zwei bis fünf Punkte für die Kalkulation vergeben. PE-Rohre befinden sich zwar in der Nähe von Gasleitungen, jedoch trat noch kein Schaden auf. Daher bekommen diese Leitungen einen Punkt.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,05	0,41	0,82	1,23	1,64	1,64

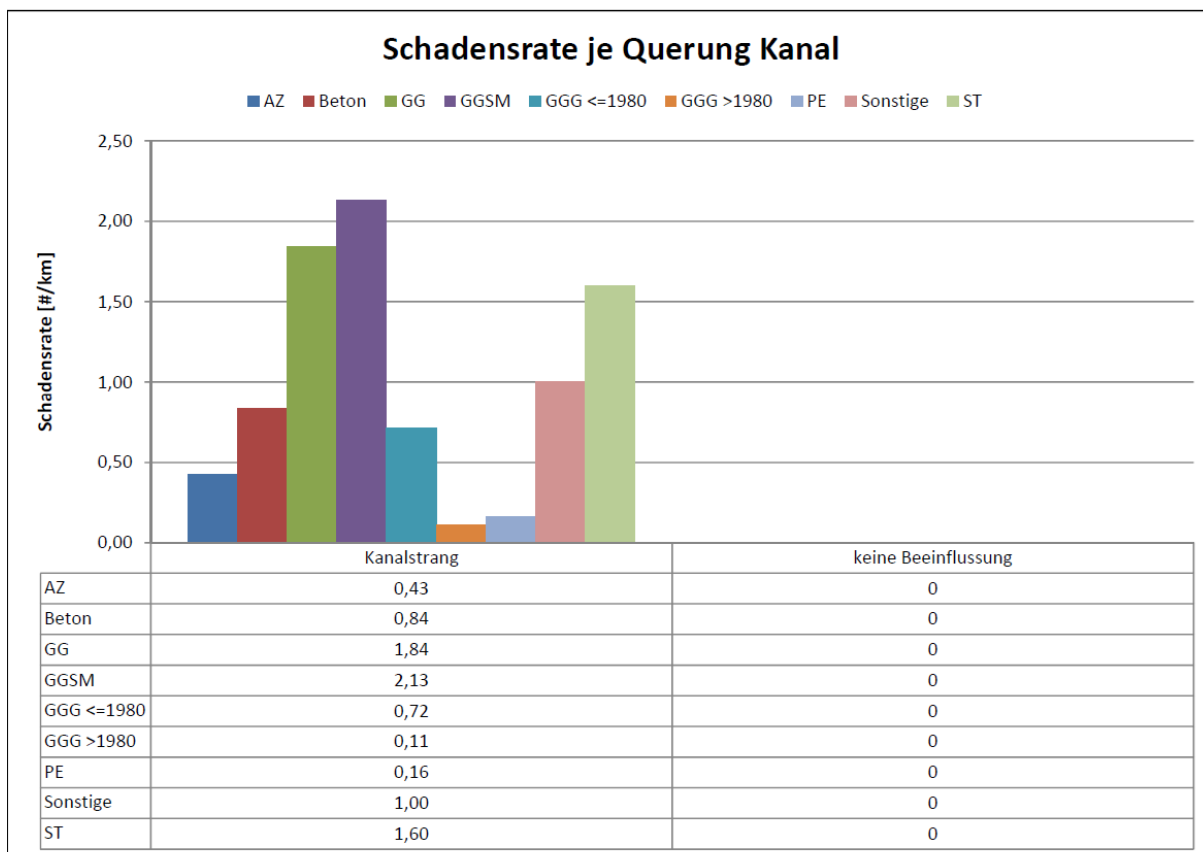
Tabelle 14: Schadensraten nach der Belastung durch Gasleitungen und die Punkteverteilung

5.2.12 Kanal

Bei undichten Kanälen führt ein Wasseraustritt oft nicht zu schwerwiegenden Problemen, da das Wasser ohne Druck aus der Leitung aussickert. Durch die Größe der Kanäle, es sind Durchmesser bis zu 7,50 Meter im vorhandenen Datensatz zu finden, und möglichen Grabungsarbeiten ergeben sich Heterogenitäten für die Bettung der Haupt- und Zubringerleitungen. Diese können zu ungleichmäßigen Setzungen

führen. Die dadurch entstehenden Spannungen führen bei Überbeanspruchung der Leitungen zu Brüchen und Rissen.

Da bei allen Materialien Querungen von Kanalsträngen auftreten, werden die Punkte von eins bis fünf vergeben. Abschnitte ohne Beeinflussung durch Kanäle erhalten keinen Punkt.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,13	0,43	0,85	1,28	1,70	1,70

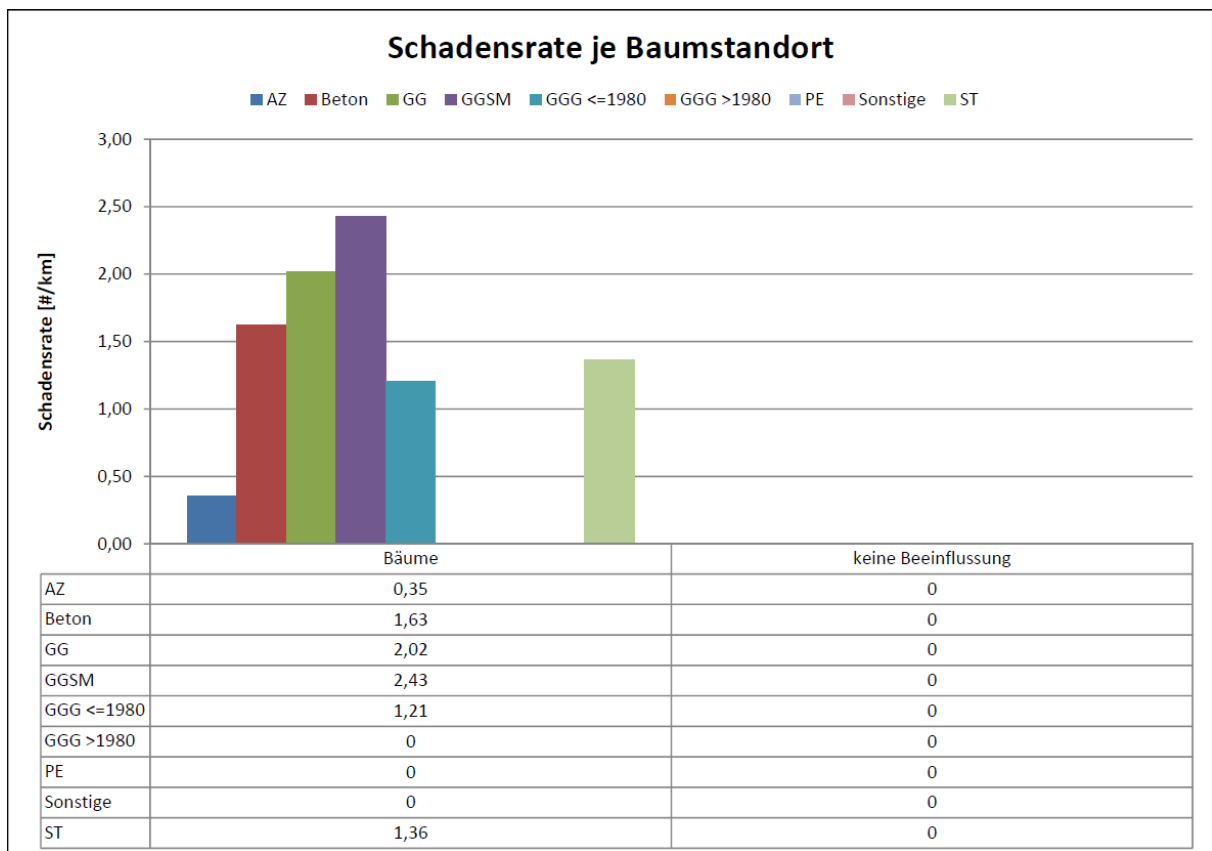
Tabelle 15: Schadensraten nach der Belastung durch Kanäle und die Punkteverteilung

5.2.13 Baumstandorte

Pflanzen, vor allem tiefwurzelnende Bäume, können mit ihren Wurzeln Beschädigungen an Leitungen verursachen. Bei Kanälen ist dieses Phänomen bereits ausreichend dokumentiert, aber auch bei Trinkwasserleitungen sind Schäden durch Pflanzenwurzeln bekannt.

Leistungsabschnitte aus Duktulguss > 1980, Polyethylen und Sonstigen Materialien weisen noch keine Beschädigungen in der Nähe von Bäumen auf. Da Leitungen unter Bäumen verlegt wurden, erhalten diese Abschnitte einen Punkt für die FRI Berechnung. Bei allen anderen Materialien werden die Punkte zwei bis fünf, nach Ab-

hängigkeit der Schadensrate, vergeben. Leitungen ohne Beeinflussung von Bäumen werden mit null Punkten bewertet.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,43	0,49	0,97	1,46	1,94	1,94

Tabelle 16: Schadensraten nach der Belastung durch Bäume und die Punkteverteilung

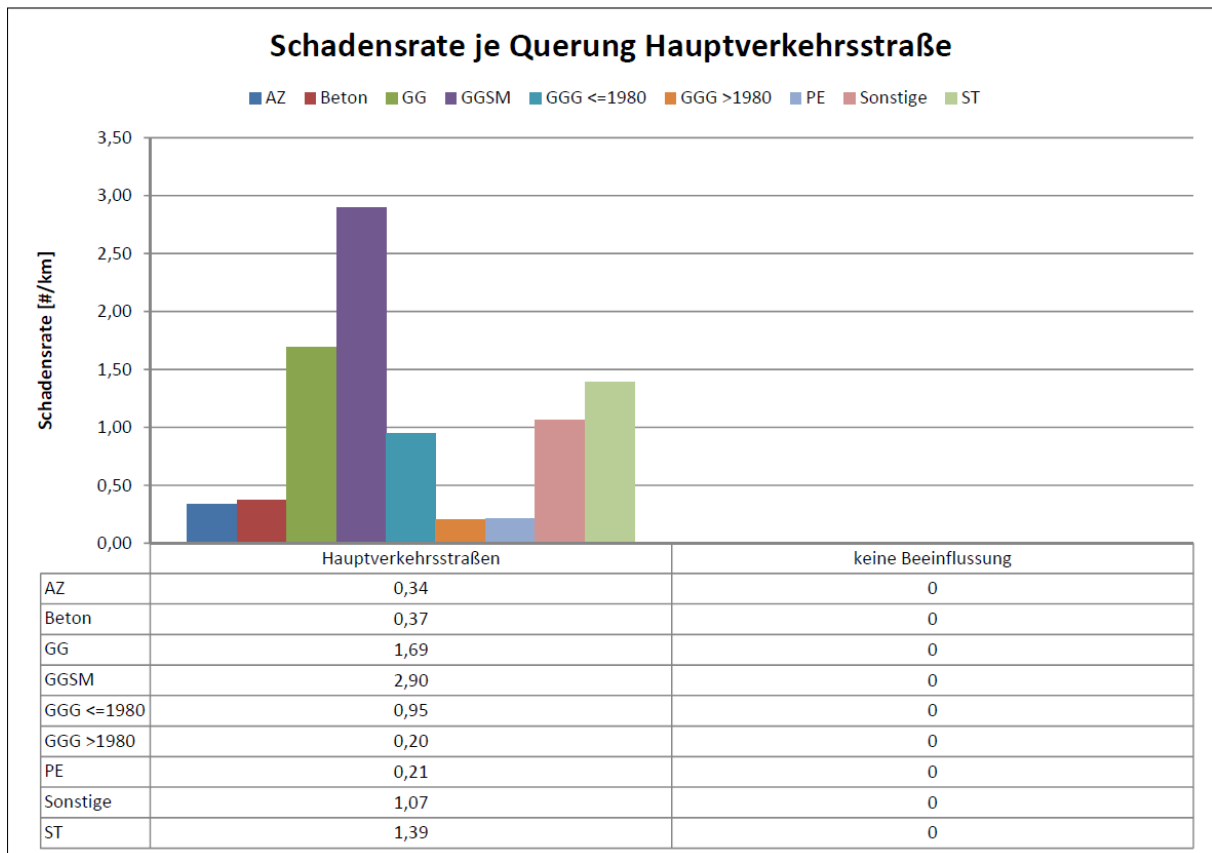
5.2.14 Hauptverkehrsstraßen

Wie bei verschiedenen Untersuchungen bereits festgestellt wurde (*Friedl, 2007; et al.*), kann der Straßenverkehr durch hohe dynamische Lasten zu Leitungsschäden beitragen. Vor allem der Schwerverkehr hat ähnliche Wirkungen wie Straßenwalzen. Der Untergrund wird verdichtet und kann punktuell zu großen Auflasten auf den Rohrleitungen führen. Die Folge können Brüche oder Risse an den Leitungen sein.

Die höchsten Schadensraten unter Hauptverkehrsstraßen treten bei Graugussleitungen mit Schraubmuffe auf.

Leitungen, die nicht unter einer Straße verlegt wurden, erhalten für die Berechnung einen Punktwert von „Null“. Abschnitte, die zwar unter einer Straße verlegt sind, jedoch noch keinen Schaden erlitten haben, erhalten einen Punkt. Alle anderen Lei-

tungsabschnitte werden je nach ihrer Schadensrate mit zwei bis fünf Punkten gezählt.



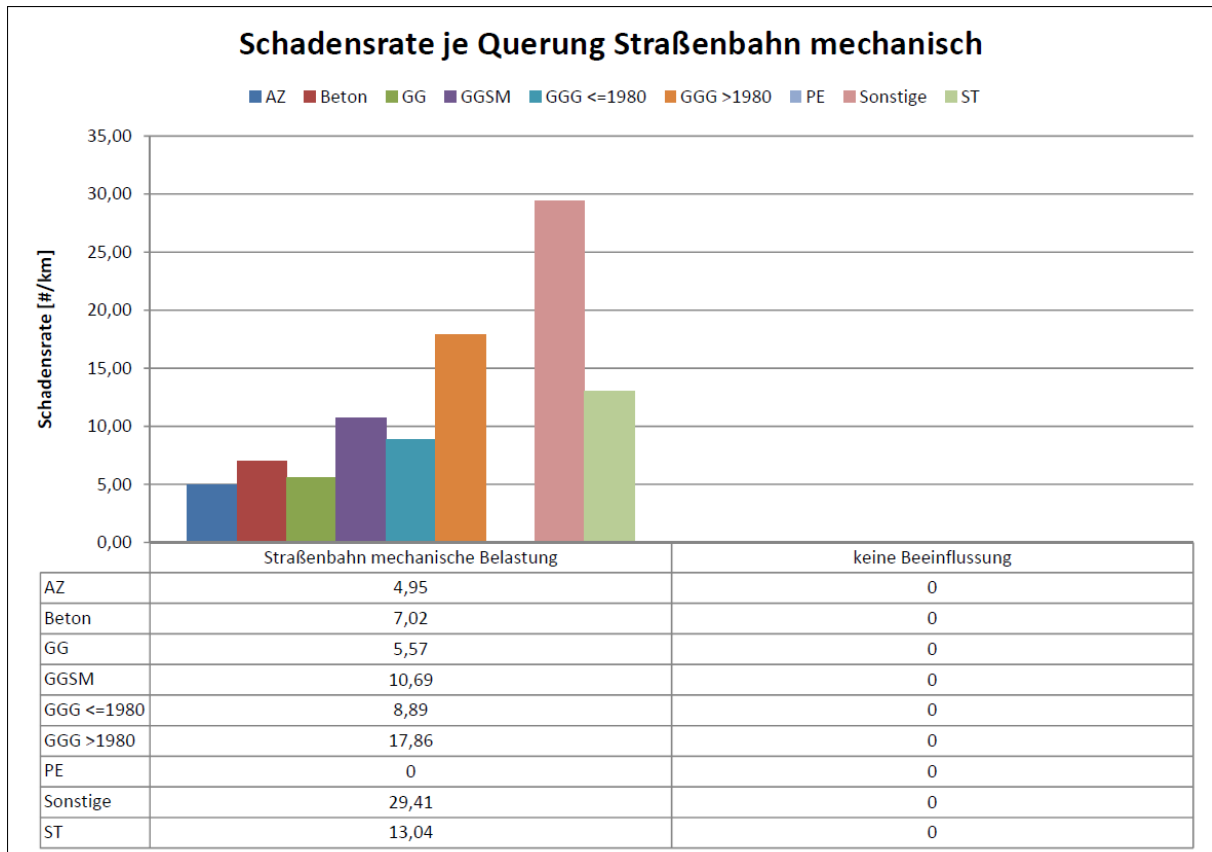
Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,90	0,58	1,16	1,74	2,32	2,32

Tabelle 17: Schadensraten nach der Belastung durch Hauptverkehrsstraßen und die Punkteverteilung

5.2.15 Straßenbahn mechanisch

Die dynamischen Auflasten der Straßenbahnen führen, wie beim Straßenverkehr auch, zu Verdichtungen und Setzungen im Untergrund (in Anlehnung an *Friedl, 2007*).

Außer Polyethylen Leitungen haben alle Materialien bereits Schäden unter Straßenbahntrassen erlitten. Deshalb bekommen Abschnitte aus PE einen Punkt. Leitungen, die nicht unter Straßenbahnen verlegt sind, erhalten null Punkte. Leitungen bei Straßenbahngleisen aller anderen Materialien bekommen nach ihrer Schadensrate die Punkte zwei bis fünf zugewiesen.



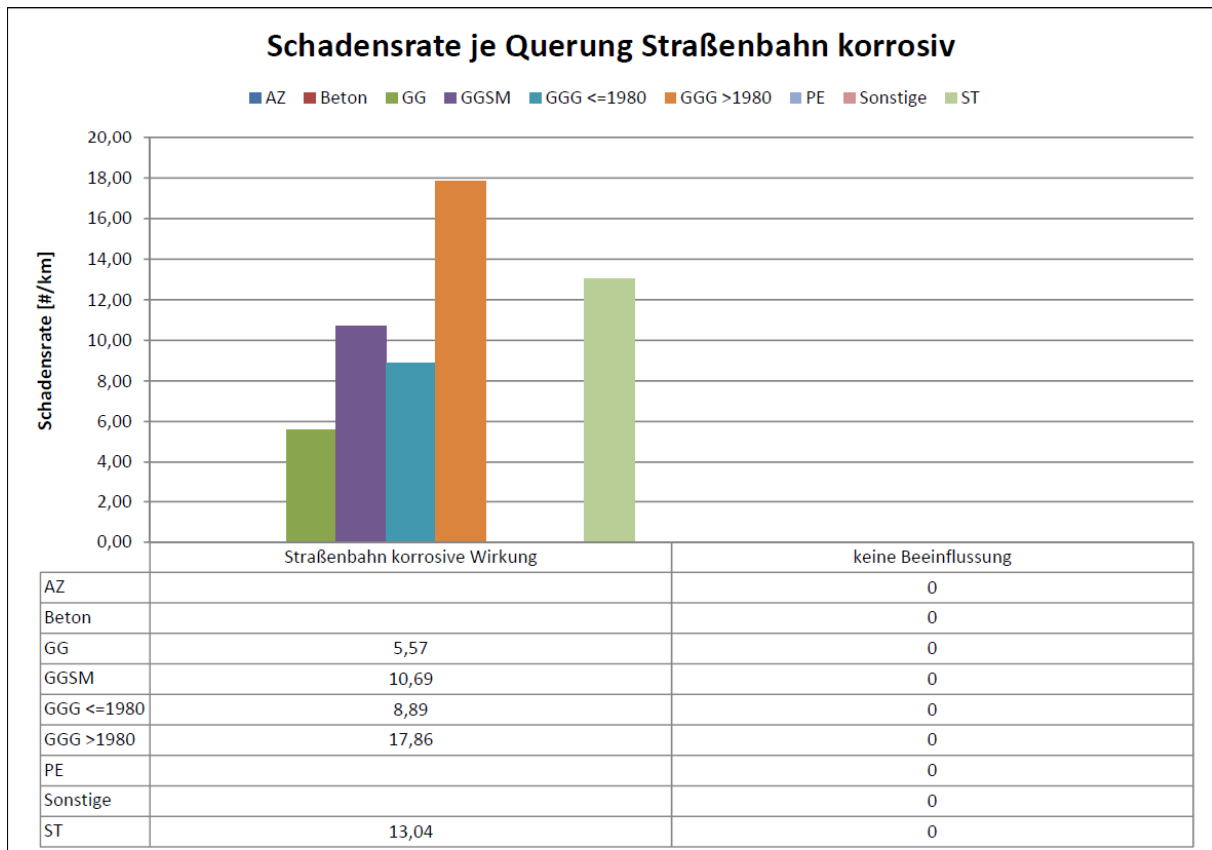
Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 29,41	5,88	11,76	17,65	23,53	23,53

Tabelle 18: Schadensraten nach der mechanischen Belastung durch Straßenbahnen und die Punkteverteilung

5.2.16 Straßenbahn korrosiv

Streuströme aus dem Gleiskörper der Straßenbahn können, wie bei den Gasleitungen, zu korrosiven Beanspruchungen der Trinkwasserleitungen aus Metall führen.

Leistungen aus Asbestzement, Beton, PE und Sonstigen Materialien wurden ebenso wie Abschnitte außerhalb des Einflussbereiches der Streuströme der Straßenbahn mit null Punkten in die Berechnung einbezogen. Die korrosionsanfälligen Rohrleitungen erhalten je nach Schadensrate einen bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 17,86	3,57	7,14	10,72	14,29	14,29

Tabelle 19: Schadensraten nach der korrosiven Belastung durch Straßenbahnen und die Punkteverteilung

5.3 Indikatoren Schadensausmaß

Das Schadensausmaß stellt die Konsequenzen bei Schadensauftritten dar. Dabei werden verschiedene Aspekte eines Leitungsschadens berücksichtigt. Zum einen ergeben sich für den Netzbetreiber Erschwernisse und zusätzliche Kosten, die verursacht werden können. Dazu zählen unter anderem die erforderlichen Bauarbeiten, Wasserverluste und die mögliche Installation einer Ersatzwasserversorgung. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang auch der Imageverlust des Unternehmens.

Auf der anderen Seite wird auch die unmittelbare Umgebung einer Schadstelle negativ beeinflusst. Dazu zählen beispielsweise Behinderungen für Passanten, Staubildungen und Verzögerungen auf den Straßen rund um den Schadensort, Schäden bei anderen Leitungsinfrastrukturen oder auch kleinräumige Überschwemmungen mit Schäden an Gebäuden und Fahrzeugen.

Beim Leitungsnetz A konnten elf Indikatoren für das Schadensausmaß bzw. die Konsequenzen definiert werden. Die Gewichtung der Indikatoren erfolgte mittels Experteneinschätzung, wodurch eine subjektive Bewertungsmethode Anwendung fand.

Als bedeutendster Indikator kann hier die Wichtigkeit eines Leitungsabschnittes festgehalten werden. Weiters sind vier Arten von Leitungsträgern angeführt und auch die Straßenbelastung bzw. deren Benutzung findet Berücksichtigung.

	Indikator	Punkte
Schadensausmaß	Wichtigkeit	1 - 5
	Versorgungsleitung/km	0 - 5
	Anschlussleitung/km	0 - 5
	Gasleitung/km	0 - 5
	Kanalstrang/km	0 - 5
	Bäume/km	0 - 5
	Hauptverkehrsstraßen/km	0 - 5
	Straßenbahn/km	0 - 5
	Schadensart	0 - 5
	Belagsart	1 - 5
	Anz. Schieber u. Klappen/km	1 - 5

Tabelle 20: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes

Die in Tabelle 20 dargestellten Indikatoren werden im Folgenden beschrieben und ihre Schadensraten und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

5.3.1 Wichtigkeit

Vom Netzbetreiber wurde der Indikator der Wichtigkeit eingeführt. Dabei erhält jeder Leitungsabschnitt eine Zahl von eins bis fünf. Abschnitte mit der Wichtigkeit von eins stellen die Hauptversorgungsleitungen im Netzwerk dar oder haben in ihrem Bereich keine alternative Leitung als Ausweichstrecke für die Wasserversorgung zur Verfügung. Abschnitte mit einer Wichtigkeit von fünf sind untergeordnete Leitungen ohne wasserabhängige Großabnehmer (Produktionsanlagen) oder können im Notfall auf Umgehungsleitungen zurückgreifen.

Bei der Berechnung wurden diese Wichtigkeitsbewertungen nach dem Schulnotensystem mit Punkten versehen. Leitungen mit einer Bewertung von eins erhielten für die Berechnung einen Punktwert von fünf, da Schäden an diesen Abschnitten besonders schlecht für die Aufrechterhaltung der Wasserversorgung sind.

Wichtigkeit (WVU)	Punkte Wichtigkeit
1	5
2	4
3	3
4	2
5	1

Tabelle 21: Bewertungsgruppen der Wichtigkeit

5.3.2 Querende Leitungsträger

Bei Schäden sind nicht nur die Wasserleitungen selbst betroffen, sondern auch das Erdreich rund um die Schäden und somit auch andere Leitungsträger, die nahe an den Schadstellen verlegt sind. Bei den Fremdleitungen kann es zu Setzungen aufgrund von Bettungsunterspülungen und anschließenden Leitungsbrüchen kommen.

In den Aufzeichnungen für Netzwerk A wurden Versorgungs-, Anschluss- und Gasleitungen sowie Kanalstränge festgehalten. Für die Auswertung wurden diese vier Leitungstypen nach der jeweiligen Anzahl an querenden Leitungen pro Kilometer in je fünf Gruppen unterteilt und mit Punkten versehen. Diese Werte wurden dabei nur für die Auswertung herangezogen und treten in dieser Form im Leitungsnetz nicht auf.

- Versorgungsleitungen pro Kilometer

VL/km	Punkte VL/km
≤200	1
>200-400	2
>400-600	3
>600-800	4
>800	5
keine	0

Tabelle 22: Bewertungsgruppen der Versorgungsleitungen

- Anschlussleitungen pro Kilometer

AL/km	Punkte AL/km
≤20	1
>20-40	2
>40-60	3
>60-80	4
>80	5
keine	0

Tabelle 23: Bewertungsgruppen der Anschlussleitungen

– Gasleitungen pro Kilometer

VL/km	Punkte VL/km
≤20	1
>20-40	2
>40-60	3
>60-80	4
>80	5
keine	0

Tabelle 24: Bewertungsgruppen der Gasleitungen

– Kanalstränge pro Kilometer

Kanal/km	Punkte Kanal/km
≤20	1
>20-40	2
>40-60	3
>60-80	4
>80	5
keine	0

Tabelle 25: Bewertungsgruppen der Kanalstränge

Die große Anzahl von querenden Leitungen ergibt sich aus den teilweise kurzen Leitungsabschnitten der Haupt- und Zubringerleitungen, wodurch sich ein hoher Wert bei der Hochrechnung auf die Länge eines Kilometers ergibt.

Die Größenordnung der Unterteilungen erfolgte nach einer gleichmäßigen Verteilung der Leitungsabschnitte auf alle Punkte.

5.3.3 Bäume pro Kilometer

Bäume, die direkt über oder knapp neben Wasserleitungen gepflanzt wurden, können zu erheblichen Erschwernissen bei der Behebung von Leckagestellen führen. Je nach der Anzahl an Bäumen pro Kilometer wurden die Punkte vergeben.

Bäume/km	Punkte Bäume/km
≤20	1
>20-40	2
>40-60	3
>60-80	4
>80	5
keine	0

Tabelle 26: Bewertungsgruppen der Bäume

5.3.4 Hauptverkehrsstraßen pro Kilometer

Hauptstraßen über Leitungsabschnitten stellen für die Reparatur von Schäden eine erhebliche Erschwernis dar. Zum einen müssen die Bauarbeiten unter meist beengten Platzverhältnissen und unter Zeitdruck stattfinden, um eine Behinderung möglichst gering und von kurzer Dauer zu halten.

Zum anderen werden Passanten und Autofahrer behindert, womit sich für Fußgänger Umwege und für Autofahrer Staus ergeben.

Straßen/km	Punkte Straßen/km
≤10	1
>10-20	2
>20-30	3
>30-40	4
>40	5
keine	0

Tabelle 27: Bewertungsgruppen der Straßen

Die große Anzahl von querenden Hauptverkehrsstraßen ergibt sich aus den teilweise kurzen Leitungsabschnitten der Haupt- und Zubringerleitungen, wodurch sich ein hoher Wert bei der Hochrechnung auf die Länge eines Kilometers ergibt.

5.3.5 Straßenbahnen pro Kilometer

Schwieriger als beim vorhergehenden Indikator stellt sich die Lage beim schienengebundenen öffentlichen Verkehr dar. Schäden, die durch Wasseraustritt die Gleislage gefährden, ziehen die Einstellung des Schienenverkehrs nach sich. Für das Verkehrsunternehmen ergeben sich dadurch Mehrkosten und Mehraufwand für die Einrichtung eines Schienenersatzverkehrs.

Straßenbahnen/km	Punkte Straßenb./km
≤10	1
>10-20	2
>20-30	3
>30-40	4
>40	5
keine	0

Tabelle 28: Bewertungsgruppen der Straßenbahnen

Die große Anzahl von querenden Straßenbahntrassen ergibt sich aus den teilweise kurzen Leitungsabschnitten der Zubringerleitungen, wodurch sich ein hoher Wert bei der Hochrechnung auf die Länge eines Kilometers ergibt.

5.3.6 Schadenspotential

Nicht jedes Material hat gleich große Schadenspotentiale auf die Umgebung. So können zum Beispiel undichte Verbindungen oder Korrosionslöcher nur einen geringen Wasseraustritt zur Folge haben. Wohingegen, vor allem bei Graugussleitungen, Scherbenbrüche zu großem Wasseraustritt und damit erheblichen Folgen führen können.

Die Punkteverteilung in der nachstehenden Tabelle bildet Durchschnittswerte über die unterschiedlichen Schadensarten ab. Undichte Verbindungen wurden mit einem Punkt bewertet, Korrosionsschäden mit zwei Punkten und Scherbenbrüche erhielten fünf Punkte (Friedl, 2012).

Rohre aus Asbestzement, Beton, GGG und Sonstige haben vor allem schadhafte Verbindungen, die keine großen Schäden in der Umgebung verursachen. Bei Stahlleitungen kommt zu den undichten Verbindungen noch eine große Anzahl von Korrosionsschäden. PE Leitungen können neben undichten Verbindungen auch zu Rissen und Scherbenbrüchen neigen. Graugussleitungen können alle verschiedenen Schadensarten aufweisen, darunter auch für die Umgebung relevante Längsrisse, Rundrisse und Scherbenbrüche.

Schadenspotential	Punkte Schadenspotential
AZ	1
B	1
GG	3
GGSM	3
GGG≤1980	1
GGG>1980	1
PE	3
Sonstige	1
ST	2

Tabelle 29: Bewertungen des Schadenspotentials

5.3.7 Belagsart

Die Belagsart bildet die Erschwernisse bei den Reparaturarbeiten und den Kostenunterschied bei den Grabungsarbeiten und der Wiederherstellung ab. Für die Berechnung wurde in „befestigt“ und „unbefestigt“ unterschieden. Wobei bei unbefestigter Oberfläche ein Punkt vergeben wird und bei befestigten Flächen, also Straßenbelägen, fünf Punkte.

Belagsart	Punkte Belagsart
kein Belag	1
befestigt	5

Tabelle 30: Bewertungen der Belagsart

5.3.8 Anzahl von Schiebern und Klappen pro Kilometer

Die Anzahl von Schiebern und Klappen bildet die Möglichkeit des Netzbetreibers ab, bei Schäden den betroffenen Leitungsabschnitt schnell und kleinräumig von funktionierenden Leitungen trennen zu können. Sind wenige Absperrvorrichtungen vorhanden, dann müssen bei Schäden große Abschnitte vom Netz genommen werden. Dadurch ist die Versorgung für viele Kunden unterbrochen.

Außerdem können bei langen Abschnitten ohne Absperrmöglichkeit große Wassermengen austreten und zu kleinräumigen Überschwemmungen im Stadtgebiet führen.

Schieber u. Klappen/km	Punkte Schieber u. Klappen/km
0	5
1 - 3	4
3 - 5	3
5 - 8	2
>8	1

Tabelle 31: Bewertungen der Klappen und Schieber Anzahl

5.4 Gewichtung der Indikatoren

5.4.1 Gewichtung der Schadenswahrscheinlichkeits - Indikatoren

Die Bestimmung der Indikatorgewichtung erfolgt innerhalb der Schadenwahrscheinlichkeit über die Schadensraten.

Alle Indikatoren, die für die jeweilige Leitung einen Wert aufweisen, erhalten die maximale Schadensrate des jeweiligen Indikators aus der Schadensratenanalyse. Alle Indikatoren, die für den jeweiligen Leitungsabschnitt nicht vorhanden sind, erhalten weder einen Punktwert noch eine Schadensrate.

Für die Berechnung der Gewichtungen werden alle maximalen Schadensraten einer Leitung aufsummiert. Dieser Summenwert ist für jeden Leitungsabschnitt unterschiedlich, da es bei jedem Abschnitt zu einer anderen Zusammenstellung der Indikatoren kommt.

Der Summenwert wird an dieser Stelle als Ausgangswert mit 100 Prozent gleichgesetzt. Die maximalen Schadensraten der einzelnen Indikatoren werden dann als Prozentwert von dem Summenwert neu dargestellt.

5.4.2 Gewichtung der Schadensausmaß - Indikatoren

Bei den Indikatoren des Schadensausmaßes bestand die Möglichkeit der Gewichtung über Schadensraten nicht. Um dennoch keine rein lineare Verteilung der Gewichtung zu erhalten, wurden zwei Indikatoren als Leitindikatoren ausgewählt. Diese beiden Indikatoren wurden in ihren Gewichtungen mittels Sensitivitätsanalyse variiert. Die restlichen Indikatoren jedes Leitungsabschnittes wurden linear in die Berechnung aufgenommen.

Im Falle des Zubringerleitungsnetzwerkes A fiel die Wahl der Leitindikatoren auf die Wichtigkeit und die Anzahl an Schiebern und Klappen je Leitungskilometer. Die Wichtigkeit des Leitungsabschnitts erhielt als Gewichtung 80 Prozent des Ausmaßes. Für die Anzahl der Schieber und Klappen je Kilometer wurden als Gewichtung zehn Prozent vergeben.

Die restlichen zehn Prozent wurden, je nach Vorhandensein der einzelnen Indikatoren bei jedem Leitungsabschnitt, linear verteilt.

5.5 Berechnungsergebnisse Netz A

5.5.1 Gesamtergebnis für das Haupt- und Zubringerleitungsnetz A

Die Zusammenführung der in Kapitel 5.2, 5.3 und 5.4 beschriebenen Indikatoren und deren Gewichtungen führen zu einer umfangreichen Berechnungstabelle.

Das Ergebnis aller Leitungsabschnitte gemeinsam kann aus Tabelle 32 und Abbildung 10 entnommen werden. Dabei wird weder nach den Schadensarten noch nach den Materialien unterschieden.

Die im Vorfeld getroffenen Annahmen und Einteilungen führen zum Ergebnis, dass 1.765 Leitungsabschnitte einen Failure Risk Index von „eins“ haben. Das sind 47,37% aller im Zubringerleitungsnetz A befindlichen Leitungsabschnitte.

Eine Bewertung von „zwei“ erhalten 1.459 Leitungsabschnitte oder 39,16% aller Abschnitte.

Für das gesamte Netz A können damit circa 87% aller Leitungen als unbedenklich, im Sinne der FRI Bewertung, angesehen werden.

Bei 427 Abschnitten ergab die Berechnung einen FRI von „drei“, das sind 11,46% der verlegten Leitungen. Ab der Bewertung von „drei“ kann eine verstärkte Instandhaltung der Leitungen sinnvoll werden.

Für 63 Leitungen wurde ein Wert von „vier“ und für zwölf Abschnitte wurde ein FRI von „fünf“ berechnet. Gerade einmal zwei Prozent der Leitungen im Haupt- und Zubringerleitungsnetz A entfallen auf die schlechtesten beiden Bewertungsgruppen.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert aller Leitungsabschnitte
1	1.765	47,37
2	1.459	39,16
3	427	11,46
4	63	1,69
5	12	0,32

Tabelle 32: Verteilung des FRI für alle Leitungsabschnitte

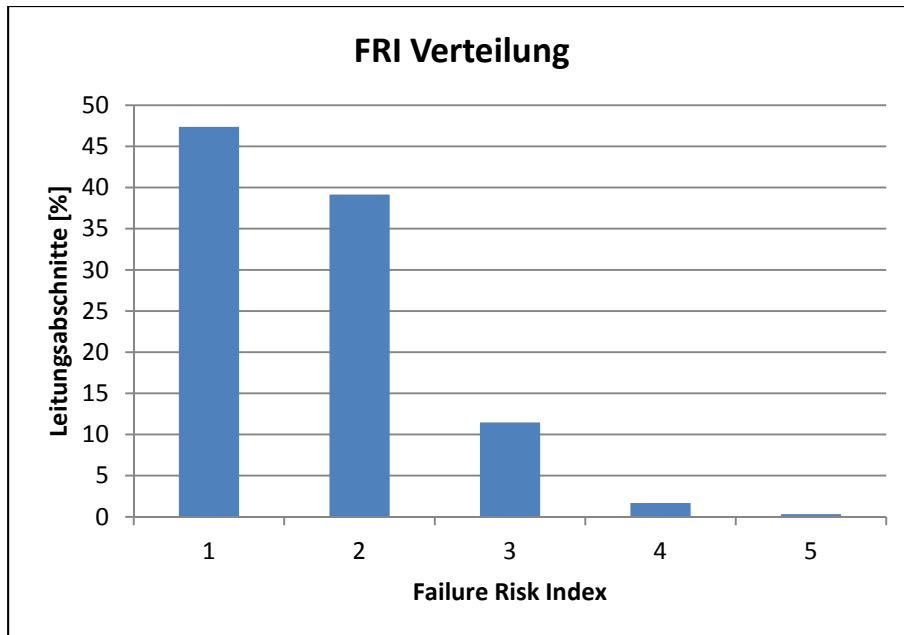


Abbildung 10: Verteilung des FRI für alle Leitungsabschnitte

146 Leitungsabschnitte wurden in der Berechnung mit einer Schadenswahrscheinlichkeit von größer als „vier“ ermittelt. Im Bereich des Schadensausmaßes gibt es hingegen 1.000 Leitungen mit einer Bewertung von größer als „vier“. In den zwei Teilbereichen lässt sich eine große Anzahl von Leitungen ermitteln, die entweder eine große Wahrscheinlichkeit oder große Konsequenzen haben. Aber nur ein kleiner Anteil aller Leitungen hat sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß.

Damit kann sich die Instandhaltung des Wasserwerkes auf einen kleinen Teil der Leitungen konzentrieren und dort verstärkt auf den Zustand achten. Es muss allerdings durch den FRI gesamt – sowohl für Material als auch für die Schadensart – bei jeder Leitung einzeln die passende Methode für zur Instandhaltung gefunden werden.

Die vorliegenden Materialien haben jedoch die unterschiedlichsten Schadensanfälligkeiten gegenüber bestimmten Schadensarten, wodurch eine Betrachtung und Analyse für jedes Material einzeln notwendig ist. Im Folgenden werden die im Netz A verlegten Materialien im Hinblick auf die Ergebnisse der FRI Berechnung gesondert dargestellt.

5.5.1.1 Betrachtung der Leitungen mit Vorschäden

Leitungsabschnitte mit Vorschäden bilden einen zentralen Bestandteil in dieser Berechnung. Einerseits treten auf diesen Abschnitten, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, mit großer Wahrscheinlichkeit erneut Schäden auf, andererseits erhält der Indikator „Vorschäden“ einen sehr hohen Anteil an der Gewichtung aller Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

27 Leitungen mit einem Vorschaden fallen in die FRI Gruppe eins. 98 Leitungen mit Vorschäden werden in die Gruppe zwei eingereiht. Auf Bewertungsgruppe drei entfallen 43 Abschnitte, das sind bereits zehn Prozent der Leitungen dieser Gruppe. 92% der Leitungen mit einem FRI von „vier“ und alle Leitungen mit einem FRI von „fünf“ hatten bereits einen Vorschaden.

Mit diesem Ergebnis wurden die Annahmen bezüglich der ausgehenden Gefahr von Vorschäden sehr gut abgebildet.

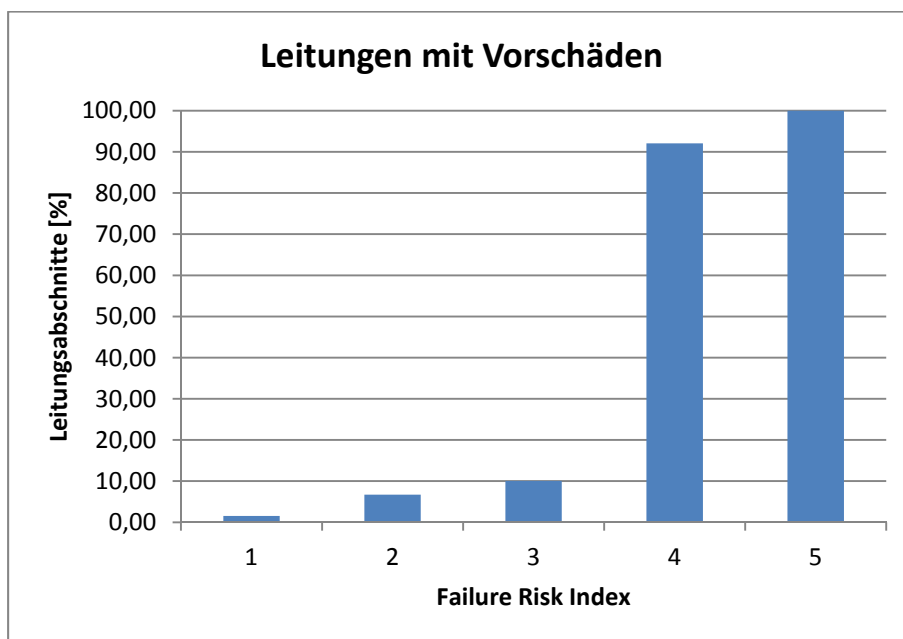


Abbildung 11: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe

Für eine schlechte FRI Bewertung eines Leitungsabschnittes ist es erforderlich, sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß aufzuweisen. Daher fallen auch Leitungsabschnitte mit einer hohen Schadenswahrscheinlichkeit in die ersten drei FRI Bewertungsgruppen.

5.5.2 Rohrmaterial Asbestzement

Im Netz sind 1.019 Leitungsabschnitte aus Asbestzement (AZ) vorhanden. Mit 150,64 Kilometern ist dieses Material das am häufigsten verwendete im Netzwerk.

Mit 0,35 Schäden pro Kilometer verlegter Leitung weist dieses Material sehr wenige Schäden auf. Dadurch ergeben sich für die Indikatoren der Rohrleitungsparameter und Umgebungsparameter jeweils niedrige Punktevergaben. Durch diesen Umstand ergeben sich, trotz einem großen Anteil von Leitungen mit hoher Wichtigkeit, gute Ergebnisse bei der Berechnung.

64,67% der Leitungsabschnitte bekamen einen FRI von „eins“ zugeteilt. Für 33,86% ergab sich nach den Berechnungen ein Failure Risk Index von „zwei“. Die restlichen 12 Abschnitte der FRI Bewertung von „drei“ und die drei Leitungen aus der Gruppe vier bilden bei Asbestzementrohren, mit in Summe 1,47%, die Ausnahme. In der schlechtesten Gruppe fünf scheint kein Abschnitt auf.

Für die Leitungen aus AZ ergibt sich damit ein Mittelwert des FRI von 1,37.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	659	64,67
2	345	33,86
3	12	1,18
4	3	0,29
5	0	0,00

Tabelle 33: Verteilung des FRI bei Asbestzement

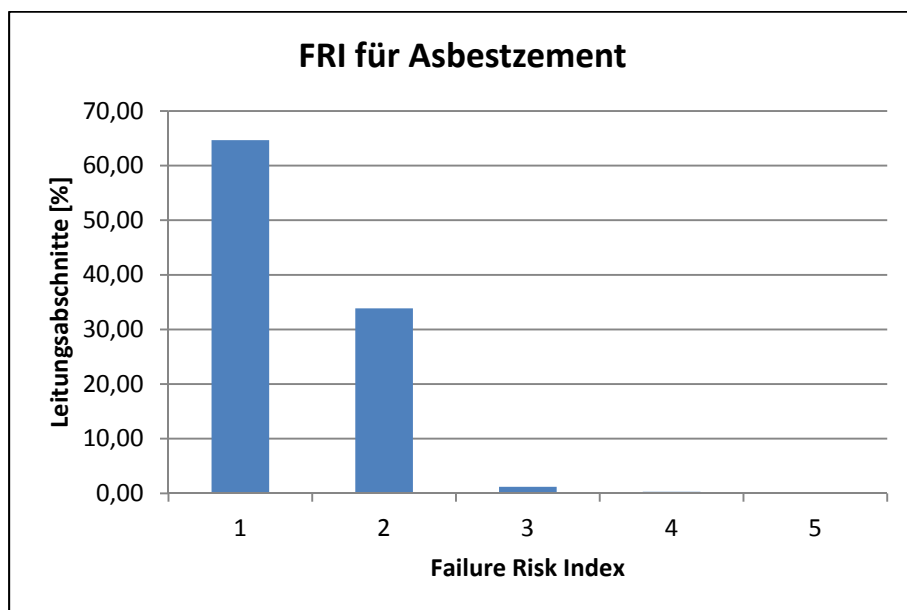


Abbildung 12: Verteilung des FRI bei Asbestzement

5.5.3 Rohrmaterial Beton

193 Leitungsabschnitte aus Beton (B) wurden im Netzwerk verlegt, das sind 34,68 Kilometer, vor allem bei Leitungen mit größerem Durchmesser.

0,55 Schäden pro Kilometer führen auch hier bei den Indikatoren zu relativ niedrigen Punktezuweisungen bei Rohrleitungs- und Umgebungsparametern. Die auftretende Schadensart ist hauptsächlich die undichte Verbindung.

48 Abschnitte, oder 24,67%, der Betonleitungen erhalten einen FRI von „eins“. Der überwiegende Anteil entfällt mit 62,18% jedoch auf einen Failure Risk Index von „zwei“. 16 Leitungen erhielten eine Bewertung von „drei“, das sind 8,29%. Weitere neun Leitungen (4,66%) entfallen laut Berechnung auf die Gruppe vier. Einen FRI von „fünf“ erhielt kein Leitungsabschnitt.

Für die Betonleitungen ergibt sich damit ein Mittelwert des FRI von 1,93.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	48	24,87
2	120	62,18
3	16	8,29
4	9	4,66
5	0	0,00

Tabelle 34: Verteilung des FRI bei Beton

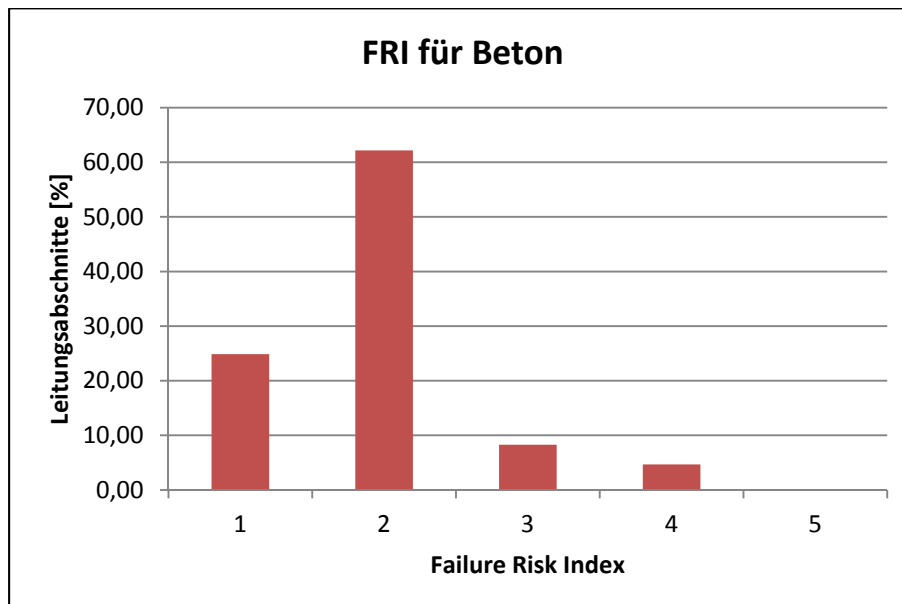


Abbildung 13: Verteilung des FRI bei Beton

5.5.4 Rohrmaterial Grauguss

Graugussleitungen (GG) wurden seit Beginn des Wasserversorgungsnetzwerks verwendet. 456 Abschnitte mit einer Länge von 56,08 Kilometern sind damit in Verwendung.

Leitungen aus diesem Material sind am häufigsten von Schäden betroffen und bilden alle Arten von Schäden aus. 1,69 Schäden pro Kilometer Leitung sind dokumentiert, dementsprechend hoch ist auch die Punkteverteilung bei den Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

Laut Berechnung sind 22,15% der Abschnitte in Gruppe eins. Der Großteil der Leitungen entfällt mit 40,13% und 30,70% auf die Gruppen zwei und drei. 7,02% der Abschnitte wurden bei der Berechnung in die schlechtesten beiden Gruppen gereiht. 27 Anteile entfallen auf die Gruppe vier und fünf Abschnitte erhalten die schlechteste Bewertung von „fünf“.

Für Graugussleitungen bildet sich daher ein Mittelwert des FRI von 2,24.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	101	22,15
2	183	40,13
3	140	30,70
4	27	5,92
5	5	1,10

Tabelle 35: Verteilung des FRI bei Grauguss

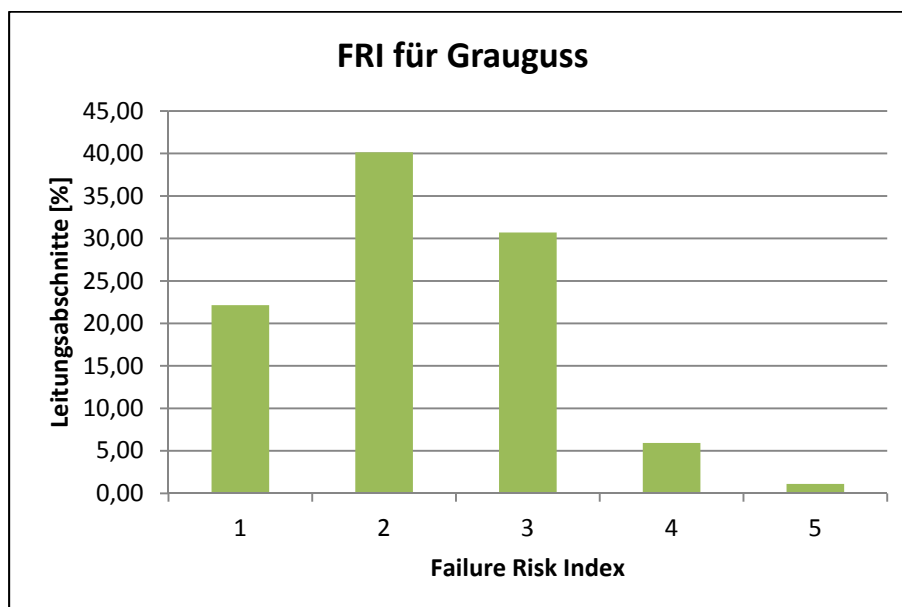


Abbildung 14: Verteilung des FRI bei Grauguss

5.5.5 Leitungen aus Grauguss mit Schraubmuffe

Als eigenes Material wurden Graugussleitungen mit Schraubmuffenverbindung (GGSM) gewertet. 356 Abschnitte wurden aus Grauguss aber ausschließlich mit Schraubmuffe verlegt, das sind in Summe 42,26 Kilometer.

Auch hier finden sich wie beim herkömmlichen GG sehr viele Schäden bei allen Schadensarten. Bezogen auf den Leitungskilometer erzielt GGSM eine Schadensrate von 2,41, wodurch sich schlechte Bewertungen bei den Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit ergeben.

Nur 17,39% der Graugussleitungen mit Schraubmuffe befinden sich nach den Berechnungen in der besten Gruppe des FRI. Gruppe zwei wurden jedoch 54,89% der Leitungsabschnitte zugeteilt. 25,00% oder 92 Abschnitte können einen Failure Risk Index von „drei“ aufweisen. In den schlechtesten beiden Gruppen finden sich 7 Leitungen (1,90%) und 3 Abschnitte (0,82%).

Der durchschnittliche Failure Risk Index von GGSM wurde mit 2,14 berechnet.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	64	17,39
2	202	54,89
3	92	25,00
4	7	1,90
5	3	0,82

Tabelle 36: Verteilung des FRI bei Grauguss Schraubmuffe

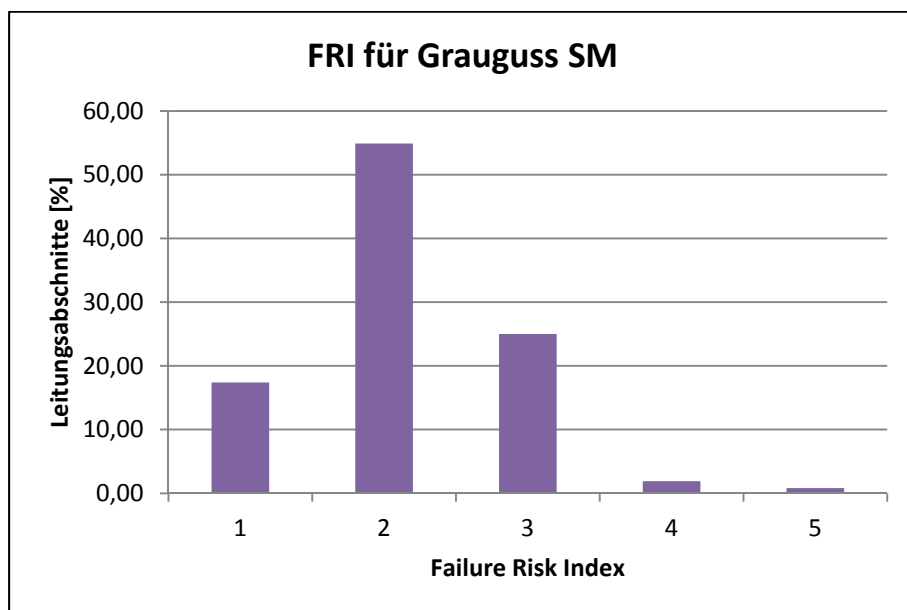


Abbildung 15: Verteilung des FRI bei Grauguss mit Schraubmuffe

5.5.6 Rohrmaterial Duktilguss ≤ 1980

35,16 Kilometer an Duktilgussleitungen wurden vor 1980 ($G\text{GG} \leq 1980$) im Netz verbaut, daraus wurden bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften 271 Einzelstücke.

Duktilgussleitungen sind aufgrund verschiedener Beschichtungen weniger Schadensanfällig, wodurch sich eine Schadensrate von 0,82 ergibt.

Ein Großteil der Leitungen wurde bei der Berechnung den Gruppen eins (47,60%) und zwei (46,86%) zugeteilt. Nur 4,06% der Abschnitte bekommt eine FRI-Bewertung von „drei“. Vier Leitungsteile oder 1,48% bekommen die, für Duktilguss ≤ 1980 , schlechteste Bewertung von „vier“ zugeteilt.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktilguss ≤ 1980 wurde mit 1,59 berechnet.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	129	47,60
2	127	46,86
3	11	4,06
4	4	1,48
5	0	0,00

Tabelle 37: Verteilung des FRI bei Asbestzement Duktilguss ≤ 1980

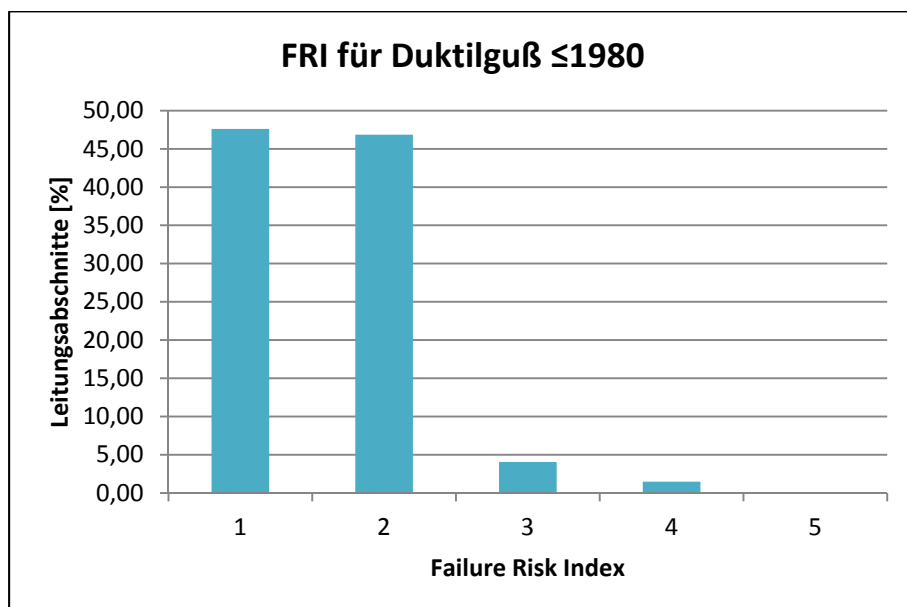


Abbildung 16: Verteilung des FRI bei Duktilguss ≤ 1980

5.5.7 Rohrmaterial Duktilguss > 1980

Duktilgussleitungen ab 1980 (GGG > 1980) wurden auf 82,41 Kilometern Länge im Netz verbaut, damit stellt dieses Material das am zweithäufigsten verwendete im Leitungsnetz A. Nach Unterteilung in Abschnitte gleicher Eigenschaften befinden sich 761 Einzelstücke in der Datenbank.

Duktilgussleitungen nach 1980 sind aufgrund verschiedener Beschichtungen und moderner Materialtechnologien weniger schadensanfällig als Werkstoffe, die bereits Jahrzehnte zuvor eingesetzt wurden. Die Schadensrate beläuft sich auf nur 0,16 Schäden pro Kilometer.

Bei 65,57% der GGG > 1980-Leitungen konnte die Bewertung einen FRI von „eins“ ausgeben. Weitere 27,73% entfallen auf die zweite Gruppe. Nur 6,04% der Abschnitte erhalten eine mittlere Bewertung von „drei“. Lediglich fünf Leitungsteile oder 0,66% entfallen auf die Failure Risk Index Gruppe vier.

Als Durchschnitt des FRI können Duktilgussleitungen, die nach 1980 verlegt wurden, einen Wert von 1,42 aufweisen.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	499	65,57
2	211	27,73
3	46	6,04
4	5	0,66
5	0	0,00

Tabelle 38: Verteilung des FRI bei Duktilguss >1980

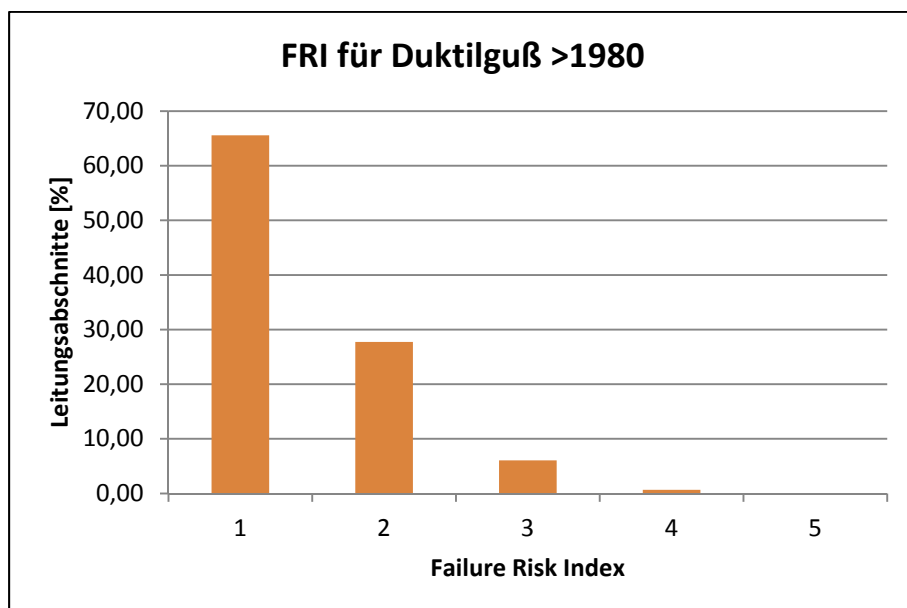


Abbildung 17: Verteilung des FRI bei Duktilguss >1980

5.5.8 Rohrmaterial Polyethylen

Erst seit den 1990er Jahren werden Polyethylen Rohre (*PE*) im Haupt- und Zubringerleitungsnetz verwendet. Seit dieser Zeit wurden 7,68 Kilometer Rohre verbaut, die in der Berechnung als 65 Einzelteile aufscheinen.

Die Materialalterung ist in diesem geringen Zeitraum noch schwer zu beurteilen, ein Schaden bei PE Rohren wurde bis jetzt detektiert. Die Schadensrate lässt sich dadurch mit 0,13 feststellen.

Dementsprechend positiv ist die Bewertung dieses Materials ausgefallen. 86,15% entfallen auf die beste FRI Gruppe von „eins“. Die restlichen 13,85% werden mit einem FRI von zwei berechnet. Auf die Gruppen drei, vier und fünf entfällt kein einziger Leitungsabschnitt.

Der Failure Risk Index Durchschnittswert beträgt 1,14.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	56	86,15
2	9	13,85
3	0	0,00
4	0	0,00
5	0	0,00

Tabelle 39: Verteilung des FRI bei Polyethylen

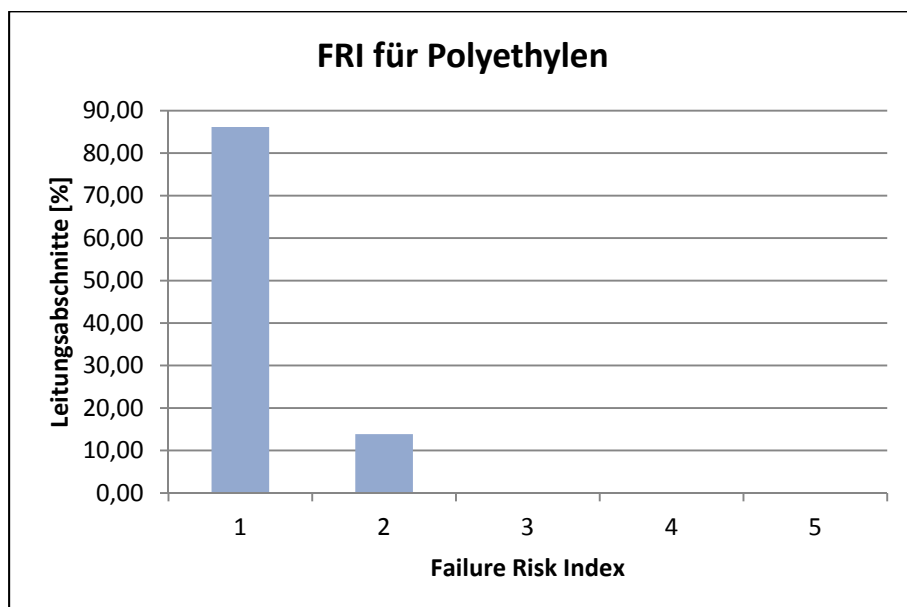


Abbildung 18: Verteilung des FRI bei Polyethylen

5.5.9 Rohrmaterial Sonstige

Die Sonstigen Materialien (SO) im Leitungsnetz sind Niro, RILIN, RISAN und SLNT. Diese werden vor allem bei speziellen Anforderungen an das Material eingesetzt. 4,73 Kilometer dieses Werkstoffes wurden bis jetzt verwendet. In dieser Arbeit ergeben sich daraus 52 Leitungsabschnitte.

Durchschnittlich sind 0,85 Schäden pro Kilometer dokumentiert.

Durch die Gruppierung verschiedener Materialien ist das Ergebnis relativ weit gestreut. Nur 26,92% der Leitungen bekommen die Wertung „eins“. Die große Anzahl der Abschnitte liegt mit 51,92% in der FRI Gruppe zwei. 17,31% der Sonstigen Leitungen erhalten nach der Berechnung den mittleren Wert von „drei“. Jeweils 1,92% der Abschnitte (jeweils ein Leitungsabschnitt) entfällt auf den FRI vier und fünf.

Gemittelt ergibt sich für die Sonstigen Materialien ein FRI von 2,00.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	14	26,92
2	27	51,92
3	9	17,31
4	1	1,92
5	1	1,92

Tabelle 40: Verteilung des FRI bei Sonstige

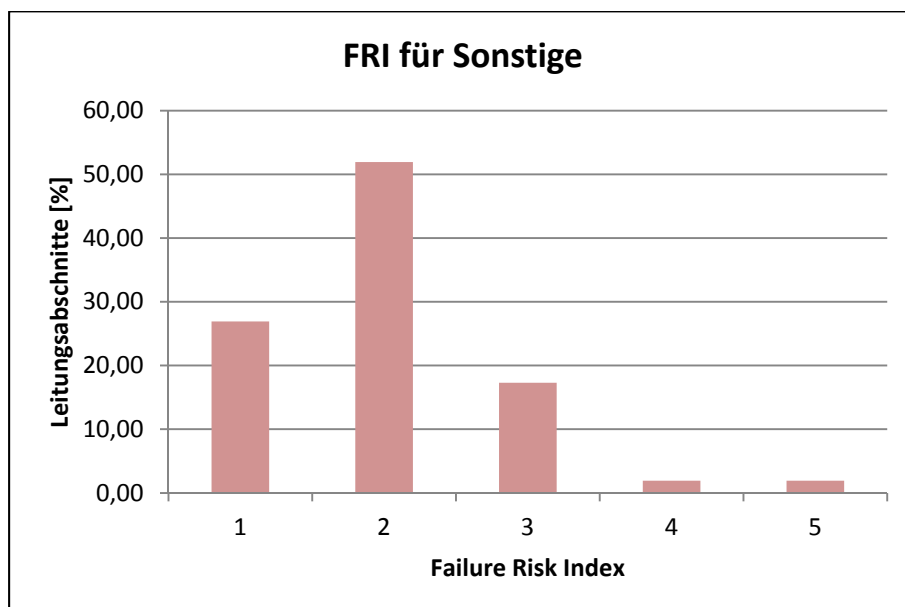


Abbildung 19: Verteilung des FRI bei Sonstige

5.5.10 Rohrmaterial Stahl

Stahlleitungen (ST) finden sich seit zirka 1900 als Trinkwasserleitungen im Netzwerk. Davon wurden 28,03 Kilometer als Haupt- und Zubringerleitungen verlegt. In der Berechnung scheinen 541 einzelne Teile auf.

Durch die fortschreitende Materialtechnologie und striktere Vorschriften ist eine sinkende Schadensrate bei neueren Leitungen zu erkennen. Dennoch treten bei Stahlleitungen sehr viele korrosionsbedingte Schäden auf. Die Schadensrate liegt bei 1,32.

36,04% der Leitungen erhalten eine FRI Bewertung von „eins“ und weitere 43,44% von „zwei“. In der mittleren Gruppe drei befinden sich 101 Abschnitte, das sind 18,67%. In die letzten beiden Bereiche wurden 1,29% bzw. 0,55% der Leitungsabschnitte gereiht.

Als Mittelwert kann Stahl 1,87 FRI aufweisen.

Failure Risk Index	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	195	36,04
2	235	43,44
3	101	18,67
4	7	1,29
5	3	0,55

Tabelle 41: Verteilung des FRI bei Stahl

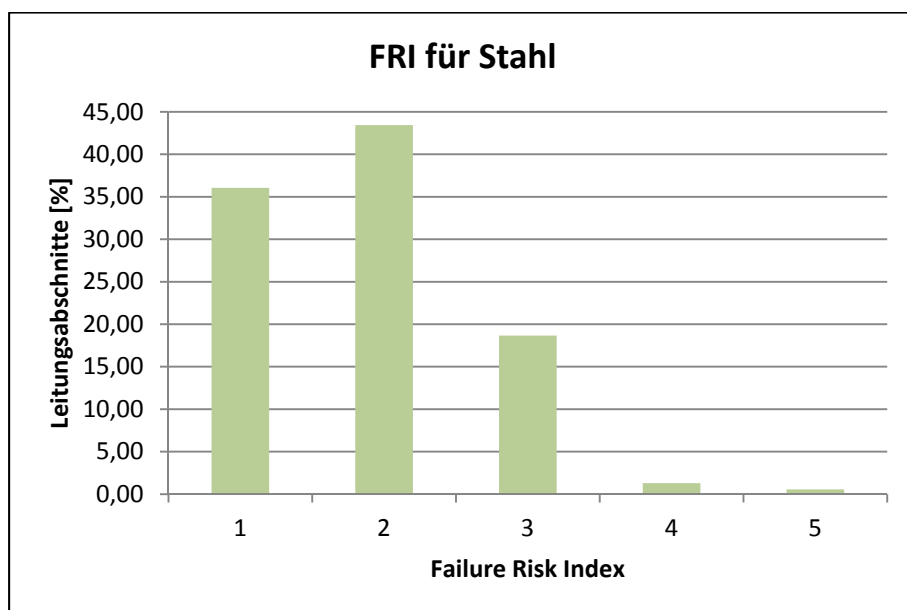


Abbildung 20: Verteilung des FRI bei Stahl

6 Anwendung des FRI auf das Zubringerleitungsnetz B

6.1 Allgemeine Beschreibung

Das Haupt- und Zubringerleitungsnetz B ist in einer GIS-Datenbank digital abgebildet. Gesamt umfasst das Netzwerk 482,86km HZL, wobei die Ältesten bereits im Jahr 1870 verlegt wurden. Durch Zuweisung diverser Eigenschaften, wie beispielsweise Material, Durchmesser, Verkehrsbelastung, u.v.m., wurden daraus 16.279 einzelne Abschnitte gebildet. Diese Abschnitte mit den zugehörigen Eigenschaften bilden als Tabelle die Grundlage der Berechnungen dieser Arbeit.

Im Zubringerleitungsnetz B sind Rohrleitungen mit einem Durchmesser von 200 bis 2.360 mm vorhanden. Seit Beginn der Schadensdokumentation traten 418 Schäden aller Art auf. Bei den Reparaturen der Schäden wurde jeweils ein Schadensdatenblatt mit der Feststellung der Schadensart und weiteren Informationen erstellt. Unter anderem wurde die Rohrleitung begutachtet und auf ihren Gesamtzustand hin überprüft.

Die genaue Anzahl einer jeden Schadensart ist in Tabelle 42 festgehalten. Ein Großteil der Schäden in den Schadensdatenblättern entfällt auf Löcher bedingt durch Korrosion. Die nächsten beiden am stärksten vertretenen Schadensarten sind Längsriss/Scherbenbruch mit 55 Schäden und Rundriss mit 27 aufgezeichneten Schäden. Nur 26 der dokumentierten Schadensereignisse wurden nur mit dem Wortlaut „unbekannt“ festgehalten.

23 Schäden wurden laut Aufzeichnungen durch Fremdverschulden, also Beschädigungen vor allem durch angrenzende Bauarbeiten, verursacht. Diese Art des Leitungsschadens hat allerdings keine alterungsbedingten oder betriebstechnischen Ursachen und wird daher für die weitere Betrachtung und Berechnung ausgeschieden.

Längsriss / Scherbenbruch	Korrosionsloch	Rundriss	unbekannt	Sonstige	Fremdbeschädigung
55	267	27	26	20	23

Tabelle 42: Schadensverteilung nach Schadensart

Für ein Konzept der Risikoanalyse wurde von den zuständigen Stellen ein Einflusskatalog erstellt, auf welchen in dieser Arbeit zurückgegriffen wurde. Die Bewertung der einzelnen Einflüsse erfolgte in diesem Konzept über die physikalische Beurteilung der Belastungen. So wird beispielsweise beim Einfluss der Verkehrsbelastung starker Verkehr mit fünf Punkten beurteilt und sehr schwacher Verkehr mit einem Punkt.

Für diese Arbeit wurden die vorhandenen Einflüsse mit ihren Gruppen aus dem Konzept der Risikoanalyse (Umgebungsparameter) übernommen und mit weiteren Indikatoren der Rohrleitungsparameter aus der GIS-Datenbank erweitert.

Nach Analyse der Schadensdokumentation wurde eine Aufteilung der weiteren Berechnungen festgelegt. Durch die qualitativ gute Datenbank werden in weiterer Folge drei unterschiedliche Failure Risk Indizes in Abhängigkeit der Schadensarten berechnet. Dazu werden die drei häufigsten Schadensarten Korrosion, Längsriss/Scherbenbruch und Rundriss als eigene Kennzahlen bestimmt.

In den Kapiteln 6.2 bis 6.4 werden die drei FRI Berechnungen samt den Schadensratenermittlungen und den Punktevergaben dargestellt.

6.2 FRI Korrosion

Der Failure Risk Index der Korrosion soll die genaue Schadensanfälligkeit der Rohrleitungen auf korrosive Beanspruchung darstellen. Damit kann eine sehr viel detailliertere Aussage über den Zustand der Rohrleitungen getroffen werden, als es bei einem FRI gesamt (siehe Kapitel 5, Netz A) möglich wäre.

6.2.1 Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit

Wie bereits angeführt setzt sich die Schadenswahrscheinlichkeit aus den beiden Unterindizes Rohrleitungsparameter und Umgebungsparameter zusammen. Beim FRI Korrosion werden aus der gesamten Indikatoren-Liste die für Korrosion relevanten Indikatoren ausgewählt. Dabei sind einige allgemeine Indikatoren vorhanden, die bei allen Schadensarten Verwendung finden. Spezielle Indikatoren für die Korrosion (z.B. Beschichtungen oder Bodenaggressivität) machen aber den Unterschied zu anderen schadensartenabhängigen Auswertungen aus.

Im Unterindex Rohrleitungsparameter sind elf Indikatoren, welche die Leitung und deren Eigenschaften beschreiben, vorhanden.

Die fünf Indikatoren des Unterindex Umgebungsparameter bilden den Standort, an dem der Leitungsabschnitt verlegt wurde, ab und stellen das Umfeld und die möglichen Belastungen aus diesem Bereich dar.

		Indikator des FRI Korrosion	Punkte
Schadenswahrscheinlichkeit	Rohrleitungsparameter	Material	0 - 5
		Dimension	0 - 5
		Verlegejahr	0 - 5
		Anzahl Vorschäden	0 - 5
		Verbindungsart	0 - 5
		Außenbeschichtung	0 - 5
		Innenbeschichtung	0 - 5
		Schubsicherung	0 - 5
		Kathodischer Schutz	0 - 5
		Betriebsdruck	0 - 5
		Hölzchen	0 - 5
	Umgebungsparameter	Bodenaggressivität	0 - 5
		Korrosionfördernde Faktoren	0 - 5
		Baumstandorte	0 - 5
		Streustrom Tram	0 - 5
Streustrom Gas		0 - 5	

Tabelle 43: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit

Die in Tabelle 43 dargestellten Indikatoren werden im Folgenden beschrieben und ihre Schadensraten und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

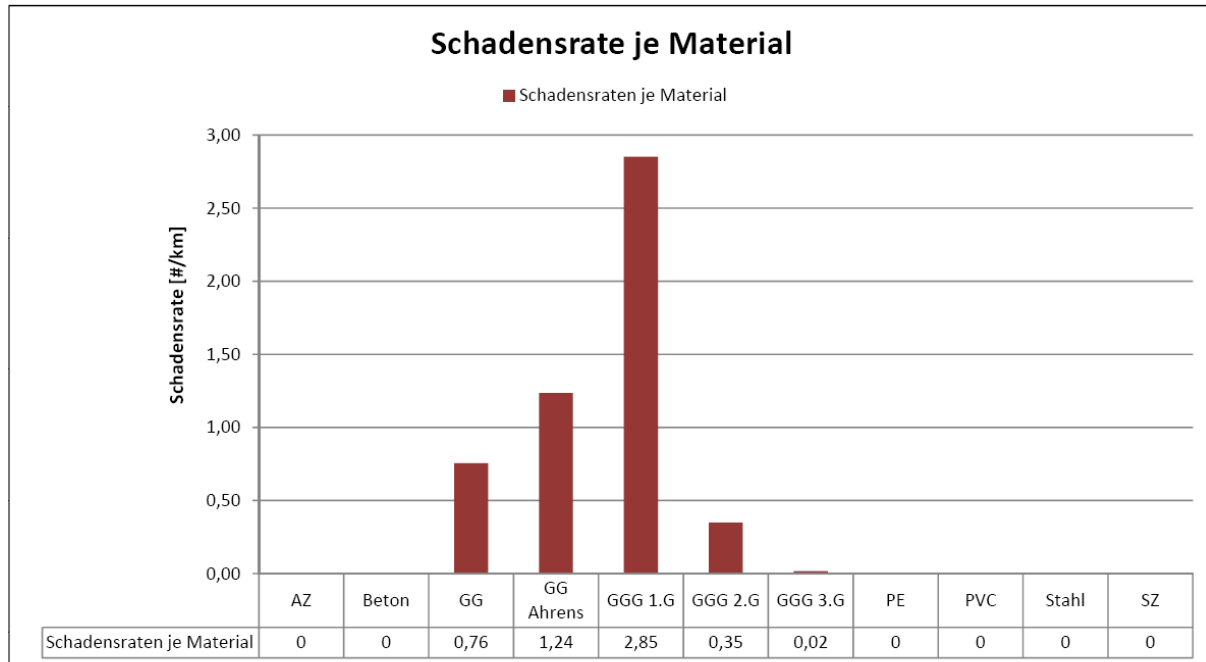
6.2.1.1 Rohrmaterial

Korrosionsschäden kommen im Netz B bis jetzt nur bei den Materialien Grauguss, Grauguss Ahrens und den drei Generationen des Duktigusses vor. Für diese Materialgruppen wird in weiterer Folge auch der FRI Korrosion berechnet.

Alle anderen Materialien werden entweder wegen fehlender Schadensraten (Stahl) oder der nicht vorhandenen Schadensanfälligkeit gegen Korrosion durch nicht metallische Werkstoffe aus der weiteren Analyse ausgeschieden.

Das auf Korrosion anfälligste Material mit einer Schadensrate von 2,85 ist der Duktiguss der ersten Generation. Obwohl es erst in den Jahren von 1963 bis 1975 verlegt wurde, ist der bituminöse Schutz dieser Leitungen offensichtlich sehr fehleranfällig.

Die Punkte eins bis fünf wurden auf die Materialgruppen Grau- und Duktiguss nach den jeweiligen Schadensraten verteilt. Alle weiteren Materialien bekommen keinen Punkt.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 2,85	0,57	1,14	1,71	2,28	2,28

Tabelle 44: Schadensraten nach den Materialien und die Punkteverteilung

6.2.1.2 Durchmesser

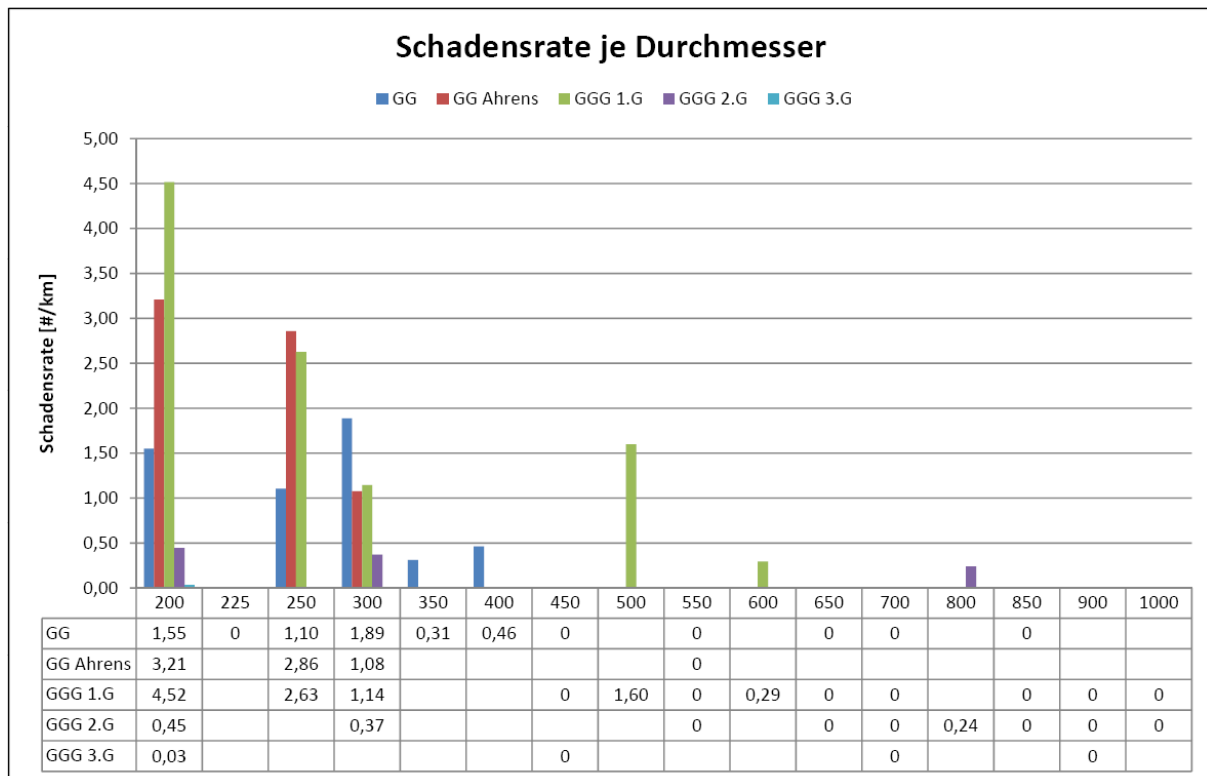
Im Haupt- und Zubringerleitungsnetz B sind Rohre von 200 mm bis zu 2.360 mm verlegt. Bei den hier betrachteten Materialien sind jedoch nur Durchmesser bis zu 1.000 mm vorhanden.

Leitungen mit einem Durchmesser von 200 mm sind mit über 200 km Verlegelänge am häufigsten verwendet. Am zweithäufigsten sind mit knapp 100 km Leitungslänge Rohre mit einem Durchmesser von 300 mm verlegt. Die beiden Größen wurden auch in den meisten korrosionsanfälligen Materialien verlegt.

Die meisten Schäden, bezogen auf einen Kilometer Länge, treten bei Duktigussleitungen der ersten Generation mit einem Durchmesser von 200 mm auf.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit

einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 4,52	kein Schaden	1,13	2,26	3,39	3,39

Tabelle 45: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung

6.2.1.3 Verlegejahr

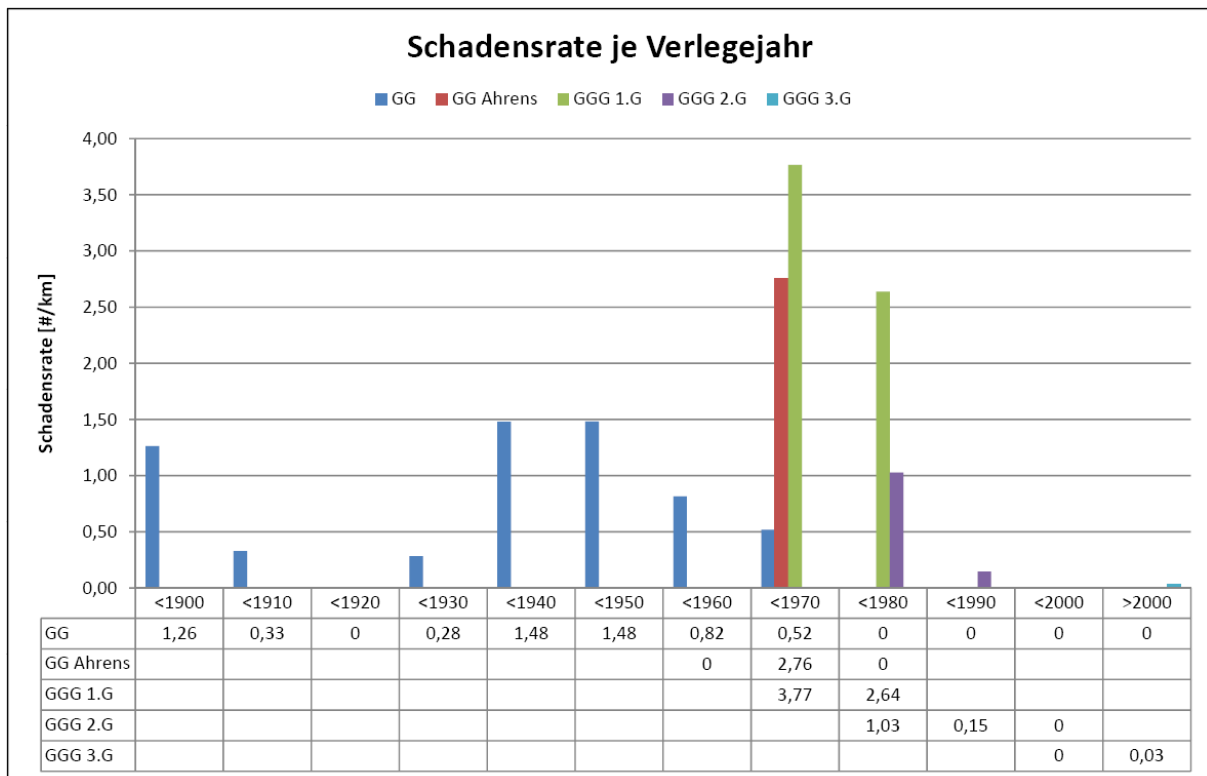
Die ersten Leitungen wurden bereits im Jahr 1870 verlegt. Bis in die 1960er Jahre waren es fast ausschließlich Graugussleitungen.

Die höchste Schadensrate weisen Leitungen aus Duktguss der ersten Generation und einem Verlegejahr zwischen 1960 und 1969 auf. Bei Graugussleitungen kann seit den 1940er Jahren durch verbesserte Materialtechnik und Beschichtungen eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber korrosiver Beschädigung erreicht werden.

Für die einfachere Handhabung wurden die Gruppen in Zehnjahres-Abschnitte zusammengefasst. Dabei fallen beispielsweise in die Gruppe < 1970 alle Leitungen, die in den Jahren 1960 bis 1969 verlegt wurden.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit

einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden kein Schaden	< 0,94	< 1,89	< 2,83	≥ 2,83
max Wert	3,77				

Tabelle 46: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung

6.2.1.4 Vorschäden

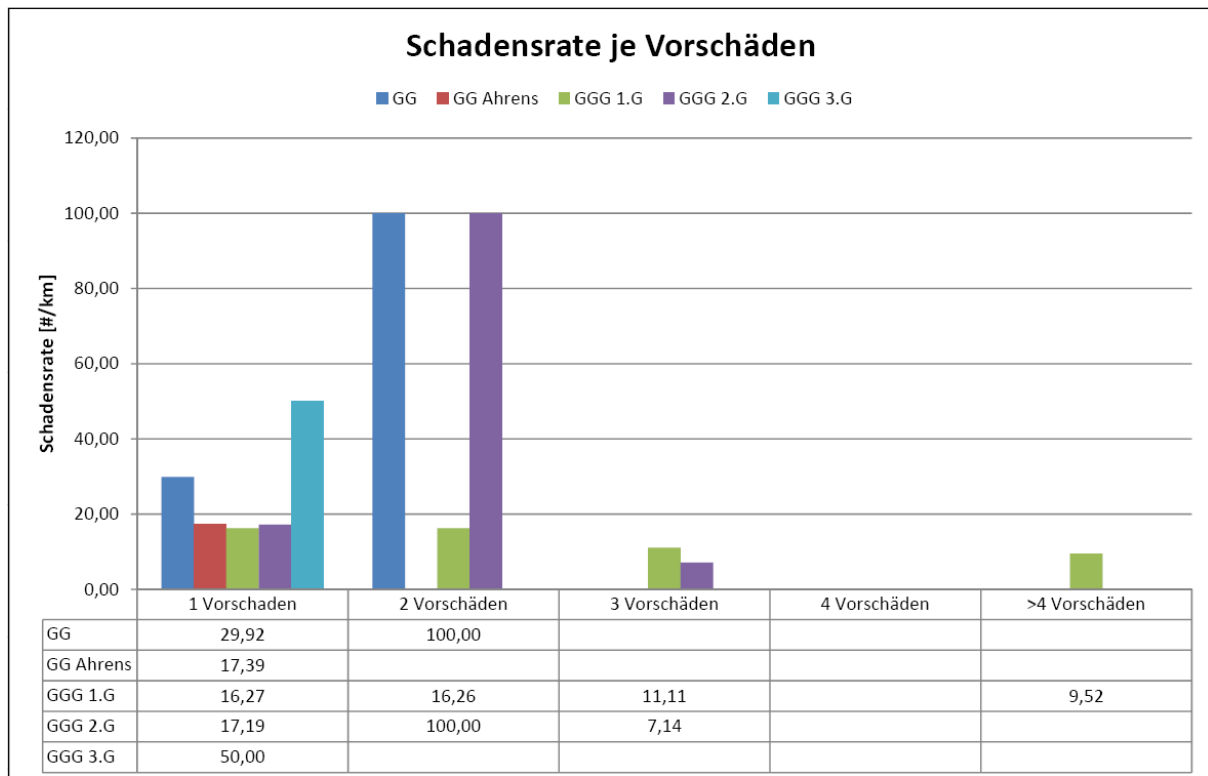
Wie bereits in Kapitel 2.5 – Räumliche und zeitliche Häufung von Schadensfällen beschrieben, treten nach einem Initialschaden oft im unmittelbaren Umfeld weitere Schäden auf. Die betrachteten Schadensfälle in der Tabelle zeigen Vorschäden auf dem gleichen Leitungsabschnitt.

Durch die kurzen Leitungsabschnitte bekommen die Schadensraten bei den Vorschäden hohe Werte. Die Punkteverteilung für diesen Indikator wird mit null Punkten für Leitungen ohne Schaden und mit fünf Punkten für Leitungen mit einem oder mehreren Schäden festgesetzt. Durch die hohen Schadensraten geht dieser Indikator als Schwergewicht in die Berechnung des FRI mit ein und bildet damit die Gefahr von Schadensanhäufungen bzw. den optimalen Erneuerungszeitpunkt nach bereits einem oder wenigen Schäden ab.

Die hohe Schadensrate von 100 wurde auf jeweils einem Leitungsabschnitt aus Grauguss und Duktilguss der zweiten Generation mit zwei Vorschäden ermittelt. Bei

beiden Materialien sind jeweils drei Leitungsabschnitte mit in Summe 30 Metern Länge mit zwei Vorschäden bekannt. Durch diese geringen Leitungslängen treten die hohen Schadensraten von 100 auf.

In verschiedenen Untersuchungen werden „Ausreißer“ von den Ergebnissen aussortiert, für die vorliegende Berechnung wurden aber die tatsächlich vorhandenen Maximalwerte herangezogen.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 100,00	20,00	40,00	60,00	80,00	80,00

Tabelle 47: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung

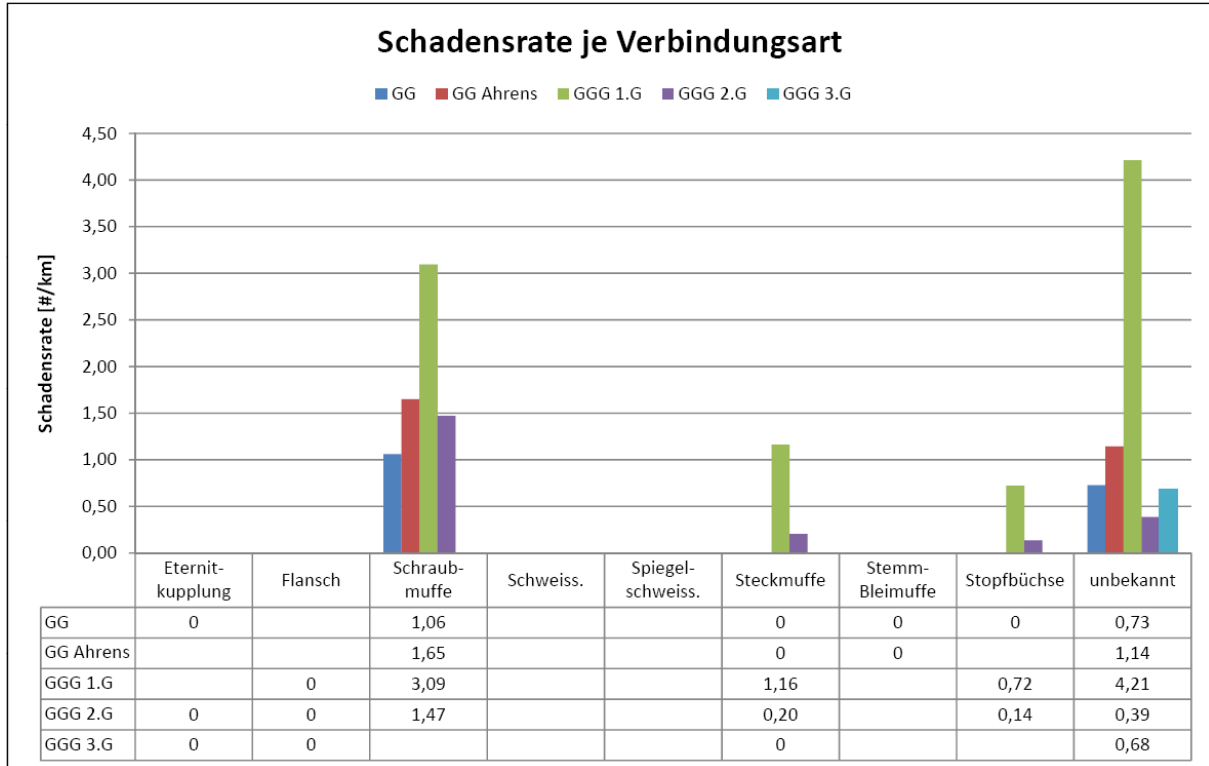
6.2.1.5 Verbindungsart

Die Aufzeichnungen für Netz B enthalten eine genaue Dokumentation der vorhandenen Verbindungen, allerdings gibt es natürlich auch Abschnitte mit unbekanntem Eigenschaften. Bei den hier betrachteten Materialien traten bei Schraub- und Steckmuffen, Stopfbüchse und bei der Gruppe der unbekanntem Verbindungen, Schäden auf.

Die höchste Schadensrate tritt mit 4,21 Schäden pro Kilometer bei Duktigussleitungen der ersten Generation mit unbekannter Verbindungsart auf.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen

dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 4,21	kein Schaden	1,05	2,11	3,16	3,16

Tabelle 48: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung

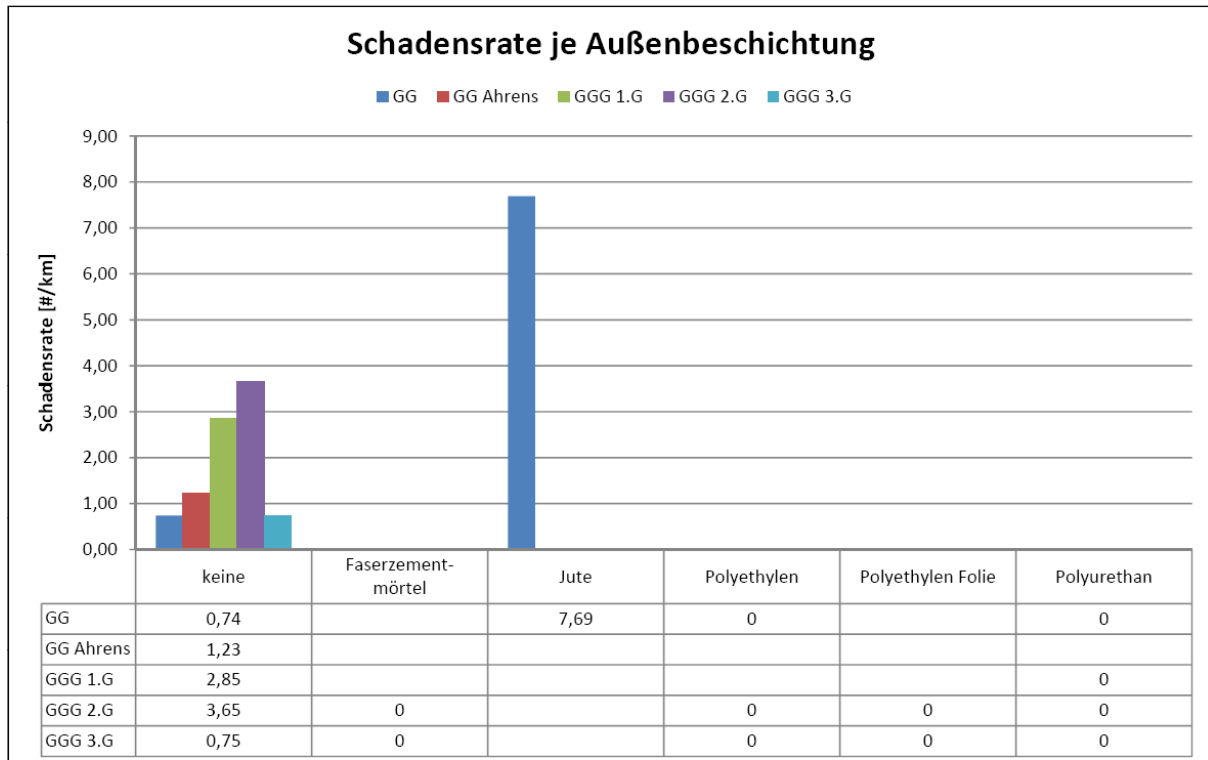
6.2.1.6 Außenbeschichtung

Die Außenbeschichtung eines Rohres ist für die Anfälligkeit gegen Korrosionslöcher von großer Bedeutung. Diesen Umstand kann man auch der folgenden Tabelle entnehmen. Korrosionsschäden traten nur bei Leitungsabschnitten ohne Außenbeschichtung oder bei Ummantelung mit Jute auf. Alle Leitungen mit einer Beschichtung auf Zement- oder Kunststoffbasis sind von Korrosionsschäden nicht betroffen.

Die höchste Schadensrate wurde bei Leitungen mit Jute als Außenbeschichtung festgestellt, wobei sich die Höhe der Schadensrate durch die geringe Anzahl der Abschnitte erklären lässt.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang

noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 7,69	kein Schaden	1,92	3,85	5,77	5,77

Tabelle 49: Schadensraten nach den Außenbeschichtungen und die Punkteverteilung

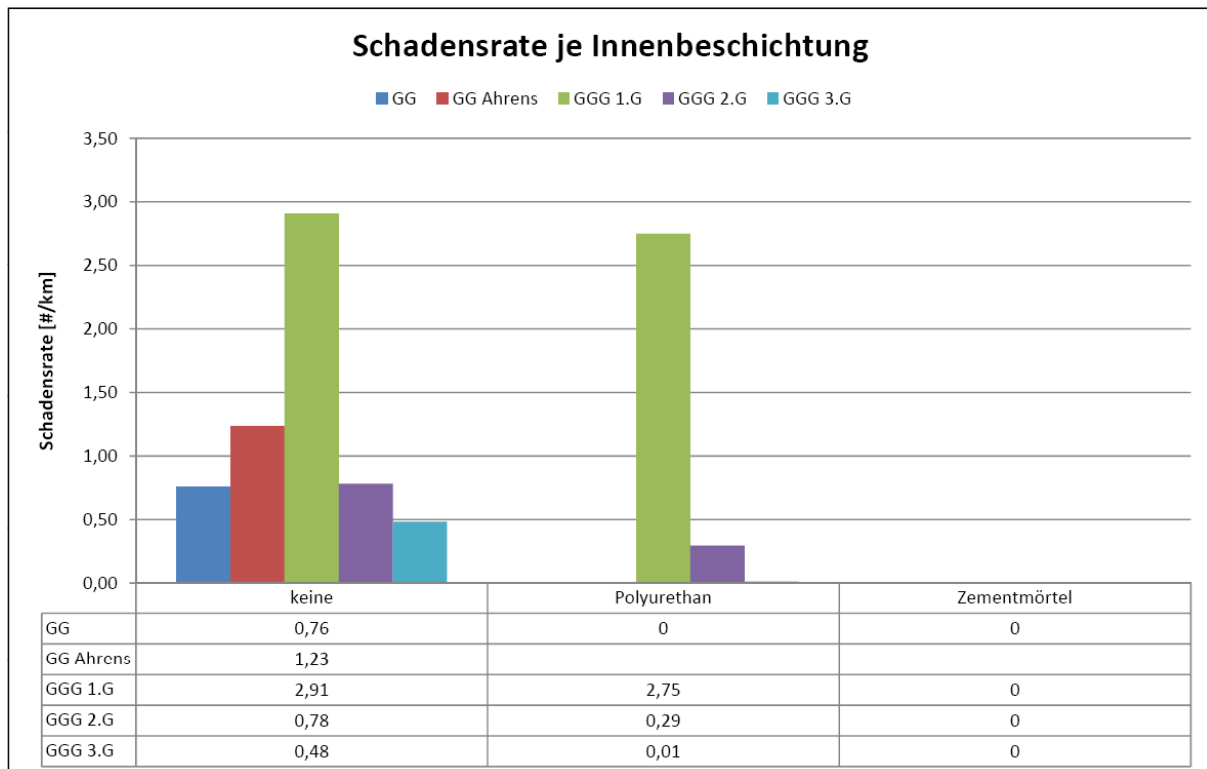
6.2.1.7 Innenbeschichtung

Die Innenbeschichtung eines Rohres ist für die Anfälligkeit gegenüber der Aggressivität des Wassers von großer Bedeutung. Korrosionsschäden traten bei Leitungsabschnitten aller Materialien ohne Innenbeschichtung auf. Auch die Innenbeschichtungen bei Duktulgussleitungen der ersten beiden Generationen aus Polyurethan weisen Korrosionsschäden auf. Den besten Schutz bieten Innenbeschichtungen aus Zementmörtel und die neueste Generation der Polyurethan-Auskleidung.

Die höchste Schadensrate wurde mit 2,91 Schäden pro Kilometer Länge bei Leitungen aus Duktulguss der ersten Generation ohne Innenbeschichtung festgestellt. Allerdings haben auch Duktulgussleitungen der ersten Generation mit einer Polyurethanbeschichtung eine ähnlich hohe Schadensrate.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen

dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
max Wert 2,91	vorhanden kein Schaden	< 0,73	< 1,46	< 2,18	≥ 2,18

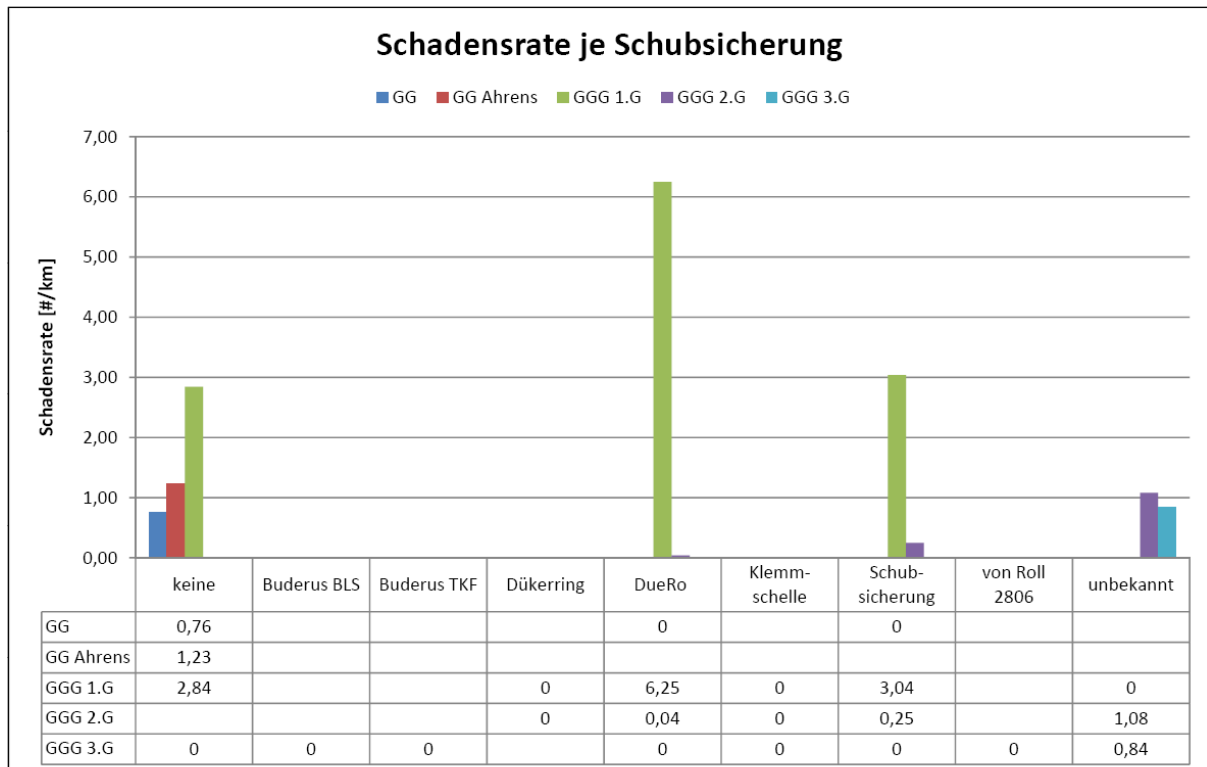
Tabelle 50: Schadensraten nach den Innenbeschichtungen und die Punkteverteilung

6.2.1.8 Schubsicherung

An Bögen oder Abzweigungen von Leitungen treten im Allgemeinen Schubkräfte auf. Diese können über Widerlager oder über die Rohraußenreibung mit dem Erdreich aufgenommen werden. Bei instabilen Böden oder auch im innerstädtischen Bereich mit vielen angrenzenden Leitungsträgern bietet sich die Aufnahme der Schubkräfte über Schubsicherungen an den Rohrverbindungen an. Dabei werden die einzelnen Rohrleitungsabschnitte kraftschlüssig miteinander verbunden und dadurch Bewegungen in den Verbindungen vermieden. Bewegungen in den Verbindungen würden zu Undichtigkeiten und damit zu Wasseraustritt führen.

Die meisten Korrosionsschäden wurden mit einer Schadensrate von 6,25 Schäden pro Kilometer Leitungslänge bei Duktulgussleitungen der ersten Generation und DueRo Schubsicherungen festgestellt.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag null stellen dar, dass es Leitungsabschnitt mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurden. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten je nach Punkteverteilung zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert	6,25	kein Schaden	1,56	3,13	4,69

Tabelle 51: Schadensraten nach den Schubsicherungen und die Punkteverteilung

6.2.1.9 Kathodischer Schutz

Der kathodische Schutz betrifft hierbei Gasleitungen, die in der Nähe des jeweiligen Haupt- und Zubringerleitungsabschnittes verlegt sind. An kathodisch geschützten Gasleitungen wird eine Spannung – von meist zwei Volt Gleichstrom – angelegt. Dadurch werden Korrosionsschäden an den metallischen Gasleitungen vermieden, da durch die Spannung die Korrosion bei einer Opferanode stattfindet, welche ein unedleres Metall bildet. Bei angrenzenden Leitungen, wie z.B. bei Trinkwasserleitungen aus metallischen Werkstoffen, kann dies jedoch zur Korrosion führen.

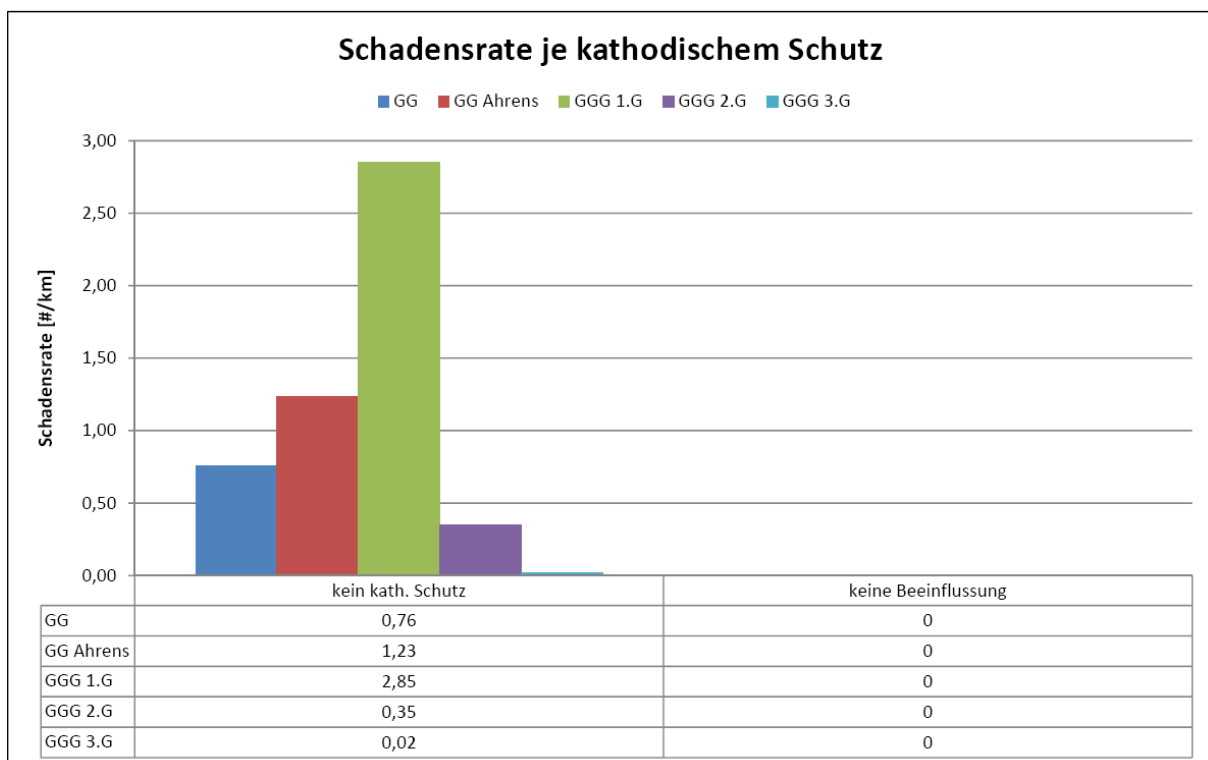
Bei einem Teil der Trinkwasserleitungen wurde in den letzten Jahrzehnten ein passiver kathodischer Korrosionsschutz angewendet. Dabei werden die Leitungen mit einem unedlen Metall (z.B. Zink) beschichtet, welches bei Streustrom im Boden zuerst

von Korrosion befallen wird. Das Leitungsmaterial wird erst von Korrosion befallen wenn das Schutzmetall vollständig aufgelöst ist. Durch diese Methode kann die Lebensdauer eines Rohres erheblich verlängert werden.

Im Konzept Risikoanalyse der Stadtwerke des Netzes B wurde ein 30 Meter Pufferbereich um alle kathodisch geschützten Gasleitungen gelegt. Haupt- und Zubringerleitungen, welche in diesem Pufferbereich liegen und nicht über einen passiven Korrosionsschutz verfügen, fallen in die Gruppe „kein kathodischer Schutz“. Alle Leitungsabschnitte, die nicht in diesem Puffer liegen oder über einen passiven Schutz verfügen, werden bei diesem Indikator der Gruppe „keine Beeinflussung“ zugeteilt.

Die meisten Schäden und die höchsten Schadensraten liegen bei Duktigussleitungen der ersten Generation vor. Bei dieser Gruppe gibt es statistisch 2,85 Schäden pro Leitungskilometer.

Bei den Abschnitten ohne kathodischen Schutz werden je nach Schadensrate ein bis fünf Punkte vergeben. Alle Leitungen ohne Beeinflussung und mit kathodischem Schutz erhalten in der Berechnung keinen Punkt.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
vorhanden	<	<	<	<	≥
max Wert 2,85	kein Schaden	0,71	1,43	2,14	2,14

Tabelle 52: Schadensraten nach dem kathodischen Schutz und die Punkteverteilung

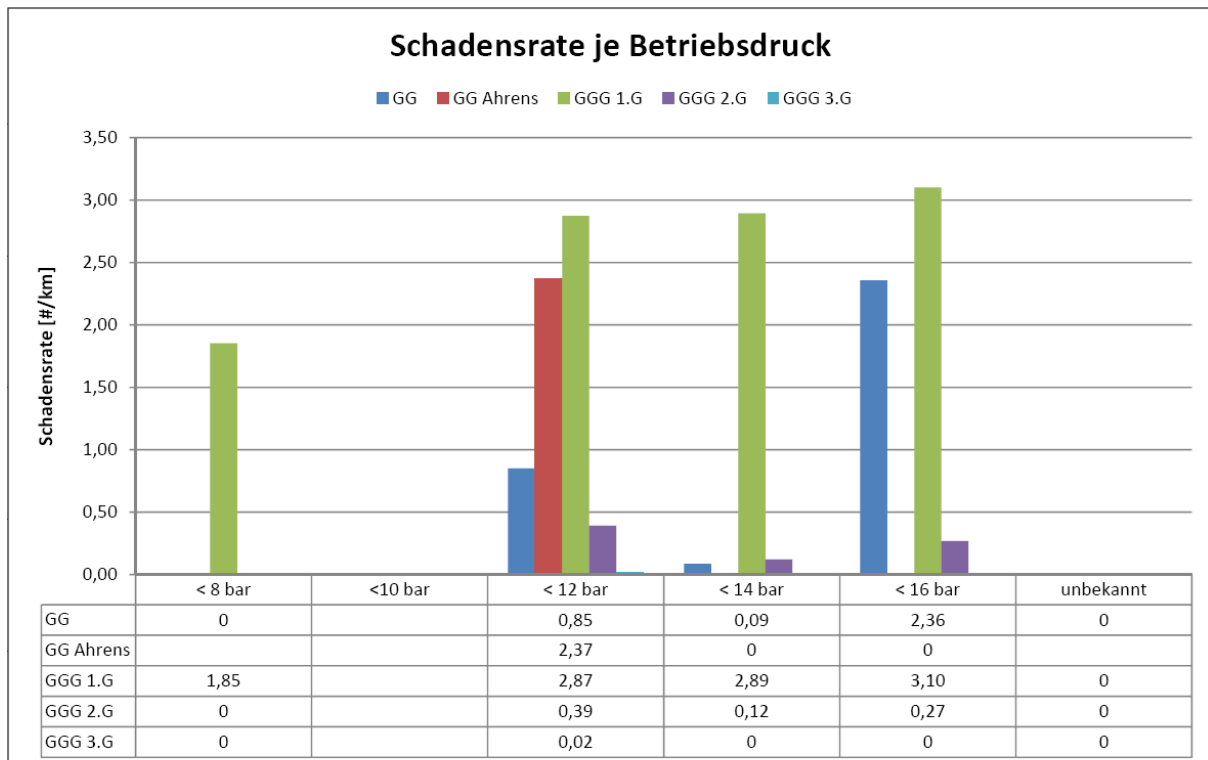
6.2.1.10 Betriebsdruck

Im Netzwerk haben alle Leitungen einen Innendruck von 7,3 bis 14,7 bar, sofern ein Leitungsdruck bekannt ist. Die Druckzonen wurden in fünf Gruppen mit jeweils zwei bar, von acht bis 16 bar, unterteilt. Abschnitte mit einem unbekanntem Wasserdruck erhalten eine eigene Gruppe. Bei der Druckstufe acht bis zehn bar sind allerdings keine Leitungsabschnitte enthalten.

Der Betriebsdruck beansprucht das Rohrmaterial von innen. Über die Jahrzehnte der Liegedauer werden die Materialeigenschaften immer schlechter, womit bei größerem Innendruck auch die Gefahr des Versagens des Materials zunimmt. Zusätzlich führt ein hoher Betriebsdruck bei Schadensfällen zu größerem Wasseraustritt und somit zu einem höheren Schadensausmaß.

Die höchste Schadensrate liegt in der Gruppe des größten Drucks. Die Duktilgussleitungen der ersten Generation weisen bei dieser Eigenschaft 3,10 Schäden pro Leitungskilometer auf.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 3,10	kein Schaden	0,78	1,55	2,33	2,33

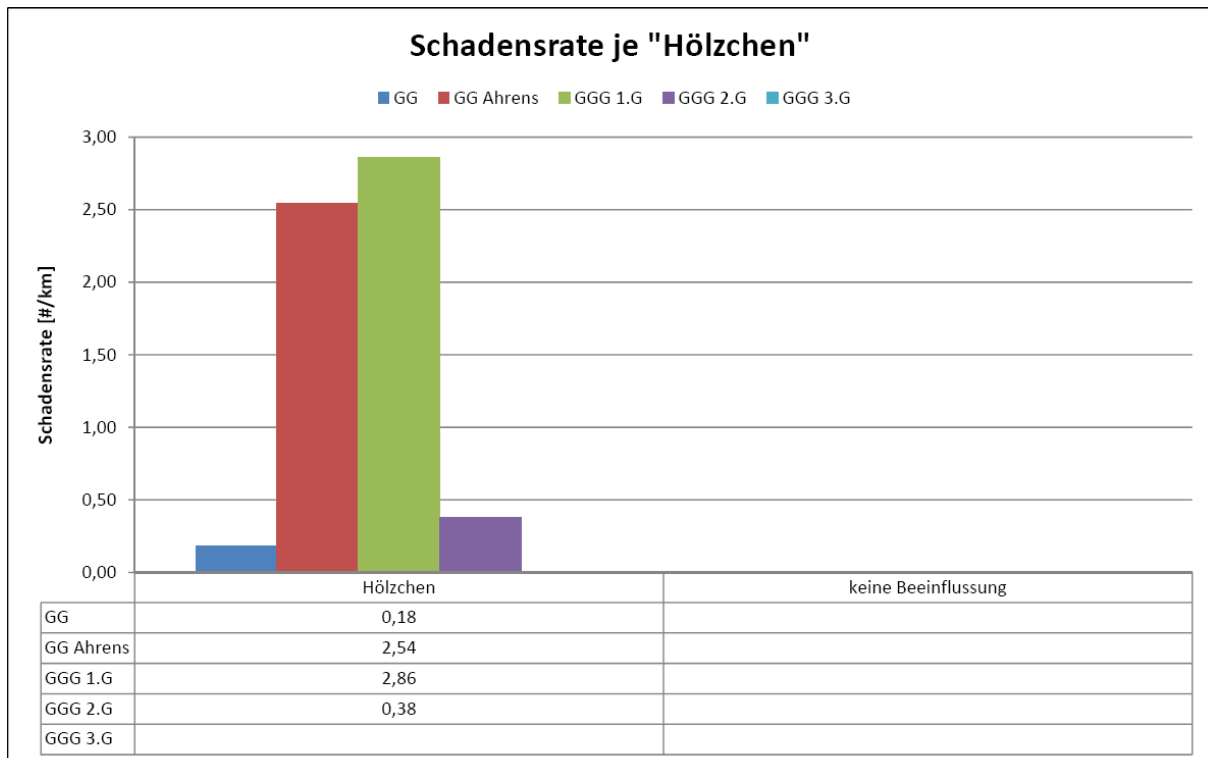
Tabelle 53: Schadensraten nach dem Betriebsdruck und die Punkteverteilung

6.2.1.11 „Hölzchen“

Vom Beginn des Haupt- und Zubringerleitungsnetzes 1870 bis ins Jahr 1989 wurden bei der Verlegung unter den Rohrleitungen Holzteile eingelegt. Diese Hölzchen sollten der leichteren Ausrichtung der Leitungen dienen, allerdings verblieben diese Teile im Bettungsbereich. Zur Anwendung kamen diese Stücke bei den Graugussleitungen und bei den ersten beiden Generationen der Duktigussrohre. Heute führen die Holzstücke an den Kontaktstellen mit den Rohren zu vielen Korrosionsschäden.

Grauguss Ahrens und GGG der ersten Generation haben ähnlich hohe Schadensraten und erhalten beide fünf Punkte für die Berechnung. Bei den Grauguss und Duktigussrohren der zweiten Generation wurden jeweils zwei Punkte vergeben.

Bei allen anderen Materialien wurden keine Hölzchen unter die Leitungen gelegt, somit werden diese mit null Punkten bewertet, da keine Beeinflussung im Bezug auf Korrosion vorhanden ist.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 2,86	kein Schaden	0,72	1,43	2,15	2,15

Tabelle 54: Schadensraten nach „Hölzchen“ und die Punkteverteilung

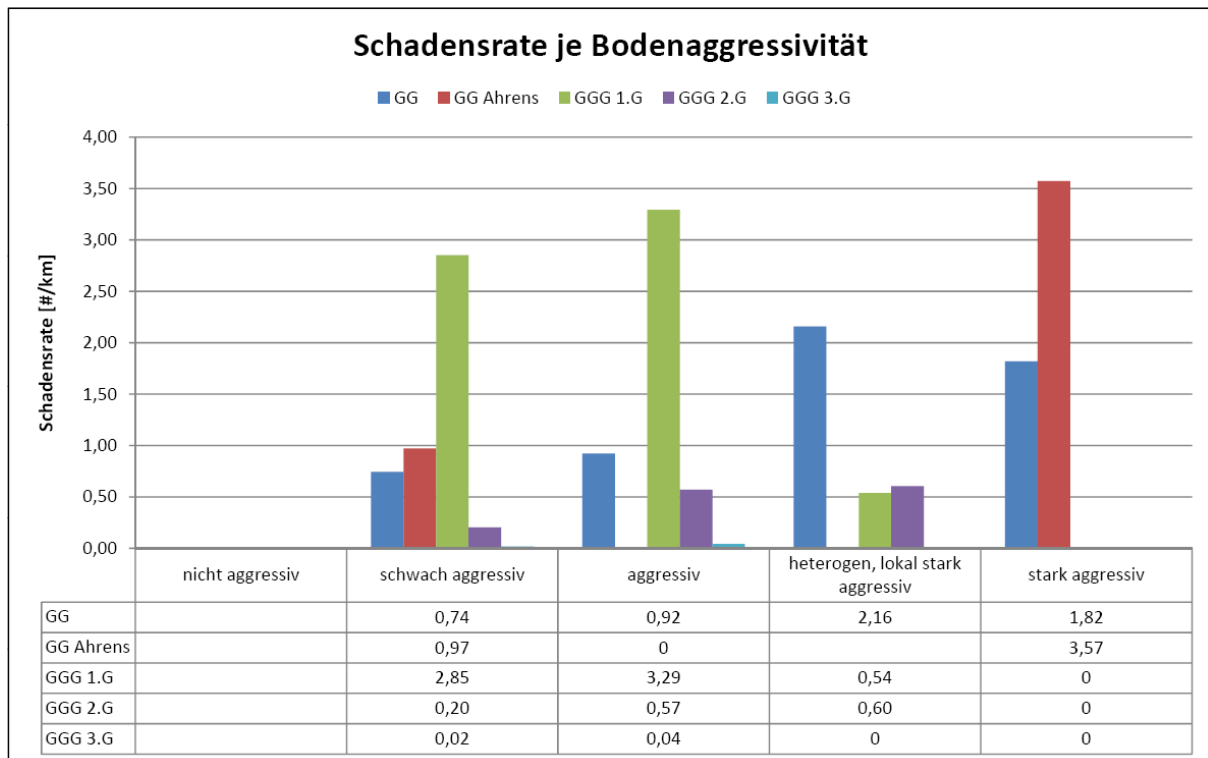
6.2.1.12 Bodenaggressivität

Die Bodenaggressivität wurde im Auftrage der zuständigen Stadtwerke über geologische Karten und Gutachten, sowie über das Baugrundarchiv erhoben und digitalisiert. Die Gruppeneinteilung erfolgte in fünf Unterteilungen von nicht aggressiv bis stark aggressiv.

Die höchsten Schadenswerte sind bei Grauguss Ahrens Leitungen in stark aggressiven Böden aufgetreten. Bei Duktigussrohren der ersten Generation traten in den Gruppen schwach aggressiv und aggressiv ähnlich hohe Schadensraten auf.

Leitungsabschnitte in nicht aggressiven Boden wurden wegen fehlender Beeinflussung mit null Punkten versehen.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 3,57	kein Schaden	0,89	1,79	2,68	2,68

Tabelle 55: Schadensraten nach der Bodenaggressivität und die Punkteverteilung

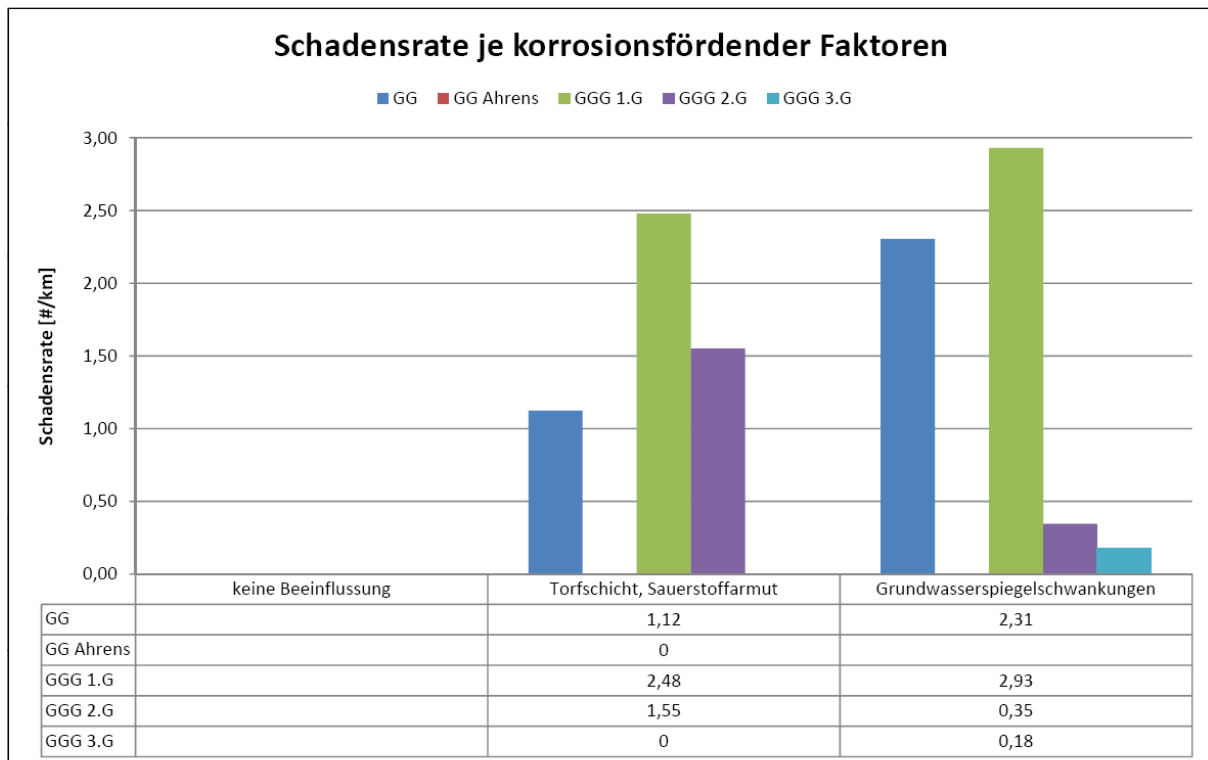
6.2.1.13 Korrosionsfördernde Faktoren

Als korrosionsfördernd wurden die Eigenschaften von Grundwasserspiegelschwankung und Torfschichten festgehalten. Bei wechselnden Grundwasserspiegeln in einer Tiefe von nur ein bis zwei Metern werden die Rohrleitungen wechselweise nass und trocken, wodurch die Bildung von Korrosionsschäden gefördert wird. In torfähnlichen Böden herrscht im Allgemeinen Sauerstoffarmut. Dadurch bekommen der Boden und das Porenwasser einen niedrigeren pH-Wert, mit der Folge, dass sich ein korrosionsfreundliches Milieu ausbildet.

In beiden Gruppen entfallen die meisten Schäden pro Kilometer auf die Leitungen aus Duktiguss der ersten Generation.

Leitungsabschnitte mit fehlender Beeinflussung sind mit null Punkten bewertet.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 2,93	kein Schaden	0,73	1,47	2,20	2,20

Tabelle 56: Schadensraten nach den korrosionsfördernden Faktoren und die Punkteverteilung

6.2.1.14 Baumstandorte

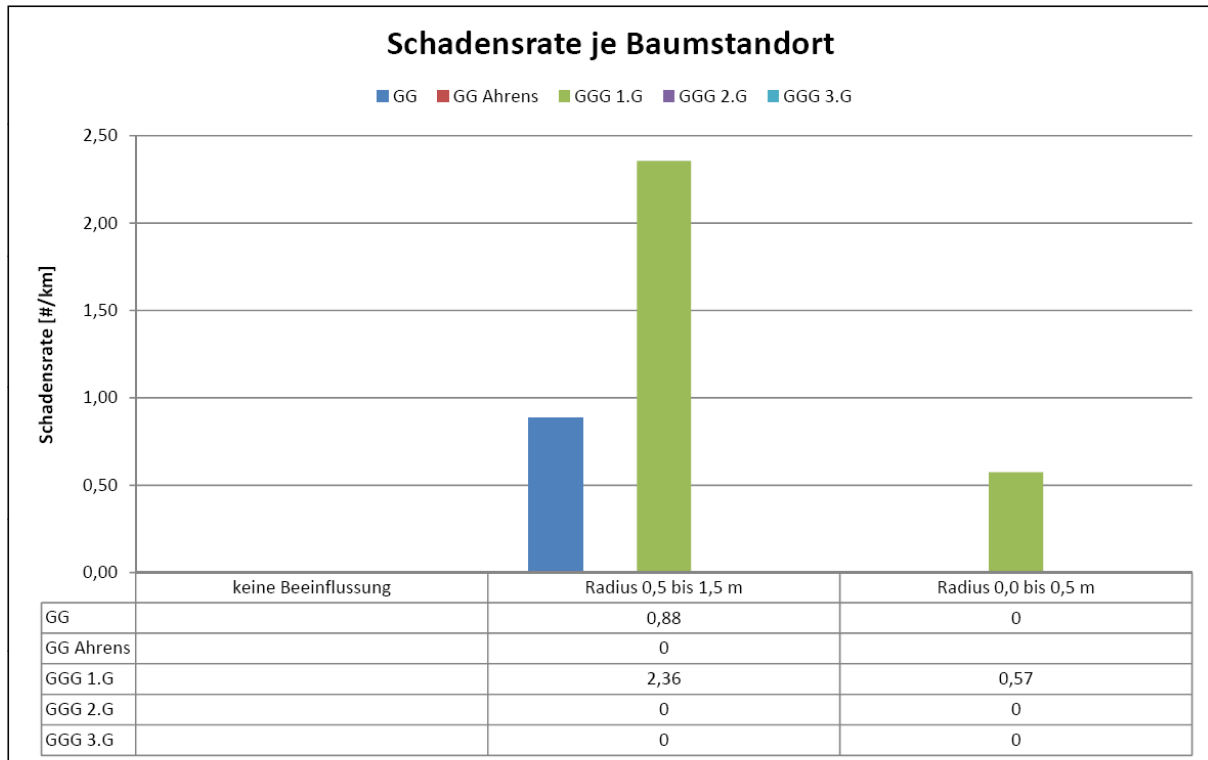
Pflanzen, vor allem tiefwurzelnde Bäume, können mit ihren Wurzeln Beschädigungen an Leitungen verursachen. Bei Kanälen ist dieses Phänomen bereits ausreichend dokumentiert, aber auch bei Trinkwasserleitungen sind Schäden durch Pflanzenwurzeln bekannt.

Im Konzept Risikoanalyse des Netzes B wurden die Baumstandorte in zwei Gruppen unterteilt. Jeder Baum erhielt zwei Kreise, einen mit 0,5 m und einen mit 1,5 m, die als Pufferflächen dienen. Befindet sich ein Leitungsabschnitt innerhalb einer dieser Flächen, so wird er mit der jeweiligen Gruppeneigenschaft versehen. Als Zusatzinformation wurden alle Bäume nach ihrer Höhe und der Kronenbreite aufgenommen und in der Datenbank unterschieden.

Bei der Analyse der Korrosions-Schäden wurden bislang nur Leitungsabschnitte aus Grauguss und Duktiguss der ersten Generation mit der Beeinflussung von Baumstandorten festgestellt, wobei bei GGG Leitungen der ersten Generation mit 2,36 Schäden pro Kilometer die stärksten Auswirkungen zu verzeichnen sind.

Die Abschnitte der beiden Materialien werden nach ihren jeweiligen Schadensraten mit zwei bis fünf Punkten in die FRI Berechnung eingetragen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt,

jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Leitungsabschnitte ohne Beeinflussung von Bäumen werden mit null Punkten gewertet.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 2,36	kein Schaden	0,59	1,18	1,77	1,77

Tabelle 57: Schadensraten nach den Baumstandorten und die Punkteverteilung

6.2.1.15 Streustrom Straßenbahn

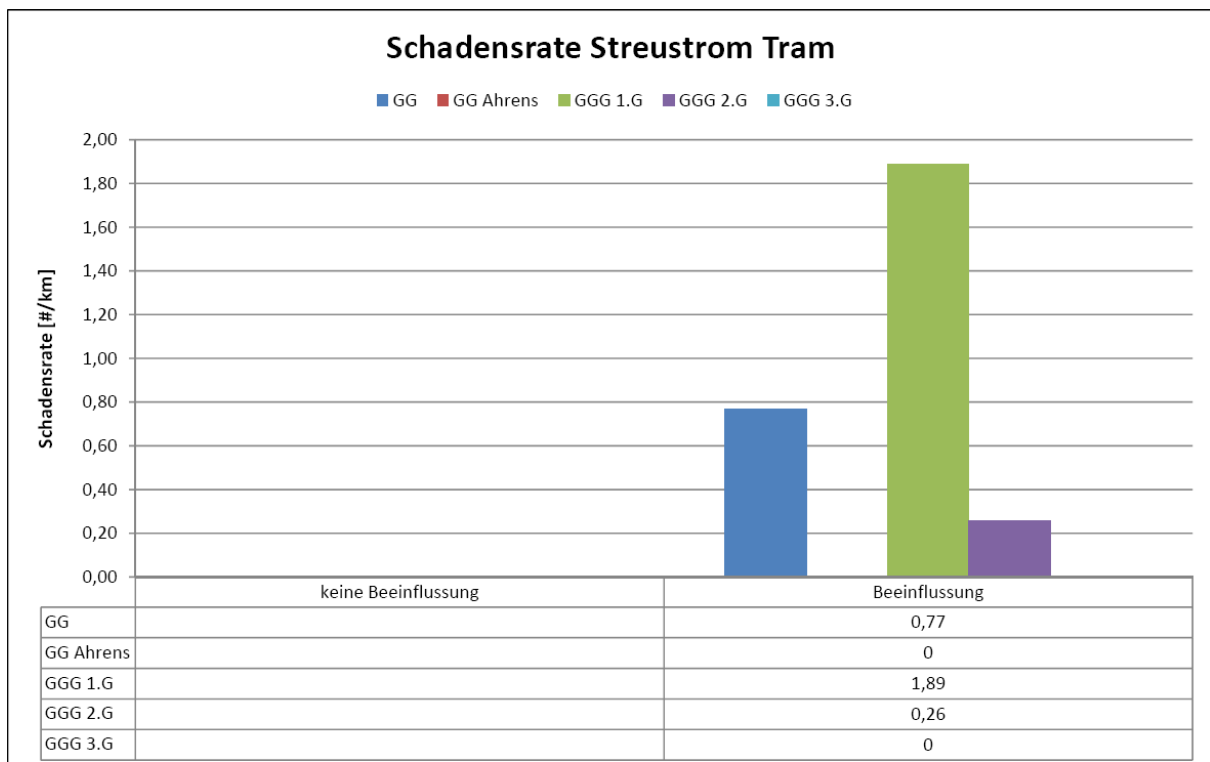
Bei elektrischen Gleichstrombahnen, wie etwa Straßenbahnen, wird durch den Fahrbetrieb ein Streustrom an den Gleiskörpern abgegeben und im Idealfall zu Unterwerken zurückgeleitet. Da Strom aber den Weg des geringsten Widerstandes wählt und der Gleiskörper elektrisch leitend mit dem Erdreich verbunden ist, kann sich ein Streustrom zwischen Gleisen und metallischen Leitungsträgern im Umfeld ausbilden.

Im Leitungsnetz B sind alle Leitungsabschnitte, die innerhalb von 30 Metern ab der nächsten Gleisachse und 400 Meter entlang der Gleise ab dem nächsten Unterwerk liegen, als streustromgefährdet definiert und in der Datenbank in der Gruppe „Beeinflussung“ festgehalten.

Leitungen aus nicht korrosionsanfälligen Materialien wurden ebenso wie Abschnitte außerhalb des Einflussbereiches der Streuströme der Straßenbahn mit null Punkten in die Berechnung einbezogen. Die korrosionsanfälligen Rohrleitungen erhalten je

nach Schadensrate zwei bis fünf Punkte. Den Materialien in der Tabelle mit dem Zahlenwert „Null“ wird in der Berechnung ein Punkt zugewiesen, da hier zwar Leitungen in der Nähe von Straßenbahnen liegen, allerdings noch kein Schaden aufgetreten ist.

Am anfälligsten für Streuströme der Straßenbahn sind die Leitungen der ersten Duktiguss-Generation.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 1,89	kein Schaden	0,47	0,95	1,42	1,42

Tabelle 58: Schadensraten nach Streustrom Straßenbahn und die Punkteverteilung

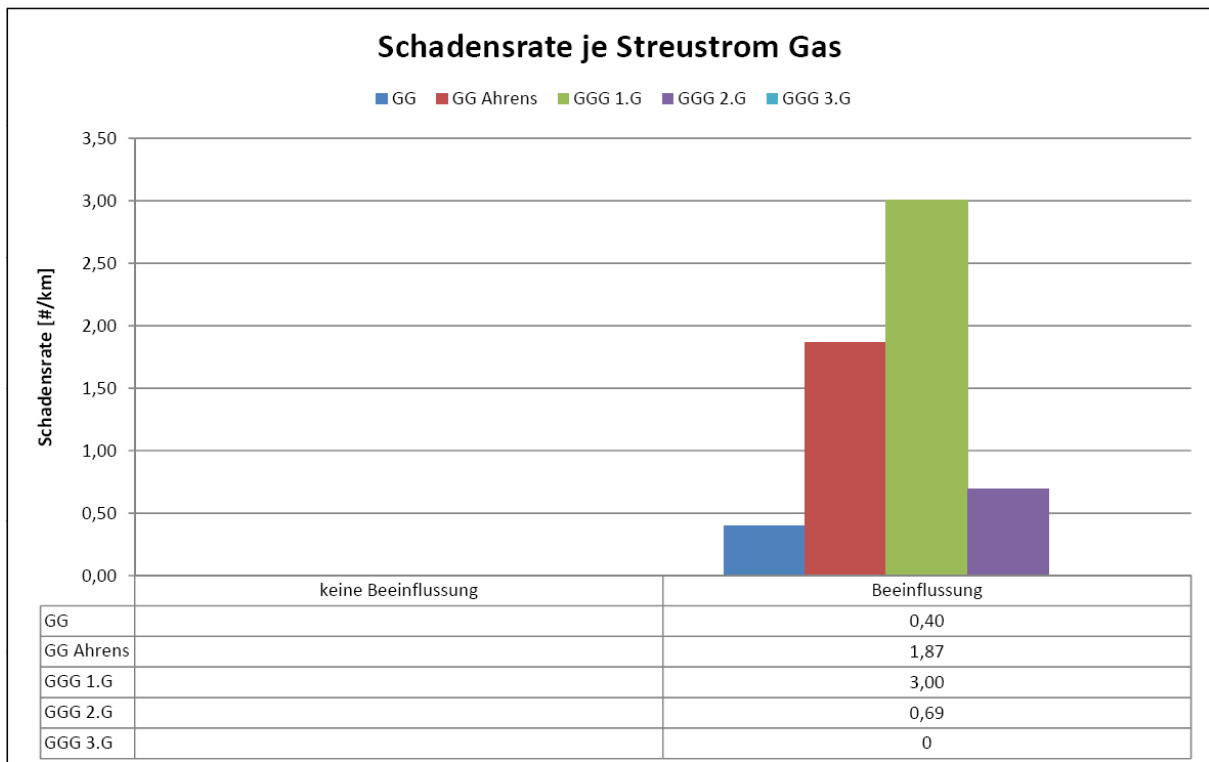
6.2.1.16 Streustrom Gas

Gasleitungen aus Metall haben meist einen kathodischen Korrosionsschutz. Dabei wird an der Gasleitung eine Spannung angelegt – im Regelfall zwei Volt Gleichstrom. Treten Beschädigungen an der Beschichtung des Gasrohres auf, kann eine nahe gelegene Wasserleitung aus Metall als Opferanode dienen. Dadurch können vermehrt Korrosionslöcher entstehen.

Um alle Gasleitungen wurde links und rechts der Leitungsachse ein 30 Meter Puffer gelegt. Jene Transportleitungen, die innerhalb dieses Sicherheitsbereichs liegen, gelten für den weiteren Verlauf als von „Streustrom Gas“ beeinflusst.

Leitungsabschnitte, die nicht in der Nähe von Gasleitungen liegen, erfahren durch diese auch keine Beeinflussung, darum werden hier null Punkte vergeben. Bei allen Abschnitten in der Nähe von Gasleitungen wurden je nach Schadensrate zwei bis fünf Punkte für die Kalkulation vergeben. Duktigussleitungen der dritten Generation erhalten in der Berechnung einen Punkt, da hier zwar Leitungen in der Nähe von Straßenbahnen liegen, allerdings noch keine Schäden aufgezeichnet wurden.

Den höchsten Schadenswert verzeichnen die GGG Rohre der ersten Generation mit 3,00 Schäden pro Leitungskilometer.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 3,00	kein Schaden	0,75	1,50	2,25	2,25

Tabelle 59: Schadensraten nach Streustrom Gas und die Punkteverteilung

6.2.2 Indikatoren Schadensausmaß

Das Schadensausmaß stellt die Konsequenzen von Schadensfällen dar. Dabei werden verschiedene Aspekte eines Leitungsschadens berücksichtigt. Zum einen ergeben sich für den Netzbetreiber Erschwernisse und zusätzliche Kosten, die verursacht werden können. Dazu zählen unter anderem die erforderlichen Bauarbeiten, Wasserverluste und die mögliche Installation einer Ersatzwasserversorgung. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang auch der Imageverlust des Unternehmens.

Auf der anderen Seite wird auch die unmittelbare Umgebung einer Schadstelle negativ beeinflusst. Dazu zählen beispielsweise Behinderungen für Passanten, Staubbildungen und Verzögerungen auf den Straßen rund um den Schadensort, Schäden bei anderen Leitungsinfrastrukturen oder auch kleinräumige Überschwemmungen mit Schäden an Gebäuden und Fahrzeugen.

Beim Leitungsnetz B konnten sechs Indikatoren für das Schadensausmaß bzw. die Konsequenzen definiert werden. Die Gewichtung der Indikatoren erfolgte mittels Experteneinschätzung, wodurch eine subjektive Bewertungsmethode Anwendung fand.

	Indikator	Punkte
Schadensausmaß	Baumstandorte	1 - 5
	Oberflächenbefestigung	1 - 2
	Gasleitungen	0 - 5
	Verkehrsbelastung	0 - 5
	Straßenbahnen	0 - 5
	Betriebsdruck	0 - 5

Tabelle 60: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes

Die in Tabelle 60 dargestellten Indikatoren werden im Folgenden beschrieben und ihre Schadensraten und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

6.2.2.1 Baumstandorte

Bäume, die direkt über oder knapp neben Wasserleitungen gepflanzt wurden, können zu erheblichen Erschwernissen bei der Behebung von Leckagestellen führen. Je nach dem Abstand zur Leitungsachse wurden die Punkte in drei Gruppen vergeben.

Bäume	Punkte Bäume
keine	0
0,5 bis 1,5 m	3
0,0 bis 0,5 m	5

Tabelle 61: Bewertungsgruppen der Baumstandorte

6.2.2.2 Oberflächenbefestigung

Die Oberflächenbefestigung stellt die Erschwernisse bei den Reparaturarbeiten und den Kostenunterschied bei den Grabungsarbeiten und der Wiederherstellung dar. Für die Berechnung wurde in „Straße“ und „unbefestigt“ unterschieden. Wobei bei unbefestigter Oberfläche null Punkte vergeben wurden und bei befestigten Flächen fünf Punkte.

Oberflächenbefestigung	Punkte Oberflächenbefestigung
keine Straße	0
	5

Tabelle 62: Bewertungsgruppen der Oberflächenbefestigung

6.2.2.3 Gasleitungen

Bei Schäden sind nicht nur die Wasserleitungen selbst betroffen, sondern auch das Erdreich rund um die Schäden und somit auch andere Leitungsträger, die nahe an den Schadstellen verlegt sind. Beim Leitungsnetz B wurden lediglich Gasleitungen aufgenommen, andere Leitungsträger wurden nicht berücksichtigt.

Sind Gasleitungen bei dem jeweiligen Haupt- und Zubringerleitungsabschnitt vorhanden, werden fünf Punkte vergeben, ansonsten null Punkte.

Gasleitungen	Punkte Gasleitungen
keine Gasleitungen	0
	5

Tabelle 63: Bewertungsgruppen der Gasleitungen

6.2.2.4 Verkehrsbelastung

Hauptstraßen über Leitungsabschnitten stellen für die Reparatur von Schäden eine erhebliche Erschwernis dar. Zum einen müssen die Bauarbeiten meist unter beengten Platzverhältnissen und unter Zeitdruck stattfinden, um eine Behinderung möglichst gering und von kurzer Dauer zu halten.

Zum anderen werden Passanten und Autofahrer immer behindert, womit sich für Fußgänger Umwege und für Autofahrer Staus ergeben. Je nach der Stärke des Verkehrsaufkommens werden ein bis fünf Punkte vergeben.

Bei Leitungsabschnitten abseits von Straßen werden keine Punkte für die Berechnung vergeben.

Verkehrsbelastung	Punkte Verkehrsbelastung
keine	0
sehr schwach bis schwach	1
durchschnittlich	2
überdurchschnittlich	3
stark	4
sehr stark	5

Tabelle 64: Bewertungsgruppen der Verkehrsbelastung

6.2.2.5 Straßenbahnen

Schwieriger als beim herkömmlichen Straßenverkehr stellt sich die Lage beim schieneengebundenen öffentlichen Verkehr dar. Schäden, die durch Wasseraustritt die Gleislage gefährden, ziehen die Einstellung des Schienenverkehrs nach sich. Für das Verkehrsunternehmen ergeben sich dadurch Mehrkosten und Mehraufwand für die Einrichtung eines Schienenersatzverkehrs.

Straßenbahnen	Punkte Straßenbahnen
keine Tram	0 5

Tabelle 65: Bewertungsgruppen der Straßenbahnen

6.2.2.6 Betriebsdruck

Bei ansteigendem Betriebsdruck tritt auch mehr Wasser aus Schädstellen aus (Friedl, 2012). Dadurch steigt auch das Schadensausmaß an. Je höher der Druck in den Leitungen, desto mehr Punkte wurden vergeben, wobei bei unbekanntem Druck auch fünf Punkte verteilt wurden.

Betriebsdruck	Punkte Betriebsdruck
< 8 bar	1
< 10 bar	2
< 12 bar	3
< 14 bar	4
< 16 bar	5
unbekannt	5

Tabelle 66: Bewertungsgruppen des Betriebsdrucks

6.2.3 Gewichtung der Indikatoren

6.2.3.1 Gewichtung der Schadenswahrscheinlichkeits - Indikatoren

Die Bestimmung der Indikatorgewichtung erfolgte innerhalb der Schadenwahrscheinlichkeit über die SR.

Alle Indikatoren, die für die jeweilige Leitung einen Wert aufweisen, erhalten die maximale Schadensrate des jeweiligen Indikators aus der Schadensratenanalyse. Alle Indikatoren, die für den jeweiligen Leitungsabschnitt nicht vorhanden sind, erhalten weder einen Punktwert noch eine Schadensrate.

Für die Berechnung der Gewichtungen werden alle maximalen SR einer Leitung aufsummiert. Dieser Summenwert ist für jeden Leitungsabschnitt unterschiedlich, da es bei jedem Abschnitt zu einer unterschiedlichen Zusammenstellung der Indikatoren kommt.

Der Summenwert wird an dieser Stelle als Ausgangswert mit 100 Prozent gleichgesetzt. Die maximalen SR der einzelnen Indikatoren werden dann als Prozentwert von dem Summenwert neu dargestellt.

6.2.3.2 Gewichtung der Schadensausmaß - Indikatoren

Bei den Indikatoren des Schadensausmaßes bestand die Möglichkeit der Gewichtung über Schadensraten nicht. Um dennoch keine rein lineare Verteilung der Gewichtungen zu erhalten, wurde ein Indikator als Leitindikator ausgewählt. Dieser Indikator wurde in seiner Gewichtung mittels Sensitivitätsanalyse variiert. Die restlichen

Indikatoren jedes Leitungsabschnittes wurden linear in die Berechnung aufgenommen.

Im Falle des Haupt- und Zubringerleitungsnetzwerkes B für die Schadensart Korrosion fiel die Wahl des Leitindikators auf die „Verkehrsbelastung“. Der Leitindikator des Leitungsabschnitts erhielt dabei als Gewichtung 60 Prozent des Schadensausmaßes.

Die restlichen 40 Prozent wurden, je nach Vorhandensein der einzelnen Indikatoren bei jedem Leitungsabschnitt, linear verteilt.

6.2.4 Berechnungsergebnisse Korrosion

6.2.4.1 Gesamtergebnis FRI Korrosion

Die Zusammenführung der in Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 beschriebenen Indikatoren und deren Gewichtungen führen zu einer umfangreichen Berechnungstabelle.

Das Ergebnis aller Leitungsabschnitte von Grauguss und Duktiguss für die Berechnung Failure Risk Index Korrosion kann aus Tabelle 67 und Abbildung 20 entnommen werden. Dabei wird nicht nach den Materialien unterschieden.

Die im Vorfeld getroffenen Annahmen und Einteilungen führen zum Ergebnis, dass 4.525 Leitungsabschnitte einen Failure Risk Index von „eins“ haben. Das sind 31,72% aller im Haupt- und Zubringerleitungsnetz B befindlichen Leitungsabschnitte.

Eine Bewertung von „zwei“ erhalten 7.750 Leitungsabschnitte oder 54,32% aller Abschnitte.

Für das Netz B können damit circa 86% aller für Korrosion anfälligen Leitungen – Grauguss und Duktiguss aller drei Generationen - als unbedenklich, im Sinne der FRI Korrosion Bewertung, angesehen werden.

Bei 1.272 Abschnitten ergab die Berechnung einen FRI von „drei“, das sind 8,92% der verlegten Leitungen. Ab der Bewertung von „drei“ kann eine verstärkte Instandhaltung der Leitungen sinnvoll werden.

Für 676 Leitungen wurde ein Wert von „vier“ und für 43 Abschnitte wurde ein FRI von „fünf“ berechnet. Gerade einmal fünf Prozent der Leitungen im Haupt- und Zubringerleitungsnetz B entfallen damit auf die schlechtesten beiden Bewertungsgruppen.

Mit dieser Auswertung konnten 14.266 der insgesamt 16.279 Leitungsabschnitte eine Bewertung für den FRI Korrosion erhalten. Die restlichen 2.013 Leitungsabschnitte entfallen auf Materialien wie z.B. Beton oder Kunststoff und sind daher nicht für Korrosion anfällig und werden auch nicht bewertet.

Failure Risk Index Korrosion	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	4.525	31,72
2	7.750	54,32
3	1.272	8,92
4	676	4,74
5	43	0,30

Tabelle 67: Verteilung des FRI Korrosion für alle Leitungsabschnitte

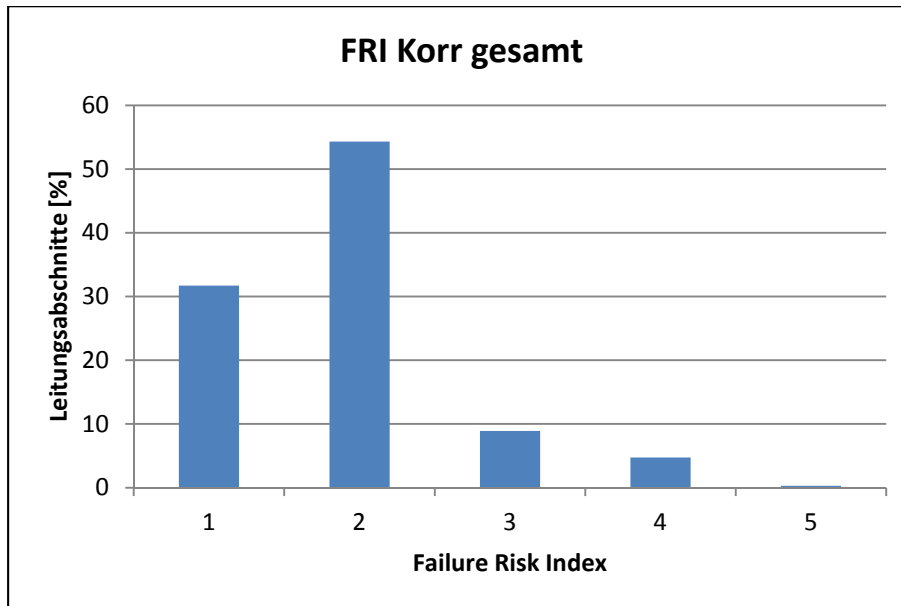


Abbildung 21: Verteilung des FRI Korrosion für alle Leitungsabschnitte

1.675 Leitungsabschnitte wurden in der Berechnung mit einer Schadenswahrscheinlichkeit von größer als „vier“ ermittelt. Im Bereich des Schadensausmaßes gibt es 1.780 Leitungen mit einer Bewertung von größer als „vier“. In den zwei Teilbereichen lässt sich eine große Anzahl von Leitungen ermitteln, die entweder eine große Wahrscheinlichkeit oder eine große Konsequenzen haben. Aber nur ein kleiner Anteil aller Leitungen hat sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß.

Damit kann sich die Instandhaltung des Wasserwerkes auf einen kleinen Teil der Leitungen konzentrieren und dort verstärkt auf den Zustand achten. Durch den FRI Korrosion kann bereits im Vorfeld die passende Methode zur Instandhaltung ausgewählt und verwendet werden.

Die fünf vorliegenden Materialien haben jedoch die unterschiedlichsten Schadensanfälligkeiten gegenüber Korrosion, wodurch eine Betrachtung und Analyse für jedes Material einzeln notwendig ist. Im Folgenden werden die im Leitungsnetz

B verlegten Materialien mit Schäden durch Korrosion im Hinblick auf die Ergebnisse der FRI Berechnung gesondert dargestellt.

6.2.4.1.1 Betrachtung der Leitungen mit Vorschäden

Leitungsabschnitte mit Vorschäden bilden einen zentralen Bestandteil in dieser Berechnung. Einerseits treten auf diesen Abschnitten, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, mit großer Wahrscheinlichkeit erneut Schäden auf, andererseits erhält der Indikator „Vorschäden“ einen sehr hohen Anteil an der Gewichtung aller Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

Null Leitungen mit einem Vorschaden fallen in die FRI Gruppe eins. 31 Leitungen mit Vorschaden werden in die Gruppe zwei eingereiht. Auf Bewertungsgruppe drei entfallen 119 Abschnitte, das sind bereits neun Prozent der Leitungen dieser Gruppe. 15% der Leitungen mit einem FRI von „vier“ und rund 35% der Leitungen mit einem FRI von „fünf“ hatten bereits einen Vorschaden.

Mit diesem Ergebnis wurden die Annahmen bezüglich der ausgehenden Gefahr von Vorschäden sehr gut abgebildet.

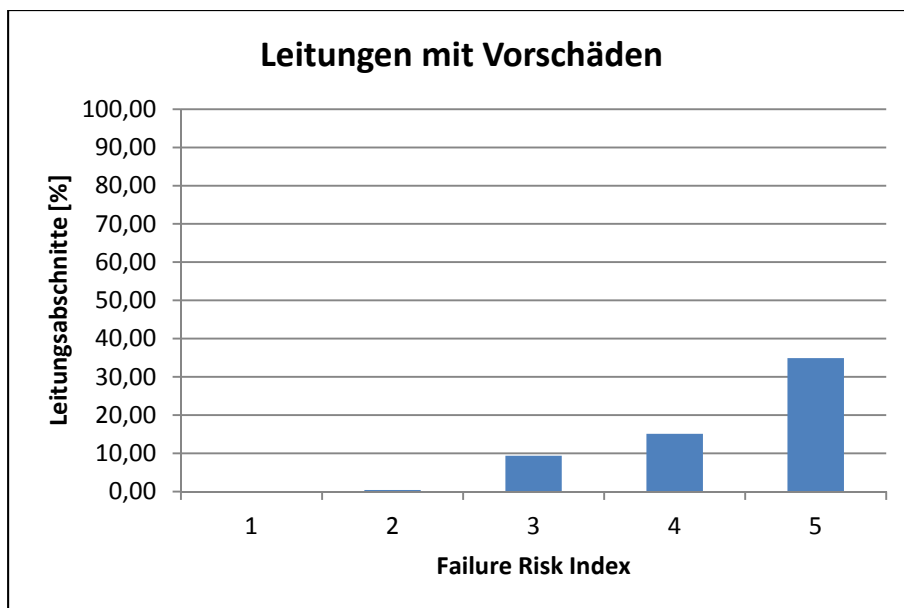


Abbildung 22: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe

Für eine schlechte FRI Bewertung eines Leitungsabschnittes ist es erforderlich, sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß aufzuweisen. Daher fallen auch Leitungsabschnitte mit einer hohen Schadenswahrscheinlichkeit in die ersten drei FRI Bewertungsgruppen.

6.2.4.2 Rohrmaterial Grauguss

Graugussleitungen (GG) wurden seit Beginn des Wasserversorgungsnetzwerks verwendet. 1.725 Abschnitte mit einer Länge von 58,23 Kilometern sind davon in Verwendung.

Leitungen aus diesem Material sind von 44 Korrosionsschäden betroffen. 0,76 Schäden pro Kilometer Leitung sind daher dokumentiert, dementsprechend hoch ist auch die Punkteverteilung bei den Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

Laut Berechnung sind nur 7,59% der Abschnitte in Gruppe eins. Der Großteil der Leitungen entfällt mit 84,23% in die Gruppe zwei. Die Gruppe drei ist mit 7,30% der Abschnitte ähnlich klein wie Gruppe zwei.

0,86% der Abschnitte wurden bei der Berechnung in die schlechtesten beiden Gruppen gereiht. 14 Anteile entfallen auf die Gruppe vier und ein Abschnitt erhält die schlechteste Bewertung von „fünf“. Alle Abschnitte der FRI Bewertung von „vier“ und „fünf“ hatten bereits Vorschäden.

Für Graugussleitungen bildet sich daher ein Mittelwert des FRI von 2,02.

Failure Risk Index Korrosion	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	131	7,59
2	1.453	84,23
3	126	7,30
4	14	0,81
5	1	0,06

Tabelle 68: Verteilung des FRI Korrosion für Grauguss

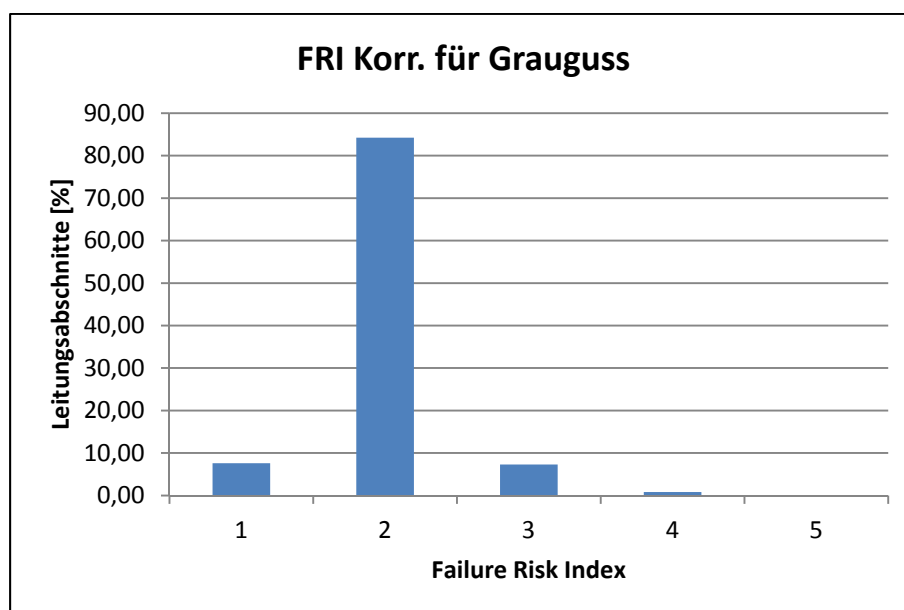


Abbildung 23: Verteilung des FRI Korrosion für Grauguss

6.2.4.3 Rohrmaterial Grauguss Ahrens

Als eigenes Material wurden Graugussleitungen der Herstellungsart Ahrens gewertet. 109 Leitungsabschnitte wurden in Grauguss Ahrens verlegt, das sind in Summe 6,48 Kilometer.

Bezogen auf den Leitungskilometer erzielt GG Ahrens eine Schadensrate von 1,24.

Nur 2,75% der Graugussleitungen Ahrens befinden sich nach den Berechnungen in der besten Gruppe des FRI. Der Gruppe zwei wurden jedoch 59,63% der Leitungsabschnitte zugeteilt. 33,94% oder 37 Abschnitte können einen Failure Risk Index von „drei“ aufweisen. In den Gruppen der FRI Bewertung von „vier“ finden sich 4 Leitungen (3,67%). Grauguss Ahrens enthält keine Leitungsabschnitte mit der schlechtesten Bewertungsgruppe fünf.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Grauguss Ahrens wurde mit 2,39 berechnet.

Failure Risk Index Korrosion	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	3	2,75
2	65	59,63
3	37	33,94
4	4	3,67
5	0	0,00

Tabelle 69: Verteilung des FRI Korrosion für Grauguss Ahrens

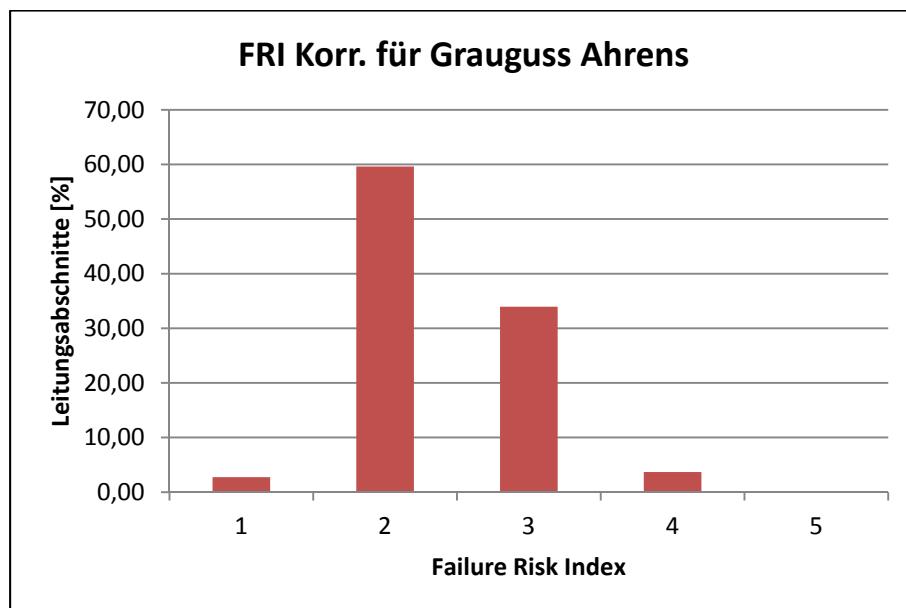


Abbildung 24: Verteilung des FRI Korrosion für Grauguss Ahrens

6.2.4.4 Rohrmaterial Duktiguss 1. Generation

Duktigussleitungen der ersten Generation (GGG 1.G) wurden in den Jahren 1950 bis 1979 im Netz verbaut. 69,09 Kilometer wurden von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 2.107 Einzelstücke.

Duktigussleitungen der ersten Generation sind unter anderem aufgrund der bituminösen Beschichtungen sehr schadensanfällig gegenüber Korrosion, wodurch sich die höchste Schadensrate von 2,85 ergibt.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befindet sich lediglich ein Leitungsabschnitt (0,05%). Auch die Gruppe zwei enthält nur 20,79% der Leitungsabschnitt von GGG 1.G. Der größte Anteil der Abschnitte, 46,27%, bekommt eine FRI-Bewertung von „drei“. Immerhin noch 30,90% der Leitungsteile aus Duktiguss der ersten Generation befinden sich in Gruppe vier. Die schlechteste Bewertung von „fünf“ erhalten 42 Abschnitte oder 1,99%.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktiguss der ersten Generation wurde mit 3,14 berechnet.

Failure Risk Index Korrosion	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	1	0,05
2	438	20,79
3	975	46,27
4	651	30,90
5	42	1,99

Tabelle 70: Verteilung des FRI Korrosion für Duktiguss 1. Generation

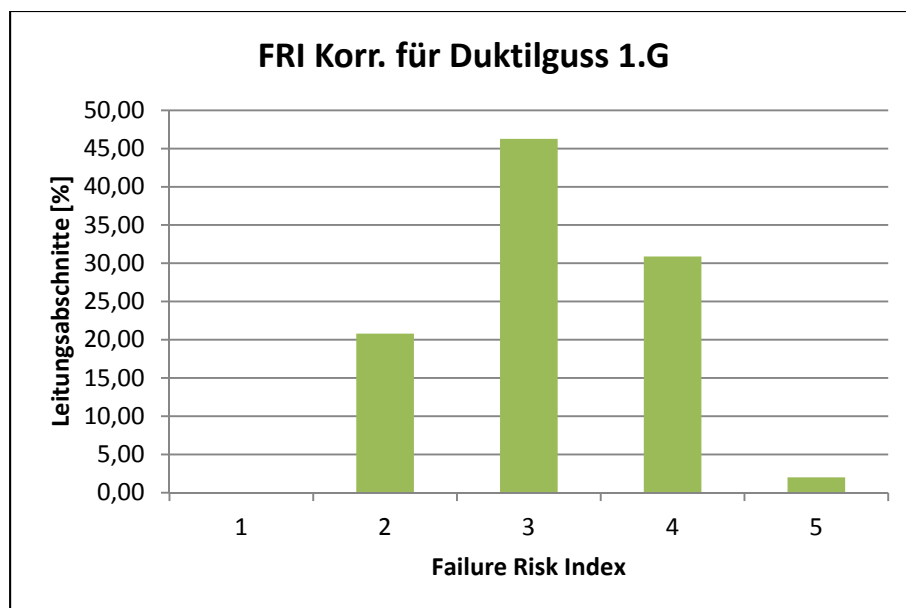


Abbildung 25: Verteilung des FRI Korrosion für Duktiguss 1. Generation

6.2.4.5 Rohrmaterial Duktiguss 2. Generation

Duktigussleitungen der zweiten Generation (GGG 2.G) wurden in den Jahren 1960 bis 1999 im Netz verbaut. 151,94 Kilometer wurden von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 5.970 Einzelstücke.

Duktigussleitungen der zweiten Generation sind unter anderem aufgrund der verbesserten Beschichtungen weniger schadensanfällig gegenüber Korrosion als Leitungen aus GGG 1.G. Die Schadensrate ergibt sich zu 0,35.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich 1.468 Leitungsabschnitte (24,59%). Die Gruppe zwei enthält mit 73,07% den Großteil der Leitungsabschnitte von GGG 2.G. Nur eine kleine Gruppe der Abschnitte, 2,23%, bekommt eine FRI-Bewertung von „drei“. Nur mehr 0,12% der Leitungsteile aus Duktiguss der zweiten Generation befinden sich in Gruppe vier. Die schlechteste Bewertung von „fünf“ enthält keine Leitungsabschnitte.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktiguss der zweiten Generation wurde mit 1,78 berechnet.

Failure Risk Index Korrosion	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	1.468	24,59
2	4.362	73,07
3	133	2,23
4	7	0,12
5	0	0,00

Tabelle 71: Verteilung des FRI Korrosion für Duktiguss 2. Generation

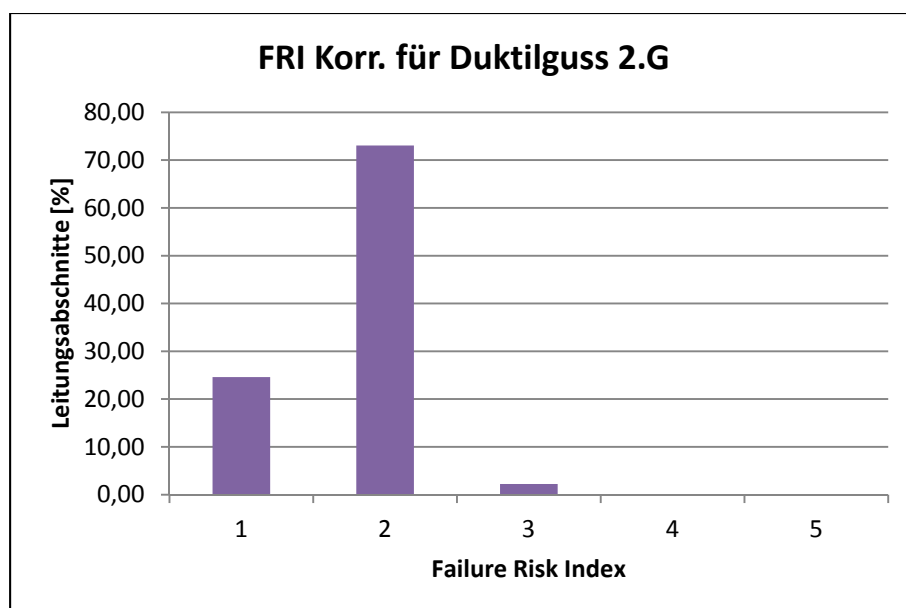


Abbildung 26: Verteilung des FRI Korrosion für Duktiguss 2. Generation

6.2.4.6 Rohrmaterial Duktilguss 3. Generation

Duktilgussleitungen der dritten Generation (GGG 3.G) werden seit 1990 im Netz verbaut. 151,94 Kilometer wurden von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 4.355 Einzelstücke.

Duktilgussleitungen der dritten Generation sind durch die hochwertigen Beschichtungen nur mehr zu sehr geringem Maße schadensanfällig gegenüber Korrosion. Die Schadensrate ergibt sich zu 0,02.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich immerhin schon 2.922 Leitungsabschnitte (67,10%). Die Gruppe zwei enthält weitere 32,88% der Leitungsabschnitte von GGG 3.G. Nur mehr ein Abschnitt, 0,02%, bekommt eine FRI-Bewertung von „drei“. In den beiden schlechtesten Bewertungsgruppen vier und fünf sind keine Leitungsabschnitte mehr vorhanden.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktilguss der dritten Generation wurde mit 1,33 berechnet.

Failure Risk Index Korrosion	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	2.922	67,10
2	1.432	32,88
3	1	0,02
4	0	0,00
5	0	0,00

Tabelle 72: Verteilung des FRI Korrosion für Duktilguss 3. Generation

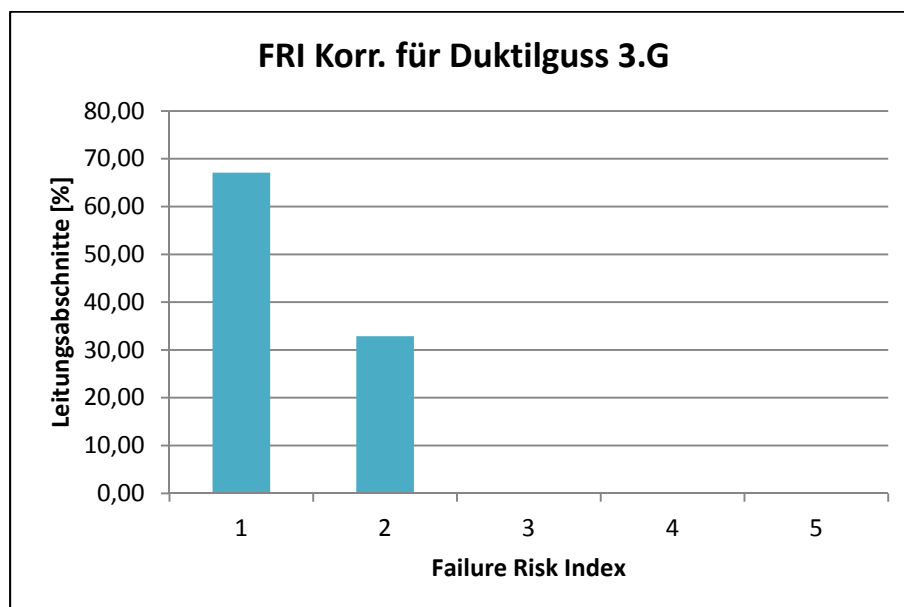


Abbildung 27: Verteilung des FRI Korrosion für Duktilguss 3. Generation

6.3 FRI Längsriss Scherbenbruch

Der Failure Risk Index für Längsriss Scherbenbruch soll die genaue Schadensanfälligkeit der Rohrleitungen auf diese Schadensart darstellen. Damit kann eine sehr viel detailliertere Aussage über den Zustand der Rohrleitungen getroffen werden, als es bei einem FRI gesamt (siehe Kapitel 5, Netz A) möglich wäre.

6.3.1 Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit

Wie bereits angeführt setzt sich die Schadenswahrscheinlichkeit aus den beiden Unterindizes Rohrleitungsparameter und Umgebungsparameter zusammen. Beim FRI Längsriss Scherbenbruch werden aus der gesamten Indikatoren-Liste die für diese Schadensart relevanten Indikatoren ausgewählt. Dabei sind einige allgemeine Indikatoren vorhanden, die bei allen Schadensarten verwendet werden. Spezielle Indikatoren für Längsrisse und Scherbenbrüche (z.B. Setzungsempfindlichkeit oder Verkehrsbelastung) machen aber den Unterschied zu anderen Auswertungen aus.

Im Unterindex Rohrleitungsparameter sind sieben Indikatoren, die die Leitung und deren Eigenschaften beschreiben vorhanden.

Die sieben Indikatoren des Unterindex Umgebungsparameter bilden den Standort, an dem der Leitungsabschnitt verlegt wurde, ab und stellen das Umfeld und die möglichen Belastungen aus diesem Bereich dar.

		Indikator des FRI Längsriss Scherbenbruch	Punkte
Schadenswahrscheinlichkeit	Rohrleitungsparameter	Material	0 - 5
		Dimension	0 - 5
		Verlegejahr	0 - 5
		Anzahl Vorschäden	0 - 5
		Verbindungsart	0 - 5
		Schubsicherung	0 - 5
		Betriebsdruck	0 - 5
	Umgebungsparameter	Setzungsempfindlichkeit	0 - 5
		Kriech- u. Rutschgebiete	0 - 5
		Schanzen, Wälle, ...	0 - 5
		Baumstandorte	0 - 5
		Verkehrsbelastung	0 - 5
		Belagszustand	0 - 5
		Mech. Belastung Tramgleise	0 - 5

Tabelle 73: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit

Die in Tabelle 73 dargestellten Indikatoren werden im Folgenden beschrieben und ihre Schadensraten und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

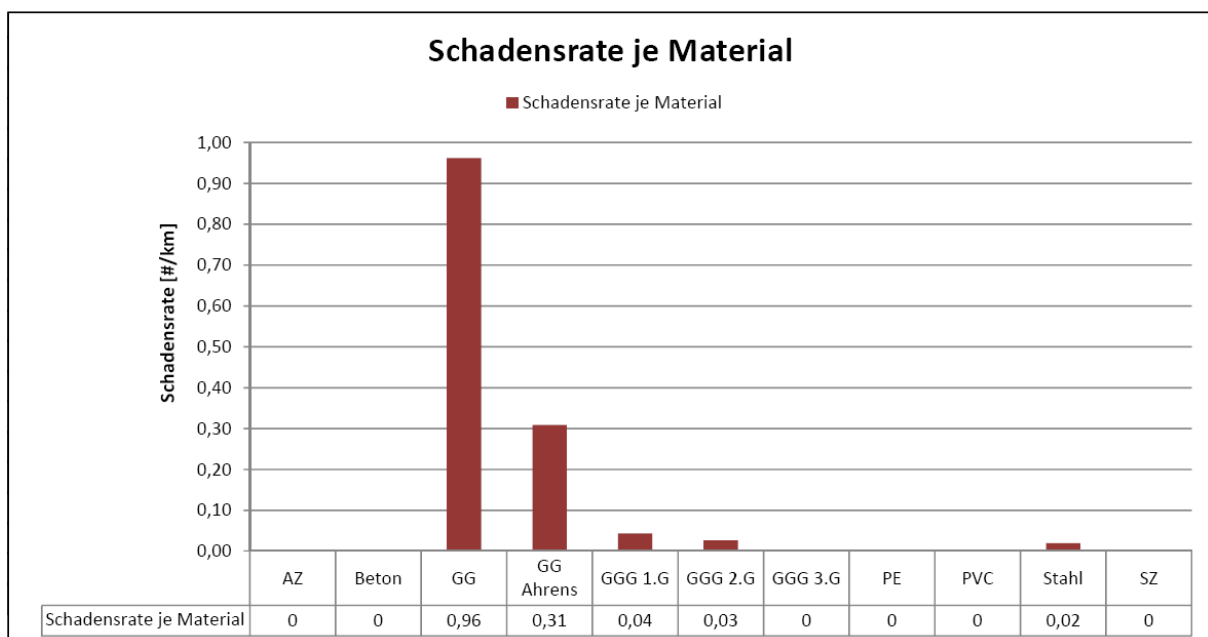
6.3.1.1 Rohrmaterial

Längsrisse und Scherbenbrüche finden sich in Netz B bis jetzt nur bei den Materialien Grauguss, Grauguss Ahrens, den ersten beiden Generationen des Duktulgusses und bei Stahl. Für diese Materialgruppen wird in weiterer Folge auch der FRI Längsriss Scherbenbruch berechnet.

Alle anderen Materialien werden wegen fehlender Schadensraten aus der weiteren Analyse ausgeschieden.

Das auf die Schadensart Längsriss Scherbenbruch anfälligste Material ist mit einer Schadensrate von 0,96 ist der Grauguss.

Die Punkte eins bis fünf wurden auf die oben genannten Materialien nach den jeweiligen Schadensraten verteilt. Alle weiteren Materialien bekommen keinen Punkt.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 0,96	0,19	0,38	0,58	0,77	0,77

Tabelle 74: Schadensraten nach Rohrmaterial und die Punkteverteilung

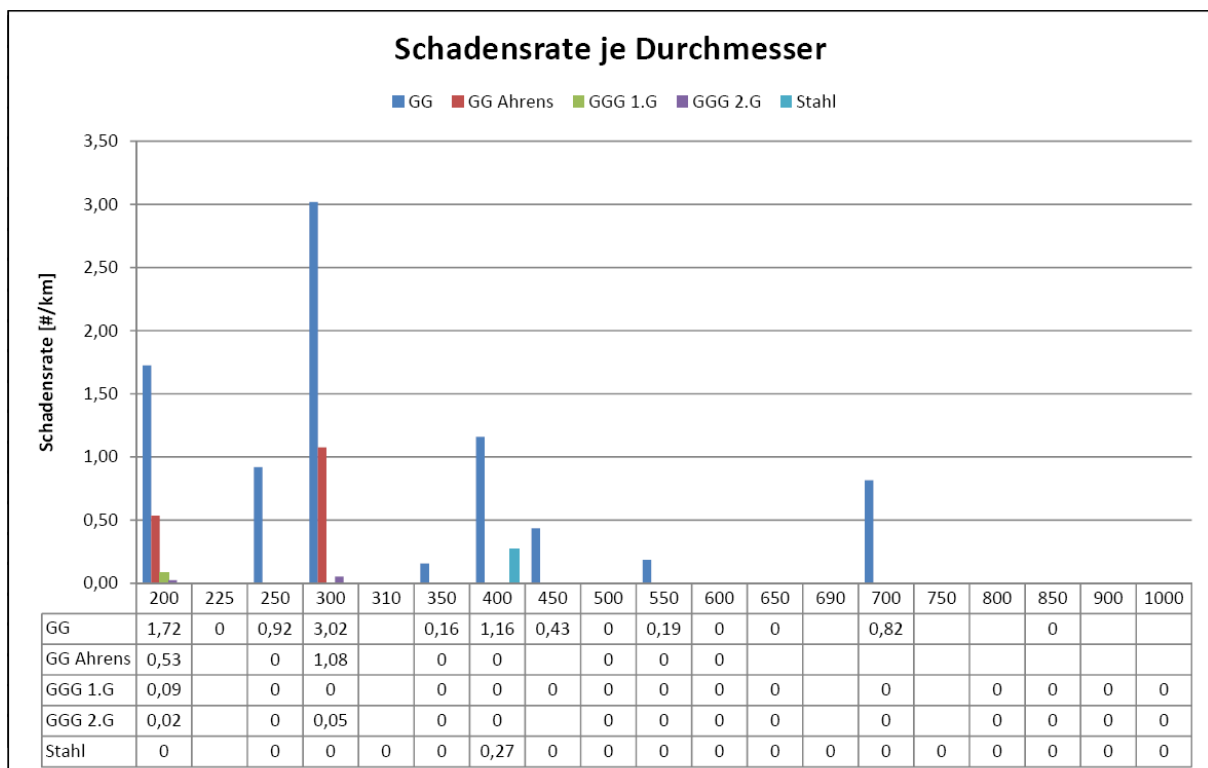
6.3.1.2 Durchmesser

Im HZL-Netz B sind Rohre von 200 mm bis zu 2.360 mm verlegt. Bei den hier betrachteten Materialien sind jedoch, mit Ausnahme von Stahlleitungen, nur Durchmesser bis zu 1.000 mm vorhanden. Bei den Stahlleitungen wurden Durchmesser bis 2.200 mm verlegt, aufgrund der Übersichtlichkeit in der folgenden Tabelle und den fehlenden Schäden bei diesen Durchmessern, wurden jedoch nur Leitungen bis zu DN1000 dargestellt.

Leitungen mit einem Durchmesser von 200 mm wurden mit über 200 km Verlegelänge am häufigsten verwendet. Am zweitöftesten sind, mit knapp 100 km Leitungslänge, Rohre mit einem Durchmesser von 300 mm verlegt.

Die meisten Schäden, bezogen auf einen Kilometer, traten bei Graugussleitungen mit einem Durchmesser von 300 mm auf.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
max Wert	3,02	<	<	<	≥
	vorhanden	<	<	<	≥
	kein Schaden	0,76	1,51	2,27	2,27

Tabelle 75: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung

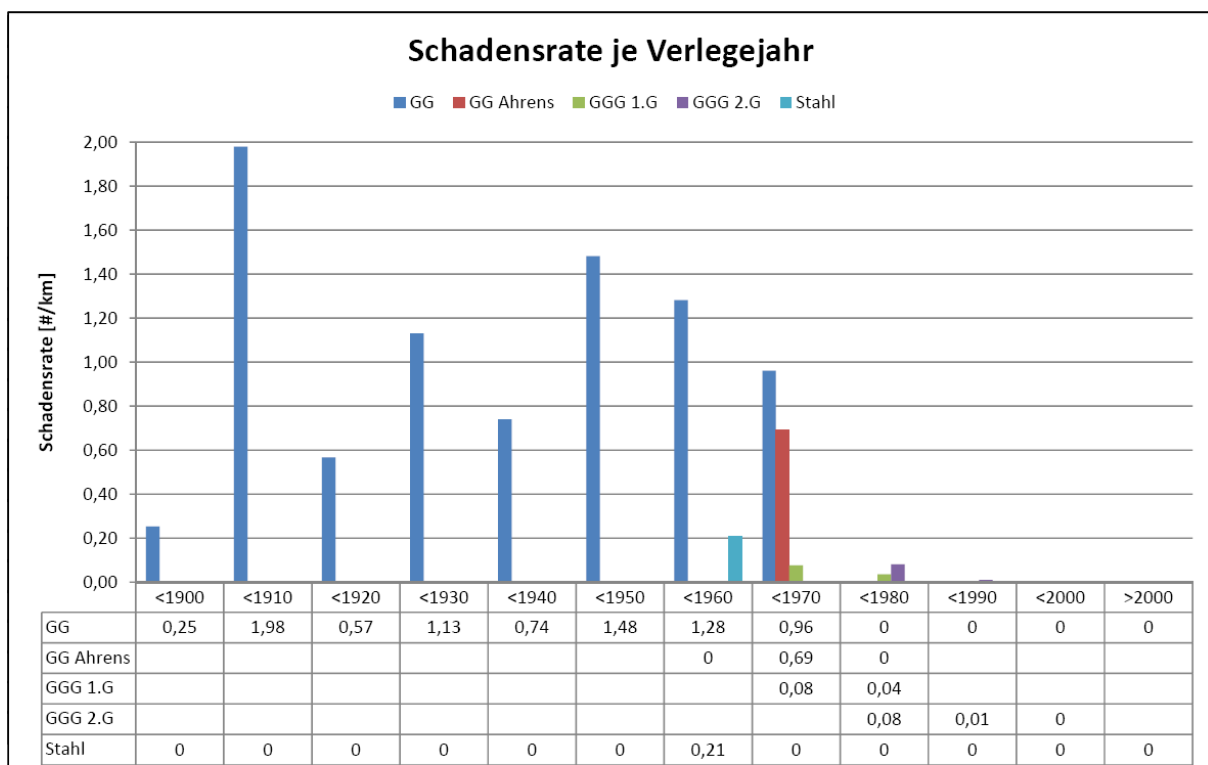
6.3.1.3 Verlegejahr

Die ersten Leitungen wurden bereits im Jahr 1870 eingebaut. Bis in die 1960er Jahren waren es fast ausschließlich Graugussleitungen.

Die höchste Schadensrate weisen Leitungen aus Grauguss und einem Verlegejahr zwischen 1900 und 1909 auf. Allerdings haben Graugussleitungen vom Beginn der Leitungsverlegung bis in die 1960er Jahre immer Längsriss oder Scherbenbruch Schäden. Alle anderen Schäden dieser Art traten erst ab den 1950er Jahren auf.

Für die einfachere Handhabung wurden die Gruppen in Zehnjahres-Abschnitte zusammengefasst. Dabei fallen beispielsweise in die Gruppe < 1970 alle Leitungen, die in den Jahren 1960 bis 1969 verlegt wurden.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 1,98	kein Schaden	0,50	0,99	1,49	1,49

Tabelle 76: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung

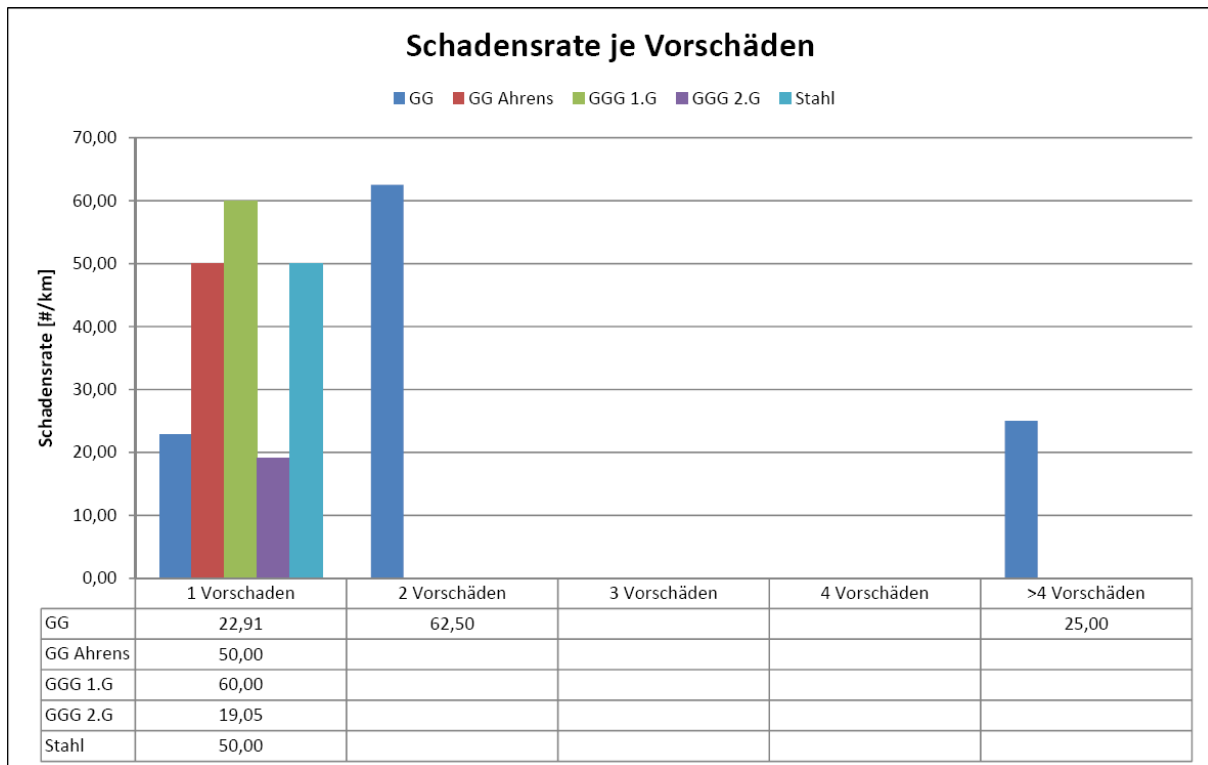
6.3.1.4 Vorschäden

Wie bereits in Kapitel 2.5 - Räumliche und zeitliche Häufung von Schadensfällen beschrieben, treten nach einem Initialschaden oft im unmittelbaren Umfeld weitere Schäden auf. Die betrachteten Schadensfälle in der Tabelle zeigen Vorschäden auf dem gleichen Leitungsabschnitt.

Durch die kurzen Leitungsabschnitte bekommen die Schadensraten bei den Vorschäden hohe Werte. Die Punkteverteilung für diesen Indikator wird mit null Punkten für Leitungen ohne Schaden und mit fünf Punkten für Leitungen mit einem oder mehreren Schäden festgesetzt. Durch die hohen Schadensraten geht dieser Indikator als Schwergewicht in die Berechnung des FRI mit ein und bildet damit die Gefahr von Schadensanhäufungen bzw. den optimalen Erneuerungszeitpunkt nach bereits einem oder wenigen Schäden ab.

Die hohe Schadensrate von 60 wurde auf einem Leitungsabschnitt aus Grauguss mit zwei Vorschäden ermittelt. Bei diesem Material sind fünf Leitungsabschnitte mit in Summe 80 Metern Länge mit zwei Vorschäden bekannt. Durch diese geringen Eigenschaftslängen treten die hohen Schadensraten von 60 auf.

In verschiedenen Untersuchungen werden „Ausreißer“ von den Ergebnissen aussortiert, für die vorliegende Berechnung wurden aber die tatsächlich vorhandenen Maximalwerte herangezogen.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 62,50	12,50	25,00	37,50	50,00	50,00

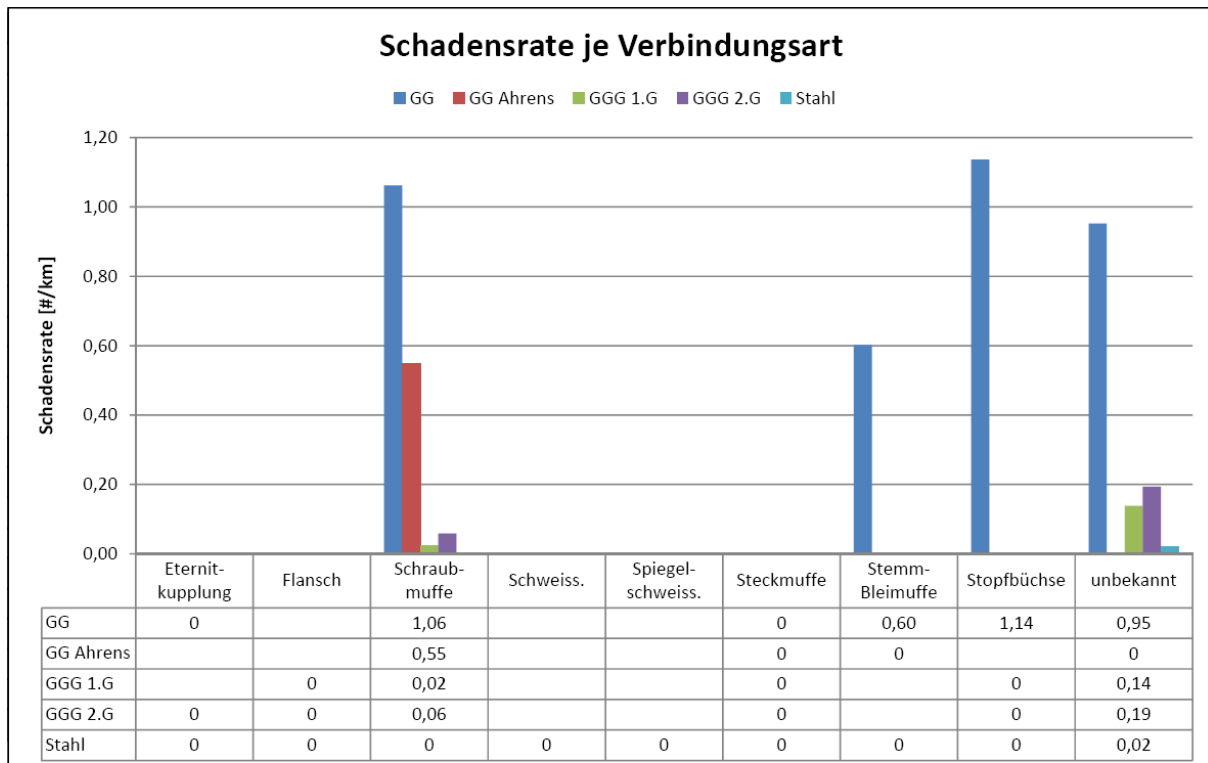
Tabelle 77: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung

6.3.1.5 Verbindungsart

Die Aufzeichnungen für Netz B enthalten eine genaue Dokumentation der vorhandenen Verbindungen, allerdings gibt es natürlich auch Abschnitte mit unbekanntem Eigenschaften. Bei den hier betrachteten Materialien traten bei Schraub- und Stemmuffen, Stopfbüchse und bei der Gruppe der unbekanntem Verbindungen, Schäden auf.

Die höchste Schadensrate tritt mit 1,14 Schäden pro Kilometer bei Graugussleitungen mit Stopfbüchse auf.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 1,14	kein Schaden	0,29	0,57	0,86	0,86

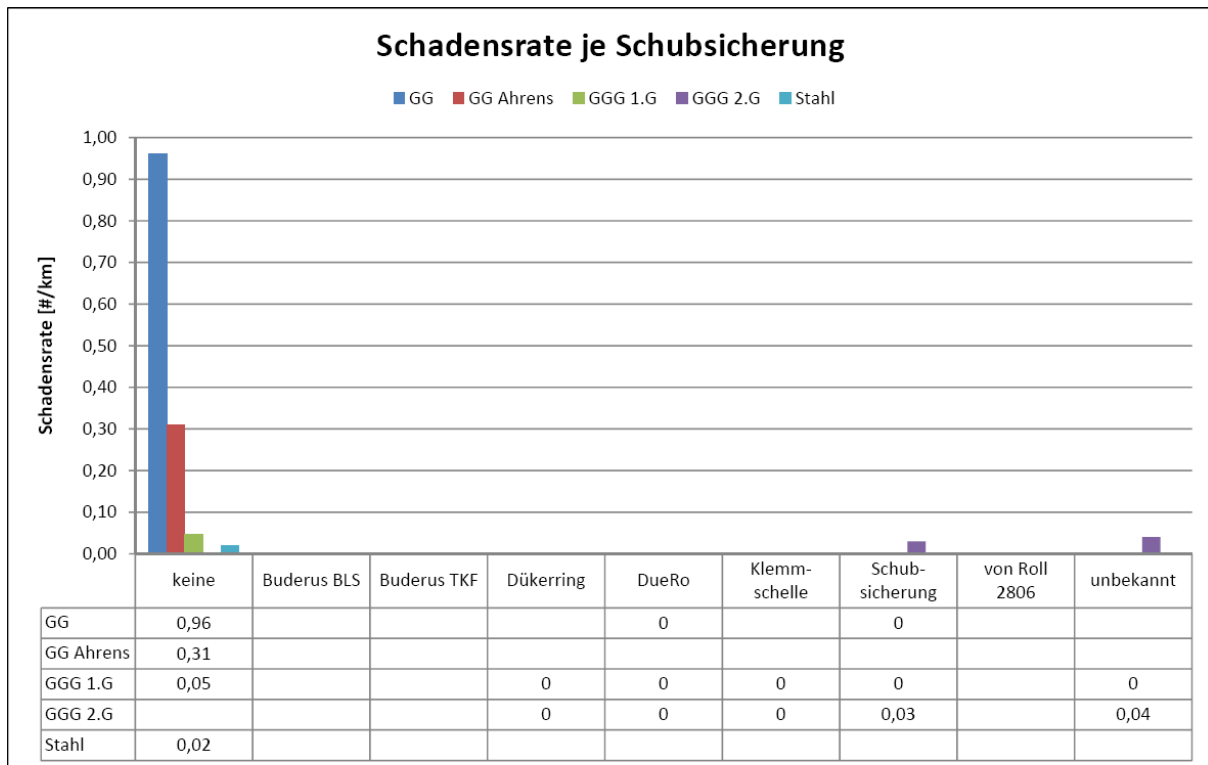
Tabelle 78: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung

6.3.1.6 Schubsicherung

An Bögen oder Abzweigungen von Leitungen treten Schubkräfte auf. Diese können über Widerlager oder auch über die Rohraußenreibung mit dem Erdreich aufgenommen werden. Bei instabilen Böden oder auch im innerstädtischen Bereich mit vielen angrenzenden Leitungsträgern bietet sich die Aufnahme der Schubkräfte über Schubsicherungen an den Rohrverbindungen an. Dabei werden die einzelnen Rohrleitungsabschnitte kraftschlüssig miteinander verbunden und dadurch Bewegungen in den Verbindungen vermieden. Bewegungen in den Verbindungen würden zu Undichtigkeiten und damit zu Wasseraustritt führen.

Die meisten Schäden wurden mit einer Schadensrate von 0,96 Schäden pro Kilometer bei Graugussleitungen und ohne Schubsicherungen festgestellt.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
max Wert 0,96	vorhanden kein Schaden	< 0,24	< 0,48	< 0,72	≥ 0,72

Tabelle 79: Schadensraten nach den Schubsicherungen und die Punkteverteilung

6.3.1.7 Betriebsdruck

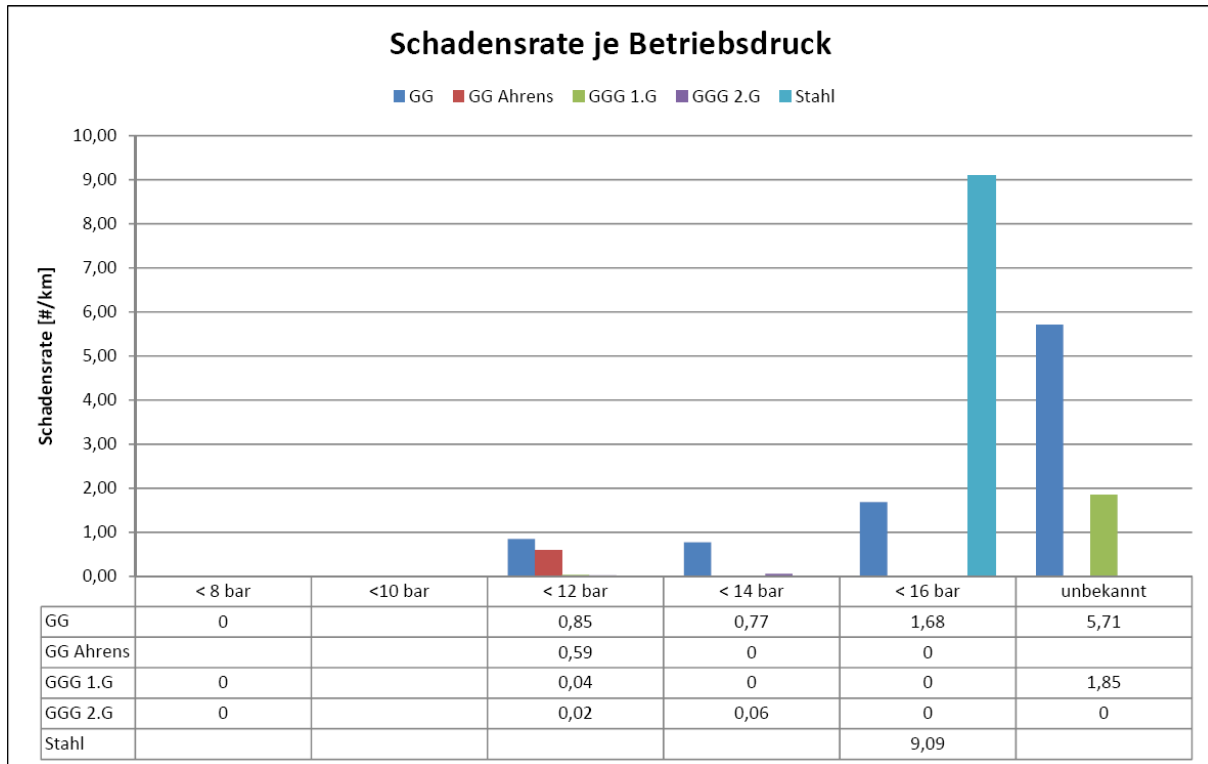
Im Netzwerk haben alle Leitungen einen Innendruck von 7,3 bis 14,7 bar, sofern ein Leitungsdruck bekannt ist. Die Druckzonen wurden in fünf Gruppen mit jeweils zwei bar, von acht bis 16 bar, unterteilt. Abschnitte mit einem unbekanntem Wasserdruck erhalten eine eigene Gruppe. Bei der Druckstufe acht bis zehn bar sind allerdings keine Leitungsabschnitte enthalten.

Der Betriebsdruck beansprucht das Rohrmaterial von innen. Über die Jahrzehnte der Liegedauer verschlechtern sich die Materialeigenschaften, womit bei größeren Innendrücken auch die Gefahr des Versagens des Materials zunimmt. Zusätzlich führt ein hoher Betriebsdruck bei Schadensfällen zu größerem Wasseraustritt und somit zu einem höheren Schadensausmaß.

Die höchste Schadensrate liegt in der Gruppe des größten Betriebsdrucks. Die Leitungen aus Stahl weisen bei dieser Eigenschaft 9,09 Schäden pro Leitungskilometer auf. Dieser sehr hohe Wert ergibt sich aus der geringen Leitungslänge von 110 Metern, die beim Material Stahl, mit einem Betriebsdruck von <16 bar vorliegt.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang

noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden kein Schaden	< 2,27	< 4,55	< 6,82	≥ 6,82
max Wert	9,09				

Tabelle 80: Schadensraten nach dem Betriebsdruck und die Punkteverteilung

6.3.1.8 Setzungsempfindlichkeit

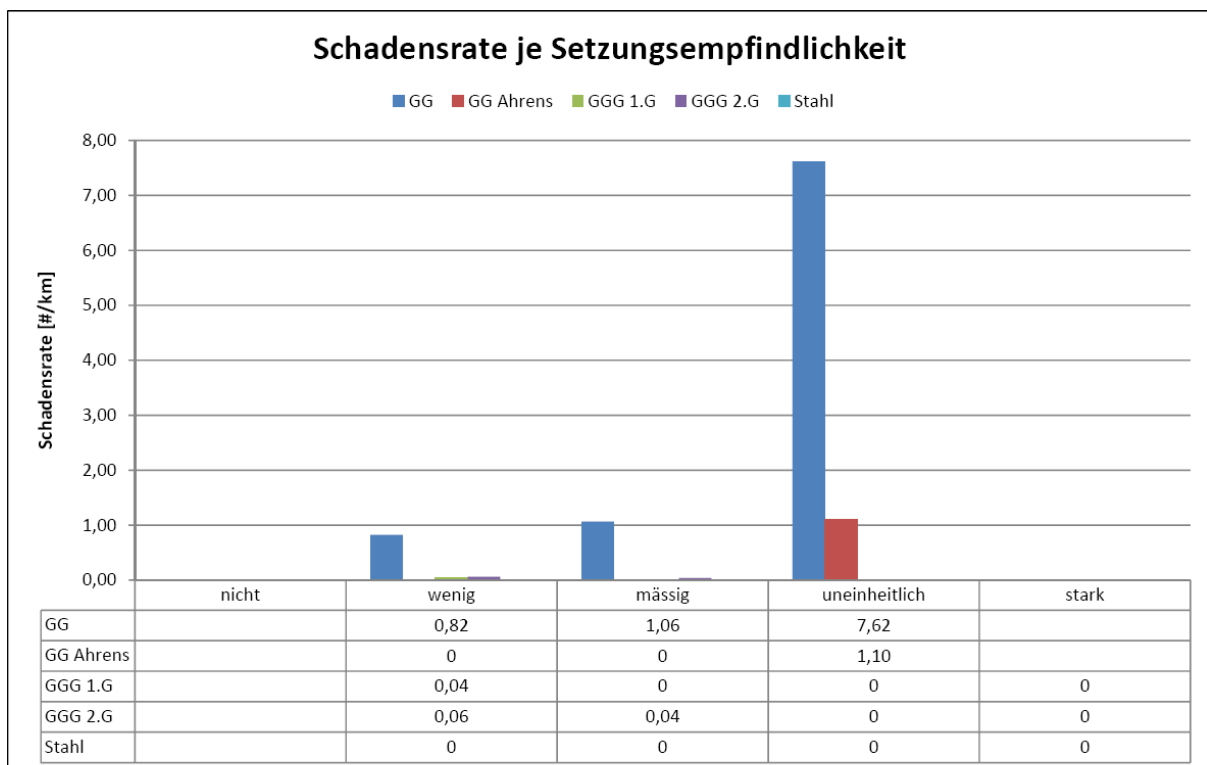
Die Setzungsempfindlichkeit wurde über geologische Karten, Baugrunderkarten und geologische Gutachten, sowie über das Baugrundarchiv der Stadt und den Erfahrungen der verschiedenen Bauunternehmungen erhoben und digitalisiert. Die Gruppeneinteilung erfolgte in fünf Unterteilungen von nicht setzungsempfindlich bis stark setzungsempfindlich.

Den einzelnen Unterteilungen wurden auch gleich entsprechende Bodentypen zugewiesen. Nicht setzungsempfindliche Gebiete haben meist Molassefels oder Schotter und Moränen im Untergrund. Als stark setzungsempfindliche Bodentypen wurden Torf und Seekreide ausgewiesen.

Mit Abstand die höchsten Schadenswerte sind bei Grauguss Leitungen in Böden der Gruppe uneinheitlich, lokal oder punktuell stark setzungsempfindlich aufgetreten.

Leitungsabschnitte in nicht setzungsempfindlichen Böden wurden wegen fehlender Beeinflussung mit null Punkten versehen.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
vorhanden	<	<	<	<	≥
max Wert 7,62	kein Schaden	1,91	3,81	5,72	5,72

Tabelle 81: Schadensraten nach den Setzungsempfindlichkeiten und die Punkteverteilung

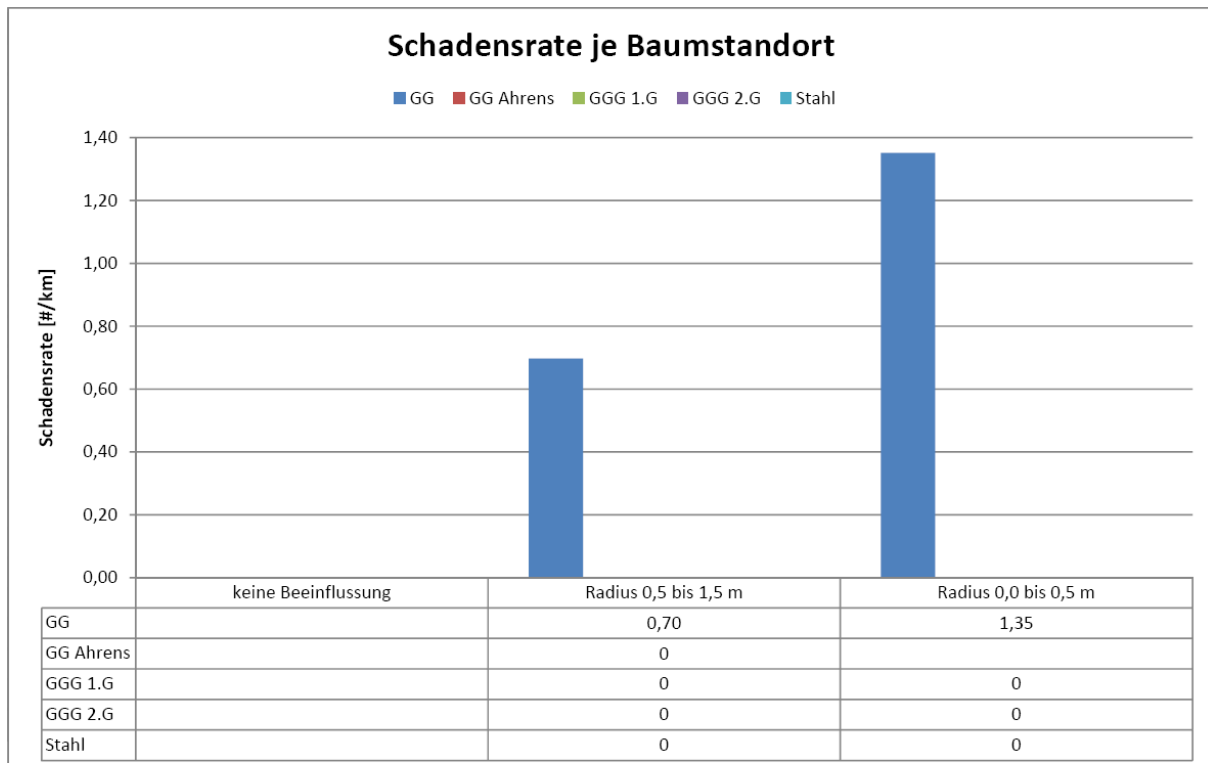
Weiters wurden als Indikatoren Kriech- und Rutschgebiete bzw. Schanzen, Wälle, Gräben und Auffüllungen festgehalten. Bei Leitungsabschnitten in diesen Bereichen wurden jedoch noch keine Schadensfälle dokumentiert, weshalb sich die Schadensraten jeweils zu „Null“ ergeben haben. Die beiden Indikatoren fallen daher aus der Berechnung des FRI Längsriss Scherbenbruch heraus.

6.3.1.9 Baumstandorte

Pflanzen, vor allem tiefwurzelnde Bäume, können mit ihren Wurzeln Beschädigungen an Leitungen verursachen. Bei Kanälen ist dieses Phänomen bereits ausreichend dokumentiert, aber auch bei Trinkwasserleitungen sind Schäden durch Pflanzenwurzeln bekannt.

Im Konzept Risikoanalyse wurden die Baumstandorte in zwei Gruppen unterteilt. Jeder Baum erhielt zwei Kreise, einen mit 0,5 m und einen mit 1,5 m, die als Pufferflächen dienen. Befindet sich ein Leitungsabschnitt innerhalb der Flächen, so wird er mit der jeweiligen Gruppeneigenschaft versehen. Als Zusatzinformation wurden alle Bäume nach ihrer Höhe und der Kronenbreite aufgenommen und in der Datenbank unterschieden.

Bei der Analyse der Längsriss-Scherbenbruch-Schäden wurden bislang nur Leitungsabschnitte aus Grauguss mit der Beeinflussung von Baumstandorten festgestellt. Die Abschnitte aus Grauguss werden nach ihren jeweiligen Schadensraten mit zwei bis fünf Punkten in die FRI Berechnung eingetragen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Leitungsabschnitte ohne Beeinflussung von Bäumen werden mit null Punkten gewertet.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 1,35	kein Schaden	0,34	0,68	1,01	1,01

Tabelle 82: Schadensraten nach den Baumstandorten und die Punkteverteilung

6.3.1.10 Verkehrsbelastung

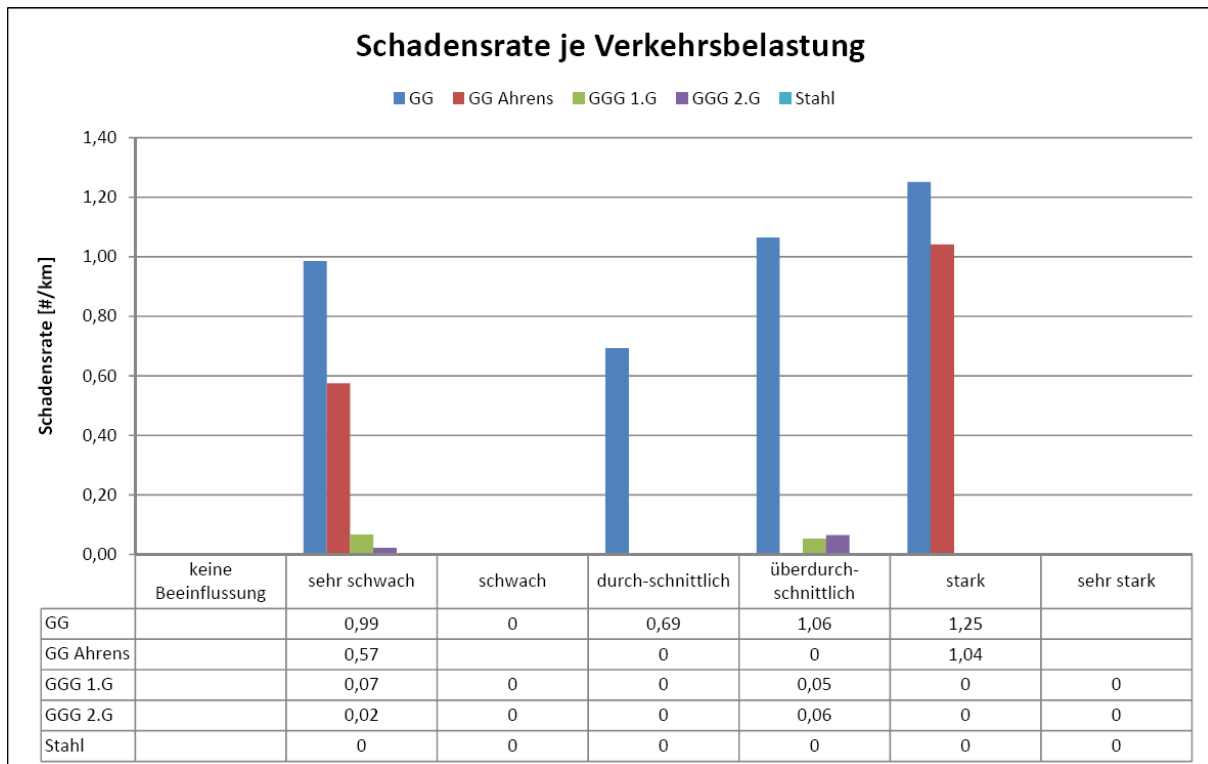
Wie bereits mehrere Untersuchungen gezeigt haben (*Friedl, 2007; et al*), führt eine erhöhte Verkehrsbelastung zu vermehrten Schäden bei der Leitungsinfrastruktur unterhalb von Verkehrsflächen. Insbesondere ein großer Anteil an Schwerverkehr führt zu hohen Spannungen im Untergrund, wodurch eine Überbeanspruchung der Leitungen entstehen kann.

Im Netz B wurde die Verkehrsbelastung jeder Straße mithilfe des Tiefbauamtes festgestellt und in die Datenbank eingetragen. Die Unterteilung erfolgte in sechs Gruppen, von sehr schwacher bis sehr starker Belastung. Für alle Leitungsabschnitte, die nicht im Straßenkörper verlegt sind, wurde die siebente Gruppe (keine Beeinflussung) eingefügt.

Die höchsten Schadensraten wurden bei Graugussleitungen mit starker Verkehrsbelastung festgestellt. Tendenziell gilt bei diesem Indikator: Je stärker die Verkehrsbelastung, desto höher die Schadensrate.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit

einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 1,25	kein Schaden	0,31	0,63	0,94	0,94

Tabelle 83: Schadensraten nach den Verkehrsbelastungen und die Punkteverteilung

6.3.1.11 Belagszustand

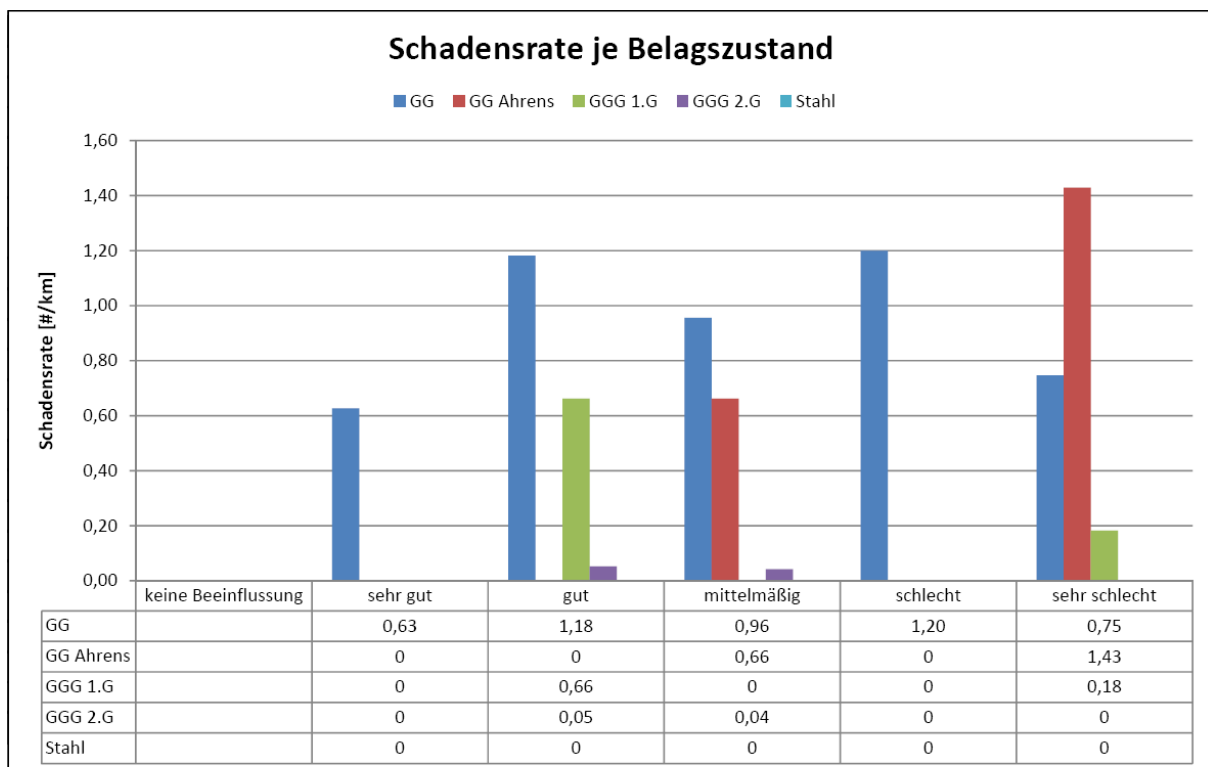
Der Einfluss der Verkehrsbelastung und des Schwerverkehrs auf die Schadensbildung bei Leitungsinfrastruktur ist bekannt (in Anlehnung an *Friedl, 2007*). Der Oberflächenzustand spielt dabei allerdings auch eine gravierende Rolle. Ein großflächig intakter Asphaltaufbau kann die aufgebrachten Lasten verteilen und in gedämpfter Form an den Straßenunterbau weiterleiten. Wurde der Straßenaufbau durch Bauarbeiten, wie Leitungsgrabungen, in seiner Kontinuität gestört, so kommt es zu ungleichmäßigen Lastabtragungen und schlussendlich zu uneinheitlichen Setzungen. Die dadurch unebene Straßenoberfläche in Verbindung mit herkömmlichen Schlaglöchern führen zu vertikalen Beschleunigungen der Fahrzeuge. Dadurch steigen die Belastungen im Untergrund an, wodurch eine Überbeanspruchung der Leitungen der Wasserinfrastruktur ausgelöst wird.

Der Belagszustand jeder Straße wurde mit den Informationen des Tiefbauamtes festgestellt und in die Datenbank eingepflegt. Die Unterteilung erfolgte in fünf Grup-

pen, von sehr gut bis sehr schlecht. Für alle Leitungsabschnitte, die nicht im Straßenkörper verlegt sind, wurde die sechste Gruppe (keine Beeinflussung) eingefügt.

Der höchste Wert der Schadensrate konnte mit 1,43 Schäden pro Kilometer bei Grauguss Ahrens Leitungsabschnitten mit sehr schlechtem Belagszustand aufgezeichnet werden.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 1,43	kein Schaden	0,36	0,72	1,07	1,07

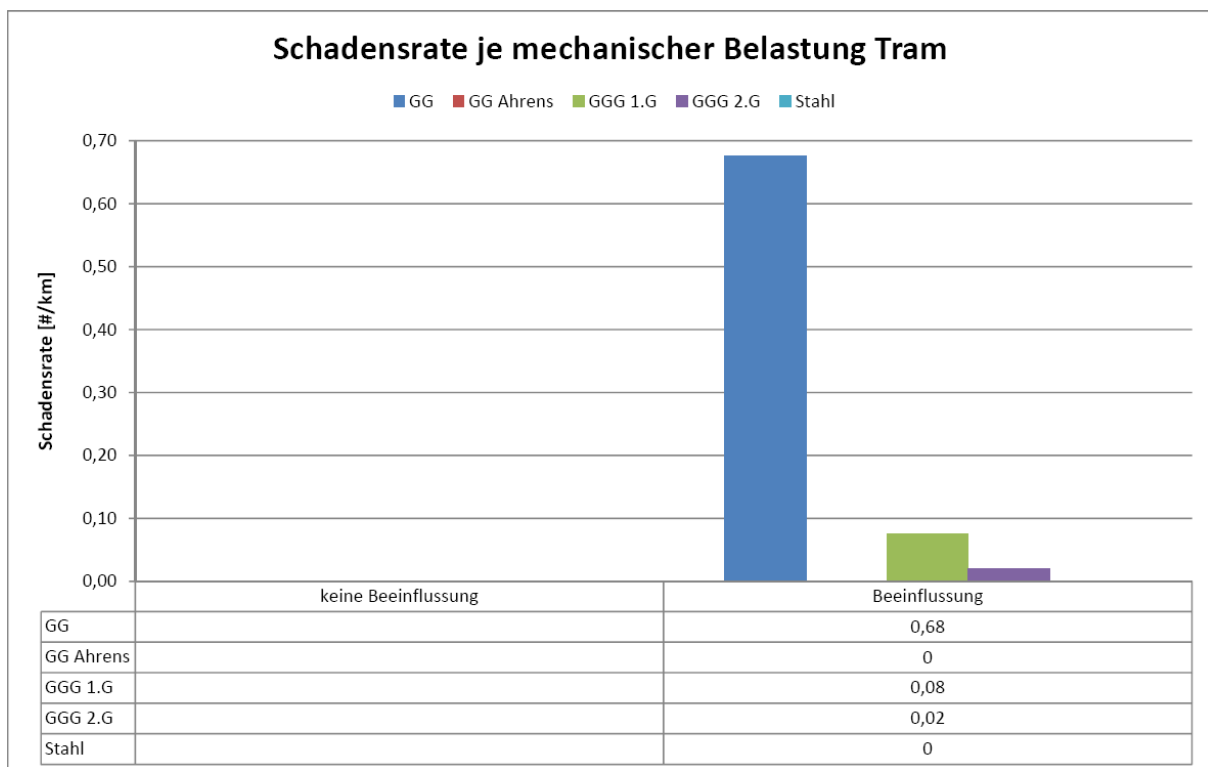
Tabelle 84: Schadensraten nach dem Belagszustand und die Punkteverteilung

6.3.1.12 Mechanische Belastung Straßenbahn

Die mechanische Belastung der Straßenbahnen stellt wie auch bei herkömmlicher Verkehrsbelastung eine erhöhte Gefahr der Überbelastung durch Spannungsspitzen an der Leitungsinfrastruktur dar (in Anlehnung an *Friedl, 2007*). Alle Leitungsabschnitte, welche innerhalb einer vier Meter Pufferzone ab der Gleisachse des nächsten Gleises verlegt sind, gelten für die FRI Berechnung als beeinflusst.

Der mit Abstand höchste Schadenswert pro Kilometer stellte sich bei Graugussleitungen dar.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 0,68	kein Schaden	0,17	0,34	0,51	0,51

Tabelle 85: Schadensraten nach der mechanischen Belastung Straßenbahn und die Punkteverteilung

6.3.2 Indikatoren Schadensausmaß

Das Schadensausmaß stellt die Konsequenzen von Schadensfällen dar. Dabei werden verschiedene Aspekte eines Leitungsschadens berücksichtigt. Zum einen ergeben sich für den Netzbetreiber Erschwernisse und zusätzliche Kosten, die verursacht werden können. Dazu zählen unter anderem die erforderlichen Bauarbeiten, Wasserverluste und die mögliche Installation einer Ersatzwasserversorgung. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang auch der Imageverlust des Unternehmens.

Auf der anderen Seite wird auch die unmittelbare Umgebung einer Schadstelle negativ beeinflusst. Dazu zählen beispielsweise Behinderungen für Passanten, Staubbildungen und Verzögerungen auf den Straßen rund um den Schadensort, Schäden bei anderen Leitungsinfrastrukturen oder auch kleinräumige Überschwemmungen mit Schäden an Gebäuden und Fahrzeugen.

Beim Leitungsnetz B konnten sieben Indikatoren für das Schadensausmaß bzw. die Konsequenzen definiert werden. Die Gewichtung der Indikatoren erfolgte mittels Experteneinschätzung, wodurch eine subjektive Bewertungsmethode Anwendung fand.

	Indikator	Punkte
Schadensausmaß	Baumstandorte	1 - 5
	Oberflächenbefestigung	1 - 2
	Gasleitungen	0 - 5
	Verkehrsbelastung	0 - 5
	Trambelastung	0 - 5
	Betriebsdruck	0 - 5
	Durchmesser	0 - 5

Tabelle 86: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes

Die in Tabelle 86 dargestellten Indikatoren werden im Folgenden beschrieben und ihre Schadensraten und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

6.3.2.1 Baumstandorte

Bäume, die direkt über oder knapp neben Wasserleitungen gepflanzt wurden, können zu erheblichen Erschwernissen bei der Behebung von Leckagestellen führen. Je nach dem Abstand zur Leitungssachse wurden die Punkte in drei Gruppen vergeben.

Bäume	Punkte Bäume
keine	0
0,5 bis 1,5 m	3
0,0 bis 0,5 m	5

Tabelle 87: Bewertungsgruppen der Baumstandorte

6.3.2.2 Oberflächenbefestigung

Die Oberflächenbefestigung stellt die Erschwernisse bei den Reparaturarbeiten und den Kostenunterschied bei den Grabungsarbeiten und der Wiederherstellung dar. Für die Berechnung wurde in „Straße“ und „unbefestigt“ unterschieden. Wobei bei unbefestigter Oberfläche null Punkte vergeben wurden und bei befestigten Flächen fünf Punkte.

Oberflächenbefestigung	Punkte Oberflächenbefestigung
keine	0
Straße	5

Tabelle 88: Bewertungsgruppen der Oberflächenbefestigung

6.3.2.3 Gasleitungen

Bei Schäden sind nicht nur die Wasserleitungen selbst betroffen, sondern auch das Erdreich rund um die Schäden und somit auch andere Leitungsträger, die sich in der Nähe von Schadstellen befinden. Beim Leitungsnetz B wurden lediglich Gasleitungen aufgenommen, andere Leitungsträger wurden nicht berücksichtigt.

Sind Gasleitungen bei dem jeweiligen Haupt- und Zubringerleitungsabschnitt vorhanden, werden fünf Punkte vergeben, ansonsten null Punkte.

Gasleitungen	Punkte Gasleitungen
keine	0
Gasleitungen	5

Tabelle 89: Bewertungsgruppen der Gasleitungen

6.3.2.4 Verkehrsbelastung

Hauptstraßen über Leitungsabschnitten stellen für die Reparatur von Schäden eine erhebliche Erschwernis dar. Zum einen müssen die Bauarbeiten unter meist beengten Platzverhältnissen und unter Zeitdruck stattfinden, um eine Behinderung möglichst gering und von kurzer Dauer zu halten.

Zum anderen werden Passanten und Autofahrer behindert, womit sich für Fußgänger Umwege und für Autofahrer Staus ergeben. Je nach der Stärke des Verkehrsaufkommens werden ein bis fünf Punkte vergeben. Bei Leitungsabschnitten abseits von Straßen werden keine Punkte für die Berechnung angenommen.

Verkehrsbelastung	Punkte Verkehrsbelastung
keine	0
sehr schwach bis schwach	1
durchschnittlich	2
überdurchschnittlich	3
stark	4
sehr stark	5

Tabelle 90: Bewertungsgruppen der Verkehrsbelastung

6.3.2.5 Straßenbahn

Schwieriger als beim herkömmlichen Straßenverkehr stellt sich die Lage beim schienegebundenen öffentlichen Verkehr dar. Schäden, die durch Wasseraustritt die Gleislage gefährden, ziehen die Einstellung des Schienenverkehrs nach sich. Für das Verkehrsunternehmen ergeben sich dadurch Mehrkosten und Mehraufwand für die Einrichtung eines Schienenersatzverkehrs.

Straßenbahn	Punkte Straßenbahn
keine	0
Tram	5

Tabelle 91: Bewertungsgruppen der Straßenbahn

6.3.2.6 Betriebsdruck

Bei ansteigendem Betriebsdruck tritt auch mehr Wasser aus Schadstellen aus (Friedl, 2012). Dadurch steigt auch das Schadensausmaß im Umkreis eines Schadens. Je höher der Druck in den Leitungen, desto mehr Punkte wurden vergeben.

Betriebsdruck	Punkte Betriebsdruck
< 8 bar	1
< 10 bar	2
< 12 bar	3
< 14 bar	4
< 16 bar	5
unbekannt	5

Tabelle 92: Bewertungsgruppen des Betriebsdrucks

6.3.2.7 Durchmesser

Der Durchmesser eines Rohres stellt einen wichtigen Wert beim Schadensausmaß von Längsrissen und Scherbenbrüchen dar. Je größer die Wassermenge in der Leitung ist, desto mehr Schaden entsteht in der Umgebung einer Schadstelle. Dabei können in einzelnen Fällen sogar kleinräumige Überschwemmungen an der Straßenoberfläche auftreten. Die Gruppen wurden nach folgender Tabelle eingeteilt.

Durchmesser	Punkte Durchmesser
200 - 300	1
>300 - 500	2
>500 - 700	3
>700 - 1000	4
>1000	5

Tabelle 93: Bewertungsgruppen des Durchmessers

6.3.3 Gewichtung der Indikatoren

6.3.3.1 Gewichtung der Schadenswahrscheinlichkeits - Indikatoren

Die Bestimmung der Indikatorgewichtung erfolgt innerhalb der Schadenswahrscheinlichkeit über die SR.

Alle Indikatoren, die für die jeweilige Leitung einen Wert aufweisen, erhalten die maximale Schadensrate des jeweiligen Indikators aus der Schadensratenanalyse. Alle Indikatoren, welche für den jeweiligen Leitungsabschnitt nicht vorhanden sind, erhalten weder einen Punktwert noch eine Schadensrate.

Für die Berechnung der Gewichtungen werden alle maximalen SR einer Leitung aufsummiert. Dieser Summenwert ist für jeden Leitungsabschnitt unterschiedlich, da es bei jedem Abschnitt zu einer unterschiedlichen Zusammenstellung der Indikatoren kommt.

Der Summenwert wird an dieser Stelle als Ausgangswert mit 100 Prozent gleichgesetzt. Die maximalen SR der einzelnen Indikatoren werden dann als Prozentwert von dem Summenwert neu dargestellt.

6.3.3.2 Gewichtung der Schadensausmaß - Indikatoren

Bei den Indikatoren des Schadensausmaßes bestand keine Möglichkeit der Gewichtung über Schadensraten. Um dennoch keine rein lineare Verteilung der Gewichtung zu erhalten, wurden zwei Indikatoren als Leitindikatoren ausgewählt. Diese beiden Indikatoren wurden in ihren Gewichtungen mittels Sensitivitätsanalyse variiert. Die restlichen Indikatoren wurden linear in die Berechnung aufgenommen.

Im Falle des Haupt- und Zubringerleitungsnetzwerkes B der Schadensart Längsriss Scherbenbruch fiel die Wahl der Leitindikatoren auf die Verkehrsbelastung und den Leitungsdurchmesser. Die Verkehrsbelastung des Leitungsabschnittes erhielt als Gewichtung 30 Prozent des Ausmaßes. Für den Durchmesser wurde als Gewichtung zehn Prozent angenommen.

Die restlichen 60 Prozent der Gewichtung wurden, je nach Vorhandensein der einzelnen Indikatoren bei einem Leitungsabschnitt, linear verteilt.

6.3.4 Berechnungsergebnisse Längsriss/Scherbenbruch

6.3.4.1 Gesamtergebnis FRI Längsriss/Scherbenbruch

Die Zusammenführung der in Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 beschriebenen Indikatoren und deren Gewichtungen führen zu einer umfangreichen Berechnungstabelle.

Das Ergebnis aller Leitungsabschnitte von Grauguss, Duktulguss der ersten beiden Generationen und Stahl für die Berechnung des Failure Risk Index Längsriss Scherbenbruch, kann aus Tabelle 94 und Abbildung 26 entnommen werden. Dabei wird nicht nach Materialien unterschieden.

Die im Vorfeld getroffenen Annahmen und Einteilungen führen zum Ergebnis, dass 2.146 Leitungsabschnitte einen Failure Risk Index von „eins“ haben. Das sind 18,89% aller im HZL-Netz B befindlichen Leitungsabschnitte aus den oben genannten Materialien.

Eine Bewertung von „zwei“ erhalten 8.843 Leitungsabschnitte oder 73,45% aller Abschnitte.

Für das Netz B können damit circa 92% aller Leitungen aus Grauguss, Duktulguss der ersten beiden Generationen und Stahl als unbedenklich, im Sinne der FRI Längsriss Scherbenbruch Bewertung, angesehen werden. Die restlichen Materialien wurden wegen bislang fehlender Schadensfälle nicht in die Berechnung einbezogen.

Bei 828 Abschnitten ergab die Berechnung einen FRI von „drei“, das sind 7,29% der verlegten Leitungen. Ab der Bewertung von „drei“ kann eine erhöhte Instandhaltung der Leitungen sinnvoll werden.

Für 39 Leitungen wurde ein Wert von „vier“ und für 3 Abschnitte wurde ein FRI von „fünf“ berechnet. Gerade einmal 0,37% der Leitungen im Haupt- und Zubringerleitungsnetz B entfallen damit auf die schlechtesten beiden Bewertungsgruppen.

Mit dieser Auswertung erhalten 11.359 der insgesamt 16.279 Leitungsabschnitte eine Bewertung für den FRI Korrosion. Die restlichen 4.922 Leitungsabschnitte entfallen auf Materialien wie z.B. Beton, GGG 3.G oder Kunststoff. Diese Materialien weisen bislang keine Schadensfälle auf, womit auch keine Auswertungen auf Grundlage der Schadensraten möglich sind.

Failure Risk Index Längsriss Scherbenbruch	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	2.146	18,89
2	8.343	73,45
3	828	7,29
4	39	0,34
5	3	0,03

Tabelle 94: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für alle Leitungsabschnitte

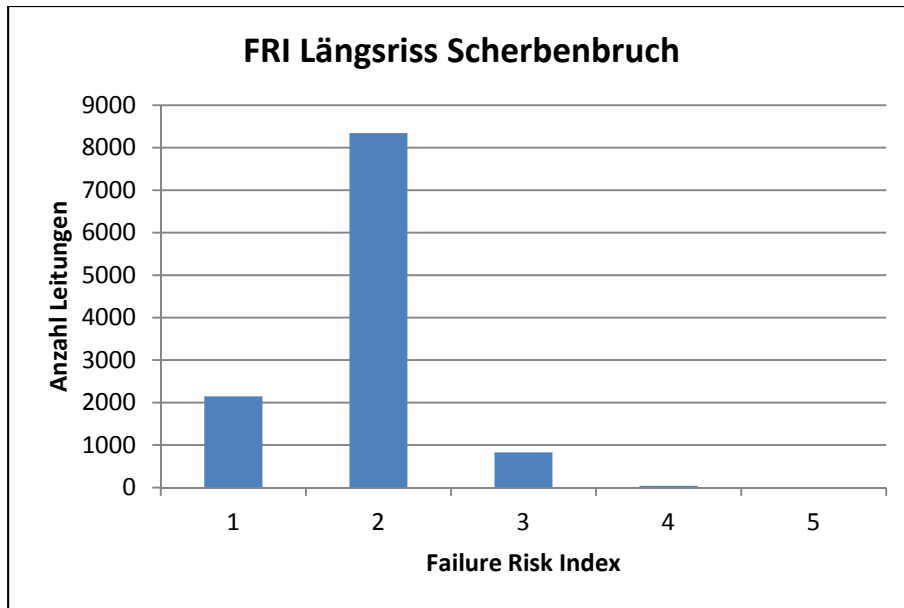


Abbildung 28: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für alle Leitungsabschnitte

Nur 57 Leitungsabschnitte wurden in der Berechnung mit einer Schadenswahrscheinlichkeit von größer als „vier“ ermittelt. Im Bereich des Schadensausmaßes gibt es 1.013 Leitungen mit einer Bewertung von größer als „vier“. In den zwei Teilbereichen lässt sich eine große Anzahl von Leitungen ermitteln, die entweder eine große Wahrscheinlichkeit oder große Konsequenzen haben. Aber nur ein kleiner Anteil aller Leitungen hat sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß.

Damit kann sich die Instandhaltung des Wasserwerkes auf einen kleinen Teil der Leitungen konzentrieren und verstärkt auf den Zustand achten. Durch den FRI Längsriss Scherbenbruch kann bereits im Vorfeld die passende Methode zur Instandhaltung ausgewählt und eingesetzt werden.

Die fünf vorliegenden Materialien haben jedoch die unterschiedlichsten Schadensanfälligkeiten gegenüber Längsriss und Scherbenbruch, wodurch eine Betrachtung und Analyse für jedes Material einzeln notwendig wird. Im Folgenden werden die im Leitungsnetz B verlegten Materialien mit Schäden durch Längsriss Scherbenbruch mit den Ergebnissen der FRI Berechnung gesondert dargestellt.

6.3.4.1.1 Betrachtung der Leitungen mit Vorschäden

Leitungsabschnitte mit Vorschäden bilden einen zentralen Bestandteil in dieser Berechnung. Einerseits treten auf diesen Abschnitten, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, mit großer Wahrscheinlichkeit erneut Schäden auf, andererseits erhält der Indikator

„Vorschäden“ einen sehr hohen Anteil an der Gewichtung aller Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

Keine Leitung mit einem Vorschaden entfällt in die FRI Gruppen eins und zwei. Auf Bewertungsgruppe drei entfallen 30 Abschnitte, das sind knapp vier Prozent der Leitungen dieser Gruppe. 61,5% der Leitungen mit einem FRI von „vier“ und alle Leitungen mit einem FRI von „fünf“ hatten bereits einen Vorschaden.

Mit diesem Ergebnis wurden die Annahmen bezüglich der ausgehenden Gefahr von Vorschäden sehr gut abgebildet.

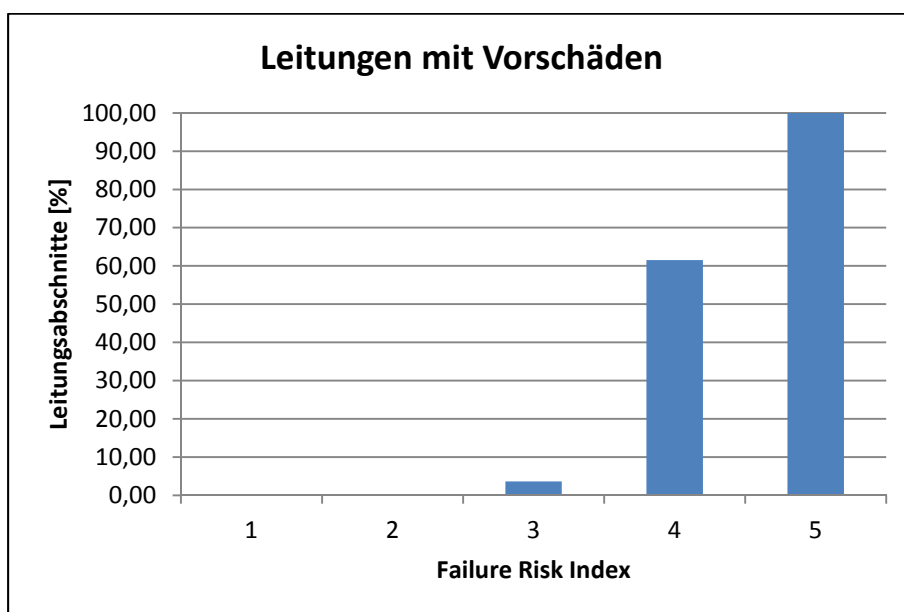


Abbildung 29: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe

Für eine schlechte FRI Bewertung eines Leitungsabschnittes ist es erforderlich, sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß aufzuweisen. Daher fallen auch Leitungsabschnitte mit einer hohen Schadenswahrscheinlichkeit in die ersten drei FRI Bewertungsgruppen.

6.3.4.2 Rohrmaterial Grauguss

Graugussleitungen wurden seit Beginn des Wasserversorgungsnetzwerks verwendet. 1.725 Abschnitte mit einer Länge von 58,23 Kilometern sind davon verlegt.

Leitungen aus diesem Material sind von 56 Längsrissen oder Scherbenbrüchen betroffen. Die 0,96 dokumentierten Schäden pro Kilometer Leitung stellen den höchsten Wert in dieser Auswertung dar. Dementsprechend hoch ist auch die Punkteverteilung bei den Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

Laut Berechnung sind nur 0,29% der Abschnitte in Gruppe eins. Der Großteil der Leitungen entfällt mit 53,45% in die Gruppe zwei. Die Gruppe drei ist mit 44,93% der Abschnitte ähnlich stark vertreten wie Gruppe zwei.

1,34% der Abschnitte wurden bei der Berechnung in die schlechtesten beiden Gruppen gereiht. 22 Anteile entfallen auf die Gruppe vier und ein Abschnitt erhält die schlechteste Bewertung von „fünf“. Alle Abschnitte der FRI Bewertung von „vier“ und „fünf“ hatten bereits Vorschäden.

Für Graugussleitungen bildet sich daher ein Mittelwert des FRI von 2,47.

Failure Risk Index Längsriss Scherbenbruch	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	5	0,29
2	922	53,45
3	775	44,93
4	22	1,28
5	1	0,06

Tabelle 95: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Grauguss

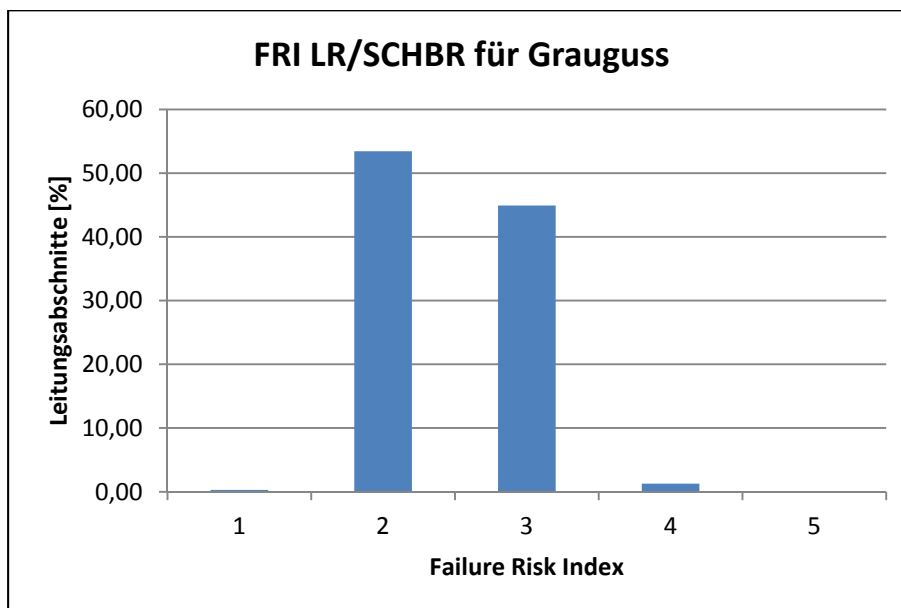


Abbildung 30: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Grauguss

6.3.4.3 Rohrmaterial Grauguss Ahrens

Als eigene Materialart wurden Graugussleitungen der Herstellungsart Ahrens gewertet. 109 Leitungsabschnitte wurden in Grauguss Ahrens verlegt, das sind in Summe 6,48 Kilometer.

Bezogen auf den Leitungskilometer erzielt GG Ahrens eine Schadensrate von 0,31.

29,36% der Graugussleitungen Ahrens befinden sich nach den Berechnungen in der besten Gruppe des FRI. Der Gruppe zwei wurden weitere 65,14% der Leitungsabschnitte zugeteilt. 4,59% oder fünf Abschnitte können einen Failure Risk Index von „drei“ aufweisen. In den Gruppen der FRI Bewertung von „vier“ findet sich eine Leitung (0,92%). Grauguss Ahrens enthält keine Leitungsabschnitte mit der schlechtesten Wertungsgruppe fünf.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Grauguss Ahrens wurde mit 1,77 berechnet.

Failure Risk Index Längsriss Scherbenbruch	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	32	29,36
2	71	65,14
3	5	4,59
4	1	0,92
5	0	0,00

Tabelle 96: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Grauguss Ahrens

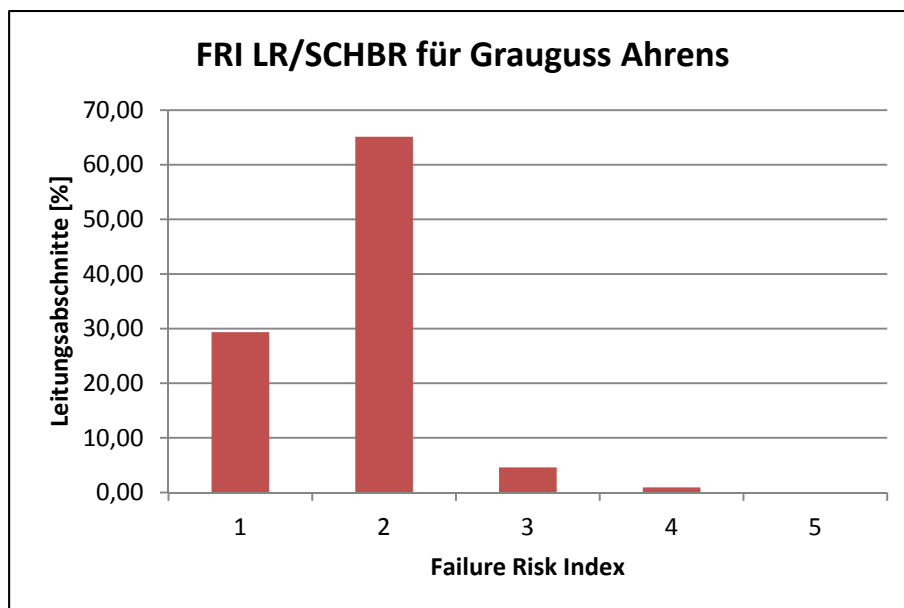


Abbildung 31: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Grauguss Ahrens

6.3.4.4 Rohrmaterial Duktiguss 1. Generation

Duktigussleitungen der ersten Generation wurden in den Jahren 1950 bis 1979 im Netz verbaut. 69,09 Kilometer wurden von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 2.107 Einzelstücke.

Duktigussleitungen der ersten Generation weisen eine Schadensrate von 0,04 Schäden pro Kilometer auf.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich 438 Leitungsabschnitte (20,79%). Die Gruppe zwei enthält mit 78,07% den größten Anteil der Leitungsabschnitte von GGG 1.G. 1,04% bekommen eine FRI-Bewertung von „drei“. Die Bewertungen von „vier“ und „fünf“ erhält jeweils ein Leitungsabschnitt, das sind jeweils 0,05%.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktiguss der ersten Generation wurde mit 1,81 berechnet.

Failure Risk Index Längsriss Scherbenbruch	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	438	20,79
2	1.645	78,07
3	22	1,04
4	1	0,05
5	1	0,05

Tabelle 97: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Duktiguss 1. Generation

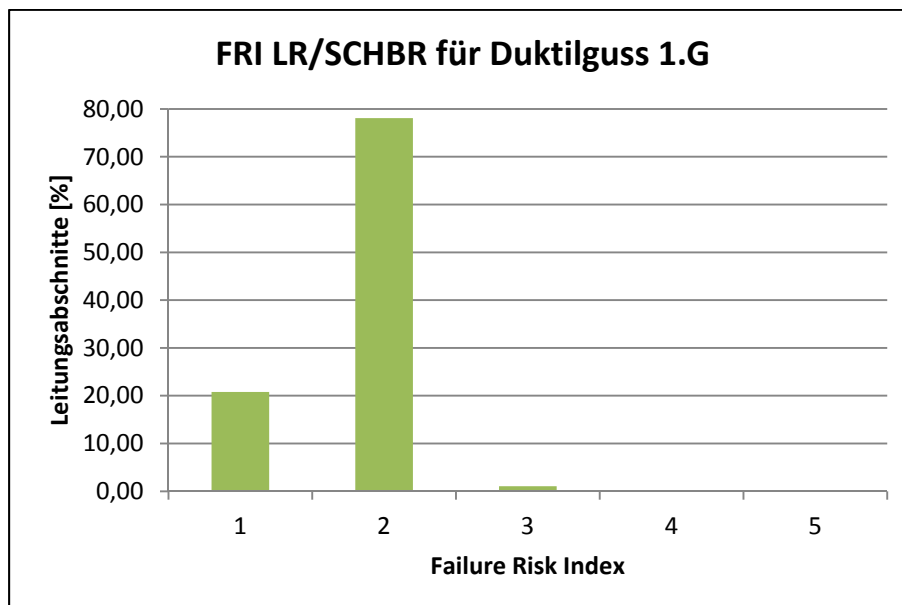


Abbildung 32: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Duktiguss 1. Generation

6.3.4.5 Rohrmaterial Duktiguss 2. Generation

Duktigussleitungen der zweiten Generation wurden in den Jahren 1960 bis 1999 im Netz verbaut. 151,94 Kilometer wurden insgesamt von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 5.970 Einzelabschnitte.

Duktigussleitungen der zweiten Generation zeigen eine sehr geringe Schadensanfälligkeit gegenüber Längsriss Scherbenbruch. Die Schadensrate beträgt 0,03.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich 543 Leitungsabschnitte (9,10%). Die Gruppe zwei enthält mit 90,84% den Großteil der Leitungsabschnitte von GGG 2.G. Nur eine kleine Gruppe der Abschnitte, 0,05%, bekommt eine FRI-Bewertung von „drei“. Auch nur 0,02% der Leitungsteile aus Duktiguss der zweiten Generation befinden sich in Gruppe vier. Die schlechteste Bewertung von „fünf“ wurde für keinen Leitungsabschnitt vergeben.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktiguss der zweiten Generation wurde mit 1,91 berechnet.

Failure Risk Index Längsriss Scherbenbruch	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	543	9,10
2	5.423	90,84
3	3	0,05
4	1	0,02
5	0	0,00

Tabelle 98: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Duktiguss 2. Generation

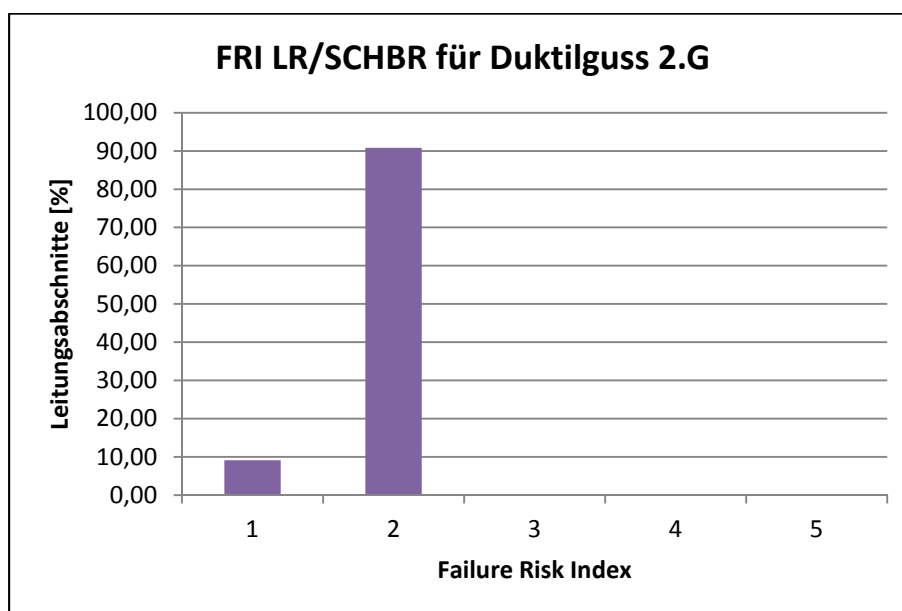


Abbildung 33: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Duktiguss 2. Generation

6.3.4.6 Rohrmaterial Stahl

Stahlleitungen werden seit Beginn des Haupt- und Zubringerleitungsnetzes verbaut. 50,28 Kilometer wurden von dieser Materialart insgesamt verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 1.448 Einzelstücke.

Stahlleitungen sind nur sehr geringfügig schadensanfällig gegenüber Längsriss Scherbenbruch. Die Schadensrate beträgt 0,02.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich immerhin 1.128 Leitungsabschnitte (77,90%). Die Gruppe zwei enthält weitere 19,48% der Leitungsabschnitte aus Stahl. Nur mehr 23 Abschnitte, 1,59%, bekommen eine FRI-Bewertung von „drei“. In den beiden schlechtesten Bewertungsgruppen vier und fünf sind 15 Leitungsabschnitte ausgewiesen. Dabei entfallen 14 Abschnitte auf die Gruppe vier und ein Abschnitt auf die Gruppe fünf.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Stahl wurde mit 1,26 berechnet.

Failure Risk Index Längsriss Scherbenbruch	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	1.128	77,90
2	282	19,48
3	23	1,59
4	14	0,97
5	1	0,07

Tabelle 99: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Stahl

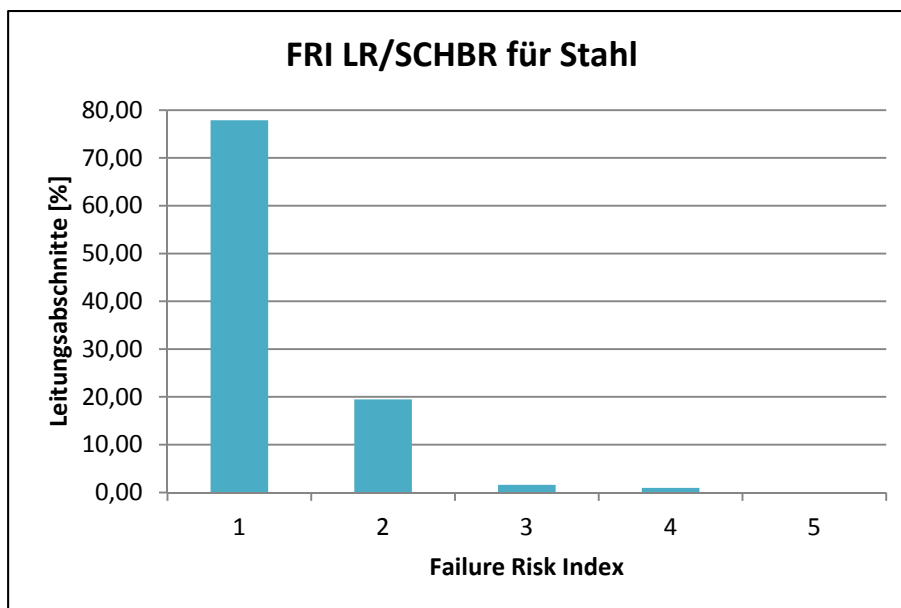


Abbildung 34: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Stahl

6.4 FRI Rundriss

Der Failure Risk Index für Rundriss soll die genaue Schadensanfälligkeit der Rohrleitungen auf diese Schadensart darstellen. Damit kann eine sehr viel detailliertere Aussage über den Zustand der Rohrleitungen getroffen werden, als es bei einem FRI gesamt (siehe Kapitel 5, Netz A) möglich wäre.

6.4.1 Indikatoren Schadenswahrscheinlichkeit

Wie bereits angeführt setzt sich die Schadenswahrscheinlichkeit aus den beiden Unterindizes *Rohrleitungsparameter* und *Umgebungsparameter* zusammen. Beim FRI Rundriss werden aus der gesamten Indikatoren-Liste die für diese Schadensart relevanten Indikatoren ausgewählt. Dabei sind einige allgemeine Indikatoren vorhanden, welche bei allen Schadensarten verwendet werden. Spezielle Indikatoren für Rundrisse (z.B. Setzungsempfindlichkeit oder Verkehrsbelastung) machen aber den Unterschied zu anderen Auswertungen aus.

Im Unterindex *Rohrleitungsparameter* sind sieben Indikatoren, welche die Leitung und deren Eigenschaften beschreiben, vorhanden.

Die sieben Indikatoren des Unterindex *Umgebungsparameter* bilden den Standort, an dem der Leitungsabschnitt verlegt wurde ab und stellen das Umfeld und die möglichen Belastungen aus diesem Bereich dar.

		Indikator des FRI Rundriss	Punkte
Schadenswahrscheinlichkeit	Rohrleitungsparameter	Material	0 - 5
		Dimension	0 - 5
		Verlegejahr	0 - 5
		Anzahl Vorschäden	0 - 5
		Verbindungsart	0 - 5
		Schubsicherung	0 - 5
		Betriebsdruck	0 - 5
	Umgebungsparameter	Setzungsempfindlichkeit	0 - 5
		Kriech- u. Rutschgebiete	0 - 5
		Schanzen, Wälle, ...	0 - 5
		Baumstandorte	0 - 5
		Verkehrsbelastung	0 - 5
		Belagszustand	0 - 5
		Mech. Belastung Tramgleise	0 - 5

Tabelle 100: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit

Die in Tabelle 100 dargestellten Indikatoren werden im Folgenden beschrieben und ihre Schadensraten und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

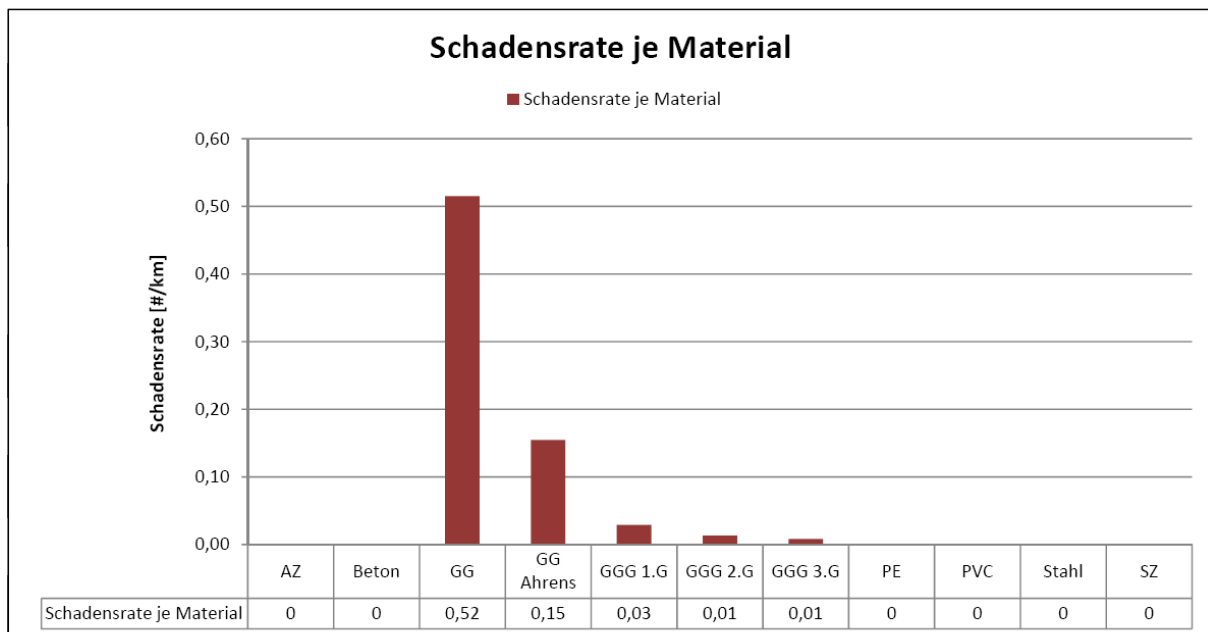
6.4.1.1 Rohrmaterial

Rundrisse finden sich in Netz B bis jetzt nur bei den Materialien Grauguss, Grauguss Ahrens und den drei Generationen des Duktulgusses. Für diese Materialgruppen wird in weiterer Folge auch der FRI Rundriss berechnet.

Alle anderen Materialien werden wegen fehlender Schadensraten aus der weiteren Analyse ausgeschieden.

Das auf die Schadensart Rundriss anfälligste Material ist, mit einer Schadensrate von 0,52, der Grauguss.

Die Punkte eins bis fünf wurden auf die oben genannten Materialien, nach den jeweiligen Schadensraten verteilt. Alle weiteren Materialien bekommen keinen Punkt.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
max Wert 0,52	< 0,104	< 0,208	< 0,312	< 0,416	≥ 0,416

Tabelle 101: Schadensraten nach dem Material und die Punkteverteilung

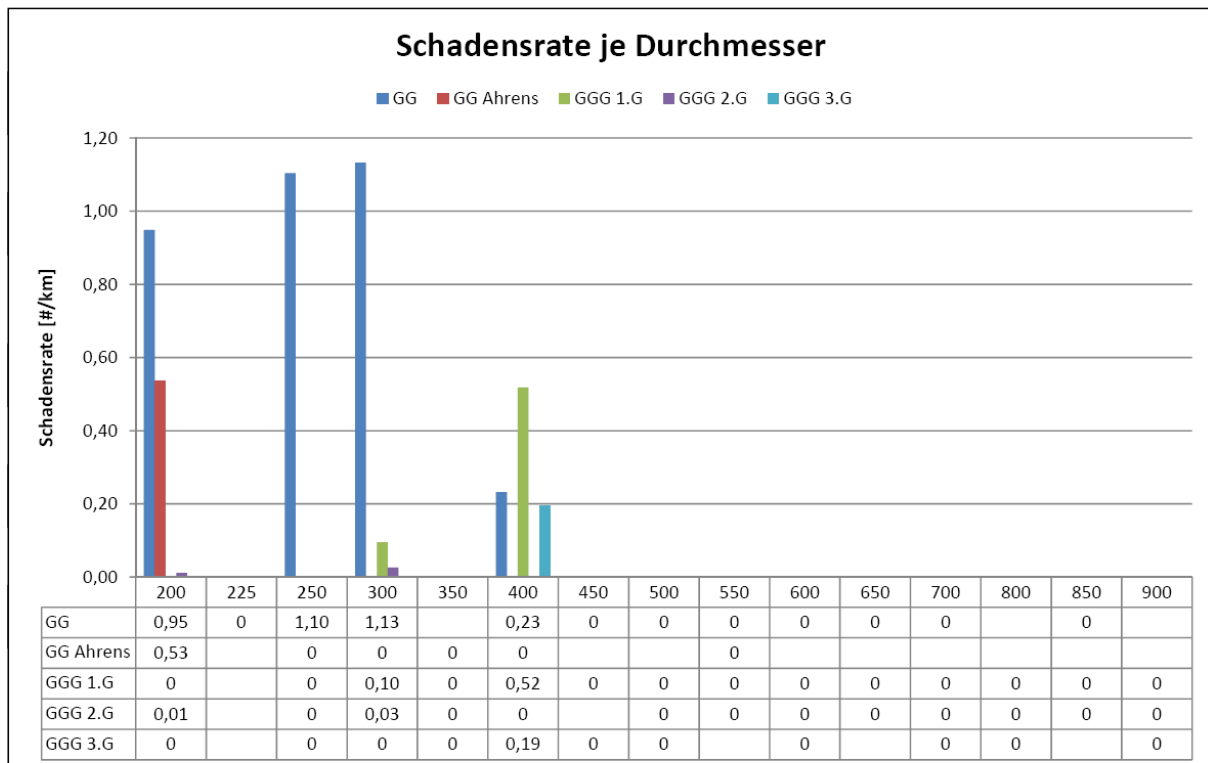
6.4.1.2 Durchmesser

Im Haupt- und Zubringerleitungsnetz B sind Rohre von 200 mm bis zu 2.360 mm verlegt. Bei den hier betrachteten Materialien sind jedoch nur Durchmesser bis zu 900 mm vorhanden. Die Materialien Duktilguss der ersten beiden Generationen wurden zusätzlich zu den in der Tabelle dargestellten Durchmessern auch noch in DN1000 verlegt.

Leitungen mit einem Durchmesser von 200 mm sind mit über 200 km Verlegelänge am häufigsten verwendet. Am zweitöftesten sind mit knapp 100 km Leitungslänge Rohre mit einem Durchmesser von 300 mm verlegt.

Die meisten Schäden, bezogen auf einen Kilometer, treten mit 1,13 bei Graugussleitungen mit einem Durchmesser von 300mm auf. Allerdings reihen sich die Leitungsdurchmesser 250 und 200 mit Schadensraten von 1,10 beziehungsweise 0,95 nur unwesentlich dahinter ein. Auffällig ist bei dieser Auswertung, dass nur kleine Durchmesser bis 400 mm von Rundrissen betroffen sind.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
max Wert 1,13	vorhanden kein Schaden	< 0,28	< 0,57	< 0,85	≥ 0,85

Tabelle 102: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung

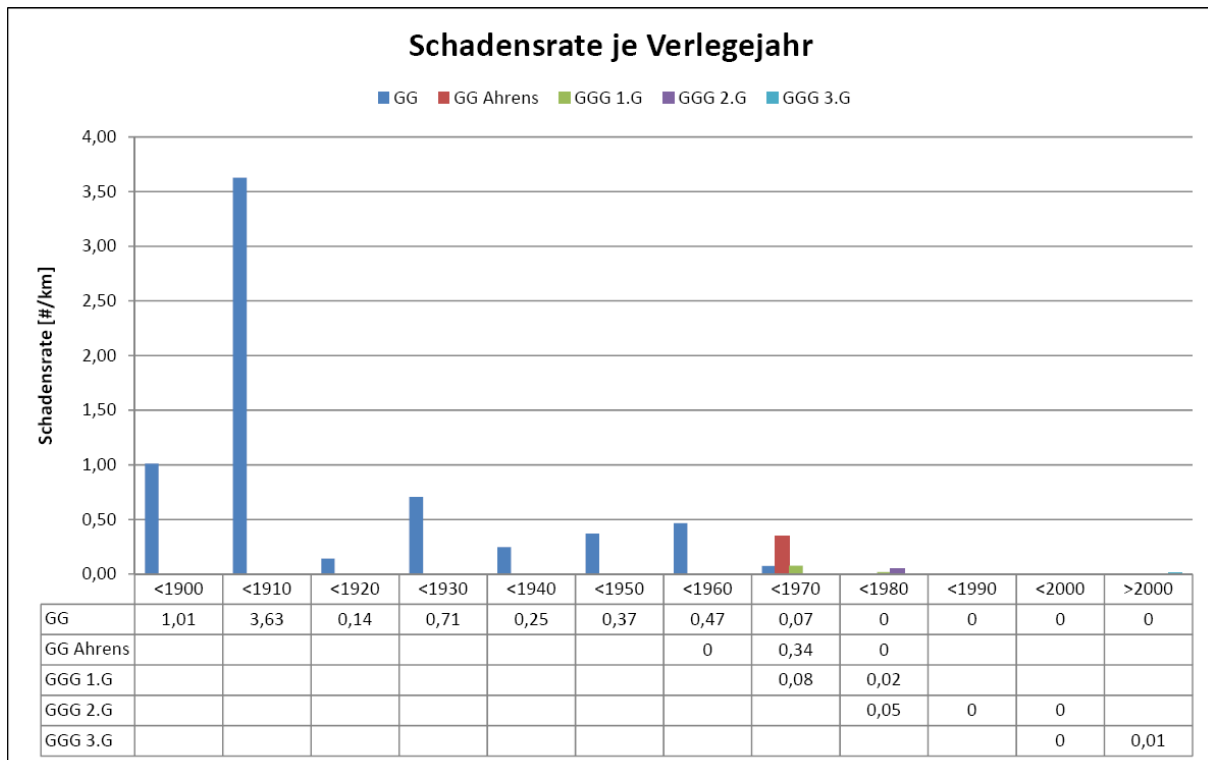
6.4.1.3 Verlegejahr

Die ersten Leitungen wurden bereits im Jahr 1870 eingebaut. Bis in die 1960er Jahren waren es fast ausschließlich Graugussleitungen.

Die höchste Schadensrate haben Leitungen aus Grauguss und einem Verlegejahr zwischen 1900 und 1909. Allerdings haben Graugussleitungen vom Beginn der Leitungsverlegung bis in die 1960er Jahre immer Rundrisse zu verzeichnen. Alle anderen Schäden dieser Art traten erst ab den 1960er Jahren auf.

Für die einfachere Handhabung wurden die Gruppen in Zehnjahres-Abschnitte zusammengefasst. Dabei fallen beispielsweise in die Gruppe < 1970 alle Leitungen, die in den Jahren 1960 bis 1969 verlegt wurden.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 3,63	kein Schaden	0,91	1,82	2,72	2,72

Tabelle 103: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung

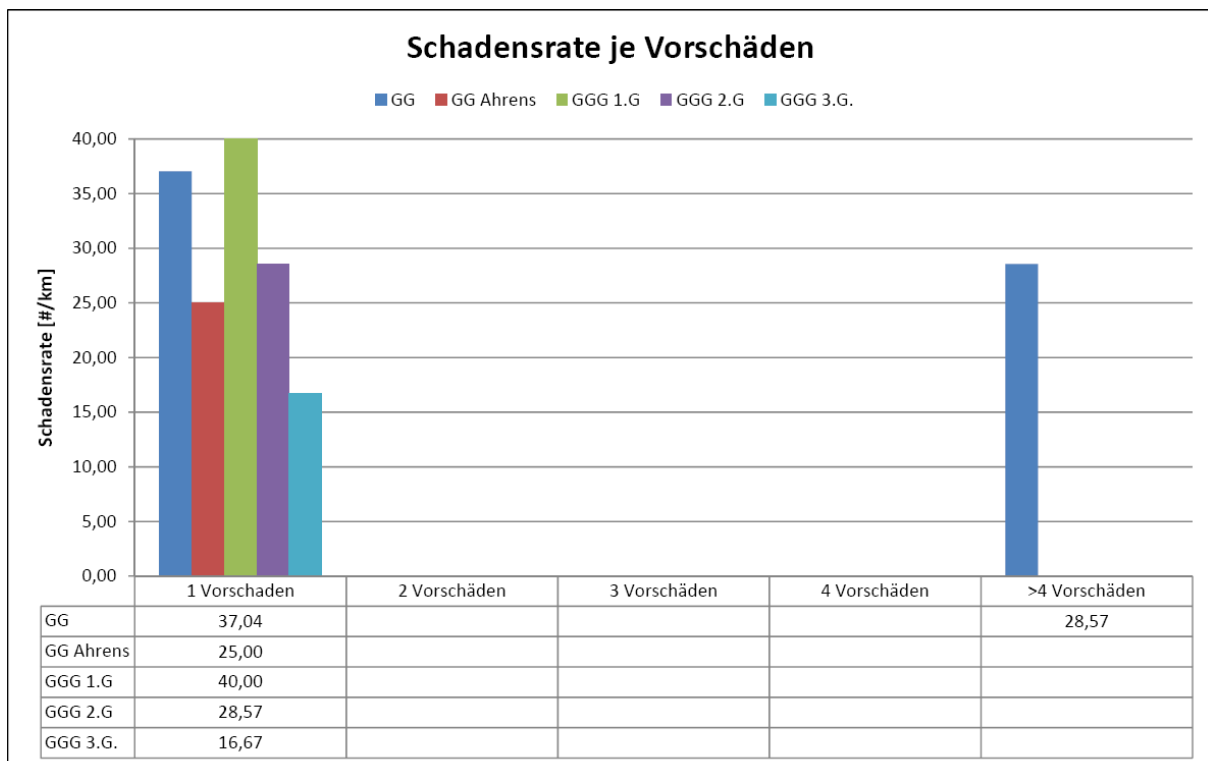
6.4.1.4 Vorschäden

Wie bereits in Kapitel 2.5 – Räumliche und zeitliche Häufungen von Schadensfällen beschrieben, treten nach einem Initialschaden oft im unmittelbaren Umfeld weitere Schäden auf. Die betrachteten Schadensfälle in der Tabelle zeigen Vorschäden auf dem gleichen Leitungsabschnitt.

Durch die kurzen Leitungsabschnitte bekommen die Schadensraten bei den Vorschäden hohe Werte. Die Punkteverteilung für diesen Indikator wird mit null Punkten für Leitungen ohne Schaden und mit fünf Punkten für Leitungen mit einem oder mehreren Schäden festgesetzt. Durch die hohen Schadensraten geht dieser Indikator als Schwergewicht in die Berechnung des FRI mit ein und bildet damit die Gefahr von Schadensanhäufungen bzw. den optimalen Erneuerungszeitpunkt nach bereits einem oder wenigen Schäden ab.

Die hohe Schadensrate von 40 wurde auf einem Leitungsabschnitt aus Duktilguss der ersten Generation mit einem Vorschaden ermittelt. Bei diesem Material sind zwei Leitungsabschnitte mit in Summe 50 Metern Länge mit einem Vorschaden vorhanden. Durch diese geringen Eigenschaftslängen treten die hohen Schadensraten von 40 auf.

Alle weiteren Leitungen mit Vorschäden haben eine ähnlich hohe Schadensrate.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	<	<	<	<	≥
max Wert 40,00	8,00	16,00	24,00	32,00	32,00

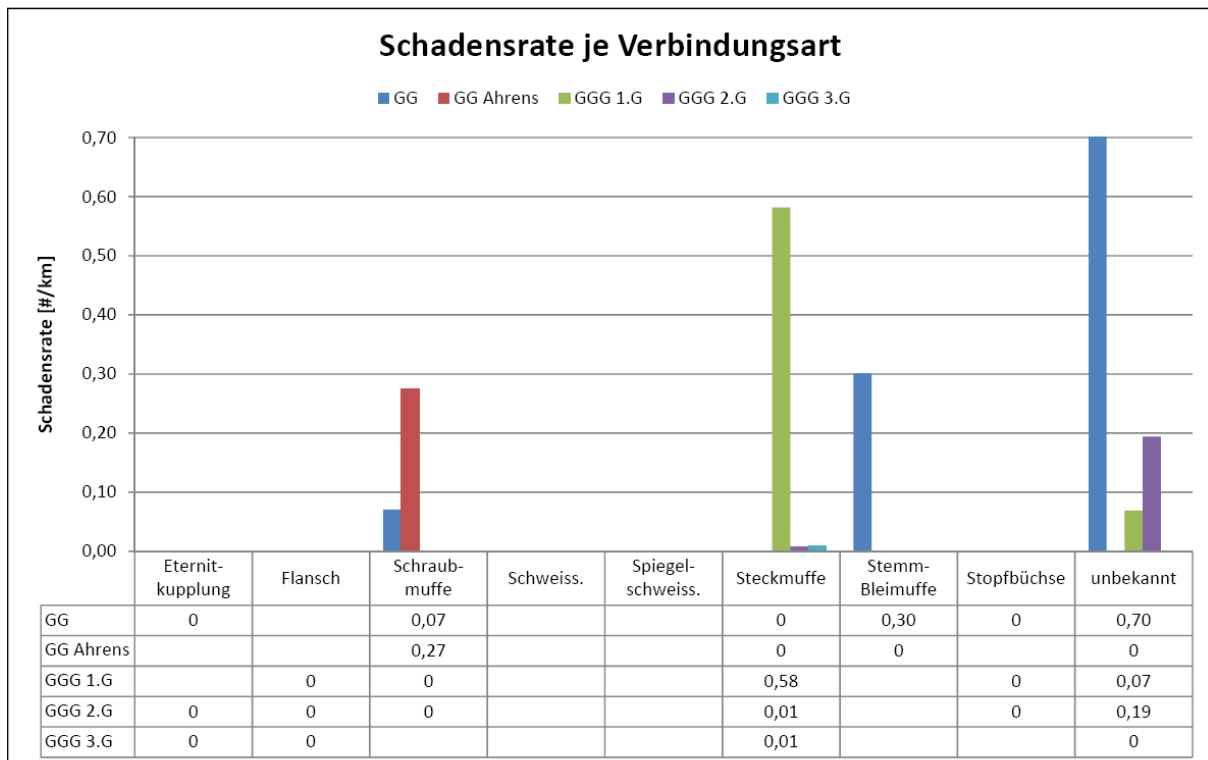
Tabelle 104: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung

6.4.1.5 Verbindungsart

In den Aufzeichnungen des Wasserwerkes werden die vorhandenen Verbindungen umfangreich dokumentiert, allerdings gibt es auch Abschnitte mit unbekanntem Eigenschaften. Bei den hier betrachteten Materialien traten bei Schraub- und Steckmuffen, Stemmbleimuffen und bei der Gruppe der unbekanntem Verbindungen, Schäden auf.

Die höchste Schadensrate tritt mit 0,70 Schäden pro Kilometer bei Graugussleitungen mit unbekannter Verbindungsart auf.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 0,70	kein Schaden	0,18	0,35	0,53	0,53

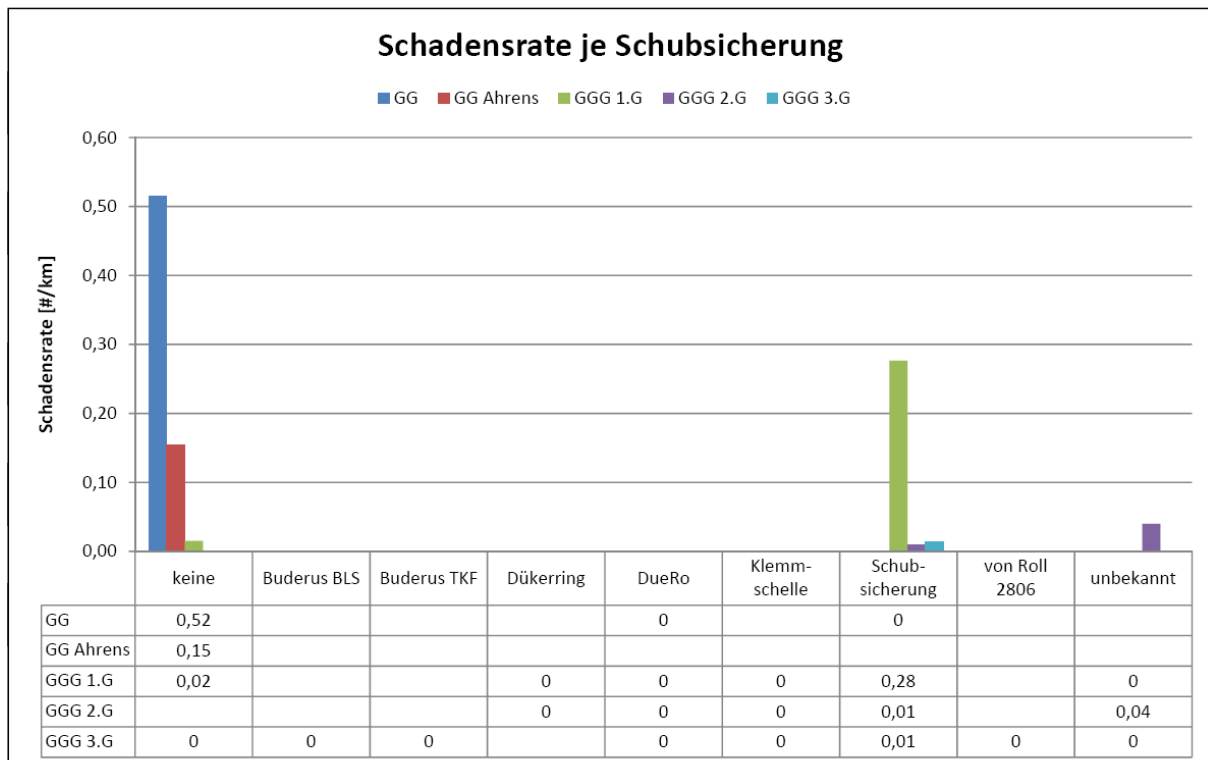
Tabelle 105: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung

6.4.1.6 Schubsicherung

An Bögen oder Abzweigungen von Leitungen treten Schubkräfte auf. Diese können über Widerlager oder auch über die Rohraußenreibung mit dem Erdreich aufgenommen werden. Bei instabilen Böden oder auch im innerstädtischen Bereich mit vielen angrenzenden Leitungsträgern bietet sich die Aufnahme der Schubkräfte über Schubsicherungen an den Rohrverbindungen an. Dabei werden die einzelnen Rohrleitungsabschnitte kraftschlüssig miteinander verbunden und dadurch Bewegungen in den Verbindungen vermieden. Bewegungen in den Verbindungen würden zu Undichtigkeiten und damit zu Wasseraustritt führen.

Die meisten Schäden wurden mit einer Schadensrate von 0,52 Schäden pro Kilometer bei Graugussleitungen ohne Schubsicherungen festgestellt.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5	
	vorhanden	<	<	<	≥	
max Wert	0,52	kein Schaden	0,13	0,26	0,39	0,39

Tabelle 106: Schadensraten nach den Schubsicherungen und die Punkteverteilung

6.4.1.7 Betriebsdruck

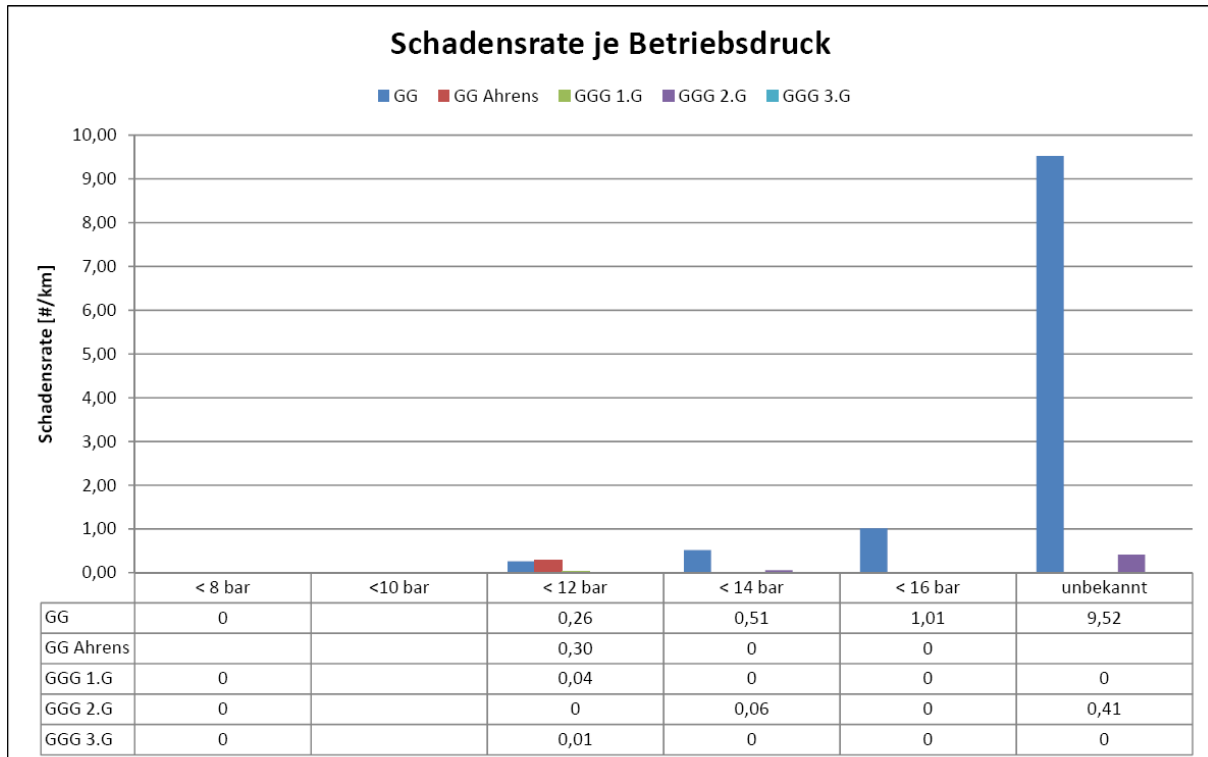
Im Netzwerk haben alle Leitungen einen Innendruck von 7,3 bis 14,7 bar, sofern ein Leitungsdruck bekannt ist. Die Druckzonen wurden in fünf Gruppen mit jeweils zwei bar, von acht bis 16 bar, unterteilt. Abschnitte mit einem unbekanntem Wasserdruck erhalten eine eigene Gruppe. Bei der Druckstufe acht bis zehn bar sind allerdings keine Leitungsabschnitte enthalten.

Der Betriebsdruck beansprucht das Rohrmaterial von innen. Über die Jahrzehnte der Liegedauer verschlechtern sich die Materialeigenschaften, womit bei größeren Innendrücken auch die Gefahr des Versagens des Materials zunimmt. Zusätzlich führt ein hoher Betriebsdruck bei Schadensfällen zu größerem Wasseraustritt und somit zu einem höheren Schadensausmaß.

Die höchste Schadensrate liegt in der Gruppe des unbekanntem Leitungsdrucks. Die Graugussleitungen weisen bei dieser Eigenschaft 9,52 Schäden pro Leitungskilometer auf. Dieser sehr hohe Wert ergibt sich aus der geringen Leitungslänge von 1,05 Kilometern beim Material Grauguss mit unbekanntem Betriebsdruck.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang

noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5	
	vorhanden	<	<	<	≥	
max Wert	9,52	kein Schaden	2,38	4,76	7,14	7,14

Tabelle 107: Schadensraten nach dem Betriebsdruck und die Punkteverteilung

6.4.1.8 Setzungsempfindlichkeit

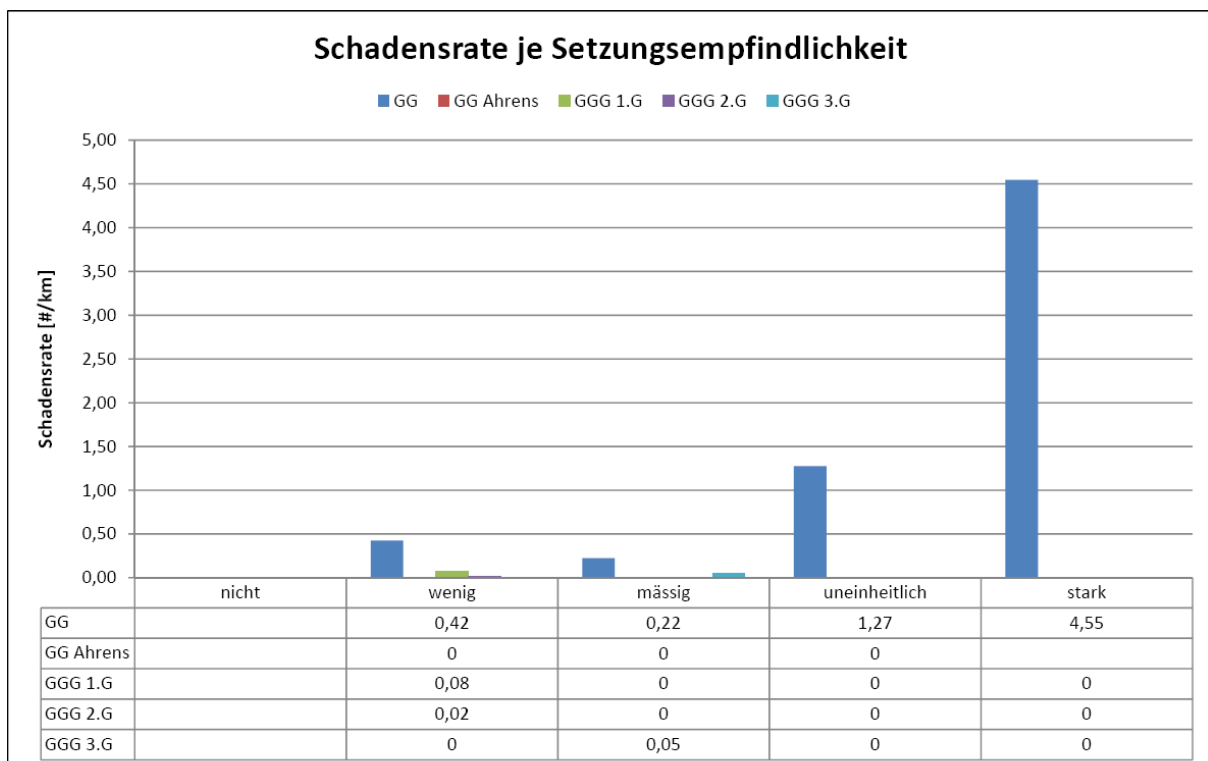
Die Setzungsempfindlichkeit wurde über geologische Karten, Baugrunderkarten und geologische Gutachten, sowie über das Baugrundarchiv der Stadt und den Erfahrungen der verschiedenen Bauunternehmungen erhoben und digitalisiert. Die Gruppeneinteilung erfolgte in fünf Unterteilungen von nicht setzungsempfindlich bis stark setzungsempfindlich.

Den einzelnen Unterteilungen wurden auch gleich entsprechende Bodentypen zugewiesen. Nicht setzungsempfindliche Gebiete haben meist Molassefels oder Schotter und Moränen im Untergrund. Als stark setzungsempfindliche Bodentypen wurden Torf und Seekreide ausgewiesen.

Mit Abstand der höchste Schadenswert (4,55) ist bei Grauguss Leitungen in Böden der Gruppe stark setzungsempfindlich aufgetreten.

Leitungsabschnitte in nicht setzungsempfindlichen Böden wurden wegen fehlender Beeinflussung mit null Punkten versehen.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 4,55	kein Schaden	1,14	2,28	3,41	3,41

Tabelle 108: Schadensraten nach den Setzungsempfindlichkeiten und die Punkteverteilung

Weiters wurden als Indikatoren Kriech- und Rutschgebiete bzw. Schanzen, Wälle, Gräben und Auffüllungen, sowie Baumstandorte festgehalten. Bei Leitungsabschnitten in diesen Bereichen wurden jedoch noch keine Schadensfälle dokumentiert, weshalb sich die Schadensraten jeweils zu „Null“ ergeben haben. Die drei Indikatoren fallen daher aus der Berechnung des FRI Rundriss heraus.

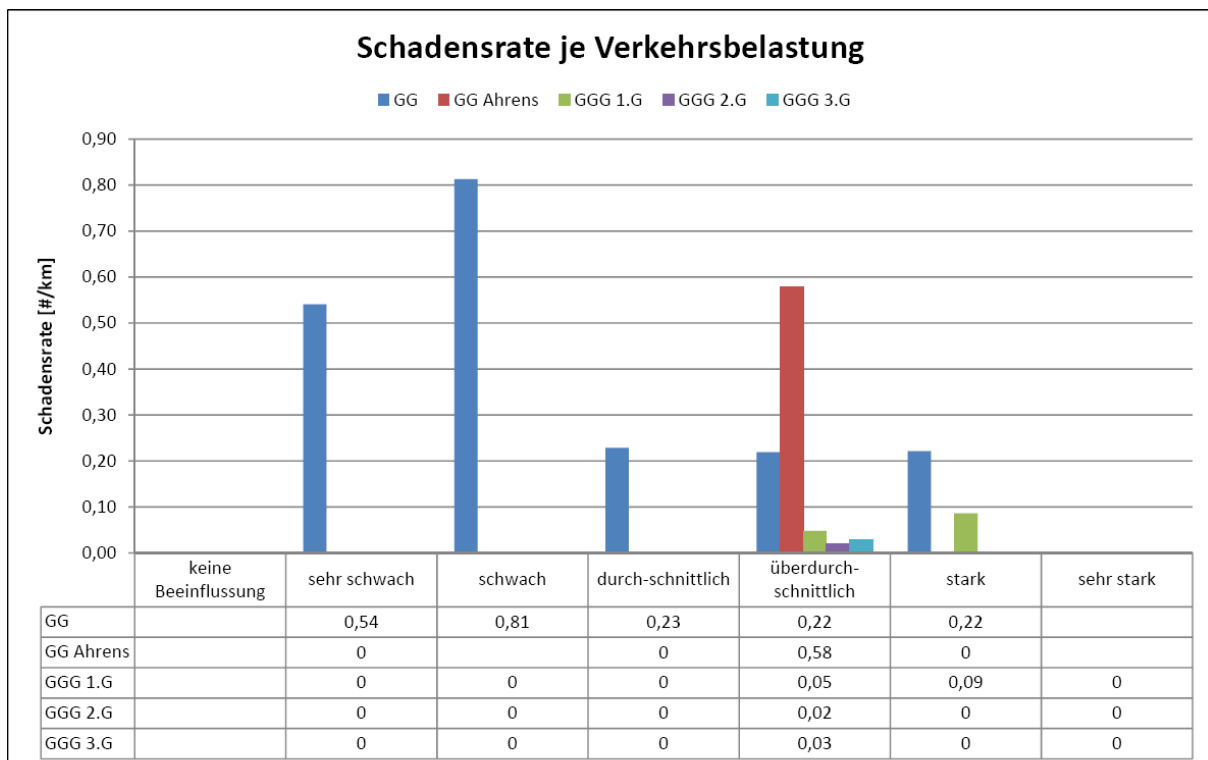
6.4.1.9 Verkehrsbelastung

Wie bereits mehrere Untersuchungen gezeigt haben (Friedl, 2007; et al), führt eine erhöhte Verkehrsbelastung zu vermehrten Schäden bei der Leitungsinfrastruktur unterhalb von Verkehrsflächen. Insbesondere ein großer Anteil an Schwerverkehr führt zu hohen Spannungen im Untergrund, wodurch eine Überbeanspruchung der Leitungen entsteht.

Im Netz B wurde die Verkehrsbelastung jeder Straße mittels Informationen des Tiefbauamtes festgestellt und in die Datenbank eingetragen. Die Unterteilung erfolgte in sechs Gruppen, von sehr schwacher bis sehr starker Belastung. Für alle Leitungsabschnitte, die nicht im Straßenkörper verlegt sind, wurde die siebente Gruppe (keine Beeinflussung) eingefügt.

Die höchsten Schadensraten wurden mit 0,81 Schäden pro Kilometer bei Graugussleitungen mit schwacher Verkehrsbelastung festgestellt.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
max Wert 0,81	vorhanden kein Schaden	< 0,20	< 0,41	< 0,61	≥ 0,61

Tabelle 109: Schadensraten nach den Verkehrsbelastungen und die Punkteverteilung

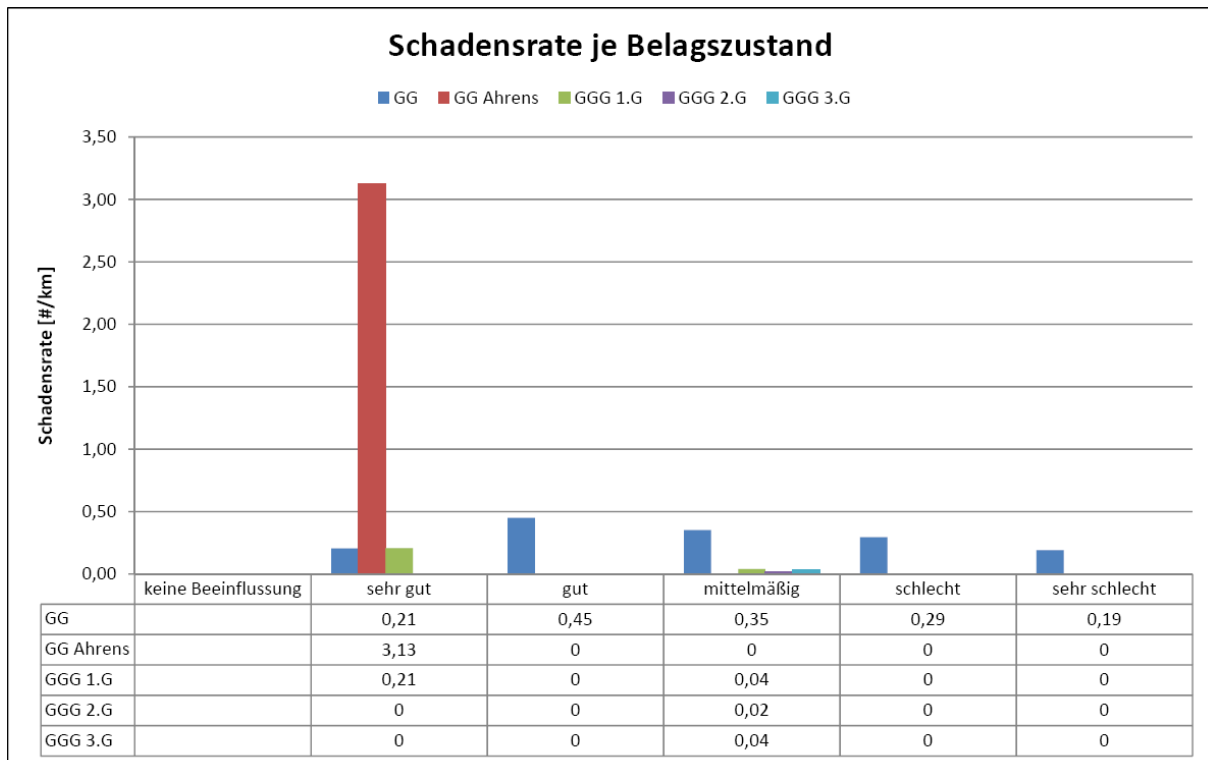
6.4.1.10 Belagszustand

Der Einfluss der Verkehrsbelastung und des Schwerverkehrs auf die Schadensbildung bei Leitungsinfrastruktur ist bekannt (in Anlehnung an *Friedl, 2007*). Der Oberflächenzustand spielt dabei allerdings auch eine große Rolle. Ein großflächig, intakter Asphaltaufbau kann die aufgebrachten Lasten verteilen und in gedämpfter Form an den Straßenunterbau weiterleiten. Wurde der Straßenaufbau durch Bauarbeiten, wie beispielsweise durch Leitungsgrabungen in seiner Kontinuität gestört, kommt es zu ungleichmäßigen Lastabtragungen und schlussendlich zu uneinheitlichen Setzungen. Die dadurch unebene Straßenoberfläche in Verbindung mit herkömmlichen Schlaglöchern führen zu vertikalen Beschleunigungen der Fahrzeuge. Dadurch steigen die Belastungen im Untergrund, wodurch eine Überbeanspruchung der Leitungen der Wasserinfrastruktur ausgelöst wird.

Der Belagszustand jeder Straße wurde mit Hilfe des Tiefbauamtes festgestellt und in die Datenbank ein gepflegt. Die Unterteilung erfolgte in fünf Gruppen, von sehr gut bis sehr schlecht. Für alle Leitungsabschnitte, welche nicht im Straßenkörper verlegt sind, wurde die sechste Gruppe (keine Beeinflussung) eingefügt.

Der höchste Wert der Schadensrate konnte mit 3,13 Schäden pro Kilometer bei Grauguss Ahrens Leitungsabschnitten aufgezeichnet werden. Entgegen den Erwartungen trat dieser Wert bei sehr gutem Fahrbahnzustand auf. Als Erklärung kann hier die geringe Gesamtlänge des sehr guten Belagszustandes bei GG Ahrens-Leitungen angeführt werden.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten je zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5
	vorhanden	<	<	<	≥
max Wert 3,13	kein Schaden	0,78	1,57	2,35	2,35

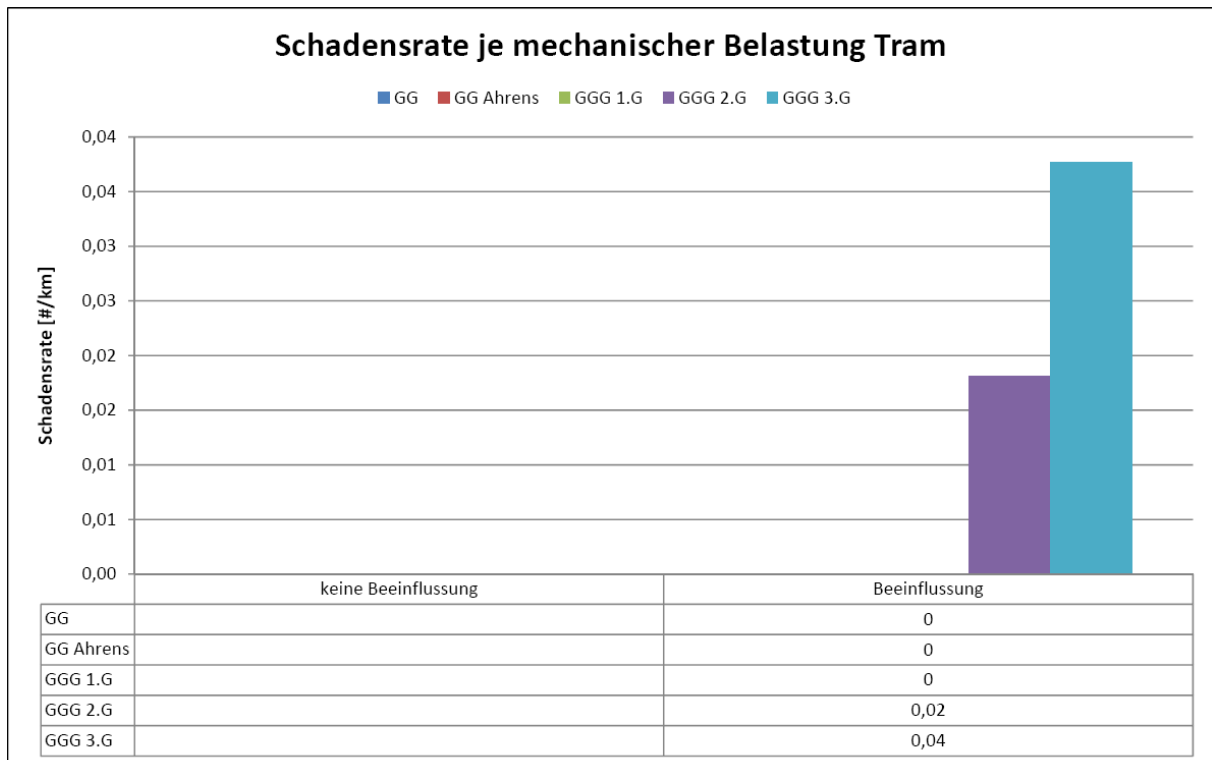
Tabelle 110: Schadensraten nach den Belagszuständen und die Punkteverteilung

6.4.1.11 Mechanische Belastung Tram

Die mechanische Belastung der Straßenbahnen stellt wie auch bei herkömmlicher Verkehrsbelastung eine erhöhte Gefahr der Überbelastung durch Spannungsspitzen bei der Leitungsinfrastruktur dar (in Anlehnung an *Friedl, 2007*). Alle Leitungsabschnitte, welche innerhalb einer vier Meter Pufferzone, ab der Gleisachse des nächsten Gleises verlegt sind, gelten für die FRI Berechnung als beeinflusst.

Den höchsten Schadenswert pro Kilometer weist die Duktulgussleitung der dritten Generation auf, wobei dieser Wert mit 0,04 extrem niedrig ist.

Die folgende Tabelle zeigt alle Gruppen und Materialien. Zellen ohne Eintrag wurden in der Berechnung mit null Punkten versehen. Zellen mit dem Eintrag „Null“ stellen dar, dass es Leitungsabschnitte mit den jeweiligen Eigenschaften gibt, jedoch bislang noch kein Schaden festgestellt wurde. Diese Elemente werden in der Berechnung mit einem Punkt gezählt. Alle Einträge mit einer Schadensrate erhalten zwei bis fünf Punkte.



Punkteverteilung	1	2	3	4	5	
	vorhanden	<	<	<	≥	
max Wert	0,04	kein Schaden	0,01	0,020	0,03	0,03

Tabelle 111: Schadensraten nach der mechanischen Belastung Tram und die Punkteverteilung

6.4.2 Indikatoren Schadensausmaß

Das Schadensausmaß stellt die Konsequenzen von Schadensfällen dar. Dabei werden verschiedene Aspekte eines Leitungsschadens berücksichtigt. Zum einen ergeben sich für den Netzbetreiber Erschwernisse und zusätzliche Kosten, die verursacht werden können. Dazu zählen unter anderem die erforderlichen Bauarbeiten, Wasserverluste und die mögliche Installation einer Ersatzwasserversorgung. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang auch der Imageverlust des Unternehmens.

Auf der anderen Seite wird auch die unmittelbare Umgebung einer Schadstelle negativ beeinflusst, dazu zählen beispielsweise Behinderungen für Passanten, Staubildungen und Verzögerungen auf den Straßen rund um den Schadensort, Schäden bei anderen Leitungsinfrastrukturen oder auch kleinräumige Überschwemmungen mit Schäden an Gebäuden und Fahrzeugen.

Beim Leitungsnetz B konnten sieben Indikatoren für das Schadensausmaß bzw. die Konsequenzen definiert werden. Die Gewichtung der Indikatoren erfolgte mittels Experteneinschätzung, wodurch eine subjektive Bewertungsmethode Anwendung fand.

	Indikator	Punkte
Schadensausmaß	Baumstandorte	1 - 5
	Oberflächenbefestigung	1 - 2
	Gasleitungen	0 - 5
	Verkehrsbelastung	0 - 5
	Trambelastung	0 - 5
	Betriebsdruck	0 - 5
	Durchmesser	1 - 5

Tabelle 112: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes

Die in Tabelle 112 dargestellten Indikatoren werden im Folgenden beschrieben und ihre Schadensraten und Punkteverteilungen für Dezember 2011 dargestellt. Die SR wurden immer mit der Einheit Schäden pro einem Kilometer berechnet.

6.4.2.1 Baumstandorte

Bäume, die direkt über oder knapp neben Wasserleitungen gepflanzt wurden, können zu erheblichen Erschwernissen bei der Behebung von Leckagestellen führen. Je nach dem Abstand zur Leitungssachse wurden die Punkte in drei Gruppen vergeben.

Bäume	Punkte Bäume
keine	0
0,5 bis 1,5 m	3
0,0 bis 0,5 m	5

Tabelle 113: Bewertungsgruppen der Baumstandorte

6.4.2.2 Oberflächenbefestigung

Die Oberflächenbefestigung stellt die Erschwernisse bei den Reparaturarbeiten und den Kostenunterschied bei den Grabungsarbeiten sowie bei der Wiederherstellung dar. Für die Berechnung wurde in „Straße“ und „unbefestigt“ unterschieden. Wobei bei unbefestigter Oberfläche null Punkte vergeben wurden und bei befestigten Flächen fünf Punkte.

Oberflächenbefestigung	Punkte Oberflächenbefestigung
keine Straße	0 5

Tabelle 114: Bewertungsgruppen der Oberflächenbefestigung

6.4.2.3 Gasleitungen

Bei Schäden sind nicht nur die Wasserleitungen selbst betroffen, sondern auch das Erdreich rund um die Schäden und somit auch andere Leitungsträger, die sich in der Nähe von Schadstellen befinden. Beim Leitungsnetz B wurden lediglich Gasleitungen aufgenommen, andere Leitungsträger wurden nicht berücksichtigt.

Sind Gasleitungen bei dem jeweiligen Haupt- und Zubringerleitungsabschnitt vorhanden, werden fünf Punkte vergeben, ansonsten null Punkte.

Gasleitungen	Punkte Gasleitungen
keine Gasleitungen	0 5

Tabelle 115: Bewertungsgruppen der Gasleitungen

6.4.2.4 Verkehrsbelastung

Hauptstraßen über Leitungsabschnitten stellen für die Reparatur von Schäden eine erhebliche Erschwernis dar. Zum einen müssen die Bauarbeiten unter meist beengten Platzverhältnissen und unter Zeitdruck stattfinden, um eine Behinderung möglichst gering und von kurzer Dauer zu halten.

Zum anderen werden Passanten und Autofahrer behindert, womit sich für Fußgänger Umwege und für Autofahrer Staus ergeben. Je nach der Stärke des Verkehrsaufkommens werden ein bis fünf Punkte vergeben. Bei Leitungsabschnitten abseits von Straßen werden keine Punkte für die Berechnung angenommen.

Verkehrsbelastung	Punkte Verkehrsbelastung
keine	0
sehr schwach bis schwach	1
durchschnittlich	2
überdurchschnittlich	3
stark	4
sehr stark	5

Tabelle 116: Bewertungsgruppen der Verkehrsbelastung

6.4.2.5 Straßenbahn

Schwieriger als beim herkömmlichen Straßenverkehr stellt sich die Lage beim schienegebundenen öffentlichen Verkehr dar. Schäden, die durch Wasseraustritt die Gleislage gefährden, ziehen die Einstellung des Schienenverkehrs nach sich. Für das Verkehrsunternehmen ergeben sich dadurch Mehrkosten und Mehraufwand für die Einrichtung eines Schienenersatzverkehrs.

Straßenbahn	Punkte Straßenbahn
keine	0
Tram	5

Tabelle 117: Bewertungsgruppen der Straßenbahn

6.4.2.6 Betriebsdruck

Bei ansteigendem Betriebsdruck tritt auch mehr Wasser aus Schadstellen aus (*Friedl, 2012*). Dadurch steigt auch das Schadensausmaß im Umkreis eines Schadens. Je höher der Druck in den Leitungen, desto mehr Punkte wurden vergeben.

Betriebsdruck	Punkte Betriebsdruck
< 8 bar	1
< 10 bar	2
< 12 bar	3
< 14 bar	4
< 16 bar	5
unbekannt	5

Tabelle 118: Bewertungsgruppen des Betriebsdrucks

6.4.2.7 Durchmesser

Der Durchmesser eines Rohres stellt einen wichtigen Wert beim Schadensausmaß von Rundrissen dar. Je größer die Wassermenge in der Leitung ist, desto mehr Schaden entsteht in der Umgebung einer Schadstelle. Dabei können in einzelnen Fällen sogar kleinräumige Überschwemmungen an der Straßenoberfläche auftreten. Die Gruppen wurden nach folgender Tabelle eingeteilt.

Durchmesser	Punkte Durchmesser
200 - 300	1
>300 - 500	2
>500 - 700	3
>700 - 1000	4
>1000	5

Tabelle 119: Bewertungsgruppen des Durchmessers

6.4.3 Gewichtung der Indikatoren

6.4.3.1 Gewichtung der Schadenswahrscheinlichkeits - Indikatoren

Die Bestimmung der Indikatorgewichtung erfolgt innerhalb der Schadenwahrscheinlichkeit über die SR.

Alle Indikatoren, die für die jeweilige Leitung einen Wert aufweisen, erhalten die maximale Schadensrate des jeweiligen Indikators aus der Schadensratenanalyse. Alle Indikatoren, die für den jeweiligen Leitungsabschnitt nicht vorhanden sind, erhalten weder einen Punktwert noch eine Schadensrate.

Für die Berechnung der Gewichtungen werden alle maximalen SR einer Leitung aufsummiert. Dieser Summenwert ist für jeden Leitungsabschnitt unterschiedlich, da es bei jedem Abschnitt zu einer anderen Zusammenstellung der Indikatoren kommt.

Der Summenwert wird an dieser Stelle als Ausgangswert mit 100 Prozent gleichgesetzt. Die maximalen SR der einzelnen Indikatoren werden dann als Prozentwert von dem Summenwert neu dargestellt.

6.4.3.2 Gewichtung der Ausmaß - Indikatoren

Bei den Indikatoren des Schadensausmaßes bestand keine Möglichkeit der Gewichtung über Schadensraten. Um dennoch keine rein lineare Verteilung der Gewichtung zu erhalten, wurden zwei Indikatoren als Leitindikatoren ausgewählt. Diese beiden Indikatoren wurden in ihren Gewichtungen mittels Sensitivitätsanalyse variiert. Die restlichen Indikatoren wurden linear in die Berechnung aufgenommen.

Im Falle des Haupt- und Zubringerleitungsnetzwerkes B bei der Schadensart Rundriss fiel die Wahl der Leitindikatoren auf die Verkehrsbelastung und den Leitungsdurchmesser. Die Verkehrsbelastung des Leitungsabschnitts erhielt als Gewichtung zehn Prozent des Ausmaßes. Für den Durchmesser wurde als Gewichtung zehn Prozent vergeben.

Die restlichen 80 Prozent wurden, je nach Vorhandensein der einzelnen Indikatoren bei einem Leitungsabschnitt, linear verteilt.

6.4.4 Berechnungsergebnisse Rundriss

6.4.4.1 Gesamtergebnis FRI Rundriss

Die Zusammenführung der in Kapitel 6.4.1 und 6.4.2 beschriebenen Indikatoren und deren Gewichtungen führen zu einer umfangreichen Berechnungstabelle.

Das Ergebnis aller Leitungsabschnitte von Grauguss und Duktulguss aller drei Generationen, für die Berechnung des Failure Risk Index Rundriss, kann aus Tabelle 120 und Abbildung 32 entnommen werden. Dabei wird nicht nach Materialien unterschieden.

Die im Vorfeld getroffenen Annahmen und Einteilungen führen zum Ergebnis, dass 4.843 Leitungsabschnitte einen Failure Risk Index von „eins“ haben. Das sind 33,95% aller im Haupt- und Zubringerleitungsnetz B befindlichen Leitungsabschnitte aus den oben genannten Materialien.

Eine Bewertung von „zwei“ erhalten 8.889 Leitungsabschnitte oder 62,31% aller Abschnitte.

Für das Netz B können damit circa 96% aller Leitungen aus Grauguss und allen drei Generationen von Duktulguss als unbedenklich, im Sinne der FRI Rundriss Bewertung, angesehen werden. Die restlichen Materialien wurden wegen bislang fehlender Schadensfälle nicht in die Berechnung einbezogen.

Bei 434 Abschnitten ergab die Berechnung einen FRI von „drei“, das sind 3,04% der verlegten Leitungen. Ab der Bewertung von „drei“ kann eine erhöhte Instandhaltung der Leitungen sinnvoll werden.

Für 94 Leitungen wurde ein Wert von „vier“ und für sechs Abschnitte wurde ein FRI von „fünf“ berechnet. Gerade einmal 0,70% der Leitungen im Haupt- und Zubringerleitungsnetz B entfallen damit auf die schlechtesten beiden Bewertungsgruppen.

Mit dieser Auswertung erhalten 14.266 der insgesamt 16.279 Leitungsabschnitte eine Bewertung für den FRI Rundriss. Die restlichen 2.015 Leitungsabschnitte entfallen auf Materialien wie z.B. Beton oder Kunststoff. Diese Materialien weisen bislang keine Schadensfälle auf, womit sich auch keine Auswertung auf Grundlage der Schadensraten ergibt.

Failure Risk Index Rundriss	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	4.843	33,95
2	8.889	62,31
3	434	3,04
4	94	0,66
5	6	0,04

Tabelle 120: Verteilung des FRI Rundriss für alle Leitungsabschnitte

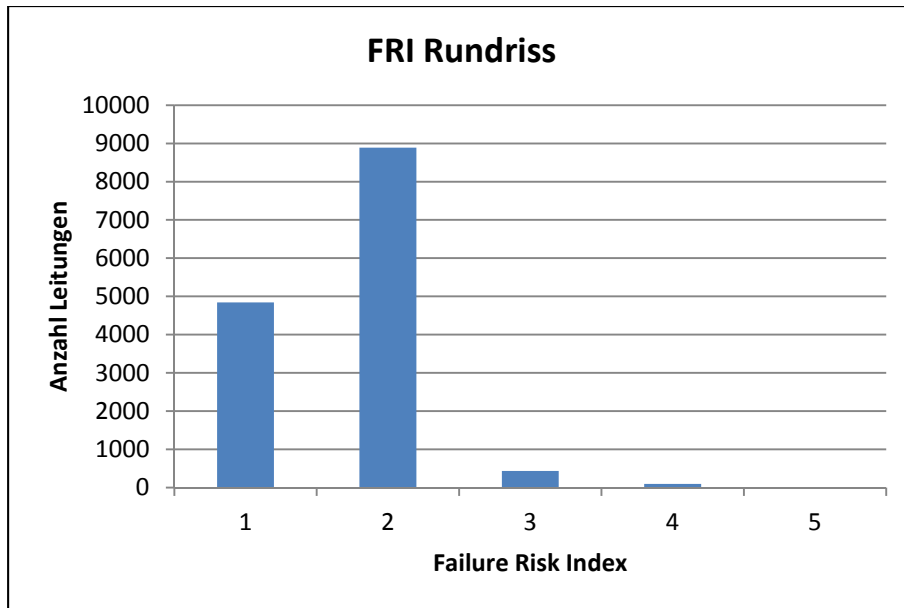


Abbildung 35: Verteilung des FRI Rundriss für alle Leitungsabschnitte

Nur 72 Leitungsabschnitte wurden in der Berechnung mit einer Schadenswahrscheinlichkeit von größer als „vier“ ermittelt. Im Bereich des Schadensausmaßes gibt es 2.544 Leitungen mit einer Bewertung von größer als „vier“. In den zwei Teilbereichen lässt sich eine große Anzahl von Leitungen ermitteln, welche entweder eine große Wahrscheinlichkeit oder große Konsequenzen haben. Aber nur ein kleiner Anteil aller Leitungen hat sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß.

Damit kann sich die Instandhaltung des Wasserwerkes auf einen kleinen Teil der Leitungen konzentrieren und dort verstärkt auf den Zustand achten. Durch den FRI Rundriss kann bereits im Vorfeld die passende Methode zur Instandhaltung ausgewählt und eingesetzt werden.

Die fünf vorliegenden Materialien haben jedoch die unterschiedlichsten Schadensanfälligkeiten gegenüber Rundriss, wodurch eine Betrachtung und Analyse für jedes Material einzeln notwendig wird. Im Folgenden werden die im Leitungsnetz B verlegten Materialien mit Schäden durch Rundriss mit den Ergebnissen der FRI Berechnung gesondert dargestellt.

6.4.4.1.1 Betrachtung der Leitungen mit Vorschäden

Leitungsabschnitte mit Vorschäden bilden einen zentralen Bestandteil in dieser Berechnung. Einerseits treten auf diesen Abschnitten, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, mit großer Wahrscheinlichkeit erneut Schäden auf, andererseits erhält der Indikator „Vorschäden“ einen sehr hohen Anteil an der Gewichtung aller Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

Keine Leitung mit einem Vorschaden entfällt in die FRI Gruppen eins und zwei. Auf Bewertungsgruppe drei entfallen knapp 55% der Leitungen mit Vorschäden dieser Gruppe. Rund 78% der Leitungen mit einem FRI von „vier“ und 50% der Leitungen mit einem FRI von „fünf“ hatten bereits einen Vorschaden.

Mit diesem Ergebnis wurden die Annahmen bezüglich der ausgehenden Gefahr von Vorschäden sehr gut abgebildet.

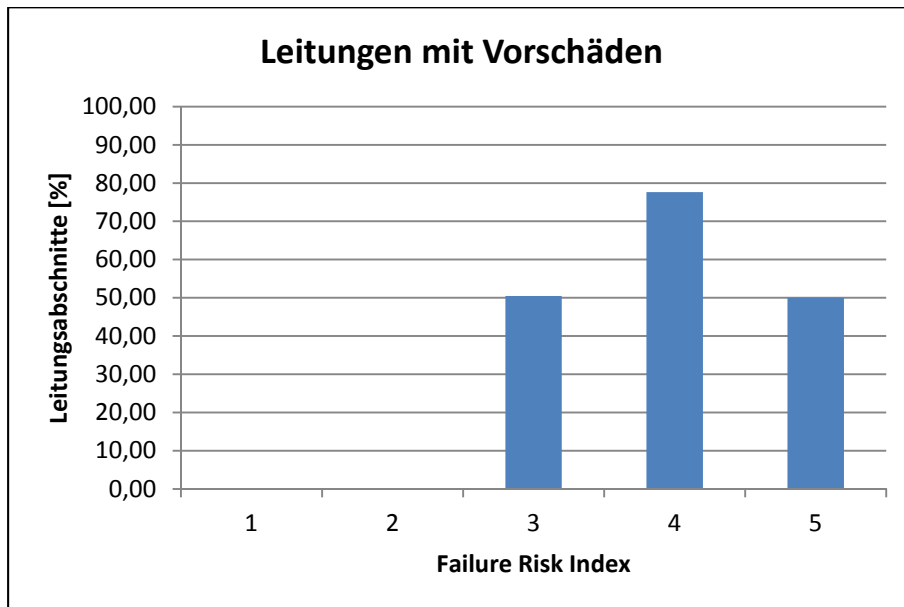


Abbildung 36: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe

Für eine schlechte FRI Bewertung eines Leitungsabschnittes ist es erforderlich, sowohl eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit als auch ein hohes Schadensausmaß aufzuweisen. Daher fallen auch Leitungsabschnitte mit einer hohen Schadenswahrscheinlichkeit in die ersten drei FRI Bewertungsgruppen.

6.4.4.2 Rohrmaterial Grauguss

Graugussleitungen (GG) wurden seit Beginn des Wasserversorgungsnetzwerks verwendet. 1.725 Abschnitte mit einer Länge von insgesamt 58,23 Kilometern sind davon in Verwendung.

Leitungen mit diesem Material sind von 30 Rundrissen betroffen. Die 0,52 dokumentierten Schäden pro Kilometer Leitung stellen den höchsten Wert in dieser Auswertung dar. Dementsprechend hoch ist auch die Punkteverteilung bei den Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit.

Laut Berechnung sind nur 0,29% der Abschnitte in Gruppe eins. Der Großteil der Leitungen entfällt mit 82,14% in die Gruppe zwei. Die Gruppe drei ist mit 14,55% der Abschnitte vertreten.

3,02% der Abschnitte wurden bei der Berechnung in die schlechtesten beiden Gruppen gereiht. 46 Anteile entfallen auf die Gruppe vier und sechs Abschnitte erhalten die schlechteste Bewertung von „fünf“. Alle Abschnitte der FRI Bewertung von „vier“ und „fünf“ hatten bereits Vorschäden.

Für Graugussleitungen bildet sich daher ein Mittelwert des FRI von 2,21.

Failure Risk Index Rundriss	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	5	0,29
2	1.417	82,14
3	251	14,55
4	46	2,67
5	6	0,35

Tabelle 121: Verteilung des FRI Rundriss für Grauguss

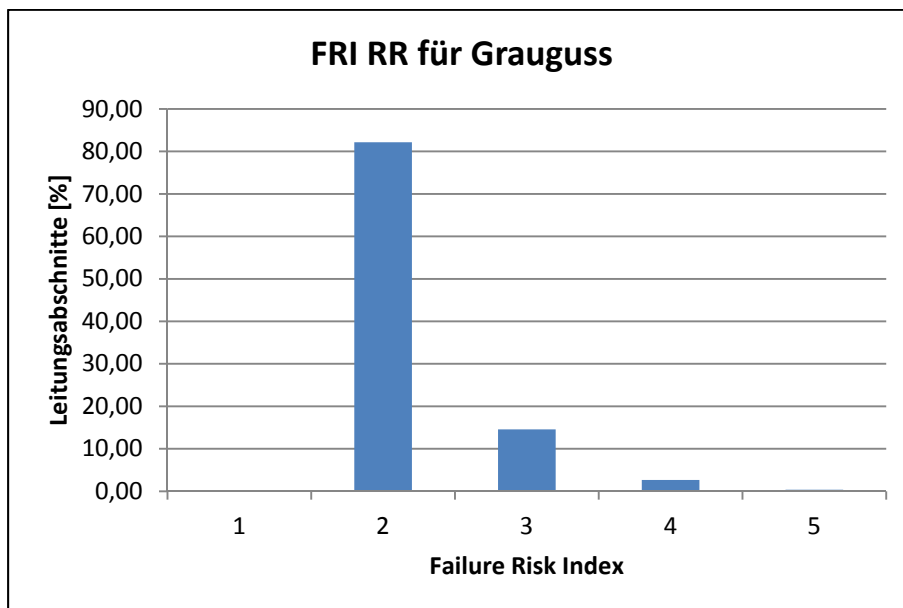


Abbildung 37: Verteilung des FRI Rundriss für Grauguss

6.4.4.3 Rohrmaterial Grauguss Ahrens

Als eigene Materialart wurden Graugussleitungen der Herstellungsart Ahrens gewertet. 109 Leitungsabschnitte wurden in Grauguss Ahrens verlegt, das sind in Summe 6,48 Kilometer.

Bezogen auf den Leitungskilometer erzielt GG Ahrens eine Schadensrate von 0,15.

18,35% der Graugussleitungen Ahrens befinden sich nach den Berechnungen in der besten Gruppe des FRI. Der Gruppe zwei wurden weitere 73,39% der Leitungsabschnitte zugeteilt. 7,34% oder acht Abschnitte können einen Failure Risk Index von „drei“ aufweisen. In den Gruppen der FRI Bewertung von „vier“ findet sich eine Leitung (0,92%). Grauguss Ahrens enthält keine Leitungsabschnitte in der schlechtesten Bewertungsgruppe fünf.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Grauguss Ahrens wurde mit 1,91 berechnet.

Failure Risk Index Rundriss	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	20	18,35
2	80	73,39
3	8	7,34
4	1	0,92
5	0	0,00

Tabelle 122: Verteilung des FRI Rundriss für Grauguss Ahrens

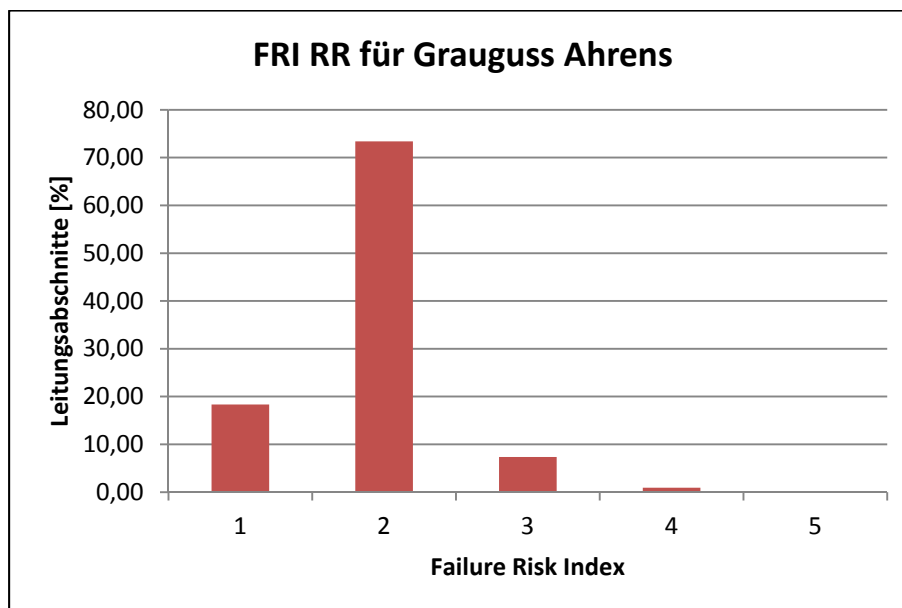


Abbildung 38: Verteilung des FRI Rundriss für Grauguss Ahrens

6.4.4.4 Rohrmaterial Duktiguss 1. Generation

Duktigussleitungen der ersten Generation (GGG 1.G) wurden in den Jahren 1950 bis 1979 im Netz verbaut. 69,09 Kilometer wurden von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 2.107 Einzelstücke.

Duktigussleitungen der ersten Generation weisen eine Schadensrate von 0,03 Schäden pro Kilometer auf.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich 106 Leitungsabschnitte (5,03%). Die Gruppe zwei enthält mit 86,90% den größten Anteil der Leitungsabschnitt von GGG 1.G. 6,22% bekommen eine FRI-Bewertung von „drei“. Die Bewertung von „vier“ wurde an 39 Leitungsabschnitte vergeben, das sind 1,85%. In der schlechtesten Bewertungsgruppe fünf sind keine Leitungen vorhanden.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktiguss der ersten Generation wurde mit 2,05 berechnet.

Failure Risk Index Rundriss	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	106	5,03
2	1.831	86,90
3	131	6,22
4	39	1,85
5	0	0,00

Tabelle 123: Verteilung des FRI Rundriss für Duktiguss 1. Generation

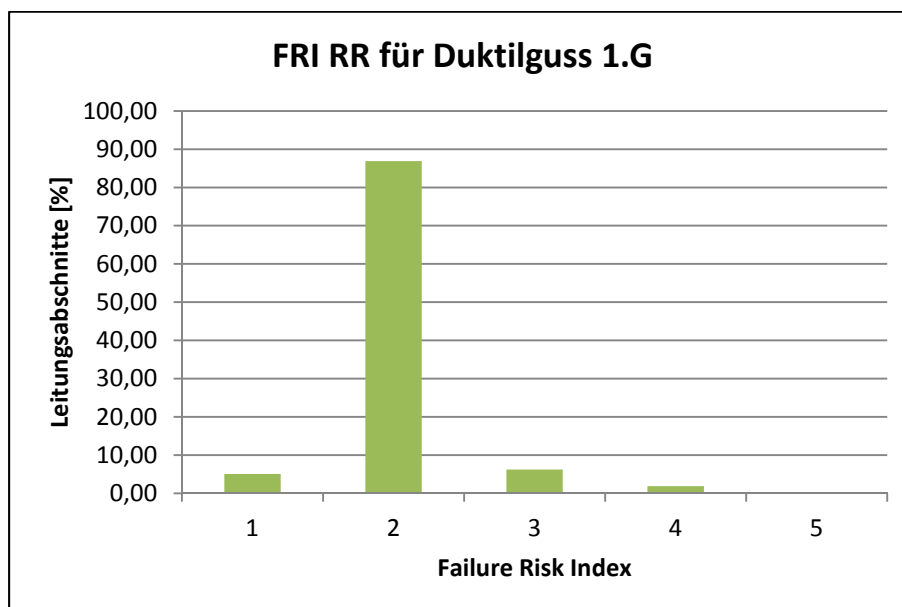


Abbildung 39: Verteilung des FRI Rundriss für Duktiguss 1. Generation

6.4.4.5 Rohrmaterial Duktiguss 2. Generation

Duktigussleitungen der zweiten Generation (GGG 2.G) wurden in den Jahren 1960 bis 1999 im Netz verbaut. 151,94 Kilometer wurden von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 5.970 Einzelstücke.

Duktigussleitungen der zweiten Generation zeigen eine sehr geringe Schadensanfälligkeit gegenüber Rundriss. Die Schadensrate beträgt 0,01.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich bereits 3.984 Leitungsabschnitte (66,73%). Die Gruppe zwei enthält 32,45% der Leitungsabschnitte von GGG 2.G. Nur eine kleine Gruppe der Abschnitte (0,70%) bekommen eine FRI-Bewertung von „drei“. Weitere 0,12% der Leitungsteile aus Duktiguss der zweiten Generation befinden sich in Gruppe vier. In der schlechtesten Bewertungsgruppe fünf sind keine Leitungsabschnitte enthalten.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktiguss der zweiten Generation wurde mit 1,34 berechnet.

Failure Risk Index Rundriss	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	3.984	66,73
2	1.937	32,45
3	42	0,70
4	7	0,12
5	0	0,00

Tabelle 124: Verteilung des FRI Rundriss für Duktiguss 2. Generation

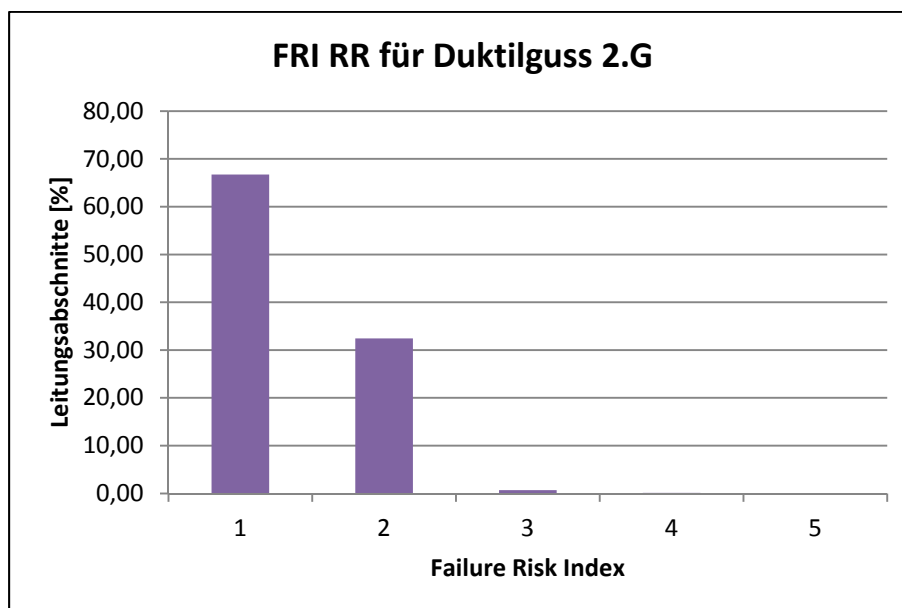


Abbildung 40: Verteilung des FRI Rundriss für Duktiguss 2. Generation

6.4.4.6 Rohrmaterial Duktilguss 3. Generation

Duktilgussleitungen der dritten Generation (GGG 3.G) werden seit 1990 im Netz verbaut. 151,94 Kilometer wurden bislang von dieser Materialart verlegt. Bei der Unterteilung in Abschnitte verschiedener Eigenschaften wurden daraus 4.355 Einzelstücke.

Duktilgussleitungen der dritten Generation sind nur mehr sehr geringfügig schadensanfällig. Die Schadensrate beträgt 0,01.

In Gruppe eins der FRI Berechnung befinden sich 728 Leitungsabschnitte (16,72%). Die Gruppe zwei enthält mit 83,21% der Leitungsabschnitte den Großteil der Abschnitte von GGG 3.G. Nur zwei Abschnitte (0,05%) bekommen eine FRI-Bewertung von „drei“. 0,02% der Leitungsteile aus Duktilguss der dritten Generation befinden sich in Gruppe vier. In der schlechtesten Bewertungsgruppe fünf sind keine Leitungsabschnitte ausgewiesen.

Der durchschnittliche Failure Risk Index von Duktilguss der dritten Generation wurde mit 1,83 berechnet.

Failure Risk Index Rundriss	Anzahl Leitungsabschnitte	Prozentwert Leitungsabschnitte
1	728	16,72
2	3.624	83,21
3	2	0,05
4	1	0,02
5	0	0,00

Tabelle 125: Verteilung des FRI Rundriss für Duktilguss 3. Generation

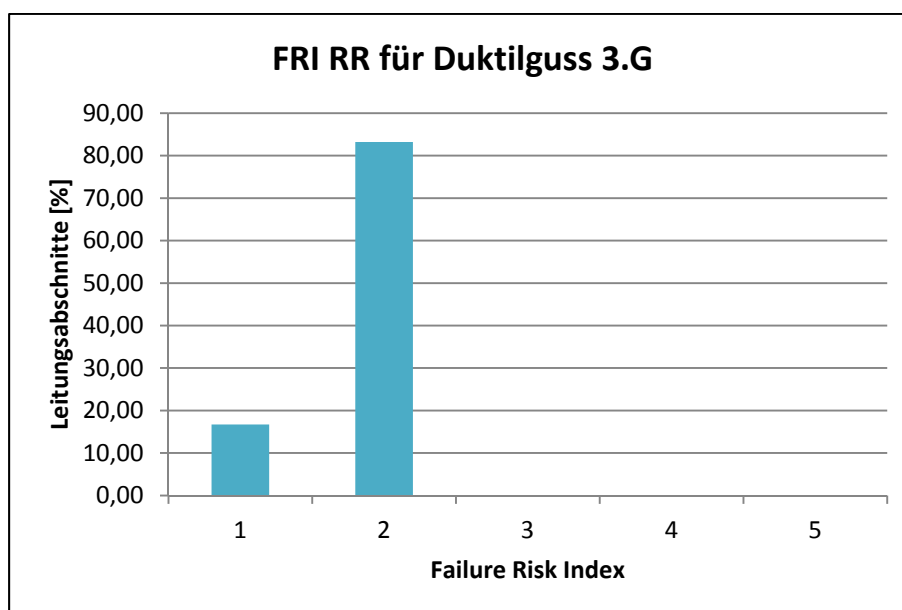


Abbildung 41: Verteilung des FRI Rundriss für Duktilguss 3. Generation

6.5 Vergleich der FRI Berechnungen für HZL Netz B nach Schadensart

Nach der Theorie sollte die Unterteilung der Failure Risk Index Berechnungen nach den verschiedenen Schadensarten im HZL Netz B auch unterschiedliche Ergebnisse liefern. Damit sollte sich auch der Mehraufwand bei der Datenanalyse begründen.

In Abbildung 38 und Tabelle 126 auf der linken Seite wurden die 43 Leitungsabschnitte, welche beim FRI Korrosion eine Bewertung von „fünf“ erhalten haben, mit den Bewertungen der beiden anderen betrachteten Schadensarten – Längsriss Scherbenbruch und Rundriss – verglichen.

Dabei zeigte sich, dass die für Korrosion schlecht bewerteten Leitungsabschnitte bei der Bewertung für Längsriss Scherbenbruch zu zirka 93% einen Failure Risk Index von „zwei“ erhielten. Die restlichen etwa sieben Prozent wurden mit FRI gleich „drei“ berechnet.

Ein ähnliches Bild zeigt der Vergleich zwischen Korrosion und Rundriss (Abbildung 39 und Tabelle 126 rechte Seite). Rund 65 Prozent der Leitungen mit der Bewertung des „FRI Korrosion gleich fünf“ erhielten bei der Bewertung für Rundriss einen FRI von „zwei“. Etwa 21% dieser Leitungsabschnitte wurde bei FRI Rundriss mit „drei“ bewertet und immerhin knapp 14% erhielten einen Failure Risk Index Rundriss von „vier“.

Failure Risk Index	Leitungsabschnitte von Längsriss Scherbenbruch		Leitungsabschnitte von Rundriss	
	[%]	[#]	[%]	[#]
1	0,00	0	0,00	0
2	93,02	40	65,12	28
3	6,98	3	20,93	9
4	0,00	0	13,95	6
5	0,00	0	0,00	0

Tabelle 126: Bewertungen bezogen auf FRI Korrosion = 5

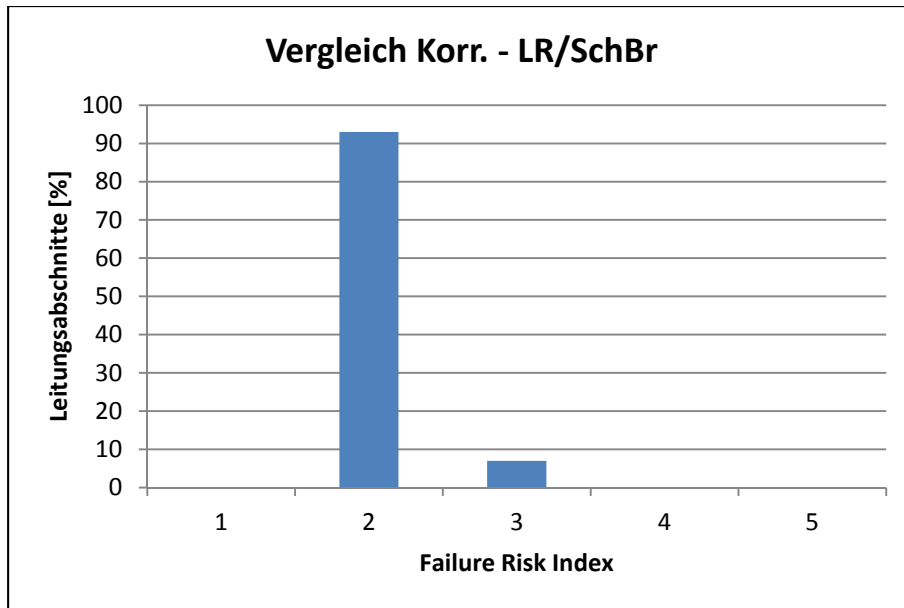


Abbildung 42: Vergleich der FRI Bewertungen von Korrosion = 5 und Längsriss/Scherbenbruch

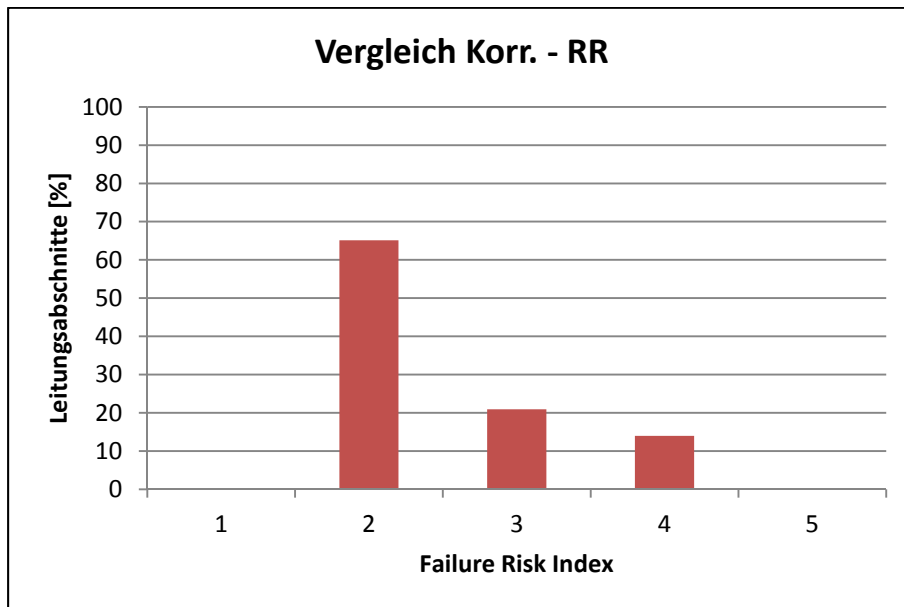


Abbildung 43: Vergleich der FRI Bewertungen von Korrosion = 5 und Rundriss

Die unterschiedliche Auswahl der Indikatoren und die damit verbundene differenzierte Gewichtung dieser Indikatoren zeigen demnach die gewünschten Auswirkungen in der Berechnung. Dazu trägt vor allem der stark gewichtete Indikator der Vorschäden bei.

Durch diesen Vergleich kann festgestellt werden, dass eine nach Schadensarten differenzierte Analyse und Berechnung des Failure Risk Index zu einer detaillierteren und für die Instandhaltung aussagekräftigeren Bewertung der Leitungsabschnitte führt.

7 Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick

Haupt- und Zubringerleitungsnetze bilden das Rückgrat einer jeden Wasserversorgung. Diese Leitungen bringen das Trinkwasser von den Fassungsgebieten in die Städte und Gemeinden. Dementsprechend wichtig sind diese Leitungen für das gesamte Trinkwassernetz. Schäden an Haupt- und Zubringerleitungen können je nach Schadensbild zu großen Wasseraustritten und erheblichen Folgeschäden führen.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Bewertung des Risikos mittels Failure Risk Index eines jeden Leitungsabschnittes bei den beiden vorliegenden HZL-Netzen. Für diese Arbeit wurden die Aufzeichnungen der GIS-Datenbanken und der Schadensdokumentation als Informationsquelle herangezogen. Mithilfe der Informationsquellen wurden Indikatoren für die Schadenswahrscheinlichkeit und die Schadenskonsequenzen festgelegt und mit Punktwerten versehen. Die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit erhielten eine Gewichtung, die auf den Schadensraten der jeweiligen Indikatoren passiert. Die Indikatoren der Schadenskonsequenzen wurden mittels Experteneinschätzung gewichtet. Alle Indikatoren eines jeden Leitungsabschnittes wurden mit Punktwerten und Gewichtungen zu einer Berechnungstabelle zusammengestellt. Als Ergebnis wurde für jeden Leitungsabschnitt ein Failure Risk Index, nach dem Schulnotensystem, von eins bis fünf als Bewertung ausgegeben.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden zwei HZL-Netze nach diesem Berechnungsschema bewertet. Bei Netz A wurde eine Berechnung ohne Unterscheidung nach den Schadensarten durchgeführt. Für Netz B erfolgte die Berechnung für die drei Schadensarten Korrosion, Längsriss/Scherbenbruch und Rundriss getrennt, wodurch es zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Bewertungen der Leitungsabschnitte gekommen ist.

Sowohl bei der Berechnung von Netz A als auch bei allen drei Berechnungen von Netz B wurden die Bewertungen eins und zwei am häufigsten vergeben. Damit wurde bei jeder einzelnen Bewertung ein Großteil der Leitungsabschnitte als unbedenklich eingestuft. Die Bewertung von „vier“ wurde in einer Bandbreite von 0,3 bis 4,7% vergeben. In der Gruppe fünf befinden sich bei allen Berechnungen weniger als 0,4% aller im jeweiligen Netz vorhandenen Leitungen. Mit diesen Ergebnissen können gezielte Einschränkungen für die Instandhaltung durchgeführt werden.

Die Berechnung eines Failure Risk Index für ein Haupt- und Zubringerleitungsnetz einer Trinkwasserversorgung erfordert eine äußerst umfangreiche Dokumentation der bestehenden Infrastruktur und deren Umgebung. Dabei ist es sehr wichtig, dass Leitungs- und Schadensinformationen ständig dokumentiert und die Daten auch aktualisiert werden. Zwischen den verschiedenen Leitungsnetzen und sogar zwischen einzelnen Dienstzimmern treten allerdings große Unterschiede in der Dokumentation von Schadensfällen auf. Je mehr Daten über die Infrastruktur und deren unmittelbare Umgebung vorhanden sind, desto besser können Analysen und Berechnungen

durchgeführt werden. Um in allen Netzen die Möglichkeit einer Failure Risk Index Berechnung zu haben, wird eine Anpassung und Standardisierung der Schadensaufzeichnungen nach den Richtlinien des ÖVGW bei allen Netzbetreibern sinnvoll sein.

Die unterschiedliche Aufzeichnungsqualität der Eigenschaften und Schäden konnte bei den in dieser Arbeit betrachteten Haupt- und Zubringerleitungsnetzen sehr gut aufzeigen, welche Ergebnisse möglich sind. Bei Netz A war aufgrund der ungenauen Informationssicherung nur eine materialspezifische aber keine schadensspezifische Aussage möglich. Dadurch konnte aber zumindest eine starke Eingrenzung der instandhaltungsbedürftigen Leitungen bewerkstelligt werden. Mit dieser Auswertungsmethode wird ein durchschnittliches Schadensereignis ausgewertet, die erheblichen Unterschiede der Schadenkonsequenzen bei den verschiedenen Schadensarten können hier allerdings nicht wiedergegeben werden.

Die Unterscheidung der FRI Berechnung nach den Schadensarten, Korrosion, Längsriss/Scherbenbruch und Rundriss, in Netz B steigerte den Informationsgewinn erheblich. Jede Schadensart hat unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Umgebung, beispielsweise führen Korrosionslöcher zu geringen Auswirkungen, wohingegen Scherbenbrüche mit starkem Wasseraustritt zu erheblichen Auswirkungen in der Umgebung führen können. Die Unterscheidung nach der Schadensart bringt dem WVU eine weitere Möglichkeit eine Priorisierung für die Instandhaltung durchzuführen.

Neben den materialspezifischen Unterschieden gewonnen wurden, sondern auch schadensartenabhängige.

Mit dem vorhandenen Wissen über die bestehenden Leitungen und den Ergebnissen aus den FRI Bewertungen, nach dem Schema dieser Arbeit, wird eine Unterstützung für die Instandhaltung geliefert. Durch die Eingrenzung von instandhaltungsbedürftigen Leitungsabschnitten können die Bereiche Wartung, Inspektion und Instandsetzung gezielt die notwendigen Schlüsse für die weiteren Aktivitäten ableiten.

Beim Unterindex des Schadensausmaßes bzw. der Schadenkonsequenzen sind in dieser Arbeit sehr stark subjektive Bewertungskriterien angenommen worden. Dieser subjektive Berechnungsanteil könnte durch die Ermittlung von Schadenskosten oder auch durch die Berechnung der hydraulischen Vulnerabilitäten innerhalb und außerhalb des Leitungsnetzes, verringert werden. Beide Möglichkeiten für eine Objektivierung der Gewichtungen bei den Schadenkonsequenzen sind derzeit für Haupt- und Zubringerleitungsnetze nur als theoretischer Ansatz verfügbar und müssen von vielen WVU erst umgesetzt werden. Entsprechende Datendokumentationen (z.B. feststellen der Schadenskosten für alle Indikatoren des Schadensausmaßes) müssten in der Praxis als Standardprozess bei Neuschäden eingeführt werden.

Für den Einsatz des vorliegenden Bewertungssystems im Regelbetrieb sind noch weitere Kalibrierungen, vor allem im Bereich der Gewichtungen des Schadensausmaßes, notwendig. Dabei lassen sich drei Verfahren anwenden.

Als erstes können neue Schäden in den Leitungsnetzen die schlecht beurteilten Leitungsabschnitte bestätigen oder eine neue Berechnung zur Folge haben.

Als zweites Verfahren können Teile der schlecht bewerteten Abschnitte entnommen und deren Materialeigenschaften, wie z.B. Zugspannungen und E-Modul, in Labortests festgestellt werden.

Die dritte Möglichkeit der verbesserten Bewertung sind Experteneinschätzungen. Dabei können die Mitarbeiter der Wasserversorgungsunternehmen ihr oft langjährig angesammeltes Wissen zum Leitungsnetz, in die Berechnungen einbringen.

Nach all diesen Schritten sollte das System des FRI eine zuverlässige und effiziente Hilfestellung für die Instandhaltung der Wasserversorgungsunternehmen bieten.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zugehörige Punkteendwerte zum Failure Risk Index.....	25
Tabelle 2: Anzahl der Schäden nach Schadensart.....	26
Tabelle 3: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit	27
Tabelle 4: Schadensraten nach den Materialien und die Punkteverteilung	28
Tabelle 5: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung.....	30
Tabelle 6: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung.....	31
Tabelle 7: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung.....	33
Tabelle 8: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung....	34
Tabelle 9: Schadensraten nach den Herstellungsarten und die Punkteverteilung....	35
Tabelle 10: Schadensraten nach den Ziegelauflagern und die Punkteverteilung	36
Tabelle 11: Schadensraten nach den Druckzonen und die Punkteverteilung.....	37
Tabelle 12: Schadensraten nach der Belastung durch Versorgungsleitungen und die Punkteverteilung.....	38
Tabelle 13: Schadensraten nach der Belastung durch Anschlussleitungen und die Punkteverteilung.....	39
Tabelle 14: Schadensraten nach der Belastung durch Gasleitungen und die Punkteverteilung.....	40
Tabelle 15: Schadensraten nach der Belastung durch Kanäle und die Punkteverteilung.....	41
Tabelle 16: Schadensraten nach der Belastung durch Bäume und die Punkteverteilung.....	42
Tabelle 17: Schadensraten nach der Belastung durch Hauptverkehrsstraßen und die Punkteverteilung.....	43
Tabelle 18: Schadensraten nach der mechanischen Belastung durch Straßenbahnen und die Punkteverteilung	44
Tabelle 19: Schadensraten nach der korrosiven Belastung durch Straßenbahnen und die Punkteverteilung	45
Tabelle 20: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes	46
Tabelle 21: Bewertungsgruppen der Wichtigkeit	47
Tabelle 22: Bewertungsgruppen der Versorgungsleitungen	47
Tabelle 23: Bewertungsgruppen der Anschlussleitungen.....	47
Tabelle 24: Bewertungsgruppen der Gasleitungen.....	48
Tabelle 25: Bewertungsgruppen der Kanalstränge.....	48
Tabelle 26: Bewertungsgruppen der Bäume	48
Tabelle 27: Bewertungsgruppen der Straßen	49
Tabelle 28: Bewertungsgruppen der Straßenbahnen	49
Tabelle 29: Bewertungen des Schadenspotentials.....	50
Tabelle 30: Bewertungen der Belagsart	51
Tabelle 31: Bewertungen der Klappen und Schieber Anzahl	51
Tabelle 32: Verteilung des FRI für alle Leitungsabschnitte.....	53

Tabelle 36: Verteilung des FRI bei Grauguss Schraubmuffe.....	59
Tabelle 42: Schadensverteilung nach Schadensart.....	65
Tabelle 43: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit	67
Tabelle 44: Schadensraten nach den Materialien und die Punkteverteilung	68
Tabelle 45: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung.....	69
Tabelle 46: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung.....	70
Tabelle 47: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung.....	71
Tabelle 48: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung..	72
Tabelle 49: Schadensraten nach den Außenbeschichtungen und die Punkteverteilung.....	73
Tabelle 50: Schadensraten nach den Innenbeschichtungen und die Punkteverteilung	74
Tabelle 51: Schadensraten nach den Schubsicherungen und die Punkteverteilung	75
Tabelle 52: Schadensraten nach dem kathodischen Schutz und die Punkteverteilung	76
Tabelle 53: Schadensraten nach dem Betriebsdruck und die Punkteverteilung	78
Tabelle 54: Schadensraten nach „Hölzchen“ und die Punkteverteilung	79
Tabelle 55: Schadensraten nach der Bodenaggressivität und die Punkteverteilung	80
Tabelle 56: Schadensraten nach den korrosionsfördernden Faktoren und die Punkteverteilung.....	81
Tabelle 57: Schadensraten nach den Baumstandorten und die Punkteverteilung....	82
Tabelle 58: Schadensraten nach Streustrom Straßenbahn und die Punkteverteilung	83
Tabelle 59: Schadensraten nach Streustrom Gas und die Punkteverteilung.....	84
Tabelle 60: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes	85
Tabelle 61: Bewertungsgruppen der Baumstandorte	86
Tabelle 62: Bewertungsgruppen der Oberflächenbefestigung.....	86
Tabelle 63: Bewertungsgruppen der Gasleitungen.....	86
Tabelle 64: Bewertungsgruppen der Verkehrsbelastung	87
Tabelle 65: Bewertungsgruppen der Straßenbahnen	87
Tabelle 66: Bewertungsgruppen des Betriebsdrucks	88
Tabelle 67: Verteilung des FRI Korrosion für alle Leitungsabschnitte	90
Tabelle 73: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit	97
Tabelle 74: Schadensraten nach Rohrmaterial und die Punkteverteilung	98
Tabelle 75: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung.....	99
Tabelle 76: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung.....	100
Tabelle 77: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung.....	102
Tabelle 78: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung	103
Tabelle 79: Schadensraten nach den Schubsicherungen und die Punkteverteilung	104
Tabelle 80: Schadensraten nach dem Betriebsdruck und die Punkteverteilung	105
Tabelle 81: Schadensraten nach den Setzungsempfindlichkeiten und die Punkteverteilung.....	106

Tabelle 82: Schadensraten nach den Baumstandorten und die Punkteverteilung..	108
Tabelle 83: Schadensraten nach den Verkehrsbelastungen und die Punkteverteilung	109
Tabelle 84: Schadensraten nach dem Belagszustand und die Punkteverteilung ...	110
Tabelle 85: Schadensraten nach der mechanischen Belastung Straßenbahn und die Punkteverteilung.....	111
Tabelle 86: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes	112
Tabelle 87: Bewertungsgruppen der Baumstandorte	113
Tabelle 88: Bewertungsgruppen der Oberflächenbefestigung.....	113
Tabelle 89: Bewertungsgruppen der Gasleitungen.....	113
Tabelle 90: Bewertungsgruppen der Verkehrsbelastung	114
Tabelle 91: Bewertungsgruppen der Straßenbahn	114
Tabelle 92: Bewertungsgruppen des Betriebsdrucks	115
Tabelle 93: Bewertungsgruppen des Durchmessers	115
Tabelle 94: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für alle Leitungsabschnitte	117
Tabelle 95: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Grauguss	120
Tabelle 100: Überblick über die Indikatoren der Schadenswahrscheinlichkeit	125
Tabelle 101: Schadensraten nach dem Material und die Punkteverteilung	126
Tabelle 102: Schadensraten nach den Durchmessern und die Punkteverteilung... ..	128
Tabelle 103: Schadensraten nach den Verlegejahren und die Punkteverteilung....	129
Tabelle 104: Schadensraten nach den Vorschäden und die Punkteverteilung.....	130
Tabelle 105: Schadensraten nach den Verbindungsarten und die Punkteverteilung	131
Tabelle 106: Schadensraten nach den Schubsicherungen und die Punkteverteilung	132
Tabelle 107: Schadensraten nach dem Betriebsdruck und die Punkteverteilung... ..	133
Tabelle 108: Schadensraten nach den Setzungsempfindlichkeiten und die Punkteverteilung.....	134
Tabelle 109: Schadensraten nach den Verkehrsbelastungen und die Punkteverteilung.....	135
Tabelle 110: Schadensraten nach den Belagszuständen und die Punkteverteilung	137
Tabelle 111: Schadensraten nach der mechanischen Belastung Tram und die Punkteverteilung.....	138
Tabelle 112: Überblick über die Indikatoren des Schadensausmaßes	139
Tabelle 113: Bewertungsgruppen der Baumstandorte	139
Tabelle 114: Bewertungsgruppen der Oberflächenbefestigung.....	140
Tabelle 115: Bewertungsgruppen der Gasleitungen.....	140
Tabelle 116: Bewertungsgruppen der Verkehrsbelastung	140
Tabelle 118: Bewertungsgruppen des Betriebsdrucks	141
Tabelle 119: Bewertungsgruppen des Durchmessers	142
Tabelle 120: Verteilung des FRI Rundriss für alle Leitungsabschnitte.....	143

Tabelle 121: Verteilung des FRI Rundriss für Grauguss	146
Tabelle 126: Bewertungen bezogen auf FRI Korrosion = 5	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: "Badewannenkurve" für den Zustand von Leitungen (Quelle: TD Williamson, 2011)	5
Abbildung 2: Aufgaben für Wasserversorger bei Trinkwassernetzen (Quelle: ÖVGW W 100, 2007)	8
Abbildung 3: Korrosionsloch (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)	9
Abbildung 4: Längsriss (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)	9
Abbildung 5: Scherbenbruch (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)	10
Abbildung 6: Rundriss (Quelle: ÖVGW W 105, 2007)	10
Abbildung 7: Vergleich des wirtschaftlichen Erneuerungszeitpunktes (Quelle: Kleiner et al., 1998)	11
Abbildung 8: Abhängigkeit der räumlichen Nähe von Schadensfällen (Quelle: nach <i>Goulter & Kazemi</i> , 1988)	13
Abbildung 9: Abhängigkeit der zeitlichen Nähe von Schadensfällen (Quelle: nach <i>Goulter & Kazemi</i> , 1988)	14
Abbildung 10: Verteilung des FRI für alle Leitungsabschnitte	54
Abbildung 11: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe	55
Abbildung 12: Verteilung des FRI bei Asbestzement	56
Abbildung 13: Verteilung des FRI bei Beton	57
Abbildung 14: Verteilung des FRI bei Grauguss	58
Abbildung 15: Verteilung des FRI bei Grauguss mit Schraubmuffe	59
Abbildung 16: Verteilung des FRI bei Duktiguss ≤ 1980	60
Abbildung 17: Verteilung des FRI bei Duktiguss > 1980	61
Abbildung 18: Verteilung des FRI bei Polyethylen	62
Abbildung 19: Verteilung des FRI bei Sonstige	63
Abbildung 20: Verteilung des FRI bei Stahl	64
Abbildung 21: Verteilung des FRI Korrosion für alle Leitungsabschnitte	90
Abbildung 22: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe	91
Abbildung 23: Verteilung des FRI Korrosion für Grauguss	92
Abbildung 24: Verteilung des FRI Korrosion für Grauguss Ahrens	93
Abbildung 25: Verteilung des FRI Korrosion für Duktiguss 1. Generation	94
Abbildung 26: Verteilung des FRI Korrosion für Duktiguss 2. Generation	95
Abbildung 27: Verteilung des FRI Korrosion für Duktiguss 3. Generation	96
Abbildung 28: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für alle Leitungsabschnitte	118
Abbildung 29: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe	119
Abbildung 30: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Grauguss	120
Abbildung 31: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Grauguss Ahrens	121
Abbildung 32: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Duktiguss 1. Generation	122

Abbildung 33: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Duktiguss 2. Generation.....	123
Abbildung 34: Verteilung des FRI Längsriss Scherbenbruch für Stahl	124
Abbildung 35: Verteilung des FRI Rundriss für alle Leitungsabschnitte	144
Abbildung 36: Anteil der Leitungen mit Vorschäden je FRI-Gruppe	145
Abbildung 37: Verteilung des FRI Rundriss für Grauguss	146
Abbildung 38: Verteilung des FRI Rundriss für Grauguss Ahrens	147
Abbildung 39: Verteilung des FRI Rundriss für Duktiguss 1. Generation.....	148
Abbildung 40: Verteilung des FRI Rundriss für Duktiguss 2. Generation.....	149
Abbildung 41: Verteilung des FRI Rundriss für Duktiguss 3. Generation.....	150
Abbildung 42: Vergleich der FRI Bewertungen von Korrosion = 5 und Längsriss/Scherbenbruch.....	152
Abbildung 43: Vergleich der FRI Bewertungen von Korrosion = 5 und Rundriss....	152

Literaturverzeichnis

- [1] **A. J. Kettler, I. C. Goulter. 1984.** *An analysis of pipe breakage in urban water distributio networks.* Manitoba, Winnipeg, Canada : Department of Civil Engineering, University of Manitoba, 1984.
- [2] **DVGW. 1986.** *Arbeitsblatt GW9 - Beurteilung von Böden hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens auf erdverlegte Rohrleitungen und Behälter aus unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen.* 1986.
- [3] **E. Mayr, A. Lukas, M. Möderl. 2011.** *Integrales Risikomanagement für die Trinkwasserversorgung in Österreich.* Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. 2011.
- [4] **F. Friedl, D. Fuchs-Hanusch. 2011.** *Risk Assessment of Transmission Water Mains to Support Efficient Rehabilitation Decisions.* Graz : Graz University of Technology, Institute of Urban Water Management and Landscape Engineering, 2011.
- [5] **F. Friedl, D. Fuchs-Hanusch. 2010.** *Technische Maßnahmen im Rohrnetz.* Graz : s.n., 2010.
- [6] **F. Friedl, M. Möderl, W. Rauch, Q. Liu, S. Schrotter, D. Fuchs-Hanusch. 2012.** *Failure Propagation for Large-Diameter Transmission Water Mains Using Dynamic Failure Risk Index.* Graz, Innsbruck : s.n., 2012.
- [7] **I. C. Goulter, A. Kazemi. 1989.** Analysis of Water Distribution Pipe Failure Types in Winipeg, Canada. *Journal of transportation Engineering.* 1989, Bd. Vol. 115.
- [8] **I. C. Goulter, A. Kazemi. 1988.** *Spatial and temporal groupings of water main pipe breakage in Winipeg.* 1988. Bd. 15/1.
- [9] **J. Zonensein, M. G. Miguez, L. P. C. de Magalhaes, M. G. Valentin, F. C. B. Mascarenhas. 2008.** *Flood Risk Index as an Urban Management Tool.* Rio de Janeiro, Brasil and Barcelone, Spain : Computational Hydraulics Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro an School of Civil Engineering of Barcelona, 2008.
- [10] **Österreichisches Normungsinstitut. 2004.** *ÖNORM B 2533 - Koordinierung unterirdischer Einbauten - Planungsrichtlinien.* Wien : s.n., 2004.
- [11] **Österreichisches Normungsinstitut. 2002.** *ÖNORM B 5016 - Transport-, Versorgungs- und Anschlussleitungen von Wasserversorgungsanlagen - Ergänzende Bestimmungen zu ÖNORM EN 805.* Wien : s.n., 2002.
- [12] **ÖVGW. 2007.** *Richtline W100 - Wasserverteilerleitungen - Betrieb und Instandhaltung.* Wien : s.n., 2007.

- [13] **ÖWAV. 2011.** Richtline W105 - Schadensstatistik - Erfassung und Verarbeitung von Schadensereignissen. Wien : s.n., 2011.
- [14] **ÖWAV. 2009.** *Regelblatt 40 - Leitungsinformationssystem - Wasser und Abwasser.* s.l. : Wien, 2009.
- [15] **Sorge, H-C. 2007.** *Technische Zustandsbewertung metallischer Wasserversorgungleitungen als Beitrag zur Rehabilitationsplanung.* Bauhaus Universität Weimar : s.n., 2007.
- [16] **Y. Kleiner, A. Nafi, B. Rajani. 2010.** *Planing renewal of water mains while considering deterioration, economies of scale and adjacent infrastructure.* Ottawa : Institue for Research in Construction, National Research Council Canada, Strassbourg : Cemagref-Engees, Joint Research Unit in Public Utilities Management, France, 2010.
- [17] **Y. Kleiner, B.J. Adams, J.S. Rogers. 1998.** *Long-Term Plannig Methodology for Water Distribution System Rehabilitation.* Water Resources Research. 34(8). 2039–2051. doi:10.1029/98WR00377.
- [18] **Z. Liu, Y. Kleiner, B. Rayani, L. Wang, W. Condit. 2012.** *Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems.* Ottawa : Institue for Research in Construction, National Research Council Canada, 2012.