



Johannes Längle, Bsc

Erneuerungspriorisierung von Trinkwasserleitungen

Verknüpfung von Schadensprognosemodellen und multikriterieller Entscheidungsanalyse

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/In

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuerin:

Assoc.- Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, September 2020

Kontakt:
Johannes Längle
johanneslaengle@hotmail.com

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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 entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

03.09.2020

Datum / Date

Johannes Längle

Unterschrift / Signature

Danksagung

Sowohl das Studium als auch das Verfassen dieser Arbeit wäre ohne die Unterstützung anderer nur schwer möglich gewesen. Deshalb möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Der erste Dank gebührt meinen Eltern Stephan und Kunigunde, die mir das Studium erst ermöglicht haben. Auch meiner Schwester Carmen und meinem Bruder Mathias sei an dieser Stelle für die Unterstützung beim Studium gedankt. Vor allem für ihre Bereitschaft von mir verfasste Texte gegenzulesen.

Ein großer Dank gebührt auch meiner Betreuerin Assoc.- Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch, für die fachliche und sehr persönliche Betreuung während der Bearbeitung dieser Masterarbeit.

Ein weiterer Dank gebührt den Beteiligten der Masterarbeit. Allen voran Michael Bösch vom Wasserwerk Lustenau für seine Bereitschaft Daten und Fachwissen zur Verfügung zu stellen und seine geduldige Beratung. Auch DI Erich Fritsch und DI Dr. Lutz Feldmann für ihre ausdauernde Beratung und Enrico Mahl für seine Bereitschaft alle Fragen zum Leitungsinformationssystem von Lustenau zu beantworten. Und allen jenen die sich an der Auswertung der Fragebögen beteiligt haben und mir bei der Beschaffung der Daten geholfen haben.

Abschließend will ich mich noch bei allen meinen Freunden bedanken, ohne die das Studium in Graz nie zustande gekommen wäre und ohne die das Studium wesentlich weniger Spaß gemacht hätte. Ein Besonderer Dank gilt dabei Nicholas und Theresa die während der gesamten Studiendauer beinahe alle Lehrveranstaltungen mit mir gemeinsam besuchten. Ohne die gegenseitige Unterstützung wäre das Studium um vieles schwieriger geworden. Der letzte Dank gilt Alexander und Fabio meinen langjährigen Mitbewohnern und Freunden, die mich während der ganzen Studienzeit aushalten mussten.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Schadensprognosemodells für Trinkwasserleitungen zur Anwendung bei kleineren Wasserversorgungsunternehmen. Es galt das entwickelte Schadensprognosemodell in eine Methode zur Ermittlung des Erneuerungsindex ERIX zu integrieren. Der ERIX dient der Planung von Erneuerungsmaßnahmen mittels multikriterieller Entscheidungsanalyse. Dieser wurde in einer Masterarbeit (Wiedenhofer, 2019) entwickelt. Um diese Ziele zu erreichen, wurden verschiedene Möglichkeiten zur Schadensprognose von Trinkwasserleitungen, anhand einer Fallstudie am Wasserversorgungsnetz der Marktgemeinde Lustenau, evaluiert und miteinander verglichen. Dazu wurden rein datenbasierte Modelle genutzt, welche auf der Ereigniszeitanalyse basieren. Dabei wurden das Weibull-, das Exponential-, das logistische und das Cox-Modell betrachtet. Zur Verbesserung der Modelle wurde eine Cross Validation im Zuge des Kalibrierungsprozesses genutzt. Das Verhältnis zwischen Trefferquote und Fehlalarmquote wurde mit dem sogenannten Ideal-Cutoff optimiert. Bei der entwickelten Methodik werden die Modelle für einen definierten Zeitraum kalibriert. Im Anschluss daran wird die jährliche Vorhersagequalität für einen bestimmten Validierungszeitraum evaluiert.

Modelle, in denen Erstschäden und Folgeschäden separat modelliert wurden, wiesen dabei eine höhere Modellqualität auf als solche bei denen beide Schadensarten mit einem Modell beschrieben wurden. Als das beste Modell stellte sich jenes heraus, in dem das Cox-Modell zur Erstschadensmodellierung und das Weibull-Modell zur Folgeschadensmodellierung genutzt wurde. Trotz guter Trefferquoten erwiesen sich die Modelle als nur bedingt geeignet für die Fallstudie in Lustenau, da auch für eine hohen Anzahl an unauffälligen Leitungen Schäden vorhergesagt wurden. Für eine exakte Vorhersage der Anzahl, der zu erwartenden Leitungsschäden auf einzelnen Rohrabschnitten, sind sie nicht geeignet. Zur Berücksichtigung der Modelle in der MCDA-Methodik zur Berechnung des ERIX wurden die im Betrachtungsjahr (2019) prognostizierten Leitungsschäden zu den vorhandenen addiert. Die Gewichtung der Kriterien des ERIX wurden anhand einer Befragung vom Wassermeister und beteiligten Ingenieuren ermittelt. Dabei erwies sich, wie es sich auch schon bei der Fallstudie von Wiedenhofer (2019) gezeigt hat, dass Betrieb und Schadensausmaß als viel wichtiger empfunden wird als die Schadenswahrscheinlichkeit.

Ergebnis der MCDA-Auswertung deckt sich mit den angedachten Erneuerungsplänen von Lustenau. Ergebnisse decken sich mit den Erfahrungen des Wassermeisters. Somit ermöglicht diese Methode es zukünftig auch unerfahrenen Ingenieuren fundierte Erneuerungspläne zu entwickeln.

Stichworte: Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA), Analytic Hierarchy Process (AHP), Erneuerungsplanung, parametrische Modelle, semiparametrische Proportional Hazard Modelle, Cross Validation

Abstract

The goal of this work was to develop a survival model for water distribution systems of small Water utilities. This survival model was then to be integrated into the ERIX-Method. The ERIX-Method was developed by Wiedenhofer (2019) in his master thesis to aid rehabilitation planning of water pipes by multi criteria decision analysis. To reach this goal various methods to model the damage occurrence on water pipes have been evaluated and compared on basis of a case study on the water utility of Lustenau.

The used models are purely data driven parametric Weibull-, exponential- and the logistic model as well as the Cox-Proportional-Hazard-Model. To increase the quality of the model Cross Validation was used in the calibration process. To optimize the ratio of strike rate to error rate, the so-called ideal cut-off was used. The calibration of the models was done in a defined time period. This model was then validated yearly on the last three years of the observation period.

Models, which consider first damages in a different model than those following the first one, turned out to perform the best in this study. The best one was the one which modelled the first damage with a Cox-model and the following damages with a Weibull-model. Although the strike rate in the models is good, those models are not perfectly suited for the case study in Lustenau, because a big number of false positives are predicted. To predict the exact number of occurring damages on the exact pipe section, they can't be used.

To include the models in the MCDA-Method to calculate the ERIX, the predicted damages in 2019, which is the first year after the observation period, were added to the observed damages. The weights for the different criteria of the ERIX-Method were determined by a questionnaire, which was handed out to the head of the local water utility and engineers which work on the network. The results of the questionnaire showed that the criteria concerning the extent of losses and the operation of the utility were considered as much more important than those concerning the damage-probability of the pipes.

The result of the ERIX-Method turned out to match the rehabilitation Plan in use in Lustenau, which was created considering the long experience of the head of the water utility. This shows that this method is suited to be used by engineers with limited experience to accomplish reliable rehabilitation planning.

Key words: Multicriteria Decision Analysis (MCDA), Analytic Hierarchy Process (AHP), Rehabilitation planning, survival modelling, parametric Models, semiparametric Proportional Hazard Models, Cross Validation

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen/Literatur	3
2.1	Schadensprognosemodelle.....	3
2.1.1	Allgemein.....	3
2.1.2	Homogene Abschnittserstellung	8
2.1.3	Kaplan-Meier-Schätzer	8
2.1.4	Parametrische Modelle.....	8
2.1.5	Nicht parametrische Modelle	9
2.1.6	Modellvarianten	10
2.1.7	Modellstabilität.....	11
2.1.8	Beurteilung der Modellqualität	12
2.1.9	Schadensprognosemodelle in der Literatur	14
2.2	Multikriterielle Entscheidungsanalyse	14
2.2.1	AHP	15
2.2.2	Erneuerungsindex - ERIX.....	17
3	Methodik	21
3.1	Schadensprognosemodell.....	21
3.1.1	Ablauf	21
3.1.2	Datenstrukturierung	22
3.1.3	Modellaufbau.....	23
3.1.4	Einflussgrößen.....	25
3.1.5	Modellvarianten	26
3.1.6	Kalibrierung	27
3.1.7	Vergleich der Modelle.....	27
3.1.8	Prognose	28
3.2	ERIX.....	29
3.2.1	Ablauf	29
3.2.2	Datenaufbereitung	30

3.2.3	Kriterien / Prioritätenklassen	30
3.2.4	ERIX ohne Schadensprognose.....	38
3.2.5	Verknüpfung ERIX und Schadensprognosemodell	38
3.2.6	Berechnung des ERIX	39
3.2.7	Vergleich der Varianten	40
4	Fallstudie Marktgemeinde Lustenau.....	41
4.1	Gemeinde	41
4.2	Wasserversorgungsnetz.....	41
4.2.1	Leitungen	41
4.2.2	Rohrbrüche	45
4.2.3	Datenaufbereitung	52
5	Ergebnisse und Diskussion.....	53
5.1	Modelle.....	53
5.1.1	Datenerkundung	53
5.1.2	Kombiniertes Erst- und Folgeschadensmodell.....	57
5.1.3	Getrenntes Erst- und Folgeschadensmodell.....	64
5.1.4	Modellvergleich.....	75
5.1.5	Prognose und Evaluierung.....	76
5.2	ERIX.....	77
5.2.1	Gewichte	78
5.2.2	Vergleich der Resultate.....	82
6	Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick	86
	Literaturverzeichnis	90
	Anhang	i
	Anhang A Fragebogen für die Datenerhebung.....	ii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Datenstruktur für die Ereigniszeitanalyse.....	4
Abbildung 2-2: Ausfallratenkurve in Form einer Badewannenkurve.....	7
Abbildung 2-3: Überlebenskurve mit Einteilung in Einbauschäden, Plateauphase und Altersschäden.....	7
Abbildung 2-4: Beispielhafte Überlebenskurve mit der Unterscheidung zwischen Erst- und Folgeschäden.....	8
Abbildung 2-5: Beispiele des "Underfitting" (links), eines "guten" Modells (Mitte) und des "Overfittings" (rechts) (Ray, 2018).....	11
Abbildung 2-6: Prinzip der Cross Validation.....	12
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung einer ROC-Kurve mit Ideal Cutoff und AUC.....	13
Abbildung 2-8: AHP - Prinzip.....	15
Abbildung 2-9: Hierarchiestruktur des ERIX.....	17
Abbildung 2-10: Hierarchieprinzip mit vorgeschlagenen Kriterien und Subkriterien (Wiedenhofer, 2019).....	19
Abbildung 3-1: Theoretischer Ablauf der Modellierung der Schadensprognose.....	22
Abbildung 3-2: Schema der zeitlichen Datenstruktur.....	23
Abbildung 3-3: Datenstruktur der Kalibrierungsdaten.....	24
Abbildung 3-4: Datenstruktur der Validierungsdaten.....	25
Abbildung 3-5: Datenstruktur der Prognosedaten.....	25
Abbildung 3-6: Unterschied der Prognose von Semiparametrischen und Parametrischen Modellen.....	28
Abbildung 3-7: Ablauf der ERIX – Ermittlung.....	29
Abbildung 3-8: Hierarchiestruktur des ERIX.....	31
Abbildung 4-1: Leitungslänge nach Leitungstyp.....	41
Abbildung 4-2: Leitungslänge der Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen nach Material.....	42
Abbildung 4-3: Leitungslänge der Hausanschlussleitungen nach Material	43
Abbildung 4-4: Leitungslänge der Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen nach Baujahr und Material.....	44
Abbildung 4-5: Leitungslänge der Hausanschlussleitungen nach Baujahr und Material.....	44
Abbildung 4-6: Rohrbrüche nach Leitungstyp.....	45
Abbildung 4-7: Rohrbrüche nach Material für Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen.....	46
Abbildung 4-8: Rohrbrüche pro Kilometer nach Material für Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen.....	47
Abbildung 4-9: Rohrbrüche nach Material für Hausanschlussleitungen.....	47

Abbildung 4-10: Rohrbrüche pro Kilometer Leitungslänge nach Material für Hausanschlussleitungen.....	48
Abbildung 4-11: Rohrbrüche für Haupt- und Hydrantenleitungen nach Leitungsalter und Material.....	49
Abbildung 4-12: Rohrbrüche für Hausanschlussleitungen nach Leitungsalter	49
Abbildung 4-13: Rohrbrüche nach Bruchjahr und Leitungstyp.....	50
Abbildung 4-14: Rohrbrüche nach Monat und Material	51
Abbildung 4-15: Rohrbrüche nach Bruchjahr und Jahreszeit. Die Jahreszeiten werden wie Folgt eingeteilt: Winter (Jänner, Februar und Dezember), Frühling (März, April und Mai), Sommer (Juni, Juli und August) und Herbst (September, Oktober und November)	52
Abbildung 5-1: Kaplan-Meier-Plot für die Leitungsmaterialien. Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit während des Leitungsalters.	54
Abbildung 5-2: Kaplan-Meier-Plot für die Leitungsdurchmesser. Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit während des Leitungsalters für die Kategorien: DimCat 0-100 (DN<100) und DimCat 100-150 (DN≥100)	54
Abbildung 5-3: Kaplan-Meier-Kurve für Kategorien die Straßen markieren, in denen vor dem Beobachtungszeitraum Leitungsschäden auftraten.....	55
Abbildung 5-4: Kaplan-Meier-Kurve für die Bodenaggressivität. Dabei wird zwischen aggressiv (=TRUE) und nicht aggressiv (=FALSE) unterschieden.	56
Abbildung 5-5: Kaplan-Meier-Kurve für das Schwerverkehrsaufkommen in den Straßen. Dabei wird zwischen Leitungen unterschieden, die in Straßen liegen in denen Schwerverkehr fährt und jene in denen dies nicht der Fall ist.	56
Abbildung 5-6: Kaplan-Meier-Kurve für die Anzahl an Vorschäden. Die Kategorien teilen sich wie Folgt ein: SchadensanzahlCat=0 (keine Vorschäden), SchadensanzahlCat=1 (1 Vorschaden), SchadensanzahlCat=2 (2 Vorschäden), SchadensanzahlCat=3-6 (3-6 Vorschäden).....	57
Abbildung 5-7: Variation der Koeffizienten des Weibull-Modells.....	60
Abbildung 5-8: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Weibull-Modell	61
Abbildung 5-9: Variation der Koeffizienten des Exponential-Modells.....	61
Abbildung 5-10: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Exponential-Modell	62

Abbildung 5-11: Variation der Koeffizienten des logistischen Modells	62
Abbildung 5-12: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das logistischen- Modell.....	63
Abbildung 5-13: Variation der Koeffizienten des Cox-Modells	63
Abbildung 5-14: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Cox-Modell.....	64
Abbildung 5-15: Variation der Koeffizienten des Weibull- Erstschadensmodells	67
Abbildung 5-16: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Weibull- Erstschadensmodell.....	68
Abbildung 5-17: Variation der Koeffizienten für das Weibull- Folgeschadensmodell	68
Abbildung 5-18: ROC-Kurven der Validationsjahre für das Weibull- Folgeschadensmodell	69
Abbildung 5-19: Variation der Koeffizienten des Exponential- Erstschadensmodells	69
Abbildung 5-20: ROC-Kurven des Exponential-Erstschadensmodells	70
Abbildung 5-21: Variation der Koeffizienten des Exponential- Folgeschadensmodells.....	70
Abbildung 5-22: ROC-Kurven des Exponential-Folgeschadensmodells	71
Abbildung 5-23: Variation der Koeffizienten des logistischen Erstschadensmodells	71
Abbildung 5-24: ROC-Kurven des logistischen Erstschadensmodells	72
Abbildung 5-25: Variation der Koeffizienten des logistischen Folgeschadensmodells.....	72
Abbildung 5-26: ROC-Kurven des logistischen Folgeschadensmodells.....	73
Abbildung 5-27: Variation der Koeffizienten des Cox- Erstschadensmodells	73
Abbildung 5-28: ROC-Kurven des Cox-Erstschadensmodells	74
Abbildung 5-29: Variation der Koeffizienten des Cox- Folgeschadensmodells.....	74
Abbildung 5-30: ROC-Kurven des Cox-Folgeschadensmodells.....	75
Abbildung 5-31: Karte der Leitungen mit prognostizierter Gefährdung	77
Abbildung 5-32: Karte der im Beobachtungszeitraum erhobenen Rohrbruchdaten mit den prognostizierten Gefährdungen.....	77
Abbildung 5-33: Variation der Gewichte in den Fragebögen.....	78
Abbildung 5-34: Variation der Gewichtungungen für das Kriterium Schadenswahrscheinlichkeit	79
Abbildung 5-35: Variation der Gewichtungungen für das Kriterium des Schadensausmaßes.....	81
Abbildung 5-36: Variation der Gewichtungungen für das Kriterium des Betriebes	82
Abbildung 5-37: Vergleich der ERIX-Kategorien der Varianten mit Modell und ohne Modell.....	83

Abbildung 5-38: Übersichtskarte der Verteilung der ERIX-Kategorien für die Variante ohne Modell	83
Abbildung 5-39: Übersichtskarte der Verteilung der ERIX-Kategorien für die Variante mit Modell	84
Abbildung 5-40: Gebiete mit Priorisierten Leitungen aus dem vorhandenen Reinvestitionsplan erstellt von der Adler + Partner ZT GmbH.	84
Abbildung 5-41: ERIX-Kategorien mit Berücksichtigung des Modells und den Aufgezeichneten Rohrbrüchen	85
Abbildung 6-1: Hierarchiestruktur der angewandten ERIX-Ermittlung	87
Abbildung 6-2: Vorgeschlagene Hierarchiestruktur für zukünftige Anwendungen.....	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bewertungsskala für einen Paarvergleich (Saaty, 1980; Übersetzung aus dem Englischen in Haedrich u. a., 1986)	16
Tabelle 3-1: Beispielelement der Erneuerungsbereiche	30
Tabelle 3-2: Bewertungsklassen der Leitungseigenschaften (Wiedenhofer, 2019)	30
Tabelle 3-3: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Anzahl an Vorschäden.....	31
Tabelle 3-4: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Durchmesser	32
Tabelle 3-5: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Material und Verlegegeneration.....	32
Tabelle 3-6: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Betriebsdruck.....	32
Tabelle 3-7: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Verkehrsbelastung (Wiedenhofer, 2019)	33
Tabelle 3-8: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Grundwassereinfluss	33
Tabelle 3-9: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Bodenaggressivität	34
Tabelle 3-10: Bewertungsklasse des Schadensausmaßes: Verlegebereich.....	34
Tabelle 3-11: Bewertungsklasse des Schadensausmaßes: Durchmesser	35
Tabelle 3-12: Bewertungskriterium des Schadensausmaßes: Betriebsdruck (Wiedenhofer, 2019)	35
Tabelle 3-13: Bewertungskriterium des Schadensausmaßes: Hausanschlussdichte.....	35
Tabelle 3-14: Bewertungskriterium des Schadensausmaßes: Redundanz	36
Tabelle 3-15: Bewertungskriterium des Betriebs: Alter	36
Tabelle 3-16: Bewertungskriterium des Betriebs: Wasserverluste (Wiedenhofer, 2019)	37
Tabelle 3-17: Bewertungskriterium des Betriebs: Synergien mit anderen Infrastrukturen.....	37
Tabelle 3-18: Bewertungskriterium des Betriebs: Spülungen	37
Tabelle 3-19: Bewertungskriterium des Betriebs: Förderfähigkeit	38
Tabelle 3-20: Bewertungskriterium des Betriebs: Hydraulische Adäquanz	38

Tabelle 3-21: Einteilung der Gebiete in Erneuerungskategorien nach dem Erneuerungsindex	40
Tabelle 5-1: Kalibrierung und Wahl der Einflussparameter für das kombinierte Erst- und Folgeschadensmodell.....	59
Tabelle 5-2: Kalibrierung und Wahl der Einflussparameter für das Erstschadensmodell	65
Tabelle 5-3: Kalibrierung und Wahl der Einflussparameter für das Folgeschadensmodell	66
Tabelle 5-4: Vergleich der kombinierten Erst- und Folgeschadensmodellen	75
Tabelle 5-5: Modellvergleich der getrennten Erst- und Folgeschadensmodelle	76
Tabelle 5-6: Gewichte der Kriterien. Einzelfragebögen sowie Auswertung für verschiedene Stakeholder und Gesamtgewichte	79
Tabelle 5-7: Gewichtungen für das Kriterium Schadenswahrscheinlichkeit. Ergebnisse der Fragebögen, Auswertung für Stakeholder, Gesamtgewichte sowie globale Gewichte	80
Tabelle 5-8: Gewichtungen für das Kriterium Schadensausmaß. Ergebnisse der Fragebögen, Auswertung für Stakeholder, Gesamtgewichte sowie globale Gewichte	81
Tabelle 5-9: Gewichtungen für das Kriterium Betrieb. Ergebnisse der Fragebögen, Auswertung für Stakeholder, Gesamtgewichte sowie globale Gewichte	82

Abkürzungsverzeichnis

Wenn im Text Abkürzungen Verwendung finden, sollten diese in einem separaten Abkürzungsverzeichnis aufgelistet werden (siehe Beispiel). Optional kann die Beschreibung auch in mehreren Sprachen erfolgen.

ERIX	Erneuerungsindex
MCDA	Multikriterielle Entscheidungsanalyse
AHP	Analytical hierarchy process
ROC	Receiver operating characteristic
AUP	Area under the curve
ANC	Averaging over normalized columns
GMM	Geometric mean
GG	Grauguss
GGG	Sphäroguss
ST	Stahl vor 1995
ST 1995	Stahl ab 1995
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PP	Polypropylen
AZ	Asbestzement

1 Einleitung

Das folgende Kapitel geht auf die zugrundeliegende eigene sowie fachliche Motivation zur Auseinandersetzung mit dem gegenständlichen Thema ein. Zudem werden die Aufgabenstellung und auch die Zielsetzung erläutert.

1.1 Motivation

Wasserversorgungsnetze sind für unsere Gesellschaft eine sehr wichtige Infrastruktur. Zur Erfüllung des Bedürfnisses nach einem bequemen Zugang zu Trinkwasser wurde Infrastruktur geschaffen, in der ein beträchtlicher Anteil des Kapitals einer Gesellschaft gebunden ist. Die Instandhaltung dieser Netze bringt somit eine erhebliche Verantwortung gegenüber der Gesellschaft mit sich.

Eine nachlässige Instandhaltungsleistung führt zu kontinuierlich zunehmenden Kosten, die für eine gleichbleibende Qualität der Dienstleistungserfüllung nötig sind. Somit muss eine nachhaltige Lösung angestrebt werden. Eine solche Lösung kann von erfahrenen Verantwortlichen für überschaubare Netze durchaus erreicht werden. Sollte die dafür nötige Erfahrung jedoch nicht vorhanden sein, müssen Verfahren gefunden und angewandt werden die zu einem nachhaltigen Management führen. Für größere Netze ist dies jedoch zunehmend schwieriger zu erreichen und oft ist auch die Erfahrung nicht mehr als alleiniges Mittel ausreichend.

Softwarelösungen für diese Aufgaben sind vorhanden. Diese sind jedoch auch nur für große Netze konzipiert. Für kleinere und mittlere Netze fehlen solche kommerziellen Lösungen. Da es jedoch auch für diese kleineren Netze das Bedürfnis nach Methoden gibt, die ein nachhaltiges Management, auch ohne ausreichend Erfahrung, sicherstellen. Zudem verbessert sich laufend die Datenlage, sodass maßgeschneiderte Lösungen für die jeweiligen Netze umsetzbar werden. Um eine bestmögliche Erneuerungsplanung zu erstellen, kann dabei auf Schadensprognosemodelle und Entscheidungstools zurückgegriffen werden.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zunächst sollen die Schadensdaten der Gemeinde Lustenau aufbereitet werden, um die Nutzung in einem Schadensprognosemodell zu ermöglichen. Die aufbereiteten Daten werden im nächsten Schritt in einem Schadensprognosemodell untersucht. Bei der Erstellung des Modells werden verschiedene Herangehensweisen untersucht und verglichen. Aus diesen Varianten soll die Beste ausgewählt werden und damit eine Schadensprognose für das Wasserversorgungsnetz der Gemeinde Lustenau erstellt werden.

Auf Basis der, von Manuel Wiedenhofer in seiner Masterarbeit (Wiedenhofer, 2019) entwickelten Methode zur Ermittlung eines Erneuerungsindex (ERIX), soll ermittelt werden wie die Schadensprognose einbezogen werden kann, um

eine Erneuerungspriorisierung zu erstellen. Die bestehende sowie die erweiterte Methode wird anhand des Wasserversorgungsnetzes der Gemeinde Lustenau getestet. Für diese beiden Varianten soll daraufhin auch ein Vergleich angefertigt werden, mit dem ermittelt werden soll, was für einen Mehrwert das Einbeziehen eines Schadensprognosemodells bietet.

Die erstellten Prognosen sowie die Reinvestitionspläne sollen auch vor Ort mit den Verantwortlichen diskutiert werden.

Bei der Arbeit werden folgende Forschungsfragen beleuchtet:

- Welche Einflussfaktoren sind maßgebend für ein Schadensprognosemodell?
- Welche Art von Schadensprognosemodellen liefert die besten Vorhersagen?
- Wie kann ein Schadensprognosemodell verbessert werden?
- Wie kann ein Schadensprognosemodell in eine Erneuerungspriorisierung einbezogen werden?
- Wie wirkt sich das Einbeziehen eines Schadensprognosemodells auf die Erneuerungspriorisierung aus?

Das Ziel der Arbeit ist die Erweiterung des ERIX um ein Schadensprognosemodell.

2 Grundlagen/Literatur

Im folgenden Abschnitt der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen der Themen Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA) bzw. der ERIX-Methode sowie der Ereigniszeitanalyse, welche die Basis der Schadensprognosemodelle bildet, erläutert. Der erste Teil bietet dabei die Grundlagen für die verschiedenen Varianten der Schadensprognosemodellen. Im zweiten Teil wird auf die MCDA eingegangen und die Anwendung in der Erneuerungspriorisierung von Trinkwasserleitungen erläutert.

2.1 Schadensprognosemodelle

In diesem Teil des Kapitels wird zunächst auf die Methoden der Ereigniszeitanalyse eingegangen. Im Anschluss werden zwei Arten der Schadensprognosemodellen erklärt.

2.1.1 Allgemein

Die hier angewandten Schadensprognosemodelle basieren auf der Ereigniszeitanalyse. Dabei wird jeweils die Zeit bis zum Eintreten eines bestimmten Ereignisses untersucht. In den Ingenieurwissenschaften werden in der Regel die Zeiten bis zum Eintreten eines Schadens betrachtet. In diesem Fall wird das Eintreten eines Lecks oder eines Rohrbruchs bei Wasserleitungen untersucht.

2.1.1.1 Datenstruktur

Um die Ereigniszeitanalyse durchzuführen müssen in den vorhandenen Daten jeweils die beobachteten Ereigniszeitpunkte und die Verlegejahre der Leitungen bekannt sein. Diese Zeitpunkte werden dann so organisiert, dass jeweils die Zeit ab der Verlegung bis zum Eintreten des ersten Schadens und daraufhin die Zeit zwischen dem aufgetretenen Schaden und dem nächsten Schaden als die Liegedauer angesehen wird. Dies führt dazu, dass eine Leitung mehrere „Liegedauern“ haben kann. Dies ist in Abbildung 2-1 abgebildet.

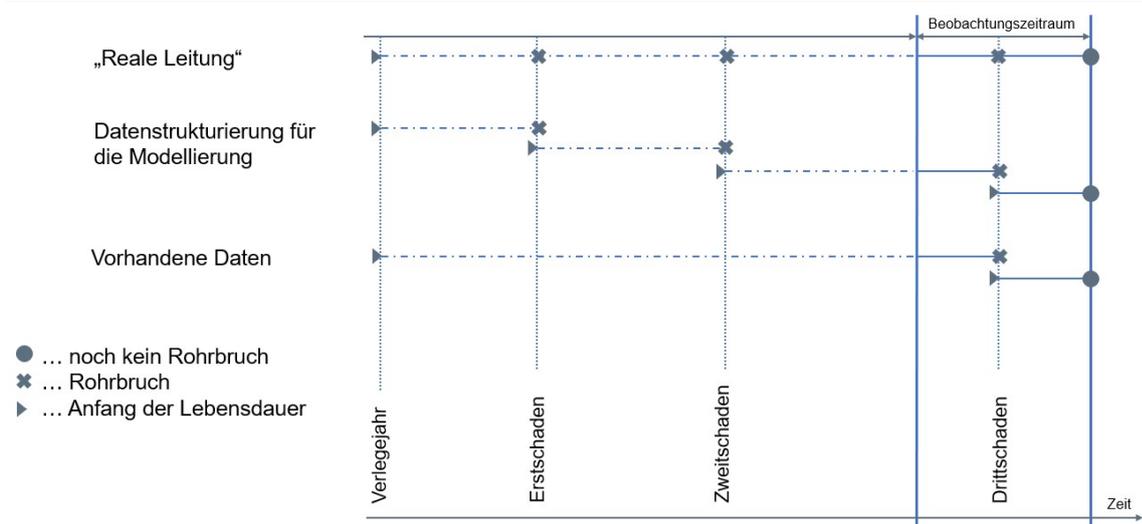


Abbildung 2-1: Datenstruktur für die Ereigniszeitanalyse

In der Regel werden die Daten, wie in Abbildung 2-1 ersichtlich, in begrenzten Beobachtungszeiträumen erhoben. Somit sind die Ereignisse oder Schäden vor dem Beginn des Beobachtungszeitraum nicht bekannt. Lediglich der Zeitpunkt der Verlegung der Leitungen ist bekannt. Die Daten sind somit linkszensiert. Zusätzlich endet die Aufzeichnung der Daten spätestens zum jetzigen Zeitpunkt. Damit sind viele Datensätze unvollständig, da das erwartete Ereignis bei diesen noch nicht eingetreten ist. Somit liegt auch eine Rechtszensur der Daten vor. Der Umgang mit der Zensur der vorliegenden Daten wurde von (Scheidegger, et al., 2013) und (Scheidegger, et al., 2015) behandelt.

Um zu untersuchen warum bei einer Leitung ein Schaden früher oder später auftritt, können Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Hierfür werden den Datensätzen Eigenschaften zugewiesen und die Daten nach diesen gruppiert und untersucht. Diese Zuweisung von Eigenschaften kann in Form von bivariaten (z.B.: Schieberstatus offen/geschlossen), kategorialen (z.B.: Material) oder metrisch skalierten Variablen (z.B.: Alter) erfolgen. (Hedderich, et al., 2015)

2.1.1.2 Umgang mit ungleichmäßigen Datengruppen

Ein Häufiges Problem bei der Modellierung sind unausgeglichene Gruppengrößen innerhalb der Daten. Für diese Fälle gibt es einige Lösungen. Nach Fawcett (2016) können folgende Herangehensweisen gewählt werden:

- Nichts tun. In manchen Fällen hat man Glück und es bedarf keiner Aktionen.
- Ausgleichen der Daten durch eine der folgenden Möglichkeiten:
 - Die Elemente der kleinen Gruppe häufiger einbeziehen, um gleichmäßige Gruppen zu erhalten.
 - Elemente der großen Gruppen nicht einbeziehen, um gleichmäßige Gruppen zu erhalten.
 - Künstlich neue Elemente für die kleine Gruppe erzeugen.

- Die kleinen Gruppen nicht in das Modell einbeziehen.
- Auf der Algorithmen-Ebene z.B.: durch Gewichtungen.

Die Methode der künstlichen Erzeugung neuer Elemente der kleinen Gruppen wurde von Scheidegger, et al. (2013) genutzt, um Daten von Leitungen vor dem Beobachtungszeitraum nachträglich zu erzeugen.

2.1.1.3 Ausfallrate, Überlebensfunktion und Sterbefunktion¹

Die Modellierung der Ereigniszeiten erfolgt in Form der Risikofunktion. Diese kann daraufhin in die Überlebensfunktion und die Sterbefunktion übergeführt werden.

Die Ausfallrate (im englischen als Hazard-Rate bezeichnet) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Ereignis eintritt. Je höher die Ausfallrate einer Leitung ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis eintritt. Für die Modellierung wird der Ausfallrate eine Funktion zugewiesen, die die Form der Kurve festlegt. Diese Funktion wird als Basis-Ausfallrate (baseline hazard rate) bezeichnet. Um Rahmenbedingungen und Leitungseigenschaften zu berücksichtigen, wird diese Basisfunktion über Faktoren skaliert, welche die Eigenschaften der Leitung repräsentieren.

Die hier beschriebenen Modelle sind Proportional-Hazard-Modelle. Dabei wird davon ausgegangen, dass Leitungen mit verschiedenen Eigenschaften der gleichen Basisfunktion folgen und sich lediglich in der Skalierung unterscheiden.

Eigenschaften der Leitungen wird jeweils ein Koeffizient zugewiesen, der den Einfluss der jeweiligen Eigenschaft widerspiegelt. Diese Koeffizienten werden in der Regel als β_n bezeichnet. Um definieren zu können ob eine Eigenschaft auf eine Leitung zutrifft, wird der Eigenschaftskoeffizient mit einer Variablen multipliziert die in der Regel als x_n bezeichnet wird.

Im Falle von dichotom skalierten Variablen nimmt x_n einen Wert von 0 oder 1 an. Ein Wert von 1 besagt, dass diese Variable zutrifft. Ein Wert von 0 demnach das Gegenteil. Für nominal skalierte Eigenschaften werden Dummy-Variablen genutzt. Dabei wird eine Kategorie als Basiskategorie genutzt und jede andere damit verglichen. Somit ergeben sich für solche Eigenschaften genau $n-1$ Dummy-Variablen bei denen x_n wieder jeweils den Wert 1 oder 0 annehmen kann. 1 indiziert dabei, dass die gegenständliche Kategorie zutrifft und 0, dass sie nicht zutrifft. Wenn alle Dummy-Variablen den Wert 0 haben trifft die Basiskategorie zu mit der jede andere Kategorie verglichen wird. Für stetige skalierte Eigenschaften nimmt x_n den jeweiligen Wert der Eigenschaft an.

Insgesamt ergibt sich so die in Gleichung 2-1 dargestellte Formel für die Ausfallrate beziehungsweise hazard rate.

¹ Die Inhalte dieses Kapitels wurden Großteils aus (Hedderich, et al., 2015) zusammengefasst.

$$h(t) = h_0(t) * e^{\sum \beta_n x_n} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

mit:

$h(t)$... Ausfallrate (-), $h_0(t)$... Basisfunktion der Ausfallrate (-), β_n ... Eigenschafts-Koeffizient, x_n ... numerischer Wert der Eigenschaft / zutreffen der Eigenschaft (a, m, etc. / -)

Durch Integrierung der Ausfallrate über die vergangene Zeit erhält man die kumulierte Ausfallrate wie in Gleichung 2-2 ersichtlich.

$$H(t) = \int_0^{t_1} h(t) dt \quad \text{Gleichung 2-2}$$

mit:

$H(t)$... kumulierte Risikofunktion [-], $h(t)$... Risikofunktion (-)

Die kumulierte Risikofunktion kann dann in die Überlebensfunktion, wie in Gleichung 2-3 erläutert, umgerechnet werden.

$$S(t) = e^{-H(t)} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

mit:

$S(t)$... Überlebensfunktion / Überlebenswahrscheinlichkeit (-), $h(t)$... Ausfallrate / Hazard rate (-)

Die Sterbefunktion wird durch das Komplement der Überlebensfunktion beschrieben, wie in Gleichung 2-4 ersichtlich.

$$F(t) = 1 - S(t) \quad \text{Gleichung 2-4}$$

mit:

$F(t)$... Sterbefunktion / Sterbewahrscheinlichkeit (-), $S(t)$... Überlebensfunktion / Überlebenswahrscheinlichkeit (-)

2.1.1.4 Ausfallrate-, Überlebens- und Sterbekurven

Üblicherweise lassen sich bei Risikokurven sogenannte Badewannenkurven beobachten, wie in Abbildung 2-2 ersichtlich. (Hedderich, et al., 2015)

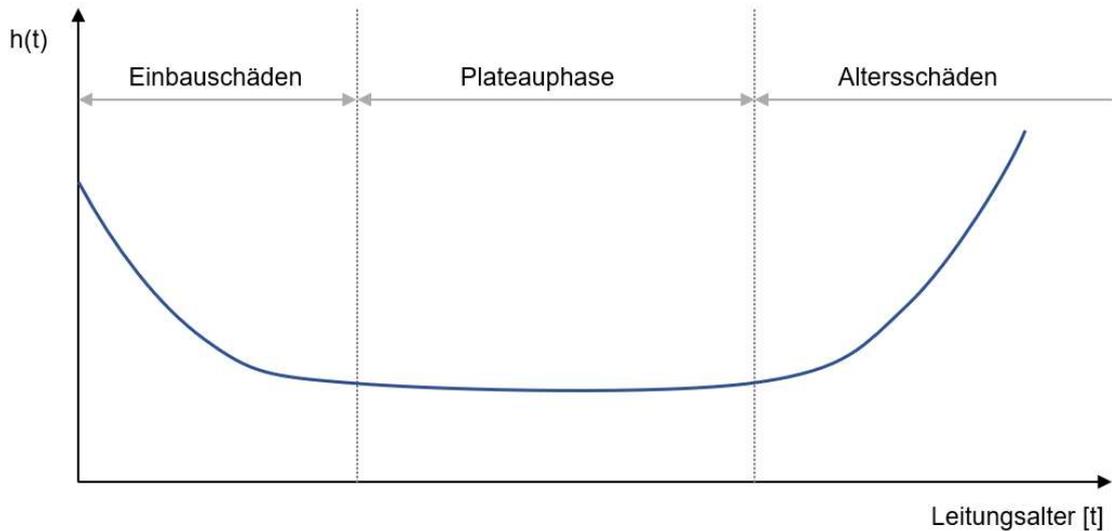


Abbildung 2-2: Ausfallratenkurve in Form einer Badewannenkurve

Das bedeutet, dass direkt nach der Leitungsverlegung ein erhöhtes Schadensrisiko beobachtet wird. Diese Schäden werden als Einbauschäden bezeichnet. Sie ergeben sich durch Fehler beim Einbauen, die zum Beispiel durch Lagerungsfehler oder Ähnliches verursacht werden. Dies führt bei Überlebenskurven zu einer Abnahme der Überlebenswahrscheinlichkeit in den ersten Jahren nach der Verlegung der Leitung wie in Abbildung 2-3 ersichtlich. Nachdem eine Leitung diese Phase überstanden hat, tritt sie in eine Plateauphase ein, in der sich die Schadenswahrscheinlichkeit auf ein gleichbleibendes Niveau absenkt. Ab einem gewissen Alter erhöht sich die Schadenswahrscheinlichkeit wieder. In diesem Abschnitt werden die Schäden durch Korrosion oder andere Alterserscheinungen verursacht.

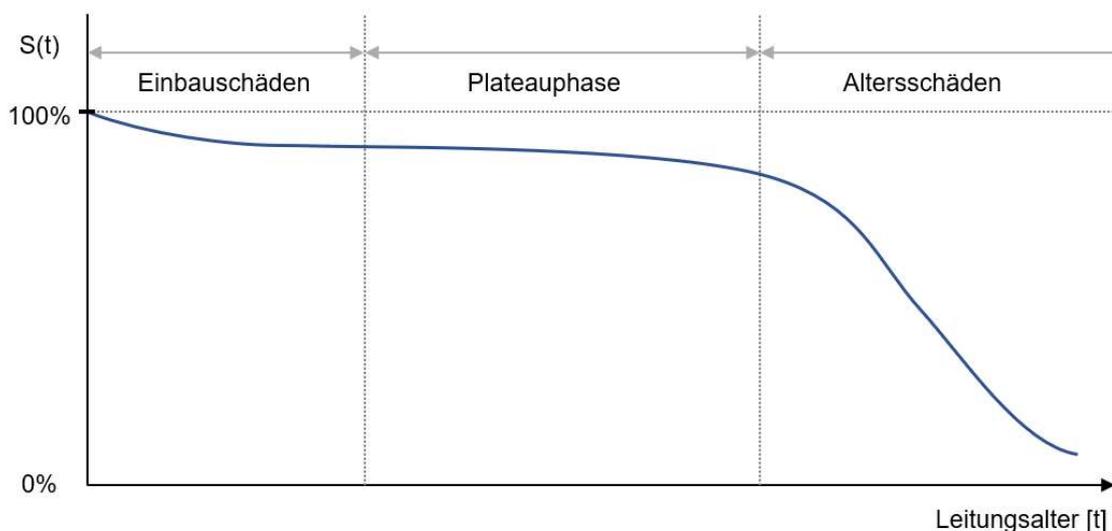


Abbildung 2-3: Überlebenskurve mit Einteilung in Einbauschäden, Plateauphase und Altersschäden

Während der ganzen Zeit geschehen auch Schäden durch Fremdeinwirkung, die nichts mit den Leitungseigenschaften zu tun haben. Üblicherweise werden diese Schäden durch Bautätigkeiten verursacht. Diese Schäden sollten für die Modellierung nicht berücksichtigt werden.

2.1.2 Homogene Abschnittserstellung

Nach Carrión, et al. (2010) kann beobachtet werden, dass längere Leitungen häufiger Schäden aufweisen als kurze Leitungen.

Somit sollten Leitungen in Abschnitte mit homogener Länge eingeteilt werden. Zudem kann die Länge als Parameter in die Modellbildung mit einfließen.

2.1.3 Kaplan-Meier-Schätzer

Um sich einen guten Überblick über die Daten zu verschaffen ist der Kaplan-Meier-Schätzer für die Überlebensfunktion ein sehr geeignetes Tool. Dabei werden anhand der Daten Überlebenskurven in Stufenform erzeugt wie in Abbildung 2-4 ersichtlich.

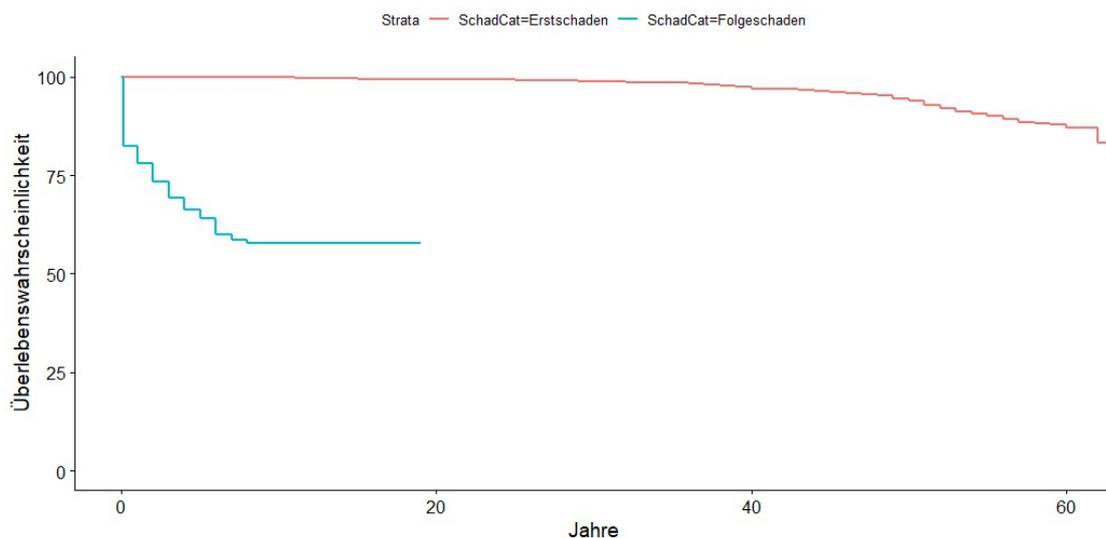


Abbildung 2-4: Beispielhafte Überlebenskurve mit der Unterscheidung zwischen Erst- und Folgeschäden

Diese Schätzungen bieten einen Einblick wie die Überlebenskurve aussehen könnte. Durch diese Kurven können die Einflüsse gewisser Eigenschaften visuell analysiert werden. So können Einflussgrößen schon ohne die Verwendung eines Modells gruppiert oder ausgeschlossen werden.

2.1.4 Parametrische Modelle

Parametrische Modelle nutzen Verteilungen, welche mittels Parameter adaptiert werden, um die Basisrisikofunktion festzulegen. Dabei gibt es Modelle verschiedener Komplexität.

2.1.4.1 Weibullmodell

Ein sehr gängiges Modell stellt das Weibullmodell dar. Dieses nutzt die Risikofunktion wie in Gleichung 2-5 dargestellt. Dabei lässt sich die Basisrisikofunktion mit einem Form- und einem Skalierungsparameter anpassen.

$$h(t) = \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} * e^{\sum \beta_n x_n} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

mit:

$h(t)$... Risikofunktion (-), α ... Formparameter (-), λ ... Skalierungsparameter, β_n ... Eigenschafts-Koeffizient, x_n ... numerischer Wert der Eigenschaft / zutreffen der Eigenschaft (a, m, etc. / -)

Der Skalierungsparameter λ beschreibt den Medianwert der Liegedauern. Der Formparameter ist maßgeblich für die Steigung der Risikofunktion.

2.1.4.2 Exponentialmodell

Wenn beim Weibullmodell der Formparameter α den Wert 1 annimmt ergibt sich das Exponentialmodell, wie es in Gleichung 2-6 ersichtlich ist. Dabei ist die Risikofunktion konstant gleich dem Median der Liegedauern.

$$h(t) = \lambda * e^{\sum \beta_n x_n} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

mit:

$h(t)$... Risikofunktion (-), λ ... Skalierungsparameter, β_n ... Eigenschafts-Koeffizient, x_n ... numerischer Wert der Eigenschaft / zutreffen der Eigenschaft (a, m, etc. / -)

Das Exponentialmodell stellt damit eine weniger anpassbare, aber auch einfachere Modellvariante dar. Dieses wird häufig in Kombination mit dem Weibullmodell genutzt. Dabei wird das Weibullmodell für die Erstschäden und das Exponentialmodell für die Folgeschäden genutzt. Wie es etwa von Scheidegger, et al. (2013) oder Didri, et al. (2009) verwendet wird.

2.1.4.3 Logistisches Modell

Das Logistische Modell stellt in diesem Fall eine parametrisierte Variante des Logit-Modells dar. Dabei folgt die Basisrisikofunktion der logistischen Funktion.

$$h(t) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha*(t-\lambda)}} * e^{\sum \beta_n x_n} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

mit:

$h(t)$... Risikofunktion (-), α ... Formparameter (-), λ ... Positionsparameter (-), β_n ... Eigenschafts-Koeffizient, x_n ... numerischer Wert der Eigenschaft / zutreffen der Eigenschaft (a, m, etc. / -)

Bei der in Gleichung 2-7 dargestellten Funktion gibt der Formparameter α die Neigung der Funktion an. Der Parameter λ gibt die Position an in der der Mittelwert erreicht wird.

2.1.5 Nicht parametrische Modelle

Die Schätzung des Cox-Proportional-Hazard-Modells (Cox, 1972) basiert auf einer Rangfolge der Ereigniszeiten und nicht auf den beobachteten Zeiten selbst.

In diesem Sinn wird das Verfahren der Cox-Regression auch als „nicht parametrisch“ bezeichnet. (Hedderich, et al., 2015)

Das Proportional-Hazards Cox-Modell basiert auf der Annahme, dass die Basisrisikofunktion h_0 nicht bekannt ist, die Risikofunktionen für die verschiedenen Gruppierungen aber zueinander proportional sind. Die Risikofunktion dafür ist in Gleichung 2-8 ersichtlich.

$$h(t) = h_0(t) * e^{\sum \beta_n x_n} \quad \text{Gleichung 2-8}$$

mit:

$h(t)$... Risikofunktion (-), $h_0(t)$... Basisrisikofunktion (-), β_n ... Eigenschafts-Koeffizient, x_n ... numerischer Wert der Eigenschaft / zutreffen der Eigenschaft (a, m, etc. / -)

Für die Modellierung werden hierbei Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines Ereignisses zum definierten Zeitpunkt t errechnet. (Hedderich, et al., 2015) Diese werden wie in Gleichung 2-9 beschrieben berechnet. Dies führt dazu, dass die Basisrisikofunktion gekürzt werden kann und somit nicht mehr benötigt werden.

$$\begin{aligned} p_n(t) &= \frac{h_0(t) * e^{\sum \beta_n x_n}}{\sum_{t(j) \geq t_n} h_0(t) * e^{\sum \beta_n x_n}} \\ &= \frac{e^{\sum \beta_n x_n}}{\sum_{t(j) \geq t_n} e^{\sum \beta_n x_n}} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

mit:

$p_n(t)$... bedingte Schadenswahrscheinlichkeit (-), $h_0(t)$... Basisrisikofunktion (-), β_n ... Eigenschafts-Koeffizient, x_n ... numerischer Wert der Eigenschaft / zutreffen der Eigenschaft (a, m, etc. / -)

2.1.6 Modellvarianten

Modelle können auch nach ihrer Art der Datenaufbereitung eingeteilt werden. So können die Daten in Form einzelner Leitungen aufbereitet werden oder als einzelne Netzwerke beziehungsweise Netzwerkeile. (Scheidegger, et al., 2015)

Da Erneuerungsentscheidungen eher auf der Leitungsebene gefällt werden, wird häufig einem Leitungsmodell der Vorzug gegeben.

Für die Schadensmodellierung entweder ein Modell für alle Schäden genutzt werden. Oder es werden für verschiedene Kategorien unterschiedliche Modelle genutzt. So kann etwa wie bei Scheidegger, et al. (2013) jeweils ein Modell für die Erstschäden und eines für die Folgeschäden genutzt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass Erst- und Folgeschäden unterschiedlichen Sterbekurven folgen.

2.1.7 Modellstabilität

Modellstabilität ist ein wichtiges Thema der Modellierung. Werden Modelle mit zu vielen Einflussparametern zu genau auf einen Datensatz angepasst so kommt es zum sogenannten „Overfitting“. Dabei werden, wie in Abbildung 2-5 (rechts) gezeigt, alle Datenpunkte genau von der Funktion getroffen, jedoch ist das Modell nur für den kalibrierten Datensatz repräsentativ. Wird ein solches Modell für einen anderen Datensatz angewendet, erweist das Modell keine gute Anpassung mehr.

Die zweite häufig beobachtete Möglichkeit der Modellanpassung ist das sogenannte „Underfitting“, wie es in Abbildung 2-5 (links) dargestellt ist. Dabei wird ein zu simples Modell angewendet. Dies kann für den Bereich der Kalibrierungsdaten zwar eine akzeptable Anpassung liefern, jedoch werden für Daten, außerhalb des in den Kalibrierungsdaten betrachteten Bereichs, nur sehr schlecht repräsentiert. Dieses Problem kann auch durch systematische Abweichungen in Residuen-Plots erkannt werden.

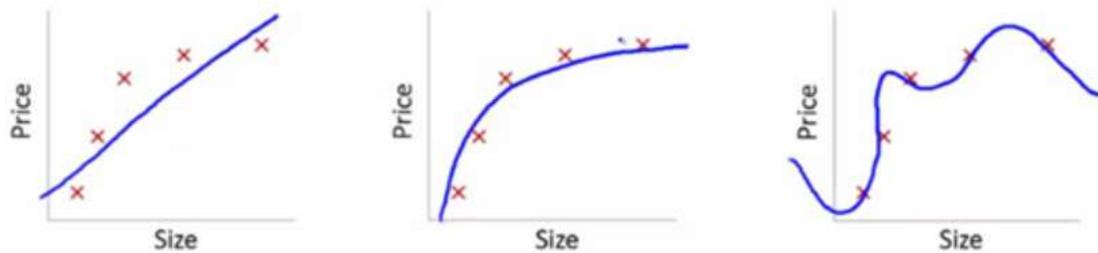


Abbildung 2-5: Beispiele des "Underfitting" (links), eines "guten" Modells (Mitte) und des "Overfittings" (rechts) (Ray, 2018)

Um das Erreichen eines „guten“ Modells, welches in Abbildung 2-5 (Mitte) ersichtlich ist, kann eine n-fache Cross Validation angewendet werden. Dabei wird der Kalibrierungsdatensatz in n Teile zerteilt und das Modell n-mal auf unterschiedliche Zusammensetzungen des Kalibrierungsdatensatzes kalibriert, wie in Abbildung 2-6 ersichtlich ist.

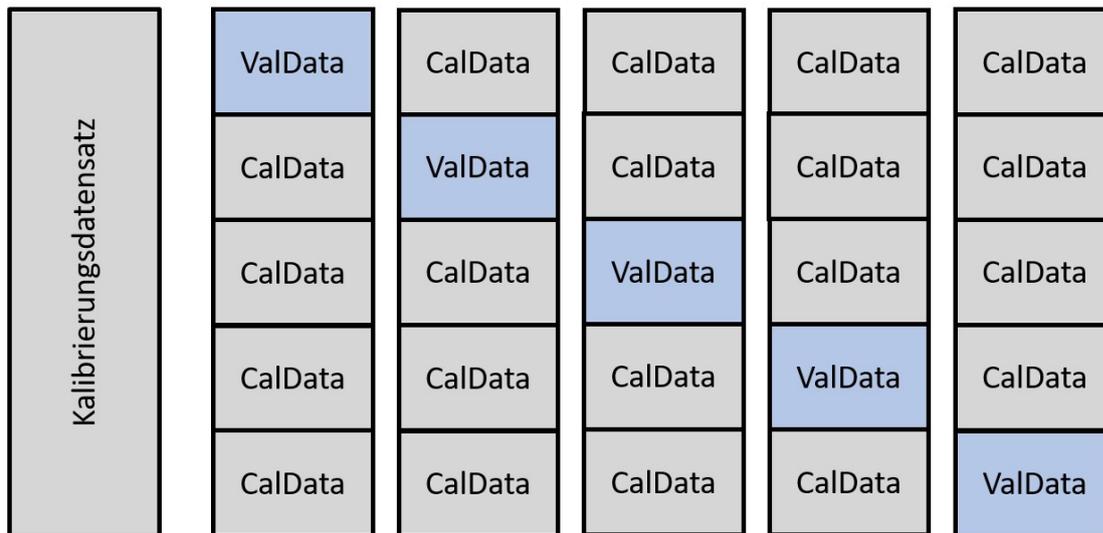


Abbildung 2-6: Prinzip der Cross Validation

Für jedes dieser Modelle werden Parameter der Modellgüte überprüft. Die Variation dieser Parameter lässt dabei Rückschlüsse bezüglich Over- oder Underfittings zu. Gewählt wird dann jenes Modell mit der besten Modellgüte.

2.1.8 Beurteilung der Modellqualität

Zur Beurteilung der Modellqualität kann die ROC-Kurve herangezogen werden. Dabei wird zunächst eine Prognose für einen Validierungsdatensatz getätigt. Daraufhin wird eine Schadensgrenze definiert und jeweils der prozentuale Wert der getroffenen richtigen Schadensvorhersagen (=Truepositive) und der falschen Schadensvorhersagen (=Falsepositive) errechnet. Diese Werte werden zur Erstellung der ROC-Kurve auf einem Graph abgebildet. Dabei werden auf der Abszisse die Falsepositive Werte aufgetragen und auf der Ordinate die Truepositive Werte.

Dabei wird die Schadensgrenze kontinuierlich erhöht, um letztendlich für jeden Prozentwert der Schadensgrenze einen Punkt auf der ROC-Kurve zu erhalten. Diese Punkte werden daraufhin nach der Reihenfolge der verwendeten Schadensgrenze miteinander verbunden.

Die so entstehende Kurve, wie sie in Abbildung 2-7 zu schematisch zu sehen ist, lässt Rückschlüsse auf die Modellqualität zu. (Fan, et al., 2006)

Bildet die ROC-Kurve genau eine Diagonale so hat das Modell keine Aussagekraft. Befindet sich die Kurve in der Hälfte über der Diagonale, so trifft das Modell zutreffende Aussagen. Je weiter sich die Kurve dem oberen Rand des Graphen annähert, desto besser treffen die Aussagen des Modells die Realität. Befindet sich die Kurve jedoch in der unteren Hälfte des Graphen, so bildet das Modell das Gegenteil dessen ab, was in der Realität geschieht. (Fan, et al., 2006)

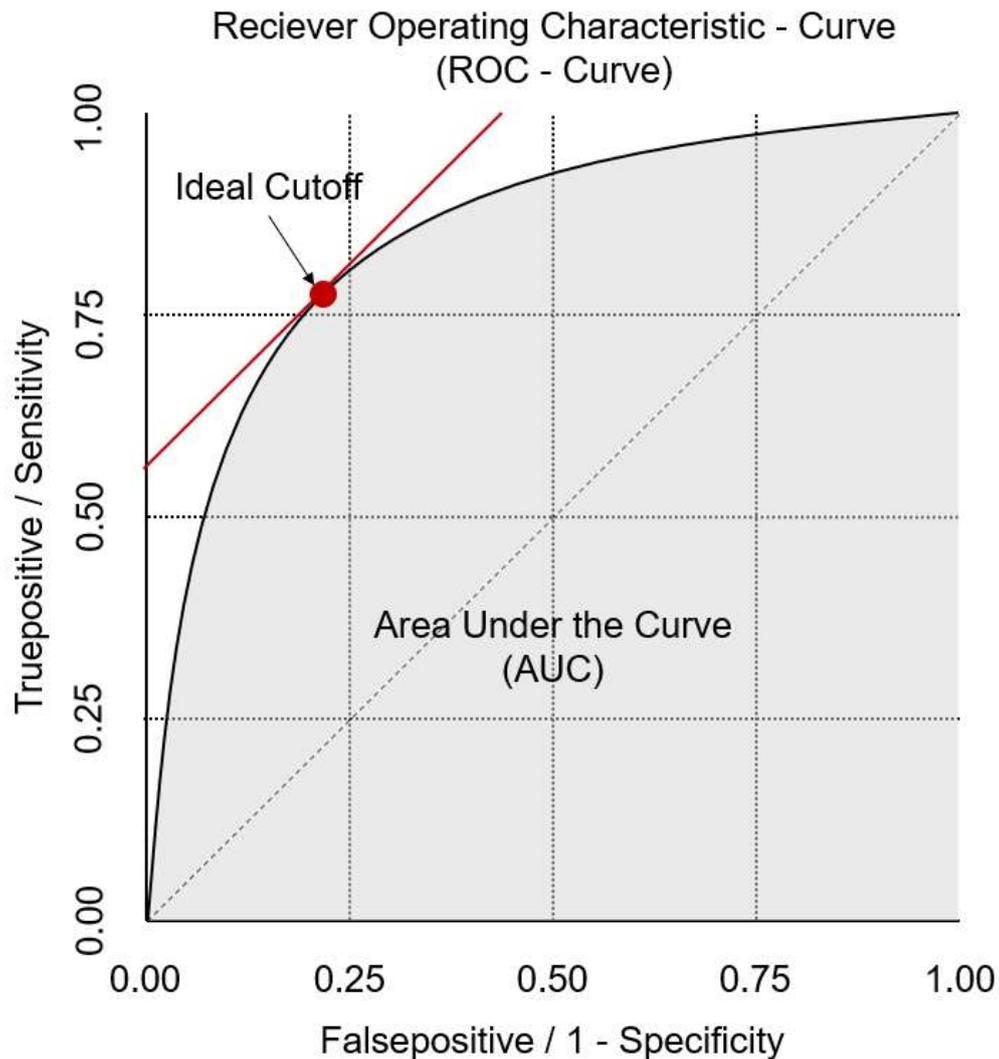


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung einer ROC-Kurve mit Ideal Cutoff und AUC

Als Kennwert, wie gut das vorliegende Modell wirklich ist, lässt sich die AUC (Area Under the Curve) berechnen, wie in Abbildung 2-7 in grau dargestellt ist. Je höher dieser Wert ist, desto besser bildet das Modell die Realität ab. Die Interpretation ist hierbei wieder gleich wie bei der Lage der Kurve. Bei einem AUC-Wert von 0.5 hat das Modell keine Aussagekraft. Ist der Wert höher als 0.5 trifft das Modell richtige Aussagen, ist er kleiner trifft das Modell gegenteilige Aussagen von dem, was in Realität geschieht. (Fan, et al., 2006)

Wenn ein Modell fertig erstellt ist, stellt sich die Frage was für eine Schadensgrenze man wählt, um im Falle der Schadensprognose, einen Schaden zu prognostizieren. Eine Möglichkeit diese festzulegen stellt der Ideal Cutoff dar. Dabei wird jener Punkt auf der ROC-Kurve gesucht, der das Ideale Verhältnis an Truepositive zu Falsepositive hat. Um diesen Punkt zu finden wird eine 45° Diagonale vertikal verschoben. Sobald diese die ROC-Kurve in nur einem Punkt schneidet, wie in Abbildung 2-7 rot dargestellt, entspricht die Schadensgrenze, die diesen Punkt erzeugt hat, dem Ideal Cutoff.

2.1.9 Schadensprognosemodelle in der Literatur

Parametrische Modelle wurden in der Schadensmodellierung für Trinkwasserleitungen schon häufig angewandt.

So wurde etwa von Watson, et al. (2004) ein Bayes'sches Gamma-Modell zur Schadensprognose genutzt.

Didri, et al. (2009) nutzte ein getrenntes Bayes'sches Erst- und Folgeschadensmodell, um die Schäden eines Hypothetischen Wasserversorgungsnetzes zu modellieren. Dabei wurden Erstschäden in Form eines Weibul-Modells und die Folgeschäden in Form eines Exponential-Modells simuliert.

Scholten, et al. (2012) untersuchte wie Expertenwissen verwendet werden kann, um ein Bayes'sches Modell für kleine Datenmengen zu verbessern. Dabei wurde ein Teil der Daten eines großen Schweizer Wasserversorgers genutzt.

Scheidegger, et al. (2013) nutzte wie auch Didri, et al. (2009) ein getrenntes Bayes'sches Erst- und Folgeschadensmodell. Die Erstschäden wurden mit einem Weibull-Modell und die Folgeschäden mit einem Exponentialmodell simuliert. Dabei wurde die Verwendung eines Leitungserneuerungsmodells untersucht, bei dem eine Leitung nach einem simulierten Schaden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausgetauscht wird, um die Prognosequalität zu verbessern. Als Feldstudie wurde das Modell auf einen Teil des Wasserversorgungsnetzes von Lausanne, Schweiz, angewendet.

Scholten, et al. (2014) untersuchte die Kombination von MCDA-Methoden und Schadensprognosemodellen. Dabei wurde das von Scheidegger, et al. (2013) erstellte Modell verwendet.

Kimutai, et al. (2015) untersuchte die Unterschiede des Weibull-Proportional-Hazard-Modells, des Cox-Proportional-Hazard-Modells und des Poisson-Modells.

Bharat, et al. (2017) untersuchte verschiedene Illustrationsmöglichkeiten des Cox-Modells, um die Ergebnisse der Modellierung verständlicher darzustellen.

Rogers (2011) nutzte ein Poisson-Modell mit konstanter Ausfallrate für alle Leitungen mit drei oder mehr aufgezeichneten Rohrbrüchen zur Schadensmodellierung für das Wasserversorgungsnetz der Stadt Denver. Diese Modellierung wurde mit einer MCDA kombiniert, welche die Schadenswahrscheinlichkeit der Leitungen mit nur ein oder zwei Rohrbrüchen beurteilt.

2.2 Multikriterielle Entscheidungsanalyse

Komplexe Probleme besitzen üblicherweise nicht eine ideale Lösung, sondern mehrere. Diese sind jeweils aus einem anderen Gesichtspunkt gesehen ideal. Aus dieser Vielzahl von Lösungen die Subjektiv beste auszuwählen ist schwierig. Zur Vereinfachung dieses Problems wurde die Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA, Multiple Criteria Decision Analysis) entwickelt.

2.2.1 AHP

Verschiedene MCDA-Methoden haben verschiedene Anwendungen im Assetmanagement gefunden. Eine häufig verwendete Variante davon stellt der Analytic Hierarchy Process (AHP). Dieser wurde 1980 von Thomas L. Saaty (Saaty, 1980) entwickelt. Dabei werden Probleme, wie in Abbildung 2-8 ersichtlich, in Ebenen unterteilt. Dabei wird ein Ziel definiert, welches erreicht werden will. In der Hierarchie darunter gelistet sind die verschiedenen Teilbereiche des Problems, die für das Erreichen der Lösung zusammenwirken. Diese Teilbereiche oder auch Kriterien werden wiederum in verschiedene Subkriterien unterteilt.

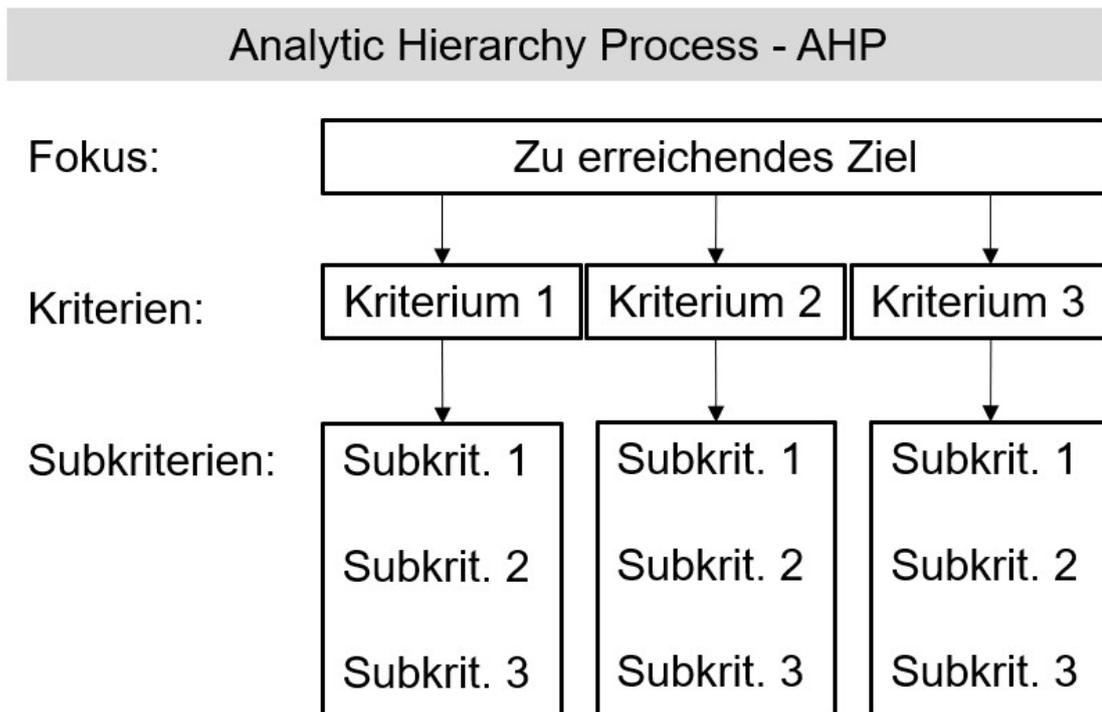


Abbildung 2-8: AHP - Prinzip

Die Kriterien werden einander in einer Paarvergleichsmatrix gegenübergestellt. Dabei wurde von Saaty (1980) eine Werteskala vorgeschlagen, welche in Tabelle 2-1 dargestellt ist. Dabei wird jedes in einer Gruppe enthaltene Kriterium oder Subkriterium mit jedem anderen sich in der Gruppe befindenden Kriterium oder Subkriterium verglichen. Welches für die Gruppe dabei die größere Wichtigkeit besitzt wird in Form der Skalenwerte zugewiesen. Das wichtigere Kriterium erhält den in Tabelle 2-1 ersichtlichen Skalenwert. Das weniger wichtige erhält dabei den Kehrwert des wichtigeren Kriteriums.

Tabelle 2-1: Bewertungsskala für einen Paarvergleich (Saaty, 1980; Übersetzung aus dem Englischen in Haedrich u. a., 1986)

Skalenwert	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit gezeigt.
9	Absolut dominierend	Es handelt sich um den größten möglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2,4,6,8		Zwischenwert

Die Paarvergleichsmatrizen werden aus zuvor von Experten ausgefüllten Fragebögen, welche die Paarvergleiche enthalten erstellt. Die Paarvergleichsmatrizen stellen dabei eine Zusammenfassung der Paarvergleiche dar.

Die Paarvergleichsmatrizen sind quadratische Matrizen und besitzen eine Anzahl an Elementen, die dem Quadrat der verglichenen Kriterien entspricht. Eine schematische Darstellung einer Paarvergleichsmatrix ist in Matrix $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ersichtlich.

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & 1 & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

In einer Paarvergleichsmatrix stellt das Element a_{ij} den Vergleich des i-ten Kriteriums mit dem j-ten Kriteriums dar. Dabei entsteht eine Hauptdiagonale, bei der jeder Eintrag den Wert 1 hat. Da hier jeweils ein Kriterium mit sich selbst verglichen wird. Die oben beschriebene Wertezuweisung führt zudem dazu, dass sich eine reziproke Matrix reziprok ergibt. Das bedeutet, dass Einträge mit vertauschten Indizes jeweils den Kehrwert voneinander haben ($a_{ij} = 1/a_{ji}$). (Saaty, 1980)

2.2.2 Erneuerungsindex - ERIX²

Manuel Wiedenhofer (2019) hat in seiner Masterarbeit ein Grundlagenwerk erstellt, mit dem mittels MCDA und AHP eine Erneuerungspriorisierung für Trinkwassernetze geplant werden kann.

Für die Erstellung wird eine AHP-Struktur angewendet, wie in Abbildung 2-9 ersichtlich.

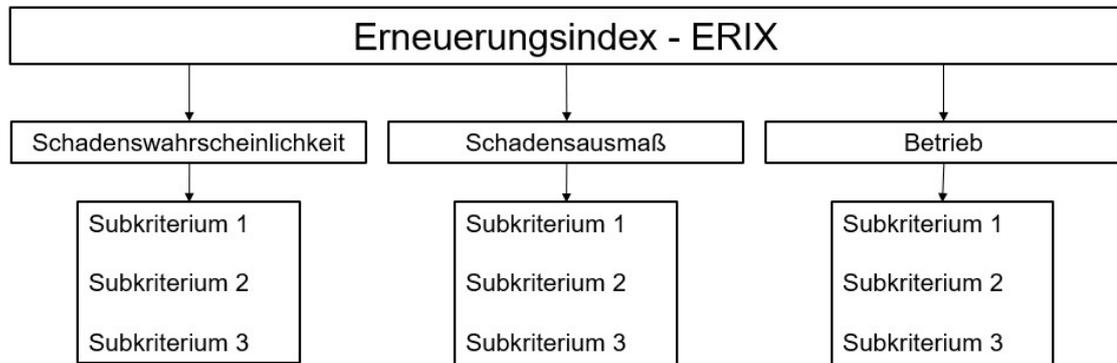


Abbildung 2-9: Hierarchiestruktur des ERIX

Für die, nach dieser Hierarchie, erstellten Paarvergleichsmatrizen wurden von Manuel Wiedenhofer nach verschiedenen Prinzipien ausgewertet und die Ergebnisse verglichen. Dabei wurden für die zukünftige Verwendung die Methoden Averaging over Normalized Columns (ANC) und Geometric Mean (GMM) empfohlen, da diese leicht anwendbar sind und sehr ähnliche und gute Ergebnisse liefern.

2.2.2.1 ANC

In der gegenständlichen Arbeit wurde auf Grund der leichten Anwendung auf die ANC Methode zurückgegriffen. Dabei geschieht die Auswertung der Paarvergleichsmatrizen wie folgt:

Schritt 1: Bilden der Spaltensummen

$$s_i = \sum_{i=1}^n a_{ij}$$

Gleichung 2-10

mit:

s_i ... Spaltensumme der Spalte j , a_{ij} ... Element der Paarvergleichsmatrix, n ... Anzahl der Spalten/Zeilen der Paarvergleichsmatrix

² Die Inhalte dieses Kapitels wurden Großteils aus der Masterarbeit von Manuel Wiedenhofer (2019) zusammengefasst.

Schritt 2: Normierung der Spaltenwerte

$$a_{ij,n} = \frac{a_{ij}}{s_i}$$

Gleichung 2-11

mit:

$a_{ij,n}$... Normiertes Element der Paarvergleichsmatrix, s_i ... Spaltensumme der Spalte j , a_{ij} ... Element der Paarvergleichsmatrix, n ... Anzahl der Spalten/Zeilen der Paarvergleichsmatrix

Schritt 3: Bildung der Zeilenmittelwerte:

$$g_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij,n}}{n}$$

Gleichung 2-12

mit:

g_i ... Mittelwert Zeile i über die normierten Elemente, $a_{ij,n}$... Normiertes Element der Paarvergleichsmatrix, s_i ... Spaltensumme der Spalte j , n ... Anzahl der Spalten/Zeilen der Paarvergleichsmatrix

2.2.2.2 Kriterien ERIX³

Einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben die gewählten Kriterien und Subkriterien. Die in Abbildung 2-10 ersichtlichen Kriterien und Subkriterien sind jene, die in einer für einen Wasserversorgungsverband durchgeführten Studie verwendet wurden.

³ Die Inhalte dieses Kapitels wurden Großteils aus der Masterarbeit von Manuel Wiedenhofer (2019) zusammengefasst.

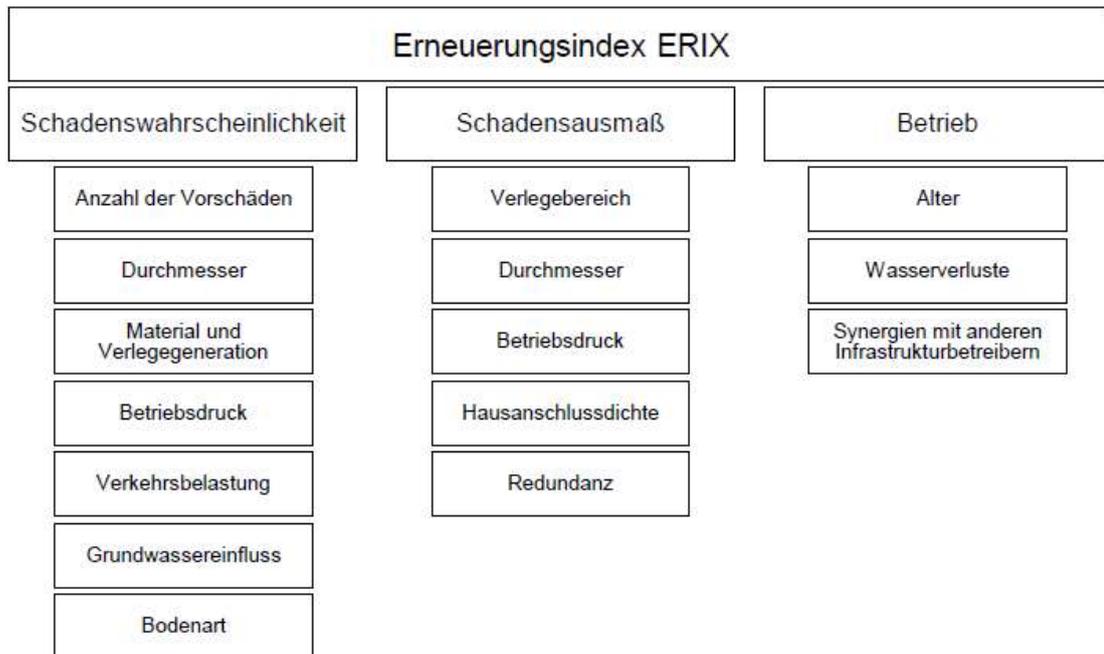


Abbildung 2-10: Hierarchieprinzip mit vorgeschlagenen Kriterien und Subkriterien (Wiedenhofer, 2019)

Bei den Kriterien wird zwischen der Schadenswahrscheinlichkeit, dem Schadensausmaß und dem Betrieb unterschieden. Die dazugehörenden Subkriterien stellen dabei Einflussgrößen auf die Kriterien dar.

Für die Schadenswahrscheinlichkeit wurden die folgenden Subkriterien gewählt:

- Anzahl an Vorschäden:
Die Menge der Vorschäden lässt Rückschlüsse auf den Leitungszustand zu.
- Durchmesser:
Kleinere Durchmesser sind aufgrund eines geringeren Trägheitsmoments und kleinere Wandstärken anfälliger auf Schäden.
- Material und Verlegegeneration:
Gewisse Materialien beziehungsweise auch eine andere Verlegegeneration desselben Materials sind unterschiedlich anfällig für Schäden.
- Betriebsdruck:
Ein höherer Betriebsdruck führt zu höheren Belastungen des Rohres und in Folge dessen können dadurch Schäden mitverursacht werden.
- Verkehrsbelastung:
Eine erhöhte Verkehrsbelastung führt zu größeren dynamischen Lasten, welche Schäden verursachen können.
- Grundwassereinfluss:
Insbesondere bei metallischen Leitungen kann ein erhöhter Grundwasserspiegel zu Korrosion führen. Auch wechselhafte Grundwasserverhältnisse

und dadurch verursachtes Quellen und Schwinden des Bodens führt zu erhöhten Kräften, die auf die Leitungen einwirken.

- Bodenart:
Einige Bodenarten haben einen korrosiven Einfluss auf metallische Leitungen. Dies führt zu Korrosionsschäden.

Für das Schadensausmaß als Subkriterien gewählt wurden:

- Verlegebereich:
Der Verlegebereich ist maßgeblich für das Ausmaß des Schadens im Falle eines Rohrbruches.
- Durchmesser:
Ein größerer Durchmesser führt zu größeren Schäden im Falle eines Rohrbruches.
- Betriebsdruck:
Ein Größerer Betriebsdruck führt zu größeren Schäden im Falle eines Rohrbruches.
- Hausanschlussdichte:
Eine größere Hausanschlussdichte führt zu mehr Häusern, die von einem Ausfall der Wasserversorgung betroffen wären.
- Redundanz:
bewertet die Ausfallssicherheit der Leitung.

Für den Betrieb wurden die folgenden Subkriterien gewählt:

- Alter:
Rohrleitungen können auch bei keiner erhöhten Schadenswahrscheinlichkeit nach einem gewissen Alter vorsorglich ausgetauscht werden.
- Wasserverluste:
Dies bewertet Rohrleitungen in einem Gebiet mit hohen Wasserverlusten als erneuerungsbedürftiger.
- Synergien mit anderen Infrastrukturen:
Dies bewertet, ob in Gebieten bereits geplante Projekte anderer Infrastrukturbetreiber (z.B.: Straßenarbeiten, Kabelverlegungen, etc.) bestehen und ob diese zu einer günstigeren Abwicklung zukünftiger Arbeiten führen können.

Die Subkriterien sollten dabei für die jeweiligen Gegebenheiten des gegenständlichen Wasserversorgungsnetzes angepasst werden. Um ein Ideales Ergebnis erzielen zu können.

3 Methodik

In diesem Abschnitt wird auf die Methodik der Arbeit eingegangen. Dabei wird zunächst der Ablauf der Schadensmodellierung erläutert und im darauffolgenden Teil auf die Methodik bezüglich des Schadensprognosemodells eingegangen. Auch die Implementierung in R wird dabei erklärt. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Methodik bezüglich der ERIX-Ermittlung sowie wiederum der Implementierung dieser in R.

3.1 Schadensprognosemodell

In Abbildung 3-1 ist der Theoretische Ablauf der Modellierung der Schäden ersichtlich. Gemäß diesem Ablauf wird in diesem Teil zunächst auf die Datenaufbereitung eingegangen. Danach wird der generelle Modellaufbau erklärt und die verschiedenen Modellvarianten erläutert. Zum Schluss wird noch der Vergleich der Modelle beschrieben.

3.1.1 Ablauf

Die Modellerstellung folgt dem Ablauf, der in Abbildung 3-1 zu sehen ist. Dabei werden zunächst die Eingangsdaten importiert und strukturiert. Nach der Datenstrukturierung findet die Datenerkundung mittel Kaplan-Meier-Plots statt. Dabei werden Daten kategorisiert und entschieden welche Einflussgrößen im Modell weiter untersucht werden.

Im nächsten Schritt wird entschieden wie viele Jahre für die Kalibrierung und die Validierung verwendet werden. Daraufhin wird das erste Jahr der Validierung festgelegt.

Nun wird der Gesamtdatensatz für das aktuelle Jahr in Validierungs- und Kalibrierungsdatensatz aufgeteilt. Mit dem Kalibrierungsdatensatz wird das Modell kalibriert. Dabei werden alle jene Einflussgrößen festgelegt, die im Modell wirklich verwendet werden und nochmals Kategorisierungen vorgenommen, falls nötig.

Das so entstandene Modell wird nun mit allen Validierungsjahren validiert, um die Qualität des Modells festzustellen.

Nun werden verschiedene Modellvarianten verglichen und die beste ausgewählt.

Mit Hilfe dieser gewählten Variante werden nun Prognosen für die Zeit nach dem Beobachtungszeitraum getätigt und mit den Verantwortlichen des Wasserwerks und beteiligten Ingenieuren evaluiert.

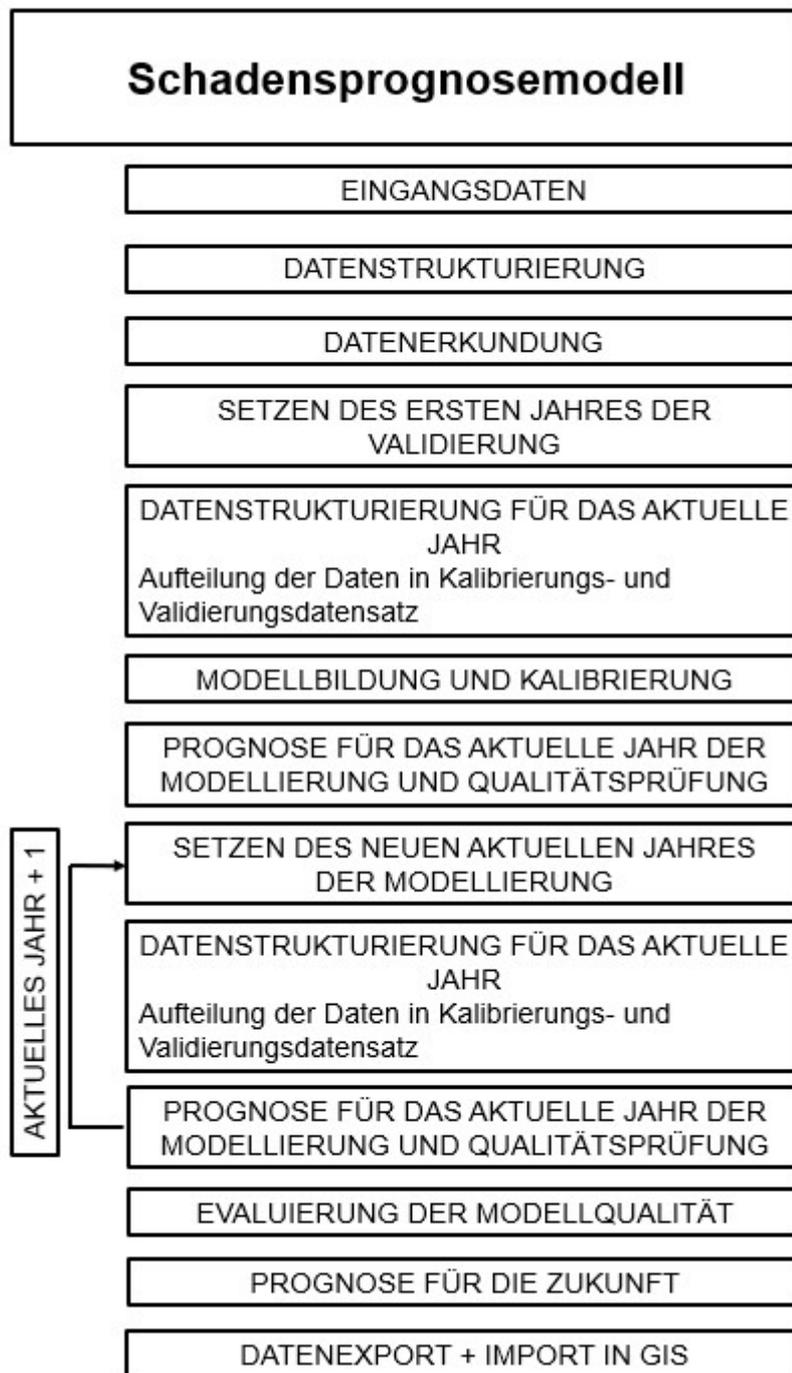


Abbildung 3-1: Theoretischer Ablauf der Modellierung der Schadensprognose

3.1.2 Datenstrukturierung

Zur Homogenisierung der Leitungsabschnitte werden lange Leitungen so lange zerteilt bis die maximale Elementlänge 200m ist. Diesen Elementen werden dann die entsprechenden Rohrbruchdaten zugewiesen.

Leitungen die kürzer als drei Meter sind werden für die Modellierung nicht berücksichtigt. Ebenso werden Transportleitungen nicht berücksichtigt, da diese andere Schadensbilder zeigen.

Allerdings wurden Hausanschlussleitungen mitberücksichtigt, da Hausanschlüsse für etwa 50% der Rohrschäden in Lustenau verantwortlich sind, wie in Kapitel 4.2.2 gezeigt wird.

3.1.3 Modellaufbau

Die Daten werden so strukturiert, dass jeweils ein Element pro aufgezeichneten Schaden vorhanden ist. Die Liegedauer einer Leitung wird dabei so unterteilt, dass im Datensatz ein Element jeweils die Zeit von Leitungseinbau bis zum Rohrbruch darstellt. Somit beschreibt ein Element immer die Zeit bis zum nächsten Schaden. Sobald ein neues Ereignis eintritt, wird ein neues Element mit einer neuen Liegedauer erstellt. Somit ergeben sich mehrere Elemente für ein und dieselbe Leitung, wie in Abbildung 3-2 ersichtlich ist. Leitungen, die erneuert wurden, werden nur bis zu ihrem letzten Schaden berücksichtigt. Die Zeit vom letzten Schaden bis zur Erneuerung wird nicht mehr berücksichtigt.

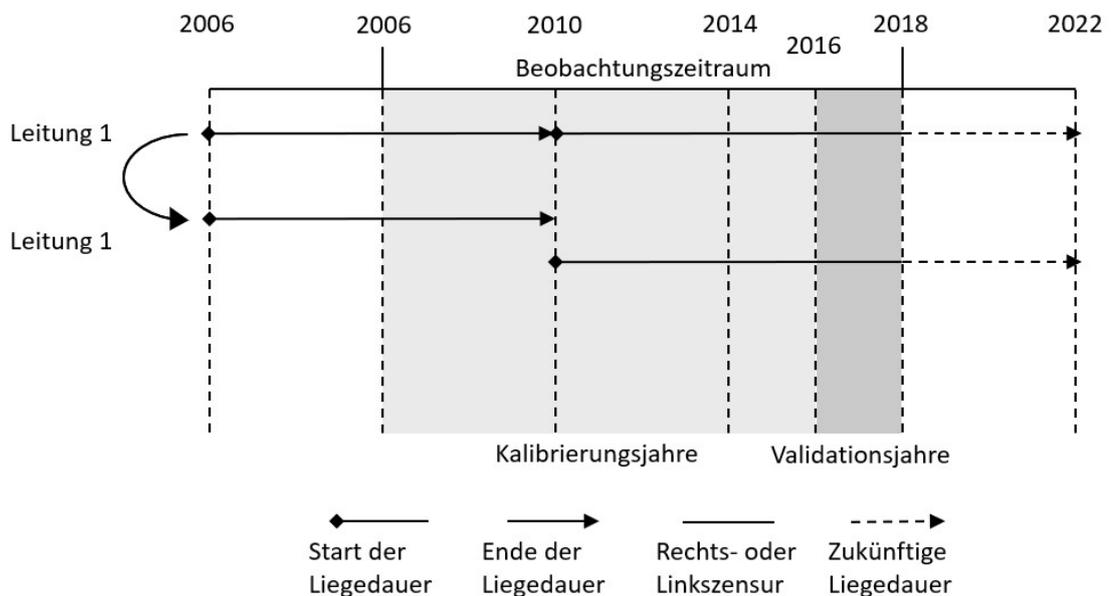


Abbildung 3-2: Schema der zeitlichen Datenstruktur

Die Zensur der Daten wird mit der Eigenschaft Status zugewiesen. So werden Elemente deren Liegedauer einen Abschluss durch einen Rohrbruch haben mit einem Status = 1 markiert. Elemente, die der Rechtszensur unterliegen erhalten den Status = 0, da hier die Liegedauer noch nicht beendet ist.

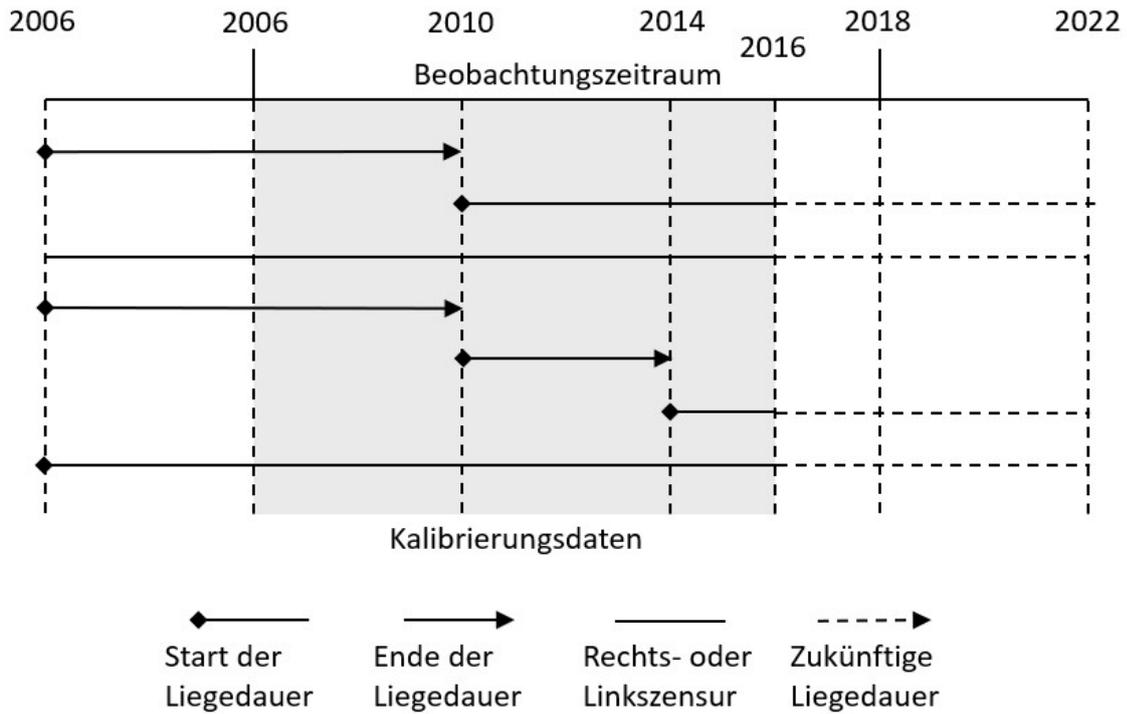


Abbildung 3-3: Datenstruktur der Kalibrierungsdaten

In Abbildung 3-3 ist die Struktur der Kalibrierungsdaten dargestellt. Dabei werden alle Elemente verwendet, bei denen bis exklusive des ersten Validierungsjahres noch kein Schaden aufgetreten ist oder deren Liegedauer bis zum ersten Validierungsjahr bereits abgeschlossen ist.

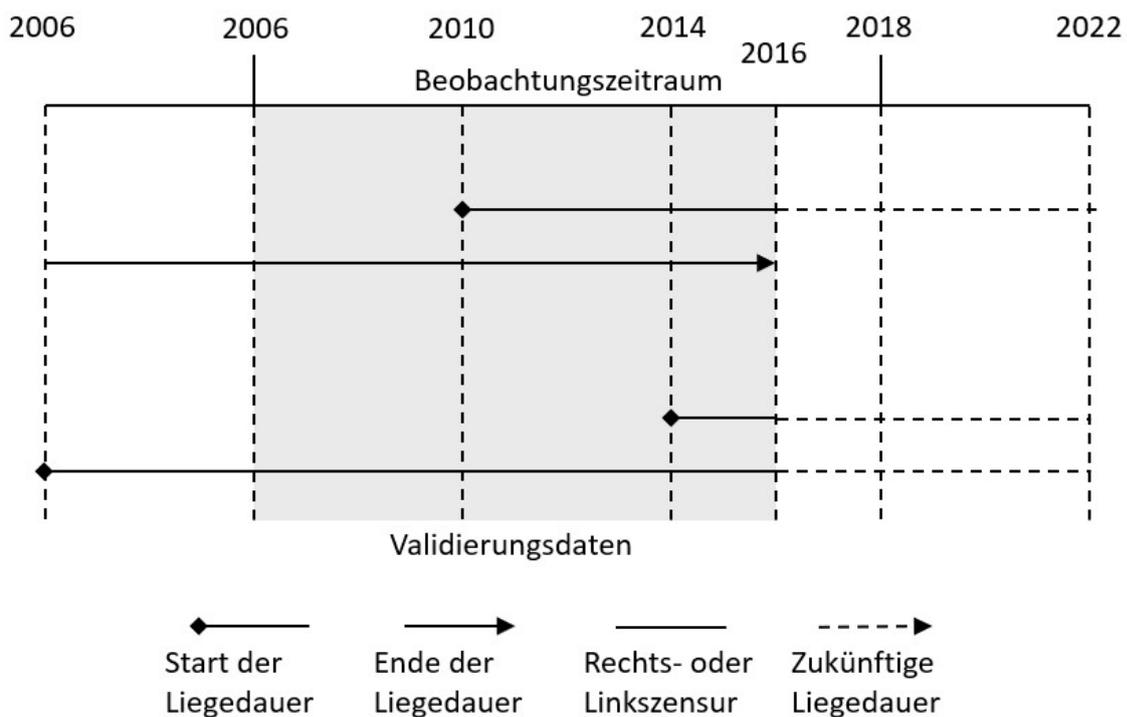


Abbildung 3-4: Datenstruktur der Validierungsdaten

Für die Validierungsdaten, deren Datenstruktur in Abbildung 3-4 ersichtlich ist, werden alle Elemente verwendet, bei denen bis zum betrachteten Validierungsjahr noch kein Schaden aufgetreten ist oder dieser im betrachteten Validierungsjahr auftritt.

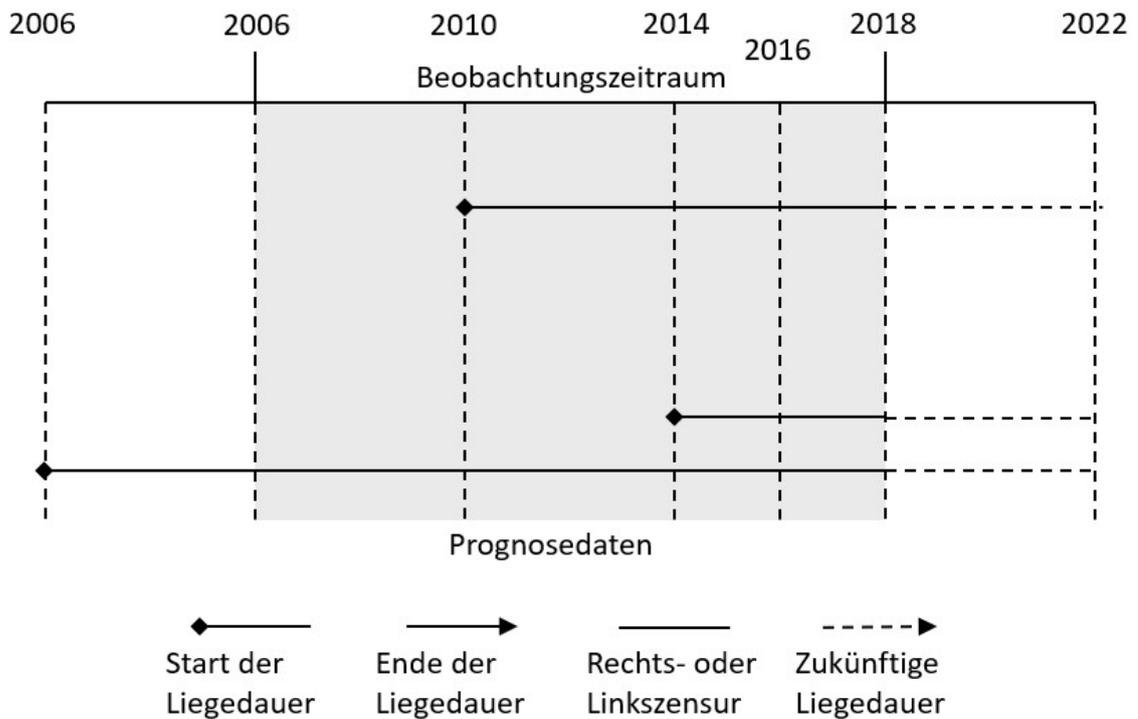


Abbildung 3-5: Datenstruktur der Prognosedaten

In Abbildung 3-5 ist die Datenstruktur der Prognosedaten ersichtlich. Dabei werden alle Elemente verwendet, die bis einschließlich dem letzten Jahr des Beobachtungszeitraumes noch keinen Schaden erfahren haben. Dieser Datensatz wird für die Prognose für die Zukunft verwendet.

3.1.4 Einflussgrößen

Auf Grund der Verfügbarkeit der Daten oder ihrer Beschaffbarkeit wurden die folgenden Einflussgrößen für die Schadensmodellierung untersucht:

- **Leitungsalter:**
Das Alter der Leitungen wird für das aktuelle Jahr der Modellierung jeweils neu berechnet. Das Alter wird als metrische Einflussgröße in Jahren berücksichtigt.
- **Leitungslänge:**
Aufgrund der trotz der Homogenisierung immer noch sehr heterogenen Längenstruktur der Daten wird die Leitungslänge auch als Parameter mit untersucht. Die Leitungslänge wird als metrische Einflussgröße in Metern berücksichtigt.

- Durchmesser:
Der Durchmesser der Leitungen wird in Kategorien eingeteilt und untersucht. Dabei werden zwei Kategorien unterschieden:
 - $DN < 100$
 - $DN \geq 100$
- Material und Verlegegeneration:
Materialien und auch verschiedene Verlegegenerationen werden für die Modellierung unterschieden. Dabei werden die folgenden Kategorien unterschieden:
 - GGG
 - GG
 - ST (Stahlleitungen die vor 1995 verlegt wurden)
 - ST 1995 (Stahlleitungen die nach 1995 verlegt wurden)
 - Kunststoff (Umfasst alle Kunststoffarten)

Eine kurze Asbestzementleitung, die in geplanten Projekten ohnehin abgebaut wird, wird nicht berücksichtigt.
- Schwerverkehr:
Leitungen in Straßenzügen mit Schwerverkehrsaufkommen werden von den anderen unterschieden. Hierfür werden zwei Kategorien unterschieden:
 - Schwerverkehr vorhanden (=TRUE)
 - Kein Schwerverkehr vorhanden (=FALSE)
- Aggressivität des Bodens:
Bodenverhältnisse werden auf Grund ihrer Reaktivität mit den Leitungsmaterialien untersucht. Dabei wird zwischen zwei Kategorien unterschieden:
 - Aggressiv (=TRUE)
 - Nicht Aggressiv (=FALSE)
- Anzahl an Vorschäden:
Die Zeit zwischen zwei Schäden wird mit Zunahme der Schadensanzahl immer kürzer. Dabei wird aufgrund von zu kleinen Probengrößen für größere Schadensanzahlen in nur zwei Kategorien unterschieden:
 - Erstschäden
 - Folgeschäden

Auch Kombinationen zwischen mehreren Einflussgrößen werden untersucht.

3.1.5 Modellvarianten

Es werden unterschiedliche Modellvarianten untersucht. In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Modellvarianten erläutert, und ihre Implementierung in R beschrieben. (R-Core-Team, 2020)

3.1.5.1 Parametrische und semiparametrische Modelle

Bei den parametrischen Modellen werden das Weibull-Modell, das Exponential-Modell sowie das logistische Modell untersucht. Diese Modelle wurden mit Hilfe des „survival“ Packages (Therneau, et al., 2020) modelliert. Hierfür wurde die „survreg“-Funktion genutzt.

Das Cox-Modell wurde mit Hilfe des „survival“ Packages (Therneau, et al., 2020) modelliert. Es wurde hierfür die „coxph“-Funktion verwendet.

3.1.5.2 Umgang mit Erst- und Folgeschäden

Es wurden zwei Varianten untersucht. Ein Gesamtmodell und ein getrenntes Erst- und Folgeschadenmodell.

Im Falle des Gesamtmodells wurden sowohl Erst- wie auch Folgeschäden in einem Modell modelliert. Dabei wurde die Schadensanzahl als Einflussgröße berücksichtigt.

In der zweiten Variante wurde jeweils ein eigenes Modell für die Erst und die Folgeschäden erstellt. Das erlaubt eine bessere Anpassung auf die jeweiligen Schadenskategorien.

3.1.6 Kalibrierung

Zur Kalibrierung wurden zunächst alle Einflussgrößen verwendet und die Modellqualität überprüft. Nach und nach wurden dann die weniger relevanten Einflussgrößen gestrichen und wiederum die Modellqualität geprüft. Sobald alle Einflussgrößen hinreichend geprüft waren, wurde das beste Modell gewählt und für die Prognose genutzt.

Als Parameter, die die Modellqualität beurteilen, wurden im Falle des Cox-Modells der AIC, der Likelihood-Ratio-Test, der Wald-Test und Harrel's C-Index verwendet. Für die parametrischen Modelle wurde der AIC und der Chi²-Test genutzt.

Zur Verbesserung der Modellstabilität wurde eine 30-Fache Krossvalidation angewendet und dabei die Veränderung der Modellkoeffizienten sowie der Güteparameter ermittelt.

3.1.7 Vergleich der Modelle

Zum Vergleich der verschiedenen Modelle wurde auf ROC-Kurven sowie die dazugehörigen AUC-Werten zurückgegriffen. Zudem wurde jeweils der Ideal-Cutoff anhand des ersten Validierungsjahres errechnet und das Verhältnis zwischen richtigen und falschen Vorhersagen als Kennwert der Modellqualität gewertet, wie es in 2.1.8 erläutert wurde.

3.1.8 Prognose

Für die Prognose wurde die Überlebenskurve genutzt. Im ersten Validierungsjahr wurde der Ideal Cutoff errechnet und in der Folge als Schadensgrenze genutzt.

In Abbildung 3-6 sind die Unterschiede der Prognose der in R implementierten Funktionen des Survival-Packages (Therneau, et al., 2020) dargestellt.

Für das Cox-Modell wird direkt eine Überlebenswahrscheinlichkeit prognostiziert. Ist dieser Wert kleiner als der Ideal Cutoff so wird der Leitung ein Schaden zugewiesen.

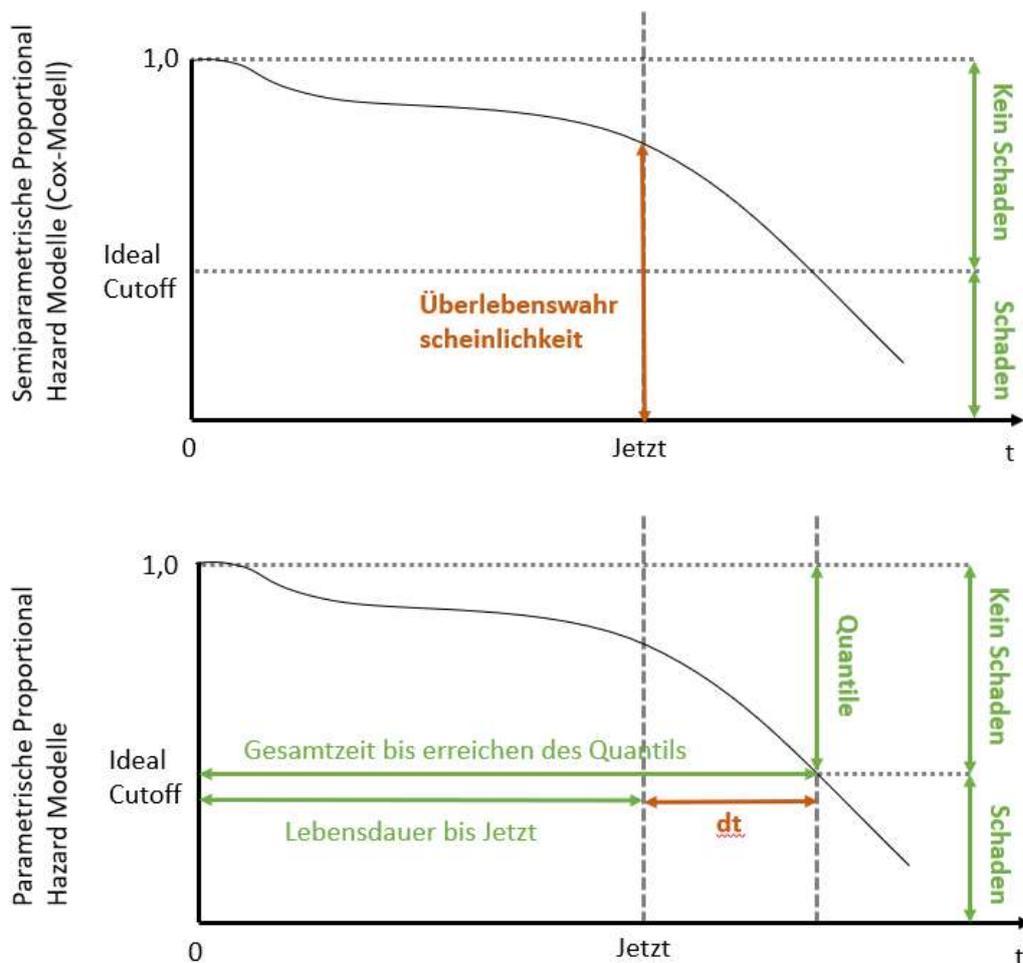


Abbildung 3-6: Unterschied der Prognose von Semiparametrischen und Parametrischen Modellen

Für parametrische proportional-Hazard-Modelle wird jeweils die Zeit bis zum Erreichen eines gewählten Quantils ausgegeben. Dabei wird die Zeit vom Anfang der Liegedauer gemessen. Als Quantil wird hier die Sterbewahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt, an dem die Überlebenswahrscheinlichkeit den Ideal Cutoff erreicht, genutzt. Von der Gesamtzeit bis zum Erreichen des Quantils wird dann die Liegedauer der Leitung abgezogen. Der dadurch errechnete Wert stellt die

Zeit von jetzt bis zum Erreichen des Quantils dar. Ist dieser Wert gleich Null oder kleiner als Null, wird der gegenständlichen Leitung ein Schaden zugewiesen.

3.2 ERIX

In diesem Abschnitt wird zunächst auf den generellen Ablauf der ERIX-Ermittlung eingegangen. Danach wird auf die gewählte Datenstruktur eingegangen und die gewählten Kriterien erläutert. Zum Schluss werden die Unterschiede beider Varianten mit und ohne Schadensmodell erklärt und wie die Varianten verglichen werden.

3.2.1 Ablauf

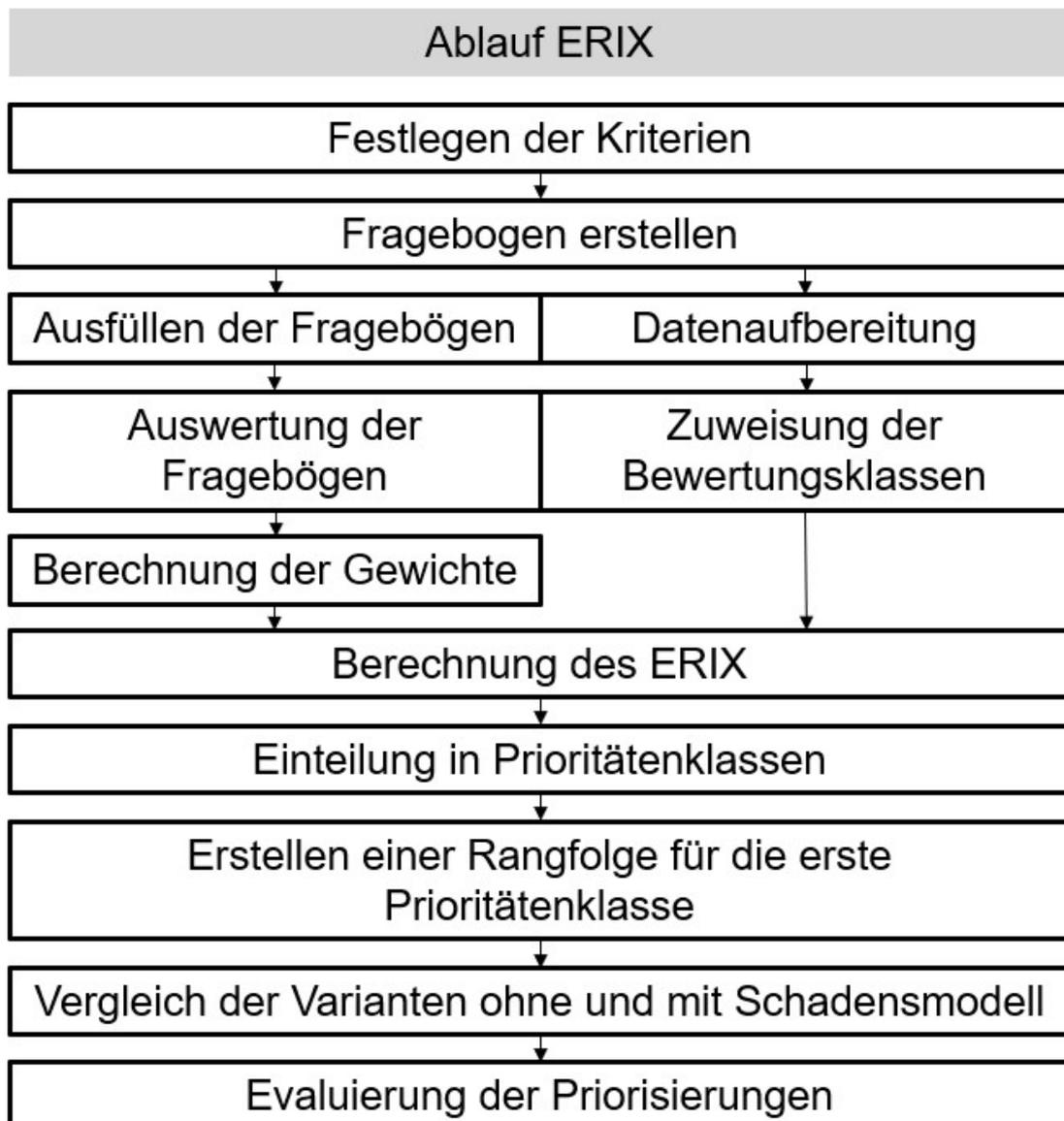


Abbildung 3-7: Ablauf der ERIX – Ermittlung

In Abbildung 3-7 ist der Ablauf der ERIX-Ermittlung dargestellt. Zunächst werden die Kriterien in Absprache mit den Verantwortlichen und beteiligten Ingenieuren

festgelegt. Daraufhin werden die Fragebögen erstellt, an beteiligte Personen verteilt und ausgefüllt. Parallel dazu werden die Daten aufbereitet und Prioritätenklassen festgelegt.

Sobald die Fragebögen ausgefüllt sind, werden daraus Paarvergleichsmatrizen erstellt und die entsprechenden Gewichte errechnet.

Nun wird für alle Elemente der Erneuerungsindex (ERIX) errechnet und in der Folge jeweils eine Erneuerungskategorie zugewiesen. Für die Klasse mit der höchsten Priorität wird danach ein Ranking erstellt, um eine Erneuerungsreihenfolge festlegen zu können.

Zum Schluss werden die Ergebnisse mit den Verantwortlichen evaluiert.

3.2.2 Datenaufbereitung

Die Leitungserneuerung wird in Lustenau Straßenzugsweise angegangen. Aus diesem Grund wurden die Leitungen in 180 Erneuerungsbereiche eingeteilt. Dabei schließt ein Bereich jeweils eine gesamte Straße mit sich darin befindenden Leitungen ein.

Tabelle 3-1: Beispiелеlement der Erneuerungsbereiche

Straßenname	Länge Hauptlei- tungen [m]	Anteil ST [%]	Anteil ST 1995 [%]	Anteil GG [%]	Anteil GGG [%]	Anteil Kunststoff [%]
Bahnhofstraße	953,5	0,00	8,19	75,38	16,28	0,15

Wie in Tabelle 3-1 ersichtlich ist, werden Eigenschaften wie Material oder Durchmesser in Prozentwerten durch ihren Anteil an der Leitungslänge im Bereich repräsentiert.

3.2.3 Kriterien / Prioritätenklassen

Für Jedes Kriterium wird eine Bewertung der jeweiligen Eigenschaft in Form von Prioritätenklassen zugewiesen. Dabei werden Punkte, wie in Tabelle 3-2 beschrieben wird, zugewiesen.

Tabelle 3-2: Bewertungsklassen der Leitungseigenschaften (Wiedenhofer, 2019)

Klasse	Punkte P
Kein Einfluss	0
Geringer Einfluss	0,25
Mäßiger Einfluss	0,50
Deutlicher Einfluss	0,75
Hoher Einfluss	1

In den folgenden Kapiteln werden die verwendeten Bewertungsklassen beschrieben.

In Abbildung 3-8 ist die Hierarchiestruktur des ERIX ersichtlich. Im folgenden Abschnitt wird diese näher erläutert und auf die verschiedenen Kriterien eingegangen.

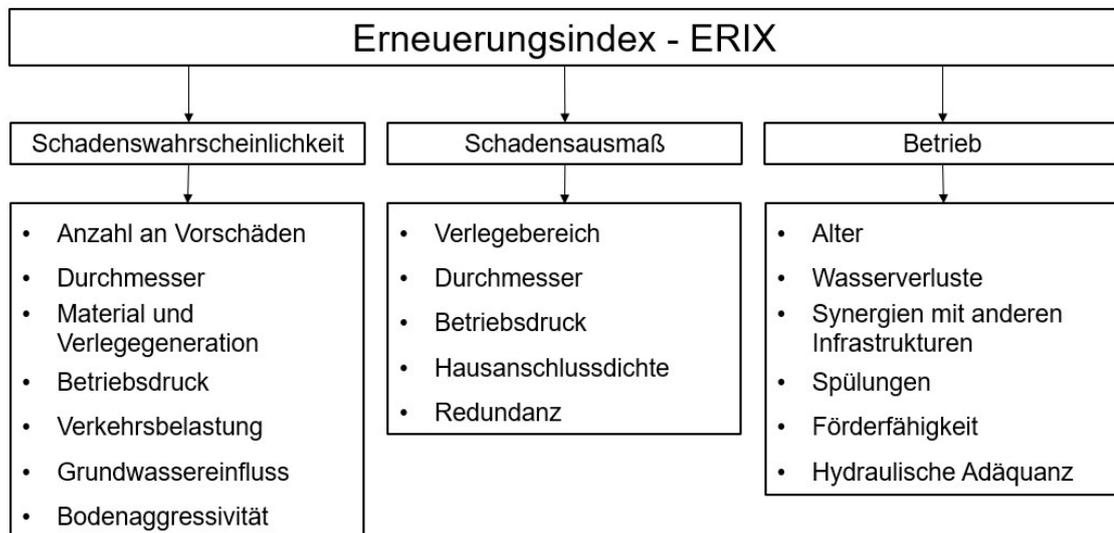


Abbildung 3-8: Hierarchiestruktur des ERIX

3.2.3.1 Schadenswahrscheinlichkeit

In dieser Kategorie werden all jene Eigenschaften vereint, die eine Auswirkung auf die Schadenswahrscheinlichkeit beziehungsweise auf den Zustand der Leitung haben.

3.2.3.1.1 Anzahl an Vorschäden

Die Anzahl an Schäden in einem Gebiet lässt auf den Zustand der darin befindlichen Leitungen zu. Mit steigender Anzahl an Schäden, verschlechtert sich der Leitungszustand. Dabei werden neben den aufgezeichneten Schäden, auch eine Zusammenfassung von Schäden berücksichtigt, die dem Wassermeister aus der Zeit vor dem Beobachtungszeitraum im Gedächtnis geblieben sind. Die Art der Punktebewertung wird in Tabelle 3-3 erläutert.

Tabelle 3-3: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Anzahl an Vorschäden

Punkte P	Klasse	Anzahl an Vorschäden
0	Kein Einfluss	0
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	0-10
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	<10

3.2.3.1.2 Durchmesser

Leitungen mit größeren Durchmessern, sind aufgrund ihrer dickeren Wandstärke auf Scherkräfte unempfindlicher. Die Punktebewertung ist wiederum in Tabelle 3-4 ersichtlich.

Tabelle 3-4: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Durchmesser

Punkte P	Klasse	Durchmesser
0	Kein Einfluss	>250
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	100-250
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	<100

3.2.3.1.3 Material und Verlegegeneration

Für die Beurteilung der Eigenschaft des Materials werden die Erkenntnisse aus der Schadensmodellierung einbezogen. Somit ergibt sich eine Reihung wie in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Material und Verlegegeneration

Punkte P	Klasse	Material und Verlegegeneration
0	Kein Einfluss	GG
0,25	Geringer Einfluss	GGG
0,50	Mäßiger Einfluss	ST
0,75	Deutlicher Einfluss	ST1995
1	Hoher Einfluss	Kunststoff

3.2.3.1.4 Betriebsdruck

Ein höherer Betriebsdruck sorgt für erhöhte Belastungen der Leitungen. Somit sind Leitungen mit hohem Betriebsdruck anfälliger für Schäden. In Lustenau herrscht aufgrund der Topografie ein sehr konstanter Betriebsdruck. Somit wird dieses Kriterium nicht mit in die Beurteilung einbezogen. Wiedenhofer (2019) bewertet diese Kategorie wie in Tabelle 3-6 ersichtlich.

Tabelle 3-6: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Betriebsdruck

Punkte P	Klasse	Betriebsdruck [m]
0	Kein Einfluss	<20
0,25	Geringer Einfluss	$20 \leq x < 40$
0,50	Mäßiger Einfluss	$40 \leq x < 60$
0,75	Deutlicher Einfluss	$60 \leq x < 80$
1	Hoher Einfluss	≥ 80

3.2.3.1.5 Verkehrsbelastung/Schwerverkehr

Eine höhere Verkehrsbelastung sorgt für erhöhte dynamische Belastungen und somit zu einer erhöhten Schadenswahrscheinlichkeit. Vor allem Schwerverkehr sorgt für große Belastungen. Somit werden alle Gebiete in denen Schwerverkehr vorkommt und alle in denen kein Schwerverkehr vorkommt wie in Tabelle 3-7 bewertet.

Tabelle 3-7: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Verkehrsbelastung (Wiedenhofer, 2019)

Punkte P	Klasse	Verkehrsbelastung/Schwerverkehr
0	Kein Einfluss	Nicht vorhanden
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	vorhanden

3.2.3.1.6 Grundwassereinfluss

Liegt eine Leitung im Grundwasser oder im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels, so ist sie durch vom Grundwasser ausgelöstes Steigen und Sinken des Bodens erhöhten Einwirkungen ausgesetzt. Zudem wird die Aggressivität eines Bodens durch präsenten Grundwasser erhöht was ebenfalls zu erhöhten chemischen Einwirkungen führt. Zur Bewertung wurde eine einfache Einteilung gewählt wie in Tabelle 3-8 ersichtlich.

Tabelle 3-8: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Grundwassereinfluss

Punkte P	Klasse	Grundwassereinfluss (Grundwasserstand)
0	Kein Einfluss	Niedrig
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	Hoch

3.2.3.1.7 Bodenaggressivität

Aggressive Bodenverhältnisse führen bei metallischen Leitungen vermehrt zu Korrosion und in der Folge zu Korrosionslöchern. In Tabelle 3-9 ist die Punktebewertung ersichtlich.

Tabelle 3-9: Bewertungsklasse der Schadenswahrscheinlichkeit: Bodenaggressivität

Punkte P	Klasse	Bodenaggressivität
0	Kein Einfluss	Nicht aggressiv
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	Aggressiv

3.2.3.2 Schadensausmaß

In dieser Kategorie werden Eigenschaften behandelt, die im Schadensfall und auch im Fall der Leitungserneuerung auf das Ausmaß der entstehenden Schäden Einfluss haben.

3.2.3.2.1 Verlegebereich

Je nach Verlegebereich wird der Verkehr im Falle einer Leitungserneuerung mehr oder weniger gestört und bringt somit einen entsprechenden Aufwand mit sich. Aufgrund der Grenzübergänge in die Schweiz und den daraus verhältnismäßig sehr starken Verkehrsaufkommen auf den Hauptverkehrsadern, werden Leitungen in Hauptstraßen eher später ausgetauscht. Daher ergibt sich eine Punktbewertung wie sie in Tabelle 3-10 zu sehen ist. Diese Bewertung wird in Rücksprache mit dem Wasserwerk festgelegt. Somit wird diese anders betrachtet als von Wiedenhofer (2019) vorgeschlagen wird.

Tabelle 3-10: Bewertungsklasse des Schadensausmaßes: Verlegebereich

Punkte P	Klasse	Verlegebereich
0	Kein Einfluss	Hauptstraßen
0,25	Geringer Einfluss	Zentrum
0,50	Mäßiger Einfluss	Wichtige Erschließungsstraßen Industriestraßen
0,75	Deutlicher Einfluss	Erschließungsstraßen
1	Hoher Einfluss	Anrainerstraßen

3.2.3.2.2 Durchmesser

Ein größerer Durchmesser der Leitung führt zu einem erhöhten Durchfluss und somit zu einem größeren Wasserverlust im Falle eines Leitungsschadens. Die Punktbewertung hierfür ist in Tabelle 3-11 ersichtlich.

Tabelle 3-11: Bewertungsklasse des Schadensausmaßes: Durchmesser

Punkte P	Klasse	Durchmesser
0	Kein Einfluss	<100
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	100-250
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	250

3.2.3.2.3 Betriebsdruck

Ein erhöhter Betriebsdruck führt zu einem erhöhten Wasserverlust im Falle eines Leitungsschadens. Wie bereits in Kapitel 3.2.3.1.4 erläutert, herrscht im Wasserversorgungsnetz Lustenaus ein sehr konstanter Druck. Somit wird dieses Kriterium in der Fallstudie nicht berücksichtigt. Eine mögliche Punktebewertung hierfür ist in Tabelle 3-12 dargestellt.

Tabelle 3-12: Bewertungskriterium des Schadensausmaßes: Betriebsdruck (Wiedenhofer, 2019)

Punkte P	Klasse	Betriebsdruck
0	Kein Einfluss	<20
0,25	Geringer Einfluss	$20 \leq x < 40$
0,50	Mäßiger Einfluss	$40 \leq x < 60$
0,75	Deutlicher Einfluss	$60 \leq x < 80$
1	Hoher Einfluss	≥ 80

3.2.3.2.4 Hausanschlussdichte

Eine höhere Hausanschlussdichte führt dazu, dass mehr Haushalte im Falle eines Schadens betroffen wären. Die Punktebewertung hierfür ist in Tabelle 3-13 ersichtlich.

Tabelle 3-13: Bewertungskriterium des Schadensausmaßes: Hausanschlussdichte

Punkte P	Klasse	Hausanschlussdichte
0	Kein Einfluss	≥ 36
0,25	Geringer Einfluss	$72 \leq x > 36$
0,50	Mäßiger Einfluss	$108 \leq x > 72$
0,75	Deutlicher Einfluss	$144 \leq x > 108$
1	Hoher Einfluss	> 144

3.2.3.2.5 Redundanz

Im Falle einer Leitungserneuerung können bei Stichleitungen die Versorgung, der an die Leitung angeschlossenen Haushalte, nicht einfach von der anderen Seite durch einen Ringschluss versorgt werden. Somit werden redundante Leitungen, also Ringleitungen aufgrund des geringeren Aufwands eher erneuert als nicht redundante Stichleitungen. Die daraus resultierende Punktebewertung ist in Tabelle 3-14 ersichtlich.

Tabelle 3-14: Bewertungskriterium des Schadensausmaßes: Redundanz

Punkte P	Klasse	Redundanz
0	Kein Einfluss	Redundant
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	Nicht redundant

3.2.3.3 Betrieb

In dieser Kategorie werden betriebliche Subkategorien behandelt.

3.2.3.3.1 Alter

Sollten die Leitungen ein gewisses Alter überschritten haben, können diese vorsorglich ausgetauscht werden. Die Punktebewertung hierfür ist in Tabelle 3-15 ersichtlich.

Tabelle 3-15: Bewertungskriterium des Betriebs: Alter

Punkte P	Klasse	Alter
0	Kein Einfluss	<50
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	≥50

3.2.3.3.2 Wasserverluste

Wenn bekannt ist, dass ein Gebiet mehr Wasserverluste aufweist als andere, können Leitungen in diesen Gebieten priorisiert werden. Eine Punktebewertung hierfür ist in Tabelle 3-16 ersichtlich. In Lustenau gibt es keine gebietsweise Aufzeichnung der Wasserverluste. Somit wird dieses Kriterium in der Fallstudie nicht berücksichtigt

Tabelle 3-16: Bewertungskriterium des Betriebs: Wasserverluste (Wiedenhofer, 2019)

Punkte P	Klasse	Wasserverluste ILI
0	Kein Einfluss	<1,0
0,25	Geringer Einfluss	$1,0 \leq x < 1,5$
0,50	Mäßiger Einfluss	$1,5 \leq x < 2,0$
0,75	Deutlicher Einfluss	$2,0 \leq x < 4,0$
1	Hoher Einfluss	$\geq 4,0$

3.2.3.3.3 Synergien mit anderen Infrastrukturen

Wenn eine Leitung gemeinsam mit einer anderen Infrastruktur erneuert werden kann, sinken die potentiellen Kosten für die Erneuerung erheblich. Gleichzeitig wird die andere Infrastruktur im Falle einer späteren Leitungserneuerung nicht durch die Arbeiten an der Leitung beschädigt. Eine Punktbewertung hierfür ist in Tabelle 3-17 ersichtlich. In Lustenau sind keine Erneuerungspläne für andere Infrastrukturen vorhanden die für eine Auswertung genutzt werden kann. Somit wird dieses Kriterium in der Fallstudie nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-17: Bewertungskriterium des Betriebs: Synergien mit anderen Infrastrukturen

Punkte P	Klasse	Synergien
0	Kein Einfluss	Nicht vorhanden
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	vorhanden

3.2.3.3.4 Spülungen

Sollte eine Leitung häufig gespült werden müssen kann diese früher ausgetauscht werden, um Kosten zu sparen. Eine mögliche Punktbewertung ist in Tabelle 3-18 ersichtlich. Da in Lustenau keine solche Leitungen vorhanden sind wird dieses Kriterium in der Fallstudie nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-18: Bewertungskriterium des Betriebs: Spülungen

Punkte P	Klasse	Spülungen
0	Kein Einfluss	Keine Spülungen nötig
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	Spülungen nötig

3.2.3.3.5 Förderfähigkeit

Sollte eine Leitung Erneuerungsbedarf aufweisen, allerdings auf Grund des Alters noch nicht Förderfähig sein, kann die Erneuerung noch etwas hinausgezögert werden. Sind Leitungen förderfähig, so können Kosten für die Erneuerung gespart werden. Eine Punktbewertung hierfür ist in Tabelle 3-19 ersichtlich.

Tabelle 3-19: Bewertungskriterium des Betriebs: Förderfähigkeit

Punkte P	Klasse	Förderfähigkeit
0	Kein Einfluss	35-40
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	<35
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	>40

3.2.3.3.6 Hydraulische Adäquanz

Sollten Leitungen unterdimensioniert sein, kann eine Erneuerung vorgezogen werden, um eine richtige Dimensionierung zu erreichen. Eine mögliche Punktbewertung ist in Tabelle 3-20 ersichtlich. In Lustenau sind keine Solchen Leitungen vorhanden, daher wird dieses Kriterium nicht in der Fallstudie berücksichtigt.

Tabelle 3-20: Bewertungskriterium des Betriebs: Hydraulische Adäquanz

Punkte P	Klasse	Hydraulische Adäquanz vorhanden
0	Kein Einfluss	ja
0,25	Geringer Einfluss	-
0,50	Mäßiger Einfluss	-
0,75	Deutlicher Einfluss	-
1	Hoher Einfluss	nein

3.2.4 ERIX ohne Schadensprognose

Im Falle der ERIX-Bewertung ohne Schadensprognose wird für die Subkategorie Anzahl an Vorschäden so berücksichtigt wie sie in Kapitel 3.2.3.1.1 erläutert wird.

3.2.5 Verknüpfung ERIX und Schadensprognosemodell

Im Falle der ERIX-Bewertung mit Schadensprognose wird für die Subkategorie Anzahl an Vorschäden zusätzlich zu der in Kapitel 3.2.3.1.1 beschriebenen Leitungsschäden noch die Prognostizierten Schäden hinzugezählt.

3.2.6 Berechnung des ERIX

Zunächst werden aus den Fragebögen die Paarvergleichsmatrizen erstellt und ausgewertet, wie in Kapitel 2.2.2.2 erläutert wird. Aufgrund eines Ungleichgewichts an Stakeholdern wurden die Gewichte zunächst für jede Gruppe gemittelt, um daraufhin die Gesamtgewichte zu erhalten.

Aus den ermittelten Gewichten der Kriterien werden zunächst die Globalen gewichte errechnet. Dabei werden die Gewichtungen der Kriterien, mit denen der Subkriterien multipliziert wie in Gleichung 3-1 dargestellt ist.

$$g_g = G_K * g_{sk}$$

Gleichung 3-1

mit:

g_g ... globales Gewicht des Subkriteriums, G_K ... Gewichtung des Kriteriums, g_{sk} ... lokale Gewichtung des Subkriteriums

Die so erhaltenen globalen Gewichte werden daraufhin mit den jeweiligen Punktbewertungen der Bewertungsklassen multipliziert und für jedes Gebiet aufsummiert, wie in Gleichung 3-2 ersichtlich ist. Daraus ergeben sich für die Gebiete die jeweiligen Erneuerungsindizes (ERIX).

$$ERIX = \sum P * g_g$$

Gleichung 3-2

mit:

$ERIX$... Erneuerungsindex (ERIX), P ... Punktbewertung für das jeweilige Subkriterium, g_g ... globales Gewicht des Subkriteriums

Im Fragebogen werden alle Subkriterien abgefragt, auch wenn dazu keine Daten vorhanden sind. Deshalb werden die globalen Gewichte adaptiert, sodass sie für die genutzten Subkriterien wieder eine Summe von 1 ergeben, um danach eine nachvollziehbare Kategorisierung gewährleisten zu können. Die Adaptierung ist in Gleichung 3-3 ersichtlich.

$$g_{g,adaptiert} = \frac{g_g}{\sum g_{g,genutzt}}$$

Gleichung 3-3

mit:

$g_{g,adaptiert}$... adaptierte globale Gewichtung der Subkriterien, $g_{g,genutzt}$... für die Feldstudie genutzte Gewichte der Subkriterien, g_g ... globales Gewicht der Subkriterien

Die verschiedenen Gebiete werden nun in Erneuerungskategorien eingeteilt. Dabei wird in vier Kategorien unterschieden, wie in Tabelle 3-21 ersichtlich ist.

Tabelle 3-21: Einteilung der Gebiete in Erneuerungskategorien nach dem Erneuerungsindex

Kategorie	Bereich des ERIX
Kategorie 1: Leitungserneuerungen sollten durchgeführt werden	$\geq 0,75$
Kategorie 2: Leitungserneuerungen werden in Zukunft angebracht sein	$0,75 < x \leq 0,5$
Kategorie 3: Keine Leitungserneuerungen nötig	$0,5 < x \leq 0,25$
Kategorie 4: Zustand der Leitung ist tadellos	$< 0,25$

3.2.7 Vergleich der Varianten

Die Varianten werden an Hand der Erneuerungskategorisierung und insbesondere an den entstehenden Sprüngen von Gebieten, die sich bei der Kategorisierung ergeben verglichen. Die Qualität der Kategorisierung wird durch die Evaluation mit den Verantwortlichen ermittelt. Dabei werden die vorhandene Erneuerungspriorisierung der Gemeinde, die auf Grund von Erfahrungswerten des langgedienten Wassermeisters erstellt wurde, als Anhaltspunkt verwendet.

4 Fallstudie Marktgemeinde Lustenau

Im Weiteren wird nun die Fallstudie erläutert. Dabei wird auf die Gemeinde, die Datenlage und die in Erneuerungsstrategie Lustenau eingegangen.

4.1 Gemeinde

Die Fallstudie wird für die Marktgemeinde Lustenau durchgeführt. Sie liegt am Rhein direkt an der Schweizer Grenze. Der Untergrund ist vom Rhein geprägt. Im Westen, also der dem Rhein zugewandten Seite ist der Untergrund sandig/kiesig. Im Osten der Gemeinde reicht das Gemeindegebiet in das angrenzende Ried. Dort herrscht Mooruntergrund vor. Im Übergangsbereich befinden sich wechselhafte Gebiete von Lehm, Sand und Kies.

Durch die sich im Gemeindegebiet befindenden Grenzübergänge und die gute Verkehrsanbindung, ist zu Stoßzeiten ein sehr großes Verkehrsaufkommen auf den Hauptverkehrswegen der Gemeinde vorhanden.

4.2 Wasserversorgungsnetz

Das Wasserversorgungsnetz von Lustenau wird vom Wasserwerk Lustenau verwaltet. Das Trinkwasser wird im Westen des Ortes im Rheinvorland gefördert und wird in einen Tiefbehälter geleitet. Von dort aus wird das Netz versorgt. Ein zusätzlicher Wasserbedarf kann über Leitungen des Trinkwasserverbands Rheintal gedeckt werden.

4.2.1 Leitungen

Leitungslänge nach Material für Hauptleitungen

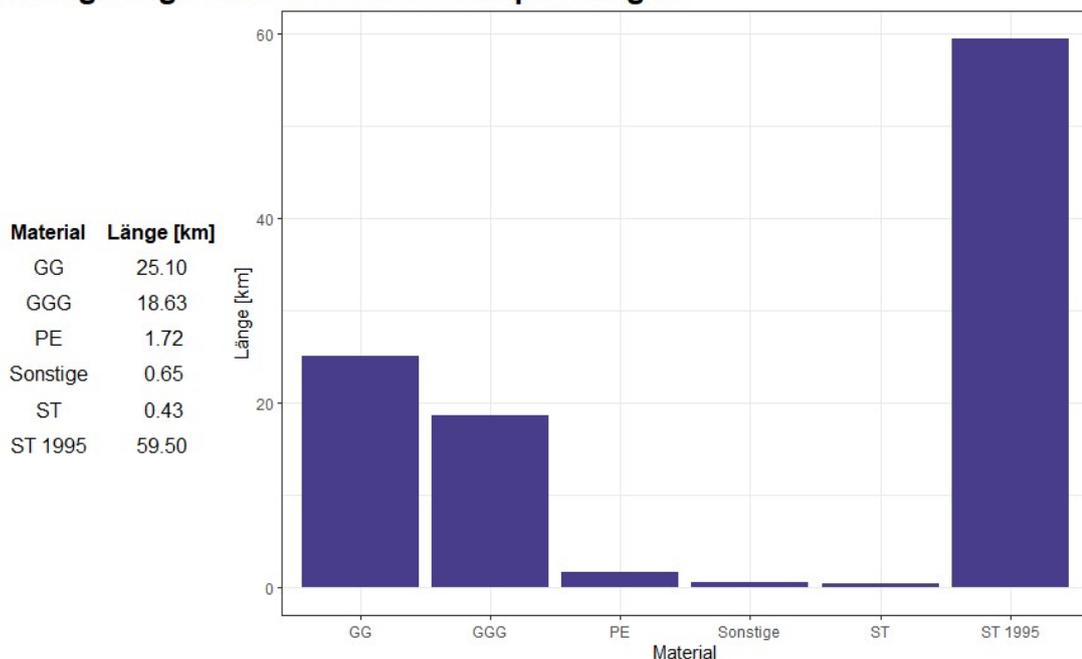


Abbildung 4-1: Leitungslänge nach Leitungstyp

Wie in Abbildung 4-1 ersichtlich ist, verfügt das Leitungsnetz über 91,46 km Hauptleitungen. Die Hausanschlussleitungen machen 124,22 km aus und die restlichen 14,38 km entfallen auf Hydranten- und Transportleitungen.

Die Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen teilen sich in die in Abbildung 4-2 ersichtlichen Materialien auf. Den größten Teil machen davon Leitungen aus Stahl aus, die seit dem Jahr 1995 verlegt wurden. Die Materialien Grauguss (GG) und Sphäroguss (GGG) machen mit 25,10 km und 18,63 km den Großteil des restlichen Netzes aus. Auf Stahl vor 1995, Polyethylen (PE) und sonstige Materialien wie Polyvinylchlorid (PVC), Asbestzement (AZ) oder Polypropylen (PP) machen gemeinsam lediglich 2,80 km aus.

Leitungslänge nach Material für Hausanschlussleitungen

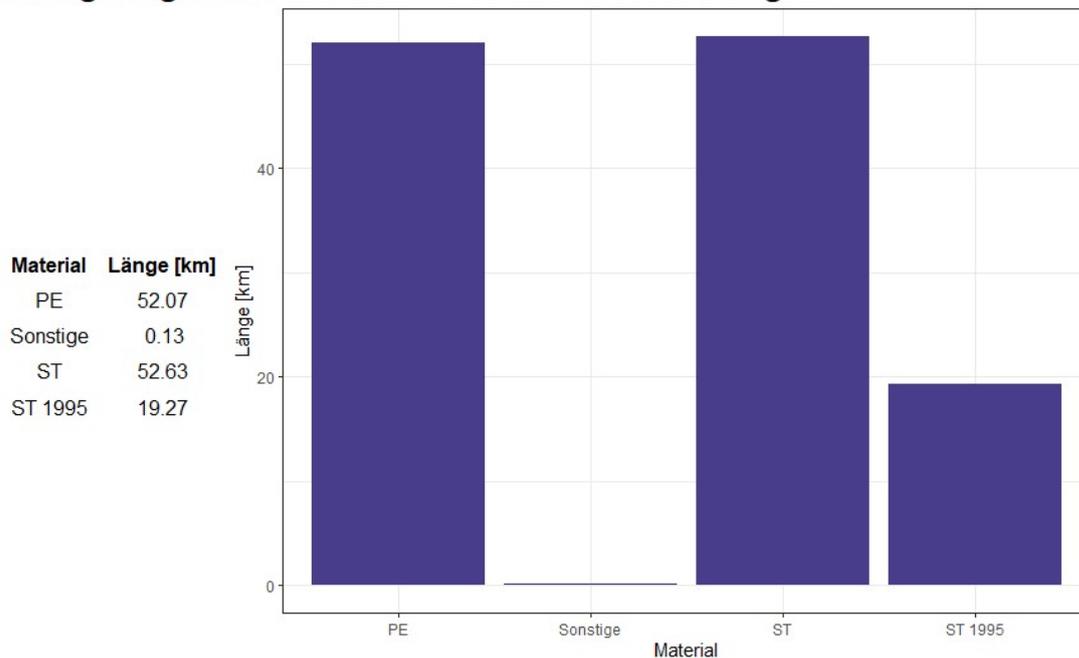


Abbildung 4-2: Leitungslänge der Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen nach Material

In Abbildung 4-3 ist die Materialverteilung der Hausanschlussleitungen ersichtlich. Dabei entfallen auf Stahlleitungen, die vor 1995 verlegt wurden und PE-Leitungen mit 52,63 km und 52,07 km den Großteil aus. Stahlleitungen, die nach 1995 verlegt wurden, machen noch 19,27 km aus und die restlichen 0,13 km sind aus sonstigen Materialien.

Leitungslänge nach Material für Hausanschlussleitungen

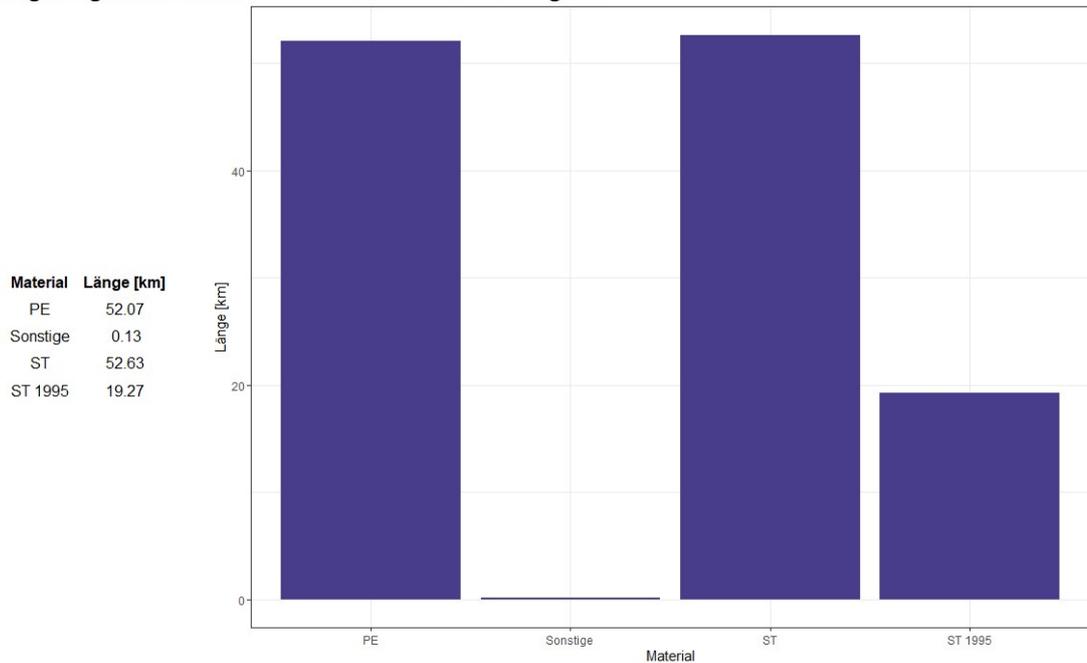


Abbildung 4-3: Leitungslänge der Hausanschlussleitungen nach Material

Die Altersstruktur der Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen ist in Abbildung 4-4 ersichtlich. Dabei ist auch das jeweilige Material, das in den Jahren verlegt sind farblich markiert. Dadurch ist ersichtlich, dass bis zum Jahr 1970 hauptsächlich Graugussleitungen genutzt wurden. Ab 1970 bis 1995 wurden vor allem Sphärogussleitungen gebaut und ab dem Jahr 1996 wurde auf Stahlleitungen zurückgegriffen. Der Großteil des Netzes stammt aus den Jahren seit 1995. In den späten 50er und frühen 60er Jahren bestehen auch noch große Teile des Netzes. Aus den restlichen Jahren ist vergleichsweise nur noch wenig erhalten, oder wurde lediglich wenig verlegt.

Leitungslänge je Verlegejahr und Material für Haupt- und Transportleitungen

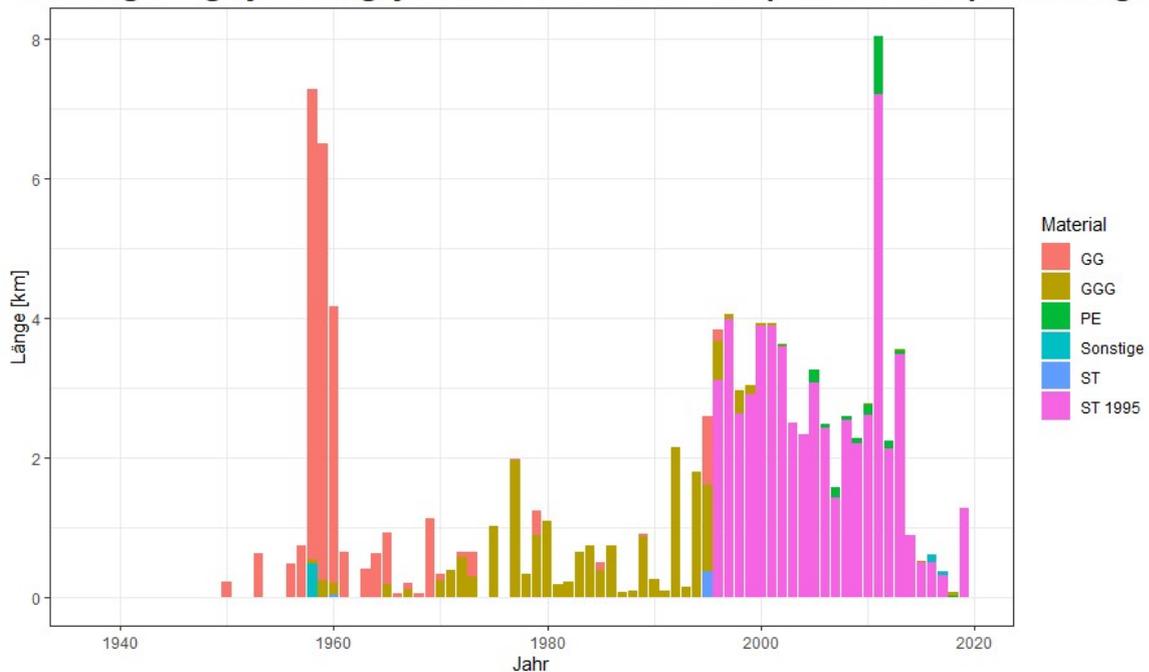


Abbildung 4-4: Leitungslänge der Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen nach Baujahr und Material

Bei den Hausanschlussleitungen gestaltet sich die Altersstruktur mit den jeweilig verlegten Materialien wie in Abbildung 4-5. Bis zum Jahr 2004 wurden beinahe nur verschiedene Generationen der Stahlleitungen verlegt und ab 2004 wurden hauptsächlich PE-Leitungen genutzt. Die Hausanschlussleitungen haben eine gleichmäßigere Verteilung der Verlegejahre. Wobei in den Jahren seit 1995 doch mehr noch bestehende Leitungen verlegt wurden.

Leitungslänge je Verlegejahr und Material für Hausanschlussleitungen

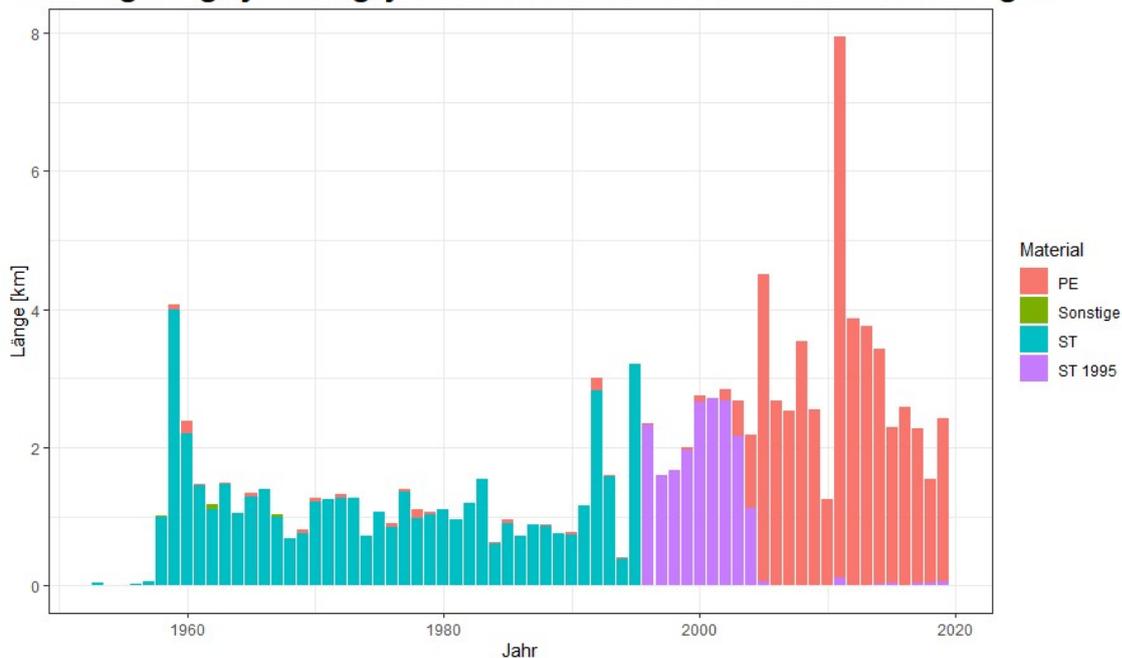


Abbildung 4-5: Leitungslänge der Hausanschlussleitungen nach Baujahr und Material

4.2.2 Rohrbrüche

Aufzeichnungen der Rohrbruchdaten sind seit dem Jahr 2006 in digitaler Form vorhanden. Wie in Abbildung 4-6 ersichtlich ist. Passieren die meisten Schäden auf Hauptleitungen. Jedoch entfallen auf die Hausanschlussleitungen ebenfalls etwa 40 % der Rohrbrüche. Somit sind die Rohrbrüche auf Hausanschlussleitungen nicht zu vernachlässigen, da auch diese repariert werden müssen.

Rohrbrüche nach Leitungstyp

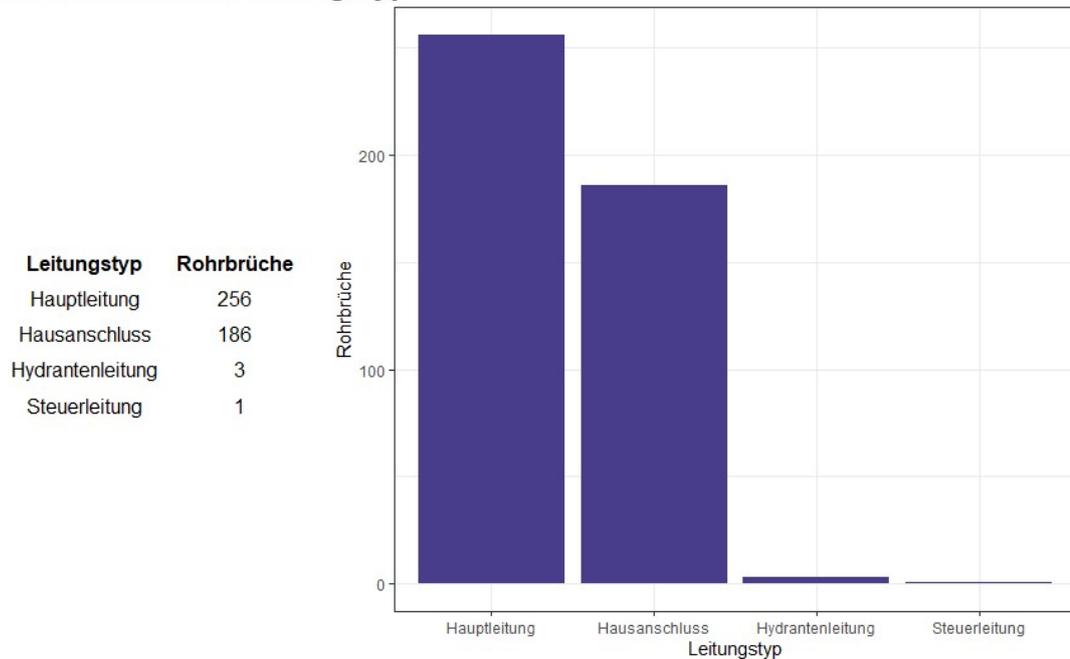


Abbildung 4-6: Rohrbrüche nach Leitungstyp

Die Rohrbrüche an Haupt- und Hydrantenleitungen, können wie in Abbildung 4-7 ersichtliche, den verschiedenen Leitungsmaterialien zugewiesen werden. Die meisten Rohrbrüche entfallen auf die Graugussleitungen mit 188 Stück. Dahinter liegen Sphäroguss, und die Stahlleitungen. Auf PE-Leitungen und sonstige Materialien entfallen nur sehr wenige.

Rohrbrüche nach Material für Hauptleitungen

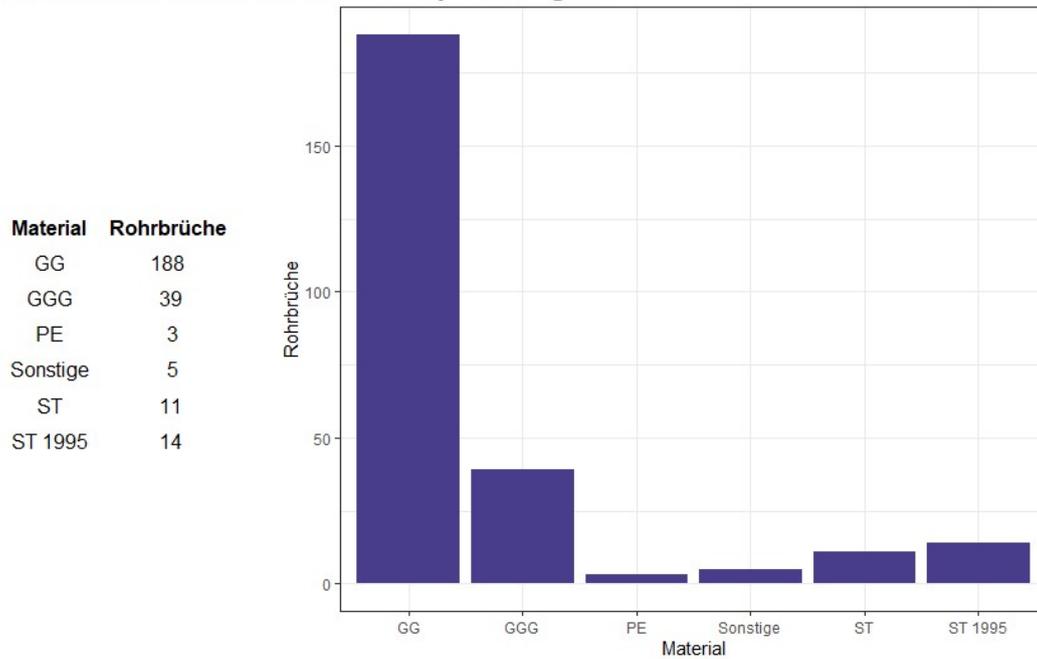


Abbildung 4-7: Rohrbrüche nach Material für Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen

Rechnet man diese Rohrbrüche bezogen auf die jeweilige Leitungslänge der Materialien so ergibt sich eine Verteilung wie sie in Abbildung 4-8 ersichtlich ist. Die meisten Rohrbrüche pro Kilometer weisen dabei Stahlleitungen vor 1995 auf. Dahinter liegen sonstige Materialien und Graugussleitungen. Sphärogussleitungen und PE-Leitungen haben 2,09 beziehungsweise 1,74 Schäden pro Kilometer an Leitungen. Stahlleitungen, sonstige Materialien und PE-Leitungen machen jedoch nur eine sehr kleine Länge an Leitungen aus. Die geringste Menge an Schäden pro Leitungslänge entfällt auf die Stahlleitungen, die seit 1995 verlegt wurden.

Rohrbrüche nach Material pro km für Hauptleitungen

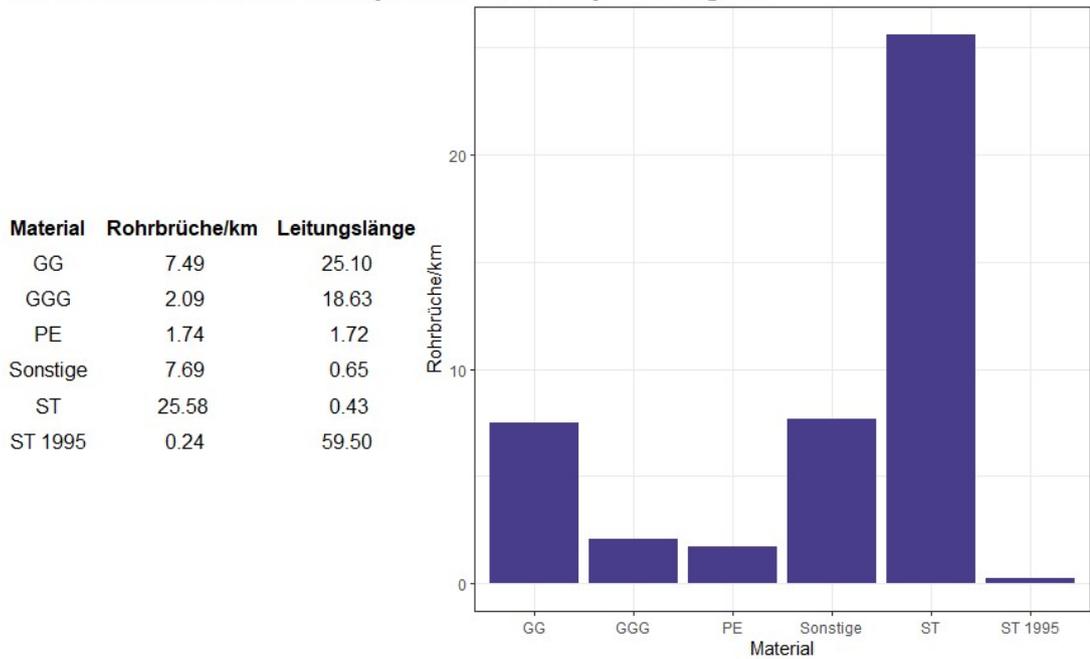


Abbildung 4-8: Rohrbrüche pro Kilometer nach Material für Haupt-, Hydranten- und Transportleitungen

Rohrbrüche nach Material für Hausanschlussleitungen

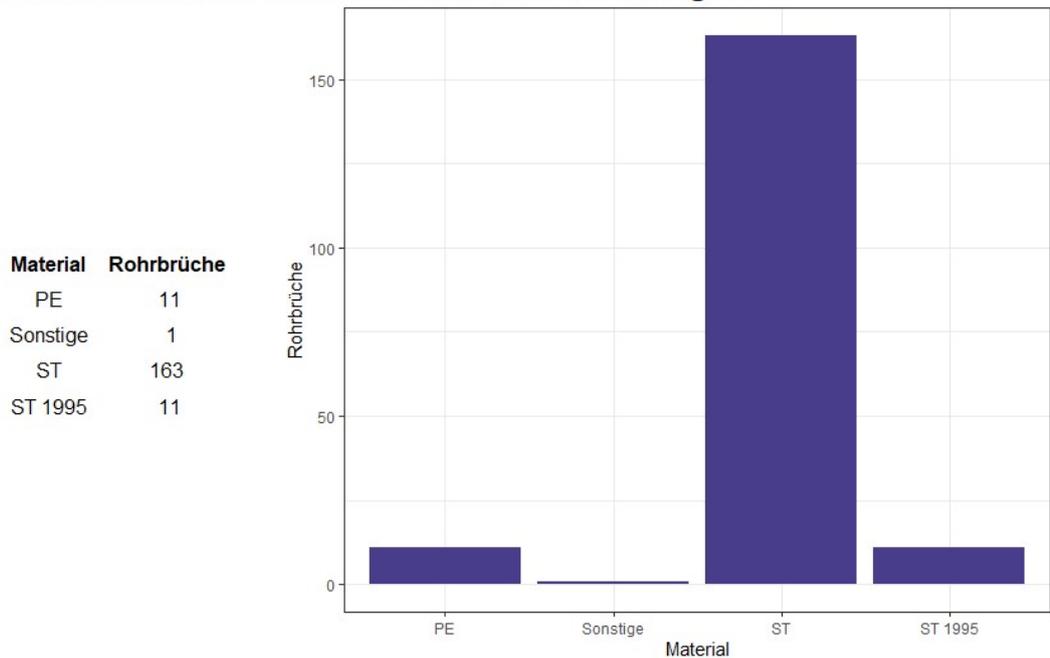


Abbildung 4-9: Rohrbrüche nach Material für Hausanschlussleitungen

Für Hausanschlüsse sind die meisten Schäden, wie in Abbildung 4-9 ersichtlich ist, auf alten Stahlleitungen zu finden. Darauf folgen PE-Leitungen und neuere Stahlleitungen mit je 11 Schäden. Ein Schaden wurde auf sonstigen Materialien verzeichnet.

Bezogen auf die Leitungslänge ergeben sich Werte, wie sie in Abbildung 4-10 ersichtlich sind. Die meisten sind auf Sonstigen Leitungsmaterialien zu finden.

Dies liegt jedoch an der sehr geringen Leitungslänge, da es sich dabei um lediglich einen Schaden handelt. Dahinter liegen die älteren Stahlleitungen, gefolgt von den neueren Stahlleitungen (seit 1995 verlegt) und die PE-Leitungen. Diese Reihenfolge entspricht im Groben der Altersstruktur der Leitungen.

Rohrbrüche nach Material pro km für Hausanschlussleitungen

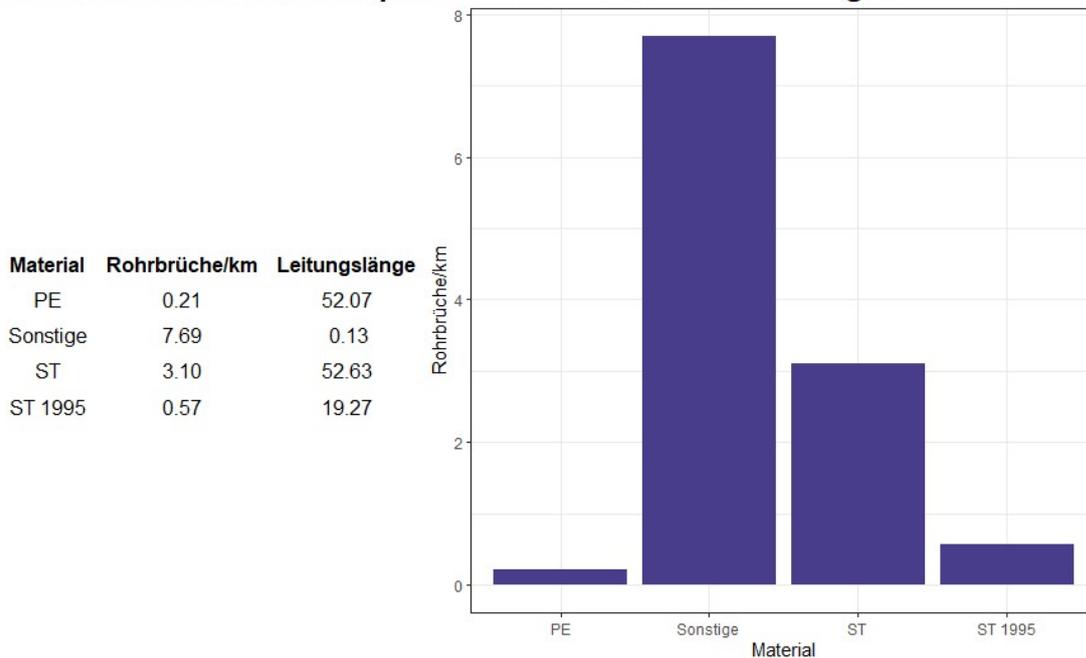


Abbildung 4-10: Rohrbrüche pro Kilometer Leitungslänge nach Material für Hausanschlussleitungen

In Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 sind die Rohrbrüche nach Leitungsalter ersichtlich. Dabei ist bei den Haupt- und Hydrantenleitungen ersichtlich, dass sich die Rohrbruchhäufigkeit bis zu einem Alter von 40 Jahren relativ konstant ist und sich dann häufen. Bei den Hausanschlussleitungen ist kein so deutlicher Trend zu erkennen. Dabei sind die Rohrbruchhäufigkeit relativ konstant über die Liegedauer. Eine leichte Häufung in den späteren Jahren ab 40 ist jedoch auch hier zu erkennen. Hier ist auch die Altersstruktur des Netzes ersichtlich. Graugussleitungen nähern sich dem Ende ihrer Nutzungsdauer, und Sphärogussleitungen kommen in jenen Lebensabschnitt, in dem sich die Rohrbrüche stark häufen. Wo hingegen Stahlleitungen, die nach 1995 verlegt wurden, erst am Anfang ihrer Liegedauer sind.

Rohrbrüche nach Alter und Material

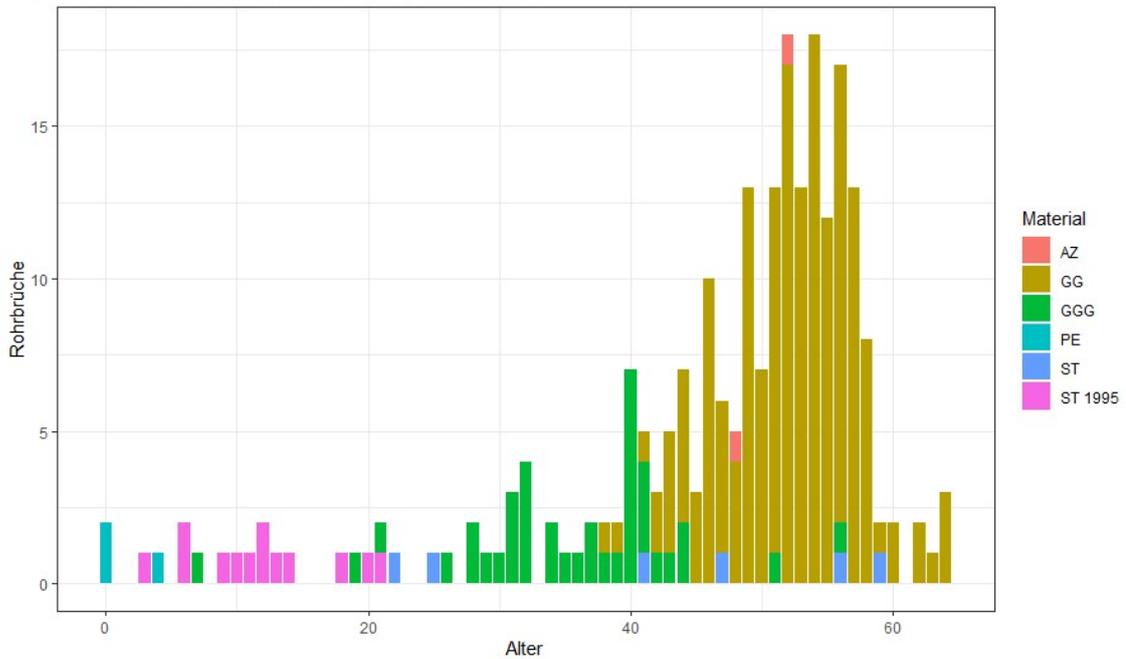


Abbildung 4-11: Rohrbrüche für Haupt- und Hydrantenleitungen nach Leitungsalter und Material

Rohrbrüche nach Alter und Material

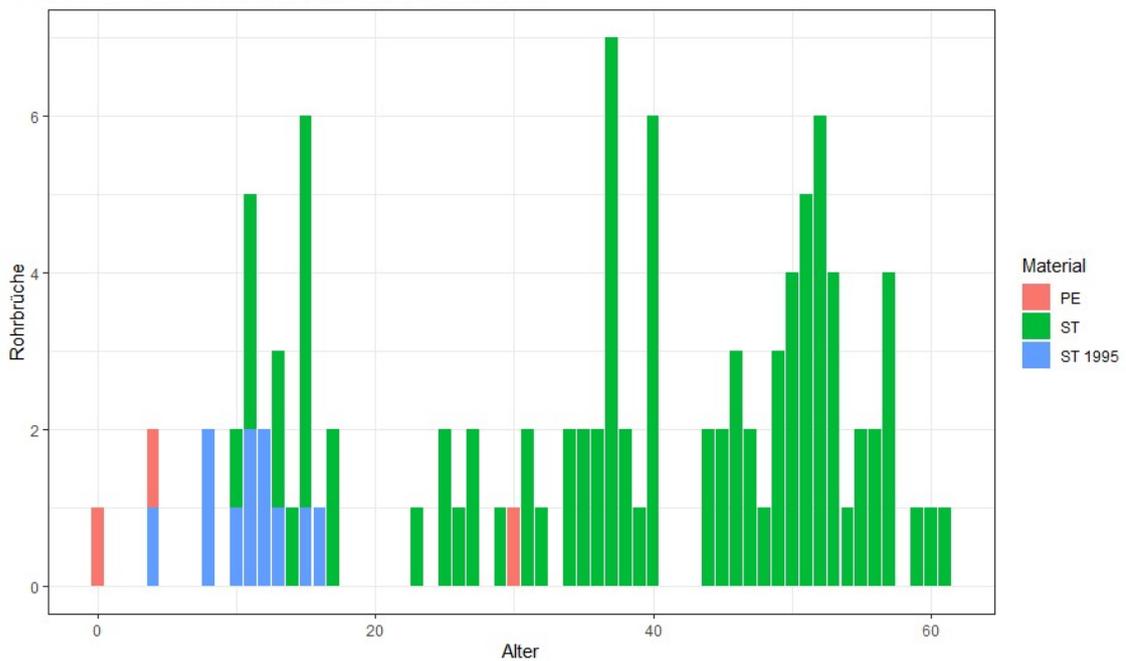


Abbildung 4-12: Rohrbrüche für Hausanschlussleitungen nach Leitungsalter

In Abbildung 4-13 ist ersichtlich wie viele Rohrschäden pro Jahr des Beobachtungszeitraums geschehen sind. Dabei wird zwischen den Leitungstypen unterschieden. In den frühen Jahren der Aufzeichnung wurden sehr viele Schäden verzeichnet. Etwa ab dem Jahr 2013 ging die Zahl der Schäden verhältnismäßig zurück.

Rohrbrüche nach Bruchjahr und Leitungstyp

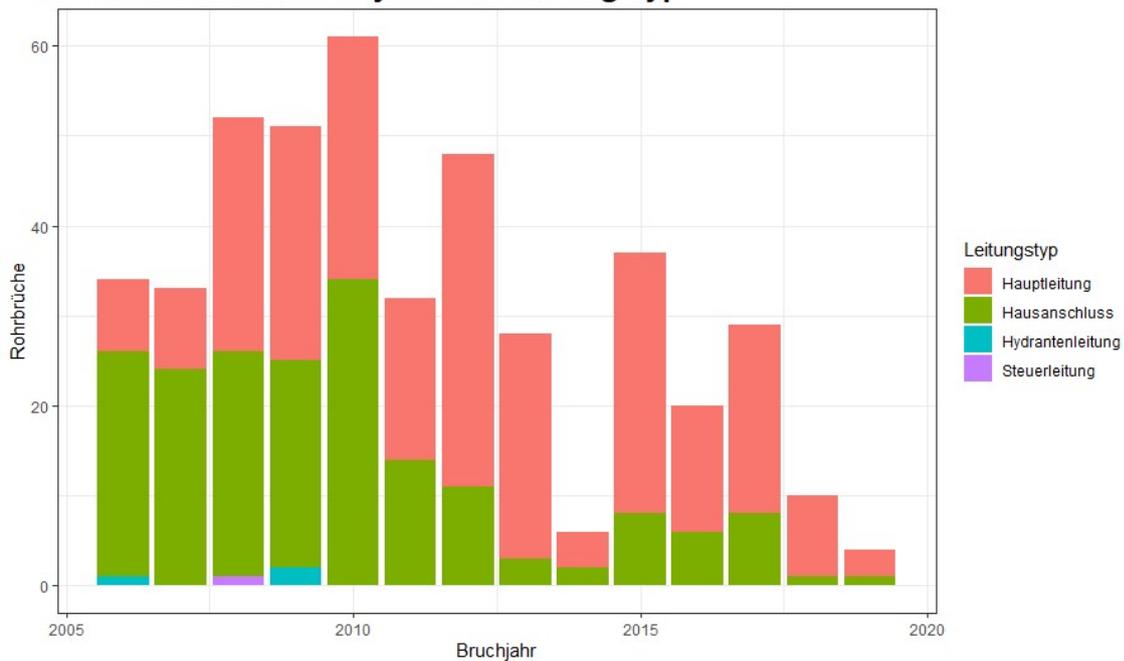


Abbildung 4-13: Rohrbrüche nach Bruchjahr und Leitungstyp

In Abbildung 4-14 sind die Rohrbrüche nach den Monaten abgebildet, in denen sie sich ereignet haben. Es ist gut ersichtlich, dass in den kalten Monaten die meisten Rohrbrüche passieren. Aber auch in den Sommermonaten sind leicht größere Rohrbruchzahlen verzeichnet. Die Stahlleitungen, welche vor 1995 erbaut wurden, sind vor allem Hausanschlussleitungen. Diese weisen das ganze Jahr über relativ gleichbleibende Schäden vor. Das sich ergebende Muster, dass vor allem in den Wintermonaten Schäden auftreten, ist vor allem den Graugussleitungen zu verdanken.

Rohrbrüche nach Bruchmonat

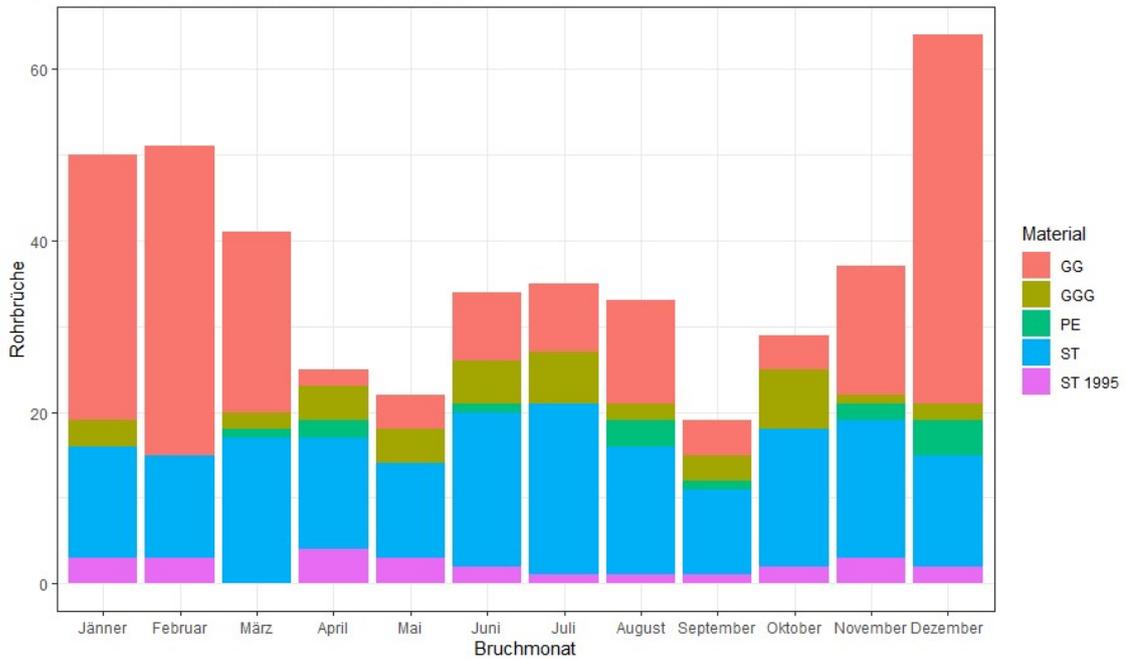


Abbildung 4-14: Rohrbrüche nach Monat und Material

Im Abbildung 4-15 sind die Rohrbrüche je Bruchjahr aufgetragen. Dabei wird zwischen den Jahreszeiten unterschieden. Dabei zeigt sich wiederum, dass in den Wintermonaten meist, die größte Menge an Rohrbrüchen gibt. Auch ein Trend von mehr Rohrbrüchen in Jahren mit extremen Temperaturen ist ersichtlich. So sind etwa im Jahr 2017 ein großer Anteil der Rohrbrüche im Winter aufgetreten. Der Jänner dieses Jahres wies sehr niedrige Temperaturen mit wenig Niederschlag auf. Aber auch heiße Sommer lassen sich beobachten.

Rohrbrüche nach Bruchjahr und Jahreszeit

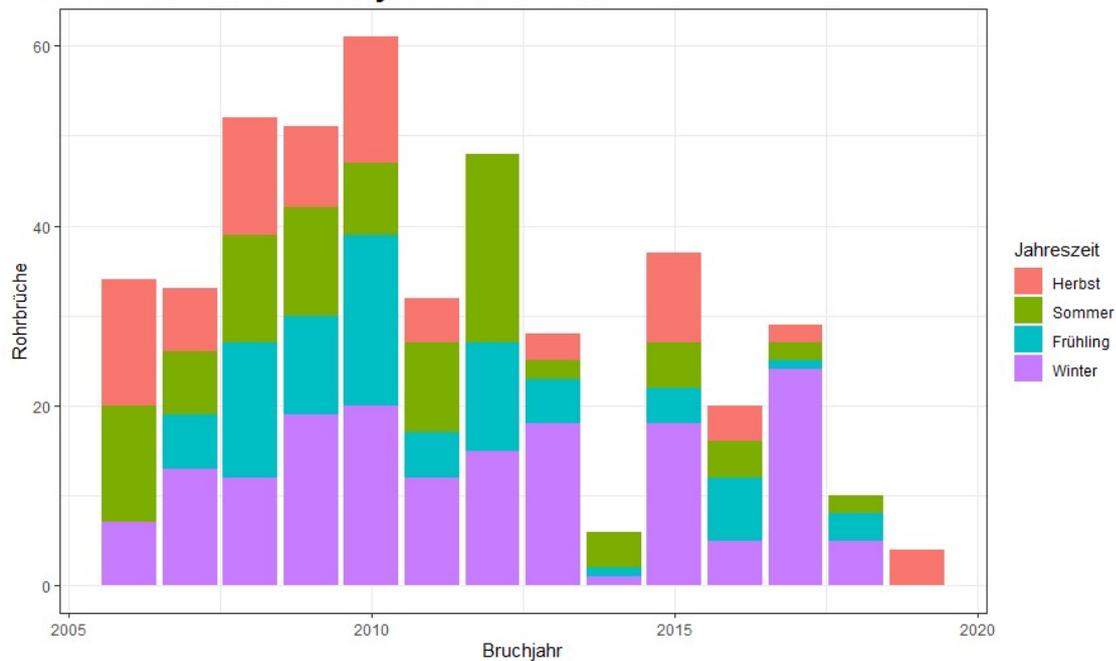


Abbildung 4-15: Rohrbrüche nach Bruchjahr und Jahreszeit. Die Jahreszeiten werden wie Folgt eingeteilt: Winter (Jänner, Februar und Dezember), Frühling (März, April und Mai), Sommer (Juni, Juli und August) und Herbst (September, Oktober und November)

4.2.3 Datenaufbereitung

Die verwendeten Daten wurden Großteils aus dem Leitungsinformationssystem von Lustenau entnommen. Die Rohrbruchdaten waren teilweise auch im Leitungsinformationssystem erfasst. Die Jahre von 2006 bis 2012 wurden im Zuge dieser Arbeit nachgetragen. Das Jahr 2019 wurde nicht mehr ganz erfasst.

Die Bodeninformationen wurden der Geologischen Karte der Republik Österreich aus dem Abschnitt 110 St. Gallen Nord und 111 Dornbirn Nord mit Anteilen von 81 Bodensee und 82 Bregenz der Geologischen Bundesanstalt entnommen.

Abgesehen der vorhandenen Daten des Leitungsinformationssystems wurden alle Daten selbstständig in die Arbeit integriert.

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit beschrieben und diskutiert. Im ersten Teil werden die verschiedenen Modelle behandelt. Dabei wird zunächst auf die Datenerkundung eingegangen. Daraufhin werden die Verschiedenen Modellvarianten mit der jeweiligen Kalibrierung und Validation erläutert. Zum Schluss werden die Modelle miteinander verglichen und die Prognose des gewählten Modells diskutiert.

Im zweiten Teil wird das Ergebnis des ERIX erläutert und diskutiert. Zunächst werden dabei die Fragebögen behandelt. Daraufhin werden die Gewichte diskutiert und die Berechnung des Erneuerungsindex behandelt. Zum Schluss werden wieder die Resultate der Varianten verglichen.

5.1 Modelle

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Schadensmodellen. Zuerst wird die Datenerkundung, danach die Modellvarianten und zum Ende der Vergleich der Modelle und die Prognose behandelt.

5.1.1 Datenerkundung

Mittels der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Kaplan-Meier-Kurven wurden zunächst die ermittelten Einflussgrößen untersucht. Das Überleben beschreibt dabei die Wahrscheinlichkeit, dass kein Schaden auftritt. Dabei wurden alle Leitungstypen außer Transportleitungen betrachtet.

In Abbildung 5-1 werden die Überlebenswahrscheinlichkeitsverläufe für die Verschiedenen Leitungsmaterialien dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass vor allem Grauguss- (GG) und Sphärogussleitungen (GGG) eine geringere Überlebenswahrscheinlichkeit aufweisen als die anderen Materialien. Bei Graugussleitungen ist ein relativ abrupter Abfall der Überlebenswahrscheinlichkeit etwa vom 45. bis zum 60. Lebensjahr zu sehen. Sphärogussleitungen tendieren dagegen bereits früher zu Schäden. Dieser Verlauf kann jedoch auch aufgrund der Altersstruktur des Systems und des Beobachtungszeitraums erklärt werden. Kunststoffleitungen sowie Stahlleitungen, die nach 1995 erbaut wurden, sind Großteils noch nicht lange genug im System vorhanden, um gesicherte Aussagen über das Schadensverhalten zu tätigen. Alte Stahlleitungen verhalten sich relativ gut und weisen wenige Schäden auf. Doch dies kann auch, damit begründet werden, dass schadhafte Leitungen mit diesem Material bereits ausgetauscht wurden.

Ergebnisse und Diskussion

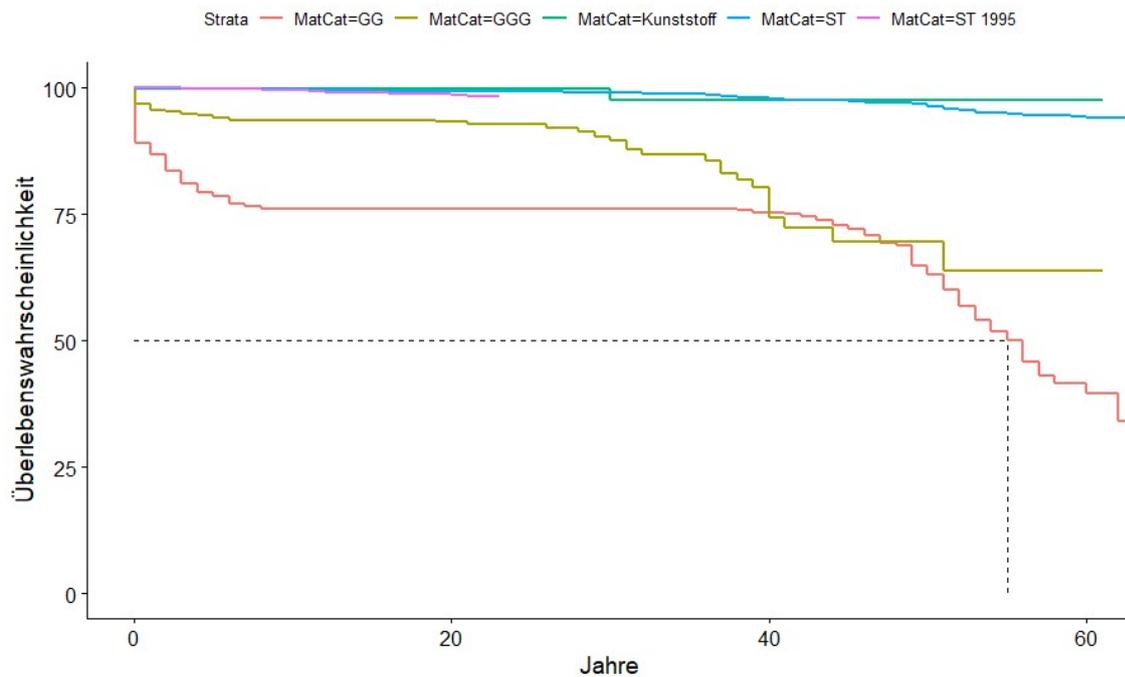


Abbildung 5-1: Kaplan-Meier-Plot für die Leitungsmaterialien. Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit während des Leitungsalters.

In Abbildung 5-2 ist die Kaplan-Meier-Kurve für Dimensionskategorien zu sehen. Daraus ist ersichtlich, dass kleinere Leitungsdurchmesser eher zu Schäden neigen als größere.

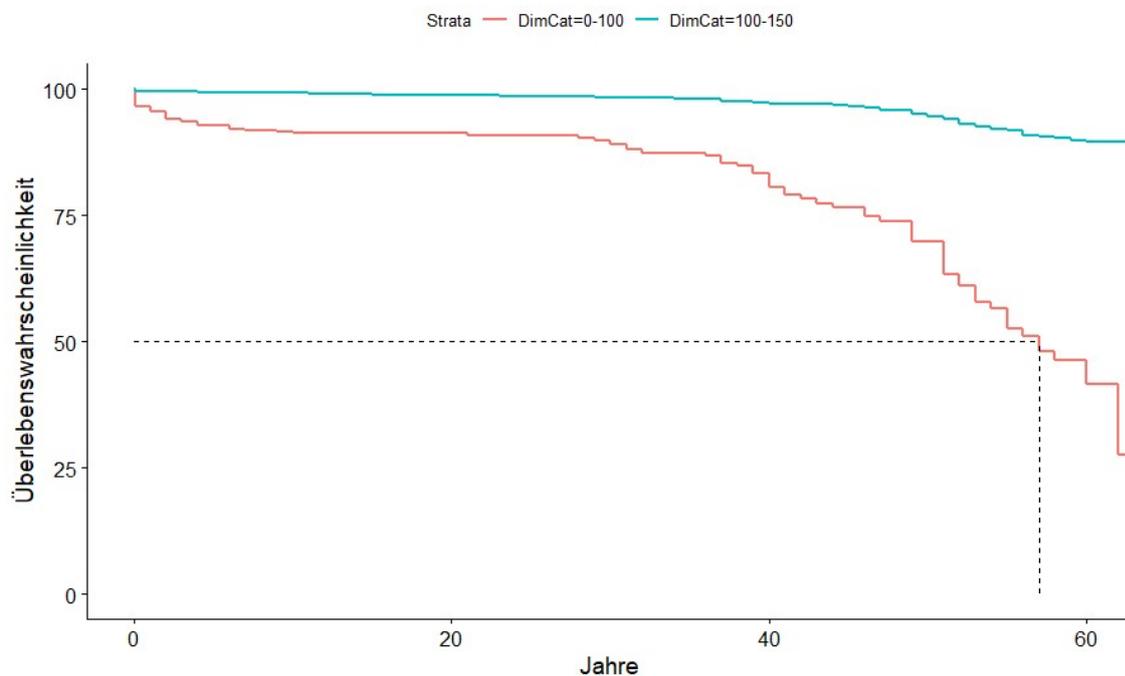


Abbildung 5-2: Kaplan-Meier-Plot für die Leitungsdurchmesser. Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit während des Leitungsalters für die Kategorien: DimCat 0-100 ($DN < 100$) und DimCat 100-150 ($DN \geq 100$)

In Abbildung 5-3 sind die Kaplan-Meier-Schätzer zu sehen. Dabei werden Kategorien behandelt die Straßen darstellen, in denen vor dem Beobachtungszeitraum Schäden auftraten. Die erkennbaren Unterschiede zwischen den Kategorien folgen jedoch keiner Regelmäßigkeit, die im Modell verwendet werden könnte.

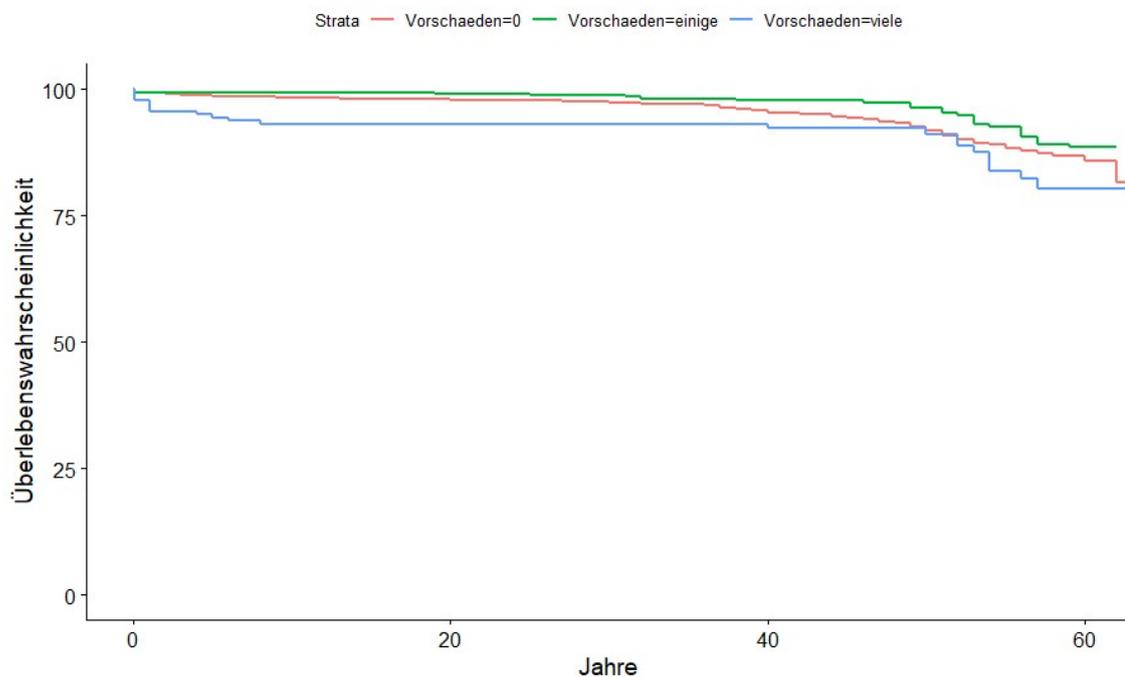


Abbildung 5-3: Kaplan-Meier-Kurve für Kategorien die Straßen markieren, in denen vor dem Beobachtungszeitraum Leitungsschäden auftraten.

In den in Abbildung 5-4 abgebildeten Kaplan-Meier-Kurven ist ersichtlich, dass Leitungen in aggressiven Böden, tendenziell früher Schäden aufweisen. Wenn sie jedoch bereits ein gewisses Alter ohne Schaden erreicht haben, sind sie unempfindlicher auf Schäden. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass nicht korrosionsempfindliche Leitungsmaterialien, diese korrosive Umgebung gut aushalten. Der Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit in nicht aggressiven Böden kann dadurch erklärt werden, dass die alten noch vorhandenen Graugussleitungen vor allem in diesen Böden liegen, und diese Leitungen grundsätzlich schadensanfälliger sind.

Ergebnisse und Diskussion

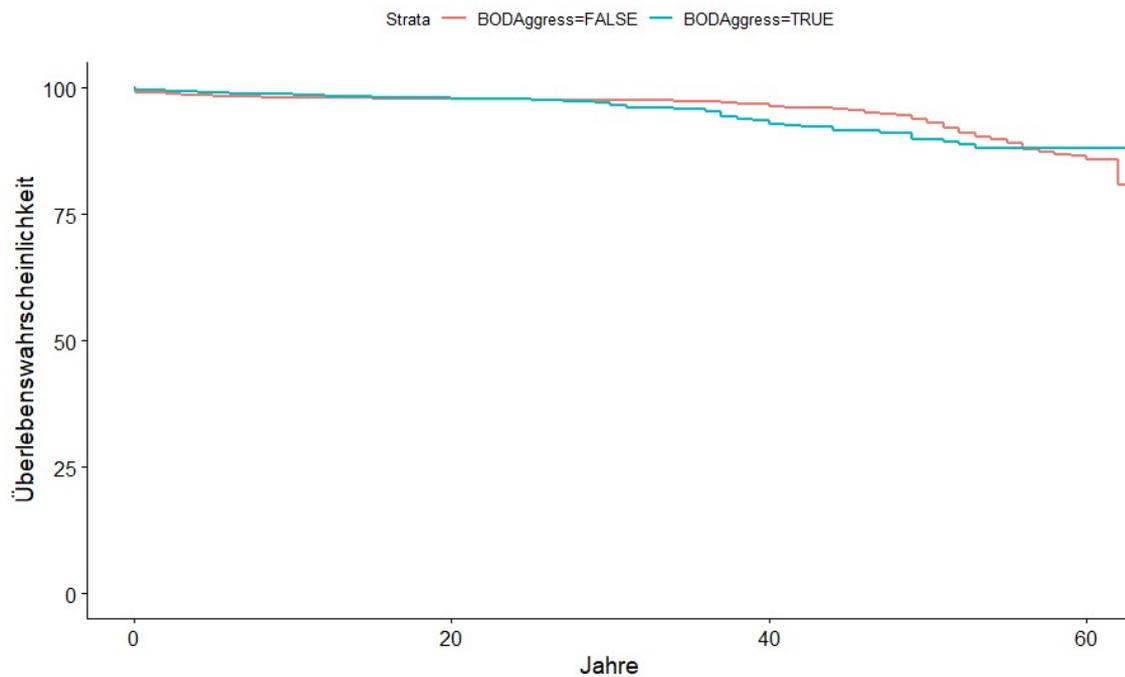


Abbildung 5-4: Kaplan-Meier-Kurve für die Bodenaggressivität. Dabei wird zwischen aggressiv (=TRUE) und nicht aggressiv (=FALSE) unterschieden.

In Abbildung 5-5 ist zu erkennen, dass nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Kurven vorhanden sind. Somit ist kein großer Einfluss nachweisbar.

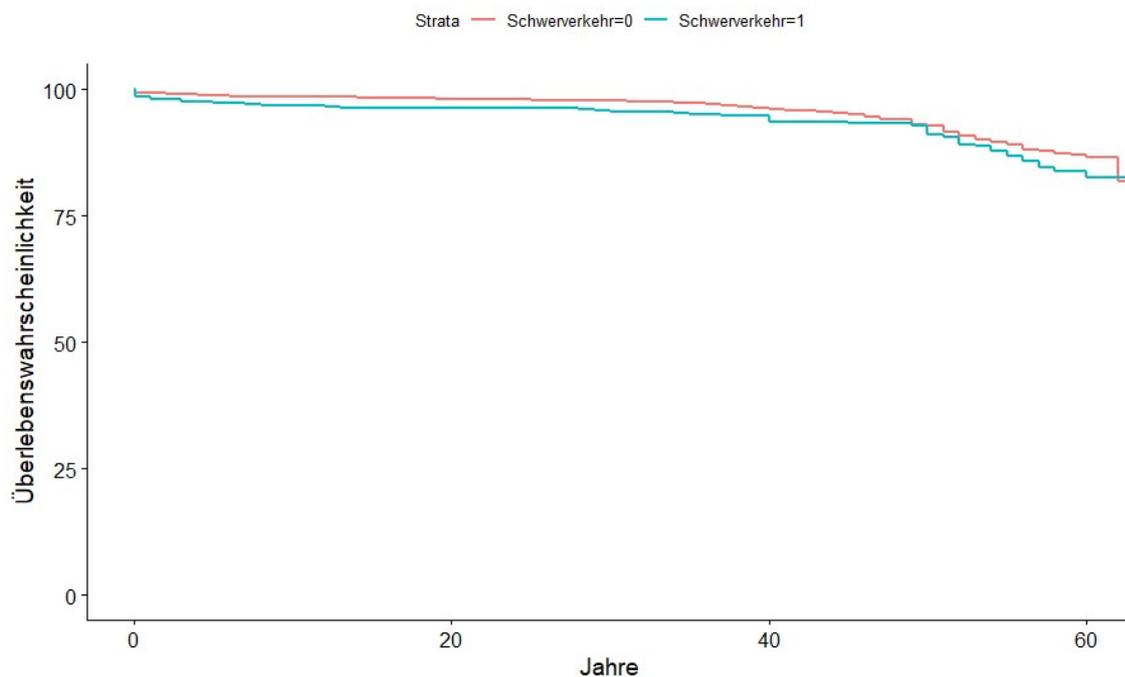


Abbildung 5-5: Kaplan-Meier-Kurve für das Schwerverkehrsaufkommen in den Straßen. Dabei wird zwischen Leitungen unterschieden, die in Straßen liegen in denen Schwerverkehr fährt und jene in denen dies nicht der Fall ist.

Wie in Abbildung 5-6 ersichtlich ist, lässt sich für eine steigende Anzahl an Vorschäden eine immer kürzer werdende Dauer bis zum nächsten Schaden beobachten. Daraus kann geschlossen werden, dass Leitungen, die schon Schäden hatten, anfälliger für neue Schäden sind. Dies ist auch bei Didri, et al. (2009), Carrión, et al. (2010) und Andreou, et al. (1987) ersichtlich.

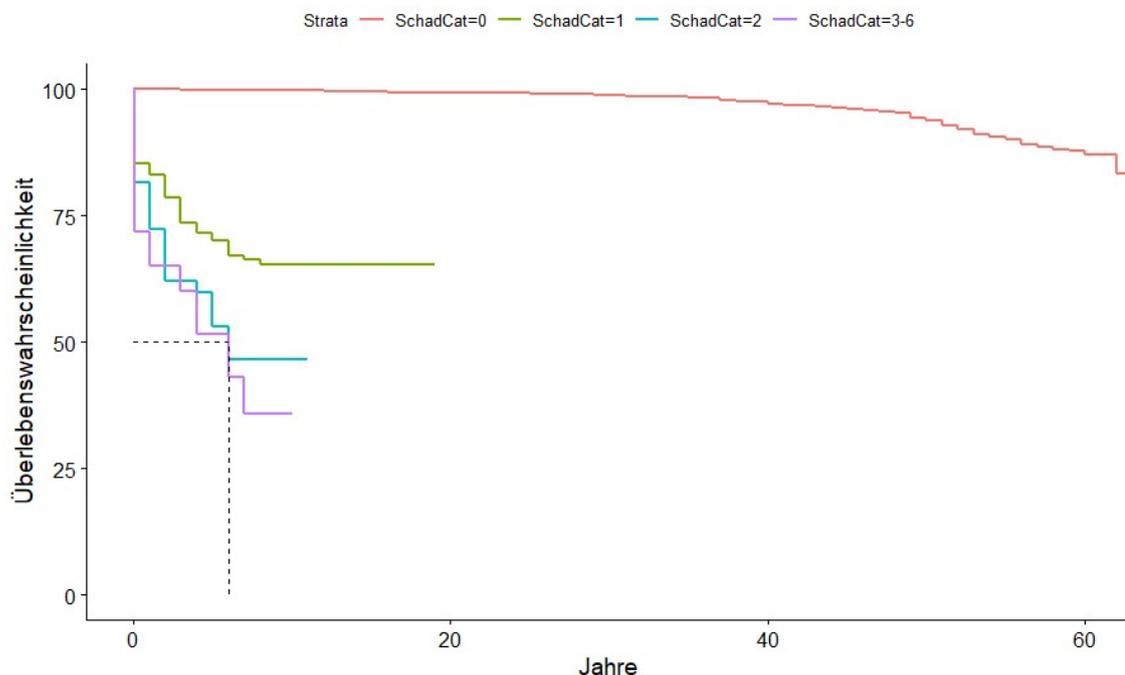


Abbildung 5-6: Kaplan-Meier-Kurve für die Anzahl an Vorschäden. Die Kategorien teilen sich wie Folgt ein: SchadensanzahlCat=0 (keine Vorschäden), SchadensanzahlCat=1 (1 Vorschaden), SchadensanzahlCat=2 (2 Vorschäden), SchadensanzahlCat=3-6 (3-6 Vorschäden)

Somit werden in den folgenden Schritten die Einflussparameter Material, Dimension, Menge an Vorschäden, Schwerverkehr, Bodenaggressivität, Leitungsalter und die Leitungslänge weiter untersucht. Da die beiden Letzten Einflussparameter metrisch skaliert sind, lassen sich diese nicht in Kaplan-Meier-Plots darstellen.

5.1.2 Kombiniertes Erst- und Folgeschadensmodell

Im Kombinierten Erst- und Folgeschadensmodell werden, wie in Kapitel 2.1.6 beschrieben, zwei getrennte Modelle genutzt. Dabei dient nur ein Modell zur Modellierung der Erstschäden und der Folgeschäden. Im Folgenden wird zunächst die Kalibration dieser Modelle und danach ihre Validation behandelt.

5.1.2.1 Kalibration

Wie in Tabelle 5-1 ersichtlich ist, wurden für alle Modellvarianten die gleichen Kombinationen an Einflussparametern getestet. Als bestes Modell stellte sich in diesem Fall die Kombination aus Schadensanzahl, Material, Leitungsalter sowie die Leitungslänge heraus. Auch das Modell, das Schadensanzahl, Leitungsalter,

Leitungslänge und die Kombination aus Material und Bodenaggressivität berücksichtigt, weist eine gute Anpassung an die Daten auf. Jedoch wird aufgrund der simpleren Modellstruktur das zuerst erwähnte Modell gewählt.

Die Parameter Dimension, Bodenaggressivität und Schwerverkehr haben beinahe keinen Einfluss auf die Modellgüte, wie aufgrund der geringen Veränderung der Güteparameter beim Weglassen ebendieser erkennbar ist.

Tabelle 5-1: Kalibrierung und Wahl der Einflussparameter für das kombinierte Erst- und Folgeschadensmodell

Folgeschadens-Modell																
Exponential			Weibull			Cox-Modell			Modellvarianten							
parametric proportional Hazard-Modelle			semiparametric proportional Hazard-Modelle			Einflussparameter für die Modellkalibrierung										
Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Likelihood Ratio Test ^{*3}	Harrell's C-Index ^{*4}	Schadensanzahl Kategorie	Material Kategorie	Dimensions Kategorie	Aggressivität des Bodens	Schwerverkehr	Leitungslänge	Leitungsalter	
Chi ² -Test ^{*2}	AIC ^{*1}	Chi ² -Test ^{*2}	AIC ^{*1}	Chi ² -Test ^{*2}	AIC ^{*1}	Chi ² -Test ^{*2}	AIC ^{*1}	Ratio Test ^{*3}	Harrell's C-Index ^{*4}	Schadensanzahl Kategorie	Material Kategorie	Dimensions Kategorie	Aggressivität des Bodens	Schwerverkehr	Leitungslänge	Leitungsalter
2789	864	2734	974	2789	839	847	0.918	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2788	863	2733	973	2788	838	847	0.918	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2788	861	2732	972	2788	836	846	0.919	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2787	859	2730	972	2788	835	845	0.916	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2790	854	2785	915	2790	840	818	0.901	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2790	856	2787	915	2790	833	819	0.901	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2835	807	2827	870	2835	784	768	0.875	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2869	767	2848	843	2860	753	767	0.895	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2792	864	2734	977	2788	851	850	0.921	x	x	x ^{*1}	x ^{*1}	x ^{*1}	x ^{*1}	x	x	x
2796	859	2786	923	2796	835	824	0.904	x	x	x ^{*1}	x ^{*1}	x ^{*1}	x ^{*1}	x	x	x
2793	858	2790	916	2792	834	819	0.899	x	x	x ^{*1}	x ^{*1}	x ^{*1}	x ^{*1}	x	x	x

*1 ... Ein gutes Modell wird durch ein niedriges Akaike Informationskriterium ausgezeichnet

*2 ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Chi²-Test-Prüfgröße ausgezeichnet

*3 ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Likelihood-Ratio-Test-Prüfgröße ausgezeichnet

*4 ... Ein gutes Modell wird durch einen Harrell's C-Index ausgezeichnet (max=1,00)

5.1.2.2 Validation

Die Modellvalidation erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden die Modellkoeffizienten betrachtet und wie diese auf Grund der Crossvalidation variieren. Im zweiten Schritt wurde mittels ROC-Kurven die Validation für die Jahre 2016, 2017 und 2018 durchgeführt.

Da die parametrischen Proportional-Hazard-Modelle mit der Sterbekurve und nicht mit der Überlebenskurve arbeiten ergeben sich dabei die Modellkoeffizienten im Vergleich zum Cox-Modell mit umgekehrtem Vorzeichen.

Im Zuge des Validierungsprozesses wurde die Kategorisierung für die Anzahl der Vorschäden geändert und nur mehr zwischen Erst- und Folgeschäden unterschieden, da sich für die verschiedenen Folgeschadenskategorien dieselben Koeffizienten ergaben.

5.1.2.2.1 Weibull-Modell

Wie in Abbildung 5-7 ersichtlich ist, variieren die Koeffizienten nur in sehr geringem Maß. Negative Koeffizienten zeigen an, dass die Schadenswahrscheinlichkeit durch diese Einflussfaktoren erhöht wird, wohingegen positive diese verringern. Somit ergeben sich nachvollziehbare Koeffizienten. Die Basisrisikofunktion wird für Grauguss-Leitungen erstellt, die noch keinen Schaden hatten. Alle anderen Leitungsmaterialien verringern die Schadenswahrscheinlichkeit. Das Leitungsalter und die Leitungslänge erhöht die Schadenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Größe und bei den Folgeschäden wird ebenfalls eine Erhöhung der Schadenswahrscheinlichkeit prognostiziert. X-Intercept bezeichnet die Verschiebung der Basisfunktion vom Koordinatenursprung in Richtung der Abszisse.

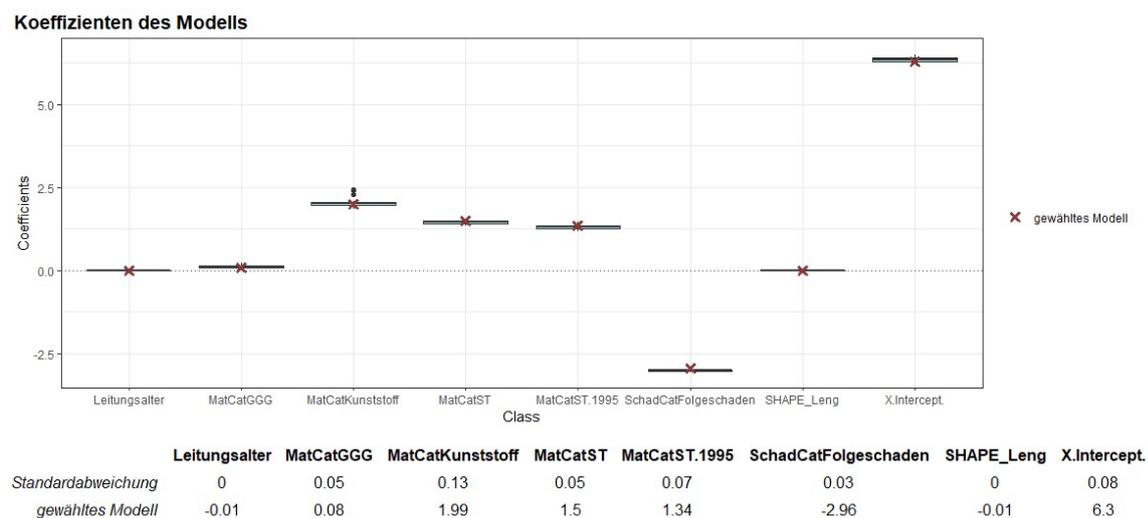


Abbildung 5-7: Variation der Koeffizienten des Weibull-Modells

Die ROC-Kurven der Validierungsjahre deuten auf eine gute Vorhersagequalität des Modells hin (siehe Abbildung 5-8). Die erreichten AUC-Werte bestätigen

dies. Für den ermittelten Cutoff von 0.95 wurden mehr als die Hälfte der Ereignisse richtig vorhergesagt.

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018

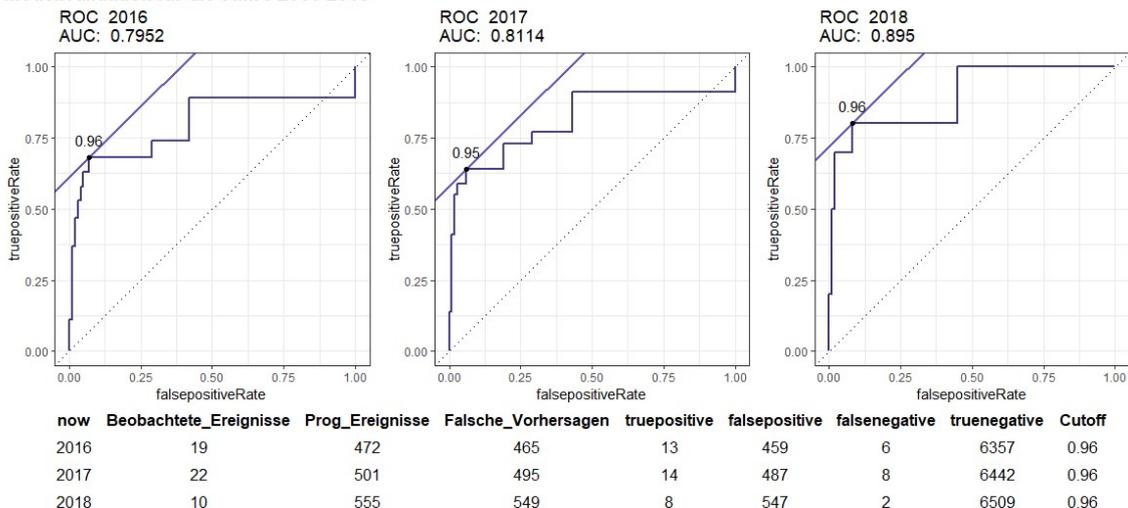


Abbildung 5-8: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Weibull-Modell

5.1.2.2.2 Exponential-Modell

Wie bereits in Kapitel 5.1.2.2.1 bereits erläutert, ergeben sich auch hier wieder nachvollziehbare und nur geringfügig abweichende Koeffizienten für das Exponential-Modell. Diese sind in Abbildung 5-9 ersichtlich. Die Koeffizienten variieren ihren Wert wiederum nur gering. Somit ist wieder ein stabiles Modell gegeben.

Koeffizienten des Modells

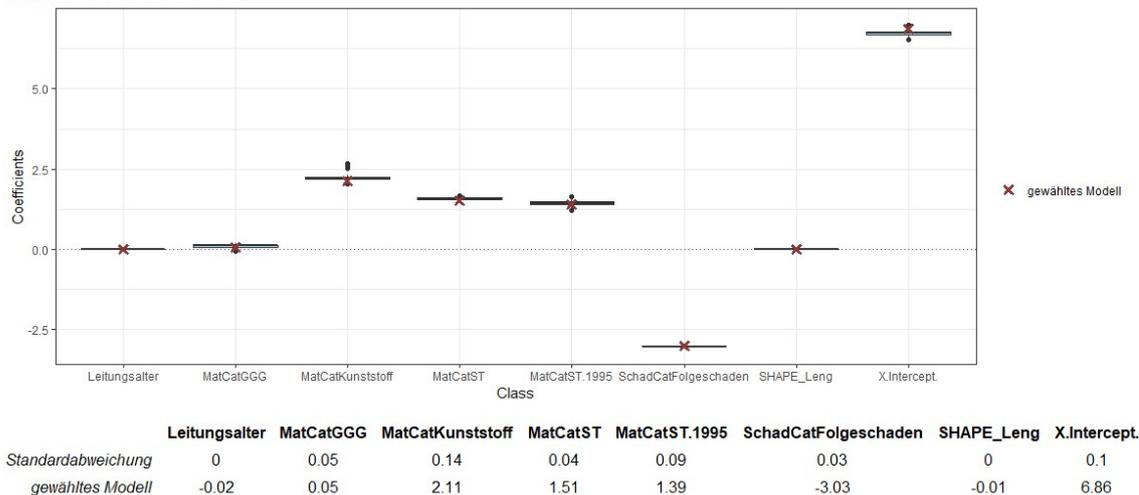


Abbildung 5-9: Variation der Koeffizienten des Exponential-Modells

Bei den ROC-Kurven ergibt sich für das Exponential-Modell wiederum ein sehr ähnliches Bild wie bereits bei dem Weibullmodell. Diese Ähnlichkeit kann sich dadurch erklären lassen, dass beide parametrisierten Modelle einander auch sehr ähneln. Beim Exponential-Modell handelt es sich lediglich um eine Sonderform des Weibullmodells. Die leichten Unterschiede der Koeffizienten führen jedoch beim Exponential-Modell zu einer höheren Anzahl an falschen Vorhersagen.

Ergebnisse und Diskussion

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018

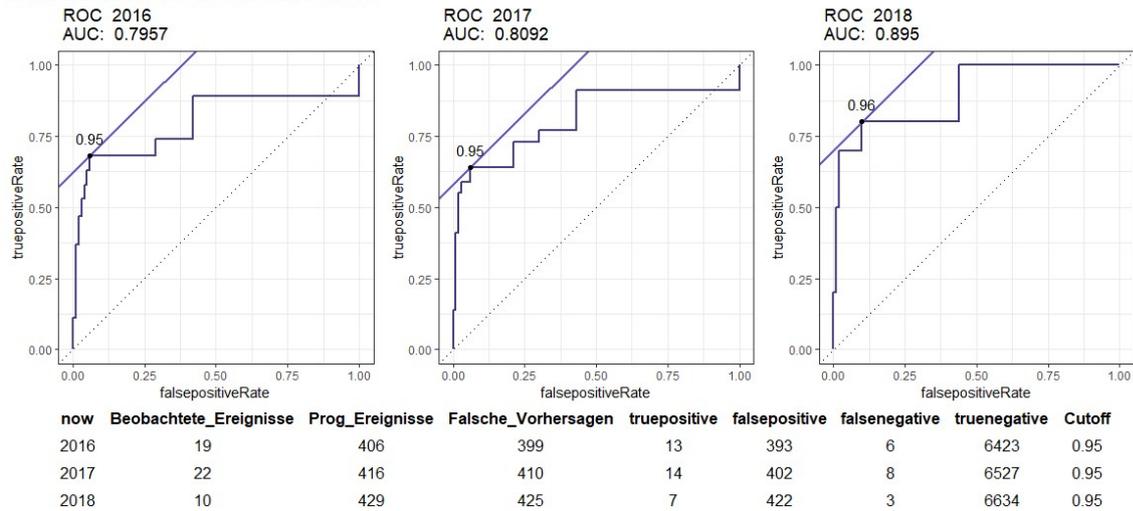


Abbildung 5-10: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Exponential-Modell

5.1.2.2.3 Logistisches Modell

Für das Logistische Modell ergeben sich weniger nachvollziehbare Koeffizienten wie bei den vorherigen Modellen, denn hier werden Leitungen mit zunehmendem Alter weniger anfällig für Schäden. Somit sollte das Modell nicht verwendet werden. Die restlichen Koeffizienten weisen jedoch nachvollziehbare Werte auf, wie in Abbildung 5-11 ersichtlich ist. Auch hier variieren die Koeffizienten nur gering.

Koeffizienten des Modells

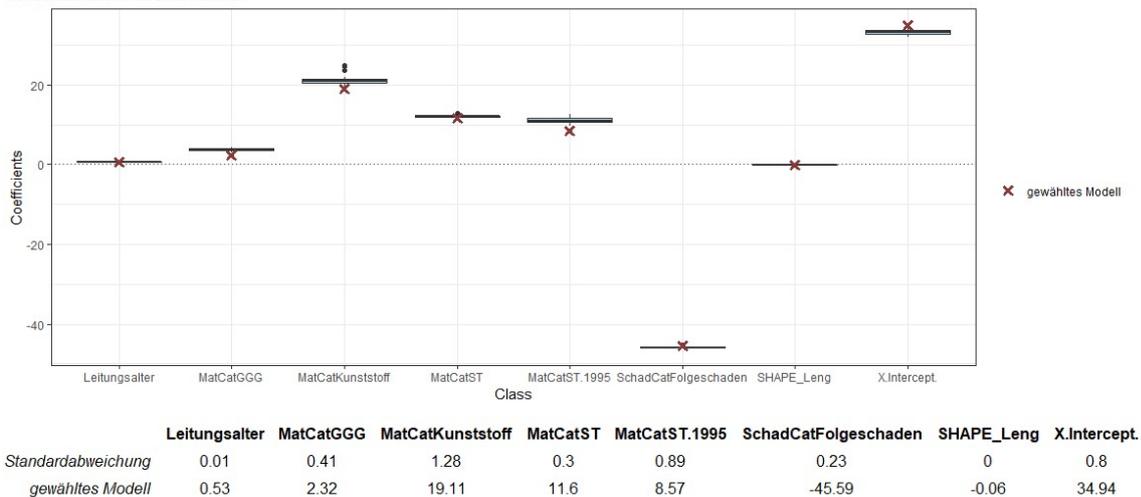


Abbildung 5-11: Variation der Koeffizienten des logistischen Modells

Trotz dem nicht nachvollziehbaren Koeffizienten für das Alter, weist das logistische Modell relativ vielversprechende ROC-Kurven auf, wie in Abbildung 5-12 ersichtlich ist. Jedoch ist die Vorhersagequalität des Modells nicht so gut wie jene des Weibull- oder des Exponential-Modells.

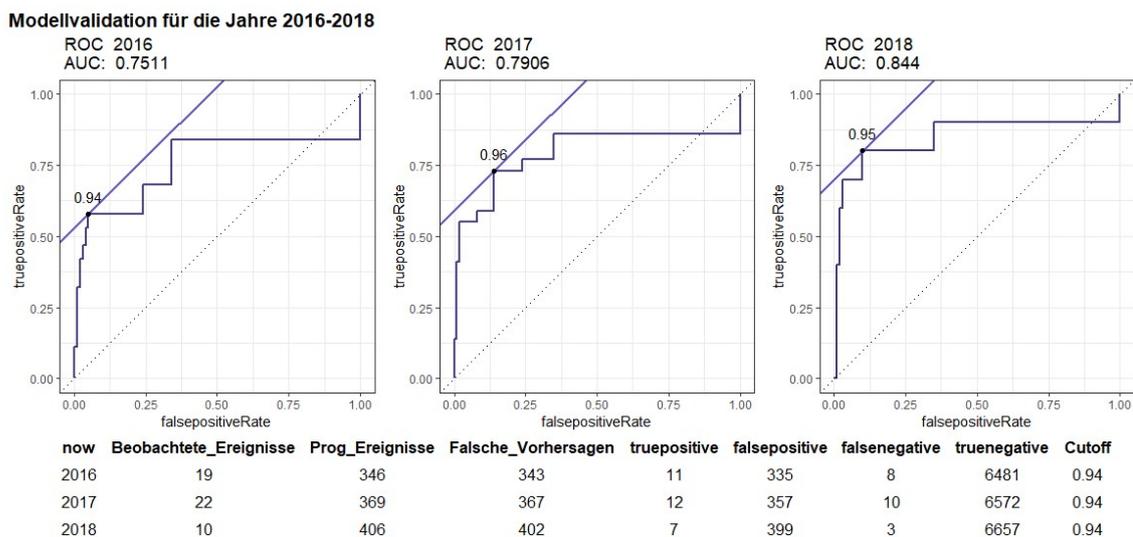


Abbildung 5-12: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das logistische-Modell

5.1.2.2.4 Cox-Modell

Im Falle des Cox-Modells wird die Überlebenskurve modelliert, deshalb ergeben sich hier die Koeffizienten mit umgedrehtem Vorzeichen im Vergleich zu den vorherigen Modellen. In Abbildung 5-13 sind die Koeffizienten des Cox-Modells ersichtlich. Auch hier ergibt sich wie vorher schon beim logistischen Modell ein Koeffizient für das Leitungsalter, der älteren Leitungen eine höhere Überlebenswahrscheinlichkeit prognostiziert als jungen Leitungen. Die restlichen Koeffizienten sind jedoch plausibel. Wie bei den vorherigen Modellen streuen die Werte nur sehr gering. Somit ist ein relativ stabiles Modell vorhanden.

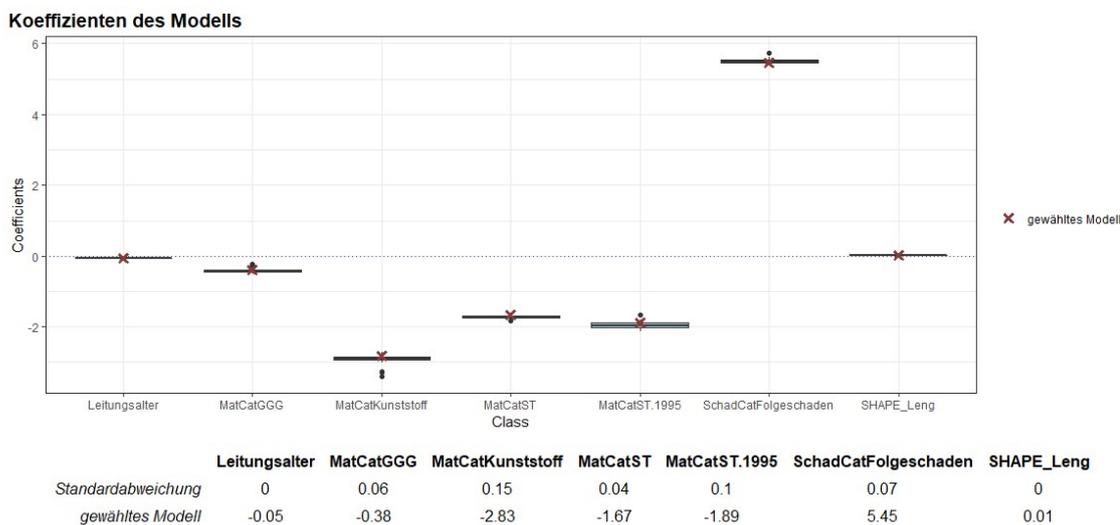


Abbildung 5-13: Variation der Koeffizienten des Cox-Modells

In Abbildung 5-14 sind die ROC-Kurven für das Cox-Modell ersichtlich. Diese sind noch etwas schlechter als jene des logistischen Modells.

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018

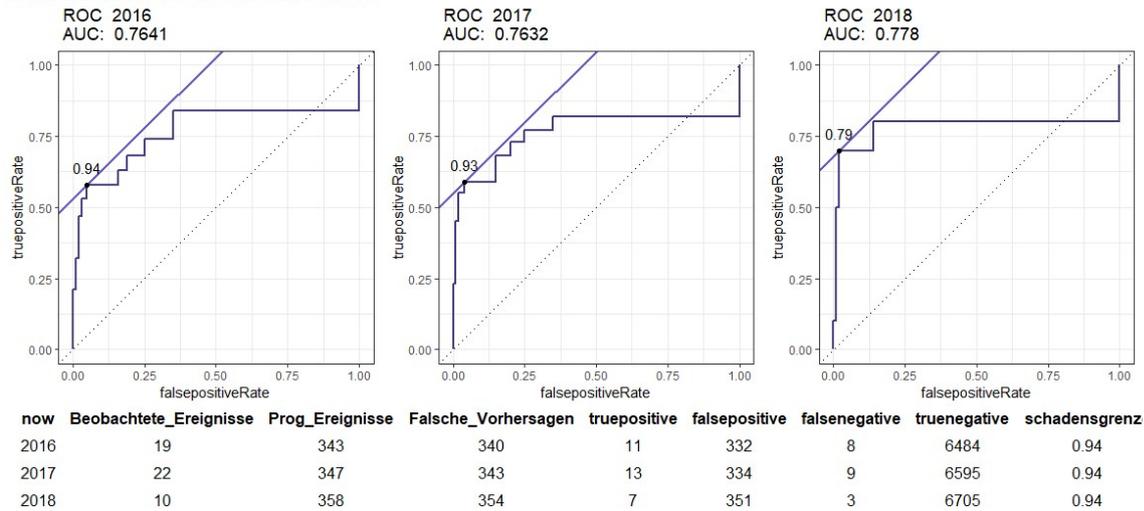


Abbildung 5-14: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Cox-Modell

5.1.3 Getrenntes Erst- und Folgeschadensmodell

Beim getrennten Erst- und Folgeschadensmodell wird je ein Modell für die Erstschäden und eines für die Folgeschäden verwendet. Im folgenden Teil wird auf die Kalibrierung dieser eingegangen. Es werden alle vier Modellansätze jeweils für das Erst- und das Folgeschadensmodell geprüft. Daraufhin wird wie bei der kombinierten Variante wieder die Variation der Koeffizienten und ihre Plausibilität geprüft und die Validation der jeweiligen Modelle diskutiert.

5.1.3.1 Kalibration

Für diese Modellvariante wurde die Kalibrierung für ein Erstschadensmodell und ein Folgeschadensmodell ausgeführt.

Die verschiedenen Kombinationen von Einflussparametern für das Erstschadensmodell sind in Tabelle 5-2 ersichtlich. In diesem Fall hat sich das Modell mit den Einflussparametern Material, Leitungsalter und Leitungslänge als das Beste herausgestellt. Dabei ist ein gutes Gleichgewicht an Sparsamkeit, in Bezug auf die Menge der verwendeten Einflussparameter und der Modellqualität, vorhanden.

Für das Folgeschadensmodell sind die verschiedenen Kombinationen von Einflussparametern in Tabelle 5-3 ersichtlich. Als bestes Modell wird das Einbeziehen von Material in Kombination mit dem Durchmesser gewählt.

Tabelle 5-2: Kalibrierung und Wahl der Einflussparameter für das Erstschadensmodell

Erstschadens-Modell		Logistisch		Weibull		Cox-Modell		Modellvarianten								
Exponential		parametric proportional Hazard-Modelle		Güteparameter		semiparametric proportional H.-Modell		Güteparameter		einbezogene Modellparameter für die Modellkalibrierung						
Güteparameter	AIC* ¹	Chi ² -Test* ²	AIC* ¹	Chi ² -Test* ²	AIC* ¹	Chi ² -Test* ²	AIC* ¹	Likelihood Ratio Test* ³	Wald Test* ⁴	Harrel's C-Index* ⁵	Material Kategorie	Dimmensions Kategorie	Aggressivität des Bodens	Schwer- verkehr	Leitungs- länge	Leitungs- alter
2318	233	1980	313	2007	311	2063	289	311	0.811	x	x	x	x	x	x	x
2316	233	1978	313	2006	310	2061	289	311	0.811	x	x	x	x	x	x	x
2314	232	1977	313	2006	308	2060	288	311	0.812	x	x	x	x	x	x	x
2315	230	1979	309	2008	304	2060	286	310	0.804	x	x	x	x	x	x	x
2315	228	2074	219	2089	212	2135	208	261	0.735	x	x	x	x	x	x	x
2316	228	2075	220	2091	213	2137	208	262	0.735	x	x	x	x	x	x	x
2360	181	2119	171	2133	167	2189	153	164	0.661	x	x	x	x	x	x	x
2366	169	2106	172	2126	169	2158	178	251	0.709	x	x	x	x	x	x	x
2317	238	1979	317	2012	311	2061	295	318	0.816	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x	x
2318	236	2069	226	2090	222	2131	223	271	0.746	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x	x
2320	229	2078	220	2095	213	2141	209	263	0.738	x	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x* ¹	x	x

*¹ ... Ein gutes Modell wird durch ein niedriges Akaike Informationskriterium ausgezeichnet

*² ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Chi²-T-Test-Prüfgröße ausgezeichnet

*³ ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Likelihood-Ratio-T-Test-Prüfgröße ausgezeichnet

*⁴ ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Wald-T-Test-Prüfgröße ausgezeichnet

*⁵ ... Ein gutes Modell wird durch einen hohen Harrel's C-Index ausgezeichnet (max=1,00)

Tabelle 5-3: Kalibrierung und Wahl der Einflussparameter für das Folgeschadensmodell

Folgeschadens-Modell														
Exponential			Weibull			Cox-Modell			Modellvarianten					
parametric proportional Hazard-Modelle			semiparametric proportional H.-Modell			einbezogene Modellparameter für die Modellkalibrierung			Modellparameter					
Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Güteparameter	Likelihood Ratio Test**3	Wald Test**4	Harrell's C-Index**5	Material Kategorie	Dimensions Kategorie	Aggressivität des Bodens	Schwer- verkehr	Leitungs- länge	Leitungs- alter
AIC*1	Chi ² -Test**2	AIC*1	Chi ² -Test**2	AIC*1	Chi ² -Test**2	AIC*1								
438	126	573	132	372	66	742	90	2797	0.761	x	x	x	x	x
434	126	572	132	370	66	740	90	2806	0.761	x	x	x	x	x
433	125	570	132	369	65	739	89	2825	0.765	x	x	x	x	x
431	125	568	131	367	65	737	89	2850	0.762	x	x	x	x	x
429	125	567	131	366	64	735	89	2897	0.758	x	x	x	x	x
439	113	573	123	370	58	740	82	2722	0.716	x				
481	67	637	54	398	28	776	42	28	0.679		x			
446	113	581	123	375	59	747	83	6987	0.72	x*1		x*1		
484	68	640	56	400	30	779	43	32	0.692					x*1
432	128	568	136	369	65	734	92	3668	0.759	x*1				x*1

*1 ... Ein gutes Modell wird durch ein niedriges Akaike Informationskriterium ausgezeichnet
 *2 ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Chi²-T-Test-Prüfgröße ausgezeichnet
 *3 ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Likelihood-Ratio-Test-Prüfgröße ausgezeichnet
 *4 ... Ein gutes Modell wird durch eine hohe Wald-Test-Prüfgröße ausgezeichnet
 *5 ... Ein gutes Modell wird durch einen hohen Harrell's C-Index ausgezeichnet (max=1,00)

5.1.3.2 Validierung

Im Folgenden wird die Validation und die Ergebnisse der Cross Validation für das Erst- und das Folgeschadensmodell erläutert.

5.1.3.2.1 Weibull-Modell Erstschaaden

In Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 sind die Koeffizienten und die Qualität des Weibull-Erstschaadenmodells ersichtlich. Abgesehen vom Leitungsalter sind hier wieder alle Koeffizienten nachvollziehbar und die Variation der Koeffizienten hält sich in akzeptablen Grenzen.

Die Aussagekraft des Modells ist ausreichend wie aus den ROC-Kurven und den AUC-Werten ersichtlich ist.

Wird das Leitungsalter nicht mit einbezogen, verschlechtert sich die Modellqualität und auch die restlichen Koeffizienten werden unplausibel. So werden dann beispielsweise auch die Stahlleitungen, welche nach 1995 verlegt wurden, als schadensanfälliger als Graugussleitungen bewertet. Somit wird auf das Einbeziehen des Leitungsalters nicht verzichtet. Dies ist auch, außer beim Exponentialmodell, bei den anderen Erstschaadenmodellen zu beobachten.

Koeffizienten des Modells

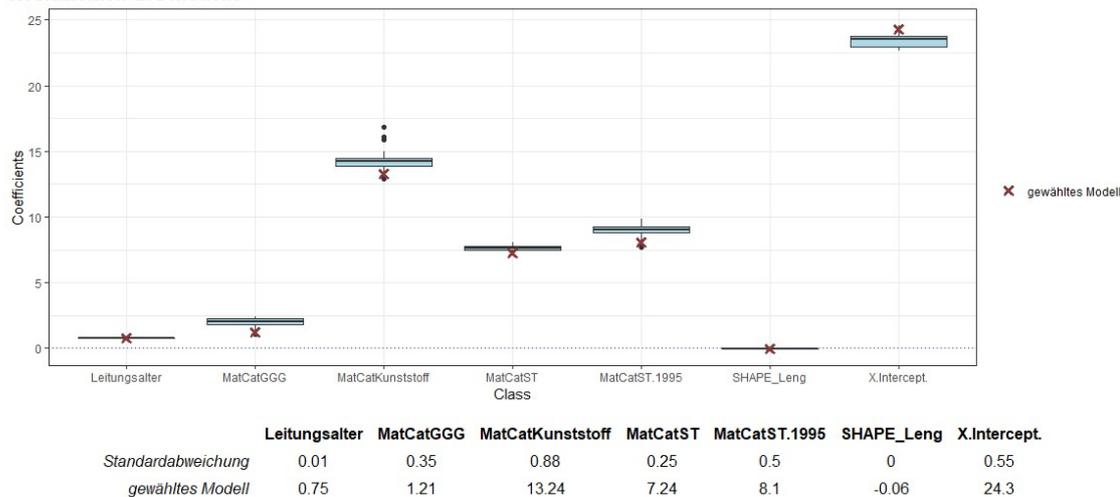


Abbildung 5-15: Variation der Koeffizienten des Weibull-Erstschaadenmodells

Ergebnisse und Diskussion

Modellvalidierung für die Jahre 2016-2018

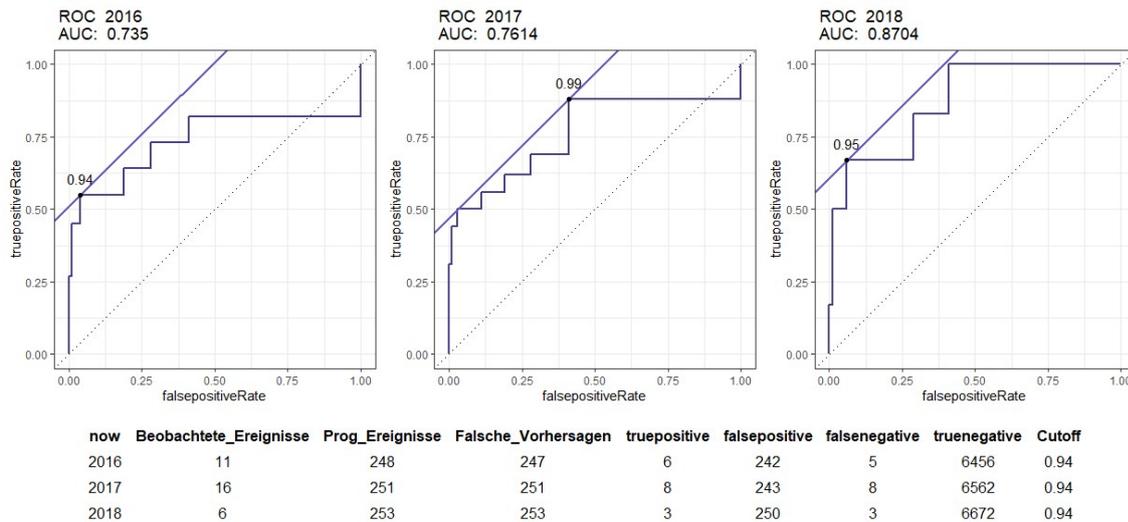


Abbildung 5-16: ROC-Kurven der Validierungsjahre für das Weibull-Erstschadensmodell

5.1.3.2.2 Weibull-Modell Folgeschaden

Folgeschäden sind lediglich für Grauguss, Sphäroguss und Stahlleitungen verzeichnet. Deshalb ergeben sich nur für diese Koeffizienten. Alle Koeffizienten sind nachvollziehbar, wie in Abbildung 5-17 ersichtlich ist. Die Variation der Koeffizienten ist bis auf einen Ausreißer gering.

Koeffizienten des Modells

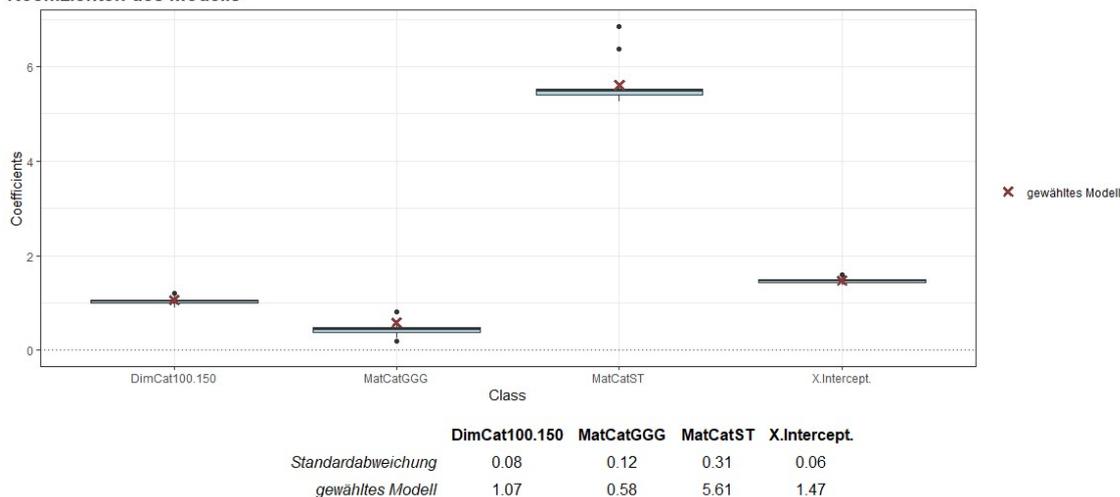


Abbildung 5-17: Variation der Koeffizienten für das Weibull-Folgeschadensmodell

In Abbildung 5-18 sind die ROC-Kurven des Modells ersichtlich. Die Aussagekraft des Modells ist weniger gut als bei den Erstschäden. Jedoch werden richtige Aussagen getätigt. Es wird hier jedoch nicht mehr auf den Ideal Cutoff zurückgegriffen, sondern ein fixierter Cutoff von 0.7 genutzt. Vor allem in den Jahren 2017 und 2018 ist eine gute Trefferquote zu beobachten.

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018

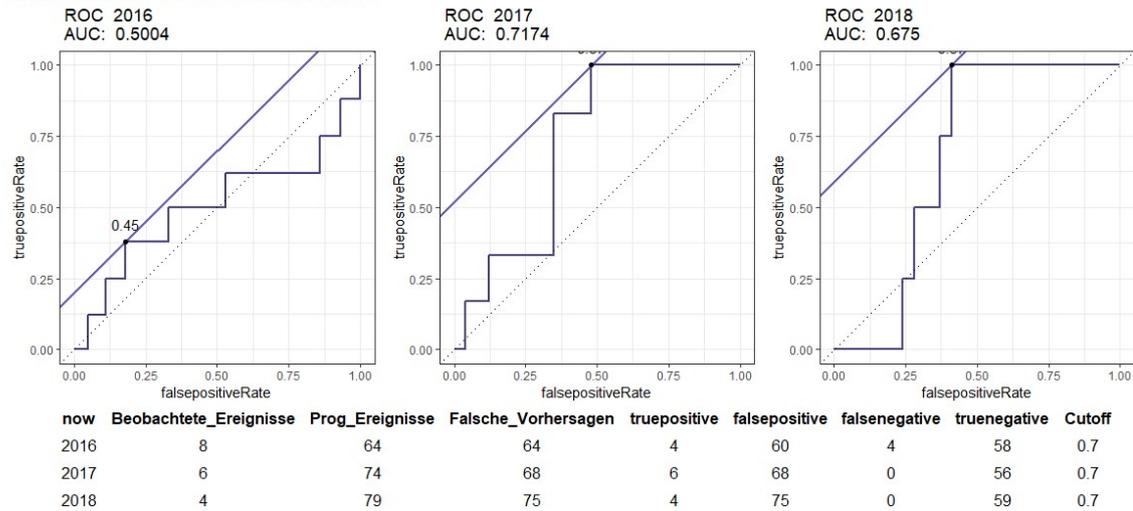


Abbildung 5-18: ROC-Kurven der Validationsjahre für das Weibull-Folgeschadensmodell

5.1.3.2.3 Exponential-Modell Erstschaden

Das Exponential-Erstschadensmodell weist durchgängig nachvollziehbare Koeffizienten auf, wie in Abbildung 5-19 ersichtlich ist. Die Variation der Koeffizienten ist dabei wieder gering.

Koeffizienten des Modells

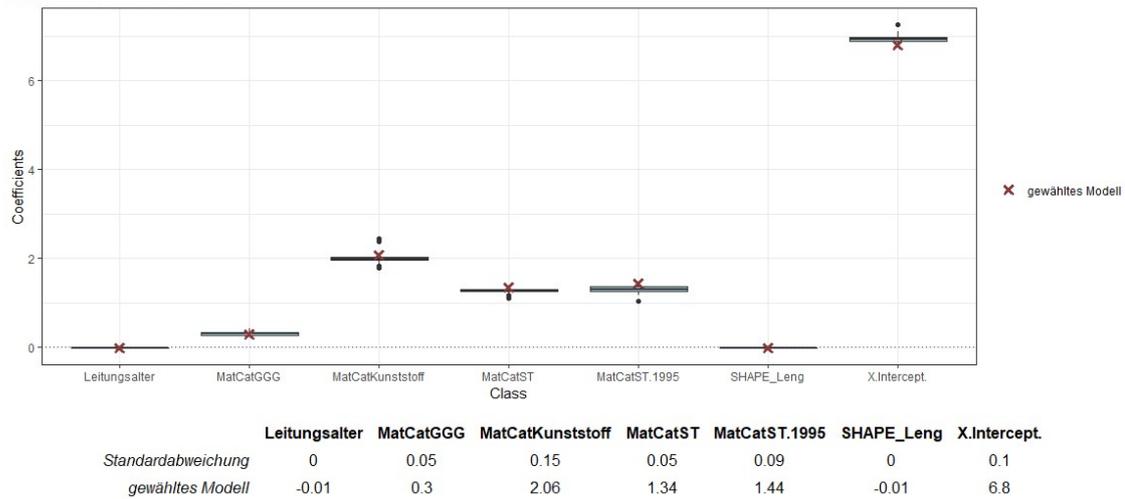


Abbildung 5-19: Variation der Koeffizienten des Exponential-Erstschadensmodells

Die ROC-Kurven des Exponential-Erstschadensmodells sind in Abbildung 5-20 ersichtlich. Die Aussagekraft des Modells ist wiederum ausreichend, wie die AUC-Werte nahelegen.

Ergebnisse und Diskussion

Modellvalidierung für die Jahre 2016-2018

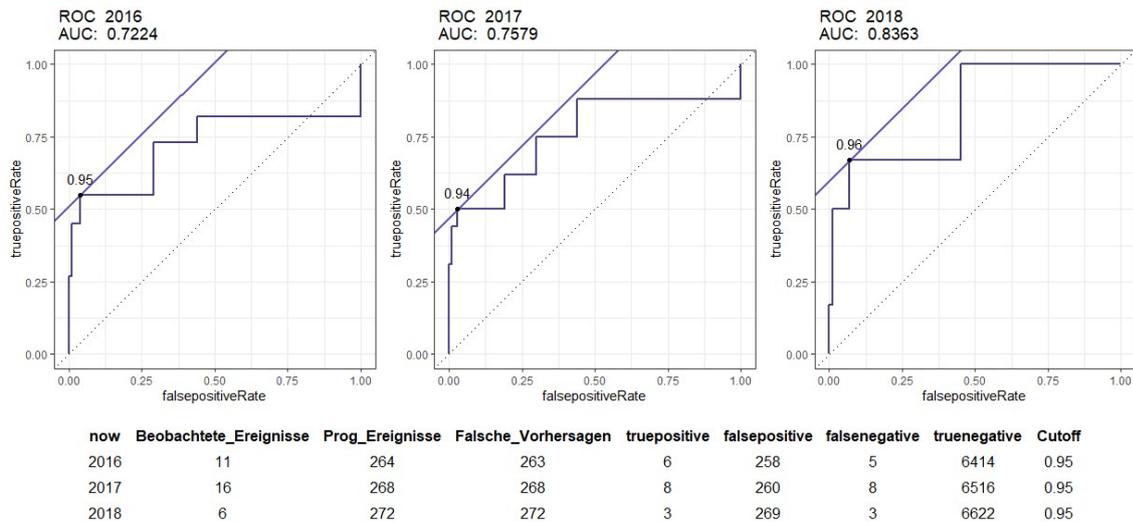


Abbildung 5-20: ROC-Kurven des Exponential-Erstschadensmodells

5.1.3.2.4 Exponential-Modell Folgeschaden

In Abbildung 5-21 sind die Koeffizienten des Exponentiell-Folgeschadensmodells und ihre Variationen ersichtlich. Die Variation erweist sich als sehr gering. Die Koeffizienten sind alle nachvollziehbar.

Koeffizienten des Modells

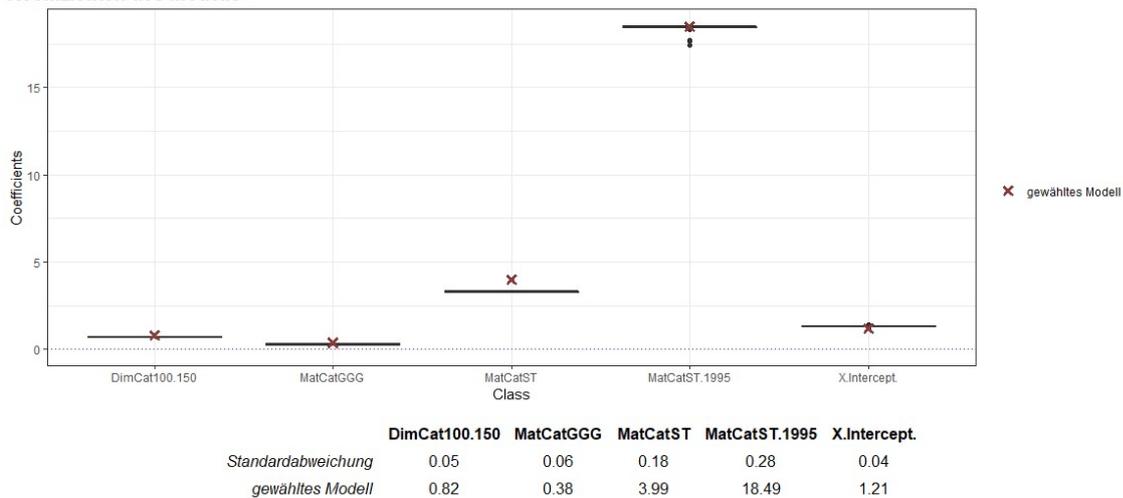


Abbildung 5-21: Variation der Koeffizienten des Exponential-Folgeschadensmodells

Die ROC-Kurve des Modells ist in Abbildung 5-22 ersichtlich. Wiederum ist die Aussagekraft nicht so gut wie im Erstschadensmodell. Jedoch ist dem Modell dennoch Aussagekraft zu bescheinigen. Wie schon beim Weibull-Modell ist ein fixer Cutoff von 0.7 gewählt. Dabei ist für die Jahre 2017 und 2018 eine sehr gute Trefferquote zu beobachten.

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018

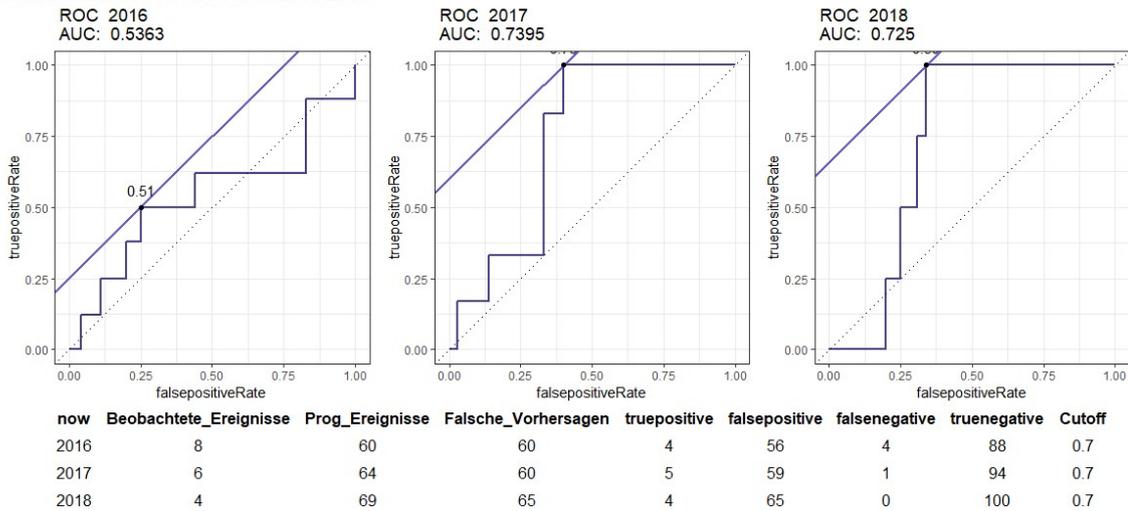


Abbildung 5-22: ROC-Kurven des Exponential-Folgeschadensmodells

5.1.3.2.5 Logistisches Modell Erstschaaden

Wie in Abbildung 5-23 ersichtlich ist, sind die Koeffizienten des logistischen Erstschaadenmodells wieder plausibel bis auf das Leitungsalter. Dabei weist, jedoch wiederum dieses Modell die mit Abstand besten Ergebnisse auf, somit wird dies akzeptiert.

Koeffizienten des Modells

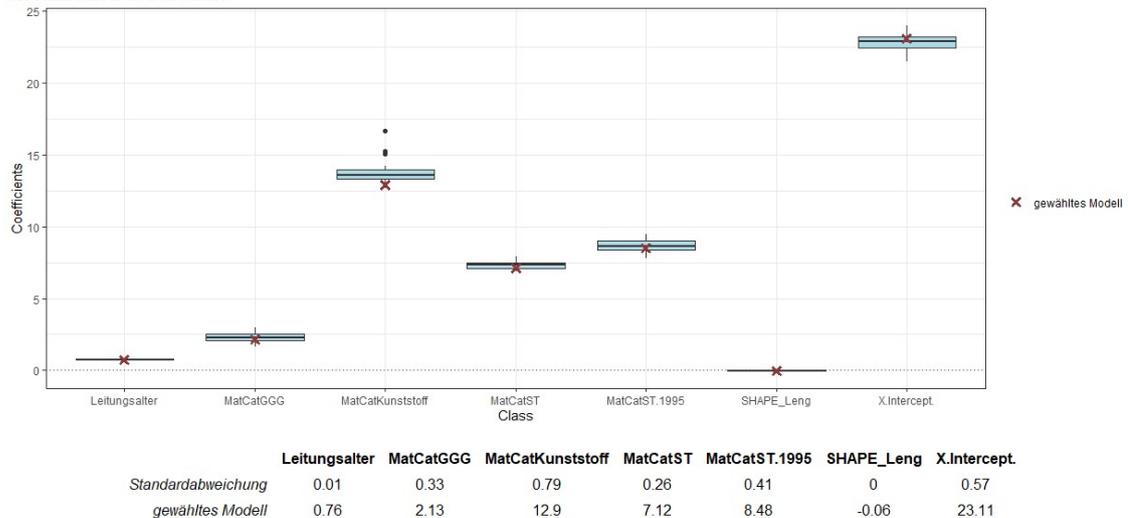


Abbildung 5-23: Variation der Koeffizienten des logistischen Erstschaadenmodells

Die ROC-Kurven welche in Abbildung 5-24 ersichtlich sind, zeigen eine gute Vorhersagequalität.

Ergebnisse und Diskussion

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018

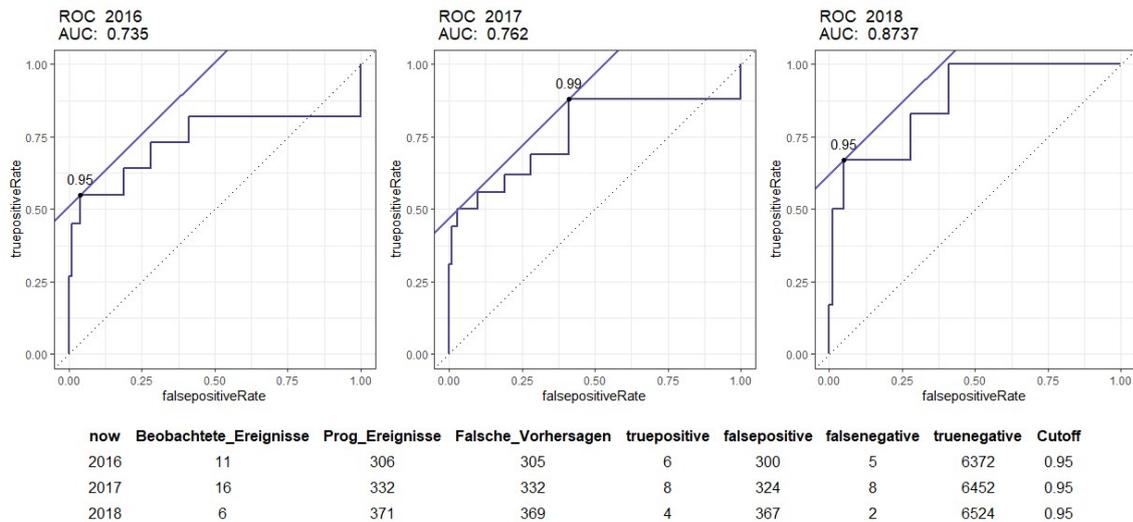


Abbildung 5-24: ROC-Kurven des logistischen Erstschadensmodells

5.1.3.2.6 Logistisches Modell Folgeschaden

Die Koeffizienten des logistische Folgeschadensmodells sind in Abbildung 5-25 ersichtlich. Die Variation ist gering und die Koeffizienten sind wiederum nachvollziehbar.

Koeffizienten des Modells

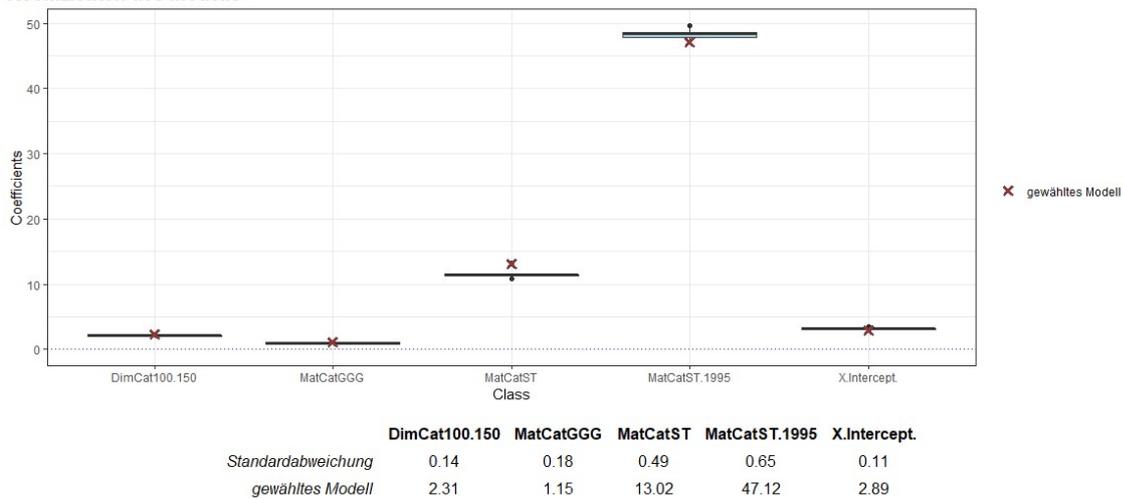


Abbildung 5-25: Variation der Koeffizienten des logistischen Folgeschadensmodells

Wie bei den vorherigen Modellen, weist das Folgeschadensmodell eine schlechtere Vorhersagequalität auf als das Erstschadensmodell. Dies ist in Abbildung 5-26 ersichtlich. Der Cutoff ist abermals auf 0.7 gesetzt. Dabei sind in den Jahren 2017 und 2018 sehr gute Trefferquoten zu beobachten.

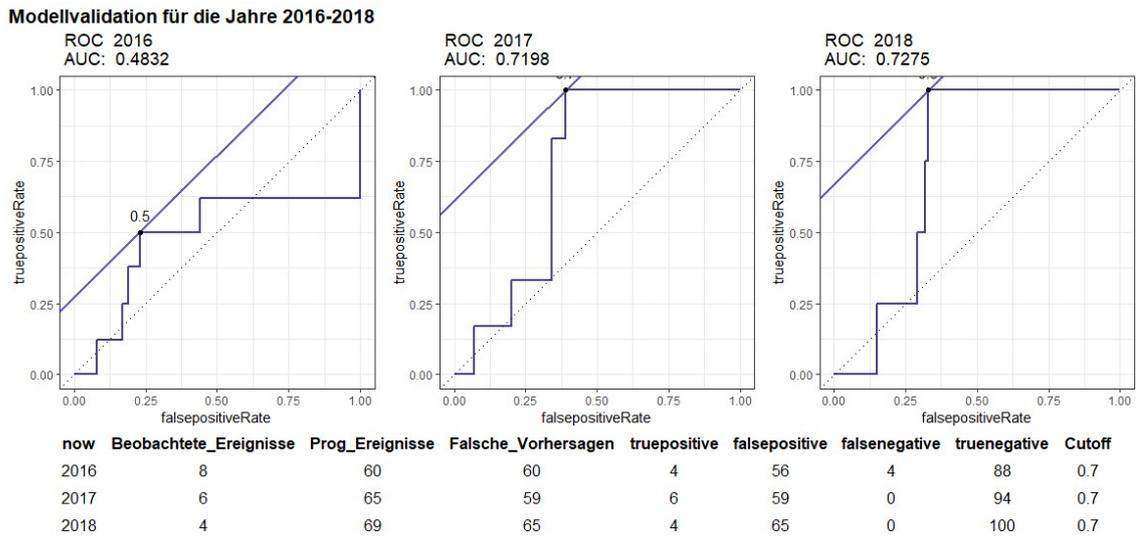


Abbildung 5-26: ROC-Kurven des logistischen Folgeschadensmodells

5.1.3.2.7 Cox-Modell Erstschaden

In Abbildung 5-27 sind die Koeffizienten des Cox-Erstschadensmodells und ihre Variation ersichtlich. Die Variation ist relativ gering und die Koeffizienten sind mit Ausnahme des Leitungsalters plausibel. Der unplausible Koeffizient des Leitungsalters wird jedoch aufgrund der guten Modellqualität, die in Abbildung 5-28 ersichtlich ist, akzeptiert. Die ROC-Kurven zeigen eine gute Vorhersagequalität des Modells. Dabei sind zudem, um beinahe ein Drittel weniger falsche Aussagen zu beobachten als bei den anderen Erstschadensmodellen.

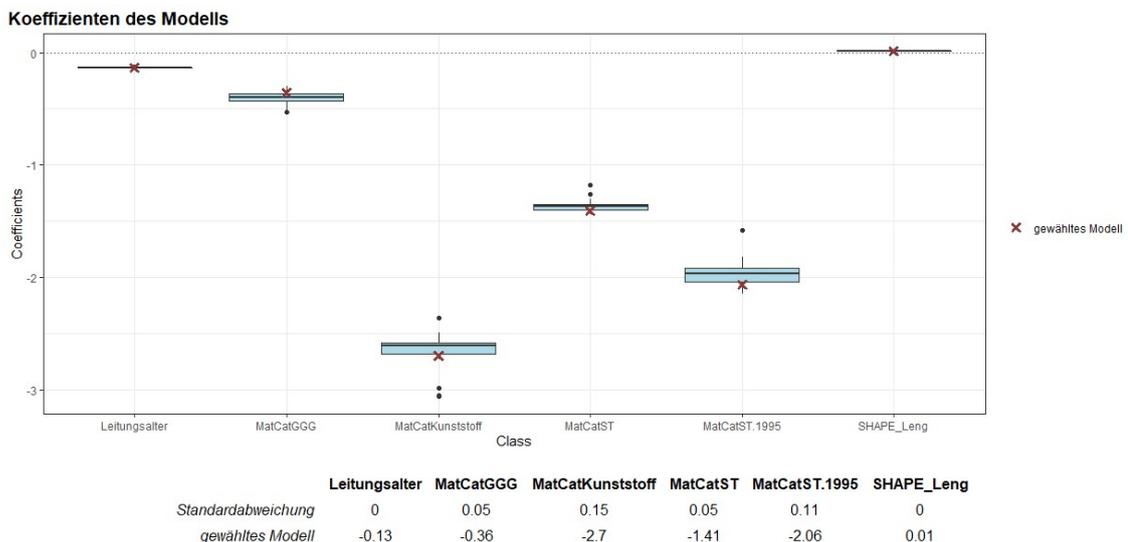


Abbildung 5-27: Variation der Koeffizienten des Cox-Erstschadensmodells

Ergebnisse und Diskussion

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018

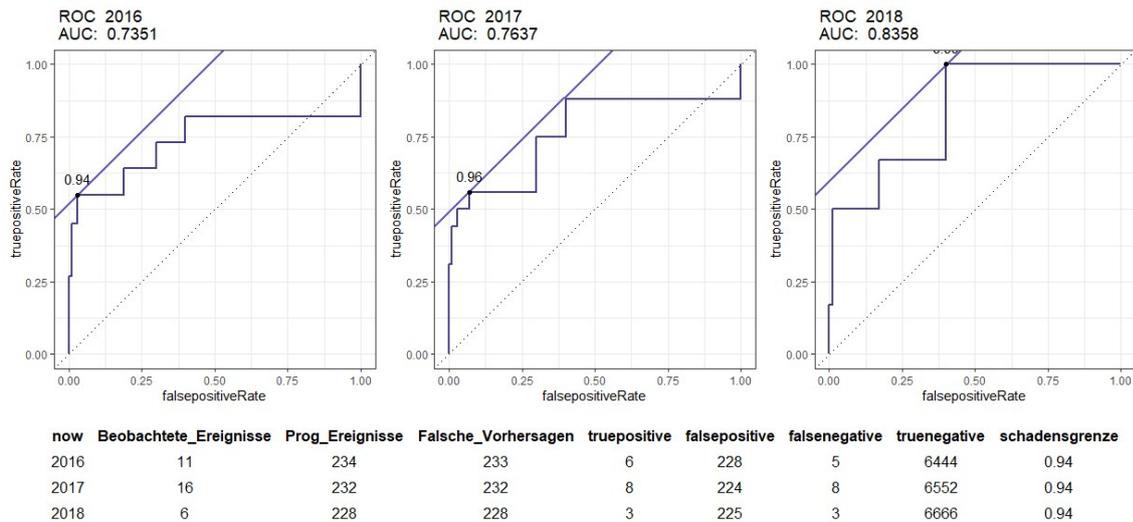


Abbildung 5-28: ROC-Kurven des Cox-Erstschadensmodells

5.1.3.2.8 Cox-Modell Folgeschaden

Die Variation der Koeffizienten erweist sich als sehr gering, wie in Abbildung 5-29 ersichtlich ist. Die Koeffizienten sind dabei alle plausibel.

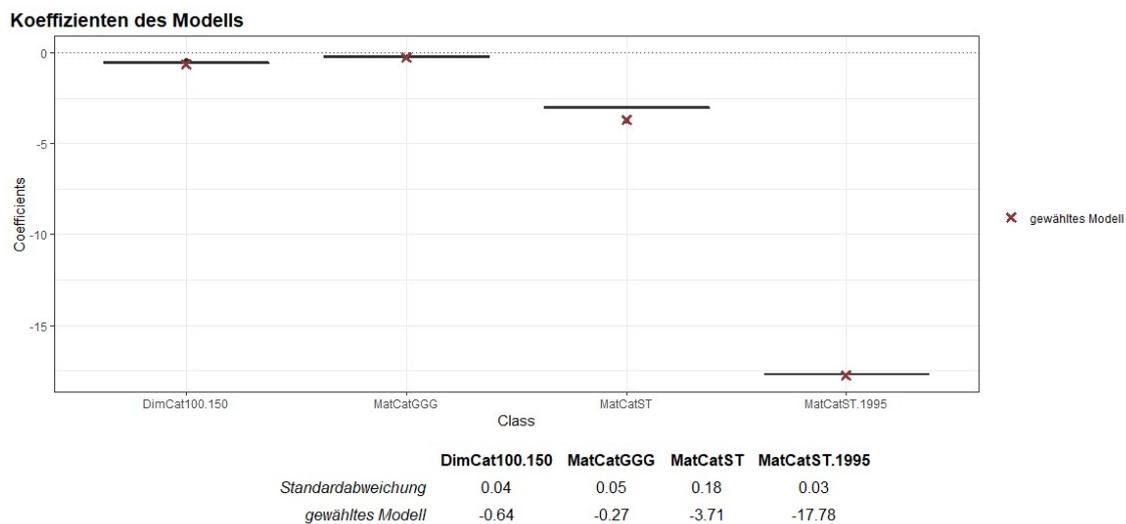
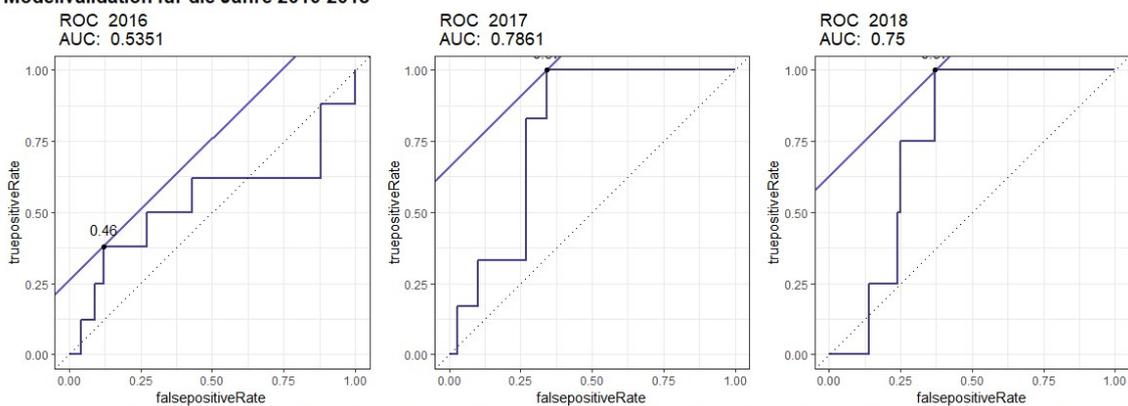


Abbildung 5-29: Variation der Koeffizienten des Cox-Folgeschadensmodells

Die ROC-Kurven, die in Abbildung 5-30 ersichtlich sind weisen abermals eine schlechtere Aussagekraft als die Erstschadensmodelle auf. Jedoch zeigen die AUC-Werte, dass eine ausreichende Vorhersagequalität vorhanden ist. Es wird hier wiederum ein Cutoff von 0.7 gewählt. Bei den Jahren 2017 und 2018 sind dabei sehr gute Trefferquoten erkennbar.

Modellvalidation für die Jahre 2016-2018



now	Beobachtete_Ereignisse	Prog_Ereignisse	Falsche_Vorhersagen	truepositive	falsepositive	falsenegative	truenegative	schadensgrenz
2016	8	68	66	5	63	3	81	0.7
2017	6	75	69	6	69	0	84	0.7
2018	4	81	77	4	77	0	88	0.7

Abbildung 5-30: ROC-Kurven des Cox-Folgeschadensmodells

5.1.4 Modellvergleich

Als Kennwert der Modellqualität wird das Verhältnis von Truepositive und falschen Vorhersagen betrachtet. In Tabelle 5-4 ist der Vergleich der kombinierten Erst- und Folgeschadensmodelle ersichtlich. Dabei weist das Cox-Modell das beste Verhältnis an richtigen zu falschen Vorhersagen auf.

Tabelle 5-4: Vergleich der kombinierten Erst- und Folgeschadensmodellen

Modellvergleich

Vergleich der Modelle an Hand von richtigen (TP - true positive) und falschen (FV - Falsche Vorhersagen) Vorhersagen

Modellparameter

Gesamtmodell:

Material, Leitungslänge und Leitungsalter

		Gesamtmodell	TP/FV	
Cox-Modell	TP		31	0,030
	FV		1017	
logistisches Modell	TP		30	0,027
	FV		1112	
Weibull-Modell	TP		34	0,028
	FV		1251	
Exponential-Modell	TP		34	0,028
	FV		1234	

In Tabelle 5-5 ist der Vergleich und die Wahl der Kombination der verschiedenen Erst- und Folgeschadensmodelle dargestellt. Dabei weist das Cox-Modell das beste Verhältnis an Truepositives und falschen Vorhersagen von den Erstscha-densmodellen auf. Bei den Folgeschadensmodellen weist wieder das Cox-Modell das beste Verhältnis auf. Als beste Kombination erweist sich jedoch das Cox-Modell als Erstscha-densmodell und das Weibull-Modell als Folgeschadensmo-dell.

Tabelle 5-5: Modellvergleich der getrennten Erst- und Folgeschadensmodelle

Modellvergleich					
Vergleich der Modelle an Hand von richtigen (TP - true positive) und falschen (FV - false positive) Vorhersagen					
Modellparameter					
Erstschadensmodell: Material, Leitungslänge und Leitungsalter					
Folgeschadensmodell: Material und Dimension					
		Erstschaden	TP/FP	Folgeschaden	TP/FP
Cox-Modell	TP	17	0,025	13	0,074
	FV	693		176	
logistisches Modell	TP	18	0,018	13	0,073
	FV	1006		177	
Weibull-Modell	TP	17	0,023	15	0,073
	FV	751		206	
Exponential-Modell	TP	17	0,021	13	0,073
	FV	803		179	
		Erstschaden	TP/FV	Folgeschaden	TP/FV
gewählte Kombination 1 (Cox + Cox)	TP	17	0,025	13	0,074
	FV	693		176	
gewählte Kombination 2 (Cox + Weibull)	TP	17	0,025	15	0,073
	FV	693		206	
Gesamtmodell 1 (Cox + Cox)	TP	30	0,035		
	FV	869			
Gesamtmodell 2 (Cox + Weibull)	TP	32	0,036		
	FV	899			

Die beste Modellvariante stellt, die in Tabelle 5-5 ersichtliche, Kombination des Cox-Erstschadens- und des Weibull-Folgeschadensmodells dar. Es übertrifft dabei das in Tabelle 5-4 ersichtliche kombinierte Erst- und Folgeschadens-Cox-Modell. Damit wird in der Folge, das in Tabelle 5-5 ersichtliche Gesamtmodell 2, verwendet.

5.1.5 Prognose und Evaluierung

Für die Prognose wird das Trennmodell gewählt. Dabei wird für Erstschäden das Cox-Modell und für die Folgeschäden das Weibull-Modell genutzt. Der genutzte Prognosedatensatz wird in Kapitel 3.2.2 erklärt. Die dafür erstellte Prognose ist in Abbildung 5-31 ersichtlich. Schäden werden vor allem bei Graugussleitungen und Sphärogussleitungen, sowie Leitungen mit Vorschäden prognostiziert. (siehe Abbildung 5-32).

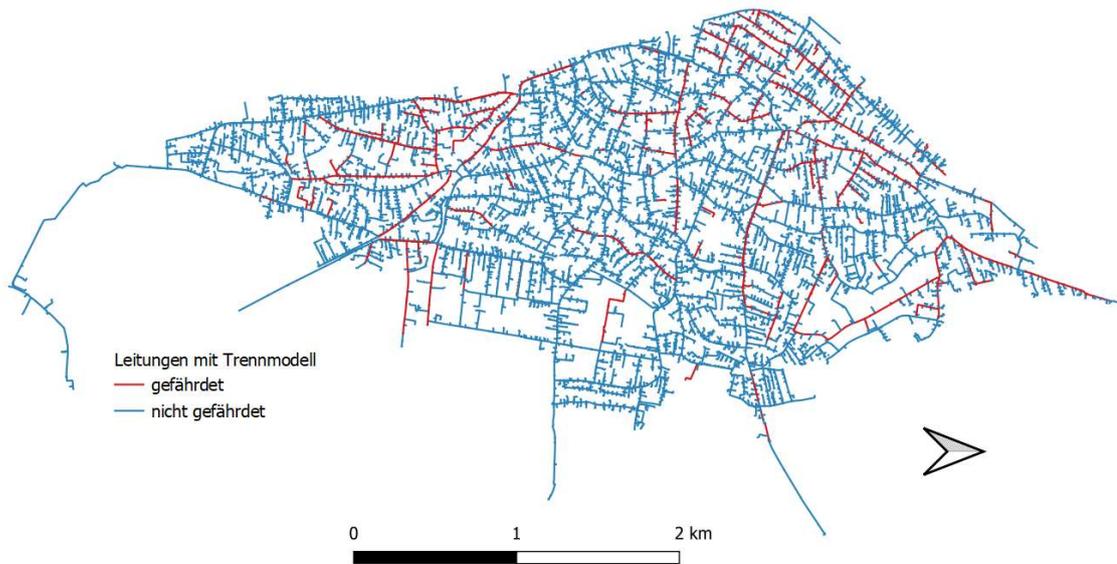


Abbildung 5-31: Karte der Leitungen mit prognostizierter Gefährdung

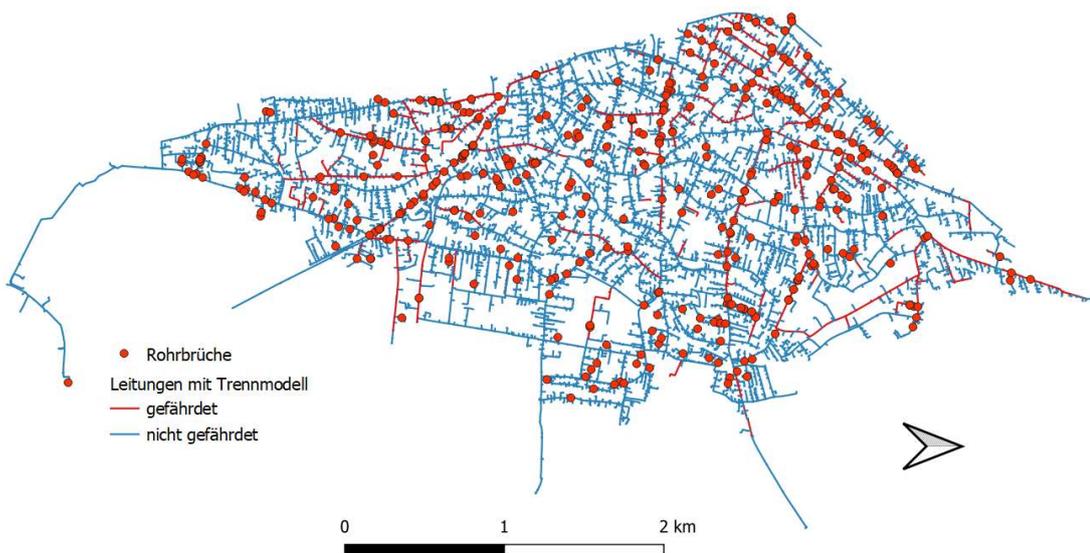


Abbildung 5-32: Karte der im Beobachtungszeitraum erhobenen Rohrbruchdaten mit den prognostizierten Gefährdungen

5.2 ERIX

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Ermittlung des Erneuerungsindex ERIX. Zunächst werden die Fragebögen behandelt. Daraufhin werden die ermittelten Gewichte erklärt. Abschließend werden die beiden Varianten mit und ohne Schadensprognosemodellen behandelt, um diese anschließend zu vergleichen.

5.2.1 Gewichte

Die Fragebögen, welche in Anhang A zu finden sind, wurden an 6 Ingenieure und Bauleiter, die sich am Wasserversorgungsnetz betätigen, und einen Wassermeister verteilt.

Die Gewichtungen der vier Kriterien, die sich bei der Auswertung der Fragebögen ergaben, sind in Abbildung 5-33 ersichtlich. Dabei ist deutlich zu sehen, dass das Kriterium Betrieb bei allen Beteiligten als sehr wichtig empfunden wird. Das Schadensausmaß wird auch von vielen als wichtig angesehen. Jedoch ist dabei eine starke Schwankung zu erkennen. Das Schadensprognosemodell und die Schadenswahrscheinlichkeit werden am unwichtigsten empfunden und werden etwa gleich bewertet. Die Einzelwerte dieser Auswertung sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Die Auswertung der verschiedenen Stakeholdergruppen zeigt dabei eine Uneinigkeit bei den Kriterien Schadensausmaß und Betrieb. Der Betrieb wurde von den Ingenieuren als wichtiger eingeschätzt, wobei der Wassermeister das Schadensausmaß als wichtiger empfindet. Die schlussendliche Gewichtung wird durch die Mittelung der Stakeholdergewichtungen errechnet.

Der Fragebogen trennt zwischen der Schadenswahrscheinlichkeit und dem Schadensprognosemodell, um die Möglichkeit einer getrennten Berücksichtigung zu erhalten. Für die Berechnung des ERIX werden beiden Kriterien gemeinsam betrachtet.

Gewichtungen der Kriterien

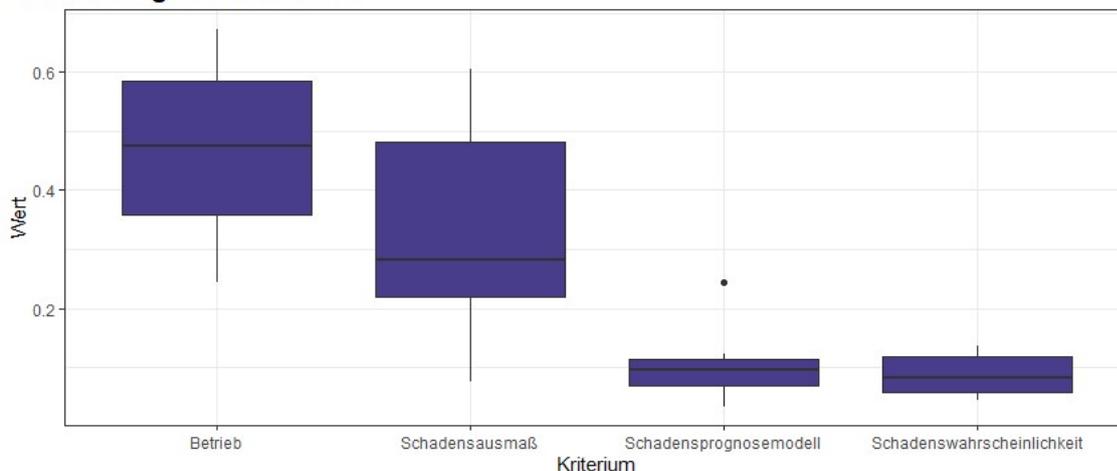


Abbildung 5-33: Variation der Gewichte in den Fragebögen

Tabelle 5-6: Gewichte der Kriterien. Einzelfragebögen sowie Auswertung für verschiedene Stakeholder und Gesamtgewichte

Gewichtungen					
	Schadenswahrscheinlichkeit	Schadensprognosemodell	Schadensausmaß	Betrieb	
Ingenieur 1	0.136	0.244	0.076	0.544	
Ingenieur 2	0.058	0.096	0.44	0.406	
Ingenieur 3	0.057	0.057	0.212	0.673	
Ingenieur 4	0.122	0.122	0.283	0.474	
Ingenieur 5	0.045	0.105	0.225	0.625	
Ingenieur 6	0.082	0.082	0.523	0.313	
Wassermeister 1	0.117	0.034	0.606	0.243	
Ingenieure	0.083	0.118	0.293	0.506	
Wassermeister	0.117	0.034	0.606	0.243	
Gesamtgewichte	0.100	0.076	0.449	0.375	

Die Gewichtungen der Subkriterien im Kriterium Schadenswahrscheinlichkeit ist in Abbildung 5-34 und Tabelle 5-7 ersichtlich. Die Kriterien Anzahl an Vorschäden und Material und Verlegegeneration wurden als am wichtigsten bewertet. Am unwichtigsten werden Durchmesser und Grundwassereinfluss betrachtet. Die restlichen Subkriterien werden als ähnlich wichtig gewertet. Aus den Gesamtgewichten werden die globalen Gewichte und die adaptierten globalen Gewichte berechnet. Die adaptierten globalen Gewichte stellen, wie in Kapitel 3.2.6 erläutert wird, die globalen Gewichte dar, die sich ergeben, wenn lediglich die in der ERIX-Berechnung verwendeten Subkriterien berücksichtigt werden. Diese zeigen, dass nach Ansicht der befragten Stakeholder den Einflussgrößen der Schadenswahrscheinlichkeit nur wenig Bedeutung bei der Erneuerungspriorisierung von Leitungen zukommt.

Gewichtungen des Kriteriums Schadenswahrscheinlichkeit

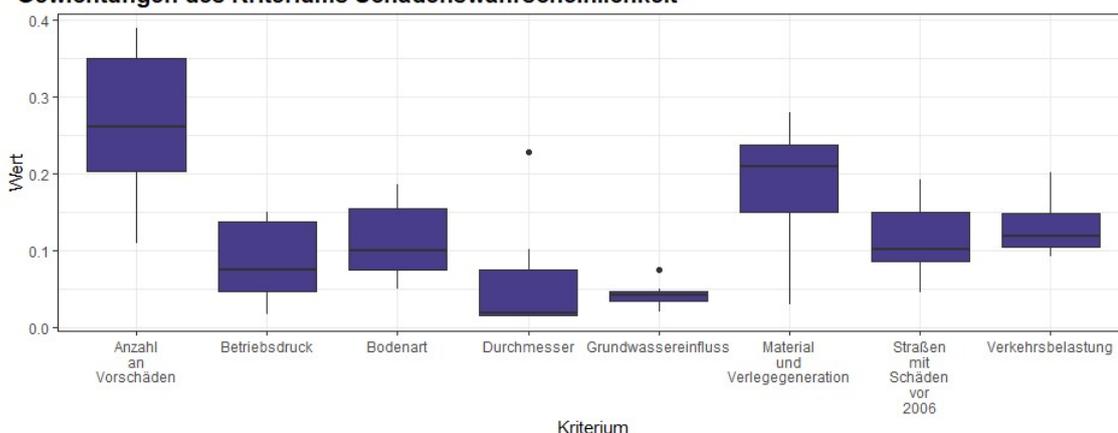


Abbildung 5-34: Variation der Gewichtungen für das Kriterium Schadenswahrscheinlichkeit

Tabelle 5-7: Gewichtungen für das Kriterium Schadenswahrscheinlichkeit. Ergebnisse der Fragebögen, Auswertung für Stakeholder, Gesamtgewichte sowie globale Gewichte

Schadenswahrscheinlichkeit								
	Anzahl an Vorschäden	Durchmesser	Material und Verlegegeneration	Betriebsdruck	Verkehrsbelastung	Grundwasserein- fluss	Bodenart	Straßen mit Schäden vor 2006
Ingenieur 1	0.261	0.018	0.209	0.017	0.101	0.043	0.185	0.166
Ingenieur 2	0.18	0.048	0.279	0.074	0.174	0.038	0.127	0.08
Ingenieur 3	0.388	0.016	0.116	0.149	0.121	0.03	0.05	0.132
Ingenieur 4	0.354	0.015	0.25	0.033	0.118	0.049	0.09	0.091
Ingenieur 5	0.346	0.228	0.029	0.129	0.091	0.074	0.06	0.044
Ingenieur 6	0.225	0.013	0.182	0.059	0.107	0.042	0.18	0.192
Wassermeister 1	0.109	0.101	0.224	0.145	0.200	0.019	0.100	0.102
Ingenieure	0.292	0.056	0.178	0.077	0.119	0.046	0.115	0.118
Wassermeister	0.109	0.101	0.224	0.145	0.200	0.019	0.100	0.102
Gesamtgewichte	0.200	0.078	0.201	0.111	0.160	0.033	0.108	0.110
Globale Gewichte	3.5%	1.4%	3.5%	2.0%	2.8%	0.6%	1.9%	1.9%
Adaptierte globale Gewichte	5.8%	2.3%	5.8%		4.6%	0.9%	3.1%	3.2%

Die Ergebnisse der Befragung zur Wichtigkeit des Schadensausmaßes in der Priorisierung von Leitungen für die Erneuerung werden in Abbildung 5-35 und Tabelle 5-8 behandelt. Dabei ist ersichtlich, dass die Redundanz das wichtigste Subkriterium darstellt, gefolgt vom Verlegebereich. Die Hausanschlussdichte wird mit geringer Streuung im Bereich von 10-20% bewertet. Der Betriebsdruck und der Durchmesser werden sehr ähnlich bewertet und belegen die letzten beiden Plätze. Somit wird die Erfüllung der Dienstleistung im Falle einer Leitungserneuerung als am wichtigsten empfunden. Durch das regelmäßig starke Verkehrsaufkommen wird auch der Verlegebereich als wichtig bewertet. Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen werden eher später erneuert, um einer Verstärkung des Verkehrsproblem auszuweichen. Die adaptierten globalen Gewichte zeigen, dass den Einflussgrößen des Schadensausmaßes ein sehr hohes Gewicht eingeräumt werden. Mit 32,3% ist dabei die Redundanz das mit Abstand wichtigste. Die Restlichen Subkriterien des Schadensausmaßes besitzen mit um die 10% jedoch auch einen großen Einfluss.

Die Subkategorie „Straßen mit Schäden vor 2006“ berücksichtigt, vom Lustenauer Wassermeister ausgewiesene Gebiete, in denen sich Leitungsschäden, die vor dem Jahr 2006 geschahen, ereignet haben. Dabei handelt es sich um eine

Zusammenstellung des Wassermeisters. Zur Berechnung des ERIX wird dieses Subkriterium mit dem Subkriterium Anzahl an Vorschäden zusammengefasst.

Gewichtungen des Kriteriums Schadensausmaß

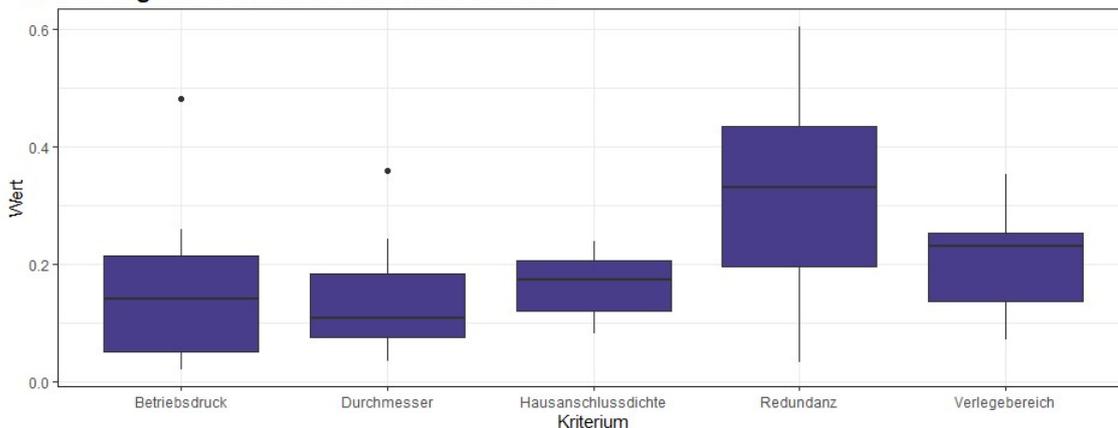


Abbildung 5-35: Variation der Gewichtungen für das Kriterium des Schadensausmaßes

Tabelle 5-8: Gewichtungen für das Kriterium Schadensausmaß. Ergebnisse der Fragebögen, Auswertung für Stakeholder, Gesamtgewichte sowie globale Gewichte

Schadensausmaß

	Verlegebereich	Durchmesser	Betriebsdruck	Hausanschlussdichte	Redundanz
Ingenieur 1	0.263	0.108	0.035	0.126	0.468
Ingenieur 2	0.23	0.065	0.065	0.239	0.4
Ingenieur 3	0.197	0.359	0.141	0.179	0.123
Ingenieur 4	0.353	0.126	0.021	0.232	0.268
Ingenieur 5	0.072	0.242	0.48	0.174	0.032
Ingenieur 6	0.244	0.086	0.258	0.081	0.331
Wassermeister 1	0.077	0.035	0.170	0.115	0.604
Ingenieure	0.227	0.164	0.167	0.172	0.270
Wassermeister	0.077	0.035	0.170	0.115	0.604
Gesamtgewichte	0.152	0.099	0.168	0.143	0.437
Globale Gewichte	6.8%	4.5%	7.6%	6.4%	19.6%
Adaptierte globale Gewichte	11.2%	7.4%		10.6%	32.3%

Die Gewichtungen der Subkriterien des Betriebs sind in Abbildung 5-36 und Tabelle 5-9 ersichtlich. Wasserverluste werden als am wichtigsten bewertet. Das Alter und nötige regelmäßige Spülungen werden als am unwichtigsten empfunden. Die restlichen Subkriterien werden alle ähnlich bewertet. In der Ermittlung des ERIX können lediglich das Alter und die Förderfähigkeit einbezogen werden. Die Förderfähigkeit erhält bei der Adaptierung der globalen Gewichte jedoch aufgrund der hohen Gewichtung des Betriebs ein Gewicht von 9,5% und hat somit

Ergebnisse und Diskussion

doch erheblichen Einfluss auf die Priorisierung. Das Alter jedoch hat mit 3,5% lediglich einen geringen Einfluss.

Gewichtungen des Kriteriums Betrieb

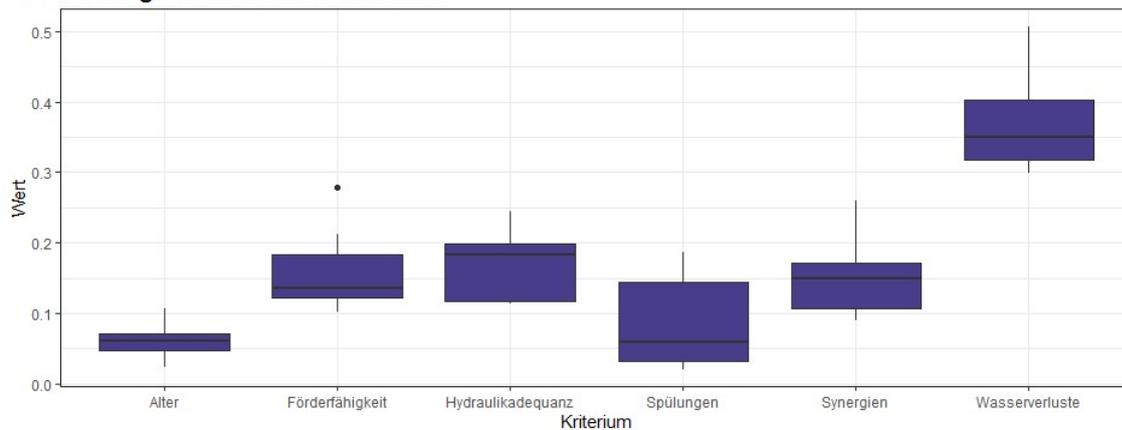


Abbildung 5-36: Variation der Gewichtungen für das Kriterium des Betriebes

Tabelle 5-9: Gewichtungen für das Kriterium Betrieb. Ergebnisse der Fragebögen, Auswertung für Stakeholder, Gesamtgewichte sowie globale Gewichte

	Betrieb					
	Alter	Wasser- verluste	Synergien	Spülungen	Förderfä- higkeit	Hydraulika- dequanz
Ingenieur 1	0.06	0.374	0.149	0.025	0.279	0.113
Ingenieur 2	0.066	0.433	0.115	0.038	0.102	0.245
Ingenieur 3	0.043	0.329	0.173	0.059	0.212	0.183
Ingenieur 4	0.075	0.307	0.098	0.176	0.156	0.188
Ingenieur 5	0.106	0.299	0.089	0.187	0.112	0.208
Ingenieur 6	0.024	0.35	0.26	0.114	0.132	0.119
Wassermeister 1	0.051	0.507	0.170	0.020	0.136	0.116
Ingenieure	0.062	0.349	0.147	0.100	0.166	0.176
Wassermeister	0.051	0.507	0.170	0.020	0.136	0.116
Gesamtgewichte	0.056	0.428	0.159	0.060	0.151	0.146
Globale Gewichte	2.1%	16.0%	5.9%	2.3%	5.6%	5.5%
Adaptierte globale Gewichte	3.5%				9.3%	

5.2.2 Vergleich der Resultate

In Abbildung 5-37 sind die Mengen der den Kategorien zugeordneten Gebiete, ersichtlich. Für die ERIX-Auswertung werden nicht mehr einzelne Leitungen betrachtet, sondern, wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, Gebiete. Diese Gebiete repräsentieren die sich darin befindenden Leitungen. Daraus ist ersichtlich, dass das Einbeziehen des Schadensprognosemodells zu einer Verschiebung einiger Gebiete in eine höhere Kategorie führt. Den größten Zuwachs verzeichnet dabei die höchste Kategorie, Kategorie 1.

Menge der Gebiete pro Variante für die Varianten ohne Modell und mit Modell

ERIX-Kategorie	mit Modell	ohne Modell
Kat 1	14	7
Kat 2	44	47
Kat 3	108	109
Kat 4	13	16

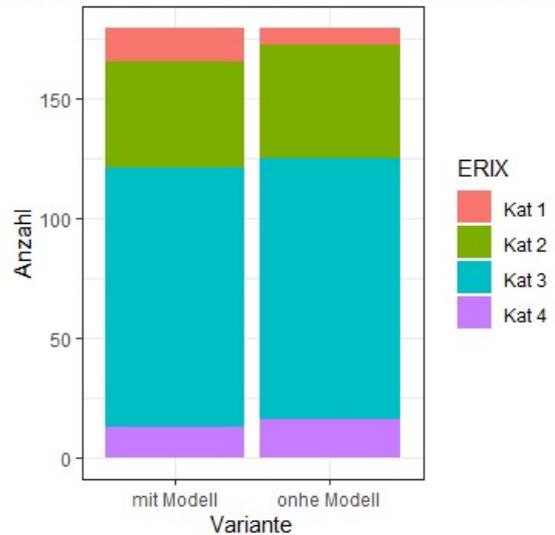


Abbildung 5-37: Vergleich der ERIX-Kategorien der Varianten mit Modell und ohne Modell

Abbildung 5-38 und Abbildung 5-39 stellen Übersichtskarten der Ergebnisse der Varianten dar. Dabei ist die Verschiebung in höhere Kategorien gut ersichtlich. Vor allem Gebiete mit alten Graugussleitungen und Gebiete mit vielen Leitungsschäden werden hier priorisiert.

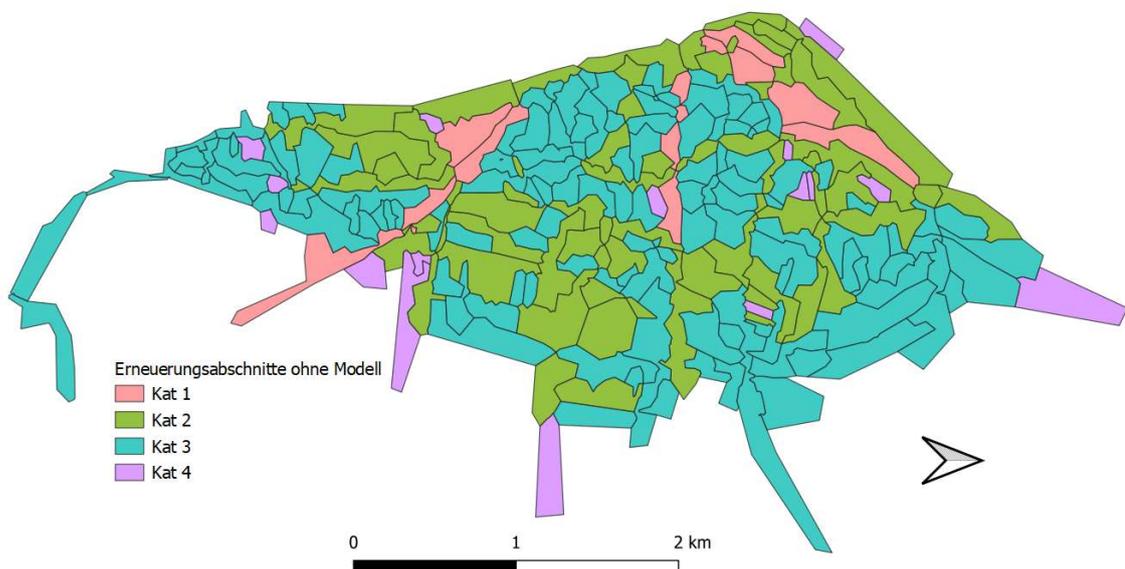


Abbildung 5-38: Übersichtskarte der Verteilung der ERIX-Kategorien für die Variante ohne Modell

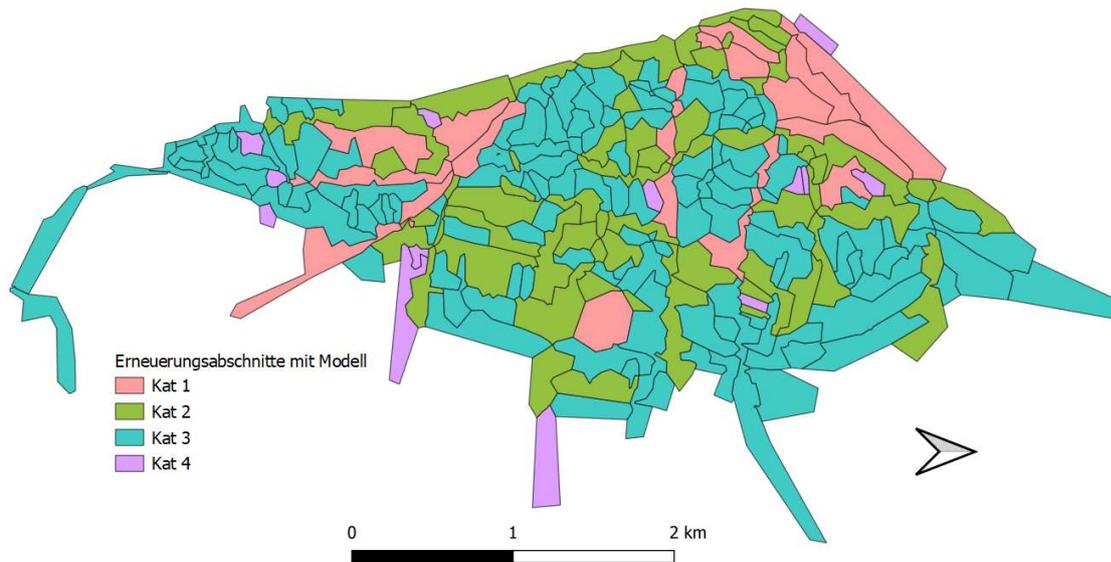


Abbildung 5-39: Übersichtskarte der Verteilung der ERIX-Kategorien für die Variante mit Modell

In Abbildung 5-40 sind die Gebiete ersichtlich, welche Leitungen enthalten, die im vorhandenen Reinvestitionsplan mit Priorisierungen versehen sind. Diese enthalten beinahe alle Gebiete, welche in den ERIX-Varianten als zu priorisieren markiert werden. Vor allem die Variante mit Modell deckt sich gut mit der vorhandenen Priorisierung.

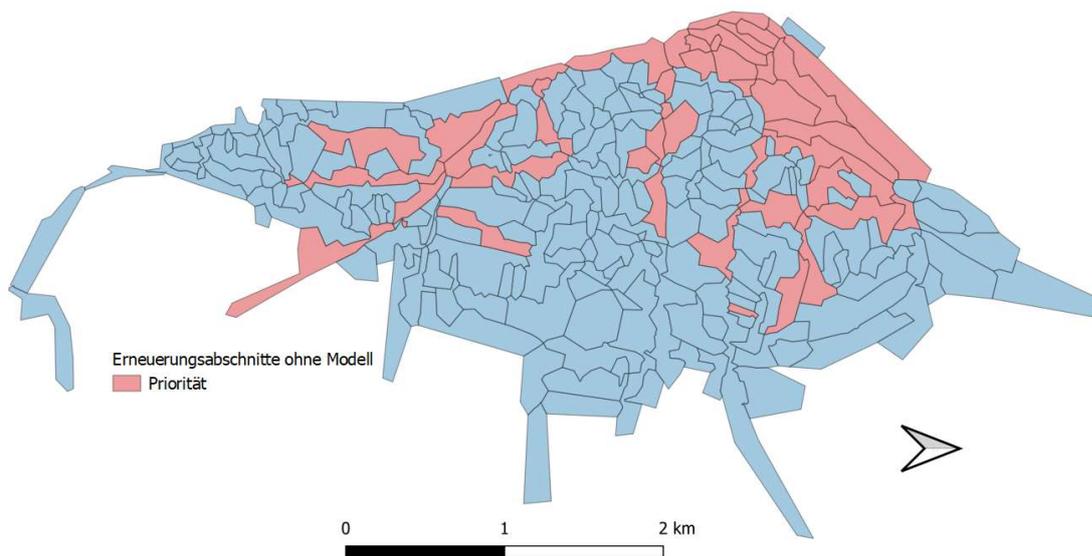


Abbildung 5-40: Gebiete mit Priorisierten Leitungen aus dem vorhandenen Reinvestitionsplan erstellt von der Adler + Partner ZT GmbH.

Die Überlagerung der Erneuerungsabschnitte mit ihren ERIX-Kategorien und den aufgezeichneten Rohrbrüchen, in Abbildung 5-41, zeigt, dass vor allem Gebiete mit vielen Rohrbrüchen in den ersten Kategorien auftauchen.

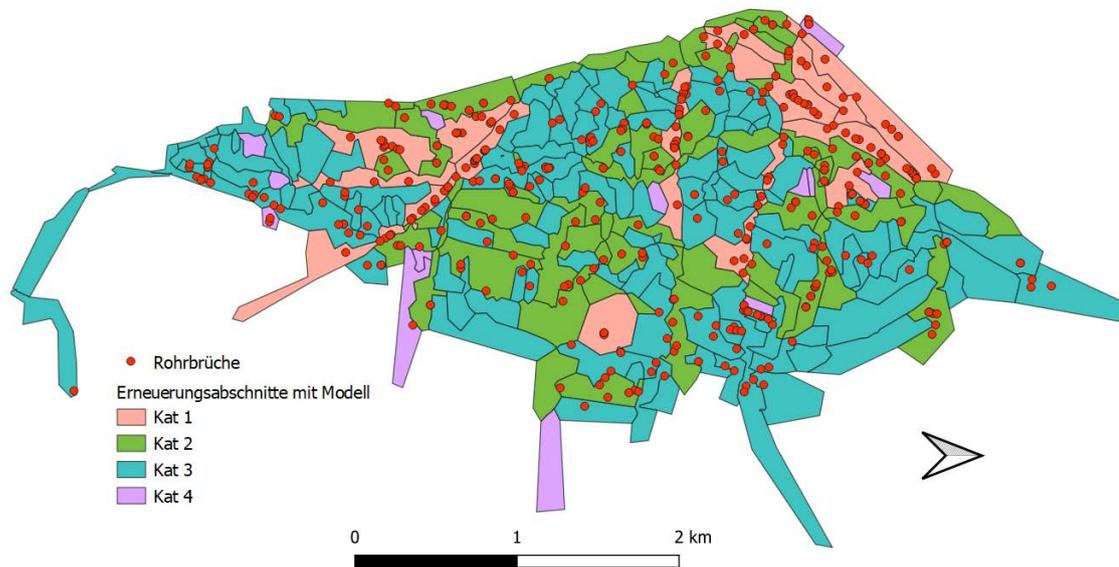


Abbildung 5-41: ERIX-Kategorien mit Berücksichtigung des Modells und den Aufgezeichneten Rohrbrüchen

6 Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick

Das erstellte Schadensprognosemodell kann zur Zustandsbewertung des Netzes genutzt werden. Nicht jedoch zur Ermittlung der Menge der auftretenden Rohrbrüche, da trotz guter Trefferquoten sehr viele Schäden auf nicht gefährdeten Leitungen prognostiziert werden. Für dies wäre, bei aktueller Datenlage ein gleitendes Mittel über die letzten Jahre besser geeignet als ein solches rein datenbasiertes Modell. Scholten, et al. (2012) bemerkte zu der Anwendung von rein datenbasierten Modellen:

„Besonders für kleine Datenumfänge könnte sich der Bayes'sche Modellansatz als vorteilhaft gegenüber rein datenbasierten Modellen erweisen.“

So könnten etwa fehlende Rohrbruchdaten künstlich erzeugt werden, um die Überlebenskurven zu vervollständigen. Dies ist insbesondere von Interesse da in der Praxis häufig nur wenige Schadensaufzeichnungen vorhanden sind.

Mit der hohen Anzahl an vorhergesagten Schäden ist die Prognose auf der sicheren Seite. Eine Reduktion dieser hohen Anzahl an falschen Vorhersagen sollte für zukünftige Anwendungen angestrebt werden. Die Trefferquote ist dabei teilweise sehr gut. Die gefährdeten Leitungen decken sich zudem, bis auf einige vorhandene Ausnahmen, mit den Erwartungen des Wassermeisters von Lustenau.

Will man dennoch bei rein datenbasierten Modellen bleiben, so könnte sich die Modellqualität durch andere Ansätze bei der Abschnittseinteilung vermutlich noch verbessern. Es könnten beispielsweise auch Abschnitte mit unterschiedlichen Leitungseigenschaften zusammengefasst werden. Diese Eigenschaften sollten sich jedoch in den Eigenschaften der Abschnitte widerspiegeln. So könnten Abschnitte mit sehr homogener Länge erstellt werden, welche alle Leitungen mitberücksichtigen. Dies würde auch einige mögliche Probleme von ungleichen Gruppengrößen, wie sie in Kapitel 2.1.1.2 erläutert werden, von vornherein umgehen. Somit könnte das Modell sich besser für die Vorhersage der Anzahl an zu erwartenden Leitungsschäden eignen.

Das Ergebnis der ERIX-Auswertung deckt sich gut mit dem ohnehin geplanten Reinvestitionsplan Lustenaus. Dieser Reinvestitionsplan wurde vor allem auf Grund der Erfahrungen des langjährigen Wassermeisters von Lustenau erstellt. Daraus lässt sich ableiten, dass die entwickelte Methode auch von unerfahrenen Verantwortlichen angewendet werden kann, um Reinvestitionspläne zu erstellen. Es ist hierfür jedoch eine relativ aufwändige Datenaufbereitung erforderlich. Insbesondere, wenn ein Schadensprognosemodell einbezogen werden soll.

Bei den Fragebögen kam es zu einigen Unklarheiten, da einige Formulierungen Fehlinterpretationen zuließen. So wurde etwa in einem Fall die Subkategorie Schäden in Straßen vor 2006 so verstanden, dass damit Straßenschäden gemeint sind und nicht die Schäden der Leitungen in diesen Straßen. Dies hat gezeigt, dass die Formulierung von Beschreibungen für Kriterien und Subkriterien einer Multikriteriellen Entscheidungsanalyse mit großer Sorgfalt erfolgen muss.

Die Interpretation des Schadensausmaßes wurde nicht im Sinne der Intention der Masterarbeit von Manuel Wiedenhofer (2019) ausgelegt. Der Verlegebereich wurde beispielsweise hinsichtlich der Schwierigkeiten, die eine Erneuerung mit sich bringt, betrachtet, anstatt auf den Schaden, der im Falle eines Leitungsschadens erfolgt. Auch das Subkriterium Redundanz wurde so ausgelegt, dass der Aufwand für die Erneuerung bewertet wird und nicht der Schaden, der im Falle eines Schadensereignisses entsteht. Die Auslegung dieser Subkriterien würde eher im Kriterium Betrieb zu verorten sein. Diese Auslegung wurde so gewählt, da einige Stakeholder diese Auslegung als viel wichtiger empfunden haben als die ursprünglich Angedachte. Dies erfolgte da im Falle eines Leitungsschadens in der Regel die Wasserversorgung noch funktioniert. Zudem ist eine kurzzeitige Baustelle in Lustenau einfacher durchzuführen ist als der Austausch einer ganzen Leitung, welche die Verkehrssituation zu Stoßzeiten noch verschärft.

Die Auswertung der Fragebögen zeigte auch, dass die Schadenswahrscheinlichkeit, welche in der Wissenschaft viel Beachtung findet, in der Praxis als nur wenig relevant angesehen wird. Vielmehr werden in der Erneuerung andere Rahmenbedingungen, welche das Schadensausmaß und den Betrieb betreffen als wichtig empfunden.

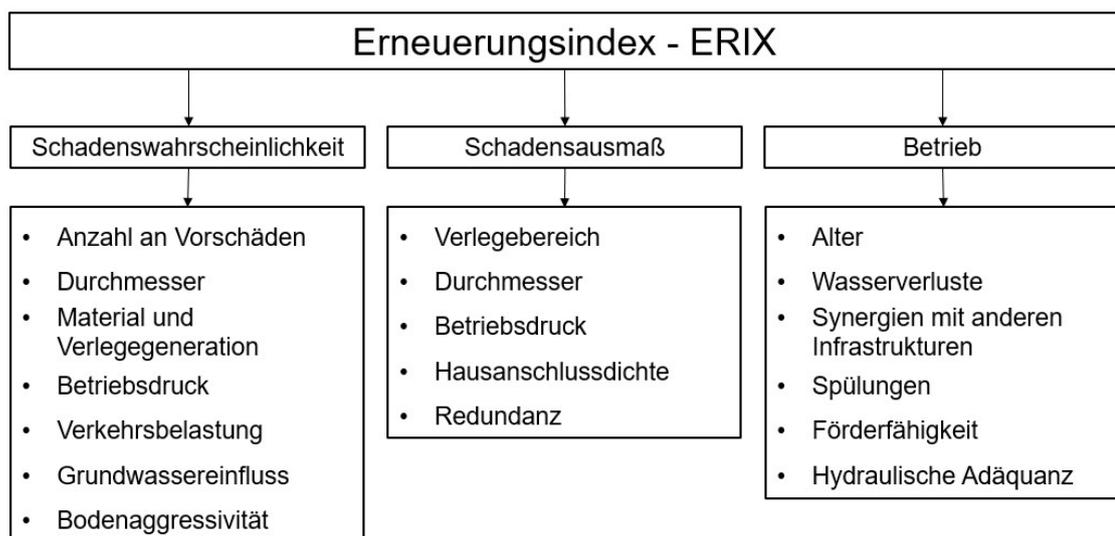


Abbildung 6-1: Hierarchiestruktur der angewandten ERIX-Ermittlung

Somit sollte bei zukünftigen Anwendungen die Hierarchiestruktur nicht, wie in Abbildung 6-1 ersichtlich, die hier verwendete Struktur zu verwenden. Sondern eher

die in Abbildung 6-2 ersichtliche adaptierte Version. Dabei wird die Kategorie und Betrieb in Betrieb / Baustellenmanagement umbenannt.

Die Subkriterien werden zweimal berücksichtigt. Einmal in Schadensausmaß und einmal in Betrieb / Baustellenmanagement. Somit kann im Kriterium Schadensausmaß das Ausmaß des Schadens im Falle eines Rohrbruches betrachtet werden. Dabei wird beispielsweise die Verkehrsbehinderung von Baustellen für Rohrbruchreparaturen bewertet. Im Kriterium Betrieb / Baustellenmanagement werden Redundanz und Verlegebereich hingegen im Hinblick auf den vermehrten Planungsaufwand für den Fall einer Leitungserneuerung berücksichtigt.

Das Subkriterium des Leitungszustandes, welches die Bodenaggressivität berücksichtigt sollte nur bewertet werden, wenn es sich auch um Leitungen handelt, die anfällig auf Korrosionsschäden sind. Da dieses Subkriterium ansonsten keinen Einfluss auf den Leitungszustand hat. Auch das Alter sollte beim Leitungszustand mit einbezogen werden.

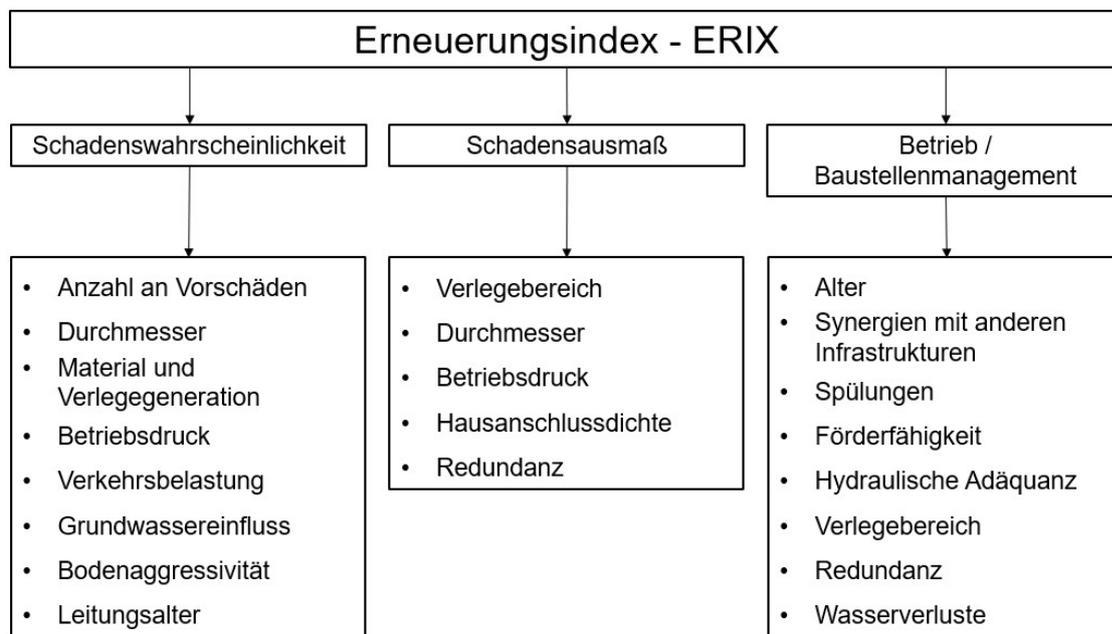


Abbildung 6-2: Vorgeschlagene Hierarchiestruktur für zukünftige Anwendungen

Zukünftige Erweiterungen des ERIX könnten eine übergeordnete Ebene der Integrierten Erneuerungsplanung enthalten. Somit könnten wie von Tscheikner-Gratl (2017) durchgeführt, die Erneuerungsplanungen verschiedener Infrastrukturen untereinander koordiniert werden. Da Wasserversorgungsnetze meist zwischen der Straße und dem Kanal verlegt werden und auch mit Kabeltrassen in Kontakt kommen, sollten Erneuerungsmaßnahmen nicht unabhängig von den anderen Infrastrukturen geschehen, sofern diese mit betroffen sind. Somit macht eine Kostenoptimierung am meisten Sinn, wenn alle Infrastrukturen mit einbezogen werden.

Abgesehen davon könnte eine Betrachtung der Lebenszykluskosten mit einbezogen werden. Wobei die Auswertungen der Fragebögen ergeben haben, dass vor allem betriebliche Überlegungen in der Praxis eine größere Priorität haben.

Die ERIX-Methode kann Verantwortliche bei der Entscheidungsfindung unterstützen (Wiedenhofer, 2019) und hat bei richtiger Anwendung ausreichend Potential dazu. Wichtig ist die Einbindung der Entscheidungsträger. Zum einen um ihre Expertise bezüglich des Leitungsnetzes und die verwendete Instandhaltungsstrategie einbeziehen zu können. Zum anderen auch um eine gute Akzeptanz für das Ergebnis zu erreichen.

Literaturverzeichnis

- Andreou, Stefanos A., Marks, David H. and Clark, Robert M. 1987.** A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory. *Adv. Water Resources*. März, 1987, 10.
- Bharat, Chrianna I, et al. 2017.** Methods for displaying and calibration of Cox proportional hazards models. *Journal of Risk and Reliability*. 2018, Vol. 232(1) 105-115, 2017.
- Carrión, Andrés, et al. 2010.** Evaluation of the Reliability of a Water Supply Network from Right-Censored and Left-Truncated Break Data. *Water Resour Manage*. 24 (12), 2010, Vols. 2917-2935.
- Cox, David. 1972.** Regression models and life tables. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1972, Vol. B, 34.
- Dridi, Leila, et al. 2009.** Multiobjective Approach for Pipe Replacement Based on Bayesian Inference of Break Model Parameters. *Journal of water resources planning and management*. 2009, 135.
- Fan, Jerome, Upadhye, Suneel and Worster, Andrew. 2006.** Cambridge.org. [Online] Jänner 2006. [Cited: August 8, 2020.] <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S1481803500013336>.
- Fawcett, Tom. 2016.** Silicon Valley Data Science. [Online] August 25, 2016. [Cited: Juni 26, 2020.] <https://www.svds.com/learning-imbalanced-classes/>.
- Haedrich, G., Kuß, A. and Kreilkamp, E. 1986.** Der Analytic Hierarchy Process: Ein neues Hilfsmittel zur Analyse und Entwicklung von Unternehmens- und Marketingstrategien. *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: WiSt. Zeitschrift für Studium und Forschung*. 15, 1986, Vol. (3).
- Hedderich, Jürgen and Sachs, Lothar. 2015.** *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R - 15. Auflage*. Kiel : Springer Spektrum, 2015. ISBN 978-3-662-45691-0.
- Kimutai, E, et al. 2015.** Comparison of Statistical Models for Predicting Pipe Failures: Illustrative Example with the City of Calgary Water Main Failure. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 6(4), 2015.
- Ray, Sunil. 2018.** analyticsvidhya.com. [Online] November 2018. [Cited: Mai 20, 2020.] <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2018/05/improve-model-performance-cross-validation-in-python-r/>.
- R-Core-Team. 2020.** *R: A language and environment for statistical computing*. [[online]] Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing., 2020.

- Rogers, Peter D. 2011.** Prioritizing Water Main Renewals: Case Study of the Denver Water System. *Journal of Pipeline Systems engineering and practice*. 73, 2011.
- Saaty, Thomas L. 1980.** *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York ; London : McGraw-Hill International Book Co, 1980. 978-0070543713.
- Scheidegger, Andreas, et al. 2013.** Extension of pipe failure models to consider the absence of data from replaced pipes. *Water research*. 2013, 47.
- Scheidegger, Andreas, Leitão, João P and Scholten, Lisa. 2015.** Statistical failure models for water distribution pipes - A review from a unified perspective. *Water Research*. 83, 2015.
- Scholten, Lisa, et al. 2012.** Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supply networks. *Environmental Modelling & Software*. 42, 2012.
- Scholten, Lisa, et al. 2014.** Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research*. 49, 2014.
- Therneau, Terry M., et al. 2020.** survival: Survival Analysis. *Cran.R-Project*. [Online] Juni 13, 2020. [Cited: Juni 20, 2020.] <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/survival.pdf>.
- Tscheikner-Gratl, Franz, et al. 2017.** Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods for Integrated Rehabilitation Prioritization. *MDPI - Water*. 9, 2017, 68.
- Watson, T G, et al. 2004.** Bayesian-based pipe failure model. *Journal of Hydroinformatics*. 2004.
- Wiedenhofer, Manuel. 2019.** Entwicklung einer Bewertungsmatrix nach Grundsätzen der MCDA für die Erneuerungspriorisierung von Trinkwasserleitungen. Graz : s.n., 2019.

Anhang

Anhang A Fragebogen für die Datenerhebung

Anhang A Fragebogen für die Datenerhebung

Ebene 1: Gewichtung der Kriterien
FRAGE: Welche Kriterien sind wichtiger für die Erstellung eines Reinvestitionsplanes für das Wasserversorgungsnetz?

- 1 Schadenswahrscheinlichkeit
Die Gewichtung der die Schadenswahrscheinlichkeit beeinflussenden Faktoren (die nicht im Schadensprognosemodell berücksichtigt werden) auf die Erneuerungspriorisierung
- 2 Schadensprognosemodell
Die Gewichtung der Erkenntnisse des Schadensprognosemodells auf die Erneuerungspriorisierung
- 3 Schadensausmaß
Die Gewichtung des erwarteten Schadensausmaßes auf die Erneuerungspriorisierung
- 4 Betrieb
Die Gewichtung Betrieblicher Faktoren auf die Erneuerungspriorisierung

	Absolut dominierend	sehr viel größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	etwas größere Bedeutung	gleiche Bedeutung	etwas größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	sehr viel größere Bedeutung	Absolut dominierend	
Schadenswahrscheinlichkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schadensprognosemodell
Schadenswahrscheinlichkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schadensausmaß
Schadenswahrscheinlichkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betrieb
Schadensprognosemodell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schadensausmaß
Schadensprognosemodell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betrieb
Schadensausmaß	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betrieb

Anhang A Fragebogen für die Datenerhebung

Ebene 2: Gewichtung der Subkriterien

2.1. Einflussfaktoren der Schadenswahrscheinlichkeit

FRAGE: Welche Subkriterien sind maßgebender für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens?

- 1 Anzahl an Vorschäden
Die Anzahl an vorhandenen Rohrschäden lässt Rückschlüsse auf den Zustand der Rohrleitung zu.
- 2 Durchmesser
Die Größe des Durchmessers hat einen Einfluss auf die Empfindlichkeit gegenüber Biegspannung.
- 3 Material und Verlegegeneration
Der Einfluss des Materials auf die Schadenswahrscheinlichkeit. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Materialien über die Zeit mit verschiedenen Bauverfahren und Konstruktionsmerkmalen verbaut wurden.
- 4 Betriebsdruck
Der Einfluss auf die Schadenswahrscheinlichkeit durch den Betriebsdruck.
- 5 Verkehrsbelastung
Der Einfluss auf die Schadenswahrscheinlichkeit durch Dynamische Belastung durch den Verkehr.
- 6 Grundwassereinfluss
Der Einfluss eines schwankenden Grundwasserspiegels auf die Schadenswahrscheinlichkeit.
- 7 Bodenart
Der Einfluss des Bodens auf die Schadenswahrscheinlichkeit: die Aggressivität des Bodens in Bezug auf Korrosion und die Größe von Bodenbewegungen (z.B.: bei wechselndem Wassergehalt).
- 8 Straßen mit Schäden vor 2006
Der Einfluss von Straßen mit bekannten Schäden die vor dem Zeitraum, der von den erhobenen Daten abgedeckt wird, geschehen sind. Dabei lässt die Anzahl der vorhandenen Schäden wieder Rückschlüsse auf den Zustand der Rohrleitungen zu.

	Absolut dominierend	sehr viel größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	etwas größere Bedeutung	gleiche Bedeutung	etwas größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	sehr viel größere Bedeutung	Absolut dominierend
Anzahl an Vorschäden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Durchmesser
Anzahl an Vorschäden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Material und Verlegegeneration
Anzahl an Vorschäden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betriebsdruck
Anzahl an Vorschäden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Verkehrsbelastung
Anzahl an Vorschäden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Grundwassereinfluss
Anzahl an Vorschäden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bodenart
Anzahl an Vorschäden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Straßen mit Schäden vor 2006
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Material und Verlegegeneration
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betriebsdruck
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Verkehrsbelastung
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Grundwassereinfluss
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bodenart
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Straßen mit Schäden vor 2006
Material und Verlegegeneration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betriebsdruck
Material und Verlegegeneration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Verkehrsbelastung
Material und Verlegegeneration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Grundwassereinfluss
Material und Verlegegeneration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bodenart
Material und Verlegegeneration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Straßen mit Schäden vor 2006
Betriebsdruck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Verkehrsbelastung
Betriebsdruck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Grundwassereinfluss
Betriebsdruck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bodenart
Betriebsdruck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Straßen mit Schäden vor 2006
Verkehrsbelastung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Grundwassereinfluss
Verkehrsbelastung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bodenart
Verkehrsbelastung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Straßen mit Schäden vor 2006
Grundwassereinfluss	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bodenart
Grundwassereinfluss	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Straßen mit Schäden vor 2006
Bodenart	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Straßen mit Schäden vor 2006

Anhang A Fragebogen für die Datenerhebung

Ebene 2: Gewichtung der Subkriterien

2.3. Einflussfaktoren des Schadensausmaßes

FRAGE: Welche Subkriterien sind maßgebender für das erwartete Schadensausmaß (sowohl in finanzieller Hinsicht als auch in Bezug auf die Erfüllung der erwarteten Dienstleistung)?

- 1 Verlegebereich
Der Ort, an dem die Rohrleitung verlegt wurde, hat im Schadensfall einen Anteil an der Höhe des Schadensausmaßes.
- 2 Durchmesser
Beeinflusst die Austrittsmenge bei einem Schadensfall.
- 3 Betriebsdruck
Beeinflusst die Austrittsmenge bei einem Schadensfall.
- 4 Hausanschlussdichte
Die möglichen betroffenen Endverbraucher im Falle eines Schadens.
- 5 Redundanz
Bewertet die Ausfallsicherheit einer Trinkwasserleitung.

	Absolut dominierend	sehr viel größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	etwas größere Bedeutung	gleiche Bedeutung	etwas größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	sehr viel größere Bedeutung	Absolut dominierend	
Verlegebereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Durchmesser
Verlegebereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betriebsdruck
Verlegebereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hausanschluss-dichte
Verlegebereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redundanz
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Betriebsdruck
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hausanschluss-dichte
Durchmesser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redundanz
Betriebsdruck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hausanschluss-dichte
Betriebsdruck	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redundanz
Hausanschluss-dichte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redundanz

Ebene 2: Gewichtung der Subkriterien

2.4. Einflussfaktoren des Betriebs

FRAGE: Welche Subkriterien sind maßgebender für den Betrieb des Wasserversorgungsnetzes?

- 1 Alter
Rohrleitungen können auch bei keiner erhöhten Schadenswahrscheinlichkeit nach einem gewissen Alter vorsorglich ausgetauscht werden.
- 2 Wasserverluste
Bewertet Rohrleitungen in einem Gebiet mit hohen Wasserverlusten als erneuerungsbedürftiger.
- 3 Synergien
Synergien mit anderen Infrastrukturbetreibern. Bewertet, ob in Gebieten bereits geplante Projekte anderer Infrastrukturbetreiber (z.B.: Straßenarbeiten, Kabelverlegungen) bestehen und ob diese zu einer günstigeren Abwicklung zukünftiger Arbeiten führen können.
- 4 Spülungen
Sollte es bei einer Leitung nötig sein diese öfter zu spülen kann dieser erhöhte Wartungsaufwand den Grund für eine Neuverlegung liefern.
- 5 Förderfähigkeit
Sollten Leitungen noch nicht das förderfähige Alter (40 Jahre) erreicht haben kann die Erneuerung noch ein paar Jahre hinausgezögert werden um doch noch eine Förderung dafür zu erhalten.
- 6 Hydraulikadequanz
Sollte eine Leitung unter- oder überdimensioniert sein kann die Leitung eine größere Priorität haben als eine vergleichbare passend dimensionierte Leitung.

	Absolut dominierend	sehr viel größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	etwas größere Bedeutung	gleiche Bedeutung	etwas größere Bedeutung	erheblich größere Bedeutung	sehr viel größere Bedeutung	Absolut dominierend	
Alter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wasserverluste
Alter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Synergien
Alter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Spülungen
Alter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Förderfähigkeit
Alter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hydraulikadequanz
Wasserverluste	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Synergien
Wasserverluste	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Spülungen
Wasserverluste	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Förderfähigkeit
Wasserverluste	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hydraulikadequanz
Synergien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Spülungen
Synergien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Förderfähigkeit
Synergien	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hydraulikadequanz
Spülungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Förderfähigkeit
Spülungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hydraulikadequanz
Förderfähigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hydraulikadequanz