

# **SCHRIFTENREIHE ZUR WASSERWIRTSCHAFT**

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ**

**Franz Friedl**

**Vergleich von statistischen und  
physikalischen Modellen zur Berechnung  
der Auftrittswahrscheinlichkeit von  
Schadensarten auf Trinkwasser-Haupt- und  
Zubringerleitungen**

## **Vorwort des Herausgebers**

Haupt- und Zubringerleitungen bilden die Grundstruktur der übergeordneten Trinkwassernetze und sind somit das Rückgrat der öffentlichen Trinkwasserversorgung. Spektakuläre Schadensfälle auf diesen übergeordneten Leitungen stellen ein allgegenwärtiges Problem dar und verursachen im Regelfall enorme Schadenskonsequenzen und folglich großes mediales Aufsehen und öffentliches Interesse.

Die auftretenden Schadenskonsequenzen werden maßgebend von den vorhandenen Schadensarten an den Haupt- und Zubringerleitungen bestimmt. Aufgrund der hohen Versorgungswichtigkeit und den maßgeblich von den Schadensarten abhängigen Schadenskonsequenzen werden für übergeordnete Trinkwassernetze Instandhaltungsstrategien bezüglich einer Schadensfrüherkennung und Schadensvermeidung seitens der Wasserversorgungsunternehmen angestrebt.

Bezugnehmend auf umfangreiche Datensätze und Expertengespräche mit den Verantwortlichen vieler österreichischer Wasserversorger im Umfeld zahlreicher Forschungsprojekte im Bereich der Instandhaltungsplanung hat Dr. Franz Friedl mit seiner Dissertation einen maßgeblichen Beitrag zur Entwicklung eines Risikobewertungsmodells geleistet.

Die Grundlage dieser Risikobetrachtung beruht auf der Ermittlung der leitungsbezogenen Auftrittswahrscheinlichkeit von bestimmten Schadensarten und den damit verbundenen Schadenskonsequenzen. Dadurch ist eine Priorisierung der einzelnen Leitungsabschnitte hinsichtlich einer Entscheidung bezüglich intensiverer Wartung, direkter innerer Inspektion zur Leckagedetektion, Materialzustandsanalyse und Sanierung oder Erneuerung entwickelt worden.

Die Möglichkeiten zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Schadensarten auf Haupt- und Zubringerleitungen wurden mittels unterschiedlichster komplexer statistischer und physikalischer Modelle kritisch analysiert und beispielhaft für zwei großstädtische mitteleuropäische Haupt- und Zubringerleitungsnetze als Praxisbeispiel angewendet.

Dr. Friedls Arbeit kann somit als Anleitung und Leitfaden für Schadensarten-auftrittswahrscheinlichkeits-Berechnungen von Haupt- und Zubringerleitungsnetzen in der Trinkwasserwirtschaft angesehen und sein Modell als Planungswerkzeug eingesetzt werden.

Graz, im November 2014

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla



Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla

Technische Universität Graz, Stremayrgasse 10/I, A-8010 Graz  
Tel. +43(0)316 / 873-8371, Fax +43(0)316 / 873-8376  
Email: [office-sww@tugraz.at](mailto:office-sww@tugraz.at), Internet: [www.sww.tugraz.at](http://www.sww.tugraz.at)

Verlag der Technischen Universität Graz [www.ub.tugraz.at/Verlag](http://www.ub.tugraz.at/Verlag)

ISBN 978-3-85125-267-5

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

Printed by TU Graz / Büroservice



## Danksagung

Diese Dissertation ist mit der Unterstützung vieler Menschen entstanden und dafür möchte ich diesen WegbegleiterInnen ein herzliches Dankeschön aussprechen. Beginnen möchte ich bei meinem Erstbetreuer, dem ehemaligen Vorstand des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau und jetzigem Rektor der Technischen Universität Graz, Prof. Harald Kainz. Er ermöglichte mir seit dem Jahr 2008 als wissenschaftlicher Universitätsassistent im Bereich der Lehre tätig zu sein, als Projektmitarbeiter spannende und praxisrelevante Themen bearbeiten zu können und förderte stets durch die Ermöglichung von Kongressteilnahmen die Erweiterung meines Fachwissens. Prof. Kainz begleitete und ermutigte mich als großes Vorbild zur Verfassung dieser Dissertation und brachte sich mit vielen wertvollen Gedanken ein. Ein weiterer Dank gilt meinem Zweitbetreuer, Dr. Thomas Ertl, der mit seinem großen Fachwissen diese Arbeit mit diversen Diskussionen bereichert und unterstützt hat.

Ein großer Dank gilt den Verantwortlichen der Magistratsabteilung 31, Wiener Wasserwerke – Dr. Wolfgang Zerobin, DI Franz Weyrer und DI Doris Kasess, des Wasserleitungs-Verbandes Nördliches Burgenland - Dr. Helmut Herlicska und der Wasserversorgung der Stadt Zürich - DI Adrian Rieder und DI Harald Tarnowski. Die intensiven Gespräche trugen maßgebend zum Entstehen dieser Arbeit bei. Dadurch konnte das Expertenwissen in diese wissenschaftliche Arbeit implementiert und ein sehr guter Praxisbezug erreicht werden.

Ein besonderer Dank gilt meiner Forschungsgruppenleiterin Dr. Daniela Fuchs-Hanusch. Sie stand mir als Ansprechperson und Mitbetreuerin der Dissertation in diesen Jahren am Institut stets zur Seite und ermöglichte maßgebend, dass diese Arbeit mit ihrer Unterstützung entstehen konnte. Weiters möchte ich mich bei allen nichtwissenschaftlichen und wissenschaftlichen KollegInnen für die sehr gute Gemeinschaft am Institut bedanken. Ein großer Dank gilt dem derzeitigen Institutsvorstand Prof. Dirk Muschalla und den KollegInnen Günter Gruber, Evelyn Krall, Valentin Gamerith, Robert Scheucher, Rosa Sulzbacher, Thomas Riedrich und den ehemaligen Kollegen Prof. Peter Kauch, Jörg Kölbl und Heimo Theuretzbacher-Fritz, mit denen ich in Projekten und in der Lehre zusammenarbeiten durfte. Ein Dankeschön auch an Prof. Qian Liu vom Institut für Angewandte Geowissenschaften, da er mir das komplexe Gebiet der Statistik in vielen konstruktiven Diskussionen verständlicher gemacht hat.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Schwiegerfamilie, meinen Geschwistern Josef, Monika, Gilbert, Christian und deren Familien und ganz besonders bei meiner Mutter Monika und bei meinem leider schon viel zu früh verstorbenen Vater Josef bedanken. Meine Eltern haben mit ihrem Fleiß und Vorbild mir den Weg bis zur Dissertation in vielen Belangen ermöglicht. Meinem im Vorjahr verstorbenen Vater möchte ich als Zeichen der Dankbarkeit auch meine Arbeit im Speziellen widmen. Zuletzt natürlich ein Dankeschön an den nun wichtigsten Menschen in meinem Leben, an meine Frau Stefanie. Sie begleitet mich stets durch Höhen und Tiefen des täglichen Lebens und steht mir mit ihrer ganzen Kraft und Liebe zur Seite.

## Kurzfassung

Haupt- und Zubringerleitungen (HZL) bilden die Grundstruktur und damit das Rückgrat der öffentlichen Wasserversorgung. Der Ausbau der öffentlichen Wasserversorgungsnetze ist in Österreich weitgehend abgeschlossen und der Fokus des Anlagenmanagements verlagert sich vom Neubau in Richtung Instandhaltung, bestehend aus Wartung, Inspektion und Instandsetzung von HZL. Aufgrund der hohen Versorgungswichtigkeit und dem großen Schadensausmaß sollten bezüglich der Instandhaltung für HZL die Strategien der Schadensfrüherkennung und -vermeidung angestrebt werden. Zur Umsetzung dieser Strategien stehen verschiedene Berechnungsmodelle als Basis zur Verfügung.

Für Versorgungsleitungen (VL) werden unterschiedliche Schadensprognosemodelle basierend auf der Analyse von Schadenshäufigkeiten bereits in der Praxis eingesetzt. Diese Berechnungsansätze lassen sich aber nicht für den Bereich der HZL anwenden, da diese zu geringe Schadenshäufigkeiten zur Ermittlung aussagekräftiger Ergebnisse aufweisen. Für HZL ist es daher zielführender im Sinne effizienter Instandhaltungsstrategien ein Risikobewertungsmodell zu verwenden. Das Ziel von Risikobewertungsmodellen ist die Priorisierung von HZL hinsichtlich Wartung, Inspektion, Erneuerung oder Reparatur. Die theoretische Grundlage dieser Risikomodelle beruht auf der Betrachtung von Schadensartenwahrscheinlichkeit und Schadensausmaß. In dieser Arbeit wurde der Fokus auf die Berechnung der Auftretswahrscheinlichkeit von vier spezifischen Schadensarten - „Schaden allgemein“, „Verbindung undicht“, „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - gerichtet.

Als Grundlage der Berechnung wurden Daten zweier mitteleuropäischer großstädtischer Wasserversorgungsunternehmen (WVU) zu Rohrmaterialien, Einflussfaktoren und reparierten Schäden verwendet. Die Berechnungen der Auftretswahrscheinlichkeit von Schadensarten wurden mit Hilfe von verschiedenen physikalischen Modellen und den statistischen Modellen – binäre logistische Regressionsanalyse (BLRA) und Diskriminanzanalyse (DA) – durchgeführt.

Physikalische Modelle beschreiben durch vereinfachte Formulierungen der in der Natur auftretenden Mechanismen den komplexen Prozess der Zustandsverschlechterung bis hin zum Schadensauftritt. Diese Modelle sind auf die Berechnung von entweder einer oder gleichzeitig mehreren bestimmten Schadensarten unter Einbeziehung vordefinierter Einflussfaktoren festgelegt. Die derzeit in der Literatur beschriebenen physikalischen Modelle beschränken sich größtenteils auf metallische Rohrmaterialien, wodurch folglich die auf Metall-Leitungen typisch auftretenden Schadensarten „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ in dieser Arbeit betrachtet wurden. Für den Fall der Schadensart „Korrosionsloch“ erreichten die Modelle eine geringe Trefferquote der reparierten Schäden und eine geringe Quote der bei der Berechnung irrtümlich als schadhaft prognostizierten, aber in der Realität, intakten Leitungen (= falsche

Alarme). Bei der Betrachtung der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ erreichten die physikalischen Modelle prinzipiell eine gute Trefferquote, aber auch eine hohe Rate an falschen Alarmen. Die berücksichtigten physikalischen Modelle sind zur Berechnung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit für die beiden untersuchten WVU, aufgrund der nicht ausreichend zur Verfügung stehenden notwendigen Daten, nicht zufriedenstellend geeignet.

Mit Hilfe der statistischen Methoden wurden die signifikanten Einflussfaktoren bezüglich der Schadensarten „Schaden allgemein“, „Verbindung undicht“, „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ ermittelt. Ein signifikanter statistischer Zusammenhang zwischen der Schadensart „Korrosionsloch“ und korrosionsfördernden Faktoren wurde anhand beider statistischer Modelle bestätigt. Die Schadensart „Verbindung undicht“ wurde von den Faktoren angrenzende Tiefbaumaßnahmen, benachbarte Infrastrukturen und vorhandene Baumwurzeln signifikant beeinflusst. Die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ hängt von der Setzungsempfindlichkeit des Bodens, Rohrrinnendruck, Rohrrauigkeit, Verkehrsbelastung und korrosionsfördernden Böden signifikant ab. Letzteres wird dadurch erklärt, dass die komplexe Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ als Folge einer Korrosionsbeeinflussung und gleichzeitig überhöhten inneren und äußeren Belastungen auftreten kann. In der Berechnung der Schadensart „Schaden allgemein“ konnten die in der Einzelbetrachtung nachgewiesenen Zusammenhänge zwischen den spezifischen Schadensarten und den jeweiligen Einflussfaktoren bestätigt werden. Mit der zur Verfügung stehenden Datenlage der beiden WVU war die Berechnung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit unter Anwendung der zwei statistischen Methoden mit hoher Trefferquote und geringer Anzahl an falschen Alarmen möglich. Grundsätzlich sind beide verwendeten statistischen Modelle zur Berechnung der Schadensartenaufttrittswahrscheinlichkeit geeignet, wobei die BLRA signifikantere Ergebnisse als die DA erzielt.

Im direkten Vergleich der physikalischen und statistischen Modelle ist bei der momentanen Datenlage der beiden WVU den statistischen Modellen der Vorzug zu geben. Zur sinnvollen praktischen Nutzung der vorhandenen physikalischen Modelle sollten die zu erhebenden Daten an die im Modell benötigten Informationen angepasst werden.

## Abstract

Large-Diameter Transmission Water Mains (LDTWM) form the basic structure and are the backbone of the public water supply. The expansion of the public water supply networks in Austria is largely completed and the focus of asset management is shifting from new construction toward maintenance, consisting of servicing, replace, repair and inspection of LDTWM. Due to the high importance of LDTWM the strategies of failure-detection and failure-prevention should be sought. For small-diameter supply pipes different failure prediction models are already used which are based on the analyses of failure frequencies. These calculation approaches can not be applied in the field of LDTWM because of high consequences in case of failure and in fact very low failure frequencies. In order to reach efficient maintenance strategies a risk assessment model should be implemented. The goal of risk assessment models is the prioritization of LDTWM regarding inspection, repair or replacement. The theoretical background of this risk model is based on the observation of the probability of failure occurrence and resulting failure severity. In this work the focus is on the calculation of the probability of occurrence of four specific failure modes - "general-failures", "connection-leak", "corrosion-hole" and "circumferential-crack/longitudinal-crack/blow-out". Data of two Central European metropolitan water companies have been used. The calculations for the probability of occurrence of failure modes have been using various physical and statistical models - called binary logistic regression analysis (BLRA) and discriminant analysis (DA). Physical models describe by simplified formulations of the naturally occurring mechanisms the complex process of deterioration up to the failure mode appearance. The current physical models which are described in the literature are limited mostly to metallic pipe materials. Due to these limitations the failure modes "corrosion-hole" and "circumferential-crack/longitudinal-crack/blow-out" could be considered in this work. In calculating the failure mode "corrosion hole" the models achieved a low success rate of the observed failures but also low false alarm rate for faultless LDTWM. When considering the failure mode "circumferential-crack/longitudinal-crack/blow-out" the physical models in principle achieved a good hit rate, but also a high rate of false alarms. The considered physical models, which were used to calculate the probability of occurrence of failure modes for the two water distribution systems, are not suitable because of insufficient available data. With the help of statistical methods the significant factors regarding the specific failure modes "general-failures", "connection-leak", "corrosion-hole" and "circumferential-crack/longitudinal-crack/blow-out" were determined. A significant statistical correlation between the failure mode "corrosion-hole" and corrosive factors was confirmed by both statistical models. The failure mode "connection-leak" was influenced by the factors adjacent construction sites, existing adjacent infrastructure and tree roots significantly. The failure modes "circumferential-crack/longitudinal-crack/blow-out" significantly depend on the setting-sensitivity of the soil, internal water-pressure, pipe roughness, traffic load and corrosive soils. The latter is

explained by the fact that the failure mode "circumferential-crack/longitudinal-crack/blow-out" could occur as a result of excessive corrosion and influence of high internal and external stresses. With the use of both statistical models it was able to calculate the probability of occurrence of failure modes. BLRA achieved more significant results than the DA. For a meaningful practical use of existing physical models more data should be collected in order to reach better results.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veranlassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ziel</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage Haupt- und Zubringerleitungen (HZL) in Österreich</b> .....	<b>8</b>
3.1	Instandhaltungsstrategien für HZL in Österreich.....	14
3.1.1	Rechtliche und technische Vorgaben in Bezug auf HZL (Gesetze, Normen, Richtlinien) .....	15
3.1.1.1	Wasserrechtsgesetz .....	15
3.1.1.2	Trinkwasserverordnung .....	15
3.1.1.3	ÖNORM EN 805 (2000).....	15
3.1.1.4	ÖNORM B 2539 (2005) .....	16
3.1.1.5	ÖVGW W 105 (2011).....	17
3.1.1.6	ÖVGW W 63 (2009).....	17
3.1.1.7	ÖVGW W 100 (2007).....	17
3.1.1.8	DVGW W 392-2 (2011).....	17
3.1.1.9	Water Safety Plans (Trinkwassersicherheitskonzepte).....	17
3.2	Definitionen, Begriffsbestimmungen .....	18
3.2.1	Definition Leitungsarten, Schaden und Risiko .....	18
3.2.2	Begriffsdefinition Modell .....	19
<b>4</b>	<b>Modelle in der Rehabilitationsplanung</b> .....	<b>22</b>
4.1	Schadensprognosemodelle für Versorgungsleitungen (VL).....	22
4.2	Risikobewertungsmodelle für HZL .....	23
4.3	Risikobewertungsmodell im Vergleich für Kanäle in Österreich.....	25
4.4	Schweizer Richtlinie SVGW 1001d (2004).....	25
<b>5</b>	<b>Schadensmechanismen und Schadensarten</b> .....	<b>26</b>
5.1	Allgemeines.....	26
5.2	Schadensmechanismen in Abhängigkeit der Rohrmaterialart .....	34
5.2.1	Metallische Rohrleitungen (Grauguss, Duktillguss und Stahl) .....	34
5.2.2	Spannbeton- und Stahlbetonleitungen .....	35
5.2.3	Asbestzement- und Betonleitungen .....	35
5.2.4	Kunststoffleitungen.....	36
5.3	Schadensarten .....	36
5.3.1	Loch aufgrund Korrosion .....	36
5.3.2	Rundriss .....	36
5.3.3	Längsriss .....	39
5.3.4	Riss an der Verbindung (Glockenmuffe) von einem Punkt ausgehend .....	39
5.3.5	Scherbenbruch.....	40
5.3.6	Verbindung undicht .....	41

5.4	Direkte innere Inspektion von HZL .....	42
<b>6</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>48</b>
6.1	Ziel .....	48
6.2	Datengrundlage (Vorgehensweise).....	49
6.3	Datenaufbereitung (Vorgehensweise).....	50
6.3.1	Verschneidung der HZL mit den spezifischen Schadensarten und Einflussfaktoren (Vorgehensweise).....	50
6.3.2	Datenqualität und Skalenanalyse (Vorgehensweise).....	50
6.4	Datenanalyse (Vorgehensweise) .....	53
6.5	Modellvorbereitung (Vorgehensweise).....	54
6.5.1	Modellvorbereitung für statistische Berechnungsmodelle .....	54
6.5.2	Modellvorbereitung für physikalische Berechnungsmodelle .....	56
6.1	Modellberechnung.....	57
6.1.1	Ermittlung der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit von HZL mit statistischen Modellen.....	58
6.1.1.1	Beschreibung der Schadenswahrscheinlichkeitsberechnung mittels binär logistischer Regressionsanalyse (BLRA) .....	60
6.1.1.2	Beschreibung der Schadensartenwahrscheinlichkeitsberechnung mittels Diskriminanzanalyse.....	69
6.1.2	Beschreibung der Schadensartenwahrscheinlichkeitsberechnung mittels physikalischer Modelle .....	79
6.1.2.1	Frostbelastungs-Modell.....	80
6.1.2.2	Rohr-Boden-Interaktions-Modell .....	81
6.1.2.3	Korrosionsmodelle .....	81
6.1.2.4	Physikalisch deterministische Modelle.....	85
6.1.2.5	Physikalisch probabilistische Modelle.....	85
<b>7</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>88</b>
7.1	Datengrundlage und Datenaufbereitung (Ergebnisse).....	88
7.1.1	WVU A .....	88
7.1.2	WVU B .....	91
7.2	Datenanalyse (Ergebnisse).....	97
7.3	Modellvorbereitung (Ergebnisse) .....	97
7.3.1	Modellvorbereitung statistische Modelle .....	97
7.3.1.1	WVU A .....	97
7.3.1.2	WVU B .....	101
7.3.2	Modellvorbereitung physikalische Modelle.....	105
7.3.2.1	WVU A .....	105
7.3.2.2	WVU B .....	105
7.4	Modellberechnung (Ergebnisse) .....	106
7.4.1	Statistische Modelle .....	106

7.4.1.1	BLRA .....	107
7.4.1.1.1	BLRA Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU A.....	107
7.4.1.1.2	BLRA Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A.....	112
7.4.1.1.3	BLRA Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - WVU A ....	117
7.4.1.1.4	BLRA Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU B.....	122
7.4.1.1.5	BLRA Schadensart „Verbindung undicht“ – WVU B.....	127
7.4.1.1.6	BLRA Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU B.....	132
7.4.1.1.7	BLRA Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbe“ – WVU B.....	137
7.4.2	Auswirkung der Stichprobengröße auf die Ergebnisse der BLRA am Beispiel Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU A .....	142
7.4.3	Auswirkung der Stichprobengröße auf die Ergebnisse der BLRA am Beispiel „Schaden allgemein“ – WVU B .....	143
7.4.3.1	Diskriminanzanalyse .....	144
7.4.3.1.1	Diskriminanzanalyse Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU A .....	144
7.4.3.1.2	Diskriminanzanalyse Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A .....	149
7.4.3.1.3	Diskriminanzanalyse Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - WVU A	155
7.4.3.1.4	Diskriminanzanalyse Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU B .....	161
7.4.3.1.5	Diskriminanzanalyse Schadensart „Verbindung undicht“ - WVU B.....	167
7.4.3.1.6	Diskriminanzanalyse Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU B.....	173
7.4.3.1.7	Diskriminanzanalyse Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - WVU B	179
7.4.4	Modellberechnung physikalische Modelle (Ergebnisse) .....	185
7.4.4.1	Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A.....	185
7.4.4.2	Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch und Korrosionsloch“ - WVU A	186
7.4.4.3	Modellberechnung physikalische Modelle (Ergebnisse) - WVU B .....	187
7.4.4.4	Zusammenfassung der Klassifizierungsergebnisse unter Anwendung der BLRA und DA für das WVU A und WVU B.....	187
<b>8</b>	<b>Diskussion, Schlussfolgerung.....</b>	<b>189</b>
8.1	Allgemeines.....	189
8.2	Rohrmaterial.....	191
8.3	Rohrdurchmesser (Nennweite) .....	191
8.4	Alter (Verlegejahr) .....	191
8.4.1	Limitation in der Vorgehensweise der Methodik bei der Betrachtung des Einflussfaktors Alter und Folgeschäden auf HZL-Abschnitten .....	192
8.5	Länge (Einzelrohrlänge ≠ Abschnittslänge) .....	193
8.6	Verbindungsart.....	193
8.7	Qualifikation der ausführenden Firmen und Personen.....	193
8.8	Verlegetiefe .....	194

8.9	Bodenaggressivität und korrosionsfördernder Boden .....	194
8.10	Angrenzende Tiefbaumaßnahmen und setzungsempfindliche Böden.....	194
8.11	Verkehr und Straßenbelagszustand.....	195
8.12	Bäume bzw. Baumwurzelbeeinflussung .....	196
8.13	Herstellungs- und einbaubedingte Einflüsse .....	196
8.14	Betriebsdruck und Rauigkeit .....	197
8.15	Zusammenfassung der Schlussfolgerung .....	197
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>198</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>202</b>
10.1	Prognose der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit je HZL .....	202
10.2	Risikoermittlung je HZL .....	202
10.3	Einflussparameter auf das Schadensausmaß von HZL .....	203
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>207</b>
<b>12</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>215</b>
<b>13</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>220</b>
<b>14</b>	<b>Formelverzeichnis.....</b>	<b>221</b>
<b>15</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>223</b>

## Abkürzungen

AL	Anschlussleitung/en
AZ	Asbestzement
B	Beton
BLRA	Binär logistische Regressionsanalyse
bez.	bezüglich
ca.	circa
CML	Customer Minutes Lost
DA	Diskriminanzanalyse
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Nennweite
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
etc.	et cetera
FL	Fernleitung/en
FOS	factor of safety
GG	Grauguss
GGG alt	Duktilguss alt
GGG neu	Duktilguss neu
GGG ≤ 1980	Duktilguss mit Verlegejahr ≤ 1980
GGG > 1980	Duktilguss mit Verlegejahr > 1980
GGG 1	Duktilguss 1. Generation
GGG 2	Duktilguss 2. Generation
GGG 3	Duktilguss 3. Generation
GGSM	Grauguss mit Schraubmuffenverbindung
GIS	Geografisches Informationssystem
HL	Hauptleitung/en
HZL	Haupt- und Zubringerleitung/en
inkl.	inklusive
KK	Korrelationskoeffizienten
KPC	Kommunalkredit Public Consulting
LDTWM	Large-Diameter Transmission Water Mains
lt.	laut

NW	Nennweite
ÖNORM	Österreichisches Normungsinstitut
ÖVGW	Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RD	Rohrdurchmesser
ROC-Kurve	Receiver Operating Characteristic-Kurve
RR	Rehabilitationsrate/n
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SR	Schadensrate/n
ST	Stahl
STZ	Steinzeug
SVGW	Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches
TL	Transportleitung/en
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
UFG	Umweltförderungsgesetz
v. a.	vor allem
VL	Versorgungsleitung/en
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)
WV	Wasserverlust/e
WVU	Wasserversorgungsunternehmen
W/Z-Wert	Wasser/Zement-Wert
z. B.	zum Beispiel
ZL	Zubringerleitung/en

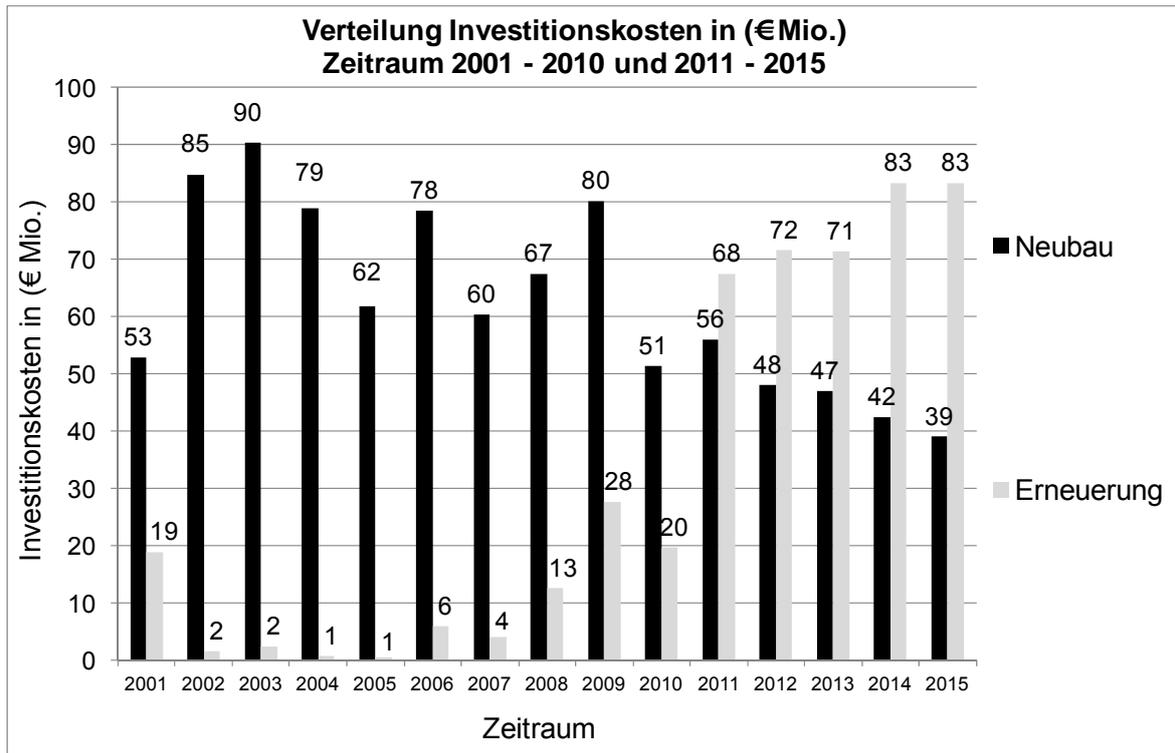
# 1 Veranlassung

Für die Gesellschaft stellt eine sichere und zuverlässige Wasserversorgung eine unverzichtbare Grundlage für die Gesundheit der Bevölkerung und eine funktionierende Wirtschaft dar. Dies kann nur gewährleistet werden, wenn alle Komponenten der Wasserversorgung gut abgestimmt funktionieren. HZL bilden als übergeordnete Trinkwassernetze das Rückgrat einer einwandfreien Versorgung der Menschen mit Trinkwasser rund um die Uhr in ausreichender Menge und bester Qualität. Diese HZL verbinden lt. ÖNORM EN 805 (2000) die Wassergewinnungs-, Wasseraufbereitungs- und Wasserbehältersysteme mit den Versorgungsgebieten, haben des Weiteren eine Hauptverteilungsfunktion innerhalb der Versorgungsnetze (= Hauptleitungen) und weisen üblicherweise keine direkte Verbindung zum Endverbraucher auf. Es ist nicht zielführend HZL anhand ihres Rohrdurchmessers (RD) zu definieren, denn dieser ist je nach WVU relativ und kann von kleinen Nennweiten (NW) für v. a. ländlich strukturierte WVU, bis hin zu über 1 200 mm RD für großstädtische WVU variieren. Es gibt daher keinen definierbaren Abgrenzungsbereich ab welchem RD Leitungen als HZL bezeichnet werden können. Entscheidend hierfür ist vielmehr die hydraulische Versorgungswichtigkeit der Leitung. Aus der Sicht des Anlagenmanagementes von WVU definiert sich die Wichtigkeit der Leitung im Netz aus der relativen Versorgungswichtigkeit infolge fehlender Redundanzen sowie aus der Konsequenz im Schadensfall. In Abhängigkeit der vorliegenden Umgebungsbedingungen und der einwirkenden Belastungen können durch verschiedene Schadensmechanismen unterschiedliche Schadensarten auf bestimmten Rohrmaterialien auftreten. Zudem haben HZL je nach Material und externen sowie internen Belastungen sehr unterschiedliche Lebensdauererwartungen.

Das Schadensausmaß ist maßgebend von der Schadensart abhängig und setzt sich aus Reparatur- und Wiederinstandsetzungskosten, Wasserverlustkosten, Folgekosten an Dritten (z. B. Beschädigungen an benachbarten Objekten oder Personenschäden) und sozialen Kosten (z. B. Verkehrsbeeinträchtigungen und Behinderung von wirtschaftlichen und industriellen Prozessen) zusammen. Weiters sind hydraulische Beeinträchtigungen im Leitungsnetz – sogenannte Vulnerabilitäten – wie Versorgungsunterbrechungen und Druckschwankungen von Relevanz. Auch Wasserqualitätsbeeinträchtigungen können bei Schäden durch das Eindringen von Verunreinigungen in die Rohrleitungen hervorgerufen werden. Bei kleineren WVU mit oft nur einer HZL und folglich einem nicht redundanten Versorgungsstandbein stellen Schäden an HZL in Hinblick auf die Versorgungssicherheit ein vergleichsweise hohes Risiko und einen möglichen Totalausfall der Wasserversorgung dar.

In Abbildung 1 ist lt. KPC (2010) die Verteilung der Investitionen für den Zeitraum 2001 bis 2010 in das österreichische Wasserleitungsnetz (HZL und VL gemeinsam betrachtet) mit insgesamt € 800 Mio. - in die Bereiche Neubau (88 %) und Erneuerung (12 %) unterteilt - dargestellt. Als Datenbasis dienen alle zugesicherten

oder endabgerechneten Baukosten für die UFG-Förderung (= Umweltförderungsgesetz) der KPC-Datenbank mit Stand 2010.



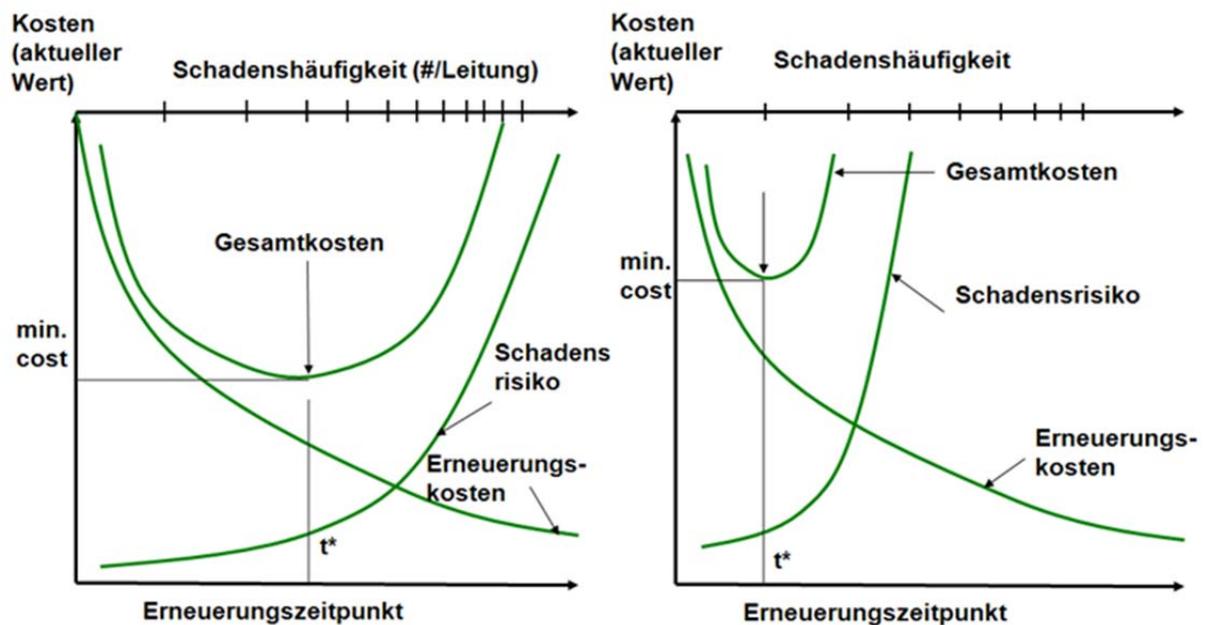
**Abbildung 1: Verteilung der abgerechneten Investitionskosten im Zeitraum 2001 bis 2010 und Abschätzung der Investitionskosten im Zeitraum 2011 bis 2015 in (€ Mio.) für Wasserleitungen in Österreich (KPC, 2010)**

Da WVU viele Investitionen auch ohne Bundes- oder Landesfördermittel abwickeln ist die tatsächliche Investitionssumme vermutlich deutlich höher. Die Investitionskostenabschätzung lt. Abbildung 1 für den Zeitraum 2011 bis 2015 stützt sich auf die Angaben der Kommunen im Zuge der Investitionskostenerhebung der KPC im Jahre 2007 (KPC, 2010). Daraus ist die veranschlagte Gesamtsumme von ca. € 610 Mio. für den Zeitraum 2011 bis 2015 zu 38 % für den Neubau und zu 62 % für die Erneuerung von Trinkwasserleitungen in Österreich angegeben. Dies bestätigt die permanent steigende Wichtigkeit von Erneuerungsmaßnahmen im Gegensatz zu Neubauten von Wasserleitungen und folglich eine zukünftige Schwerpunktverlagerung auf den Bereich Erneuerungsmaßnahmen. Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt eine Zustandsbeurteilung von Einzelleitungen vordergründig im Zuge der Reparatur von Rohrbrüchen oder der Wartung, Reparatur oder Erneuerung von Einbauten und Armaturen, sowie im Rahmen des Wasserverlustmanagements. In der ÖVGW Mitteilung W 105 (2011) ist eine Vorgehensweise zur Schadensartendokumentation im Reparaturfall als Leitungszustandserhebung beschrieben.

Die Bewertung der übergeordneten Trinkwassernetze mit der Kennzahl der Schadensrate (SR) gemäß ÖVGW Richtlinie W 100 (2007) – Richtwert für eine niedrige SR von sieben Schäden/100 km für Haupt- und Versorgungsleitungen – ist

daher speziell für übergeordnete Trinkwassernetze nicht als Bewertungskriterium heranzuziehen. In der ÖVGW Richtlinie W 100 (2007) wird im Zuge von Reparaturen für HZL mit erhöhter Priorität die Durchführung einer erweiterten Zustandsbeurteilung empfohlen. Jedoch fehlt jeglicher Hinweis auf Art und Weise der Zustandsbeurteilung. Gesetzliche Vorgaben zu Erneuerungszeiträumen von Rohren mit besonderer Versorgungswichtigkeit existieren in Österreich weiters nicht. Wasserverluste treten auf Leitungen über Schadstellen in Form von Löchern, Rissen und über Undichtigkeiten bei Rohrverbindungen und Armaturen auf. Die Zustandsbeurteilung eines Netzes mittels Wasserverlustbetrachtungen kann durch sogenannte Messzonenbildungen lokal eingegrenzt werden. Einzel-Leitungsabschnitten ist eine allgemeine zonenbezogene Wasserverlustinformation nach dem tatsächlichen Verursachungsprinzip nicht direkt zuordenbar und deshalb für einzelabschnittsbezogene Priorisierungen nicht geeignet. Die Schadensanzahl auf übergeordneten Trinkwassernetzen ist in Österreich im Allgemeinen gering. Eine bestimmte Anzahl von Schadensereignissen bzw. Reparaturen wird bis zum Erreichen des wirtschaftlich optimalen Erneuerungszeitpunktes auf VL aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen zugelassen. Zahlreiche wissenschaftliche Publikationen (Kleiner und Rajani, 2000; Kleiner und Rajani, 2001) sind bereits über die Auswertung von Schadensdokumentationen und den dazu angepassten mathematischen Modellen zur Beschreibung der bisherigen Schadensentwicklung und der Prognose zukünftiger Schadensratenentwicklungen für VL veröffentlicht worden.

Für HZL ist es jedoch nicht zielführend mit den für VL entwickelten Prognosemodellen (Kleiner und Rajani, 2001) zukünftige Schäden auf HZL vorherzusagen, da mehrere aufgetretene Folgeschäden und größere Schadenshäufungen zur Kalibrierung der benötigten Überlebensfunktionen nicht vorhanden sind. Liu et al. (2012) erwähnen einen großen Forschungsaufholbedarf zur Optimierung von Modellen und Instandhaltungsstrategien für übergeordnete Trinkwassernetze. In Abbildung 2 ist die Zunahme der Schadens-Auftrittswahrscheinlichkeit als Anstieg des Schadensrisikos bzw. der zu erwartenden Kosten als Konsequenz im Schadensfall dargestellt. Gleichzeitig sinken die zeitlich hinausgeschobenen diskontierten Erneuerungskosten. Das Minimum der gesamten Lebenszykluskosten veranschaulicht den wirtschaftlich optimalen Erneuerungszeitpunkt ( $t^*$ ).



**Abbildung 2: Lebenszykluskostenbetrachtung VL (links) und HZL (rechts) (nach Liu et al., 2012)**

Die linke Darstellung in Abbildung 2 stellt den typischen Fall einer VL mit geringeren Kosten für das Schadensrisiko und einem wirtschaftlich optimalen Erneuerungszeitpunkt korrespondierend mit einer steigenden Schadenshäufigkeit dar. Aufgrund des erhöhten Schadensausmaßes erreichen HZL im Vergleich zu VL nach wenigen Schadensfällen ihren wirtschaftlich optimalen Erneuerungszeitpunkt. Darüber hinaus wird bei Fuchs-Hanusch et al. (2011d) die Wichtigkeit der Betrachtung von Wasserverlustmengen im Schadensfall als einer der sensitivsten Parameter in der Lebenszykluskostenbetrachtung von Trinkwasserleitungen genannt. Aus der rechten Grafik in Abbildung 2 geht hervor, dass sich Instandhaltungsstrategien für HZL an Schadensvermeidung anstatt einem Management von Schadenshäufungen orientieren sollten. Eine gewisse Problematik stellt die Tatsache dar, dass die technische Nutzungsdauer des Netzes durch Reparaturen nicht verlängert wird, da unter Ausführung der punktuellen Reparatur der schlechtesten Netzteile der Zustand des Netzes nicht verbessert wird. Trotz der Reparaturmaßnahmen muss mit weiteren Schäden an der entsprechenden Leitung gerechnet werden. Längerfristig wird ein sogenannter Rehabilitationsstau verursacht, da aufgrund einer angewendeten Reparaturstrategie die Erneuerung zeitlich hinausgezögert wird. In der Praxis werden jedoch die Entscheidungen für die Erneuerung eines Leitungsabschnittes maßgebend von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen geprägt. Aufgrund finanzieller Knappheit der zuständigen Gemeinden, Genossenschaften, Verbände und Gesellschaften und der Liberalisierung des Marktes und der damit einhergehenden Preiskalkulations- bzw. Kostenoptimierungsstrategien wird die Ausschöpfung von Leitungsnutzungsdauern angestrebt. Dies führt aber gleichzeitig zu einem Anstieg des Schadensrisikos, speziell für HZL.

In Österreich ist derzeit ein Mangel an Zustandsinformationen betreffend HZL erkennbar. Ein Grund dafür ist, dass ca. 70 % des Gesamtanschaffungswertes der WVU in Form von Rohrleitungen und dazugehörigen Anlagen im Untergrund vergraben und nicht zugänglich und somit direkt sichtbar sind. Ein weiterer Grund des Zustandsmangels resultiert aus vielfach noch fehlenden Instandhaltungsstrategien. Zusätzlich herrscht über die am Markt angebotenen Methoden der zerstörungsfreien direkten inneren Inspektion ein gewisser Informationsmangel, weshalb diese kaum eingesetzt werden. Die unterschiedlichen Verfahren beeinflussen in Abhängigkeit der Fragestellung und Rahmenbedingungen das Trinkwassernetz in hydraulischer und betrieblicher Hinsicht. Nach erfolgter Reparatur werden aktuell auch keine Untersuchungen an geborgenen Leitungsteilen mit Hilfe von Labor-Materialzustandsanalysen durchgeführt. Derartige Untersuchungen würden diesbezüglich zum besseren Verständnis der Schadensentstehung beitragen.

Der Verschlechterungsprozess von Rohrleitungen wird von unterschiedlichsten Faktoren beeinflusst. Alle Einflüsse im Detail zu erheben ist nicht möglich und wirtschaftlich auch nicht vertretbar. Daher ist es sinnvoll die maßgebenden Einflüsse zu identifizieren und daraus eine Zustandsverschlechterung zu berechnen. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Einflussfaktoren ist stets von der Datenlage des einzelnen WVU abhängig. Jedes WVU hat eine eigene einzigartige Alterungs- bzw. Verschlechterungs-Charakteristik und man kann das Schadensverhalten nicht ohne weitere Untersuchungen pauschal von einem WVU auf ein anderes WVU umlegen.

## 2 Ziel

Ziel dieser Arbeit ist es für verschiedene Rohrmaterialien mit unterschiedlichen RD in Abhängigkeit der Schadensmechanismen, Belastungen und Rahmenbedingungen das Auftreten diverser Schadensarten mit Hilfe unterschiedlicher Berechnungsansätze zu ermitteln. Dies soll durch eine ganzheitliche Betrachtung des Systems „Leitung-Belastungen-Rahmenbedingungen“ als Basis eines effizienten Risikomanagements von HZL und einer dadurch langfristigen Werterhaltung der übergeordneten Trinkwassernetze erreicht werden.

Der Vergleich von unterschiedlichen Berechnungsansätzen zur einzelleitungsbezogenen Eingrenzung von gefährdeten HZL mittels Risikobewertung soll methodisch entwickelt und gezeigt werden. Statistische und physikalische Modelle zur Berechnung der quantitativen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit werden exemplarisch angewendet. Die zu bestimmenden Modellannahmen werden in Abhängigkeit der vorliegenden Datenstruktur der zwei betrachteten HZL-Systeme im Detail erläutert. An diesen zwei Fallbeispielen von übergeordneten Trinkwassernetzen werden leitungsspezifische Auftrittswahrscheinlichkeiten von spezifischen Schadensarten berechnet. Bei dieser praxisrelevanten Problemstellung wird die Frage beantwortet, mit welcher Wahrscheinlichkeit bestimmte Schadensartenereignisse auftreten, welche Einflussgrößen diese Wahrscheinlichkeiten signifikant bestimmen und welche Schadensarten am Besten im Rahmen einer Validierung am Gesamtnetz bestimmt werden können.

Dies soll als Basis für Instandhaltungsentscheidungen hinsichtlich Wartung, Erneuerung, Reparatur oder direkter Inspektion zur Materialzustandsanalyse einerseits und Leckagedetektion andererseits dienen. Eine einzelleitungsbezogene und nicht leitungsgruppenbezogene Schadensfrüherkennung und Schadensvermeidung kann dadurch erreicht werden. Damit wird die Entscheidung unterstützt ob und unter welchen Voraussetzungen durch den vorerst erhöhten Inspektionsaufwand langfristige Einsparungen durch eine Schadensminimierung mittels einer Detektion von Leckagen und Wasserverlusten und eine damit einhergehende Verlängerung der Lebensdauer der HZL erreicht werden können.

Folgende Fragestellungen sollen im Rahmen der Methodenentwicklung in dieser Arbeit untersucht und abschließend als unterstützende Entscheidungsgrundlage der Praxis zur Verfügung gestellt werden:

- Welche Daten hinsichtlich Bestand und Zustand der HZL-Netze und der darauf einwirkenden Einflüsse sind in Österreich verfügbar und eruiierbar?
- Welche Einflussfaktoren ergeben sich zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von spezifischen Schadensarten als signifikant und sollten daher langfristig detailliert dokumentiert werden?

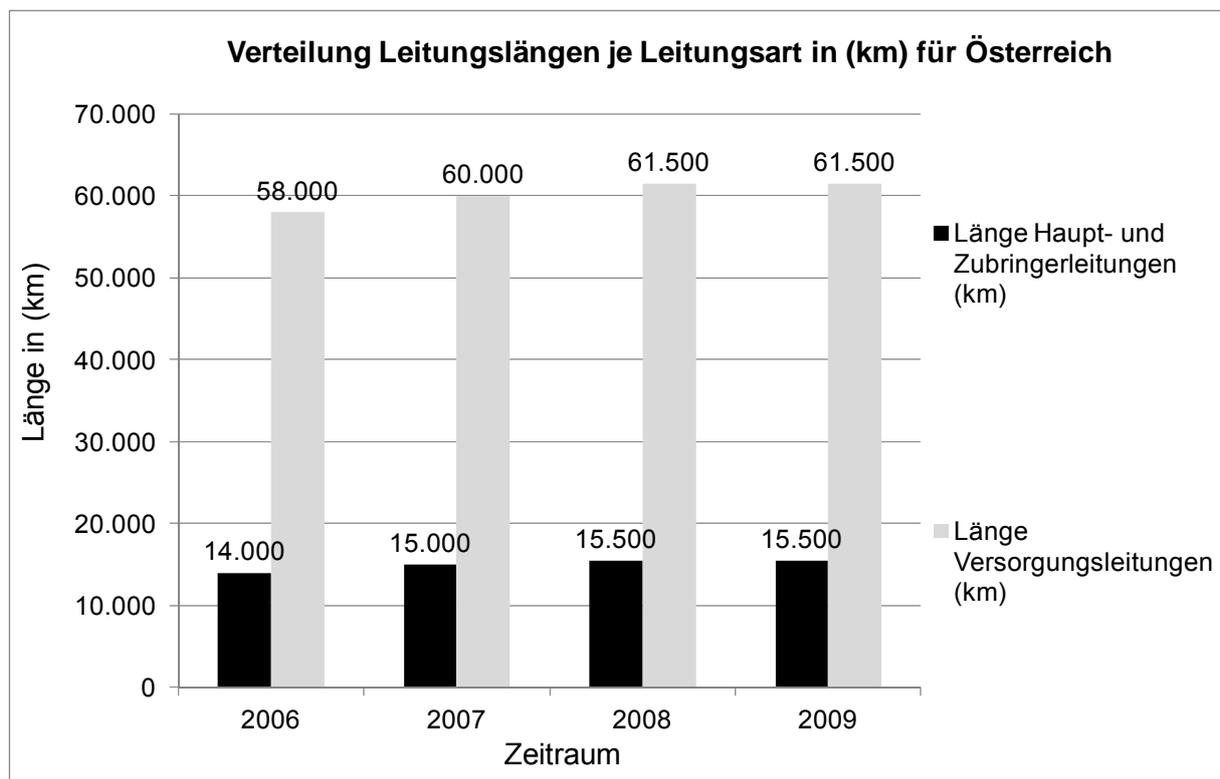
- Reichen die derzeit vorhandenen Normen, Richtlinien und Regelwerke zur zufriedenstellenden Dokumentation der unterschiedlichen Schadensarten im Reparaturfall vor Ort aus?
- Ist der derzeitig vorhandene Datenstand an Einflussfaktoren, Zustandsdaten von Rohrleitungen und Informationen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit der spezifischen Schadensarten ausreichend?
- Führt eine große und detaillierte Datendichte im Gegensatz zum alleinigen Vorhandensein der Basisinformationen Rohrmaterial, Alter und RD zu besseren Ergebnissen in der Prognose des zukünftigen Leitungszustandes?
- Mit welcher Berechnungsmethode - physikalische oder statistische Modelle – werden hinsichtlich der Zustandsberechnung von spezifischen Schadensarten bessere Ergebnisse ermittelt?
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit treten bestimmte Schadensarten auf und welche Einflussgrößen bestimmen diese Schadensartenwahrscheinlichkeiten?
- Für welche Netzgröße und Altersstruktur können diese Modelle zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit im Bereich HZL angewendet werden?
- Welche Auswirkungen ergeben sich durch Veränderung von signifikanten Einflussfaktoren in der zukünftigen Risikoprognose?

Für übergeordnete Trinkwassernetze ist es daher besser Schäden zu vermeiden und frühzeitig zu erkennen als mit Hilfe von Schadenshäufungen im Nachhinein Strategien zu entwickeln.

### 3 Ausgangslage Haupt- und Zubringerleitungen (HZL) in Österreich

#### Allgemeines

Mit Stand 2012 ist der Ausbau der öffentlichen Wasserversorgungsnetze in Österreich weitgehend abgeschlossen. Der Anschlussgrad an die öffentliche Wasserversorgung lag im Jahr 2009 lt. ÖVGW DW 1 (2009) bei ca. 89 %. Aus Abbildung 3 ist ersichtlich, dass mit Datenstand 2009 20 % der Gesamtlänge der öffentlichen Wasserversorgung in Österreich als HZL vorliegen.

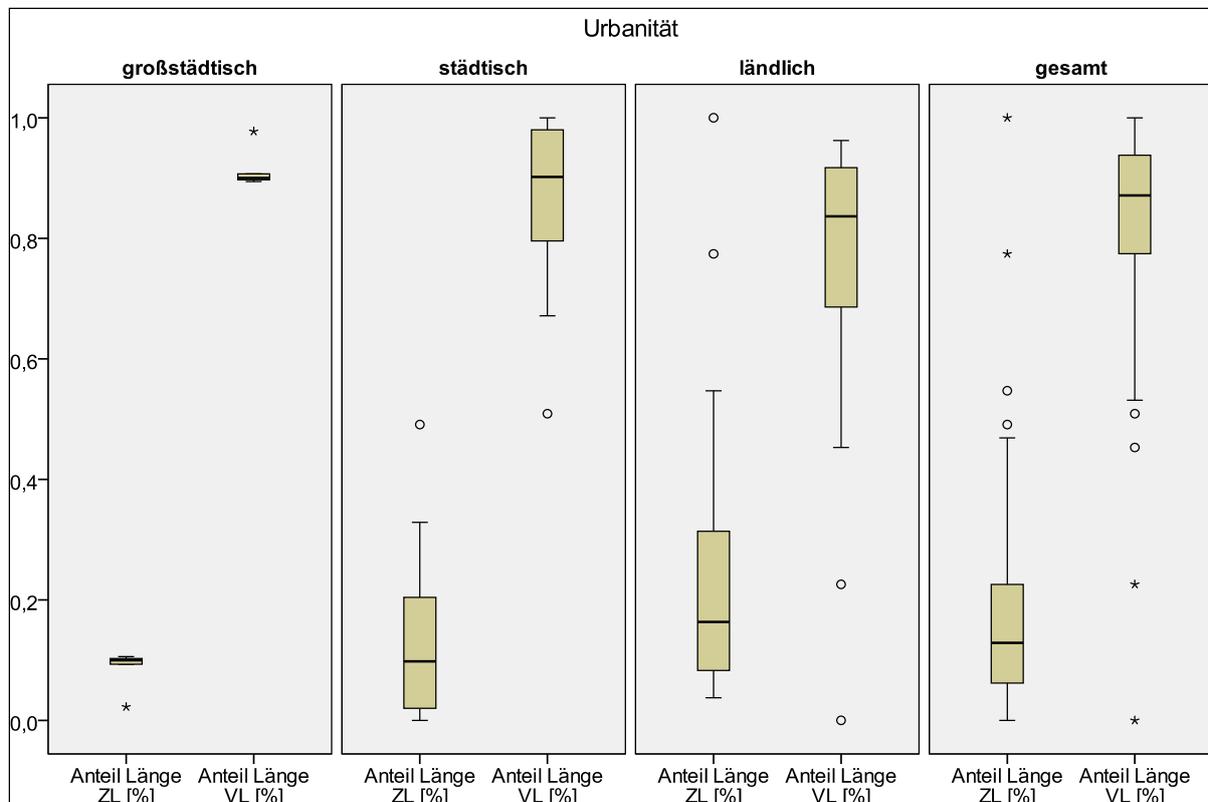


**Abbildung 3: Verteilungsentwicklung der Trinkwasserleitungslängen je Leitungsart in Österreich von 2006 bis 2009 (ÖVGW DW 1, 2009)**

Die Datenbasis der folgend dargestellten Auswertungen basiert auf den Ergebnissen des ÖVGW Benchmarking Stufe C (2008), an dem 36 WVU auf freiwilliger und anonymer Basis teilgenommen haben. Diese Betriebe versorgen rund 45 % der Einwohner Österreichs, repräsentieren damit rund 43 % des entgeltlichen Wasserverbrauches, 31 % der existierenden Hausanschlüsse (= AL) und 17 % der österreichischen Leitungslänge. Bedingt durch die Teilnahme städtischer WVU mit geringerer Leitungslänge können verhältnismäßig viele Einwohner bezogen auf Gesamt-Österreich mit Trinkwasser versorgt werden.

In Abbildung 4 ist die Verteilung der Längenanteile von HZL (Benennung Zubringerleitungen ZL = HZL) und VL in Österreich in Abhängigkeit des Gruppierungskriteriums Urbanität lt. Datenbasis ÖVGW Benchmarking Stufe C (2008) dargestellt. Für großstädtisch und städtisch strukturierte Leitungsnetze liegt

der Median in der Verteilung der Längenanteile für HZL-Systeme bei etwa 10 %. In ländlich strukturierten Leitungsnetzen liegt der Median in der Verteilung für HZL bei etwa 16 %. Dies kann durch die zu überwindenden großen Entfernungen zwischen den Wassergewinnungs- und Versorgungsgebieten am Land erklärt werden.



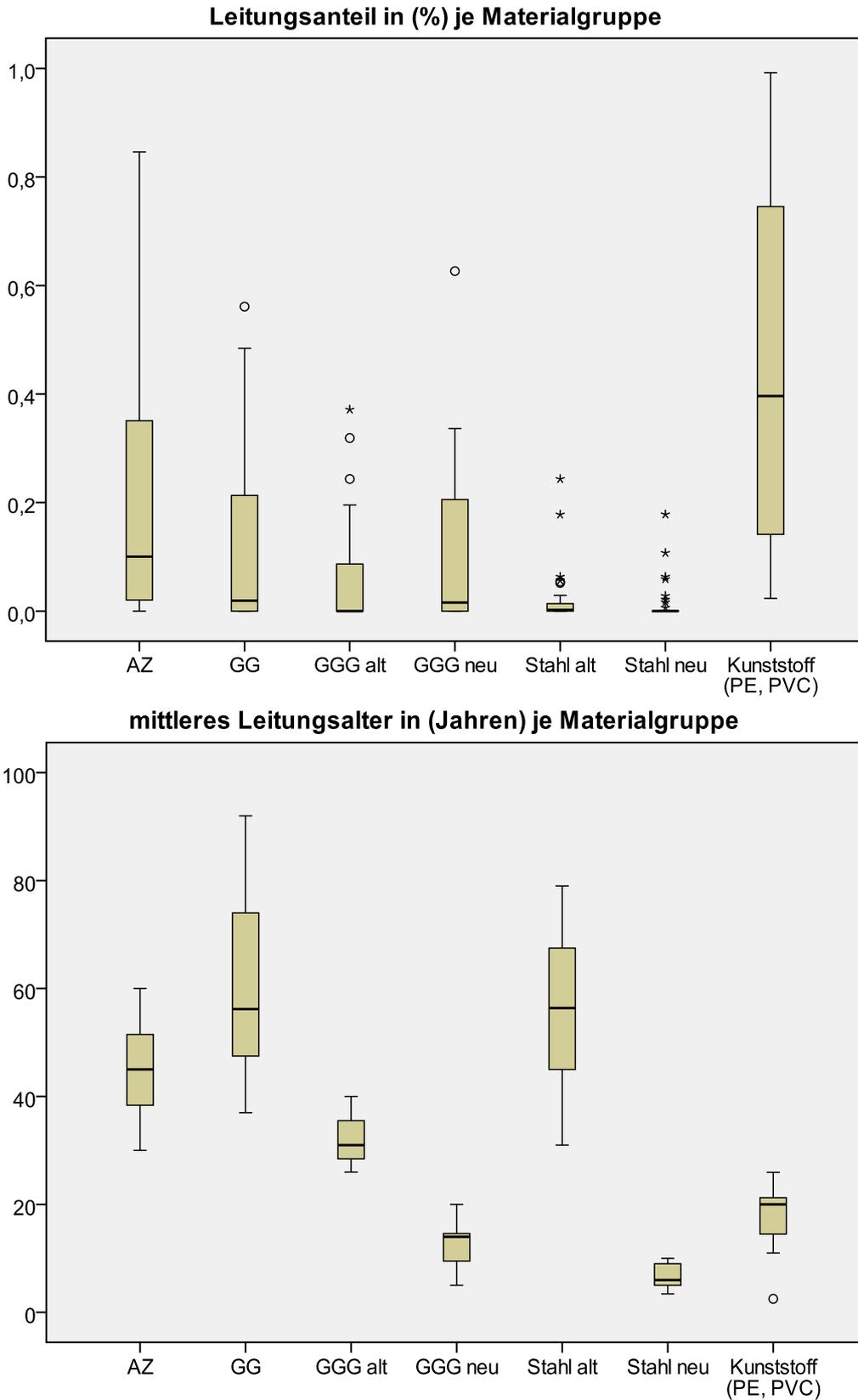
**Abbildung 4: Verteilung Länge HZL und VL in Abhängigkeit der Urbanität (ÖVGW Benchmarking Stufe C, 2008)**

Betrachtet man die Streuung, so kann festgestellt werden, dass großstädtische Netze nur sehr gering streuen. Städtisch strukturierte Netze streuen in der Verteilung mit bis zu 30 % und ländliche mit bis zu 50 % - vereinzelt Ausreißer sind dabei nicht berücksichtigt. Dies wird von der Struktur der Netze der drei Gruppen beeinflusst. Somit kann festgehalten werden, dass je ländlicher die WVU strukturiert sind, umso höher wird in der Regel der Anteil an HZL im System und umso mehr unterscheiden sich die Strukturen untereinander.

Zur genaueren Betrachtung der Leitungsnetze ist nicht nur eine Unterscheidung nach der Leitungsart in HZL und VL sinnvoll, sondern auch eine Unterscheidung nach Materialgruppen und mittlerem Rohrleitungsalter. In Abbildung 5 wird die Verteilung der Leitungsanteile in Prozent und das mittlere Alter in Jahren je Materialgruppe für HZL und VL gemeinsam dargestellt. In Bezug auf den Leitungsanteil in Prozent sind Kunststoffleitungen aus Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) mit einem Median von etwa 40 % am häufigsten vertreten, gefolgt von Asbestzement (AZ) mit etwa 10 % und Grauguss (GG) und Duktiguss neu (GGG neu) mit jeweils etwa 5 %. Im Vergleich der Streuungen setzt sich diese Reihung fort. Des Weiteren vertreten sind die Materialgruppen Duktiguss alt (GGG alt), Stahl alt und Stahl neu.

Vergleicht man das mittlere Leitungsalter in Jahren je Rohrmaterialgruppe so zeigt sich, dass Leitungen aus GG mit einem mittleren Leitungsalter von 58 Jahren, gefolgt von Stahl alt mit 50 Jahren und AZ mit 45 Jahren die im Mittel ältesten verlegten Rohrleitungen in Österreich sind. Wobei diese drei Gruppen auch die größte Streuung aufweisen. Maßgebende zu untersuchende Leitungsanteile sind somit AZ und metallische Leitungen (GG, GGG alt, Stahl alt) mit hohen Leitungsanteilen und hohem mittleren Alter.

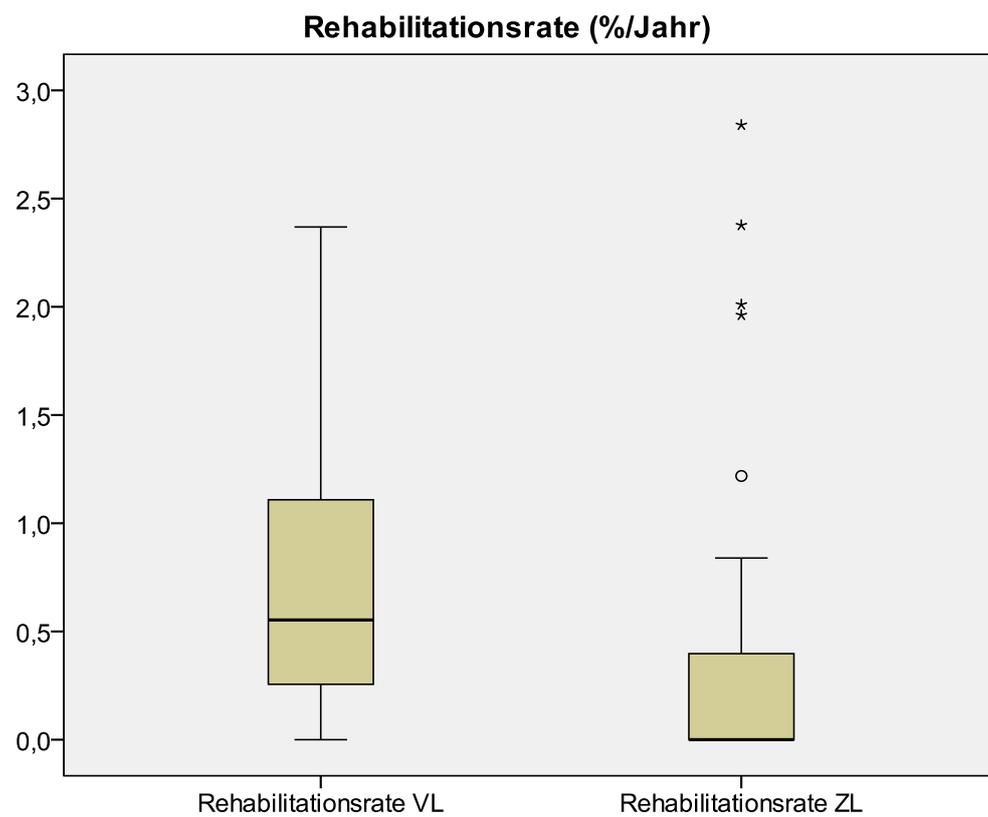
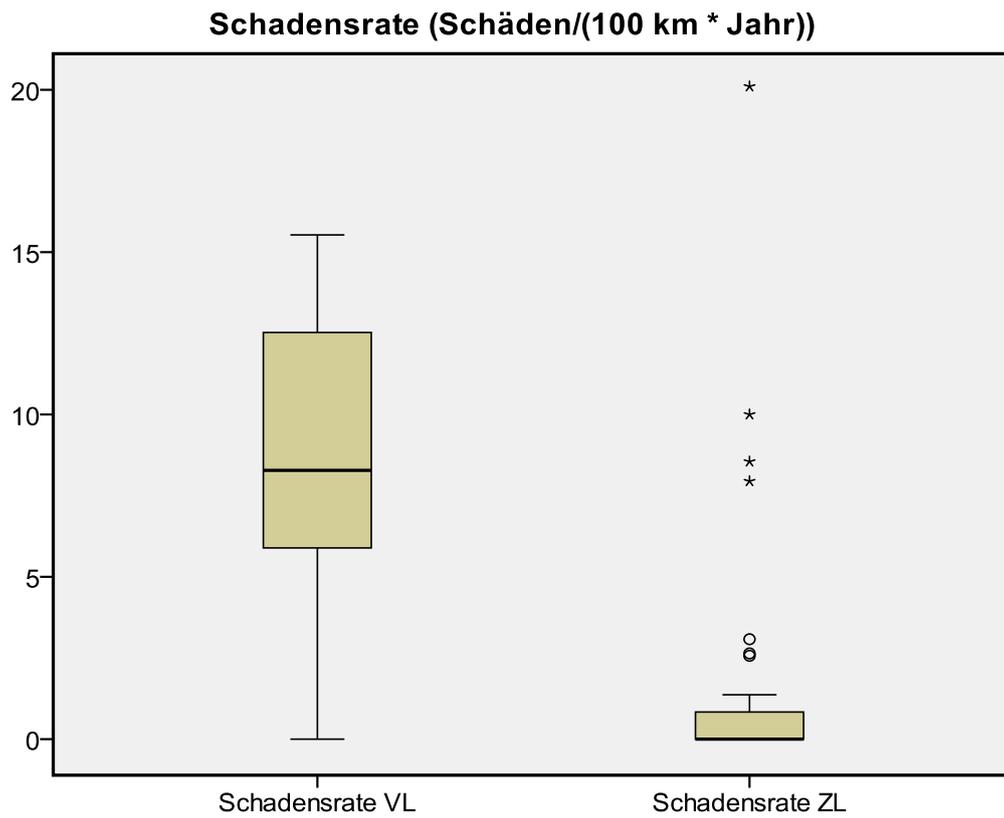
Ein wichtiges Zustandskriterium für Leitungsnetze ist die Schadensanfälligkeit. HZL wurden aufgrund der im Vergleich zu VL hohen Baukosten und Versorgungswichtigkeit mit größerer Sorgfalt verlegt. Weiters sind größere RD aufgrund höherer Rohrwandstärken und folglich größerer Trägheits- und Widerstandsmomente stärker belastbar und widerstandsfähiger im Betrieb als kleinere Nennweiten.



**Abbildung 5: Leitungsanteil in Prozent und mittleres Alter in Jahren in Österreich je Materialgruppe für HZL und VL gemeinsam betrachtet (ÖVGW Benchmarking Stufe C, 2008)**

Lt. ÖVGW Benchmarking Stufe C (2008) befinden sich die SR der HZL für die teilnehmenden WVU in Österreich auf einem sehr niedrigen Niveau. Vereinzelt weisen WVU aufgrund individueller Schadensproblematiken höhere SR auf. Für WVU mit einer geringen HZL-Länge besteht eine gewisse Dipolarität in der Größe der SR und Rehabilitationsrate (RR). Im Falle keiner Schäden ist die SR null, wohingegen bei wenigen Schäden die SR aufgrund der kurzen Bezugslänge auf ein sehr hohes Maß ansteigt. Aufgrund des hohen Schadensausmaßes von HZL und der vorhandenen niedrigen SR müssen umfassendere Bewertungsmethoden zur Prioritätenermittlung der Instandhaltungsstrategien, wie z. B. Risikobewertungsmethoden, eingesetzt werden.

In Abbildung 6 werden die Unterschiede in der SR und der RR zwischen HZL und VL in Österreich lt. ÖVGW Benchmarking Stufe C (2008) verdeutlicht.



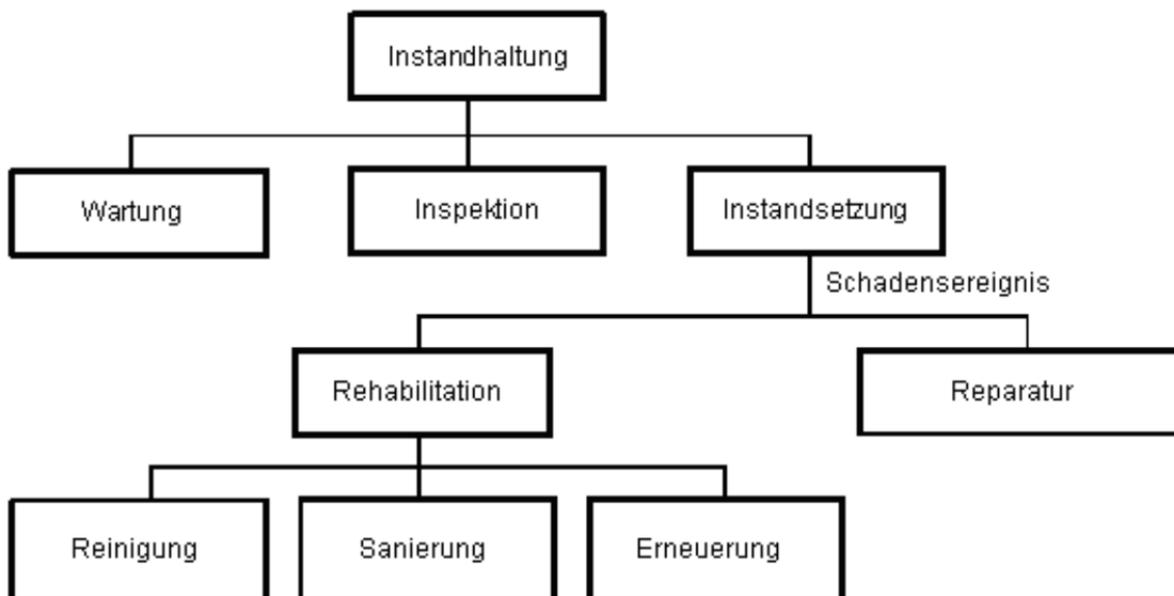
**Abbildung 6: SR und RR für HZL und VL in Österreich (ÖVGW Benchmarking Stufe C, 2008)**

Der Median der SR liegt für VL bei etwa acht Schäden pro 100 km und Jahr, wohingegen der Median der SR für HZL deutlich niedriger bei knapp über null Schäden pro 100 km und Jahr liegt. Vergleicht man die Streuung, so kann festgestellt werden, dass VL eine wesentlich größere Streuung aufweisen als HZL. Dies verdeutlicht die verfolgte abwartende reaktive Feuerwehrstrategie der WVU bez. der Instandhaltung von VL. Für VL wird, wie in der rechten Darstellung in Abbildung 6 ersichtlich ist, ein Medianwert der RR von 0,5 % pro Jahr erreicht. Für HZL liegt der Median der RR bei nahe 0 %. VL streuen bezüglich der RR deutlich mehr als HZL.

### 3.1 *Instandhaltungsstrategien für HZL in Österreich*

#### Allgemeines

Die Instandhaltung von Trinkwasserleitungen gliedert sich, wie in Abbildung 7 dargestellt, in verschiedene Teil- und Unterbereiche (ÖVGW W 100, 2007).



**Abbildung 7: Aufgaben bzw. Bereiche der Instandhaltung von Trinkwasserleitungen (ÖVGW W 100, 2007)**

Im Sinne einer nachhaltigen und effizienten Instandhaltung sollten sich WVU v. a. auf den Teilbereich der Rehabilitation konzentrieren. Dabei sind lt. DVGW W 400-3 (2006) bzw. ÖVGW W 100 (2007) alle Maßnahmen zur Erhaltung oder Verbesserung der Funktionsfähigkeit bestehender Wasserverteilungsanlagen als Rehabilitation definiert. Eine Umsetzung der Rehabilitation als geplante Maßnahme im Rohrnetz aufgrund von Zustands- bzw. Schwachstellenanalysen soll dabei nach Instandhaltungsstrategien lt. ÖVGW W 100 (2007) erfolgen. Diese lassen sich in drei Arten unterteilen:

- **Ereignisorientierte Instandhaltung oder Ausfallstrategie**, d. h. Instandsetzungen werden nur als Reaktion auf gemeldete bzw. detektierte

Schäden bzw. auf externe Ereignisse und Maßnahmen ausgeführt; es wird nur im Schadensfall repariert (Reparatur, Abbildung 7); Inspektion und Wartung finden nicht oder nicht ausreichend statt.

- **Vorbeugende und intervallorientierte Instandhaltung oder Präventivstrategie**, d. h. Wartungs-, Inspektions- und Rehabilitationsmaßnahmen werden in vordefinierten Zeitabständen ausgeführt.
- **Vorbeugende und zustandsorientierte Instandhaltungs- oder Inspektionsstrategie**, d. h. die Instandhaltung orientiert sich an dem durch Inspektion festgestellten Ist-Zustand im Vergleich zu einem definierten Soll-Zustand.

Derzeit werden für HZL in Österreich ereignisorientierte Instandhaltungsstrategien als Reaktion auf gemeldete und detektierte Schäden ausgeführt. In Österreich wird für HZL im Schadensfall eine Reparatur durchgeführt und zerstörungsfreie direkte innere Inspektionen finden nicht oder nicht ausreichend statt.

### **3.1.1 Rechtliche und technische Vorgaben in Bezug auf HZL (Gesetze, Normen, Richtlinien)**

#### 3.1.1.1 Wasserrechtsgesetz

Im österreichischen Wasserrechtsgesetz 1959 BGBl 14 (2011) wird die Bewilligung und die Errichtung von Wasserversorgungsanlagen gesetzlich eindeutig geregelt. Im § 134 wird die hygienische und technische Überprüfung von öffentlichen Wasserversorgungsanlagen festgelegt. In Zeitabständen von höchstens 5 Jahren sind diese Überprüfungen durch Sachverständige oder geeignete Anstalten durchzuführen, sofern die Wasserrechtsbehörde keine kürzeren Zeitabstände aufgrund besonderer Umstände vorsieht. Ein spezieller Bezug bzw. Hinweis auf die Vorgehensweise mit risikogefährdeten HZL ist im Wasserrechtsgesetz nicht explizit gegeben.

#### 3.1.1.2 Trinkwasserverordnung

In der Trinkwasserverordnung-BGBl 121 (2007) wird im § 5 vom Betreiber einer Wasserversorgungsanlage gefordert, dass er die Anlage im ordnungsgemäßen Zustand hält, wartet und instand hält, um dadurch negative Beeinflussungen auf das Trinkwasser zu vermeiden. Ein Verweis auf eine spezielle Vorgehensweise mit risikogefährdeten HZL ist in der Trinkwasserverordnung nicht explizit angeführt.

#### 3.1.1.3 ÖNORM EN 805 (2000)

Die ÖNORM EN 805 (2000) fordert im Kapitel 14.1 vom WVU Unterbrechungen bei der Trinkwasserversorgung zu minimieren und eventuellen Folgen für Umwelt und öffentliche Gesundheit entgegenzuwirken. Die Anlagen müssen auf Störungen und Undichtheiten überprüft werden. Die Häufigkeit und Art der Überwachung und

Inspektion ist von den örtlichen Gegebenheiten und folgenden Rahmenbedingungen abhängig:

- Funktion, Bedeutung der Rohrleitung, Material- und Verbindungsart
- Größe der Wasserverluste, Wasserqualität, Druck und Durchfluss,
- Verkehrslasten, Bettung, Bodenbeschaffenheit und äußere Kräfte,

Somit ist an dieser Stelle im Kapitel 14.1 ein indirekter Verweis auf HZL mit der Charakteristik einer besonderen Bedeutung der Rohrleitung in der Funktion der Wasserversorgung, möglichen hohen Wasserverlusten im Schadensfall, großen Durchflussmengen im ordentlichen Betrieb und verschiedenen Belastungen, welche im Zusammenwirken mit bestimmten Rohrmaterialien zu Schäden führen können, gegeben. Aufgrund dieser örtlichen Rahmenbedingungen ist die Häufigkeit und Art der Überwachung, Inspektion und Pläne für zukünftige Instandhaltung in Abstimmung mit europäischen, nationalen oder örtlichen Anforderungen zu erstellen. Ein Verweis auf eine spezielle Vorgehensweise mit risikogefährdeten HZL ist in der ÖNORM EN 805 (2000) ebenso nicht explizit beschrieben.

#### 3.1.1.4 ÖNORM B 2539 (2005)

In der ÖNORM B 2539 (2005) ist festgehalten, dass im Rahmen einer Eigenüberwachung alle HZL in einem jährlichen Abstand auf Dichtheit kontrolliert werden sollen. Für die regelmäßige und systematische Überwachung von HZL auf deren Dichtheit sind folgende Verfahren gängig, die lt. ÖNORM kombiniert angewendet werden sollten:

- Kontrolle der monatlichen Einspeisung ins Rohrnetz und Beurteilung der Wasserverluste im Sinne der ÖVGW W 63 (2009) und Überwachung durch kontinuierliche Erfassung des Durchflusses, Druckes und der Behälterwasserstände,
- Überwachung mit akustischen Geräten und Überwachung durch Kurzzeitmessung in einem abgesperrten Versorgungsbereich,
- Vergleich der Nachteinspeisemengen mit Erfahrungswerten (= Nachtmindestverbrauchsmessung),
- für kleine Messbereiche sind zufließende Mengen zugleich die Verlustmengen nach Abzug der Dauerentnahmen (= Nullverbrauchsmessung).

Bei komplexen Versorgungsstrukturen wird die Inspektionen in kürzeren Zeiträumen und, wenn möglich, gemeinsam mit der Prüfung auf Dichtheit vorgeschlagen.

Von der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW) und dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) werden Richtlinien erarbeitet und veröffentlicht, welche bestimmte rechtliche Anforderungen im Detail behandeln. Diese Richtlinien bilden ergänzend zu den rechtlichen und normativen Vorgaben den Stand der Technik in Österreich.

#### 3.1.1.5 ÖVGW W 105 (2011)

In dieser ÖVGW-Mitteilung wird im Falle einer Schadensdokumentation eine erweiterte Zustands- und Umgebungsbeschreibung prinzipiell immer, bei HZL mit hoher Priorität unbedingt, vorgeschlagen. Darunter fallen beispielsweise die detaillierte Erfassung der Oberfläche, Verkehrsbelastung, Beschichtungen am Rohr, Umgebungsmaterialien und Grundwasserinformationen.

#### 3.1.1.6 ÖVGW W 63 (2009)

Die ÖVGW W 63 (2009) weist darauf hin die Abhängigkeit von unterschiedlichen Versorgungsstrukturen und Rahmenbedingungen, wie etwa die Anschlussdichte, bei der Berechnung von Wasserverlustkennzahlen zu berücksichtigen. Ein Bewertungsschema der Wasserverluste für HZL-Systeme ist, wie für Versorgungssysteme mit weniger als 20 AL bezogen auf einen Kilometer Leitungslänge, anwendbar.

#### 3.1.1.7 ÖVGW W 100 (2007)

Die Bewertung der übergeordneten Trinkwassernetze mit der Kennzahl der SR gemäß ÖVGW Richtlinie W 100 (2007) ist speziell für übergeordnete Trinkwassernetze nicht als Bewertungskriterium heranzuziehen. In der ÖVGW Richtlinie W 100 (2007) wird im Zuge von Reparaturen für HZL mit erhöhter Priorität die Durchführung einer erweiterten Zustandsbeurteilung, wie auch in der ÖVGW W 105 (2011) empfohlen. Jedoch fehlt ein Hinweis auf die detaillierte Art und Weise dieser vorzunehmenden Zustandsbeurteilung.

#### 3.1.1.8 DVGW W 392-2 (2011)

Mit Hilfe der DVGW W 392-2 (2011) kann unter Anwendung einer Gefährdungsanalyse ein Überwachungskonzept von HZL erstellt werden. Ein Bewertungsschema in Abhängigkeit der Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen mit einer Erläuterung der Überwachungskonzepte wird beschrieben. Dadurch ist eine Risikoabschätzung nach DVGW W 1001 zum Schutz von Personen und Anlagen Dritter dargestellt, welche aufgrund von Schäden an HZL ausgehen können.

#### 3.1.1.9 Water Safety Plans (Trinkwassersicherheitskonzepte)

In den „Water Safety Plans“ (deutsch: Trinkwassersicherheitskonzepte) der World Health Organization (WHO) (deutsch: Weltgesundheitsorganisation) sind Methoden und Konzepte zur Aufrechterhaltung und Sicherstellung der Trinkwasserversorgung erarbeitet worden. Eine Risikoabschätzung mit Berücksichtigung der Schadenswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes als Basis einer Gefährdungsanalyse ist implementiert worden. Ein konkreter Hinweis auf die detaillierte Art und Weise einer vorzunehmenden Zustandsbeurteilung von HZL und die Methodik einer quantitativen schadensartenbezogenen Risikoermittlung für übergeordnete Trinkwassernetze ist in den „Water Safety Plans“ nicht vorhanden (WHO, 2009).

## 3.2 Definitionen, Begriffsbestimmungen

### 3.2.1 Definition Leitungsarten, Schaden und Risiko

Definition Zubringerleitungen (ZL):

- ZL wurden vor der Überarbeitung der ÖNORM EN 805 (2000) mit Veröffentlichung im Jahr 2000 als Transportleitungen bezeichnet und verbinden die Wassergewinnung, Wasseraufbereitung und Wasserbehälter mit den Versorgungsgebieten und weisen üblicherweise keine direkte Verbindung zum Endverbraucher auf.
- Lt. DVGW W 400-3 (2006) und DVGW W 392-2 (2011) sind ZL als Wasserleitungen definiert, welche Wassergewinnung(en), Wasseraufbereitungsanlage(n), Trinkwasserbehälter und/oder Versorgungsgebiete verbinden und üblicherweise keine direkte Verbindung zum Verbraucher aufweisen.
- Lt. SVGW W 4 (2012) ist die Doppelbezeichnung Transportleitungen bzw. Zubringerleitungen noch aufrecht und eine ZL ist als Wasserleitung definiert, welche Wassergewinnung(en), Wasseraufbereitungsanlage(n), Trinkwasserbehälter und/oder Versorgungsgebiete verbindet und üblicherweise keine direkte Verbindung zum Verbraucher aufweist.

Definition Hauptleitungen (HL):

- HL sind lt. ÖNORM EN 805 (2000), ÖVGW W 100 (2007), DVGW W 400-3 (2006) und SVGW W 4 (2012) als Wasserleitungen mit Hauptverteilungsfunktion innerhalb eines Versorgungsgebietes ohne direkte Verbindung zum Verbraucher definiert.

Für die Untersuchungen in dieser Dissertation werden Haupt- und Zubringerleitungen gemeinsam betrachtet. Dies ist aufgrund der Funktionalität von Haupt- und Zubringerleitungen als sogenannte Hauptschlagadern in großstädtischen Trinkwassersystemen begründet.

Verschiedene Begrifflichkeiten existieren lt. Kleiner et al. (2005) für die Bezeichnung von HZL

im amerikanischen Sprachraum:

- large-diameter water transmission mains,
- large-diameter transmission water mains,
- large water transmission mains,
- large diameter mains,
- large water mains,
- large-diameter pipes,
- large pipes,
- large transmission mains,

und im englischen Sprachraum als:

- trunk mains.

Definition Fernleitungen (FL):

- Lt. DIN 4046 (1983) sind FL als ZL über große Entfernungen definiert.
- Lt. SVGW W 4 (2012) werden FL als TL über große Entfernungen als Freispiegel- oder Druckleitung definiert.

Definition Leitungsabschnitt:

- Lt. DVGW W 402 (2009) ist dies ein Teil der Wasserversorgungsanlage mit gleichen bestandsbeschreibenden Attributen wie beispielsweise Rohrmaterial, NW, Rohrverbindung, Rohrumhüllung und Verlegejahr.

Definition Schaden:

- Lt. ÖVGW W 105 (2011) und Lt. DVGW W 402 (2009) stellt ein Schaden eine lokale unzulässige Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit einer Leitung oder Anlage dar und ist in der Regel mit einem Wasseraustritt verbunden.

Definition Schadensbild:

- Lt. ÖVGW W 105 (2011) tritt jeder Schaden in Form eines bestimmten Schadensbildes auf. Das Schadensbild umfasst alle Faktoren, die bei einem Schadensauftritt ersichtlich sind und dokumentiert werden können.

Definition Schadensart:

- Lt. DVGW W 402 (2009) ist die Schadensart eine festgestellte Veränderung des Sollzustandes.
- Lt. ÖVGW W 105 (2011) ist die Schadensart ein Teil des Schadenbildes.

Definition Schadensursache:

- Lt. ÖVGW W 105 (2011) und DVGW W 402 (2009) ist die Schadensursache die Einwirkung, die zur unzulässigen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit geführt hat.

Definition Risiko:

Das Risiko stellt lt. Roscher et al. (2004) statistisch einen Erwartungswert dar und wird als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und erwartetem Schadensausmaß definiert. Das Schadensausmaß kann hierbei beispielsweise mit der Höhe der Folgekosten beschrieben werden wie auch qualitativ definiert sein, z. B. als Beschädigung der umgebenden Infrastruktur.

### **3.2.2 Begriffsdefinition Modell**

Durch die Abgrenzung von relevanten Objekten und wichtigen Interaktionen von ihrer Umwelt wird nach Gujer (2008) ein System gebildet. Alle nicht in diesem System berücksichtigten Objekte und betrachteten Interaktionen liegen folglich außerhalb der

Systemgrenzen und beeinflussen das System nicht mehr. Mit Hilfe einer Modellbildung wird die Systemkomplexität auf relevante Variablen, Parameter und Beziehungen mit physikalischen und mathematischen Modellen vereinfacht und beschrieben.

Auftretende Probleme und Missverständnisse im Rahmen von Modellbeschreibungen werden lt. Carstensen et al. (1997) durch ein falsches Verwenden von bestehenden und bereits klar definierten Terminologien und durch den Gebrauch von unklaren Begrifflichkeiten verursacht. Bestehende und bereits klar definierte Terminologien werden einerseits aufgrund mangelnden Wissens oder andererseits aufgrund Unachtsamkeit falsch verwendet. Die Anwendung unklarer Begrifflichkeiten wird aber auch oftmals durch bestehende verwirrende Definitionen hervorgerufen.

Carstensen et al. (1997) trennen die Begrifflichkeiten einer Systembeschreibung in Modellbestandteile, Modellattribute und Begriffe der Modellbildung.

#### Modellbestandteile

- Konstante: Die Größe bleibt aufgrund aller möglichen Modellapplikationen konstant.
- Modellstruktur: Verhältnis zwischen Input, Output und formulierten Gleichungen.
- Parameter: Modellbestandteil, dessen Größe für jede spezielle Modellapplikation ermittelt werden muss.
- Variable: Input- und Outputwerte in einem Modell.
- Koeffizient: Ist einem Parameter gleich zu setzen.
- Faktor: Ist nicht mit der Definition von Parameter oder Variable gleich zu setzen.
- Indikator: Hinweis auf einen bestimmten Sachverhalt oder ein Ereignis.

#### Modellattribute

- dynamisch: Das Modell beschreibt die zeitliche Entwicklung des Systems.
- empirisch: Die Modellgleichungen basieren nicht auf generellen Vorschriften und Naturgesetzen und sind von beschreibender Charakteristik.
- mechanistisch: Ein Anstreben des Modells um die Mechanismen, die zum beobachteten Verhalten führen, zu beschreiben.
- physikalisch: Das Modell basiert auf Beschreibungen naturwissenschaftlicher Gesetzmäßigkeiten.
- statisch: Das Modell beschreibt einen stabilen Dauerzustand eines Systems.
- zeitinvariant: Die Modellberechnungen ändern sich nicht mit der Zeit.

#### Begriffe der Modellbildung

- Kalibrierung: Das Bestimmen von Parametergrößen zur optimalen Übereinstimmung von Messdaten und Modellergebnissen.

- Confirmation: Ist der Validierung gleich zu setzen.
- Falsifikation: Demonstration der Ungültigkeit eines Modells durch Darstellung der Abweichung der Modellergebnisse von den Messungen bzw. Beobachtungen. Confirmation, Validierung und Verifikation sind fehlgeschlagene Versuche der Falsifikation.
- Systemidentifizierung: Modellfindung zur Lösung eines gegebenen Problems durch wiederholte Durchführung von Parameterschätzung und Modelldiagnose.
- Modellbildung: Iterativer Prozess zum Erreichen eines adäquaten Modelles mit Hilfe der Schritte Problemformulierung, Systemidentifizierung und Modelltest.
- Modellauswahl: Wahl des optimalen Modelles, welches die gemessenen Daten bzw. Beobachtungen am besten beschreibt.
- Parameterschätzung: Das Bestimmen von Parametergrößen mit Hilfe statistischer Methoden zur optimalen Übereinstimmung von Messdaten und Modellergebnissen.
- Simulation: Berechnung von Modellergebnissen für gegebene Inputgrößen und Parameterwerten.
- Validierung: Test des Modells mit einem Datensatz, der nicht zur Identifizierung des Modells herangezogen wurde. Validierung erhöht nur den Glauben an die Richtigkeit des Modells. Dadurch ist es aber nicht möglich die Richtigkeit des Modells allgemein zu beweisen.
- Verifikation: Ist der Validierung gleich zu setzen.
- Unsicherheitsanalyse: Abschätzung der Unsicherheit in der Modellprognose und Analyse der Herkunft der Unsicherheiten.

## 4 Modelle in der Rehabilitationsplanung

### 4.1 Schadensprognosemodelle für Versorgungsleitungen (VL)

Zur Vorhersage von Schäden mit Wasseraustritt auf VL in Trinkwassernetzen werden Schadensprognosemodelle angewendet und diese bilden eine weitere Grundlage zur Planung von Instandhaltungsmaßnahmen. VL in Trinkwassernetzen werden als allgemein reparierbare Systeme betrachtet. Wirtschaftlichkeitsüberlegungen der Verantwortlichen von WVU bestimmen die Nutzungsdauer von Trinkwasserleitungen. Die entstehenden Kosten infolge von Schäden und Wasserverlusten werden mit den Erneuerungskosten verglichen. Dadurch wird der wirtschaftlich optimale Zeitpunkt eruiert, ab wann die Leitung nicht mehr weiter repariert, sondern erneuert werden sollte.

Zur Prognose von zukünftigen Schäden wurden unterschiedliche Schadensprognosemodelle entwickelt (Kleiner und Rajani, 2001; Park und Longanathan, 2002, Kleiner und Rajani, 2012). Diese leiten in der Anwendung auf VL aufgrund historischer Schadensinformationen bestimmte Schadensmuster ab, welche sich in die Zukunft mit Hilfe von Schadensprognosemodellen fortsetzen lassen und sind speziell für VL eine wirtschaftliche Vorgehensweise. Am Markt werden verschiedene Softwarepakete zur Rohrnetzbewertung von Trinkwassernetzen angeboten, mit denen die Entscheidung zur Umsetzung verschiedener Instandhaltungsstrategien vorgeschlagen wird. Diese Software-Entscheidungshilfetools stützen sich Großteils auf die Auswertung von Schadensstatistiken. Lt. Reid (2000) verwenden nur ca. 30 % von insgesamt 45 untersuchten WVU aus Nordamerika und Großbritannien diese mathematischen Modelle zur Entscheidungsunterstützung in der Rehabilitationsplanung. Dieser geringe Anteil ist ein Hinweis darauf, dass Forschungserfolge zwar in Softwaretools umgesetzt werden und folglich aber in der Praxis oftmals nicht angewendet werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil der WVU in Österreich, die keine mathematischen Modelle oder Softwaretools zur Schadensprognose verwenden, noch viel höher ist.

Die Leitungsgruppen zur Berechnung der Schadensprognose für VL werden lt. Kleiner und Rajani (2007) aufgrund der vorliegenden oder eruierten statischen Faktoren, wie beispielsweise Rohrmaterialart, RD, Verlegejahr und Bodenart gebildet. Nach Kleiner und Rajani (2000) werden für Schadensprognosemodelle nahezu nur statische Einflussfaktoren berücksichtigt. Die Begründung dafür ist, dass erhebliche Datenmengen in einem gewissen Detaillierungsgrad vorliegen sollten und dass belastbare Daten zur Modellierung von z. B. spezifischem Bodenwiderstand nur unter hohem finanziellem Aufwand eruiert sind oder überhaupt historisch bedingt nicht vorliegen. Weiters sind Klimadaten wie Temperatur langfristig nicht zuverlässig voraussagbar und deswegen ist die Implementierung von z. B. langfristigen Temperatureinflüssen in die Schadensprognose noch nicht allgemein umgesetzt

worden. Ungeachtet der Datenverfügbarkeit von Einflussparametern ergibt ein Nichtberücksichtigen von zeitabhängigen Einflüssen in der statistischen Analyse von Schadensraten trotzdem ein verzerrtes Ergebnis in vielen Fällen.

Die Abweichungen oder Schwankungen der SR können zeitabhängigen Einflussfaktoren, wie extrem kalten Winterperioden oder sehr trockenen Sommerperioden, zugeordnet werden. Die Datenverfügbarkeit ist meist ein limitierender Faktor der Schadensprognose. Lt. Kleiner und Rajani (2007) sind Alter, Temperatur, Bodenfeuchtigkeit und Korrosionsschutz die zu betrachtenden zeitabhängigen (= dynamischen) Variablen in der Schadensprognose. Kleiner und Rajani (2012) untersuchten vier unterschiedliche Modelle zur Reihung von Versorgungs-Einzelleitungen bezüglich der Umsetzung von Instandhaltungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Schadensfrequenz in Abhängigkeit von dynamischen und statischen Einflussfaktoren. Diese vier betrachteten Modelle waren ein heuristisches Modell, ein bayessches Modell, ein logistisches Regressionsmodell und ein probabilistisches Modell basierend auf dem non-homogeneous-Poisson-process.

Statistische Methoden werden prinzipiell in leitungsgruppenbezogene und einzelleitungsbezogene Modelle unterteilt. Diese statistischen Methoden zur Schadensprognose für VL werden des Weiteren in deterministische, probabilistisch multi-variate und probabilistisch single-variate Methoden unterteilt. Deterministische Modelle werden zur Schadensprognose für homogen gebildete Leitungsgruppen angewendet. Dabei werden die homogenen Leitungsgruppen aufgrund der Einflussfaktoren, die diese Schadensmuster verursachen, gebildet. Probabilistisch multi-variate Modelle berücksichtigen unterschiedliche die Schadensmuster beeinflussende Kovariaten und rechtszensierte Leitungsdaten und sind als einzelleitungsbezogene Entscheidungshilfe bezüglich Erneuerung oder Reparatur anwendbar. Probabilistisch single-variate Modelle enthalten Modelle, die probabilistische Prozesse auf gruppierte Daten anwenden und Schadenswahrscheinlichkeiten und Lebensdauererwartungen als Ergebnis ableiten (Kleiner und Rajani, 2001).

Auf die statistischen Methoden zur Schadensprognose für VL wird in dieser Arbeit folglich nicht mehr weiter eingegangen.

#### **4.2 Risikobewertungsmodelle für HZL**

Liu et al. (2012) beschreiben zahlreiche Untersuchungen und Forschungsarbeiten zur optimalen Entscheidungsfindung betreffend Reparatur oder Erneuerung für VL. Der Großteil dieser Forschungsarbeiten verwendete die Schadensstatistik bzw. Schadensfrequenz als eine Beschreibung der Verschlechterung bzw. Alterung. Diese Vorgehensweise ist für VL mit kleinen RD sehr gut einsetzbar, da eine bestimmte Anzahl von Schäden toleriert wird, bis es zu einer Erneuerungsmaßnahme kommt. Wenig Forschungsarbeit hat es bisher hingegen in der Schadensfrüherkennung von

HZL gegeben, bei der die Schadensvermeidung oberstes Ziel ist, da HZL-Schäden ein großes Schadensausmaß verursachen können.

Grundsätzlich lässt sich der Begriff Risiko im Kontext dieser Arbeit als das Produkt aus Wahrscheinlichkeit und Schadensausmaß bei einem aufgetretenen und folglich reparierten Schaden definieren.

Friedl und Fuchs-Hanusch (2011), Fuchs-Hanusch et al. (2011b) und Park et al. (2010) wählten mit den zur Verfügung stehenden Daten zur Bewertung von HZL einen risikoorientierten Priorisierungsansatz. Grundlage dieser Risikobetrachtung ist die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis oder „Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse“). Die Schadenswahrscheinlichkeit je HZL wurde dabei mit einem Punktesystem aufgrund der vorhandenen Einflüsse berechnet und gewichtet. Die Punkte-Einteilung und Gewichtung erfolgte über Experteneinschätzungen oder qualitativer Bewertungen der jeweiligen Einflüsse auf bereits dokumentierte Schadensereignisse. Die Schadensausmaßseite je HZL wurde ebenfalls aufgrund der qualitativ ermittelten oder über Experteneinschätzung festgelegten Punktezahl und Gewichtung berechnet.

Cooper et al. (2000) ermittelten für 5 x 5 m große GIS-Raster entlang von Wasserleitungen die Auftretswahrscheinlichkeit von allgemeinen Schäden mittels logistischer Regressionsanalyse in Abhängigkeit der Einflussfaktoren Verkehrsbelastung, Innendruck, korrosionsfördernder Faktoren im Boden und angrenzende Leitungsträger. Zur abschnittsbezogenen Risikoermittlung wurden unterschiedliche Konsequenzen mittels Punktesystemen bewertet und mit den Auftretswahrscheinlichkeiten in einer Risikomatrix dargestellt.

Möderl et al. (2011) entwickelten ein integriertes Konzept zur Identifikation von Schwachstellen und der Implementierung von Sicherheitsplänen für kritische Infrastrukturen. Dabei wurden u.a. terroristische oder Sabotageakte, altersbedingte Einflüsse und Veränderungen aufgrund des Klimawandels berücksichtigt.

In den Untersuchungen von Fuchs-Hanusch et al. (2011b), Park et al. (2010), Möderl et al. (2011) und Cooper et al. (2000) wurde der Zusammenhang der unterschiedlichen Einflussfaktoren mit dem Auftreten von spezifischen Schadensarten, wie Korrosionslöchern oder Rissen, nicht berücksichtigt.

In den Veröffentlichungen von Fuchs-Hanusch et al. (2011a), Friedl und Fuchs-Hanusch (2012) und Friedl et al. (2012) wurde die Berechnung der quantitativen spezifischen Schadensarten-Auftretswahrscheinlichkeit und Prognose dieser maßgeblicher Versagensarten unter Anwendung unterschiedlicher Modelle als Grundlage der Risikobewertung übergeordneter Trinkwassernetze im Detail beschrieben.

### **4.3 Risikobewertungsmodell im Vergleich für Kanäle in Österreich**

Mit einem Planungskonzept, basierend auf einem Risikoansatz, werden Leitungsabschnitte identifiziert, die in Hinblick auf die Einhaltung von Funktionalanforderungen gemäß EN 752 (2008) ein Risiko darstellen (Fuchs-Hanusch et al., 2012). Aus unerwünschten Ereignissen resultierende Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen werden quantifiziert. Die Zustandsbeschreibungen, auf Basis der Kürzel aus der Kamera-Inspektion, werden nach ihrer Relevanz für definierte „unerwünschte Ereignisse“ eingestuft. Mittels einer binären logistischen Regressionsanalyse werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Auftreten relevanter Zustände beschrieben. Die Konsequenzen werden mittels einer Vulnerabilitätsanalyse (Möderl et al., 2009) beschrieben. Im Sinne der Risikobewertung werden schadensbildorientierte Wahrscheinlichkeiten für definierte „Ereignisse“ bei bereits befahrenen Kanalisationen abgeleitet. Die statistischen Berechnungen werden dann zur Wahrscheinlichkeitsabschätzung für nicht bzw. selten inspizierte Kanäle mit ähnlichen Rahmenbedingungen verwendet. Die gewonnenen Informationen können somit für die Planung von Inspektionen bzw. die Festlegung von Inspektionshäufigkeiten genutzt werden.

Eine Erweiterung von statistischen Schadensprognosemodellen (Davies et al., 2001; Ariaratnam et al., 2001; Ana et al., 2009) auf schadensbildorientierte Risikobewertungen ermöglicht die Identifizierung von Abwasserleitungen, die nicht nur eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit aufweisen, sondern auch eine Reduzierung von Leistungsanforderungen zur Folge haben können. Speziell für die vertiefende Priorisierung von Kanälen für Sanierungen und für eine gezielte selektive Inspektionsplanung ist dies anwendbar.

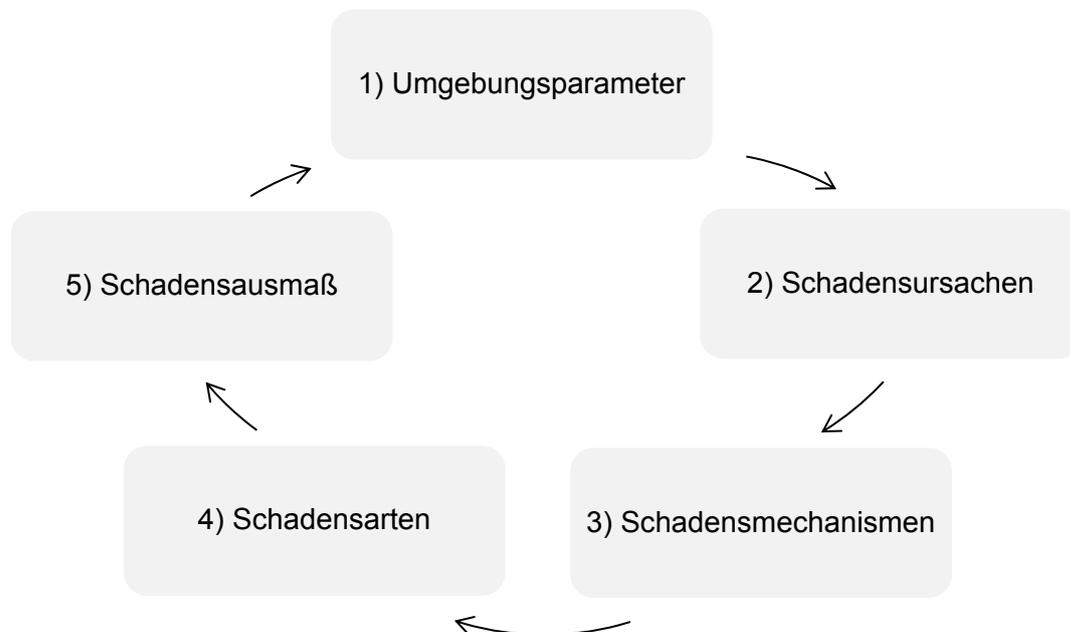
### **4.4 Schweizer Richtlinie SVGW 1001d (2004)**

Da in Österreich für den Bereich Trinkwasser keine Risikobeurteilungsverfahren vorhanden sind, wird nachfolgend eine in der Schweiz im Gasbereich bereits eingesetzte empirische Methode beschrieben. Dieser Ansatz zur Sicherheits- bzw. Risikobeurteilung von Leitungsabschnitten von Gasrohren für Neubauprojekte oder meldepflichtige Änderungen mit Drücken von 1 bar bis 5 bar wird in der Schweizer Richtlinie SVGW 1001d (2004) angeführt. Mit diesem Verfahren wird das frühzeitige Erkennen, Beurteilen und eventuelle Reduzieren von Risiken bereits in der Planungsphase festgelegt. Die Beurteilung im Rahmen dieser Richtlinie umfasst die Bestimmung der Sensibilitätsklassen von Leitungsabschnitten, die Bestimmung der Gefahrenklasse pro Objekt aus der Leitungskennzahl, der Umgebungskennzahl und der Gebäudekennzahl, die Festlegung von Maßnahmen an der Leitung, der Umgebung oder am Objekt und die Dokumentation der umgesetzten Maßnahmen. Es stellt ein erfahrungsgestütztes, sehr einfaches und praxisnahes Risikobeurteilungsverfahren dar und komplexe Wahrscheinlichkeitsberechnungen müssen nicht getätigt werden.

## 5 Schadensmechanismen und Schadensarten

### 5.1 Allgemeines

Die Zustandsverschlechterung von Rohrleitungen führt aufgrund umweltbedingter, operativer und herstellungsbedingter Einflüsse in Abhängigkeit der Rohrmaterialeigenschaften zu einer spezifischen Schadensart. Die Komponenten der Schadensentstehung sind in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: Komponenten in der Betrachtung einer Schadensentstehung**

Diese strukturelle Verschlechterung führt lt. Liu et al. (2012) zu einer Verminderung der Tragfähigkeit und des strukturellen Widerstandes einer Rohrleitung und zu einem Anstieg von Schadenshäufigkeiten. Die Gesamtheit der für einen Schadensauftritt entscheidenden physikalischen Mechanismen ist sehr komplex und wissenschaftlich nicht komplett geklärt. Die Verschlechterung der Rohrrinnenwand verringert z. B. die hydraulische Kapazität, erhöht den notwendigen Pump-Energieverbrauch aufgrund höherer Rauigkeiten und beeinflusst die Trinkwasserqualität nachteilig.

In Tabelle 1 werden die inferentiellen Einflüsse (Definition siehe Kapitel 5.4) der Zustandsverschlechterung dargestellt. Diese können in rohrphysikalische, umweltbedingte, betriebliche und herstellungsbedingte Einflüsse und aufgrund der zeitlichen Veränderlichkeit in statische (Rohrmaterialart, RD, Bodenart, usw.) und dynamische Einflussfaktoren (Alter, jahreszeitliche klimatische Veränderungen, Druckzonenwechsel, usw.) unterteilt werden. Die dargestellten Einflüsse tragen potentiell zur Materialzustandsverschlechterung und damit zum Entstehen von Leckagen und dem Auftreten von Schäden bzw. Rohrbrüchen bei.

**Tabelle 1: Inferentielle Einflussfaktoren der Leitungs-Zustandsverschlechterung**

zeitliche Veränderlichkeit	rohrphysikalische Einflüsse	umweltbedingte Einflüsse	betriebliche Einflüsse	herstellungsbedingte Einflüsse
<b>statisch</b>	Rohrmaterial	anstehender Boden		Rohrherstellungsqualität
	Rohrdurchmesser	Bettungsmaterial		Rohrtransporteinfluss
	Rohrwandstärke	Wiederverfüllmaterial		Rohrlagerungseinfluss (vor Einbau)
	Rohreinzellänge	Bodenaggressivität		Künnettenverbaumethode
	Rohrverlegetiefe	korrosionsfördernde Faktoren		Rohrinstallationsqualität
	Rohrinnenschutz	Setzungsempfindlichkeit Boden		Rohrbettungsqualität allgemein
	Rohraussenschutz	Kriech- Rutschhang		spezielles Rohrauflager der Trinkwasserleitung (Ziegel, Beton, Holzchen)
	Rohrverbindungsart	aufgeschüttete Schanzen und Wälle		Künnettenverdichtungsqualität
<b>dynamisch</b>	Rohralter	Straßenoberflächenbefestigung	Instandhaltungsstrategie	
		Grundwasserfluktuation	Rohr-Betriebsinnendruck	
		Verkehrslast (Schwerverkehr, Straßenbahn)	Druckzonenveränderung	
		Oberflächenlast	Druckstoß	
		Streustrom (Straßenbahn, Gasleitung, Bus)	Fließgeschwindigkeit	
		benachbarte Baumaßnahme	Rauhigkeit	
		Bodenbewegung	kathodischer Korrosionsschutz	
		jahreszeitlicher klimatischer Einfluss	Exfiltration aufgrund Leckage	
		Baumwurzel	Wasserqualität	
		benachbarte bzw. kreuzende Leitung (Kanal, Gas, Anschlussleitung- Trinkwasser, Versorgungsleitung Trinkwasser, Fernwärme, Strom)	Inkrustation	
		Abschieberorgane auf Trinkwasserleitung (Schieber/Klappen)		
		Belagzustand der Straßenoberfläche		
		bodenseismische Belastung		

Schadensarten beschreiben lt. Kleiner et al. (2005) auf welche Art und Weise Leitungen schadhaft werden. Schadensmechanismen erklären den Vorgang zur Schadensentstehung.

Schadensursachen (= inferentielle Einflüsse) gekoppelt mit Schadensmechanismen führen daher zu bestimmten Schadensarten bzw. Schadensbildern.

In vielen internationalen wissenschaftlichen Publikationen (Rajani et al., 1996; Makar, 2000; Makar et al., 2001; Makar et al., 2002; Water Services Association of Australia, 2003; Rajani und Kleiner, 2004; Roscher et al., 2004; Kleiner et al., 2005; Makar und McDonald, 2007; Sorge, 2007; Richter, 2010) werden Schadensarten und Schadensmechanismen in Abhängigkeit unterschiedlicher beobachtbarer Rahmenbedingungen beschrieben.

Die österreichischen WVU begannen mit der Errichtung ihrer überregionalen Trinkwassernetze Ende des 19. Jahrhunderts. Die verwendeten Rohrmaterialien und Nennweiten wurden unter verschiedensten Rahmenbedingungen eingebaut und verschlechtern sich aufgrund dieser Einflüsse in unregelmäßiger Geschwindigkeit. Viele der Einflussfaktoren in Tabelle 1 können nicht direkt gemessen bzw. quantifiziert werden. Überdies sind die quantitativen Beziehungen zwischen dem Auftreten einer bestimmten Schadensart und diesen Einflussfaktoren physikalisch nicht ermittelbar. Aufgrund der Alterung und Versprödung kann es zu einer Veränderung der Materialqualität bei Kunststoffleitungen oder zu einer Abnahme der Rohrwandstärke aufgrund Korrosion bei metallischen Rohrleitungen kommen. Weiters können die Bodeneigenschaften des Bettungsmaterials oder des anstehenden Bodens aufgrund von Grundwasserfluktuationen oder Leckagen, die zu Ausspülung von Feinteilen im Korngerüst führen, stark beeinflusst bzw. verändert werden. Somit kann festgehalten werden, dass streng genommen auch viele statische Faktoren als dynamische Einflüsse zu betrachten wären.

Instandhaltungsmaßnahmen werden mit Hilfe von Schadensstatistiken (ÖVGW W 105, 2011; Gmoser, 2012; DVGW W 402, 2009) geplant. Mittels dieser Schadensdokumentationsblätter und Schadensstatistiken (siehe Anhang Abbildung 118 und Abbildung 119) werden alle vor Ort verfügbaren und erhebbaren Informationen gespeichert. Rehabilitationsplanungen auf Basis von SR und WV allein geben aber keine ausreichende Information über den tatsächlichen Zustand der HZL und mangelhafte Schadenserfassungen machen eine Zustandsbeurteilung oft unmöglich.

Auswertungen von Schadensstatistiken am Beispiel fünf österreichischer WVU ermöglichten keine zufriedenstellende differenzierte Betrachtung der Schadensart bzw. Schadensursachen. Die Verwendung von nicht detaillierten und allgemeinen Begriffen wie „Bruch“, „Riss“ oder „Sonstiges“ als Beschreibung der Schadensart stellen lt. Fuchs-Hanusch et al. (2011a) und Gmoser (2012) eine gewisse Problematik dar. Roscher et al. (2004) beziffern den Anteil an nicht verwertbaren

Daten aufgrund fehlerhafter oder unvollständiger Angaben bei der Erfassung von Schäden mit etwa 75 bis 80 % in Deutschland.

Die Reparatur eines Schadensauftrittes stellt einen betrieblichen Ausnahmezustand für jedes WVU dar. Unter schwierigsten Rahmenbedingungen wie Regen oder Schnee, Hitze oder Kälte, oftmals auftretend in den Nachtstunden und auf engstem Raum zur Vermeidung von großräumigen Verkehrsbehinderungen wird eine sofortige Reparatur des Schadens zur Wiederherstellung der betrieblichen Normalsituation ausgeführt. Eine schnelle und optimale Ausführung der handwerklichen Reparatur steht im Interessenskonflikt mit der optimalen Dokumentation des Schadens mittels Schadensaufnahmeblatt und schränkt somit die Qualität in der Dokumentation aller Informationen ein.

In den von Fuchs-Hanusch et al. (2011a) und Gmoser (2012) durchgeführten Überprüfungen von fünf Schadensstatistiken großer österreichischer Wasserversorger, bei der die Verwertbarkeit der einzelnen Datensätze hinsichtlich ihrer Aussagekraft über die dokumentierte Schadensart untersucht wurde, konnte ein weit streuendes Ergebnis der vorliegenden Informationen festgestellt werden. In Tabelle 2 werden die Ergebnisse dieser Auswertung dargestellt, wobei Datensätze mit den Beschreibungen „allgemeiner Bruch“, „allgemeiner Riss“, „elementarer Rohrschaden“ oder „Sonstiges“ als unbekannte Schadensart gewertet wurden, da die pauschale Beschreibung einer Schadensart mit z. B. „elementarer Bruch“ mit keiner weiteren eindeutigen Schadensartenzuordnung möglich ist. Für das WVU 3 liegen 4 % unbekannte Schadensarten vor, wo hingegen für das WVU 1 83 % der Schadensartendokumentationen nicht verwertbar sind. Aufgrund dieser an fünf österreichischen WVU durchgeführten Auswertungen kann, für Gesamt-Österreich generalisiert, ausgesagt werden, dass für einen Großteil der WVU keine detaillierte Zuordnung der allgemeinen Schadensdokumentation auf die spezifische Schadensart möglich ist.

**Tabelle 2: Verwertbarkeit der Information Schadensart am Beispiel 5 österreichischer Schadensstatistiken (Fuchs-Hanusch et al., 2011a; Gmoser, 2012)**

<b>Netz</b>	<b>Anzahl Datensätze</b>	<b>davon mit unbekannter Schadensart</b>
WVU 1	2548	2111 <b>(83 %)</b>
WVU 2	661	468 <b>(71 %)</b>
WVU 3	6387	280 <b>(4 %)</b>
WVU 4	2281	1402 <b>(61 %)</b>
WVU 5	924	727 <b>(79 %)</b>

In den untersuchten Schadensdokumentationen wurden die Begriffe Schadensart und Schadensursache oftmals verwechselt oder gleich bezeichnet, Informationen zur Bestimmung der Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Bettungsverhältnisse und visuelle Bodenbewertung, sind nicht Inhalt der Dokumentation, die Abfrage zur genauen Lage des Schadens am Rohr (in Rohrmitte, am Rohrende, im Scheitelbereich, im Sohlbereich), die Abfrage zur Ausrichtung des Schadens an der Rohrleitung (diagonal, längs, quer) und die Größe der Schadensfläche werden prinzipiell nicht durchgeführt. Fehlende Plausibilitätsüberprüfungen bei der Übertragung der Schadensdokumentationen in die GIS-Schadensdatenbanken führen zu falschen Zuordnungen, wie beispielsweise Korrosionsschäden auf Kunststoffleitungen. Schäden auf Anbohrschellen von AL und VL auf HZL führen oftmals zu einer Fehlzusammenordnung des Schadens auf die HZL. Somit ist im Nachhinein nur mit großem Aufwand eine genaue Rekonstruktion des Schadens und der Reparatur aufgrund der vorhandenen Schadensdokumentationen und den angefertigten Skizzen möglich.

Zur Verbesserung der Dokumentation von Schadensfällen bereits an der Schadensstelle hinsichtlich der aufgetretenen Schadensart wurde in Anlehnung an die ÖVGW Mitteilung W 105 (2011) ein Schadensdokumentationsblatt von Fuchs-Hanusch et al. (2011a) und Gmoser (2012) entwickelt. Durch Anwendung dieses Schadensdokumentationsblattes können die Gegebenheiten, welche in Zusammenhang mit dem Rohrbruch und der genauen Schadensart auftreten, übersichtlicher und umfassender als Basis für weiterführende Berechnungen erfasst werden.

Jeder Schaden weist sein eigenes Schadensbild bzw. Charakteristikum auf, wodurch kein Schaden genau einem anderen gleicht. Aufgrund dieser Schwierigkeit werden in Schadensstatistiken unterschiedlichste Bezeichnungen für im Prinzip gleich auftretende Schadensarten angeführt. Teilweise werden Informationen abgefragt, die der Sachbearbeiter vor Ort nicht wissen kann (z. B. Verlegejahr oder Betriebsdruck) oder an anderen Stellen wird vom Bearbeiter eine Bewertung gefordert (z. B. Verkehrsstärke oder Zustand der Beschichtung), welche von der subjektiven Einschätzung der das Dokumentationsblatt ausfüllenden Person beeinflusst wird. Die Schadenserfassungen werden zudem von unterschiedlichen Personen ausgeführt und dementsprechend ergeben sich Unsicherheiten in der Vergleichbarkeit der Schadensstatistiken in einem WVU und übergreifend über mehrere WVU. Die Zuordnung der Schadensursache ist in vielen Fällen vor Ort nicht direkt und eindeutig durchführbar. Weiters werden die geometrischen Abmessungen der Schadensfläche derzeit prinzipiell noch nicht dokumentiert.

In der Richtlinie ÖVGW G 58 (2000) gilt aber als Voraussetzung für die Beurteilung des Schadens die Kenntnis über die genaue Schadensart, die Schadensursachen und die genauen geometrischen Größen der Fehlerstelle. In der ÖVGW W 105 (2011) gibt es dazu keine Vorgaben zur Dokumentation der genauen geometrischen Größen der spezifischen Schadensart. Diese detaillierten Schadensartenaufnahmen

werden von Fuchs-Hanusch et al. (2011a) und Gmoser (2012) beschrieben und sind in Abbildung 118 und Abbildung 119 angeführt.

Sadiq et al. (2004) und Makar et al. (2001) haben im Detail die Schadensmechanismen für starre Leitungen, wie z. B. Grauguss, betrachtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass, mit Ausnahme der Ursache Fremdverschulden, Schäden nicht plötzlich auftreten, sondern sich in mehreren Schritten bzw. Stufen entwickeln. Diese Entwicklung wird in Abbildung 9 am Beispiel der Schadensart „Korrosionsloch“ dargestellt.

In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen und Belastungen durchschreiten spezifische Schadensarten bestimmte Phasen bis aufgrund einer gewissen Wasserverlustmenge der Schaden detektiert oder an der Oberfläche sichtbar wird und es zu einer anschließenden Reparatur kommt. Die in dieser Arbeit betrachteten Schadensarten sind „Korrosionsloch“, „Rundriss“, „Längsriss“, „Scherbenbruch“ und „Verbindung undicht“. Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Schadensartenauftritts ist von Interesse, da die Konsequenzen im Schadensfall wesentlich von der Ausprägung der Schadensart abhängen (Friedl et al., 2012). Im Falle von optimalen Leckortungs- und Netzinspektionsstrategien kann man die Dauer der Phase 3 (siehe Abbildung 9) und somit die Laufzeit des nicht gemeldeten Wasserverlustes auf ein Minimum reduzieren.

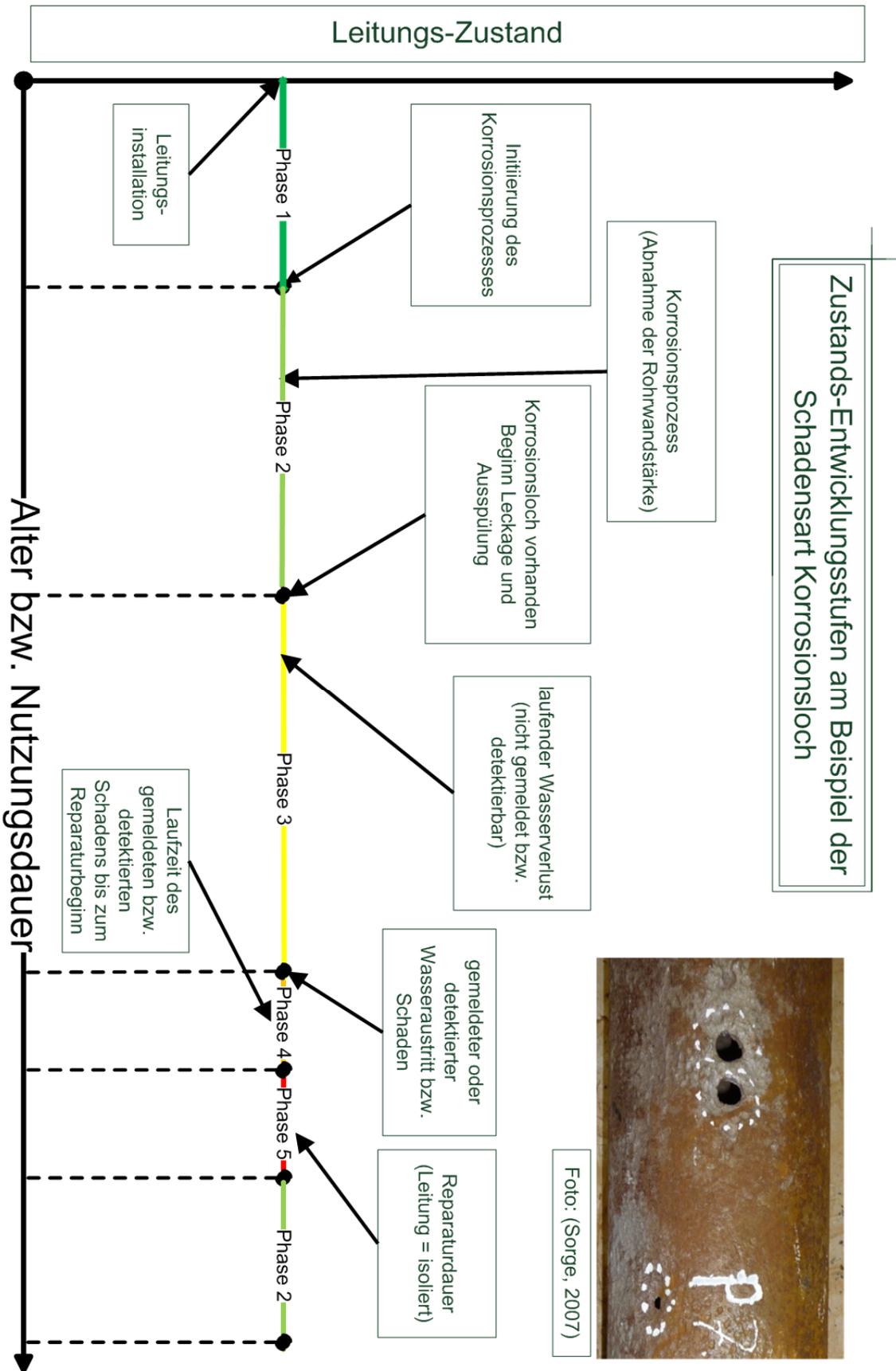


Abbildung 9: Zustands-Entwicklungsstufen am Beispiel der Schadensart „Korrosionsloch“

In Abhängigkeit der vorliegenden Umgebungsbedingungen und der einwirkenden Belastungen, können durch verschiedene Schadensmechanismen gewisse Schadensarten, wie in Tabelle 3 dargestellt, auf bestimmten Rohrmaterialarten auftreten.

**Tabelle 3: Schadensarten in Abhängigkeit der Rohrmaterialart**

Schadensart	Rohrmaterialart						
	<i>Grauguss (GG)</i>	<i>duktiles Gusseisen (GGG)</i>	<i>Stahl (ST)</i>	<i>Asbestzement (AZ)</i>	<i>Beton (B)</i>	<i>Polyethylen (PE)</i>	<i>Polyvinylchlorid (PVC)</i>
Rundriss	typisch (Querbruch)	selten	nicht bekannt	typisch (kleine DN)	nicht bekannt	nicht bekannt	typisch
Längsriss	typisch	möglich ab DN 400	nicht bekannt	typisch (kleine DN)	nicht bekannt	typisch	typisch
Scherbenbruch	typisch (ab DN 500)	nicht bekannt	nicht bekannt	typisch (kleine DN)	nicht bekannt	nicht bekannt	typisch (Fächerriss)
Loch	typisch	typisch	typisch	selten	typisch	typisch	selten
Verbindung undicht	typisch	typisch	typisch	typisch	typisch	nicht bekannt	typisch

Die Entwicklung eines Schadens kann durch Schwachstellenbildung bei Herstellung, Transport, Lagerung und Einbau initiiert werden. Plötzlich auftretende Überbelastungen oder Lastwechsel verursachen in Überlagerung mit Verschlechterungsprozessen, wie z. B. Versprödung und Korrosion, die beschleunigte Entwicklung und den Auftritt bestimmter Schadensarten.

Diese Ergebnisse beziehen sich u.a. auf Untersuchungen von Sorge (2007) und auf Auswertungen der Schadensdatenbanken von fünf österreichischen VL-Systemen und drei HZL-Systemen (Fuchs-Hanusch et al., 2011a; Gmoser, 2012).

Wasserverluste sind im Wesentlichen von der Schadensart bzw. dem Schadensbild, der Schadensaustrittsfläche am Rohr, dem Rohrbetriebsinnendruck, der Bodenumgebung, dem Rohrmaterial und der Leckagelaufzeit abhängig. Die ermittelte Schadensart und eine davon abgeleitete korrespondierende Schadensaustrittsfläche wurde als einer der maßgebenden Einflüsse zur Berechnung der hydraulischen Vulnerabilität mittels lokaler Sensitivitätsanalyse für unterschiedliche Rohrmaterialien und RD ermittelt (Friedl et al., 2012).

Schadensauftritte werden nur in Verbindung mit gemeldeten oder detektierten Wasseraustritten erfasst. Somit ist ein Schadensauftritt durch den Übergang von Phase drei auf Phase vier beschrieben (siehe Abbildung 9). Viele Schäden bleiben aber oft über Jahrzehnte unerkant, da die Entwicklung der Schadensart in der Praxis nicht im Detail betrachtet wird. Beispielsweise können dafür Korrosionsschäden in kiesigen Böden angeführt werden, da in diesem Fall das austretende Wasser ungehindert versickern kann. Zur Unterstützung der Instandhaltungsstrategien der Schadensfrüherkennung bzw. Schadensvermeidung ist die Kenntnis der Schadensartenentwicklung aber von größter Wichtigkeit. Ziel dieser Arbeit ist es daher mit Hilfe der inferentiellen Einflussfaktoren und den beobachteten Schadenszuständen (= Zustand bei Übergang Phase drei auf Phase vier in der Schadensarten-Entwicklungsbetrachtung) die Einzelleitungsabschnitte mit

hoher Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Schadensauftrittes im Netz zu erkennen und aufgrund der schadensartenspezifischen Entwicklungskennntnis weitere Instandhaltungsmaßnahmen zu definieren.

Sorge (2007) macht zusätzlich noch eine Unterteilung der Schadensereignisse in echte und unechte Schäden. Wenn keine alterungs- bzw. verschleißbedingten Rohrquerschnittsschwächungen vorliegen und eine Überschreitung der Belastbarkeit des ungeschwächten Rohres zu einem Bruch führt, werden diese als unechte Schäden eingestuft. Echte Schäden treten an geschwächten Rohrquerschnitten auf, welche eine vorliegende Unterschreitung der lt. Regelwerken geforderten Mindesttragfähigkeiten aufweisen. Eine Untergliederung der Schadensereignisse lt. Sorge (2007) im Nachhinein in echte und unechte Schäden ist aufgrund der vorliegenden Informationen betreffend Schadensursachen aus der Schadensstatistik aus Informationsmangel meist nicht möglich und wird daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

## **5.2 Schadensmechanismen in Abhängigkeit der Rohrmaterialart**

### **5.2.1 Metallische Rohrleitungen (Grauguss, Duktulguss und Stahl)**

Die hauptsächlich auftretenden Schadensmechanismen auf der Rohraußenseite von Grauguss-, Duktulguss- und Stahlleitungen sind Korrosionsprozesse in Form von unterschiedlichsten Korrosionsarten. Korrosionsprozesse führen zu einer Rohrwandstärkenabnahme bis hin zu Korrosionslöchern und daraus folgend zu lokalen Spannungskonzentrationen, welche weiterführend Ausgangspunkte für die Entstehung von Rissen oder Brüchen darstellen können.

Nach Sorge (2007) kann die Schadensart „Korrosionsloch“ in folgende Erscheinungsformen unterteilt werden:

- Lochkorrosion,
- Narben- bzw. Zeilenkorrosion,
- Muldenkorrosion,
- Flächenkorrosion,
- Spongiose bzw. Graphitierung.

In Tabelle 4 sind nach Kleiner et al. (2005), DVGW GW 9 (1986) und Sorge (2007) die Einflussfaktoren angeführt, die aufgrund der oben angeführten Korrosionsarten eine Zustandsverschlechterung an der Rohrleitung hervorrufen können.

**Tabelle 4: Einflussfaktoren auf das Korrosionsverhalten von metallischen Rohrleitungen (Kleiner et al., 2005; DVGW GW 9, 1986; Sorge, 2007)**

Rohraußenwand	Rohrinnenwand
Bodenaggressivität	Sauerstoffgehalt des Wassers
Bodenart	pH-Wert des Wassers
Leitfähigkeit des Bodens	Fließgeschwindigkeit des Wassers
Redoxspannung – Belüftung	Salzgehalt des Wassers (Chloride, Sulfate)
Streustromeinflüsse (Straßenbahn, Bus, Gas, Fundamentbewehrung, Erdungen über Anschlussleitungen Trinkwasser)	Kalk-Kohlensäuregleichgewicht des Wassers
Herstellungsfehler	Herstellungsfehler
Anaerobe Bakterien (organische Bestandteile)	
Porenvolumen des Bodens	
Feuchtigkeitsgehalt des Bodens	
Dispersität des Bodens	
Grundwasserstand, Grundwasserfluktuation	
Korrosionsschutzzustand außen	Korrosionsschutzzustand innen

Unterschiedliche Bodenarten, Grundwasserfluktuationen und Bodeneigenschaften, wie beispielsweise Belüftung und Leitfähigkeit, werden zur Gruppe der korrosionsfördernden Faktoren zugeordnet.

### 5.2.2 Spannbeton- und Stahlbetonleitungen

Ein niedriger pH-Wert des angrenzenden Bodens verursacht einen niedrigen pH-Wert im Außenbereich der Rohrleitung und dies führt weiters zu einer möglichen Korrosion der Stahl- bzw. Spannstahlbewehrung der Wasserleitung. Korrodierte Bewehrungsglieder vermindern die Tragfähigkeit des Rohrquerschnittes und führen zu Rissen, Abplatzungen oder Löchern in der Rohrwand (Kleiner et al., 2005).

### 5.2.3 Asbestzement- und Betonleitungen

Asbestzement- und Betonleitungen verschlechtern sich aufgrund unterschiedlicher chemischer Angriffe, die das Rohrmaterial auslaugen und aufgrund unterschiedlicher chemischer Reaktionen eine Aufweichung und Auflösung der Rohrmaterialmatrix verursachen (Kleiner et al., 2005).

## **5.2.4 Kunststoffleitungen**

PVC- und PE-Rohrleitungen werden seit den 1960iger Jahren in Österreich eingebaut und daher können Langzeit-Zustandsverschlechterungen über diesen relativ kurzen Zeitraum noch nicht zugeordnet werden (Kleiner et al., 2005). Aufgrund fehlerhafter Lagerung, Verlegung und Installation treten aber auch schon Schäden auf Kunststoffrohrleitungen auf. Forschungsinstitute, wie beispielsweise das Polymer-Competence-Center-Leoben (PCCL), befassen sich speziell mit der Rissfortpflanzung bzw. Materialverschlechterung an Kunststoffrohrleitungen in Österreich.

## **5.3 Schadensarten**

### **5.3.1 Loch aufgrund Korrosion**

Die Schadensart Loch aufgrund Korrosion tritt mit all ihren Erscheinungsformen auf metallischen Rohrleitungen, besonders auf GG-Leitungen auf.

Rajani und McDonald (1995) zeigen, dass in einer Betrachtung von 21 WVU im Jahr 1993, die 11 % der gesamten kanadischen Trinkwasserversorgung umfassen, 50 % aller Wasserleitungen aus dem Material GG bestehen. Weiters verdeutlicht eine ähnliche Studie von Rajani und Makar (2000), dass 48 % der Wasserversorgungsleitungen in den USA aus dem Rohrmaterial GG verlegt sind. Makar (2000) identifiziert das Material GG als das Material mit der höchsten SR in Kanada mit durchschnittlich 39 Schäden pro 100 km und Jahr.

Diese Berichte bestätigen die hohe Schadenswahrscheinlichkeit von GG-Leitungen aufgrund des spröden Bruchverhaltens und Anfälligkeit auf Korrosionseinwirkungen.

Rajani und Kleiner (2001) bestätigen für metallische Leitungen auch den Einfluss von Rohrinnenkorrosion, erkennbar in Form einer Rohrrauigkeitsveränderung, als eine Art der Zustandsverschlechterung.

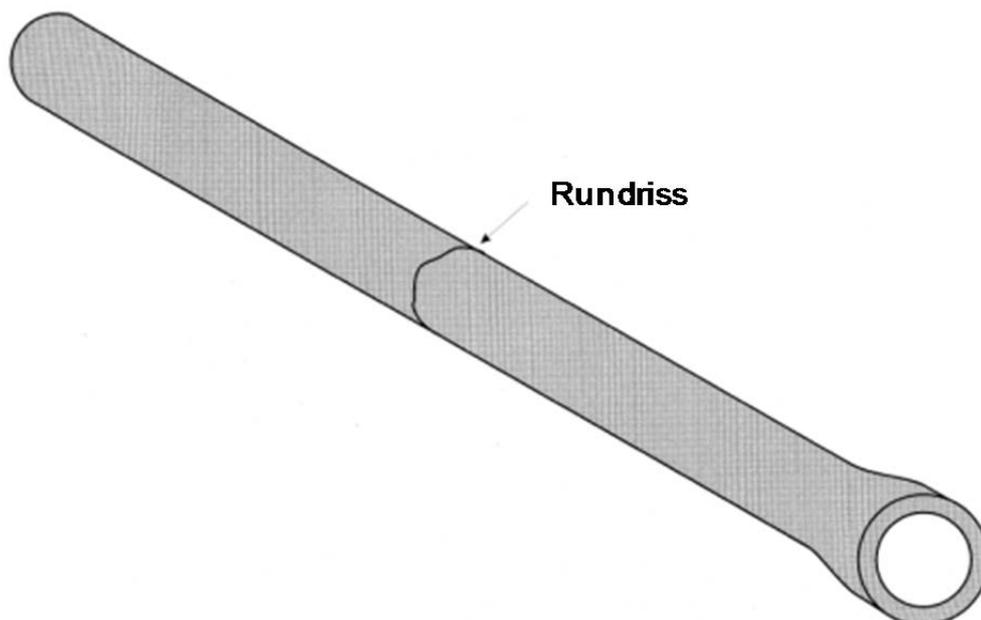
### **5.3.2 Rundriss**

Rohrleitungen mit kleineren RD neigen aufgrund des geringen Trägheits- und Widerstandmomentes zu Rundrissen, welche auch als Querriss oder Querbruch bezeichnet werden (siehe Abbildung 10). Rohrleitungen mit größeren RD weisen demgegenüber auch größere Trägheits- und Widerstandmomente auf und tendieren daher zu Längsrissen und Rissen von der Muffe ausgehend. Rundrisse werden aufgrund zu hoher Längsbiegemomente verursacht und von Makar et al. (2001) als die häufigste Schadensart auf GG-Leitungen für RD im Bereich kleiner 380 mm angeführt.

Lt. Rajani und Kleiner (2001) sind die Ursachen für Rundrisse überhöhte Längsspannungen und werden von folgenden Rahmenbedingungen verursacht:

- unterschiedliche thermische Ausdehnungen aufgrund Temperatureinflüsse bzw. Temperaturschwankungen im Bereich erdverlegter und somit quasi eingespannter Rohrleitungen,
- überhöhte Biegemomente aufgrund differentieller Bodenbewegungen in Folge von Frost- Tauhebungen und Hohlrumbildung bzw. Auswaschung der Feinteile im Bettungsmaterial durch lang laufende Leckagen.

Untersuchungen von Fuchs-Hanusch et al. (2011c) bestätigen den Zusammenhang von jahreszeitlichen klimatischen Veränderungen, wie extrem kalten Wintern mit folglich hohen Frostbelastungen auf Rohrleitungen, mit einem Anstieg der Schadensart Rundriss auf GG-Leitungen am Beispiel fünf österreichischer Trinkwassernetze in Abhängigkeit der in Österreich auftretenden unterschiedlichen Klimazonen.



**Abbildung 10: Rundriss auf Rohrmaterial GG (Makar, 2000)**

Korrosionsarten führen z. B. aufgrund von Graphitierung oder Lochkorrosion zu einer Schwächung des Rohrquerschnittes und weiterführend zu einem Rundriss mit einer glatten Bruchfläche. Unterschiedliche Farbausprägungen der Korrosionsprodukte entlang der glatten Bruchfläche weisen auf einen mehrstufigen Bruch mit einer bestimmten Zeit zwischen den einzelnen Stufen hin. Rundrisse gehen meist von einer geschwächten Stelle aus und dehnen sich ca. um die Hälfte des Rohrumfanges aus. Daher haben Rundrisse im ersten Schritt keine völlig umlaufende Ausdehnung um den Rohrumfang und liegen eher im Sohlbereich als im Scheitelbereich des Rohres vor dem völligen Versagen. Zwischenzeitlich austretende Wassermengen beeinflussen das Rohr-Bodengefüge nachteilig und es bilden sich Korrosionsprodukte an der Rissfläche. Ausgangspunkt der Rundrisse sind

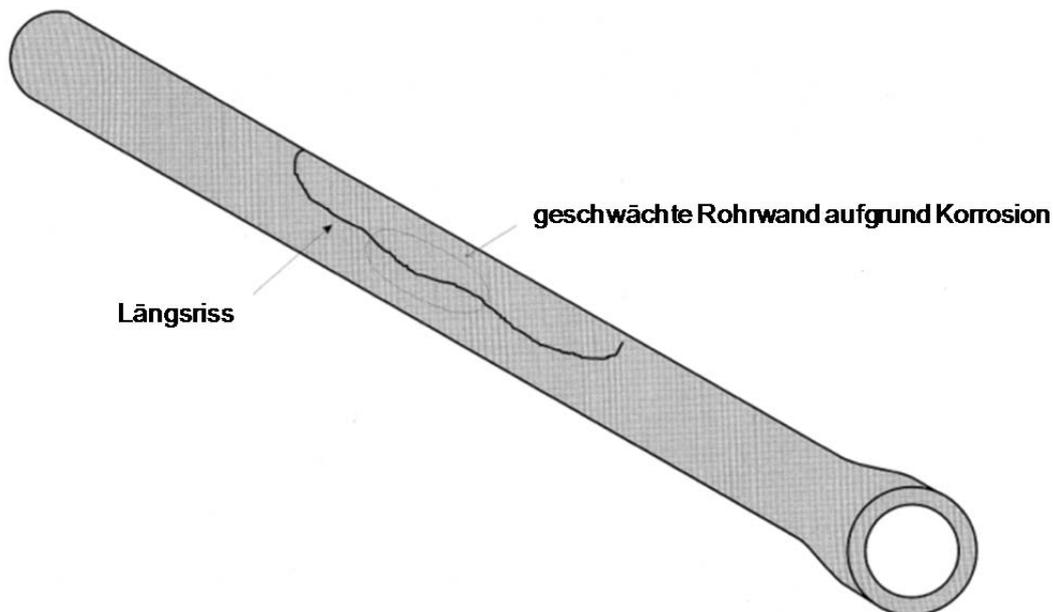
Korrosions- oder Graphitierungsstellen in Kombination mit zu großen äußeren Lasten, wie z. B. Verkehr oder Bodenbewegungen aufgrund angrenzender Tiefbaumaßnahmen. Einige Zeit später versagt schließlich der restliche verbleibende Rohrquerschnitt auch im Scheitelpunkt (Makar, 2000).

Lt. Kern (1954) führen schlechte Verlegequalität und Zwangsauflagerpunkte der Rohrleitungen aufgrund von eingebauten Ziegel- oder Betonaufleger zu hoher mechanischer Beanspruchung des Rohrquerschnittes und folglich zu Rundrissen.

Für Leitungen mit vorhandenen Korrosionslöchern und damit verbundenen Wasseraustritten verändert sich das Rohr-Bodengefüge bezüglich Tragfähigkeit nachteilig. Von den befragten österreichischen WVU (Anmerkung des Autors: durchgeführte Expertenbefragung) konnte nicht bestätigt werden, dass bei angenommener verbleibender Auflagerung im Muffen- und Spitzenden-Bereich und daraus resultierendem erhöhten Längsbiegemoment in der Mitte der freiaufhängenden Rohrleitung mit einer erhöhten Auftretswahrscheinlichkeit von Rundrissen in Rohrmitte zu rechnen ist. Diese Erkenntnisse aus den Erfahrungen der WVU sind jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig, da bis dato im Reparaturfall nicht im Detail auf diese Problematik geachtet und diese daher auch nicht dokumentiert wurde.

### 5.3.3 Längsriss

Zustandsverschlechterungen aufgrund von Korrosionseinwirkungen superponiert mit inneren und äußeren Belastungen führen zu erhöhten Umfangsspannungen bzw. vertikalen Spannungen und folglich zu Längsrissen an der Rohrleitung (Abbildung 11). Geschwächte Rohrwandbereiche bilden auch in diesem Fall Ausgangspunkte für die Entstehung von Längsrissen (Makar, 2000).



**Abbildung 11: Längsriss auf Rohrmaterialart GG (Makar, 2000)**

Lt. Kern (1954) können z. B. Haarrisse aufgrund von Materialherstellungsfehlern und unsachgemäßem Transport zu Längsrissen führen.

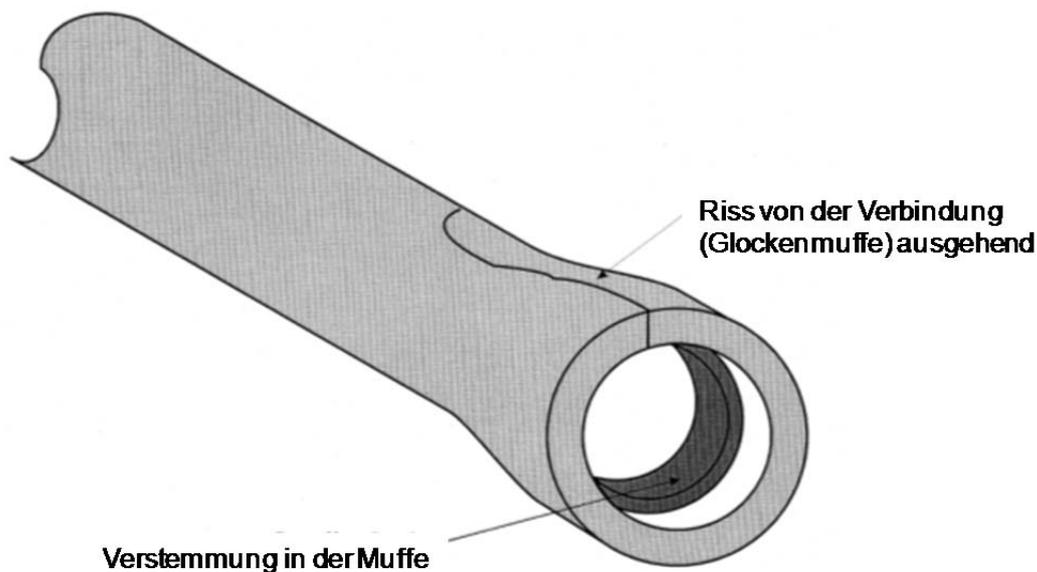
Längsrisse können lt. Rajani und Kleiner (2001) durch überhöhte Umfangsspannungen verursacht werden. Diese erhöhte Umfangsspannung wird von folgenden Einflüssen einzeln oder gleichzeitig in Form von Superposition verursacht:

- hoher Rohrbetriebsinnendruck,
- große Rohrüberdeckung und folglich Erdlast,
- hohe Verkehrs- und Oberflächenlasten,
- Frosteindringung bis zum Rohrleitungsbereich und folglich Frostauflast.

### 5.3.4 Riss an der Verbindung (Glockenmuffe) von einem Punkt ausgehend

Lt. Makar (2000) treten Risse an der Verbindung, wie in Abbildung 12 dargestellt, stets an der Glockenmuffe und nicht am Spitzende auf. Längsrisse setzen sich danach als Rundrisse fort und können auch weiter zu Scherbenbrüchen führen. Die Risse gehen von einer Schwachstelle, z. B. einem Korrosionsloch, aus und die verschiedenen Farben entlang der Bruchfläche, bedingt durch unterschiedliche Korrosionsablagerungsprodukte, weisen auf einen mehrstufigen Zustandsverschlechterungsprozess hin. „Risse an der Verbindung von einem Punkt

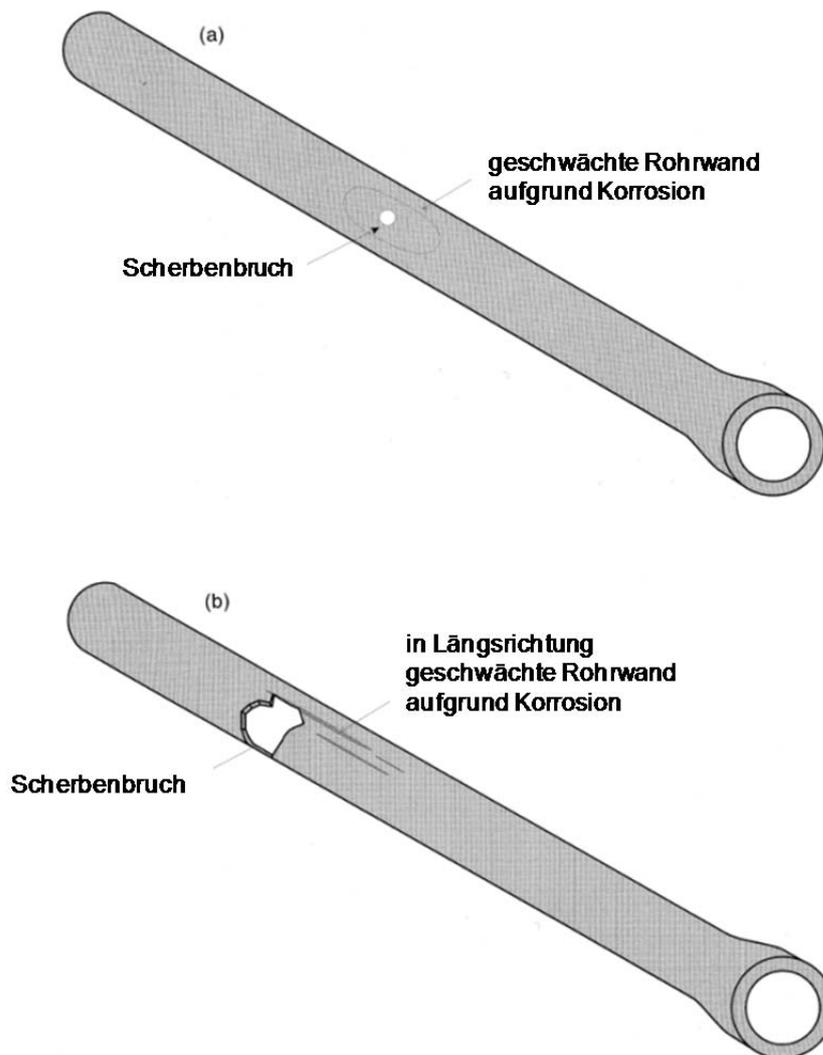
ausgehend“ ausgehend treten meist an Stemmuffenverbindungen auf. Stemmuffenverbindungen bestehen z. B. aus Blei und sind als starre Verbindung einzuordnen. Dadurch weisen diese eine unterschiedliche Wärmeausdehnung im Gegensatz zum Rohrmaterial GG auf. „Risse an der Verbindung von einem Punkt ausgehend“ treten häufig aufgrund von Spannungen auf, wenn der Fall gegeben ist, dass die Temperatur am Rohr und der Verbindung viel höher oder viel tiefer ist als im Ur-Einbauzustand. Die wirkenden Schadensmechanismen sind jedoch viel komplexer. Korrosionslöcher verursachen Schwachstellen und die unterschiedliche Wärmeausdehnung im Bereich GG-Rohr und Stemmuffe erzeugt Spannungen, welche das Rohr im Muffenbereich spalten. Diese Risse pflanzen sich solange in Rohrlängsrichtung fort bis die unterschiedlichen Spannungen wieder abgebaut sind. Danach entstehen Korrosionsprodukte entlang dieser Rissflächen. Ein weiterer Rissverlauf als Verlängerung der Anfangsrisse könnte durch Kräfte aufgrund von ausdehnungsfähigen Korrosionsprodukten entlang der Bruchfläche und an der Rohroberfläche entstehen.



**Abbildung 12: Riss an der Verbindung (Glockenmuffe) von einem Punkt ausgehend auf Rohrmaterial GG (Makar, 2000)**

### 5.3.5 Scherbenbruch

Von Bereichen mit a) punktförmiger Schwächung des Rohrquerschnittes oder b) Schwachstellen in Längsrichtung aufgrund von Korrosionsprozessen können bei plötzlichen zusätzlichen Überbelastungen der Rohrleitung, wie z. B. Druckstoß im Rohrrinneren, Scherbenbrüche auftreten (siehe Abbildung 13). Somit ist das Auftreten von Scherbenbrüchen auch als mehrstufiger Prozess definiert, da die Abnahme der Rohrwandstärke durch Korrosion und das Entstehen von Längsrissen die Vorstufen bei der Entstehung von Scherbenbrüchen darstellen (Makar, 2000).



**Abbildung 13: Scherbenbruch von a) Punktkorrosion oder b) Längskorrosion ausgehend auf Rohrmaterial GG (Makar, 2000)**

### 5.3.6 Verbindung undicht

Lt. Kern (1954) kann einerseits der Bleiring samt Hanfstrick aus der Muffe einer GG-Stemmmuffenverbindung durch Wasserdruck herausgedrückt werden und andererseits entsteht aufgrund von Bodenbewegungen ein Spalt zwischen Muffeninnenwand und Dichtung an der unteren Seite der Muffe. Im Falle eines herausgeschobenen Bleirings besteht eine Undichtigkeit und ein Wasseraustritt beginnt. Dadurch kann Luft bis zum Hanfstrick gelangen und einen Fäulnisprozess des Strickes verursachen. Bei der überwiegenden Anzahl von Muffenundichtigkeiten wurde beobachtet, dass der Bleiring an der unteren Seite der Muffe aus seiner ursprünglichen Lage gebracht wurde. Ursachen dafür sind die schwere Arbeit und schlechte Zugänglichkeit bei der Verstemmung des Bleirings beim Einbau und eine folglich nicht gleichmäßige Einbauqualität.

Deformationen von Rohrleitungen und Schäden an Armaturen und Formstücken führen zu einer gewissen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Rohrleitungssystems und sind normalerweise mit keinem Wasseraustritt verbunden.

Daher sind diese dem Aufgabengebiet der Betriebsüberwachung zuzuordnen und werden in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

#### **5.4 Direkte innere Inspektion von HZL**

Nach Liu et al. (2012) werden für Rohrleitungs-Zustandsbeurteilungen, als Basis einer Risikobeurteilung, zwei Arten von Indikatoren verwendet, sogenannte „distress“ Indikatoren und „inferentielle“ (= schlussfolgernde) Indikatoren.

Rajani et al. (2006) definieren „distress“ Indikatoren, wie z. B. Risslänge, Rissbreite und Korrosionslochtiefe, als im Rahmen von Reparaturen und inneren Inspektionen beobachtbare und messbare physikalische Erscheinungsformen des Alterungs- und Verschlechterungsprozesses, die zur direkten Zustandsbewertung herangezogen werden.

Nach Liu et al. (2012) wird eine Leckage bzw. ein Wasseraustritt als Folgeerscheinung eines Schadens und somit als universeller „distress“ Indikator betrachtet. Mit Hilfe von direkten Inspektionen können „distress“ Indikatoren bestimmt werden und dienen, wie die Zustandsbeurteilung im Kanalwesen, zur weiteren qualitativen Zustandsbeurteilung. Im Gegensatz dazu verweisen „inferentielle“ Indikatoren, wie beispielsweise Bodenart und Grundwasserschwankungen, auf das mögliche Vorhandensein einer Verschlechterung ohne die Kenntnis inwieweit der Prozess in Realität schon aktiv und fortgeschritten ist. Der eindeutige Nachweis eines Einflusses auf eine mögliche Zustandsverschlechterung kann aufgrund „inferentieller“ Faktoren nicht erbracht werden, jedoch ein Hinweis auf ein mögliches Potenzial dafür kann dadurch identifiziert werden.

In der Regel ist es einfacher und kostengünstiger „inferentielle“ Faktoren den Rohrleitungen zuzuordnen. Diese können im Reparaturfall detailliert dokumentiert werden. „Distress“ Indikatoren können mit Hilfe von zerstörenden und zerstörungsfreien Inspektionsmethoden ermittelt werden. Zerstörende Inspektionsmethoden bedingen das Bergen der gesamten Rohrleitung oder das Entnehmen einer Materialprobe der Rohrwand und führen zu einer Betriebsunterbrechung. „Distress“ Indikatoren werden in dieser Arbeit folglich nicht näher behandelt.

Bis jetzt standen nicht HZL sondern VL im Blickpunkt des Wasserverlustmanagements von WVU. Aufgrund der großen Wasserverlustmenge im Fall von Schadensereignissen an den HZL ist die Schadensstelle an der Oberfläche relativ schnell sichtbar und es kommt meist nicht zu lang laufenden undetektierten Wasserverlusten. Bei Schadensarten, die sich jedoch über viele Jahre langsam über mehrere Stufen entwickeln, kann, bei Vorhandensein von versickerungsfähigen Böden, die Detektion ohne den Einsatz innerer Inspektionsmethoden sehr schwierig sein. Es kommt so zu einer risikoreichen Fehleinschätzung des Leitungszustandes mit nicht erkannten Leckagen. Weiters

herrscht bez. der am Markt angebotenen Methoden der zerstörungsfreien direkten inneren Inspektion ein gewisser Informationsmangel, was dazu führt, dass diese in Österreich kaum bis gar nicht eingesetzt werden. Die Gründe für die bis dato ereignisorientierte Instandhaltungsstrategie in Österreich und den geringen Wissensstand über HZL sind nachfolgend beschrieben:

- HZL-Systeme sind meist aufgrund hoher Errichtungskosten als nicht redundante Systeme erbaut worden.
- HZL sind erdverlegt und bis auf bestimmte Bereiche, wie z. B. Absperrarmaturen-Kammern, nicht direkt zugänglich und sichtbar.
- Der Einsatz direkter innerer Inspektion auf HZL kommt für HZL mit höherem mittleren Alter und steigender Schadenswahrscheinlichkeit in Frage. Dies betrifft in Österreich metallische und AZ-Rohrleitungsmaterialien. Bei der Planung und Errichtung dieser Anlagenteile konnte auf die Anforderungen der Einsetzbarkeit von Inspektionsverfahren nach dem heutigen Stand der Technik noch nicht vorweg eingegangen werden. Daher sind nur wenige bzw. über weite Strecken gar keine Zugangsstellen (z. B. Absperrarmaturen-Kammern) vorhanden.
- Eingebaute Klappen als Absperrarmaturen machen den Einsatz von vielen direkten inneren Inspektionsmethoden unmöglich, da das Inspektionsgerät den Rohrquerschnitt an dieser Stelle nicht überwinden kann.
- Um direkte innere Inspektionen durchführen zu können müssen Adaptierungen im Netz, wie beispielsweise Klappenausbau und Schieberkammern-Umbau, durchgeführt werden. Diese Maßnahmen sind u.a. sehr kostenintensiv und mit viel technischem Aufwand verbunden.
- HZL weisen geringe Schadenshäufigkeiten auf und stehen daher nicht ständig im konkreten Blickpunkt der WVU und der Öffentlichkeit.
- Direkte innere Inspektionen werden üblicherweise nach einem plötzlich aufgetretenen katastrophalen Schadensereignis oder an einem außer Betrieb stehenden Leitungsabschnitt durchgeführt.
- HZL bilden die ältesten Anlagenteile im Wasserversorgungssystem. Aufzeichnungen und Dokumentationen wurden zum damaligen Herstellungszeitpunkt nicht gemacht bzw. sind teilweise nicht mehr vorhanden.
- Die unterschiedlichen Verfahren beeinflussen in Abhängigkeit der Fragestellung und Rahmenbedingungen das Trinkwassernetz in hydraulischer und betrieblicher Hinsicht.
- WVU stehen dem Einsatz von direkten inneren Inspektionen in ihren Leitungsnetzen sehr reserviert gegenüber, da das Einbringen eines Inspektionsgerätes (= Fremdkörper) in das Trinkwassersystem immer mit großer Vorsicht behandelt wird.
- Die Ergebnisse der Zustandsbeurteilung an einem Leitungsabschnitt können in Abhängigkeit der verwendeten Inspektionstechnologie stark variieren.

- Abschieberungen führen lt. Erfahrung der WVU (Anmerkung des Autors: Informationen aus Besprechungen mit den WVU) zu hydraulischen Veränderungen im HZL-System und folglich zu Druckstößen und Druckschwankungen. Aus diesem Grunde werden Abschieberungen an HZL daher prinzipiell vermieden.
- Das HZL-System ist von höchster Wichtigkeit bez. Versorgungssicherheit und Redundanz. Abschieberungen und bauliche Eingriffe mittels Aufgrabungen und Anbohrungen von Leitungen werden von WVU vermieden, da diese betrieblich und schadensausmaßseitig im Vorhinein nicht abgeschätzt werden können.

Auf HZL kommt es im Schadensfall zu extremen Konsequenzen. Deswegen werden Eingriffe und betriebliche Störungen aufgrund direkter innerer Inspektionen generell vermieden. Derzeit werden HZL in Österreich mit Hilfe innovativer innerer Inspektionsmethoden nicht inspiziert. Zukünftig könnten sich für die Inspektion von HZL ähnliche Probleme ergeben wie bereits in der Kanalinspektion vorhanden sind. Im Falle von Mehrfachinspektionen von HZL könnte sich im Abstand größerer Zeiträume aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der Technologien und Gerätschaften eine Interpretationsschwierigkeit im Vergleich der mehrmals durchgeführten Inspektionsergebnisse ergeben. Mögliche vorhandene Zustandsverschlechterungen als Ergebnis nach einer ersten Inspektion könnten aufgrund sich ändernder Technologien, unterschiedlicher ausführender Firmen und abweichender Tagesverfassung der Arbeiter bei einer nachfolgenden Inspektion nicht erkannt oder unterschiedlich bewertet werden.

Tabelle 5 zeigt die Möglichkeit der Anwendung von Inspektionstechnologien in Abhängigkeit unterschiedlicher Rohrmaterialarten, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit in der Auflistung der entwickelten und am Markt befindlichen Verfahren erhoben wird (Liu et al., 2012).

**Tabelle 5: Zusammenfassung von Inspektionstechnologien für HZL in Abhängigkeit der Rohrmaterialart (Liu et al., 2012)**

Inspektionstechnologien	Metallische Leitungen			Betonleitungen		Kunststoffleitungen		
	GG	GGG	ST	B	AZ	GFK	PVC	PE
Korrosionslochtiefenbestimmung	√	√	√	–	–	–	–	–
Visuelle Inspektion	√	√	√	√	√	?	?	?
Elektromagnetische Inspektion	√	√	√	√	√	–	–	–
Akustische Inspektion	√	√	√	√	√	√	√	√
Ultraschallmethoden	√	√	√	–	–	?	?	?
Pipeline current mapper	√	√	√	–	–	–	–	–
Strahlungsuntersuchungen	√	√	√	–	–	–	–	–
Thermografische Methoden	√	√	√	–	–	–	–	–
Zustandsbeurteilung mittels Bodeneigenschaften	√	√	√	?	?	?	?	?
Sensortechnologie	√	√	√	√	√	?	?	?

√ ... Anwendung der Inspektionsmethode bei dieser Rohrmaterialart möglich

– ... Anwendung der Inspektionsmethode bei dieser Rohrmaterialart nicht möglich

? ... Anwendung der Inspektionsmethode bei dieser Rohrmaterialart fraglich

GG ... Grauguss; GGG ... Duktulguss; ST ... Stahl; B ... Stahlbeton und Spannbeton; AZ ... Asbestzement; GFK ... glasfaserverstärkter Kunststoff; PVC ... Polyvinylchlorid;

PE ... Polyethylen (siehe auch Abkürzungsverzeichnis)

### **Korrosionslochtiefenbestimmung**

Die Korrosionslochtiefe kann im Reparaturfall vor Ort an einer freigelegten Rohrleitung oder im Labor an einem Probenstück bestimmt werden. Im Einsatz befindliche Technologien sind Mikrometer-, Nadelspiztentiefen-, Ultraschall- und

Lasermessung. Anwendung finden Korrosionslochtiefenmessungen bei metallischen Rohrleitungen.

### **Visuelle Inspektion**

Die visuelle Inspektion der Rohrwand kann durch Begehung ohne notwendiges Equipment oder mit Hilfe von Kamerabefahrungen und laserbasierten Oberflächenvermessung ausgeführt werden. In der österreichischen Trinkwasserversorgung sind visuelle Inspektionen der Rohrwand durch Begehung aufgrund des zu geringen Rohrwanddurchmessers nicht möglich. Visuelle Inspektionen können bei Metall- und Betonleitungen angewendet werden. Voraussetzung dafür sind keine vorhandenen Inkrustationserscheinungen an der Rohrwand. In Kunststoffleitungen sind Veränderungen an der Oberfläche visuell nur schwer erkennbar.

### **Elektromagnetische Inspektion**

Magnetfluss-Verfahren erzeugen ein Magnetfeld um die Rohrwand und erkennen Unregelmäßigkeiten im Rohrmaterial aufgrund der Störungen im Magnetfeld und werden bei Metall- und Betonleitungen angewendet.

### **Akustische Inspektion**

Spezielle Sensoren fließen bzw. bewegen sich durch in Betrieb befindliche und unter Druck stehenden Rohrleitungen und nehmen gleichzeitig die Austrittsgeräusche einer Leckage über die Medien Rohr und Wasser mittels eines Mikrofones auf. Da das Austrittsgeräusch nur wenig von der Rohr Materialeigenschaft abhängig ist, können akustische Inspektionstechnologien für alle Rohrmaterialien verwendet werden.

### **Ultraschallmethoden**

Diese Inspektionsmethoden senden hochfrequenten Schall durch die Rohrwand und analysieren das empfangene Echo. Ultraschallmethoden werden für Wandstärken-, Korrosionsabtrags- und Schichtablösemessungen eingesetzt.

### **Pipeline current mapper**

Mittels der Pipeline current mapper-Technologie werden Fehlerströme auf kathodisch geschützten Leitungen lokalisiert.

### **Strahlungsuntersuchungen**

Strahlungsmethoden senden mittels einer Strahlungsquelle z. B. Röntgenstrahlen durch das Rohrmaterial und stellen Unregelmäßigkeiten, wie Löcher oder Hohlräume, im Rohrmaterial fest.

### **Thermografische Methoden**

Mit Hilfe von thermischen Anomalien werden z. B. Materialabtragungen an der Rohrwand detektiert.

## **Zustandsbeurteilung mittels Bodeneigenschaften**

Mittels Untersuchungen von Bodenproben in situ oder im Labor und Elektropotentialmessung werden an Rohrleitungen anstehende Böden auf korrosionsfördernde Eigenschaften hin untersucht.

## **Sensortechnologie**

Verschiedenste Sensortechnologien zur Detektion von Rohrmaterialanomalien wurden für Transportleitungen (TL) im Bereich der Erdöl und Gasindustrie entwickelt. Diese können für Metall- und Betonleitungen im Bereich Trinkwasser unter bestimmten Voraussetzungen bzw. Adaptierungen angewendet werden.

Prinzipiell können in Abhängigkeit der vorab prognostizierten Schadensarten bestimmte Inspektionstechnologien verwendet werden. Der Einsatz der Technologien (Ultraschall-, Magnetfluss- oder akustische Methoden, usw.) ist stets von der Rohrmaterialart abhängig. Nach Vergleich der derzeit entwickelten und am Markt vorhandenen Inspektionstechnologien können akustische Inspektionsverfahren generell für alle Rohrmaterialarten und Schadensarten angewendet werden. Vorhandene Regelwerke als Unterstützung in der Durchführung innerer Inspektionen existieren derzeit in Österreich noch nicht. Die DVGW W 392-2 (2011) verweist ebenfalls auf keine expliziten Informationen bezüglich innerer Inspektionsmethoden von HZL.

## 6 Methodik

### 6.1 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist die Methoden-Entwicklung und Modellierung der einzelleitungsbezogenen Berechnung der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit von HZL. Dies ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt und wird nachfolgend erläutert.

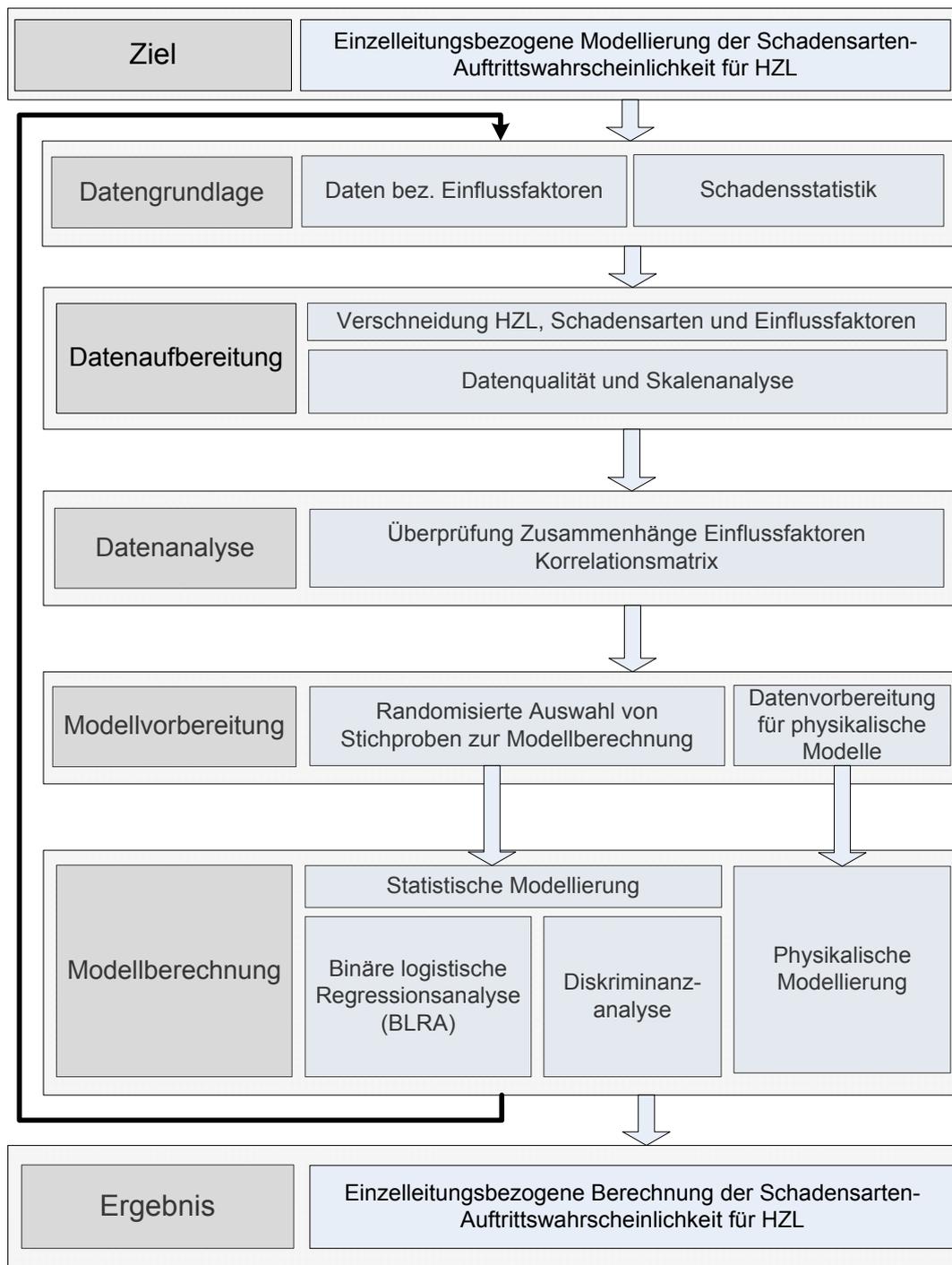


Abbildung 14: Entwickelte Methodik zur Berechnung der einzelleitungsbezogenen Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit von HZL

## 6.2 **Datengrundlage (Vorgehensweise)**

In Österreich werden sämtliche Anlagenbestandteile der Trinkwasserversorgungsnetze lagemäßig in Geografischen Informationssystemen (GIS) digital eingearbeitet und verwaltet. Des Weiteren werden Reparaturfälle aufgrund von Schadensauftritten in Anlehnung an die ÖVGW W 105 (2011) in einer Schadensstatistik, mit Beschreibung der Schadensart, Schadensdatum und weiteren relevanten Informationen des Schadensauftrittes als Basis für nachfolgende Auswertungen, dokumentiert. Diese Vorgehensweisen sind in österreichischen WVU mehr oder weniger implementiert und unterliegen einem ständigen Optimierungsprozess. Auf das Vorhandensein von zumindest Bestandsplänen und Stammdaten sämtlicher Anlagenbestandteile der Trinkwasserversorgungsnetze in geeigneter Art und Weise wird in der ÖNORM B 2539 (2005) hingewiesen. Eine Darstellung der lagemäßig zu erfassenden Anlagenbestandteile eines Trinkwasserversorgungsnetzes in einem Betriebs- und Wartungshandbuch, wird in der ÖVGW Richtlinie W 85 (2008) beschrieben. Die Zuordnung und Verknüpfung von Bestandsdaten mit räumlich strukturierten Daten in einem GIS wird in der ÖVGW-Richtlinie W 100 (2007) als Unterstützungsmöglichkeit der Zustandsbeurteilung von Trinkwasserleitungen dargestellt.

Somit bestehen viele Normen und Richtlinien zur Datengewinnung als Basis einer Zustandsbeurteilung.

Im Reparaturfall besteht die Möglichkeit den Zustand einer Rohrleitung und die Informationen der Umgebungsparameter in ein Schadensaufnahmeblatt zu übertragen oder mittels einer Entnahme einer Rohrmaterial- und Bodenprobe eine detaillierte Zustandsanalyse durchzuführen. In Österreich werden nach erfolgter Reparatur keine generellen Untersuchungen an geborgenen Leitungen mit Hilfe von Labor-Materialzustandsanalysen durchgeführt. Im Zuge von angrenzenden Tiefbaumaßnahmen im Trassenbereich einer Trinkwasserleitung können der Zustand und die mögliche Veränderung des Trinkwasserrohrzustandes durch permanente Messungen von z. B. Bodenbewegungen und Erschütterungen im Untergrund kontrolliert werden (Kainz et. al., 2011; SN 640 312 a, 1992). Weiters können die Informationen im Rahmen der vorgeschriebenen Netzinspektion lt. ÖNORM B 2539 (2005) zur Zustandsbeurteilung verwendet werden. Diverse Maßnahmen des Wasserverlustmanagements zählen zur indirekten Inspektion von Trinkwasserleitungen und stellen zusätzliche zustandsbeurteilende Informationen zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu wird die Zustandsklassifizierung von Abwasserleitungen auf Basis von direkten inneren Inspektionen mittels Kamerabefahrungen als Stand der Technik durchgeführt. Fehler und Ungenauigkeiten in den Zustandsdaten beeinflussen aber eine optimale Zustandsklassifizierung. So stellen Dirksen et al. (2007) in einer Untersuchung der Zustandsdaten von vier niederländischen Abwasserentsorgungsunternehmen fest, dass 30 % der dokumentierten Schäden

zwischen der ersten und zweiten Inspektion wieder verschwanden. Ursache dafür sind die ständige Weiterentwicklung der Kamerabefahrungstechnologien und „menschliches Versagen“ durch unterschiedliche Einflüsse, wie Erfahrungs- und Konzentrationsmangel, bei der Befahrung von Abwasserleitungen.

Die in dieser Arbeit verwendeten Eingangsdaten zur Ermittlung der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit umfassen die Daten bez. aller vorhandenen Einflussfaktoren und der Schadensstatistiken mit den spezifischen Schadensarteninformationen strukturiert nach Abbildung 14 als GIS-basierte Informationen. Diese Einflussvariablen wurden im Rahmen von Workshops mit den Experten der beiden WVU vorab definiert und im Detail erhoben.

Anhand von zwei großstädtischen mitteleuropäischen WVU (aus Anonymitätsgründen folgend WVU A und WVU B genannt) wird beispielhaft die Modellentwicklung und Modellumsetzung zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit spezifischer Schadensarten auf HZL gezeigt. Die nun final vorliegende Datenstruktur und Festlegung der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren wurde im Rahmen zahlreicher Besprechungen vor Ort bei den WVU definiert. Aus Gründen der Anonymität werden die Ergebnisse nicht mit den realen Bezeichnungen der WVU in Verbindung gebracht. Alle weiteren in dieser Arbeit beschriebenen Ergebnisse beziehen sich auf die Datenbasis dieser beiden großstädtisch strukturierten HZL-Systeme.

### **6.3 Datenaufbereitung (Vorgehensweise)**

#### **6.3.1 Verschneidung der HZL mit den spezifischen Schadensarten und Einflussfaktoren (Vorgehensweise)**

Die HZL-Abschnitte wurden aufgrund der Attribute Rohrmaterialart, RD, Verlegejahr, Druckzone und Straßename im GIS verschnitten. Für einen Teil der Daten (WVU B – siehe Abbildung 28) wurden zusätzlich Leitungsabschnitte mit Längen über 300 m mittels GIS-Operationen weiter geteilt um eine homogenere Verteilung der Leitungslängen zu erreichen. Diese damit erzeugten Leitungsabschnitte wurden mit den im GIS vorhandenen Einflussfaktoren verschnitten. Alle HZL-Abschnitte, die vollständig oder teilweise in bestimmten Flächen von Einflussfaktoren im GIS zu liegen kamen, erhielten den für diesen Einflussfaktor zutreffenden Wert. Kam ein HZL-Abschnitt in mehreren unterschiedlichen Flächen bestimmter Einflussfaktoren zu liegen, wurde jeweils der Wert des Einflussfaktors mit der größten Auswirkung zugewiesen.

#### **6.3.2 Datenqualität und Skalenanalyse (Vorgehensweise)**

Durch das Messen werden Eigenschaften von Einflüssen oder Objekten nach gewissen Regeln in Kategorien bzw. Zahlen ausgedrückt. Die Qualität der Daten wird

u.a. durch die Art und Weise der Messung, der gleichbleibenden Methodik der Messung und der Dokumentation der Daten bestimmt.

Im Rahmen der Anwendung von Modellabläufen auf Basis bestimmter Datenquellen sind nach Davies et al. (2001) die Qualitäts-Charakteristiken Genauigkeit, Vollständigkeit, Übereinstimmung und Widerspruchsfreiheit, Aktualität, Eindeutigkeit, Aussagekraft und Gültigkeit von Bezugsdaten zu hinterfragen.

Bei der Anwendung von verschiedenen Ansätzen ergibt sich eine Modellunsicherheit aus der Simplifizierung bzw. Darstellung von natürlichen Prozessen und Abläufen.

Unsicherheiten der Eingangsparameter ergeben sich nach Pate-Cornell (1996) aufgrund zeitlicher und örtlicher Streuung bzw. Änderung, Variabilität oder natürliche Heterogenität. Diese Variabilität ist eine Sache der Natur und eine solche Unsicherheit kann nicht kontrolliert werden. Unsicherheiten aufgrund von fehlendem Wissen und fehlenden Daten können nur durch Wissenszugewinn und höherer Informationsdichte reduziert werden.

Je nachdem, in welcher Art und Weise eine Eigenschaft eines Objektes bewertet werden kann, unterscheidet man nach Backhaus et al. (2010) unterschiedliche Skalenniveaus mit unterschiedlichen Gruppierungen, Merkmalen und möglichen rechnerischen Handhabungen, wie in Tabelle 6, dargestellt.

**Tabelle 6: Skalenniveaus und ihre Gruppierung, Merkmale bzw. mögliche rechnerische Handhabung (Backhaus et al., 2010)**

Skalenniveau	Gruppierung	Merkmale	Mögliche rechnerische Handhabung
Nominalskala	nicht-metrische Skalen	Klassifizierung qualitativer Eigenschaftsausprägungen	Bildung von Häufigkeiten
Ordinalskala		Rangwert mit Ordinalzahlen	Median, Quantile
Intervallskala	metrische Skalen	Skala mit gleich großen Abschnitten ohne natürlichen Nullpunkt	Subtraktion, Mittelwert
Ratioskala		Skala mit gleich großen Abschnitten und natürlichem Nullpunkt	Summe, Division, Multiplikation

Durch das Skalenniveau sind der Informationsgehalt der Daten und damit die Anwendbarkeit von mathematischen Rechenoperationen definiert. Nominalskalen sind die primitivste Klassifizierungsart qualitativer Eigenschaftsausprägungen und werden mittels Zahlenzuordnungen ausgedrückt. Beispiele für Nominalskalen sind Schaden auf Leitung dokumentiert (ja = 1, nein = 0) oder die einfache Aufzählung der Rohrmaterialart (AZ = 1, GG = 2, ...). Die Zahlen sind den Eigenschaften beliebig zuordenbar und außer der Berechnung von Häufigkeiten sind keine arithmetischen

Operationen, wie beispielsweise Addition, Subtraktion, Multiplikation oder Division, erlaubt (Backhaus et al., 2010).

Ein Ordinalskalenniveau ermöglicht nach Backhaus et al. (2010) die Reihung bzw. Rangordnung von Objekten aufgrund der Zuordnung von ordinalen Zahlen in Abhängigkeit der Eigenschaftsausprägung und bildet somit das nächsthöhere Skalenniveau. Die Objekte werden aufgrund ihrer Zahlenzuordnung in eine Rangordnung überführt. Die Information über die Abstände zwischen den Objekten bleibt aber unbekannt. Für Objekte mit Ordinalskalenniveau sind, wie für nominalskalierte Messniveaus, nur die Berechnung von Häufigkeiten und keine arithmetischen Operationen, wie z. B. Addition, Subtraktion, Multiplikation oder Division, erlaubt. Es können Aussagen wie etwa „1 ist schlechter als 2“ getätigt werden, jedoch keine Aussagen wie etwa „1 ist die Hälfte von 2“. Beispiele für Zuordnungen nach dem Ordinalskalenniveau sind die Verkehrsbelastung einer Straße (keine = 1, schwach = 2, mittel = 3, hoch = 4) und Setzungsempfindlichkeit eines Bodens (schwach = 1, mittel = 2, hoch = 3).

Ein Intervallskalenniveau geht nach Backhaus et al. (2010) von gleich großen Skalenabschnitten und Abständen zwischen den Messwerten aus und bildet das nächsthöhere Skalenniveau. Erlaubte arithmetische Rechenoperationen für Intervallskalenniveaus sind Addition und Subtraktion und die statistischen Maße von arithmetischem Mittelwert und Standardabweichung. Beispiel für ein Intervallskalenniveau ist die Celsius-Skala zur Temperaturmessung (100 gleiche Abstände zwischen Gefrierpunkt und Siedepunkt von Wasser).

Das Ratio- oder Verhältnisskalenniveau ist das höchste Messniveau und unterscheidet sich vom Intervallskalenniveau durch die Existenz eines natürlichen Nullpunktes. Beispiele dafür sind Länge (in Meter), RD (in Millimeter) und Alter (in Jahren).

Nach Backhaus et al. (2010) können auf ratio- oder verhältnisskalierten Daten alle arithmetischen Rechenoperationen und statistischen Maße angewendet werden. Nominal- und ordinal skalierte Messniveaus werden als nichtmetrische oder kategoriale Skalenniveaus, Intervallskala und Ratioskala als metrische Skalen bezeichnet. Der Informationsgehalt und die Anwendbarkeit der arithmetischen Rechenoperationen steigen je höhere Skalenniveaus vorliegen. Generell kann von höheren Skalenniveaus auf ein niedrigeres Skalenniveau mit einem gewissen Informationsverlust transformiert werden, umgekehrt ist dies aber nicht möglich.

Für die vorliegende GIS-basierte Datenstruktur wurden im speziellen die Datenqualität, Skalenniveaueigenschaft und Verteilungscharakteristik, wie oben beschrieben, untersucht und definiert.

## 6.4 Datenanalyse (Vorgehensweise)

Ein Interaktionseffekt zwischen zwei betrachteten Einflussfaktoren liegt vor, wenn der Zusammenhang eines Einflussfaktors auf die Auftrittswahrscheinlichkeit einer spezifischen Schadensart auf einer HZL durch die Wirkung eines weiteren Einflussfaktors beeinflusst wird. In diesem Falle verzerren die interagierenden Einflussfaktoren das Ergebnis, wenn diese gleichzeitig in die Berechnung mit einbezogen werden. Daher wurden alle vorliegenden Einflussfaktoren der Datenstruktur der WVU A und B aufgrund sachlogischer Überlegungen bezüglich Zusammenhänge der Einflussfaktoren untereinander analysiert. Dies wurde unter Anwendung unterschiedlicher Korrelationsmethoden durchgeführt. Die daraus resultierenden Korrelationskoeffizienten (KK) beschreiben den Zusammenhang zweier betrachteter Einflussfaktoren. Somit können interagierende Einflussfaktoren entweder einzeln oder in Form einer Produktbildung (= Einflussfaktor 1 x Einflussfaktor 2) in der Modellberechnung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden. In der Datenstruktur für das WVU A und B liegen nominal, metrisch und ordinal skalierte Datenniveaus vor.

Nach Hedderich und Sachs (2012) kann der Phi-Koeffizient ( $\phi$ ) zur Ermittlung der Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei nominal skalierten Variablen verwendet werden. Zwei metrisch skalierte Variablen werden, wenn diese normalverteilt vorliegen, mit dem Produktmomentkorrelationskoeffizienten nach Pearson ( $r$ ) auf mögliche Interaktion berechnet. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson ( $r$ ) mit Werten zwischen (+1) und (-1) ist ein dimensionsloses Maß für den linearen Zusammenhang zweier metrischer Einflussfaktoren. Werte von (+1) oder (-1) stellen folglich einen optimalen positiven oder negativen Zusammenhang dar. Wenn für die metrisch skalierten Skalenniveaus keine Normalverteilung vorliegt wird mit Verwendung des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman ein möglicher Zusammenhang getestet. Mit Hilfe des Eta-Koeffizienten wird der Zusammenhang zwischen einem nominal skalierten und einem metrisch skalierten Einflussfaktor ermittelt.

Zur Untersuchung der Korrelation zweier ordinal skalierten Einflussvariablen ist der Korrelationskoeffizient nach Kendall, der Konkordanzkoeffizient (Kendalls W) oder der  $\kappa$ - Koeffizient (Cohen) heranzuziehen (Hedderich und Sachs, 2012). Neben den genannten Koeffizienten bietet sich auch die Rangkorrelation nach Spearman an.

In Abhängigkeit der vorliegenden Skalenniveaus der zu untersuchenden Einflussfaktoren ergeben sich folgende Kombinationsmöglichkeiten (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 7: Kombinationsmöglichkeiten der Korrelationsberechnung zweier Einflussfaktoren in Abhängigkeit der vorliegenden Skalenniveaus**

Skalenniveau 1	Skalenniveau 2	Korrelationsmethode
nominal	nominal	Phi-Koeffizient ( $\phi$ )
metrisch	metrisch	Produktmomentkorrelationskoeffizienten nach Pearson ( $r$ )
ordinal	ordinal	Kendall-Koeffizient Konkordanzkoeffizient (Kendalls $W$ ) $\kappa$ -Koeffizient (Cohen)
nominal	metrisch	Eta-Koeffizient

Die Beurteilung eines Zusammenhanges zwischen zwei betrachteten Einflussfaktoren wird mit Hilfe des betragsmäßigen Wertes des Korrelationskoeffizienten (siehe Tabelle 8) nach Kohn (2005) und dem dazugehörigen Signifikanzniveau durchgeführt.

**Tabelle 8: Interpretation der betragsmäßigen Werte der Korrelationskoeffizienten (KK) (Kohn, 2005)**

betragsmäßiger Wert des KK	Interpretation der Korrelation
$0 <  KK  < 0,5$	schwache Korrelation
$0,5 \leq  KK  < 0,8$	mittlere Korrelation
$0,8 \leq  KK  < 1,0$	starke Korrelation

## 6.5 Modellvorbereitung (Vorgehensweise)

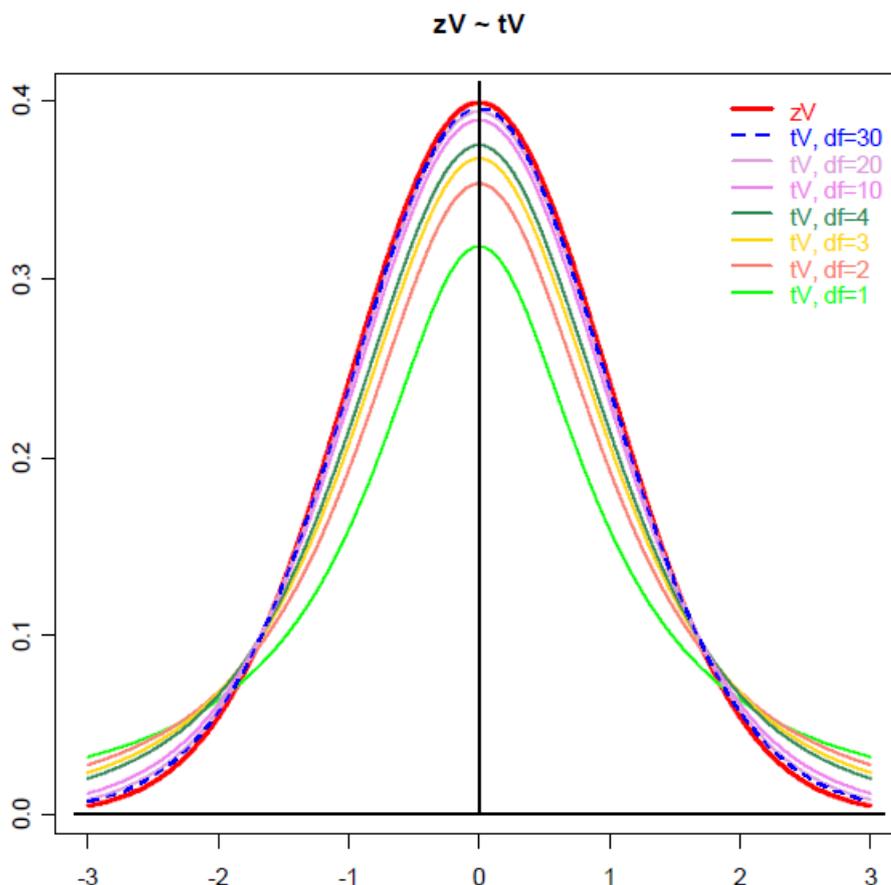
### 6.5.1 Modellvorbereitung für statistische Berechnungsmodelle

In der Datenstruktur der in dieser Arbeit betrachteten WVU A und B liegt für die Verteilung der Anzahl der Leitungen mit bzw. ohne Schäden eine große Unverhältnismäßigkeit vor.

Kausale Schlussfolgerungen aus statistischer Sicht setzen lt. Hedderich und Sachs (2012) voraus, dass wiederholbare randomisierte Stichproben zur Modellbildung vorliegen müssen. Bei der Randomisierung werden unter Verwendung einer zufällig gesteuerten Auswahl Elemente unterschiedlichen Gruppen zugeordnet. Dadurch können unbekannte Störgrößen im System verteilt werden und systematische Verzerrungen und Fehler durch unerwünschte und unbekannte Korrelationserscheinungen reduziert werden. Die Zuverlässigkeit der Stichproben im Sinne der mathematischen Statistik wird dadurch garantiert.

Nach Liu (2012) setzen Modellberechnungen mit Hilfe statistischer Methoden die Einbeziehung unabhängiger randomisierter Eingangsdatensätze zur Findung eines finalen Modelles, welches sich an die Charakteristik der Grunddatenmenge optimal

anpasst und diese abbildet, voraus. Diese Vorgehensweise ist vergleichbar mit der Anwendung des zentralen Grenzwertsatzes. Bei einer zufälligen (= randomisierten) Ziehung von  $n$  Einzelstichproben aus einer Grundgesamtheit ist die Verteilung der Einzelstichprobenmittelwerte annähernd normalverteilt und der Gesamt-Einzelstichprobenmittelwert gleicht sich dem Mittelwert der Daten-Grundgesamtheit an. Voraussetzung dafür ist eine ausreichend große Anzahl  $n$  an randomisierten Einzelstichproben. In Abbildung 15 nähern sich die einzelnen Wahrscheinlichkeitsdichten (=  $tV$ ) der berücksichtigten Stichproben mit steigender Zahl  $n$  (=  $df$ ) an die Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit (=  $zV$ ) an (Liu, 2012). Nach Liu (2012) ist deutlich zu erkennen, dass bereits für einen Stichprobenumfang von  $n \geq 30$  die Näherung der  $tV$  an  $zV$  sehr gut ist.



**Abbildung 15: Wahrscheinlichkeitsdichte bei unterschiedlicher Stichprobenmenge  $n$  (=  $df$ ) (Liu, 2012)**

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit 30 unabhängige Stichproben in Abhängigkeit der Verteilung der Schadensarteninformation aus der gesamten Grunddatenmenge gezogen (siehe Abbildung 16). Dazu wurde ein nach Günther (2012) entwickelter Algorithmus zur zufälligen Auswahl (= Randomisierung) von Leitungsabschnitten aus einer Grundgesamtheit verwendet. Aus der Gruppe der schadhafte Leitungen werden in der Betrachtung einer spezifischen Schadensart alle schadhafte Leitungen für alle 30 Einzelstichproben mit einbezogen. Eine gleiche Anzahl von nicht schadhafte Leitungen wurde im nächsten Schritt zufällig

aufgrund des Randomisierungs-Algorithmus für diese erste Einzelstichprobe gezogen. Danach wurden alle nicht schadhafte Leitungen wieder zurückgelegt und die Prozedur begann für jede weitere Stichprobe ( $n = 30$ ) von vorne. Durch die Auswahl mit Zurücklegen ergeben sich Duplikate für die ausgewählten nicht schadhafte Leitungen in den einzelnen Stichproben. Das Ziel der Randomisierung ist die Generierung unabhängiger Einzelstichproben und die Vermeidung, dass gleiche nicht schadhafte Leitungen in verschiedenen Stichproben als Duplikate häufig gezogen werden.

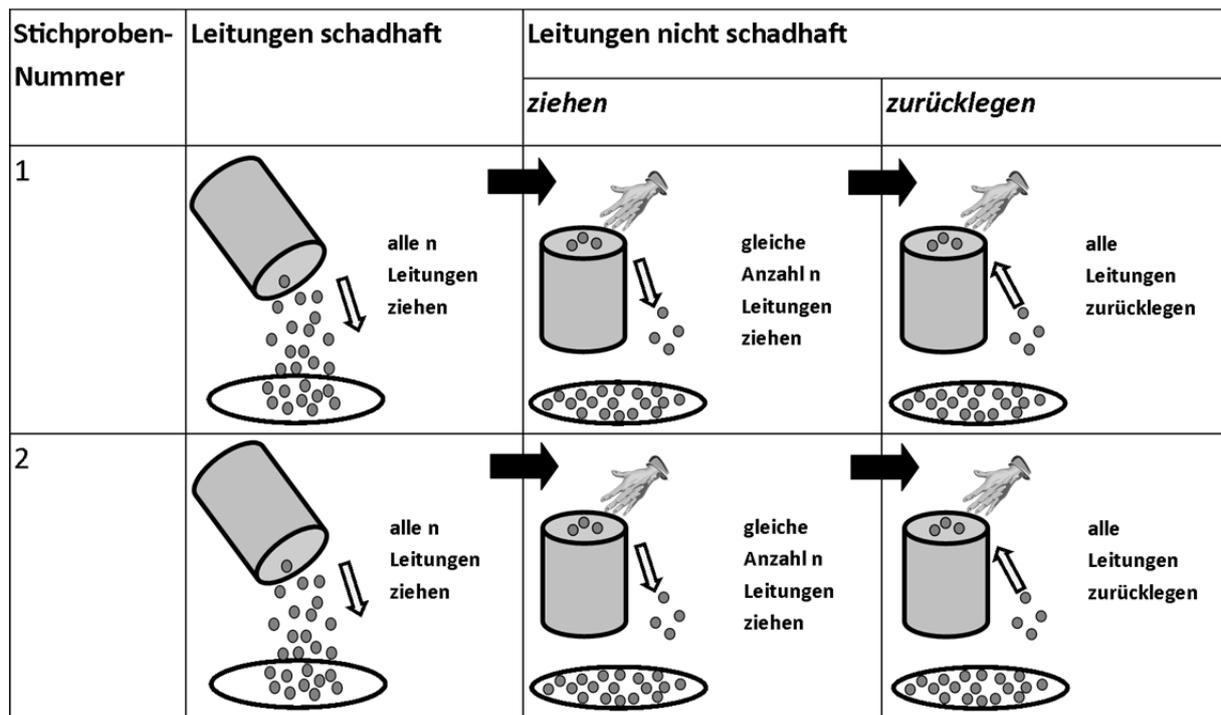


Abbildung 16: Randomisierungs-Prozedur zur Bildung von Einzelstichproben

### 6.5.2 Modellvorbereitung für physikalische Berechnungsmodelle

In dieser Arbeit wurden Modelle betreffend Korrosions- und Rissauftreten auf HZL gewählt (siehe Abbildung 23 und

Tabelle 10). Physikalische Modelle berücksichtigen in der Berechnung der spezifischen Schadensart unterschiedliche Einflussfaktoren. Beispielsweise sind in Tabelle 9 die berücksichtigten Einflussfaktoren bei der Berechnung von Korrosionsmodellen dargestellt. Als Vorbereitung zur Anwendung der physikalischen Modelle ist die Umwandlung von Einflussfaktoren in spezifische Zahlen (= Ersatzinformationen) notwendig. Problematisch sind z. B. die Quantifizierbarkeit der tatsächlichen Bodenaggressivität für eindeutige Größenzuordnungen der benötigten Modellvariablen und der Zusammenhang zwischen Bodenaggressivität und dem benötigten Modell-Recheneingangswert. Unbekannte Einflüsse, wie Beschädigung der Korrosionsschutzschicht während der Prozesse Transport, Lagerung und Einbau der Rohrleitung, führen zu sogenannten Korrosions-Initiatoren

bzw. beschädigten Stellen auf der Rohraußenseite, die modelltechnisch nicht erfassbar und implementierbar sind.

**Tabelle 9: Berücksichtigte Einflussfaktoren bei der Berechnung von spezifischen Korrosionsmodellen**

Einflussfaktoren	gewählte Korrosionsmodelle		
	Korrosionsmodell Rajani et al. (2000)	Korrosionsmodell Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987)	Korrosionsmodell Rossum (1969)
Rohrmaterialart	X	X	X
Rohrwandstärke	X	X	X
Korrosionsdauer bzw. Rohralter	X	X	X
Bodenaggressivität	X	X	
pH-Wert Boden			X
Belüftungszahl Boden			X
Bodenwiderstand			X
<b>X ... Einflussfaktor durch spezifisches Korrosionsmodell berücksichtigt</b>			

## 6.1 Modellberechnung

### Allgemeines

Für Infrastrukturbereiche, wie z. B. Abwasserleitungen (Ariaratnam et al., 2001; Davies et al., 2001; Ana et al., 2009; Fuchs-Hanusch et al., 2012), Straßen (Butt et al., 1987), Brücken (Ariaratnam, 1984) und Gasleitungen (Harwod et al., 1982), wurde bei Vorhandensein einer Zustandsbewertung und der beeinflussenden Faktoren mittels physikalischer, statistischer und sogenannter „artificial-intelligence-based“ Modelle eine strukturelle Zustandsverschlechterung abgebildet.

Lt. Mehle et al. (2001) ist eine Prognose des Versagenszeitpunktes für HZL am besten durch die Verwendung von statistischen Verfahren möglich. Die strukturelle Zustandsverschlechterung von HZL ist als komplexer Prozess anzusehen und wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Friedl et al. (2012) verwenden eine Risikobewertung von HZL, die aufgrund der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit und dem Schadensausmaß ermittelt wurde, als Unterstützung in der Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen je Einzelleitungsabschnitt. Die Berechnung und Prognose der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit bildet die Zustandsverschlechterung von HZL ab.

Sogenannte auf künstliche-Intelligenz-basierenden Modelle versuchen nach Hoffman et al. (2005) wie das menschliche Denken ein Begründen und Lernen im

Zusammenhang mit Unsicherheiten zu erreichen. Komplexe Problemstellungen können dadurch gelöst werden, die mit analytischen Methoden, wie physikalischen Modellen, nicht behandelt werden können. Auf künstliche-Intelligenz-basierende Modelle sind wie Black-Box-Modelle zu verstehen und benötigen eine Vielzahl von in der Praxis nicht vorhandenen Informationen. Neuronale Netze (Tran et al., 2006), Fuzzy-set-Theoriemodelle (Kleiner et al., 2006), Expertensysteme (Merill et al., 2004) und regelbasierte Simulationen (Ruwanpura et al., 2004) sind praktische Beispiele von auf künstliche-Intelligenz-basierenden Modellen und werden zur Beschreibung der Zustandsverschlechterung angewendet. Die artificial-intelligence-based Modelle zur Ermittlung der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit von HZL werden in dieser Arbeit nicht weitergehend behandelt.

### **6.1.1 Ermittlung der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit von HZL mit statistischen Modellen**

#### **Allgemeines**

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen in der Literatur bereits z. B. für Abwasserleitungen entwickelten und angewendeten statistischen Methoden zur Zustandsprognose mit den dahinter liegenden Modellgedanken, den Datenanforderungen und deren Anwendungsmöglichkeiten zur Unterstützung von Instandhaltungsstrategien erläutert.

#### **Kohorten-Überlebens-Modell**

Kanäle werden nach Baur et al. (2004), aufgrund prinzipiell gleicher Charakteristiken bezüglich Zustandsverschlechterung, zu Kohorten zusammengefasst und durchschreiten über ihre Nutzungsdauer Zustände in Kategorien von „gut“ bis „schlecht“ (= Schadensauftritt). Die betrachteten Abwasserleitungen verbleiben aufgrund ihrer zugehörigen Wahrscheinlichkeit einen gewissen Zeitraum in einem bestimmten Zustand und schreiten danach, mit Hilfe der Beschreibung von Übergangsfunktionen, in den nächst schlechteren Zustand. Mit dem Kohorten-Überlebens-Modell können somit der Anteil der Kanäle in der Kohorte und der Zeitpunkt, an dem dieser Anteil den Zustand Schaden erreichen wird, abgebildet werden. Die Kohortengröße sollte einerseits homogen sein um gleiche Charakteristiken bezüglich der Verschlechterung aufzuweisen und andererseits groß genug sein um statistisch signifikante Aussagen zu erlauben.

#### **Markov-Modelle und Semi-Markov-Modelle**

Markov-Modelle (Le Gat, 2008) und Semi-Markov-Modelle (Kleiner, 2001) erfordern, wie Kohorten-Überlebens-Modelle, eine Leitungsgruppierung aufgrund von Gruppierungsvariablen, wie beispielsweise Rohrmaterialart, RD und Bodenart. Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten werden basierend auf Überlebensfunktionen ermittelt.

Der derzeit in Österreich vorhandene Mangel an notwendigen Eingangsdaten zur Ermittlung der Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten für HZL erschwert die Anwendung von Markov- und Semi-Markov-Modellen für österreichische WVU.

### **Multivariate statistische Analysemethoden**

Multivariate statistische Analysemethoden werden nach Backhaus et al. (2010) aufgrund verschiedener Ansätze unterteilt:

1. Unterscheidung, ob die Verfahren Strukturen geben (= strukturen-entdeckende Verfahren) oder diese nur untersuchen (= strukturen-prüfende Verfahren).
2. Unterscheidung, ob die beobachteten in die Berechnung eingehenden Merkmale alle gleichberechtigt (Dependenzanalyse) sind oder gibt es Merkmale, die wichtiger als andere sind (Interdependenzanalyse).
3. Strukturen-prüfende Verfahren können noch differenzierter aufgrund der Art der Skalenniveaus der abhängigen und unabhängigen Variablen eingeteilt werden.

Multivariate Analysemethoden werden durch die gemeinsame und gleichzeitige Analyse mehrerer Merkmale charakterisiert und werden in Abhängigkeit der Fragestellung in strukturen-entdeckende Verfahren und strukturen-prüfende Verfahren untergliedert (Backhaus et al., 2010). Aufgrund von sachlogischen und theoretischen Überlegungen werden mittels strukturen-prüfender Verfahren Zusammenhänge zwischen Variablen und kausale Abhängigkeiten einer abhängigen interessierenden Variable mit einer oder mehreren unabhängigen Variablen ermittelt. Zu den strukturen-prüfenden Analyseverfahren zählen:

1. Lineare und nichtlineare Regressionsanalyse,
2. Zeitreihenanalyse,
3. Varianzanalyse,
4. Diskriminanzanalyse,
5. Logistische Regressionsanalyse,
6. Kreuztabellierung und Kontingenzanalyse,
7. Traditionelle und auswahlbasierte Conjoint-Analyse,
8. Strukturgleichungsmodelle,
9. Konfirmatorische Faktorenanalyse.

Bei der Anwendung von strukturen-entdeckenden Verfahren hat man am Beginn der Analyse noch keine Kenntnis über die Beziehungszusammenhänge im zu untersuchenden Datensatz und daher ist die Entdeckung von Zusammenhängen zwischen Variablen das Ziel dieser Verfahren (Backhaus et al., 2010). Zu den strukturen-entdeckenden Analyseverfahren zählen:

1. Faktorenanalyse,
2. Clusteranalyse,
3. Neuronale Netze,

4. Multidimensionale Skalierung,
5. Korrespondenzanalyse.

#### 6.1.1.1 Beschreibung der Schadenswahrscheinlichkeitsberechnung mittels binär logistischer Regressionsanalyse (BLRA)

Davies et al. (2001), Ariaratnam et al. (2001), Ana et al. (2009) und Fuchs-Hanusch et al. (2011) beschreiben die Verwendung von binär logistischen Regressionsmodellen (BLRA) zur Identifizierung der wichtigsten Einflüsse auf das Auftreten von Schäden auf Abwasserleitungen. Davies et al. (2001) untersuchten das Verhalten von Kanälen aus Beton und Steinzeug und leiteten einen statistischen Zusammenhang zwischen dem Auftritt von risikoreichen Schadensbildern und ausgewählten bestimmten Einflussfaktoren ab. Mittels BLRA wurden von 33 einbezogenen Parametern, die von Kanalbetreibern als relevant angegeben wurden, signifikante Einflussfaktoren zur Schadensentstehung bestimmt. Ariaratnam et al. (2001) beschreiben damit eine Möglichkeit in der Unterstützung einer Priorisierung zur Inspektion von Kanälen mittels BLRA. Die Untersuchungen von Ariaratnam et al. (2001), Davies et al. (2001) und Ana et al. (2009) zeigen somit, dass Regressionsmodelle eine wissenschaftlich fundierte Möglichkeit zur Beschreibung der Beziehung zwischen einer abhängigen Zielvariable (Zustand bzw. Schadensart) und einer oder mehrerer unabhängigen Einflussvariablen (z. B. Verkehrsbelastung, Setzungsempfindlichkeit des Bodens, usw.) darstellen. Im Folgenden wird der mathematische Hintergrund der BLRA mit praktischen Anwendungshinweisen für die vorliegende Arbeit beschrieben.

Die BLRA versucht nach Backhaus et al. (2010) über den Regressionsansatz die Auftretswahrscheinlichkeit eines 0/1-Ereignisses in Abhängigkeit verschiedenster Einflussgrößen zu bestimmen und zählt, wie die Diskriminanzanalyse, zu den multivariaten und strukturen-prüfenden Analysemethoden. Beispiele dafür sind:

- Kauf- oder Nichtkauf eines Produktes,
- Tod oder Überleben im Zuge einer schweren Krankheit,
- Kreditwürdigkeit oder Kreditunwürdigkeit eines Bankkunden,
- Treue oder Wechsel von Stammkunden.

Die BLRA beschreibt die Beziehung zwischen einer binären Zielgröße ( $y = 0/1$ ) und einer Anzahl von  $k$  Einflussvariablen ( $x_1, \dots, x_k$ ).

Die Zustände der Leitungen werden in der hier angewandten Analyse als binäre (dichotome) abhängige Variable (Y) mit den Ausprägungen 1 („Schaden mit bestimmter Schadensart auf Leitung dokumentiert“) und 0 („kein Schaden auf Leitung dokumentiert“) eingeteilt. Somit ergeben sich die Auftrittswahrscheinlichkeiten P der Zustände in folgender Weise:

**Formel 1: Auftrittswahrscheinlichkeit P - BLRA**

$$P(y = 0) + P(y = 1) = 1$$
$$P(y = 0) = 1 - P(y = 1)$$

Wie bei der Diskriminanzanalyse ist die Betrachtung der abhängigen Variable in mehreren Gruppen mit Hilfe der multinomialen logistischen Regression auch möglich. Die abhängige Variable kann somit binär (dichotom = zwei Ausprägungen) aber auch multinomial (mehr als zwei Ausprägungen) ausgeprägt sein. Die Methodik unterscheidet sich im Grunde nicht, jedoch gibt es Unterschiede in der Interpretation der Gütemaße. Auf die Methode der multinomialen Analyse wird in dieser Arbeit weiter nicht eingegangen.

Die logistische Regressionsanalyse ist im Vergleich zur Diskriminanzanalyse als wesentlich robustere Berechnungsmethode anzusehen, da sie an weniger strenge Prämissen der unabhängigen Variablen (= Einflussfaktoren) geknüpft ist. Im Vergleich zur klassischen Regressionsanalyse wird in der logistischen Regressionsanalyse kein metrisches Skalenniveau für die abhängige Variable zugelassen und es wird die Eintrittswahrscheinlichkeit aufgrund der dokumentierten Zustände der Rohrleitungen berechnet. Als unabhängige Variablen können sowohl kategorial (Nominal- und Ordinalskalenniveau) als auch metrisch (Intervall- und Verhältnisskalenniveau) skalierte Variablen in der Analyse berücksichtigt werden. Kategoriale Variablen müssen in binäre Variablen zerlegt werden und für jede dieser Dummy-Variablen ist ein Koeffizient zu berechnen, der den Einfluss der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable angibt. Für die binär kodierte abhängige Variable ist ein lineares Regressionsmodell nicht geeignet um Wahrscheinlichkeiten abzuschätzen. Eine latente Variable (Z) ermöglicht die Erzeugung der Ausprägung der abhängigen Variable (Y) in Form einer Linearkombination in Abhängigkeit der Ausprägungen der unabhängigen Variablen ( $X_j$ ). Die logistische Funktion (p) dient als Wahrscheinlichkeitsfunktion, welche in Abhängigkeit der aggregierten Einflussstärke Z das Ereignis  $y = 1$  oder  $y = 0$  erzeugt, mit der Euler'schen Zahl  $e = 2,71828183$  (Backhaus et al., 2010).

**Formel 2: Wahrscheinlichkeitsfunktion - BLRA**

$$p = \frac{e^z}{1 + e^z}$$

Das Hauptmerkmal der BLRA ist es, dass nicht die Gruppenzugehörigkeit ( $y = 1$ ) direkt modelliert wird, sondern die Wahrscheinlichkeit der Gruppenzugehörigkeit

$p(y = 1)$ . Da die  $y$ -Werte entweder die Ausprägung 1 oder 0 annehmen, wird der Anteil der Fälle einer Stichprobe, für  $y = 1$  als  $\pi = P(y = 1)$  und der Anteil der Fälle, für  $y = 0$  als  $1 - \pi = P(y = 0)$  definiert. Der Parameter  $\beta_0$  und die Regressionskoeffizienten  $\beta_j$  bilden einen nicht-linearen Zusammenhang der Regressionsfunktion, welche die Einflussstärke der jeweils betrachteten unabhängigen Variable  $X_j$  auf die Eintrittswahrscheinlichkeit  $P(y = 1)$  beschreibt (Backhaus et al., 2010).

**Formel 3: Eintrittswahrscheinlichkeit  $\pi$  - BLRA**

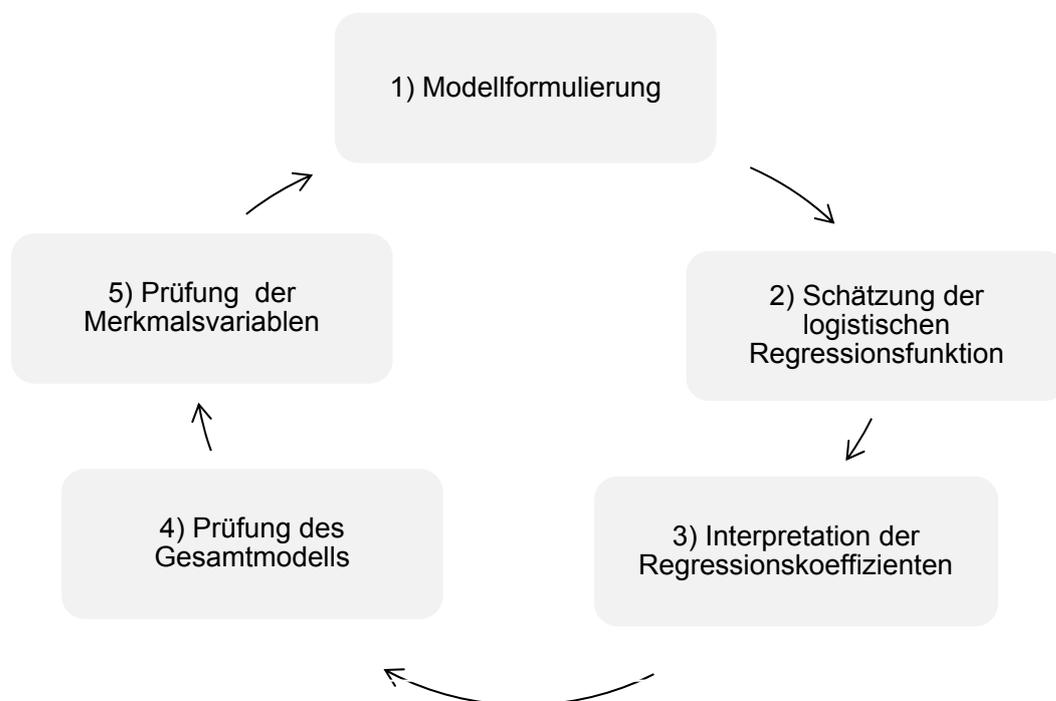
$$\pi = P(y = 1) | x_1, \dots, x_k = \frac{e^z}{1 + e^z} = \frac{e^{\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j}}{1 + e^{\alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j}}$$

Als abhängige Variable wird anstelle der Wahrscheinlichkeit für die Gruppenzugehörigkeit, das sog. Chancenverhältnis, die „Odds“ ( $\psi$ ) betrachtet:

**Formel 4: Chancenverhältnis (Odds)**

$$\psi = \frac{\pi}{1 - \pi}$$

Nachfolgend werden die Ablaufschritte der BLRA, wie sie in Abbildung 17 dargestellt sind, beschrieben.



**Abbildung 17: Ablaufschritte der logistischen Regressionsanalyse (Backhaus et al., 2010)**

### 1) Modellformulierung

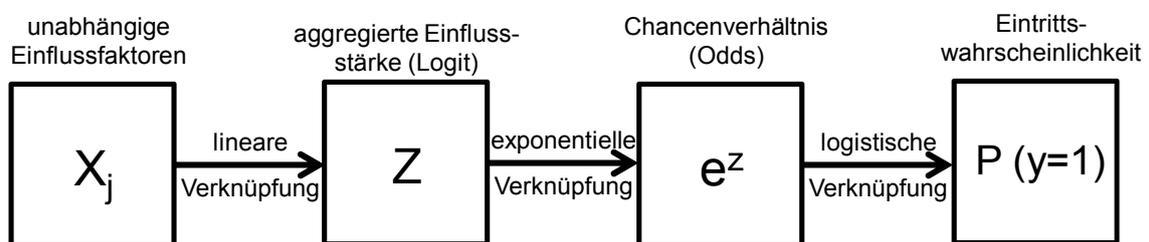
Aufgrund sachlogischer Überlegungen des Rohr-Boden-Systems und der Schadensmechanismen wird eine Modellformulierung aufgestellt, bei der die möglichen Einflussgrößen der unabhängigen Variablen auf die Auftrittswahrscheinlichkeit der abhängigen Variable bestimmt werden.

### 2) Schätzung der logistischen Regressionsfunktion

Mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode werden die Modellparameter  $b_j$ , welche die Einflussgewichte der unabhängigen Variablen abbilden, so geschätzt, dass die beobachteten Erhebungsdaten erreicht werden maximiert wird. Dazu können Berechnungsmethoden verwendet werden, welche die einzelnen Einflussfaktoren schrittweise vorwärts, schrittweise rückwärts oder alle gleichzeitig (= Einschluss) in das Modell aufnehmen. Im Rahmen der schrittweisen vorwärts Methode ist keine Variable im Modell berücksichtigt und danach werden die einzelnen Einflussfaktoren auf Signifikanz überprüft und gegebenenfalls ins Modell aufgenommen. Bei der schrittweisen rückwärts Methode werden zuerst alle Einflussfaktoren in das Modell aufgenommen und danach die nicht signifikanten Variablen schrittweise aus dem Modell entfernt. In der Regel werden Wahrscheinlichkeitswerte  $p_k > 0,5$  dem Ereignis  $y = 1$  und  $p_k < 0,5$  dem Ereignis  $y = 0$  zugeordnet.

### 3) Interpretation der Regressionskoeffizienten

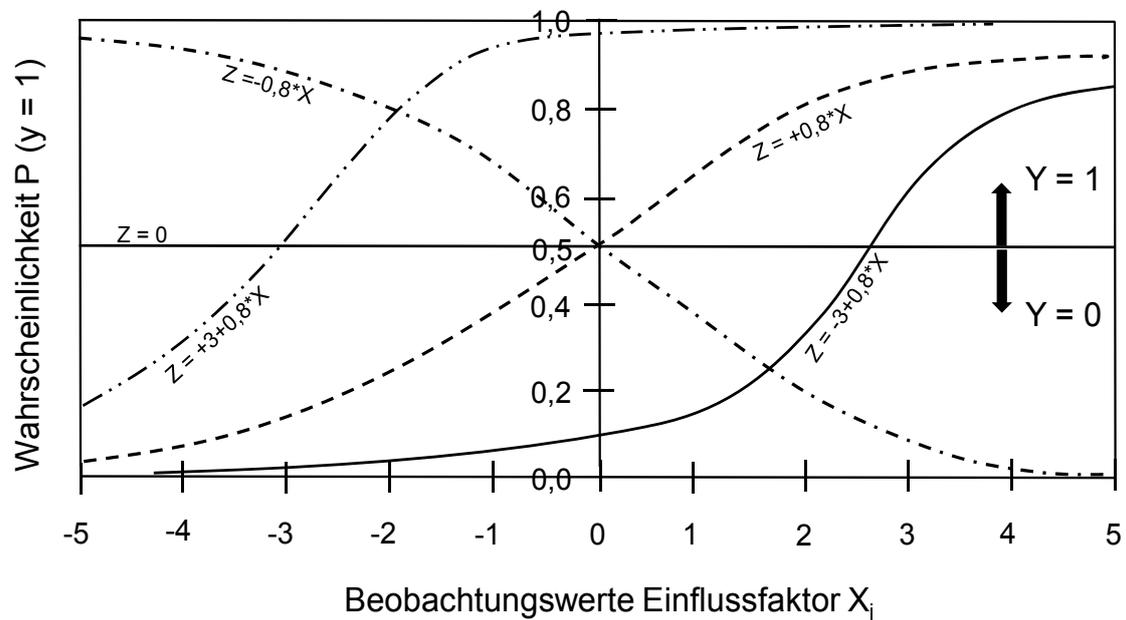
Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen den Betrachtungsgrößen der logistischen Regressionsanalyse auf die Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit verhalten sich nach folgenden Zusammenhängen (siehe Abbildung 18). Es existiert kein linearer Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren  $X_j$  und den über die logistische Funktion bestimmten Wahrscheinlichkeiten  $P(y = 1)$ . Die unabhängigen Einflussfaktoren  $X_j$  werden als Linearkombination gebildet und so entsteht die lineare Verknüpfung in Form des Z-Wertes. Somit können mit Hilfe der Z-Werte unter Anwendung der logistischen Funktion die einzelleitungsbezogenen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeiten berechnet werden.



**Abbildung 18: Grundlegende Zusammenhänge zwischen den Betrachtungsgrößen der logistischen Regressionsanalyse**

Aufgrund des nicht-linearen Zusammenhanges können die Regressionskoeffizienten  $b_j$  der unabhängigen Variablen untereinander nicht verglichen werden. Diese weisen eine unterschiedliche Wirkung über die gesamte Breite ihrer Ausprägung auf. Die

folgend beschriebenen Charakteristiken in der Interpretation der Regressionsgleichung sind exemplarisch für einen Einflussfaktor  $X_j$  mit betrags- und vorzeichenmäßig unterschiedlichen Regressionskoeffizienten in Abbildung 19 dargestellt.



**Abbildung 19: Verlauf der logistischen Funktion in Abhängigkeit von  $\beta_0$  und  $\beta_j$**

Aufgrund des sogenannten Sättigungseffektes führen Änderungen in den Extrembereichen der latenten Variable  $Z$  nicht mehr zu wesentlichen Änderungen der Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Konstante bzw. der Parameter  $\beta_0$  definiert die Lage der logistischen Funktion auf der horizontalen Achse. Für positive  $\beta_0$  verschiebt sich die Kurve nach links und für negative  $\beta_0$  findet eine Rechtsverschiebung der logistischen Funktion statt. Große Regressionskoeffizienten  $\beta_j$  ( $\beta_j > 1$ ) beeinflussen den Verlauf der logistischen Funktion so, dass sich die Wahrscheinlichkeitswerte sehr schnell den Randbereichen der logistischen Funktion (0 oder 1) annähern und die Wahrscheinlichkeitswerte für kleine  $\beta_j$  ( $0 < \beta_j < 1$ ) in Abhängigkeit von  $X$  nur sehr langsam ansteigen. Für  $\beta_j = 0$  ergeben alle Wahrscheinlichkeitswerte 0,5 (mit  $e^0 = 1$  und folglich  $\frac{1}{(1+e^0)} = 0,5$ ). Positive Regressionskoeffizienten  $\beta_j$  bewirken mit größer werdenden Beobachtungswerten für  $X$  einen nicht linearen Anstieg der Wahrscheinlichkeitswerte für  $P(y = 1)$  und negative Regressionskoeffizienten  $\beta_j$  ein Abnehmen der Wahrscheinlichkeitswerte für  $P(y = 1)$  für ansteigende Beobachtungswerte der unabhängigen Variablen. Gleiche Veränderungen in den Beobachtungswerten der unabhängigen Variablen  $X_j$  in verschiedenen Bereichen wirken sich unterschiedlich auf die Auftretswahrscheinlichkeit  $P(y = 1)$  aus und somit kann  $\beta_j$  nicht als globales Gütemaß, sondern nur die Information über die Richtung des Einflusses verwendet werden. Als Interpretationserleichterung kann statt der Eintrittswahrscheinlichkeit  $P(y = 1)$ , ihr Verhältnis zur Gegenwahrscheinlichkeit  $P(y = 0)$  bzw.  $1 - P(y = 1)$  verwendet werden. Dieses Wahrscheinlichkeitsverhältnis

wird als Chance (Odds) oder „Effekt-Koeffizient“  $\exp(\beta_j)$  (= Odds-Ratio) bezeichnet. Dieser gibt die Vervielfachung der Odds an, wenn sich die Variable  $X_j$  um eine Einheit verändert. Der Effekt-Koeffizient kann Werte zwischen größer „0“ und „ $+\infty$ “ annehmen. Werte größer „1“ vergrößern die Odds, Werte kleiner „1“ verringern sie. Bei kategorialen Regressoren (z. B. Rohrmaterial) hängt die Interpretation von  $\exp(\beta)$  von der gewählten Kontrast-Kodierung ab. Das bedeutet, es muss bekannt sein, welche kategoriale Variable als Referenzkategorie in der Berechnung der logistischen Regressionsfunktion gewählt wurde (Backhaus et al., 2010).

#### **4) Prüfung des Gesamtmodells**

Bei der Prüfung des Gesamtmodells werden Gütemaße ermittelt, die die Gesamtanpassung des analysierten Modells widerspiegeln. Zusätzlich werden mit Hilfe einer Ausreißerdiagnostik extreme Werte der Zustands-Beobachtungen der Leitungen untersucht, die als Ausreißer anzusehen sind. Es wird eine Eliminierung dieser vorgenommen oder aber aufgrund ihres oftmaligen Auftretens eine Modellveränderung durchgeführt (Backhaus et al., 2010).

#### **Gütemaße für den Regressionsansatz**

Der Beitrag der unabhängigen Variablen  $X_j$  (= Einflussfaktoren) in ihrer Gesamtheit zur Trennung der Ausprägungskategorien der abhängigen Variable  $Y$  wird mit Hilfe der Gütemaße als Beurteilungskriterien der Modellgüte des logistischen Regressionsansatzes bewertet (Backhaus et al., 2010).

#### **Gütekriterien auf Basis der LogLikelihood-Funktion (Güte der Anpassung)**

Der Likelihood-Ratio-Test (LR-Test) vergleicht den Likelihood-Wert (LL-Wert) des Nullmodells (nur konstanter Term berücksichtigt, alle Regressionskoeffizienten sind gleich null) mit dem vollständigen Modell (alle unabhängigen Variablen werden berücksichtigt). Ist die Differenz zwischen der Devianz des Nullmodells und des vollständigen Modells groß, wird von einer hohen Erklärungskraft der unabhängigen Variablen ausgegangen. Der Effekt der unterschiedlichen Gruppengröße wird durch den Bezug auf das Nullmodell neutralisiert (Backhaus et al., 2010).

## Pseudo-R-Quadrat-Statistiken (Güte des Gesamtmodells)

### 1) Cox und Snell-R<sup>2</sup>

Cox und Snell-R<sup>2</sup> nimmt nur Werte zwischen null und kleiner eins an und kann den Maximalwert von eins nicht erreichen.

#### Formel 5: Cox und Snell-R<sup>2</sup>

$$\text{Cox \& Snell} - R^2 = \left[ \frac{L_0}{L_V} \right]^{\frac{2}{K}}$$

L<sub>0</sub> = Likelihood des Nullmodells (ausschließlich mit Konstante)

L<sub>V</sub> = Likelihood des vollständigen Modells

K = Stichprobenumfang

Bei Werten größer 0,2 ist die Güte des Gesamtmodells akzeptabel und gut bei Werten größer 0,4 (Backhaus et al., 2010).

### 2) Nagelkerke-R<sup>2</sup>

Nagelkerke-R<sup>2</sup> kann den Maximalwert von 1 erreichen und dadurch ist eine eindeutige inhaltliche Interpretation gegeben.

#### Formel 6: Nagelkerke-R<sup>2</sup>

$$\text{Nagelkerke} - R^2 = \frac{\text{Cox \& Snell} - R^2}{R_{\max}^2}$$

$$R_{\max}^2 = 1 - (L_0)^{2/K}$$

L<sub>0</sub> = Likelihood des Nullmodells (ausschließlich mit Konstante)

Bei Werten größer 0,2 ist die Güte des Gesamtmodells akzeptabel, gut ab 0,4 und sehr gut bei Werten größer 0,5 (Backhaus et al., 2010).

## Beurteilung der Klassifikationsergebnisse (Güte der Anpassung)

### 1) Analyse der Klassifikationsergebnisse

Die empirisch beobachteten Zustandszuordnungen der HZL werden nach Backhaus et al. (2010) mit den Ausprägungen 0 und 1 der abhängigen Variable gekennzeichnet und mit den durch die logistische Regressionsgleichung berechneten Wahrscheinlichkeiten p verglichen. Die richtig und falsch klassifizierte Fälle werden in einer Klassifikationsmatrix bzw. Confusions-Matrix dargestellt. In der Hauptdiagonalen stehen die Häufigkeiten der richtig klassifizierten Elemente und in den übrigen Feldern die der falsch klassifizierten Elemente. Zur Beurteilung der

Klassifikationsfähigkeit der logistischen Regressionsfunktion wird die Trefferquote der richtigen Zuordnungen mit der Trefferquote bei rein zufälliger Zuordnung der Elemente, z. B. durch Werfen einer Münze oder durch Würfeln, verglichen. Die Trefferquote bei rein zufälliger Zuordnung ist abhängig von der relativen Gruppenstärke und nimmt mit steigender Ungleichheit der Gruppengröße (Verhältnis schadhafte zu nicht schadhafte HZL) zu. Wenn eine höhere Trefferquote erreicht wird als nach dem Zufallsprinzip erwartet werden kann ist die logistische Regressionsfunktion von Nutzen. Wenn die Klassifikation der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wird, wie für die Schätzung der logistischen Regressionsfunktion verwendet wurde, ergibt sich eine überhöhte Trefferquote. Bei Anwendung der ermittelten logistischen Regressionsfunktion auf eine weitere bzw. andere Stichprobe (= Validierung) ist stets mit einer niedrigeren Trefferquote zu rechnen (Backhaus et al., 2010).

Zur Beurteilung der Klassifikationsergebnisse aufgrund der richtig und falsch klassifizierten Leitungszustände werden folgende 4 Klassifikationsfälle unterschieden.

1. Der Leitungszustand „kein Schaden“ wird richtigerweise als „kein Schaden“ klassifiziert: Es liegt eine korrekte Ablehnung vor, d. h. der betrachtete Fall erfüllt das Kriterium „Schaden“ nicht und wird korrekt als nicht schadhaft klassifiziert (richtig negativ = RN).
2. Der Leitungszustand „Schaden“ wird richtigerweise als „Schaden“ klassifiziert. Der betrachtete Fall erfüllt das Kriterium Schaden und wird korrekt als schadhaft klassifiziert (richtig positiv = RP).
3. Eine schadhafte Leitung wird fälschlicherweise als „kein Schaden“ klassifiziert (falsch negativ = FN). Dieser Fall wird auch als „Verpasser“ bezeichnet.
4. Eine HZL mit beobachtetem nicht schadhaftem Leitungszustand wird fälschlicherweise als „Schaden“ klassifiziert (falsch positiv = FP). Dieser Fall wird auch als „falscher Alarm“ bezeichnet.

Mit Hilfe dieser vier Klassifizierungsdarstellungen der Ergebnisse werden die Trefferquote (= Sensitivität) und die Quote falscher Alarme (= 1 - Spezifität) definiert.

#### **Formel 7: Trefferquote**

$$\text{Sensitivität} = \frac{RP}{FN+RP} (= \text{Trefferquote})$$

#### **Formel 8: Quote falscher Alarme**

$$1 - \text{Spezifität} = \frac{FP}{FP+RN} (= \text{Quote falscher Alarme})$$

Für jede zufällig gewählte Stichprobe und folglich abgeleitetem Regressionsmodell werden die zueinander gehörigen Werte für Sensitivität und (1 – Spezifität) grafisch gegeneinander aufgetragen. Diese Darstellungsweise ist vergleichbar mit einer ROC-Kurve (= Receiver Operating Characteristic-Kurve).

## 2) Hosmer-Lemeshow-Test

Mit dem Hosmer-Lemeshow-Test wird die Nullhypothese, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich null ist, überprüft. Dazu werden die Beobachtungsfälle mit den geschätzten Wahrscheinlichkeiten für  $P(y = 1)$  in zehn ungefähr gleich große Gruppen unterteilt. Danach wird mit einem Chi-Quadrat-Test überprüft, wie sich die beobachteten und erwarteten Häufigkeiten für das Ereignis  $y = 1$  in den jeweiligen Gruppen unterscheiden. Zur Überprüfung der Güte der Anpassung werden ein möglichst kleiner Chi-Quadrat-Wert und ein Signifikanzniveau größer 70 % gefordert (Backhaus et al., 2010).

### Ausreißerdiagnostik

Der Einfluss einzelner Beobachtungen auf die Gesamtgüte des Modells wird mit Hilfe der Ausreißerdiagnostik und Residuenanalyse nach Backhaus et al. (2010) durchgeführt. Eine nicht optimale Anpassung der vorliegenden Daten an die sachlogisch erwarteten Zusammenhänge der Einflussfaktoren auf eine Schadensentstehung auf HZL kann aus zwei Gründen verursacht sein:

1. Die Informationen der unabhängigen Variablen (= Einflussfaktoren) bestimmen die  $y$ -Ausprägungen der abhängigen Variable (= Leitungszustände) nicht und somit ist das Modell unpassend.
2. Aufgrund der besonderen Ausprägung der unabhängigen Variablen (= Einflussfaktoren) weisen einige der HZL die vom Modell beschriebenen Zusammenhänge nicht auf und verzerren damit signifikant das Ergebnis.

Eine mögliche Neuformulierung des Modells aufgrund des ersten Falles kann nur nach sachlogischen Überlegungen gemacht werden. Wenn zwischen den empirischen Zustandsbeobachtungen (=  $y$ -Werte) und den über das Modell geschätzten bzw. berechneten Wahrscheinlichkeiten  $p$  große Abweichungen auftreten, können diese Ausreißer mit den individuellen Residuen berechnet werden.

### Formel 9: Residuenberechnung

$$\text{Resid}_k = y_k - p_k(y)$$

Die Residuenwerte können somit Werte zwischen (-1) und (+1) annehmen, da die abhängige Variable  $y$  im binären Fall die Zustandsbeobachtungswerte 0 und 1 aufweist und die geschätzten Wahrscheinlichkeiten  $p_k(y)$  im Intervall  $[0, 1]$  liegen. Diskussionen in der Literatur weisen bei betragsmäßigen Residuenwerten von deutlich größer als 0,5 auf Ausreißerfälle und somit Klassifikationsfehler hin. Mittels der standardisierten Residuen (= Pearson-Residuen) wird eine Gewichtung der Residuen vorgenommen und die Ausreißer damit besser erkennbar gemacht.

### Formel 10: standardisierte Residuen

$$ZRESID_k = \frac{y_k - p(y_k = 1)}{\sqrt{p(y_k = 1) * (1 - p(y_k = 1))}}$$

Um die Ursachen für die extremen Positionen der Ausreißer-Fälle zu untersuchen können prinzipiell zwei Vermutungen hinterfragt werden:

1. Die betroffenen Leitungen mit hohen Residuenwerten sind tatsächlich atypisch und sollten aus der Analyse ausgeschlossen werden, wenn diese Fälle nur selten auftreten.
2. Hohe Residuenwerte deuten auf eine schlechte Anpassung und Güte des Modells hin. Wichtige Einflussgrößen bei der Modellformulierung könnten nicht berücksichtigt worden sein und damit sollte eine Erweiterung oder Modifikation des Modells durchgeführt werden.

## 6) Prüfung der Merkmalsvariablen

### 1) Likelihood-Quotienten-Test

Mit Hilfe des Likelihood-Quotienten-Tests werden unterschiedliche reduzierte Modelle gebildet, bei denen jeweils ein Regressionskoeffizient auf den Wert null gesetzt wird und die Differenz der  $-2\text{LogLikelihoods}$  zwischen dem vollständigen Modell und einem reduzierten Modell bestimmt wird (Backhaus et al., 2010).

### 2) Wald-Statistik

Es wird die Nullhypothese getestet, dass ein bestimmtes  $\beta_j$  null ist und daher die betrachtete unabhängige Variable keinen Einfluss auf die Trennung der Gruppen hat.

#### Formel 11: Wald-Statistik

$$WALD_j = \left( \frac{\beta_j}{S.E.j} \right)^2$$

$\beta_j$  ist der Regressionskoeffizient der j-ten Einflussvariable und S.E.j ist die Standardabweichung der Maximum-Likelihood-Schätzung der Regressionskoeffizienten (Backhaus et al., 2010).

## 7) Schadensartenprognose mittels BLRA

Nach einer sachlogisch begründeten Modellformulierung, Schätzung der logistischen Regressionsfunktion, Interpretation der Regressionskoeffizienten und Prüfung des Gesamtmodells und der Merkmalsvariablen kann durch Veränderung der dynamischen Einflussfaktoren in den Eingangsdaten der Berechnung, wie z. B. Alter, Verkehrsbelastung, angrenzende Infrastrukturen, usw. eine Prognose der Zustände von HZL in Abhängigkeit bestimmter Szenarien durchgeführt werden.

### 6.1.1.2 Beschreibung der Schadensartenwahrscheinlichkeitsberechnung mittels Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse wurde von Tran et al. (2006) zur Beurteilung der Zustandsverschlechterung von Regenwasserleitungen eines australischen Leitungssystems eingesetzt. Die Diskriminanzanalyse berechnet den Zustand bzw. die Gruppenzugehörigkeit von HZL in Abhängigkeit der Einflussfaktoren und der

beobachteten Zustände. Im Folgenden wird der mathematische Hintergrund der Diskriminanzanalyse näher beschrieben.

Die Diskriminanzanalyse (= Unterscheidungsanalyse) ist ein multivariates Verfahren zur Analyse von Gruppenunterschieden und wird in dieser Arbeit zur Bestimmung und zur Prognose der Gruppenzugehörigkeit von HZL in die Gruppe 0 (= „kein Schaden“) und Gruppe 1 (= „Schaden mit bestimmter Schadensart“) angewendet. Es ist damit eine direkte Prognose bzw. Bestimmung des Leitungszustandes möglich. Die Gruppenzugehörigkeit liegt bereits vor und somit wird eine Bildung von Gruppen (Taxonomie) mittels Clusteranalyse nicht mehr durchgeführt. Ziel dieses Modellansatzes ist es den Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable (= „Schaden mit bestimmter Schadensart“) durch eine Kombination von mehreren unabhängigen Einflussvariablen zu erklären. Unter Anwendung der Diskriminanzanalyse lassen sich alle relevanten (diskriminatorisch bedeutsamen) Merkmale (unabhängige Einflussvariablen) ermitteln, die zum Zustandekommen einer spezifischen Schadensart beitragen. Die im Modell berechnete Gruppenzugehörigkeit wird anhand der Werte der abhängigen Variablen mit Nominal- oder Ordinalskalenniveau angegeben.

Die Diskriminanzanalyse ermöglicht es, die Unterschiedlichkeit von zwei oder mehreren Gruppen hinsichtlich einer Mehrzahl von Variablen (= Einflussfaktoren) zu beschreiben. Dabei wird untersucht, ob sich die jeweiligen Gruppen signifikant voneinander hinsichtlich der berücksichtigten Variablen unterscheiden und welche Variablen zur Unterscheidung zwischen den Gruppen besonders geeignet bzw. ungeeignet sind. Zur Bestimmung der Diskriminanzfunktion ist es notwendig eine Auswahl von Merkmalsvariablen vorzunehmen. Es werden die Variablen, aufgrund von theoretischen oder sachlogischen Überlegungen, ausgewählt, die vermutlich am stärksten zwischen den Gruppen differieren und zur Erklärung von Gruppenunterschieden beitragen können (Backhaus et al., 2010).

Die Anwendung der Diskriminanzanalyse erfordert nach Backhaus et al. (2010) nachstehende Bedingungen:

1. Gruppierungsvariablen müssen nominal oder ordinal skaliert sein,
2. die unabhängige Variable darf ausschließlich metrisch skaliert sein,
3. kein Element der Stichprobe darf gleichzeitig mehreren Gruppen zugeordnet sein,
4. der Stichprobenumfang sollte mindestens doppelt so groß sein wie die Anzahl der Merkmalsvariablen,
5. die Anzahl der Merkmalsvariablen sollte größer sein als die Anzahl der Gruppen.

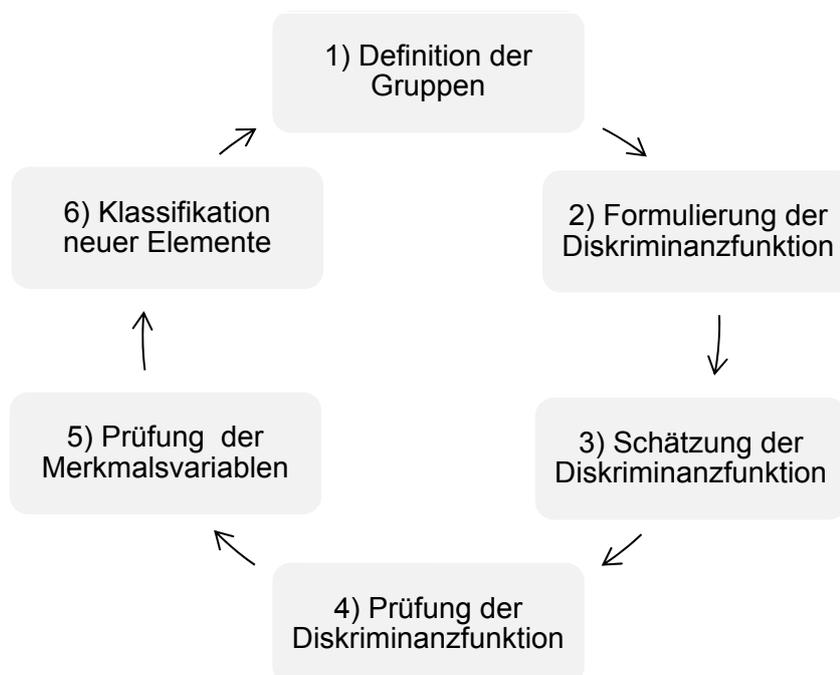
Bei der Anwendung der Diskriminanzanalyse sind des Weiteren folgende Voraussetzungen gefordert (Ana et al., 2010):

1. Normalverteilung der unabhängigen Einflussvariablen,
2. Vermeidung von Multikollinearität zwischen den unabhängigen Variablen.

Diese Voraussetzung zur richtigen Durchführung der Diskriminanzanalyse repräsentieren, speziell bei Trinkwassernetzen mit wenig vorliegenden metrisch skalierten unabhängigen Variablen, einen Schwachpunkt bez. der Anwendung dieser strukturen-prüfenden multivariaten Berechnungsmethode.

Zusammenfassend lässt sich die Diskriminanzanalyse damit formal als ein Verfahren charakterisieren, mit dem die Abhängigkeit einer nominal skalierten Variable (Gruppierungsvariable, abhängige Variable, zu erklärende Variable) von metrisch skalierten Variablen (Merkmalsvariablen der berücksichtigten Einflussfaktoren, unabhängige Variablen, erklärende Variablen) untersucht wird. Die Diskriminanzanalyse und die lineare Regressionsanalyse verfolgen somit dasselbe Ziel - die Erklärung von Zusammenhängen zwischen der abhängigen und den unabhängigen Variablen. Der Unterschied dieser beiden Verfahren liegt im Skalenniveau der abhängigen Variable. Die lineare Regressionsanalyse bedingt Intervallskalenniveau und die Diskriminanzanalyse Nominal- oder Ordinalskalenniveau für die abhängige Variable.

Das Modell der Diskriminanzanalyse lässt sich nach Backhaus et al. (2010) in sechs Teilschritte (siehe Abbildung 20) strukturieren welche nachfolgend näher erläutert werden:



**Abbildung 20: 6 Teilschritte der Durchführung der Diskriminanzanalyse (Backhaus et al., 2010)**

## 1) Definition der Gruppen

Mit der Definition der HZL mittels der Gruppierungsvariable  $g$  ( $g = 0, 1, \dots, G$ ), mit  $g = 0$  für nicht schadhafte HZL und  $g = 1$  für schadhafte HZL, beginnt die Modellberechnung der Diskriminanzanalyse, wobei  $G$  die Gesamtzahl der Gruppen ist. Somit ist mittels der Diskriminanzanalyse eine Betrachtung von mehr als 2 Gruppierungen der abhängigen Variable möglich. Es erhöht sich dementsprechend die Anzahl der Diskriminanzfunktionen (Backhaus et al., 2010).

## 2) Formulierung der Diskriminanzfunktion

Die Formulierung der Diskriminanzfunktion (Trennfunktion) stellt den zweiten Modellschritt im Rahmen der Diskriminanzanalyse zur optimalen Trennung der Gruppen und Überprüfung der diskriminatorischen Bedeutung der Merkmalsvariablen dar. Die Diskriminanzfunktion strebt somit wie die lineare Regressionsanalyse unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate das Berechnungsziel an, dass die Summe der quadrierten Abweichungen der errechneten Funktionswerte von den beobachteten Werten der abhängigen Variable minimal wird. Die Diskriminanzfunktion hat allgemein die Form (Backhaus et al., 2010):

### Formel 12: Diskriminanzfunktion

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_j * X_j$$

mit

$Y$  = Diskriminanzvariable  $g$  ( $g = 0, \dots, G$ )

$X_j$  = Merkmalsvariable  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ )

$b_j$  = Diskriminanzkoeffizient für Merkmalsvariable  $j$

$b_0$  = konstantes Glied

Die Parameter  $b_0$  und  $b_j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) werden auf Basis der Daten der Merkmalsvariablen geschätzt. Für jedes Element  $i$  ( $i = 1, \dots, I_g$ ) einer Gruppe  $g$  ( $g = 0, 1, \dots, G$ ) mit den Merkmalswerten  $X_{jgi}$  ( $j = 1, \dots, J$ ) berechnet die Diskriminanzfunktion einen Diskriminanzwert  $Y_{gi}$ . Die Diskriminanzfunktion wird auch als kanonische Diskriminanzfunktion und die Diskriminanzvariable als kanonische Variable bezeichnet. Der Ausdruck „kanonisch“ kennzeichnet die berechnete Linearkombination von Variablen. Jede Gruppe  $g$  lässt sich durch ihren mittleren Diskriminanzwert  $\bar{Y}_g$ , der als Centroid (Schwerpunkt) bezeichnet wird, beschreiben (Backhaus et al., 2010):

### Formel 13: Diskriminanzwert-Berechnung (Centroid)

$$\bar{Y}_g = \frac{1}{I_g} \sum_{i=1}^{I_g} Y_{gi}$$

Die Unterschiedlichkeit zweier Gruppen ( $g = 0, 1$ ) lässt sich durch die Differenz

**Formel 14: Diskriminanzwert-Gruppendifferenz**

$$|\bar{Y}_0 - \bar{Y}_1|$$

messen.

*Geometrische Ableitung*

Geometrisch gesehen bildet die Diskriminanzfunktion eine Ebene (für  $j = 2$ ) bzw. eine Hyperebene (für  $j > 2$ ) über dem Raum, die durch die  $j$  Merkmalsvariablen gebildet wird. Die Diskriminanzfunktion kann weiters als eine Gerade im Raum als Diskriminanzachse dargestellt werden. Für eine Diskriminanzfunktion mit ( $j = 2$ )

**Formel 15: Diskriminanzfunktion für 2 Merkmalsvariable**

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2$$

wird die Diskriminanzachse als Gerade mit der Form

**Formel 16: Steigung der Diskriminanzachse**

$$X_2 = \frac{b_2}{b_1} \times X_1$$

dargestellt. Die Diskriminanzachse verläuft durch den Nullpunkt des Koordinatensystems und die Steigung wird durch das Verhältnis der Diskriminanzkoeffizienten festgelegt. Die Konstante  $b_0$  wird so skaliert, dass der kritische Diskriminanzwert exakt null ist und bestimmt somit die Entfernung des Nullpunktes der Skala vom Nullpunkt des Koordinatensystems. Die Projektion eines beliebigen Punktes ( $X_1, X_2$ ) ergibt den zugehörigen Diskriminanzwert  $Y$  auf der Diskriminanzachse. Die Werte der Diskriminanzfunktion werden auf einer Diskriminanzachse abgebildet. In Abbildung 21 ist die Konstruktion einer Diskriminanzachse exemplarisch für den Fall mit zwei Einflussfaktoren (Alter und RD) dargestellt. Dabei sind die Zuordnung der beobachteten Leitungszustände als Gruppenzuweisung mit Hilfe der Diskriminanzachse und die falsch gruppierten Leitungszustände ersichtlich.



### 3) Schätzung der Diskriminanzfunktion

Die Unterscheidung zwischen zwei Gruppen ist zwar einerseits umso besser möglich, je größer die Distanz ihrer Centroide ist, andererseits aber wird sie erschwert, wenn die Gruppen stark streuen. Ein besseres Maß der Unterschiedlichkeit (Diskriminanz) bzw. Diskriminanzkriterium erhält man durch Berücksichtigung der Streuung der Gruppen. Die Streuung zwischen den Gruppen wird auch als „erklärte Streuung“  $SS_b$  (Sum of Squares between) bezeichnet und errechnet sich durch die quadrierten Abweichungen der Gruppencentroide vom Gesamtmittel (kritischer Diskriminanzwert). Um unterschiedliche Gruppengrößen zu berücksichtigen, werden die Abweichungen jeweils mit der Gruppengröße  $I_g$  multipliziert. Die Streuung in den Gruppen wird als „nicht erklärte Streuung“  $SS_w$  (Sum of Squares within) bezeichnet und wird durch die quadrierten Abweichungen der Gruppenelemente vom jeweiligen Gruppencentroid gemessen. Das Diskriminanzkriterium lautet nach Backhaus et al. (2010):

#### Formel 18: Diskriminanzkriterium

$$\Gamma = \frac{\text{Streuung zwischen den Gruppen}}{\text{Streuung innerhalb der Gruppen}} = \frac{SS_b}{SS_w}$$

und lässt sich wie folgt präzisieren

#### Formel 19: Diskriminanzkriterium

$$\Gamma = \frac{\sum_{g=1}^G I_g * (\bar{Y}_g - \bar{Y})^2}{\sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^{I_g} (Y_{gi} - \bar{Y}_g)^2} = \frac{SS_b}{SS_w}$$

### 4) Prüfung der Diskriminanzfunktion

Die Güte bzw. Trennkraft der Diskriminanzfunktion und somit die Unterschiedlichkeit der Gruppen wird einerseits mit dem Diskriminanzkriterium und den davon abgeleiteten Gütemaßen und andererseits mit der Klassifizierung der Untersuchungsobjekte mit deren tatsächlichen Gruppenzugehörigkeiten überprüft. Beide Möglichkeiten zur Überprüfung der Diskriminanzfunktion sind inhaltlich stark miteinander verknüpft und führen zu ähnlichen Ergebnissen (Backhaus et al., 2010).

#### Prüfung der Klassifikation

Die richtig errechneten bzw. klassifizierten HZL der Gruppe mit keinem Schaden müssen Werte kleiner null bzw. negative Diskriminanzwerte und HZL der Gruppe mit spezifischen Schadensarten müssen Werte größer null bzw. positive Diskriminanzwerte aufweisen. Anhand eines Vergleiches der durch die Diskriminanzanalyse vorgenommenen Gruppenzuordnungen mit den tatsächlichen Gruppenzugehörigkeiten kann die Güte der Diskriminanzanalyse untersucht werden. Hierzu wird eine Tabelle, wie bei der Berechnung mittels der BLRA, mit der Anzahl der richtig und falsch zugeordneten Fälle ausgegeben.

In einer Klassifikationsmatrix oder Confusion-Matrix werden die Häufigkeiten der richtig bzw. falsch klassifizierten Leitungen der Gruppen schadhafte und nicht

schadhafte Leitungen dargestellt. In der Hauptdiagonalen der Klassifikationsmatrix stehen die Fallzahlen der richtig klassifizierten Elemente jeder Gruppe und in den restlichen Feldern die Fallzahlen der falsch klassifizierten Leitungen. Die Klassifikationsfähigkeit der errechneten Diskriminanzfunktion wird mit der Trefferquote bei einer rein zufälligen Zuordnung der Leitungen, wie z. B. durch Werfen einer Münze oder durch Würfeln, verglichen. Bei einem Zwei-Gruppenfall mit gleicher Gruppengröße, ist bei zufälliger Zuordnung eine Trefferquote von 50 % und bei ungleicher Größe der Gruppen eine noch höhere Trefferquote zu erwarten. Der Einsatz der Diskriminanzanalyse kann nur dann von Nutzen sein, wenn als Ziel eine höhere Trefferquote, als nach dem Zufallsprinzip zu erwarten ist, angestrebt wird. Wenn die Klassifikation der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wird, wie für die Schätzung der Diskriminanzfunktion verwendet wurde, ergibt sich eine überhöhte Trefferquote, da die Diskriminanzfunktion die Trefferquote der verwendeten Stichprobe maximiert. Bei Anwendung der ermittelten Diskriminanzfunktion auf eine andere Stichprobe ergibt sich eine niedrigere Trefferquote. Dieser Umstand wird als Stichprobeneffekt bezeichnet (Backhaus et al., 2010).

Wie im Fall der BLRA werden auch bei der Diskriminanzanalyse mit Hilfe der vier Klassifizierungsdarstellungen der Ergebnisse die Trefferquote (= Sensitivität) und die Quote falscher Alarme (= 1 - Spezifität) definiert. Für jede zufällig gewählte Stichprobe und der folglich abgeleiteten Diskriminanzfunktion werden die zueinander gehörigen Werte für Sensitivität und (1 – Spezifität) grafisch gegeneinander aufgetragen.

## Prüfung des Diskriminanzkriteriums

### *Eigenwert*

Der Maximalwert des Diskriminanzkriteriums wird als Eigenwert  $\gamma$  bezeichnet

### **Formel 20: Eigenwert (Diskriminanzanalyse)**

$$\gamma = \frac{SS_b}{SS_w} = \frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{nicht erklärte Streuung}}$$

und bildet ein Maß für die Güte (Trennkraft) der Diskriminanzfunktion. Der Nachteil dabei ist, dass der Eigenwert nicht auf Werte zwischen null und Eins normiert ist und auch größere Werte als Eins annehmen kann. Ein hoher Eigenwert bedeutet somit, dass das Modell einen guten Erklärungswert besitzt, die Werte sich untereinander deutlich unterscheiden lassen und die Werte innerhalb der Gruppen nicht weit streuen. Wenn die Streuung zwischen den Gruppen im Verhältnis zur Streuung innerhalb der Gruppen groß ist ergibt sich die von der Diskriminanzanalyse angestrebte Situation eines großen Eigenwertes. Bei Vorhandensein eines großen Eigenwertes unterscheiden sich die Werte der einzelnen Gruppen deutlich voneinander während die Werte innerhalb der Gruppe sehr ähnlich sind (Backhaus et al., 2010).

### *Kanonischer Korrelationskoeffizient*

Der kanonische Korrelationskoeffizient  $c$  stellt den Zusammenhang zwischen den Funktionswerten der Diskriminanzfunktion und den Gruppen der abhängigen Variablen dar und lässt sich mit Einbeziehung des Eigenwertes ermitteln. Für zwei betrachtete Gruppen  $g$  ( $G = 2$ ) ist der Wert  $c$  mit dem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten identisch.

#### **Formel 21: kanonischer Korrelationskoeffizient (Diskriminanzanalyse)**

$$c = \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}} = \sqrt{\frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}}}$$

Der kanonische Korrelationskoeffizient  $c$  stellt somit das Verhältnis der Streuung zwischen den Gruppen an der Gesamtstreuung dar. Die Werte von  $c$  liegen zwischen null und Eins. Je größer der Wert ist, umso größer ist die Streuung zwischen den Gruppen im Verhältnis zur Streuung innerhalb der Gruppen. Ein großer kanonischer Korrelationskoeffizient  $c$  weist somit auf eine gute Trennung zwischen den Gruppen und auf einen hohen Erklärungsgehalt des Modells hin (Backhaus et al., 2010).

### *Wilks' Lambda*

Ein weiteres Kriterium zur Prüfung der Diskriminanz bildet Wilks' Lambda. Dieses Kriterium ist ein inverses Gütemaß, welches bei kleineren Werten auf eine höhere und bei größeren auf eine niedrigere Trennkraft der Diskriminanzfunktion hinweist.

#### **Formel 22: Wilks' Lambda (Diskriminanzanalyse)**

$$\Lambda = \frac{1}{1+\gamma} = \frac{\text{nicht erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}}$$

Die Bedeutung von Wilks' Lambda liegt darin, dass es sich in eine probabilistische Variable transformieren lässt und damit Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Unterschiedlichkeit von Gruppen erlaubt. Dadurch ist eine statistische Signifikanzprüfung der Diskriminanzfunktion möglich. Die Transformation liefert eine Variable, die angenähert dem  $\chi^2$  (Chi-Quadrat) verteilt ist. Des Weiteren lässt sich der Erklärungswert der unabhängigen Variablen durch die Betrachtung der Mittelwerte, der einzelnen unabhängigen Variablen in den verschiedenen Gruppen der abhängigen Variablen, erkennen. Um beurteilen zu können, ob Differenzen zwischen den Mittelwerten auf einen Zufall bei der Berücksichtigung der Stichprobe oder vielleicht doch auf einem systematischen Unterschied der Werte in der Grundgesamtheit zurückzuführen sind, werden für Gruppenmittelwerte der einzelnen Variablen Signifikanztests durchgeführt (Backhaus et al., 2010).

### **5) Prüfung der Merkmalsvariablen**

Die Erklärung der Unterschiedlichkeit der Gruppen und die Eliminierung von unwichtigen Variablen aus der Modellberechnung, ist die Veranlassung um die Wichtigkeit der Merkmalsvariablen in der Diskriminanzfunktion zu beurteilen. Die Diskriminanzkoeffizienten bilden die Basis für die multivariate Beurteilung der

diskriminatorischen Bedeutung der Merkmalsvariablen und damit ihrer Bedeutung im Rahmen der Diskriminanzfunktion. D. h. sie zeigen den Einfluss einer Merkmalsvariable auf die Diskriminanzfunktion. Generell gilt, dass je höher der Wert des standardisierten Koeffizienten ist, umso größer ist die diskriminatorische Bedeutung. Variablen mit gleichen Vorzeichen bewirken eine Gruppenzuordnung in die gleiche Richtung. Diskriminanzkoeffizienten im Größenbereich nahe null tragen wenig zur Gruppenunterscheidung bei. Um Skalierungseffekte auszuschalten müssen die Diskriminanzkoeffizienten standardisiert werden. Dabei werden mittels einer Transformation die Werte jeder Variable so transformiert, dass ein Mittelwert von null und eine Standardabweichung von Eins erreicht werden. Der Vorteil in der Betrachtung von standardisierten Werten liegt darin, dass Einflüsse unterschiedlicher Dimensionen in verschiedenen Variablen ausgeschaltet werden. Für die Beurteilung der absoluten diskriminatorischen Bedeutung spielt das Vorzeichen der Koeffizienten keine Rolle. Das Vorzeichen der standardisierten bzw. unstandardisierten Diskriminanzkoeffizienten gibt jedoch Rückschluss, in welche Richtung der Gruppenunterscheidung der Einfluss der einzelnen Merkmalsvariablen ausschlägt. Zur Berechnung der Diskriminanzfunktion müssen immer die unstandardisierten Diskriminanzkoeffizienten herangezogen werden (Backhaus et al., 2010).

#### *Korrelationen zwischen unabhängigen Variablen und Diskriminanzfunktion*

Aus den Beträgen der standardisierten Koeffizienten kann man jedoch nicht ohne weitere Überprüfung, auf die Stärke des Zusammenhangs zwischen der betreffenden unabhängigen und der abhängigen Variable schließen. Die Koeffizienten können durch Wechselwirkungen zwischen den unabhängigen Variablen verzerrt werden. Sind die unabhängigen Variablen untereinander korreliert, wird der Einfluss einer unabhängigen Variable auf die abhängige Variable im Modell möglicherweise einer anderen unabhängigen Variablen zugeschrieben. Mittels Korrelationen lässt sich der Erklärungswert, den die einzelnen Variablen für die Diskriminanzfunktion besitzen, darstellen. Dafür werden Korrelationen zwischen der Diskriminanzfunktion und den einzelnen unabhängigen Variablen nicht für alle gesamt und gleichzeitig, sondern gruppenweise berechnet. Der ausgewiesene Koeffizient für die gesamte Variable ergibt sich abschließend als Mittelwert der einzelnen Koeffizienten. Für jede Gruppierungsvariable werden zwei Koeffizienten für die Korrelation zwischen den Variablen- und den Funktionswerten ermittelt, einer für die Fälle der Gruppe 0 (HZL nicht schadhaft) und einer für die Gruppe 1 (HZL schadhaft mit spezifischer Schadensart). Der resultierende Koeffizient für die Variable ist der Mittelwert der einzelnen Koeffizienten (gepoolte Koeffizienten). Die Werte dieser gepoolten Korrelationskoeffizienten können sich sehr stark von den Koeffizienten bei einfacher Berechnungsweise unterscheiden (Brosius, 1998).

#### **6) Klassifikation neuer Elemente**

Das Wahrscheinlichkeitskonzept, das auf dem Distanzkonzept aufbaut, ist das flexibelste Konzept zur Klassifizierung von Elementen (im vorliegenden Fall der

HZL). Die unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Funktionswerte bei den verschiedenen Gruppen werden bei der Zuordnung der Fälle zu den Gruppen ausgenutzt. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Fall, für den sich der Funktionswert D ergibt, der Gruppe  $g_i$  angehört kann als

**Formel 23: A-posteriori-Wahrscheinlichkeit (Diskriminanzanalyse)**

$$P(g_i | D)$$

formuliert werden und wird als A-posteriori-Wahrscheinlichkeit bezeichnet. Sie lässt sich aus den Wahrscheinlichkeiten  $P(g_i)$  (A-priori-Wahrscheinlichkeit) und  $P(D | g_i)$  (bedingte Wahrscheinlichkeit) berechnen. Die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten eines Falles addieren sich stets zu Eins, da jeder Fall mit Sicherheit genau einer Gruppe entstammt. Bei der konkreten Berechnung der Wahrscheinlichkeiten eines Falles wird der Satz von Bayes verwendet, der es erlaubt, die Wahrscheinlichkeit für die Gruppen eines Funktionswertes anhand zweier bekannter Wahrscheinlichkeiten zu ermitteln:

**Formel 24: A-priori-Wahrscheinlichkeit (Diskriminanzanalyse)**

$$P(g_i | D) = \frac{P(D | g_i) * P(g_i)}{\sum_{i=1}^g P(D | g_i) * P(g_i)}$$

Die A-priori-Wahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit einer Gruppenzugehörigkeit, von der man ausgehen muss, wenn keinerlei weitere Informationen zur Verfügung stehen. Bei der Gruppenbetrachtung von HLZ mit der Zustandsinformation „schadhaft ja/nein“ ergibt sich bei gleicher Gruppenzugehörigkeitszahl eine Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit eines Falles zur Gruppe schadhaft ja/nein mit 50 %. Die bedingte Wahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein bestimmter Funktionswert D ergibt, wenn der jeweilige Fall der Gruppe  $g_i$  entstammt (Brosius, 1998).

**6.1.2 Beschreibung der Schadensartenwahrscheinlichkeitsberechnung mittels physikalischer Modelle**

**Allgemeines**

Die traditionelle Bemessung von Rohrleitungen lt. Normen und Richtlinien (ATV DVWK A 127, 2000; ÖNORM B 5012, 2005) vergleicht die Spannungen aufgrund aller einwirkenden Faktoren und stellt diese den vom Rohrquerschnitt tragbaren Spannungen mit einer gewissen Sicherheitsbetrachtung gegenüber.

Physikalische Modelle beschreiben nach Liu et al. (2012) durch vereinfachte Formulierungen der in der Natur auftretenden Mechanismen den komplexen Prozess der Zustandsverschlechterung. Durch Verwendung von allgemein gültigen Stoffgesetzen können physikalische Modelle bei Vorhandensein der flächendeckend benötigten Eingangsdaten für beliebige Randbedingungen angewendet werden. Diese Modelle beziehen verschiedenste Informationen, wie rohr-intrinsische Daten (Materialkennwerte, Rohrgeometrie), interne Lasten (Rohrbetriebsinnendruck),

externe Lasten (Erdüberdeckung, Verkehrslast, Frost und Beeinflussung durch angrenzende Tiefbauarbeiten), vorhandene Umgebungsbedingungen (Bodensteifigkeiten, Grundwasserfluktuation) und Daten betreffend innerer und äußerer Zustandsverschlechterung (chemische, biochemische und elektrochemische Einflüsse) in die Modellberechnung mit ein. Liu et al. (2012) beschreibt die Verwendung von physikalischen Modellen zur Berechnung der strukturellen Zustandsverschlechterung als die im Prinzip wissenschaftlich robustere Möglichkeit. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit der notwendigen Eingangsdaten in geeigneter Qualität.

Das in der Vergangenheit fehlende Bewusstsein über die Wichtigkeit der Dokumentation von Schadensarten im Reparaturfall und eine mangelnde Zustandsbeurteilung für HZL sind Ursachen für die nun unzureichende allgemein gegenwärtige Datenverfügbarkeit in Österreich. Dies bildet u.a. einen eingrenzenden Faktor zum optimalen Einsatz von physikalischen Modellen.

Viele wissenschaftliche Untersuchungen zur Thematik der Berechnung der Schadensartenwahrscheinlichkeit mit Hilfe physikalischer Modelle berücksichtigen entweder nur einzelne oder auch gleichzeitig mehrere einwirkende Einflussfaktoren, wie z. B. Frostlasten oder Verkehrsbelastung (Rajani und Kleiner, 2001). Weiters werden physikalische Modelle in deterministische und probabilistische Ansätze gegliedert. Jedoch existiert kein gesamtheitlicher Ansatz zur Abschätzung der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung aller möglichen quantifizierbaren Beeinflussungen und Rahmenbedingungen, die in der Natur auftreten. Lille et al. (2004) geben die Materialverteilung, basierend auf der Untersuchung von 337 WVU in den Vereinigten Staaten, mit 66 % metallischen Leitungen (davon 40 % GG, 22 % GGG und 4 % ST), 16 % AZ-Leitungen, 13 % PVC-Leitungen und 3 % Betonleitungen an. Rajani und McDonald (1995) berichten von einer ähnlichen Verteilung der Materialgruppen in einer Untersuchung von 21 kanadischen WVU, die 11 % der gesamten Bevölkerung Kanadas mit Trinkwasser versorgen. Aufgrund dieser allgemeinen und auch für Österreich zutreffenden Verteilungscharakteristik von Rohrmaterialarten lag daher der Schwerpunkt der Entwicklung von physikalischen Modellen auf Metall- und Betonleitungen. Nach Rajani und Kleiner (2001) sind die komplexen Schadensmechanismen betreffend der strukturellen Zustandsverschlechterung von HZL nicht völlig verstanden und können lt. Tran (2007) mit sehr vereinfachten Modellen nicht der Realität entsprechend beschrieben werden. Aufgrund der vielen in der Literatur vorhandenen Modelle wird in dieser Arbeit nur auf die zur Bewertung von metallischen Leitungen relevanten Modelle eingegangen.

#### 6.1.2.1 Frostbelastungs-Modell

Zur Modellierung einzelner Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit von erdverlegten Rohrleitungen bestehen in der Literatur viele Modelle. Erhöhte Erdlasten aufgrund zusätzlicher Frostbelastung in Winterperioden verursachen vergleichsweise höhere

Schadenshäufigkeiten in Winterperioden (Fuchs-Hanusch et al., 2011c). Rajani und Zhan (1996) und Zhan und Rajani (1997) entwickelten Modelle um Frostbelastungen auf erdverlegte Leitungen in Gräben und unter Straßen abschätzen zu können. Im beschriebenen Feldversuch wurden Belastungen aufgrund einwirkender Frostlasten bis zu einer Verdopplung der statischen Erdlast gemessen. Weiters kann der Einfluss von jahreszeitlich bedingtem Schwinden und Quellen der Böden und gleichzeitigen Frostbelastungen bestimmte Schadensarten auslösen.

#### 6.1.2.2 Rohr-Boden-Interaktions-Modell

Spangler (1941) entwickelte ein Modell zum besseren Verständnis der Interaktion von flexiblen Rohrleitungen mit dem umgebenden Boden. Eine Verbesserung dieses Ansatzes wurde von Watkins und Spangler (1958) unter Berücksichtigung des Bettungsreaktionsverhaltens erreicht.

Rajani et al. (1996) entwickelten ein analytisches Rohr-Boden-Interaktions-Modell zur Abschätzung der Rohrtragfähigkeit in Rohr-Längsrichtung aufgrund innerer und äußerer Belastungen und dem Einfluss von Temperaturveränderungen.

Rajani und Tesfamariam (2004) und Sorge (2007) untersuchten die Rohrtragfähigkeit in Abhängigkeit gestörter Rohr-Bettungsverhältnisse.

#### 6.1.2.3 Korrosionsmodelle

*Korrosionsmodell nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987)*

Das Korrosionsmodell nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987) verwendet einen linearen Rechenansatz zur Berechnung der Korrosionseindringtiefe für metallische Rohrleitungs-Werkstoffe. Hierbei werden die Einflussfaktoren Rohrmaterialart, Rohrwandstärke, Bodenaggressivität und das Rohralter bzw. die Korrosionsdauer berücksichtigt:

#### **Formel 25: Korrosionsmodell nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987)**

$$\Delta d = t * \omega_{\text{int}}$$

$\Delta d$  ... Korrosions-Eindringtiefe (mm)

$t$  ... Betrachtungszeitraum (Jahre)

$\omega_{\text{int}}$  ... integrale (gesamte) Eindringrate (mm/Jahr)

### *Korrosionsmodell nach König (2005)*

Das Korrosionsmodell nach König (2005) berechnet den Rohrzustand von Betonleitungen aufgrund von Korrosionsangriffen von außen auf die Rohrwand in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren. Dieses lineare Modell berücksichtigt die Einflussfaktoren Rohrmaterialart, Rohralter, Bodenaggressivität, Bodenfeuchte und Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert) des Betons zur Berechnung der Tiefe des Korrosionslochs auf Betonleitungen:

#### **Formel 26: Korrosionsmodell nach König (2005)**

$$C_{\text{ext}} = a * b * (\text{year}_{\text{pred}} - \text{year}_{\text{inst}})$$

$C_{\text{ext}}$  ... Korrosionslochtiefe (von außen nach innen gerechnet) (mm)

a ... externer Korrosionskoeffizient (mm/Jahr)

b ... Rohrqualitätskoeffizient (W/Z-Wert des Betons)

$\text{year}_{\text{pred}}$  ... Schadensauftrittsjahr bzw. das Jahr, für welches der Schaden prognostiziert werden soll

$\text{year}_{\text{inst}}$  :... Leitungsverlegejahr

### *Korrosionsmodell nach Rajani et al. (2000)*

Das Korrosionsmodell nach Rajani et al. (2000) kombiniert eine lineare Funktion mit einer Exponentialfunktion zur Berechnung der Korrosionsabtragung und berücksichtigt die Rohrmaterialart, Rohrwandstärke, Bodenaggressivität und das Rohralter bzw. die Korrosionsdauer als Einflussfaktoren. Es wurde festgestellt, dass die Korrosionsgeschwindigkeit anfangs einem linearen Trend folgt und danach abnimmt, da das Rohrmaterial sich selbst zu schützen beginnt. Die aus den Korrosionsprodukten entstehende Passivierungsschicht hemmt dabei mehr und mehr den Korrosionsprozess. Die Korrosionslochtiefe lautet:

#### **Formel 27: Korrosionsmodell nach Rajani et al. (2000)**

$$\Delta d = a * T + b * (1 - e^{-c * T})$$

$\Delta d$  ... Korrosions-Eindringtiefe (mm)

T ... Korrosionsdauer (Jahre)

a ... finale Korrosionslochratekonstante (mm/Jahr)

b ... Konstante zur Skalierung der Lochtiefe (mm)

c ... Hemmungsfaktor der Korrosionsrate (- /Jahr)

### *Korrosionsmodell nach Rossum (1969)*

Das Korrosionsmodell nach Rossum (1969) berechnet mittels einer Potenzfunktion die Korrosionslochtiefe und berücksichtigt die Rohrmaterialart, die Rohrwandstärke, das Rohralter bzw. die Korrosionsdauer, den pH-Wert des Bodens, den Ohmschen Bodenwiderstand und die Bodenbelüftungszahl als Einflussfaktoren:

#### **Formel 28: Korrosionsmodell nach Rossum (1969)**

$$d = K_n \cdot Z^n$$

$$Z^n = \frac{(10-pH)T}{\rho_{Soil}}$$

d ... Korrosions-Eindringtiefe (mm)

$K_n$  ... Modell-Konstante

pH ... pH-Wert des Bodens (-)

T ... Betrachtungszeitraum (Jahre)

$\rho_{Soil}$  ... spezifische Bodenwiderstand (Ohm/m)

n ... Bodenbelüftungskonstante (-)

Für alle vier beschriebenen Korrosionsmodelle ist der Zeitpunkt der Korrosionsinitiierung nicht bekannt und wird daher vereinfacht mit dem Verlegejahr gleichgesetzt. Ein Nachteil in der rechnerischen Ermittlung der Korrosionsabtragungsgeschwindigkeit ist, neben den Vereinfachungen zur Aufstellung der Modellgleichungen und des angenommenen Startzeitpunktes der Korrosion, die Umwandlung von Einflussfaktoren in spezifische Zahlen (= Ersatzinformationen), mit welchen das Rechenmodell erst angewendet werden kann. Problematisch sind z. B. die Quantifizierbarkeit der tatsächlichen Bodenaggressivität und der Zusammenhang zwischen Bodenaggressivität und benötigtem Modelleingangswert. Aufgrund der Information Bodenaggressivität ist es sehr schwierig eindeutige Größenzuordnungen für die Modellkonstanten a, b oder c zu definieren. Unbekannte Einflüsse, wie Beschädigung der Korrosionsschutzschicht während der Prozesse Transport, Lagerung und Einbau der Rohrleitung, führen zu sogenannten Korrosions-Initiatoren bzw. zu beschädigten Stellen, die modelltechnisch nicht erfassbar und implementierbar sind. In Abbildung 23 ist die Anzahl der benötigten Einflussfaktoren in Abhängigkeit der physikalischen Modelle dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass Korrosionsmodelle vier bis sechs Einflussfaktoren berücksichtigen bzw. Eingangsdaten benötigen und die dargestellten physikalischen Modelle zwischen 28 und 35 Einflussfaktoren berücksichtigen bzw. Eingangsdaten benötigen. Die Ermittlung dieser Daten ist mit großem Arbeitsaufwand und wirtschaftlichem Einsatz verbunden. Die Anwendung physikalischer Modelle zur Ermittlung der Zustandsverschlechterung ist in vielen Fällen in der Praxis für WVU aufgrund mangelhaft vorliegender flächendeckender Daten und hohen finanziellen Aufwendungen zur Verbesserung der Datenstruktur und Informationslage nicht realistisch bzw. nicht vertretbar. In Tabelle 10 sind die in

Abhängigkeit der spezifischen Modelldefinition der physikalischen Modelle berechenbaren Schadensarten dargestellt. Die Schadensart „Verbindung undicht“ gilt als sehr komplexe Schadensart in der Entstehung aufgrund des Zusammenwirkens verschiedener Schadensmechanismen und wird von keines dieser beschriebenen Modelle in Tabelle 10 berücksichtigt.

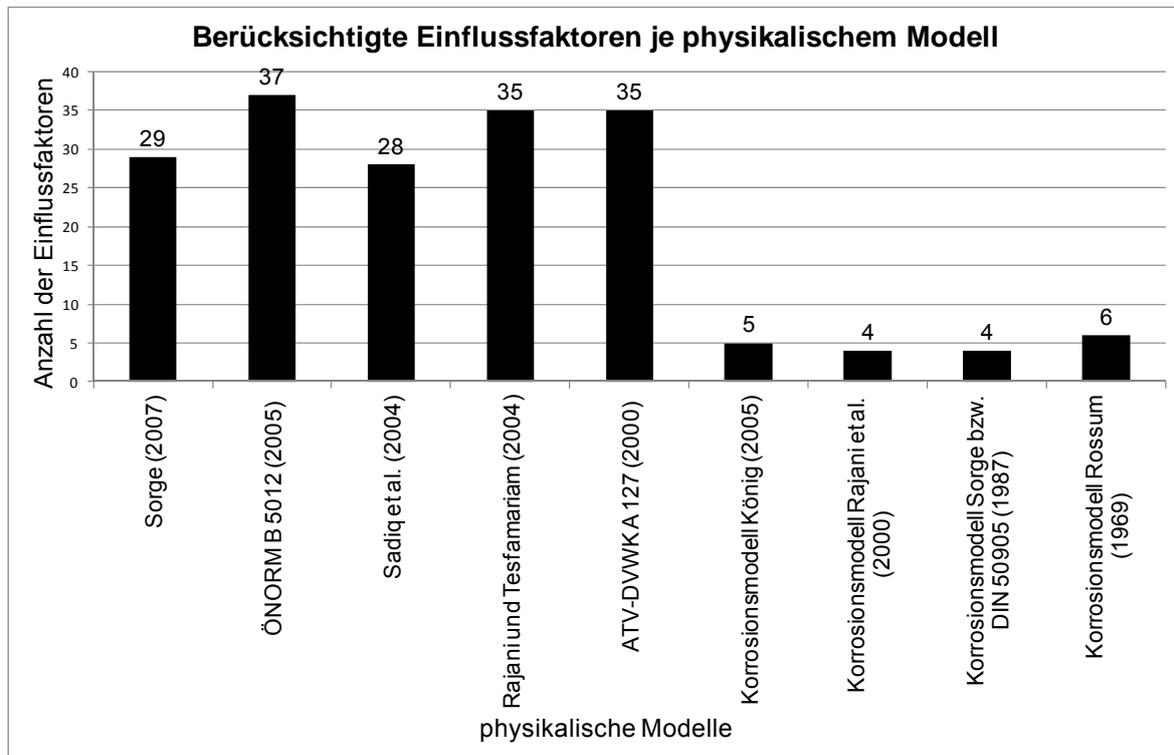


Abbildung 23: berücksichtigte Einflussfaktoren in Abhängigkeit der physikalischen Modelle

Tabelle 10: Schadensarten mit spezifischem physikalischen Modell berechenbar

physikalische Modelle	Schadensart			
	Verbindung undicht	Rundriss	Längsriss	Korrosionsloch
Sorge (2007)		X		X
ÖNORM B 5012 (2005)		X	X	
Sadiq et al. (2004)		X	X	X
Rajani und Tesfamariam (2004)		X	X	
ATV-DVWKA A 127 (2000)			X	
Korrosionsmodell König (2005)				X
Korrosionsmodell Rajani et al. (2000)				X
Korrosionsmodell Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987)				X
Korrosionsmodell Rossum (1969)				X
X ... Schadensart mit physikalischem Modell berechenbar				

#### 6.1.2.4 Physikalisch deterministische Modelle

Doleac (1979) und Doleac et al. (1980) verwendeten die Korrosionslochtiefe in Zusammenhang mit dem Rohralter um die verbleibende Rest-Rohrwandstärke zu prognostizieren. Randall-Smith et al. (1992) berechneten mit einem linearen Modellansatz unter Annahme einer konstanten Korrosionsabtragungsrate die verbleibende Nutzungsdauer von Trinkwasserleitungen. Rajani und Makar (2000) entwickelten ein Modell zur Abschätzung der Restlebensdauer von GG-Leitungen unter Betrachtung der Änderungen der Strukturfestigkeit einer Leitung bei Vorhandensein von Korrosionseinflüssen.

#### 6.1.2.5 Physikalisch probabilistische Modelle

Rajani und Kleiner (2001) beschreiben viele weitere vorhandene physikalisch probabilistische Modelle, welche den Einfluss von tragfähigkeitsreduzierenden Vorgängen, wie Korrosion berücksichtigen und die Resttragfähigkeit von Rohrquerschnitten abschätzen (Hong, 1997, 1998; Jones, 1997; Linkens et al., 1998; Pandey, 1998; Stephens, 1994).

##### *Sorge (2007)*

Sorge (2007) verwendet in seinem Modell, im Gegensatz zu wahrscheinlichkeitstheoretischen Prognosen zur Bestimmung der Restnutzungsdauer und Ausfallswahrscheinlichkeit, mit Hilfe der materialtechnischen Zustandsuntersuchung die statische Resttragfähigkeit zur Beurteilung des Rohrzustandes, welche nicht aus der Schadensstatistik direkt ableitbar ist. Das Erreichen der technischen Nutzungsdauer wird als Zeitpunkt definiert, ab wann die Tragfähigkeit unter Verwendung der Resttragfähigkeit durch bestimmte Einflüsse, wie z. B. Korrosionseinwirkung, unterschritten wird. Der Ausfallszeitpunkt einer Rohrleitung kann umso genauer ermittelt werden, je genauer die technische Restnutzungsdauer berechnet werden kann. Dieses Modell verbessert die technische Zustandsbewertung durch Erkennung, Ermittlung und Gewichtung der Einflussfaktoren zur Entstehung der Schadensart Querbruch- bzw. Rundriss von GG-Leitungen.

##### *Sadiq et al. (2004)*

Sadiq et al. (2004) berechneten mit einem physikalisch probabilistischen Modell die Auftrittswahrscheinlichkeit von korrosionsverursachten Schäden auf erdverlegten Trinkwasserleitungen. Die Korrosionseinwirkung von außen auf die Rohrwand verringert die Tragfähigkeit von Rohrquerschnitten. Durch Superposition unterschiedlicher Einflussfaktoren ergeben diese ein Überschreiten der zulässigen Spannungen im Rohrquerschnitt und das gleichzeitige Unterschreiten eines definierten Sicherheitsfaktors ( $FOS = \text{Factor of Safety}$ ) (siehe Formel 29). Die Auftrittswahrscheinlichkeit eines unmittelbar bevorstehenden Schadens in Form einer spezifischen Schadensart ist dann gegeben, wenn der Sicherheitsfaktor  $FOS (= \text{factor of safety})$  kleiner als eins wird. Der  $FOS$  wird mittels Verhältnisbildung der

zulässigen Spannung (siehe Formel 30) zur tatsächlich auftretenden Spannung am Rohrquerschnitt errechnet. Die tatsächlich auftretenden Spannungen werden in Längs- (siehe Formel 31) und Umfangsrichtung bzw. Ringspannung (siehe Formel 32) ermittelt. In der Berechnung der Rohr-Umfangsspannungen werden Belastungen aufgrund von Innendruck, Erdüberdeckung, Frostlast und Verkehrslasten mit einbezogen. Zur Berechnung der Längs- oder Axialspannungen werden zusätzlich zu den Einflussfaktoren für Spannungen in Rohrumfangsrichtung mögliche Längsspannungen aufgrund von Temperaturunterschieden im Rohr-Boden-Bereich berücksichtigt. Durch Verwendung eines Korrosionsabtragungsmodelles wird die tatsächlich noch vorhandene Rest-Rohrwandstärke und folglich zulässige Spannung am Rohrquerschnitt im Modell berechnet. In diesem Modell wird der Beginn des Korrosionsprozesses vereinfacht mit dem Verlegejahr gleichgesetzt. In der Realität liegt dies oft nicht vor und würde nur im Falle einer Beschädigung des Korrosionsschutzes beim Transport, Lagerung oder Einbau tatsächlich auftreten.

**Formel 29: definierter Sicherheitsfaktor (FOS = Factor of Safety) (Modell Sadiq et al., 2004)**

$$FOS = \min\left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_X}, \frac{\sigma_Y}{\sigma_\theta}\right)$$

**Formel 30: zulässige materialspezifische Spannung unter Einbeziehung der Schwächung durch Korrosion (N/mm<sup>2</sup>)**

$$\sigma_Y = \frac{\alpha K_q}{a_1 \left( \frac{(aT + b(1 - e^{-cT}))}{(t - (aT + b(1 - e^{-cT})))} \sqrt{L(aT + b(1 - e^{-cT}))} \right)^s \left( \frac{(aT + b(1 - e^{-cT}))}{(t - (aT + b(1 - e^{-cT})))} \right)^{b_1}}$$

**Formel 31: vorhandene Längsspannung (N/mm<sup>2</sup>) am Rohr**

$$\sigma_X = -E_p \alpha_p \Delta T + \frac{p}{2} \left( \frac{D}{t} - 1 \right) v_p + \left\{ \frac{3K_m I_c C_t F E_p t D}{A(E_p t^3 + 3K_d p D^3)} + (1 + f_{frost}) \frac{3K_m \gamma B_d C_d E_p t D}{E_p t^3 + 3K_d p D^3} \right.$$

**Formel 32: vorhandene Ringspannung (N/mm<sup>2</sup>) am Rohr**

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2t} + \frac{3K_m I_c C_t F E_p t D}{A(E_p t^3 + 3K_d p D^3)} + (1 + f_{frost}) x \frac{3K_m \gamma B_d C_d E_p t D}{E_p t^3 + 3K_d p D^3}$$

Hinsichtlich der Berechnung der Auftretswahrscheinlichkeit spezifischer Schadensarten ergeben sich nach Durchführung der Modellierung mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden signifikante Einflussfaktoren. Diese sollten im Rahmen von Wartungs-, Inspektions- und Reparaturmaßnahmen im Detail zukünftig weiter erhoben werden und durch Einbeziehung weiterer Informationen,

wie beispielsweise aktualisierte Daten anderer Leitungsträger, kann dadurch die Datenqualität ständig erweitert und verbessert werden. Somit ist ein ständiger Rückkopplungsprozess in der Umsetzung der Methodik und Modellierung gewährleistet. Veranschaulicht ist dies in Abbildung 14 mit dem Pfeil der nach der Modellberechnung wieder auf den Bereich der Datengrundlage zurück führt.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 *Datengrundlage und Datenaufbereitung (Ergebnisse)*

#### 7.1.1 **WVU A**

Die Analysen wurden auf einem HZL-Datensatz bestehend aus 16 279 Leitungsabschnitten mit einer Gesamtlänge von 482,86 km und einer Verlegeperiode beginnend in 1870 durchgeführt. Insgesamt 455 Schäden wurden auf 394 Leitungsabschnitten (im Folgenden zur vereinfachten Lesbarkeit auch als Leitung bezeichnet) im Zuge von Reparaturen seit 1937 dokumentiert. Diese 455 Schäden wurden in die Schadensarten „Korrosionsloch“ (304 Schäden auf 269 HZL-Abschnitten), „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ (102 Schäden auf 83 HZL-Abschnitten) und sonstige Schadensarten („unbekannt“ und „Verbindung undicht“; 49 Schäden auf 42 HZL-Abschnitten) unterteilt. Für wenige Fälle wurden mehrere Schäden von unterschiedlicher Schadensart auf einer Leitung dokumentiert, was zu einer zahlenmäßigen Überlegenheit der Schäden im Vergleich zu den Leitungsabschnitten führt. Der dokumentierte Leitungszustand wurde als Grundlage zur weiteren Berechnung in die binäre Kodierung 1 - für „Schaden allgemein“ bzw. „spezifische Schadensart“ dokumentiert - und 0 – für „kein Schaden“ vorhanden bzw. dokumentiert - eingeteilt. 2,5 % der Leitungen weisen lt. Dokumentation eine oder mehrere unterschiedliche Schadensarten auf. In dieser Arbeit wurden zur Modellierung der Zustandsverschlechterungen der HZL 19 unterschiedliche Einflussfaktoren berücksichtigt. Diese repräsentieren den derzeit maximal eruierten Informationsstand betreffend HZL für das WVU A. Die Bezeichnung der Variablen, das gewählte Skalenniveau (= Variablentyp), die auftretenden Kategorien je Einflussvariable, die Codierung, Festlegung der Referenzkategorie, die Verteilung der Leitungsabschnitte je Kategorie und die Datenquelle der Variablen ist in Tabelle 11 im Detail für das WVU A dargestellt. Alle 19 zur Verfügung stehenden Variablen werden in rohrphysikalische, umweltbedingte, betriebliche und herstellungsbedingte bzw. Konstruktionseinflüsse gegliedert. Eine Vielzahl von unterschiedlichen verwendeten Materialien wurde aufgrund gleicher Materialeigenschaften in die Hauptgruppen Asbestzement (AZ), Beton (B), Grauguss (GG), Polyethylen und Polyvinylchlorid (PE\_PVC), Stahl (ST), Steinzeug (STZ), Duktulguss 1. Generation (GGG 1), Duktulguss 2. Generation (GGG 2), Duktulguss 3. Generation (GGG 3) unterteilt.

Zu den umweltbedingten und zugleich korrosionsfördernden Einflussvariablen zählen Bodenaggressivität (BA), korrosionsfördernde Faktoren im Boden (z. B. Grundwasserfluktuation und Torfschichten) (KFB), Streustrom aufgrund von Straßenbahn (SSB) und Streustrom Gasleitung (= Streustrom aufgrund kathodisch geschützter Gasleitungen) (SGL).

Zur Gruppe der umweltbedingten und zugleich mechanischen Faktoren zählen Setzungsempfindlichkeit des Bodens (SEB), Kriech-Rutschhang (KR), historisch aufgefüllte Schanzen und Wälle (SW), durch Straßenbahn bedingte mechanische Oberflächenbelastung (SMB), Verkehrsbelastung (VB), Belagszustand der Straßenoberfläche (BZ) und Baumwurzelbeeinflussung (BWB).

Die Information des Rohrinnendruckes (= Zugehörigkeit zur Druckzone) (RID) und Rohrrinnen-Rauhigkeit (RIR) definieren die betrieblichen Einflussfaktoren und verwendete Hölzchen-Auflager (HA) als Bettungsmaterial den konstruktions- bzw. herstellungsbedingten und zugleich auch korrosionsfördernden Einflussfaktor.

**Tabelle 11: Abhängige Zustandsvariable und beeinflussende unabhängige Merkmalsvariablen (= Einflussfaktoren) für das WWU A (inkl. Abkürzungen)**

Einflussvariable Einflussfaktor	Variablentyp	Kategorie	Codierung	Referenz-kategorie	Anzahl Leitungen	%	Anzahl Schäden	%	Datenquelle
Leitungszustand	nominal	Schadensart Schaden allgemein	1		394	2,41%	455	100%	Schadensdatenbank WWU-GIS
		Schadensart Korrosionsloch	1		269		304	67%	
		Schadensart Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch	1		83		102	22%	
		Schadensart unbekannt	1		30		31	7%	
		Schadensart Verbindung undicht	1		17		18	4%	
		kein Schaden	0		15885	97,22%	15885		
<b>rohrphysikalische Einflüsse</b>									
Rohrmaterial (RM)	nominal	Asbestzement (AZ)	1		121	1%	121	1%	WWU-GIS
		Beton (B)	2		32	0%	32	0%	
		Grauguss (GG)	3		1837	11%	1863	11%	
		PE PVC	4		410	3%	410	3%	
		Stahl (ST)	5		1448	9%	1448	9%	
		Steinzeug (STZ)	6		2	0%	2	0%	
		Duktilguss 1. Generation (Bitumen) (GGG 1)	7		2106	13%	2135	13%	
		Duktilguss 2. Generation (PUR innen) (GGG 2)	8		5969	37%	5975	37%	
		Duktilguss 3. Generation (Vollschutz) (GGG 3)	9	x	4354	27%	4354	27%	
Rohrdurchmesser (RD)	metrisch							WWU-GIS	
Abschnittslänge (L)	metrisch							WWU-GIS	
Alter (A)	metrisch	Bezugsjahr = 2011						WWU-GIS	
Verbindungsart (VA)	nominal	AZ-Kupplung	1		76	0%		0%	WWU-GIS
		Flansch	2		290	2%		0%	
		Schraubmuffe	3		2808	17%		0%	
		Schweißung	4		23	0%		0%	
		Spiegelschweißung	5		20	0%		0%	
		Steckmuffe	6		6601	41%		0%	
		Stemm-Bleimuffe	7		81	0%		0%	
		Stopfbüchse	8	x	291	2%		0%	
		unbekannt			6089	37%			
<b>umweltbedingte Einflüsse</b>									
Bodenaggressivität (BA)	nominal	keine Aggressivität (kBA)	1		3636	22%		0%	kommunale Bodenkarte
		schwache Aggressivität (swBA)	2		7859	48%		0%	
		aggressiv (aBA)	3		3564	22%		0%	
		heterogen, lokal stark aggressiv (hBA)	4		976	6%		0%	
		stark aggressiv (sBA)	5	x	244	1%		0%	
Korrosionsfördernde Faktoren im Boden (KFB)	nominal	nicht vorhanden (KFBnv)	1		15020	92%		0%	kommunale Bodenkarte
		vorhanden (Grundwasserfluktuation und Torf) (KFBv)	2	x	1259	8%		0%	
Setzungsempfindlichkeit Boden (SEB)	nominal	nicht setzungsempfindlich (nSEB)	1		6823	42%		0%	kommunale Bodenkarte
		wenig setzungsempfindlich (wSEB)	2		5370	33%		0%	
		mässig setzungsempfindlich (mSEB)	3		2683	16%		0%	
		uneinheitlich, lokal stark setzungsempfindlich (uSEB)	4		1044	6%		0%	
		stark setzungsempfindlich (sSEB)	5	x	359	2%		0%	
Kriech-Rutschhang (KR)	nominal	nicht vorhanden (KRnv)	1		16159	99%		0%	kommunale Bodenkarte
		vorhanden (KRv)	2	x	120	1%		0%	
Schanzen und Wälle (SW)	nominal	nicht vorhanden (SWnv)	1		16157	99%		0%	kommunale Bodenkarte
		vorhanden (SWv)	2	x	122	1%		0%	
Streustrom Straßenbahn (SSB)	nominal	nicht vorhanden (SSBnv)	1		14745	91%		0%	kommunale Karte
		vorhanden (SSBv)	2	x	1534	9%		0%	
Streustrom Gasleitungen (SGL)	nominal	nicht vorhanden (SGLnv)	1		14714	90%		0%	kommunale Karte
		vorhanden (SGLv)	2	x	1565	10%		0%	
Straßenbahn mechanische Oberflächenbelastung (SMB)	nominal	nicht vorhanden (SMBnv)	1		12502	77%		0%	kommunale Karte
		vorhanden (SMBv)	2	x	3777	23%		0%	
Verkehrsbelastung (VB)	nominal	keine Verkehrslast (kVB)	1		2745	17%		0%	kommunale Karte
		sehr schwache Verkehrslast (sswVB)	2		4681	29%		0%	
		schwache Verkehrslast (swVB)	3		463	3%		0%	
		durchschnittliche Verkehrslast (dVB)	4		1457	9%		0%	
		überdurchschnittliche Verkehrslast (üdvVB)	5		4736	29%		0%	
		starke Verkehrslast (sVB)	6		2147	13%		0%	
		sehr starke Verkehrslast (ssVB)	7	x	50	0%		0%	
Straßenoberflächen-/Belagszustand (BZ)	nominal	keine Beeinflussung (kBBZ)	1		3174	19%		0%	kommunale Karte
		sehr guter Belagszustand (sgBZ)	2		2179	13%		0%	
		guter Belagszustand (gBZ)	3		3850	24%		0%	
		mittelmässiger Belagszustand (mmBZ)	4		4625	28%		0%	
		schlechter Belagszustand (sBZ)	5		1720	11%		0%	
		sehr schlechter Belagszustand (ssBZ)	6	x	731	4%		0%	
Baumwurzelbeeinflussung (BWB)	nominal	keine Beeinflussung (BWBnv)	1		16046	99%		0%	kommunale Karte
		Beeinflussung bis Radius = 1,5 m (BWBv)	2	x	233	1%		0%	
<b>betriebliche Einflüsse</b>									
Rohrinnendruck (RID)	metrisch							WWU-GIS	
Rohr-Innen-Rauhigkeit (RIR)	metrisch							WWU-GIS	
<b>Konstruktionseinflüsse</b>									
Hölzchen-Auflager (Bettungsmaterial) (HA)	nominal	nicht vorhanden (HANv)	1		7820	48%		0%	WWU-GIS
		vorhanden (HAV)	2	x	8459	52%		0%	

## 7.1.2 WVU B

Die Analysen wurden auf einem HZL-Datensatz bestehend aus 3 726 Leitungsabschnitten mit einer Gesamtlänge von 441,6 km und einer Verlegeperiode beginnend in 1895 durchgeführt. Im Zeitraum zwischen 1895 und 1950 wurden nicht jährlich Erweiterungen des HZL-Netzes ausgeführt. Seit dem Jahr 1951 sind jährliche Neuverlegungen, siehe Abbildung 24, mit einer intensiven Bauphase im Zeitraum 1960 bis 1980, zu erkennen. Weiters ist aus Abbildung 24 der gegenwärtig rückläufige Trend der HZL-Netzerweiterung für das WVU B ersichtlich.

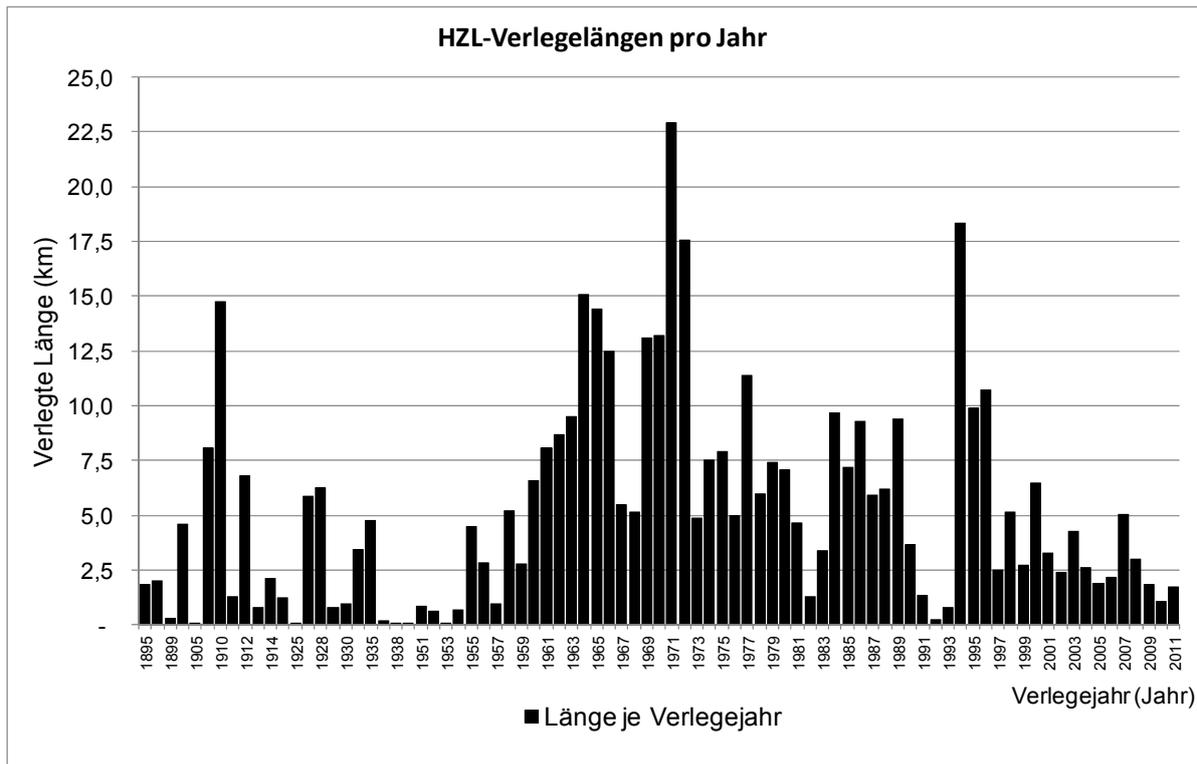


Abbildung 24: HZL-Verlegelängen pro Jahr – WVU B

Insgesamt 324 Schäden wurden auf 226 Leitungsabschnitten im Zuge von Reparaturen seit 1945 dokumentiert. Eine durchgängige Schadensaufzeichnung ist für das WVU B ab 1969 gegeben (Abbildung 25). Der Verlauf der HZL-Schäden verzeichnet eine erhöhte Schadensrate zwischen 1974 und 1980 und ist weiters durch eine im Trend ansteigende Schadensrate von zwei bis drei Schäden pro 100 km und Jahr seit 1990 charakterisiert.

Die 324 Schäden werden lt. Abbildung 26 in die Schadensarten „Verbindung undicht“, „Korrosionsloch“, „Längsriss“, „Rundriss“ und „Scherbenbruch“ unterteilt. Weiters ist in Abbildung 26 die Anzahl der betroffenen Leitungsabschnitte je Schadensart dargestellt. Die HZL-Abschnitte weisen in der Regel einen dokumentierten Schaden auf. Für wenige Fälle wurden aber mehrere Schäden von unterschiedlicher Schadensart auf Einzelabschnitten dokumentiert, was die zahlenmäßige Überlegenheit der Schäden gegenüber den Leitungen erklärt.

In den folgenden Berechnungen werden die Schadensarten „Rundriss“, „Längsriss“ und „Scherbenbruch“ aufgrund ähnlicher Schadensmechanismen für das WVU A und WVU B in die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ zusammengefaßt.

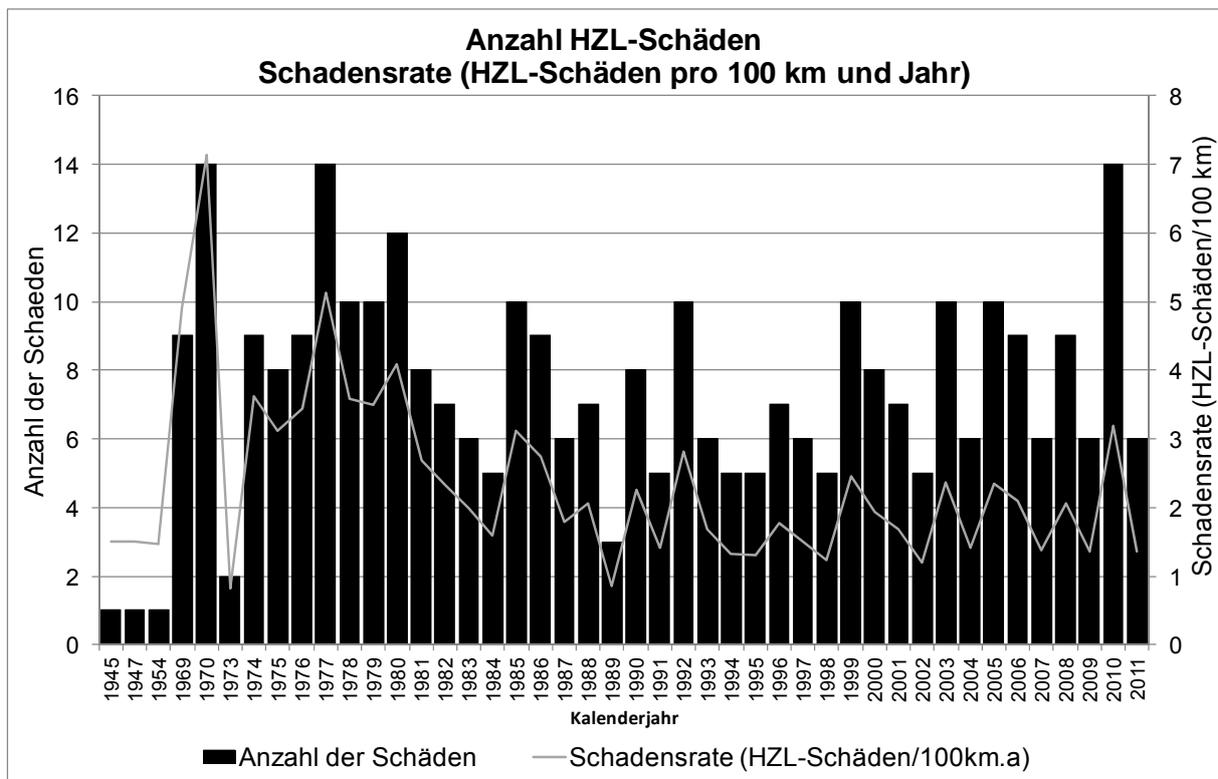
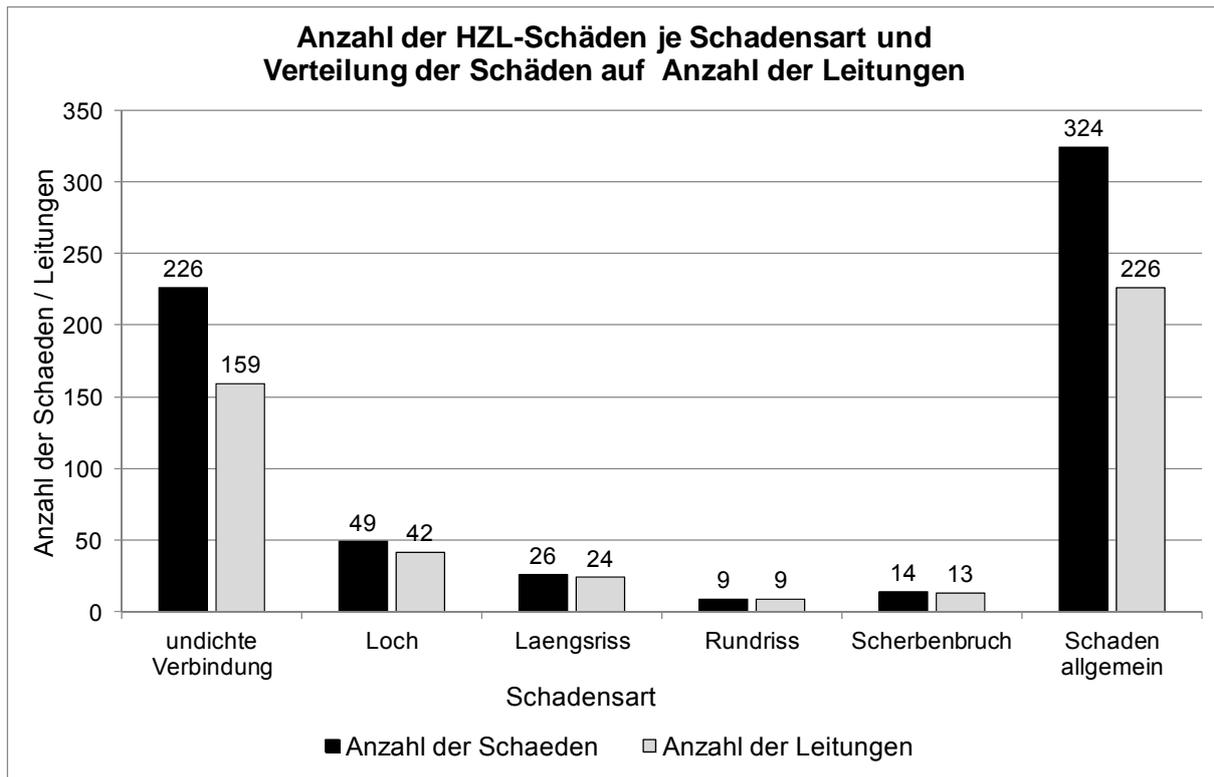


Abbildung 25: Anzahl HZL-Schäden und Schadensrate pro 100 km und Jahr – WVU B



**Abbildung 26: Anzahl der HZL-Schäden und Anzahl der betroffenen Leitungen je Schadensart – WVU B**

Der dokumentierte Leitungszustand wurde als Grundlage zur weiteren Berechnung in die binäre Kodierung 1 - für „Schaden allgemein“ bzw. „spezifische Schadensart“ dokumentiert - und 0 – für „kein Schaden“ eingeteilt. Aus Tabelle 12 ist ersichtlich, dass 6 % der HZL-Abschnitte einen oder mehrere unterschiedliche Schadensarten aufweisen bzw. dokumentiert wurden. In dieser Arbeit wurden zur Modellierung der Zustandsverschlechterungen der HZL 19 unterschiedliche Einflussfaktoren berücksichtigt. Diese repräsentieren den derzeit maximal eruierten Informationsstand betreffend HZL für das WVU B. Die Bezeichnung der Variablen, das gewählte Skalenniveau (= Variablentyp), die auftretenden Kategorien, die Codierung, Festlegung der Referenzkategorie, die Verteilung der Leitungsabschnitte je Kategorie und die Datenquelle der Variablen ist in Tabelle 12 im Detail für das WVU B dargestellt. Alle 19 zur Verfügung stehenden Variablen werden in rohrphysikalische, umweltbedingte, betriebliche und herstellungs- bzw. konstruktionsbedingte Einflüsse gegliedert. Eine Vielzahl von unterschiedlichen verwendeten Materialien wurde aufgrund gleicher Materialeigenschaften in die Hauptgruppen Asbestzement (AZ), Beton (B), Grauguss mit Stemmmuffenverbindung (GG), Grauguss mit Schraubmuffenverbindung (GGSM), Duktiguss vor 1980 verlegt (GGG ≤ 1980), Duktiguss nach 1980 verlegt (GGG > 1980), Polyethylen und sonstige Materialien (PE\_Sonstige) und Stahl (ST) untergliedert. Die Verteilung der RD und Anzahl der Schäden in Bezug zum RD sind in Abbildung 27 dargestellt. Die RD DN 400, 500, 600, 700 und größer 800 bilden den Großteil der vorhandenen RD. Im Häufigkeitsdiagramm für die auftretenden

Längen (Abbildung 28) ist ersichtlich, dass viele kurze Abschnitte (< 50 m) vorliegen und ein Anstieg für Leitungslängen größer 160 m, verursacht durch die GIS-Teilungsoperationen in der Stufe der Datenaufbereitung zur Reduktion der Längen über 300 m, erkennbar ist.

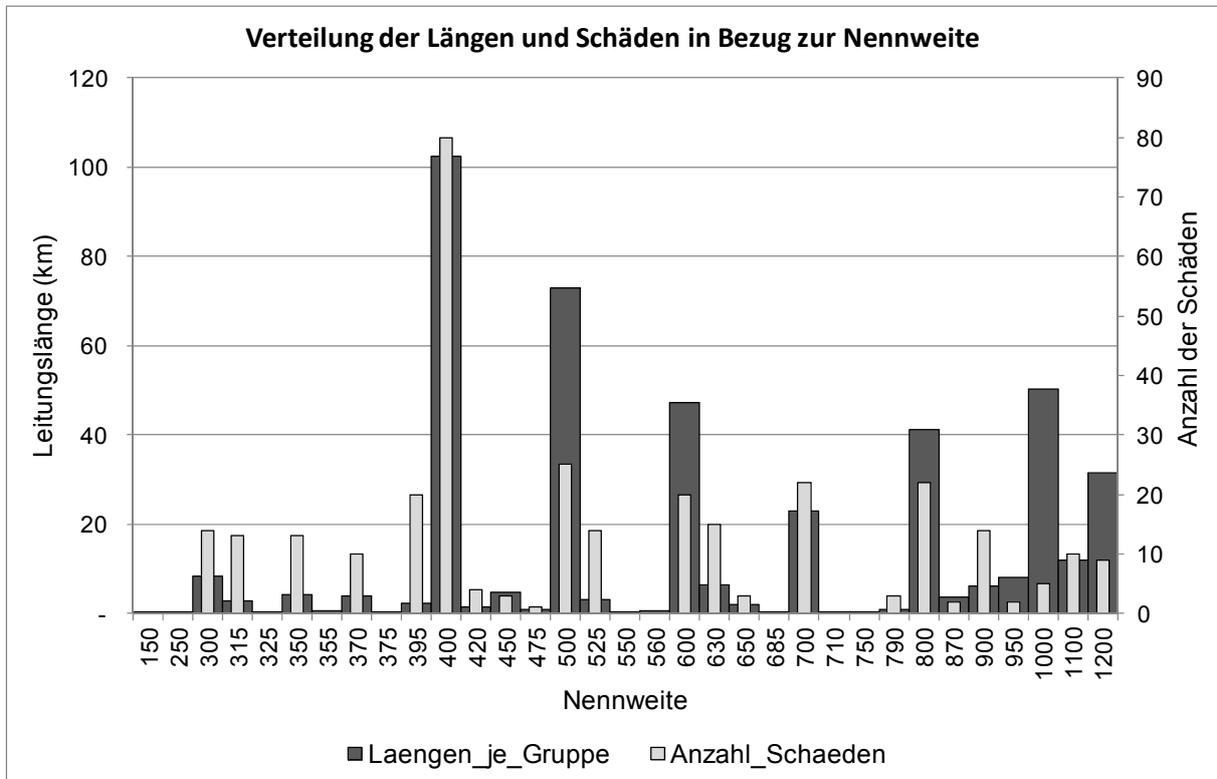


Abbildung 27: Verteilung der Längen und Schäden bezogen auf die Nennweite

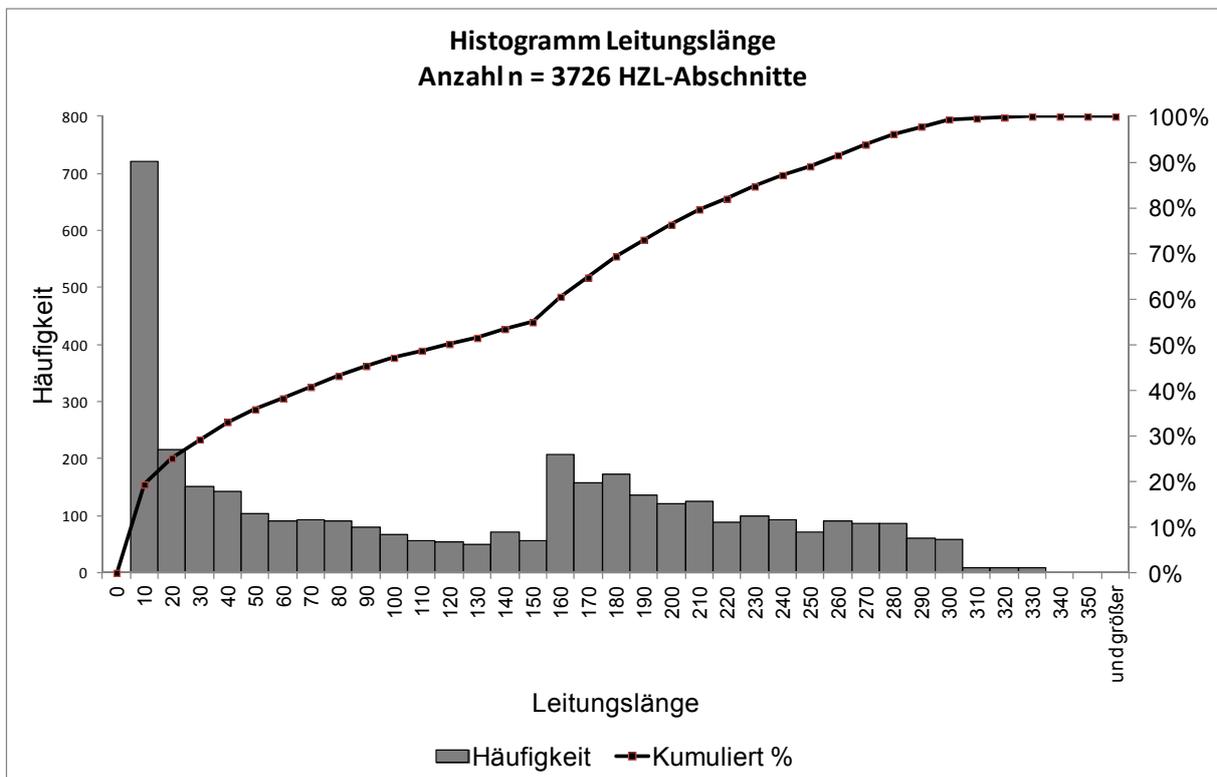


Abbildung 28: Histogramm Leitungslängen WVU B

Zu den umweltbedingten Einflussvariablen zählen kreuzende oder direkt an HZL hydraulisch verbundene Trinkwasser-Anschluss- und Versorgungsleitungen, kreuzende oder im Nahbereich parallel verlaufende Gas- und Abwasserleitungen und der Durchmesserbereich dieser Leitungen, die Beeinflussung von Baumwurzeln und der zugehörige Baumstammumfang, die Information ob HZL in Hauptverkehrsstraßen verlegt sind, das Vorhandensein von Absperrarmaturen wie Schieber und Klappen am HZL-System und die Information der Zugehörigkeit zu geographischen Einheiten, welche als Ersatzinformation für die Bodenbeschaffenheit und Setzungsempfindlichkeit definiert sind, sogenannte Dienstzimmern bzw. Bezirke, im HZL-System. Kreuzende oder im Nahbereich parallel verlaufende Straßenbahnen stellen einen korrosionsfördernden Einflussfaktor dar. Die Information des Rohrrinnendruckes zählt zu den betrieblichen Einflussvariablen und die Unterscheidung der Rohrherstellungsarten und spezifischen Bettungseigenschaften, wie auf Ziegeln gelagerte Rohrleitungen, zu den herstellungsbedingten Einflussvariablen.

**Tabelle 12: Abhängige Zustandsvariable und beeinflussende unabhängige Merkmalsvariablen für das WVU B**

Variable	Variablentyp	Kategorie	Codierung	Referenz-kategorie	Anzahl Leitungen	%	Schadensanzahl	Datenquelle
Leitungszustand	nominal	Schaden allgemein	1		226	6%	324	Schadensdatenbank WVU-GIS
		Schadensart Verbindung undicht	1		159	4%	226	
		Schadensart Loch	1		42	1%	49	
		Schadensart Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch	1		46	1%	49	
		kein Schaden	0		3500	94%		
<b>rohrphysikalische Einflüsse</b>								
Rohrmaterial	nominal	Asbestzement (AZ)	1		1020	27%	WVU-GIS	
		Beton (B)	2		193	5%		
		Grauguss (GG)	3		466	13%		
		Duktilguss <= 1980 (GGG <= 1980)	4		270	7%		
		Duktilguss > 1980 (GGG > 1980)	5		756	20%		
		Grauguss Schraubmuffe (GGSM)	6		368	10%		
		PE und sonstige Materialien (PE_Sonstige)	7		112	3%		
		Stahl (ST)	8	x	541	15%		
Rohrdurchmesser	metrisch						WVU-GIS	
Rohrverlegejahr	metrisch						WVU-GIS	
Alter	metrisch			2011				
Länge (Einzel-Leitungsabschnitt)	metrisch						WVU-GIS	
<b>umweltbedingte Einflüsse</b>								
Anschlussleitungen Trinkwasser (AL TW)	nominal	vorhanden	1		1382	37%	WVU-GIS	
		nicht vorhanden	2	x	2344	63%		
Versorgungsleitungen Trinkwasser (VL TW)	nominal	vorhanden	1		2075	56%	WVU-GIS	
		nicht vorhanden	2	x	1651	44%		
Gasleitungen (Gas)	nominal	vorhanden	1		2407	65%	kommunale Karte	
		nicht vorhanden	2	x	1319	35%		
Durchmesser Gasleitungen (DN Gas)	metrisch						kommunale Karte	
Kanalleitung (Kanal)	nominal	vorhanden	1		2138	57%	kommunale Karte	
		nicht vorhanden	2	x	1588	43%		
Durchmesser Kanalleitung (DN Kanal)	metrisch						kommunale Karte	
Bäume	nominal	vorhanden	1		613	16%	kommunale Karte	
		nicht vorhanden	2	x	3113	84%		
Baum Stammumfang	metrisch						kommunale Karte	
Hauptverkehrsstraße (Verkehr)	nominal	vorhanden	1		2307	62%	kommunale Karte	
		nicht vorhanden	2	x	1419	38%		
Straßenbahn	nominal	vorhanden	1		634	17%	kommunale Karte	
		nicht vorhanden	2	x	3092	83%		
Schieber/Klappen	nominal	vorhanden	1		1142	31%	WVU-GIS	
		nicht vorhanden	2	x	2584	69%		
Dienstzimmer (= geographische Strukturierung)	nominal	Dienstzimmer 2	1		629	17%	WVU-GIS	
		Dienstzimmer 7	2		309	8%		
		Dienstzimmer 12	3		315	8%		
		Dienstzimmer 13	4		323	9%		
		Dienstzimmer 14	5		367	10%		
		Dienstzimmer 17	6		165	4%		
		Dienstzimmer 19	7		200	5%		
		Dienstzimmer 21	8		249	7%		
		Dienstzimmer 22	9		430	12%		
		Dienstzimmer 23	10	x	739	20%		
		<b>betriebliche Einflüsse</b>						
Druckzone/Rohrinnendruck	nominal	Blau III	1		366	10%	WVU-GIS	
		blau II-Ostbahn	2		9	0%		
		Blau IV	3		31	1%		
		Blau I-Zentrum	4		619	17%		
		Braun I	5		252	7%		
		Braun II	6		8	0%		
		Braun III	7		41	1%		
		Braun IX	8		5	0%		
		Braun V	9		58	2%		
		Braun VI	10		8	0%		
		Braun VIII	11		1	0%		
		Gelb IV	12		6	0%		
		Gelb V	13		10	0%		
		Gelb VI	14		5	0%		
		Gelb XI	15		53	1%		
		Grün I	16		215	6%		
		Grün II	17		26	1%		
		Orange I	18		2	0%		
		Rot I	19		198	5%		
		Rot II	20		97	3%		
		Rot III	21		364	10%		
		Violett	22	x	1352	36%		
<b>Konstruktionseinflüsse</b>								
Herstellart	nominal	Sandguss (GG Verlegejahr <= 1925)	1		304	8%	WVU-GIS	
		Schleuderguss (GG + GGSM Verlegejahr > 1925)	2		530	14%		
		Sonstige Rohr-Herstellungsmethoden	3	x	2892	78%		
Ziegelaufleger	nominal	vorhanden (GG + GGSM Verlegejahr <= 1938)	1		457	12%	WVU-GIS	
		nicht vorhanden	2	x	3269	88%		

## **7.2 Datenanalyse (Ergebnisse)**

In Abhängigkeit der vorliegenden Skalenniveaus der Einflussfaktoren wurden die geforderten Korrelationsmethoden für das WVU A und B angewendet. Diese Untersuchungen auf Interaktionseffekte zwischen den Einflussfaktoren wurden für das WVU A und WVU B (im Detail siehe Günther, 2012) durchgeführt. Es ergaben sich bezüglich der Betrachtung der spezifischen Schadensarten keine signifikanten Korrelations- bzw. Interaktionseffekte zwischen den 19 Einflussfaktoren. Somit konnten alle Einflussvariablen des WVU A und WVU B in die Modellberechnung miteinbezogen werden.

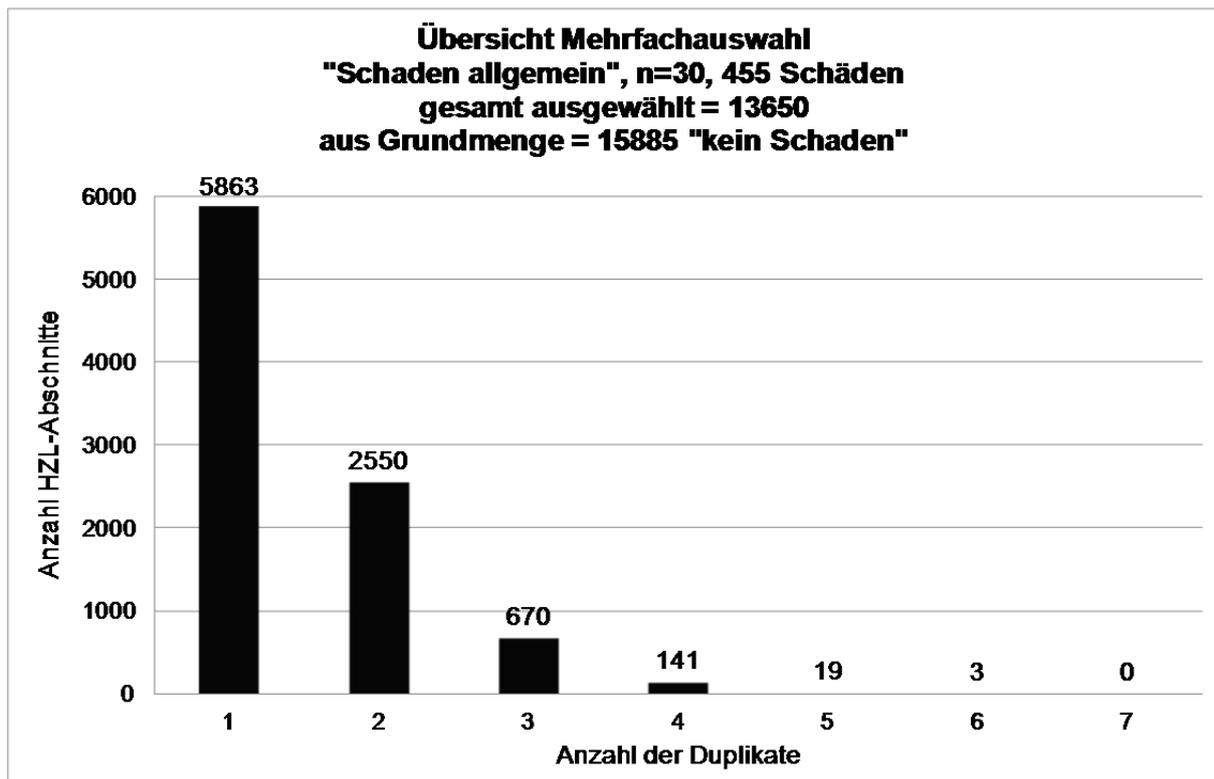
## **7.3 Modellvorbereitung (Ergebnisse)**

### **7.3.1 Modellvorbereitung statistische Modelle**

#### **7.3.1.1 WVU A**

##### *Stichproben-Randomisierung für „Schaden allgemein“ - WVU A*

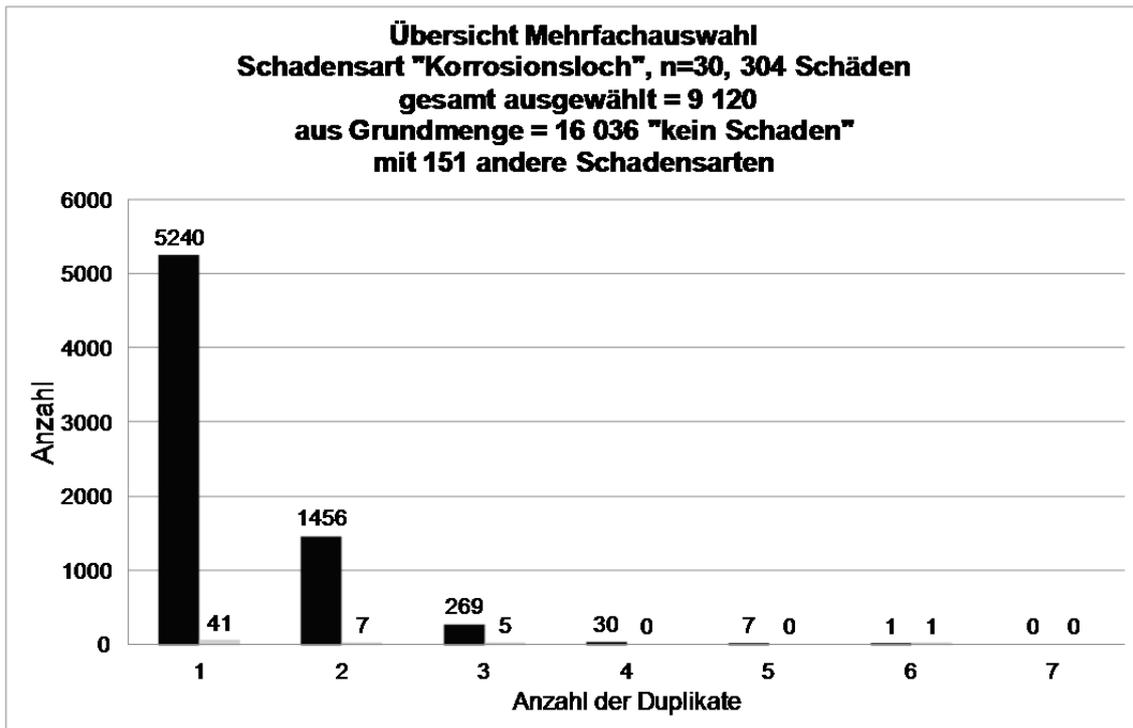
Zur Bildung von 30 Einzelstichproben und somit als Grundlage weiterer statistischer Berechnungen für die Schadensart „Schaden allgemein“, wurden jeweils alle 455 Schäden auf den 394 Leitungen und weitere 455 zufällig ausgewählte nicht schadhafte Leitungen herangezogen. In Summe wurden zur Bildung der 30 Einzelstichproben 13 650 (= 30 x 455) nicht schadhafte Leitungen aus der Gruppe von 15 885 Leitungen ohne Schaden zufällig mit Zurücklegen ausgewählt. Durch die Auswahl mit Zurücklegen ergeben sich, wie in Abbildung 29 dargestellt, Duplikate der ausgewählten Leitungen. Der Randomisierungs-Algorithmus generiert unterschiedliche unabhängige Einzelstichproben und vermeidet es somit gleiche nicht schadhafte Leitungen häufiger zu wählen



**Abbildung 29: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Schaden allgemein“ – WVU A**

*Stichproben-Randomisierung für Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU A*

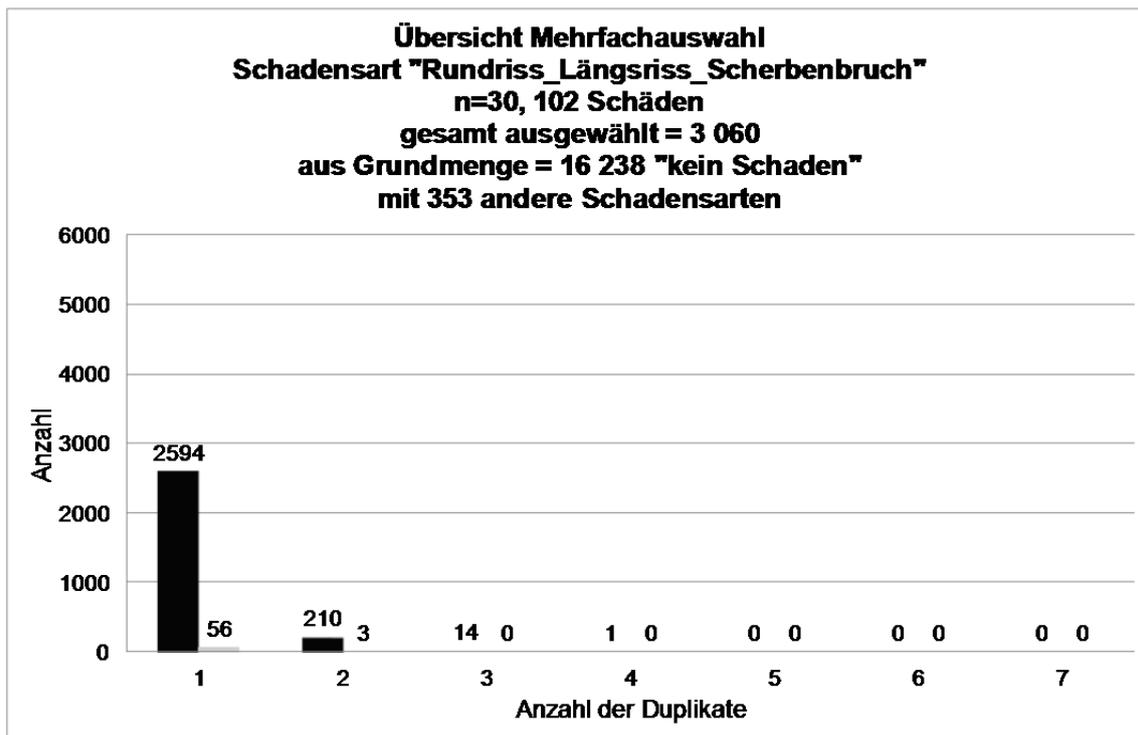
Zur Bildung der 30 Einzelstichproben für die statistische Betrachtung der Schadensart „Korrosionsloch“ wurden jeweils die gleichen 304 Schäden der Art „Korrosionsloch“ die auf 269 Leitungen auftraten und zusätzlich jeweils 304 zufällig gewählte nicht schadhafte Leitungen herangezogen. In Summe wurden zur Bildung der 30 Einzelstichproben 9 120 (= 30 x 304) nicht schadhafte Leitungen aus der Gruppe von 16 036 Leitungen ohne Schaden zufällig gewählt. Die Anzahl der Leitungen „ohne Schaden“ setzt sich aus 15 885 nicht schadhafte Leitungen und 151 Leitungen mit Schäden „anderer Schadensarten“ zusammen. Diese „anderen Schadensarten“ berücksichtigen 102 Schäden mit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ auf 83 Leitungen und 49 weitere Schadensarten auf 47 Leitungen. In Abbildung 30 wurden die Duplikate der gewählten „nicht schadhafte“ Leitungen in schwarz und die Duplikate der „anderen Schadensarten“ in grau dargestellt. Der Randomisierungs-Algorithmus generiert somit unabhängige Einzelstichproben.



**Abbildung 30: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU A**

*Stichproben-Randomisierung für Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - WVU A*

Zur Bildung von 30 Einzelstichproben als Grundlage weiterer statistischer Berechnungen für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ wurden jeweils alle 102 Schäden auf 83 Leitungen und je Einzelstichprobe 102 zufällig ausgewählte nicht schadhafte Leitungen verwendet. In Summe wurden zur Bildung der 30 Einzelstichproben 3 060 (= 30 x 102) nicht schadhafte Leitungen aus der Gruppe von 16 238 Leitungen ohne Schaden zufällig gewählt. Die Leitungsanzahl zur Betrachtung der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ setzt sich aus 15 885 nicht schadhafte Leitungen und 353 Schäden anderer Schadensarten zusammen. Diese anderen Schadensarten berücksichtigen 304 Schäden mit der Schadensart „Korrosionsloch“ auf 269 Leitungen und 49 sonstige Schäden auf 47 HZL-Abschnitten. In Abbildung 31 wurden die Duplikate der gewählten nicht schadhafte Leitungen in schwarz und die Duplikate der anderen Schadensarten in grau dargestellt. Der Randomisierungs-Algorithmus generiert somit sehr gute unabhängige Einzelstichproben.



**Abbildung 31: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ – WVU A**

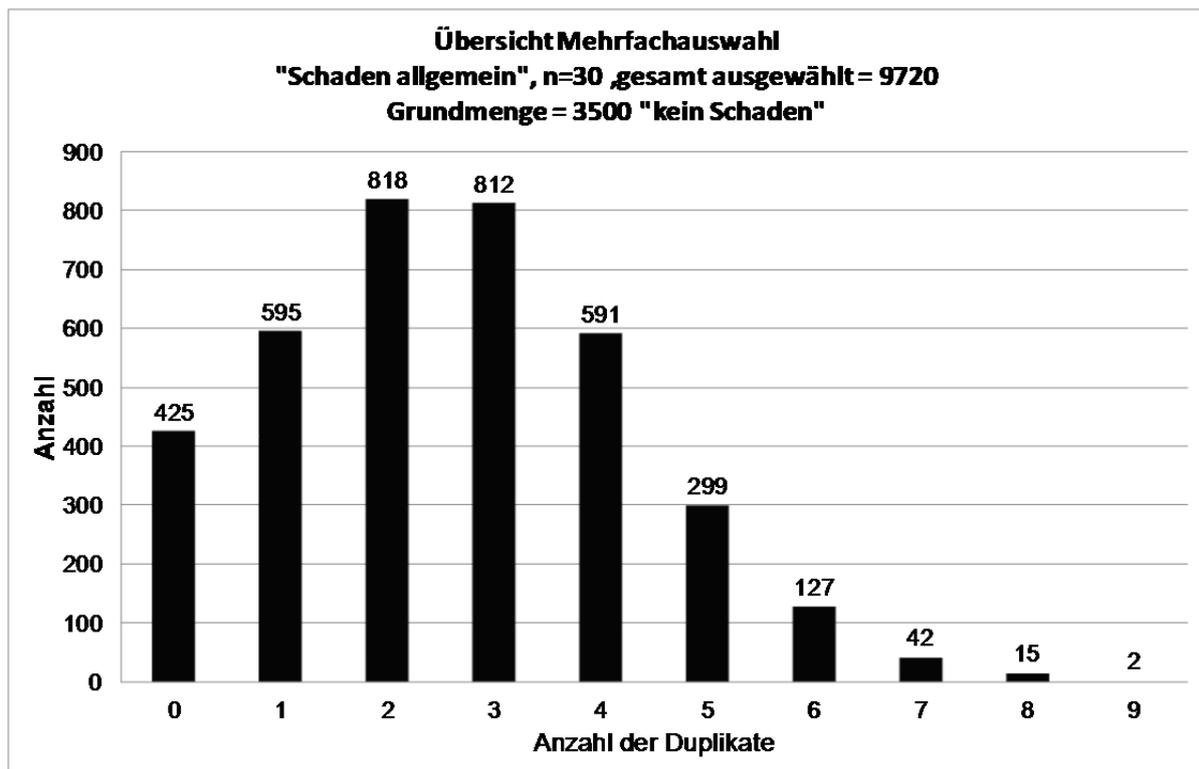
**Tabelle 13: Zusammenfassung der Randomisierungsergebnisse - WVU A**

analysierte Schadensart	schadhafte Leitungen		nicht schadhafte Leitungen		
	Anzahl Schäden	Anzahl Leitungen	Anzahl Leitungen (n)	Leitungen gesamt (n x 30)	Grundgesamtheit der Leitungen ohne Schäden
Schaden allgemein	455	394	455	13 650	15 885
Korrosionsloch	304	269	304	9 120	16 036 davon 15 885 ohne Schaden und 151 mit anderer Schadensart (davon 102 Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch auf 83 Leitungen und 49 sonstige Schadensarten auf 47 Leitungen)
Rundriss/ Längsriss/ Scherbenbruch	102	83	102	3 060	16 238 davon 15 885 ohne Schaden und 353 mit anderer Schadensart (davon 304 Korrosionsloch auf 269 Leitungen und 49 sonstige Schadensarten auf 47 Leitungen)

### 7.3.1.2 WVU B

#### *Stichproben-Randomisierung für spezifische Schadensarten - WVU B*

Zur Bildung von 30 Einzelstichproben als Grundlage weiterer statistischer Berechnungen für die Schadensarten „Schaden allgemein“, „Korrosionsloch“, „Verbindung undicht“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ wurden die Anzahl der Schäden auf den zugehörigen schadhafte Leitungen und die gleiche Anzahl nicht schadhafte Leitungen zufällig ausgewählt. Es wurde die gleiche Vorgehensweise wie für das WVU A durchgeführt. Die Zusammenfassung dieser Randomisierungs-Ergebnisse ist in Tabelle 14 dargestellt und in den folgenden vier Abbildungen dargestellt (Abbildung 32 bis Abbildung 35).



**Abbildung 32: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Schaden allgemein“ – WVU B**

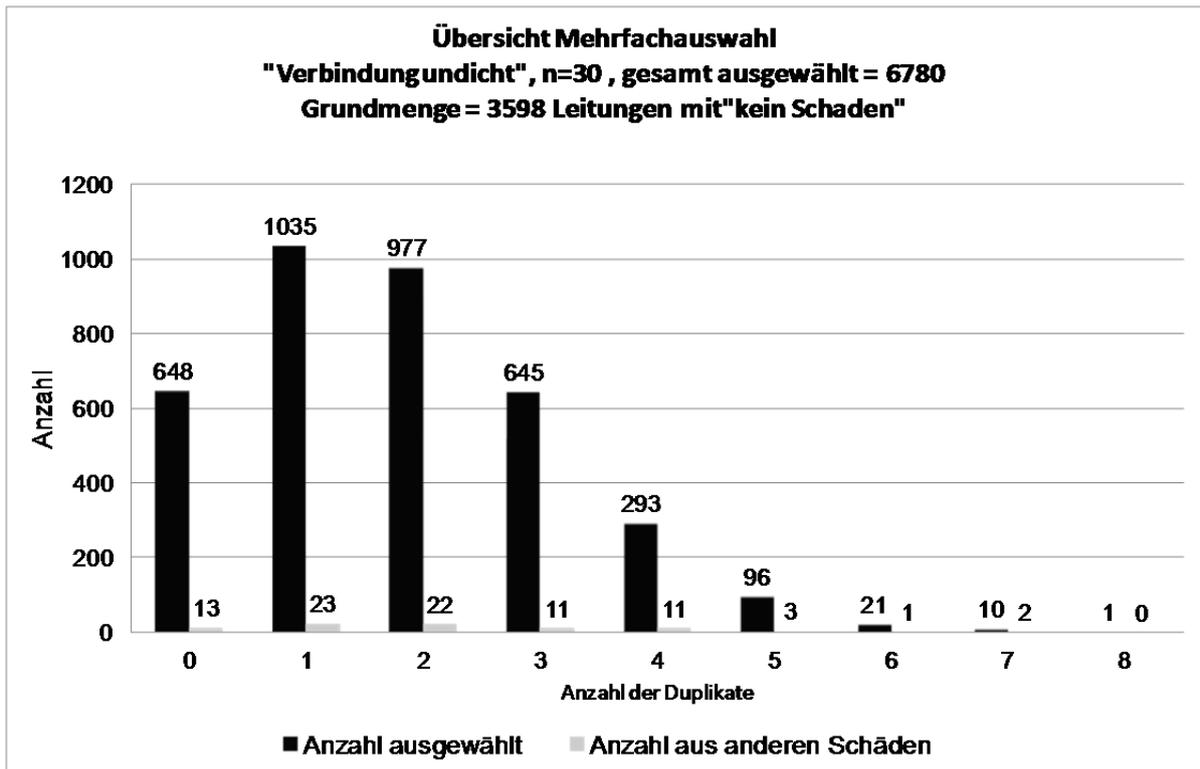


Abbildung 33: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Verbindung undicht“ – WVU B

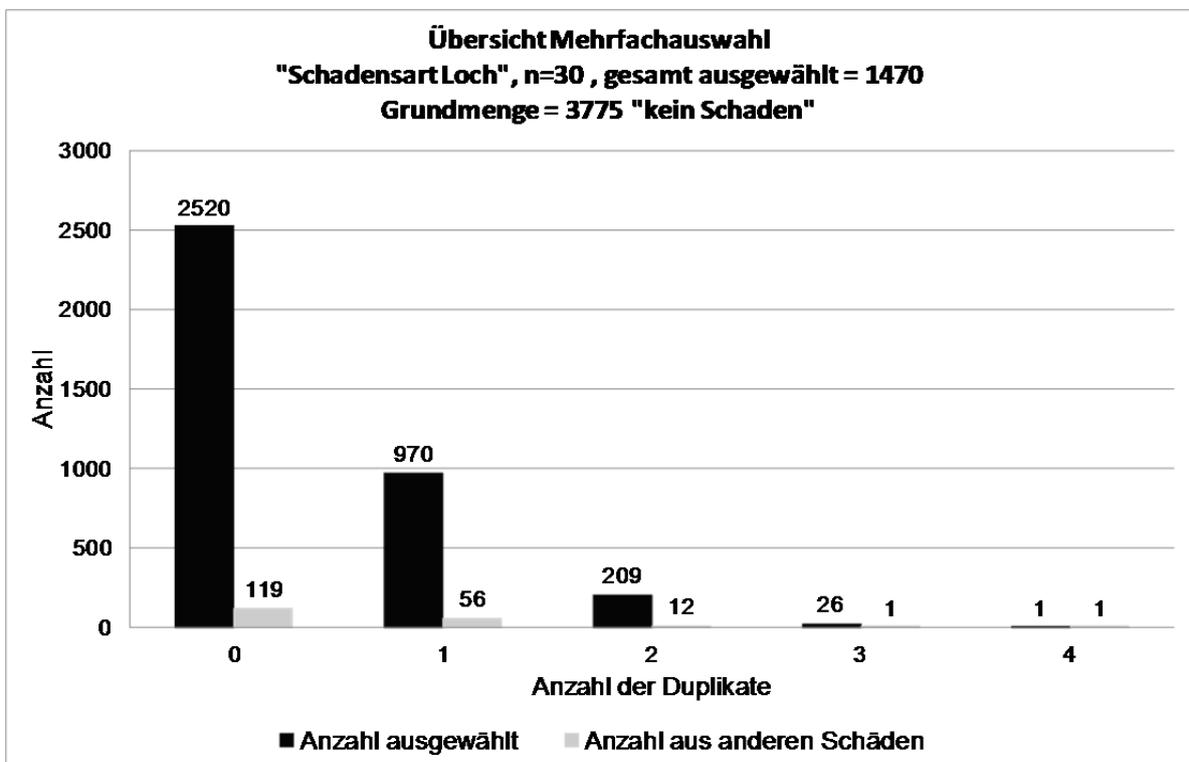
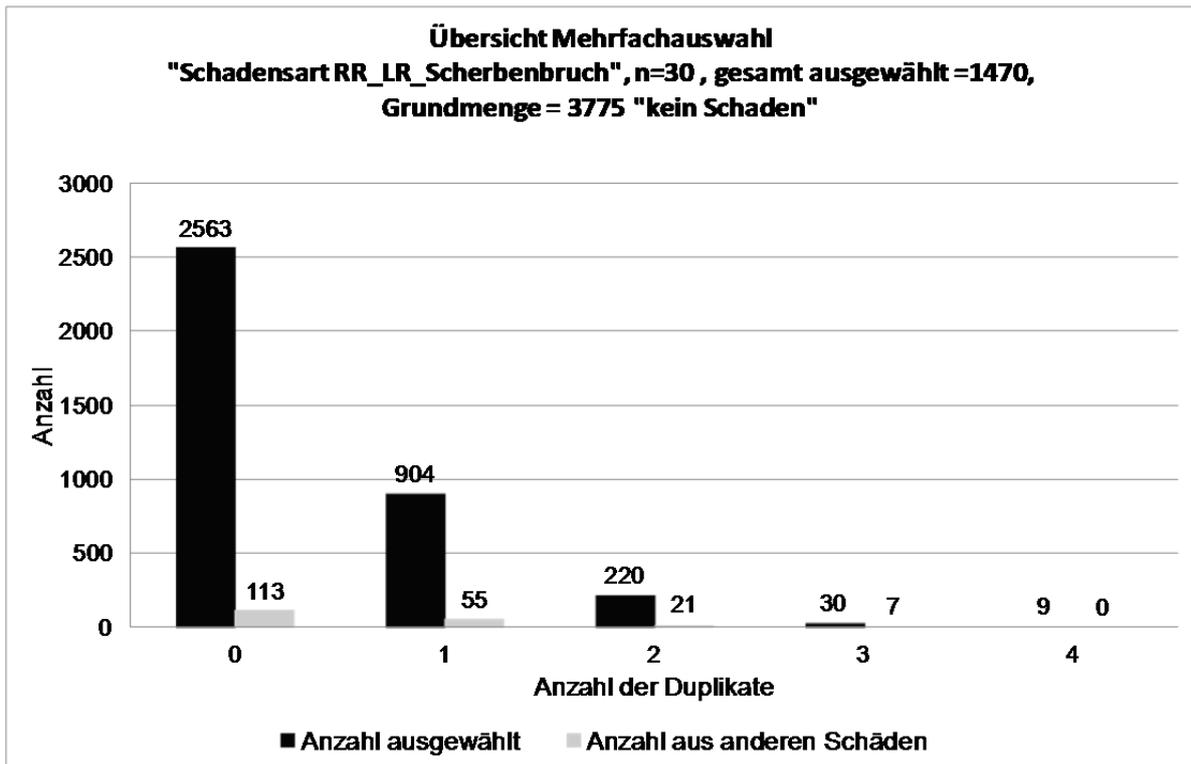


Abbildung 34: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU B



**Abbildung 35: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ – WVU B**

**Tabelle 14: Zusammenfassung der Randomisierungsergebnisse - WVU B**

analysierte Schadensart	schadhafte Leitungen		nicht schadhafte Leitungen		
	Anzahl Schäden	Anzahl Leitungen	Anzahl Leitungen (n)	Leitungen gesamt (n x 30)	Grundgesamtheit der Leitungen ohne Schäden
Schaden allgemein	324	226	324	9 720	3 500
Verbindung undicht	226	159	226	6 780	3 598 davon 3 500 ohne Schaden und 98 mit anderer Schadensart (davon 49 Korrosionslöcher auf 42 Leitungen und 49 Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch auf 46 Leitungen)
Korrosionsloch	49	42	49	1 470	3 775 davon 3 500 ohne Schaden und 275 mit anderer Schadensart (davon 226 Verbindung undicht auf 159 Leitungen und 49 Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch auf 46 Leitungen)
Rundriss/ Längsriss/ Scherbenbruch	49	46	49	1 470	3 775 davon 3 500 ohne Schaden und 275 mit anderer Schadensart (davon 226 Verbindung undicht auf 159 Leitungen und 49 Korrosionslöcher auf 42 Leitungen)

## 7.3.2 Modellvorbereitung physikalische Modelle

### 7.3.2.1 WVU A

Als Vorbereitung zur Anwendung der physikalischen Modelle ist die Umwandlung von Einflussfaktoren in spezifische Zahlen (= Ersatzinformationen) notwendig. Dies ist exemplarisch für den Einflussfaktor Bodenaggressivität zur Berechnung der Schadensart „Korrosion“ für das WVU A mit Hilfe physikalischer Modelle (Korrosions- und Rissmodelle) in Tabelle 15 erläutert. In diesem Beispiel wird die Information der Bodenaggressivität zur Ermittlung der weiteren Ersatzgrößen für pH-Wert, Belüftungszahl und die Korrosionsmodellkonstanten  $a$ ,  $b$  und  $c$  verwendet.

**Tabelle 15: Umwandlung vom Einflussfaktor Bodenaggressivität in spezifische Zahlen (= Ersatzinformationen) zur Berechnung von physikalischen Modellen**

Einflussfaktor	benötigte Information im Korrosions- und Rissmodell				
	<i>pH-Wert</i>	<i>Belüftungszahl-n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
<b>Bodenaggressivität</b>					
	(-)	(-)	(mm/Jahr)	(mm)	(n/Jahr)
5 (stark aggressiv)	2	0,69	0,021	10	0,17
4 (heterogen, lokal stark aggressiv)	4	0,48	0,015	8	0,13
3 (aggressiv)	6	0,42	0,009	6	0,09
2 (schwach aggressiv)	8	0,29	0,004	4	0,05
1 (nicht aggressiv)	10	0,16	0,001	2	0,01

### 7.3.2.2 WVU B

Aufgrund der unzureichenden Datenlage, speziell in Bezug auf Bodeninformationen, konnten für das WVU B keine physikalischen Modelle angewendet werden.

## 7.4 Modellberechnung (Ergebnisse)

### 7.4.1 Statistische Modelle

#### Allgemeines

Mit Hilfe statistischer Methoden kann ein möglicher signifikanter Zusammenhang zwischen den vielfältigen Einflussfaktoren und der beobachteten Schadensart in einem Modell ermittelt werden. Dabei kann es Abweichungen zu physikalisch erklärbaren Einflussfaktoren geben, da durch ein Zusammenwirken von verschiedenen Einflussfaktoren (auch wenn diese Einflussfaktoren untereinander nicht korrelieren) ein weiterer Schadensmechanismus erzeugt werden kann, der mit der vorhandenen Datenstruktur nicht abgebildet werden kann.

In statistischen Untersuchungen können Systeme als reparierbar oder nicht reparierbar betrachtet werden. Reparierbare Systeme können mehrmals einen Schaden aufweisen und folglich jedesmal repariert werden. Der Zustand einer reparierbaren Leitung kann als „kaputt = aber noch in Betrieb“ und bei einer Erneuerung als „tot = ausgebaut“ klassifiziert werden. Nicht reparierbare Systeme weisen nur einen Leistungszyklus auf und werden im Schadensfalle ersetzt. In vielen durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen bezüglich Schadensprognose wurde der Einfluss der Reparatur und des Schadensbildes in der Prognose von zukünftigen Schadensereignissen nicht berücksichtigt.

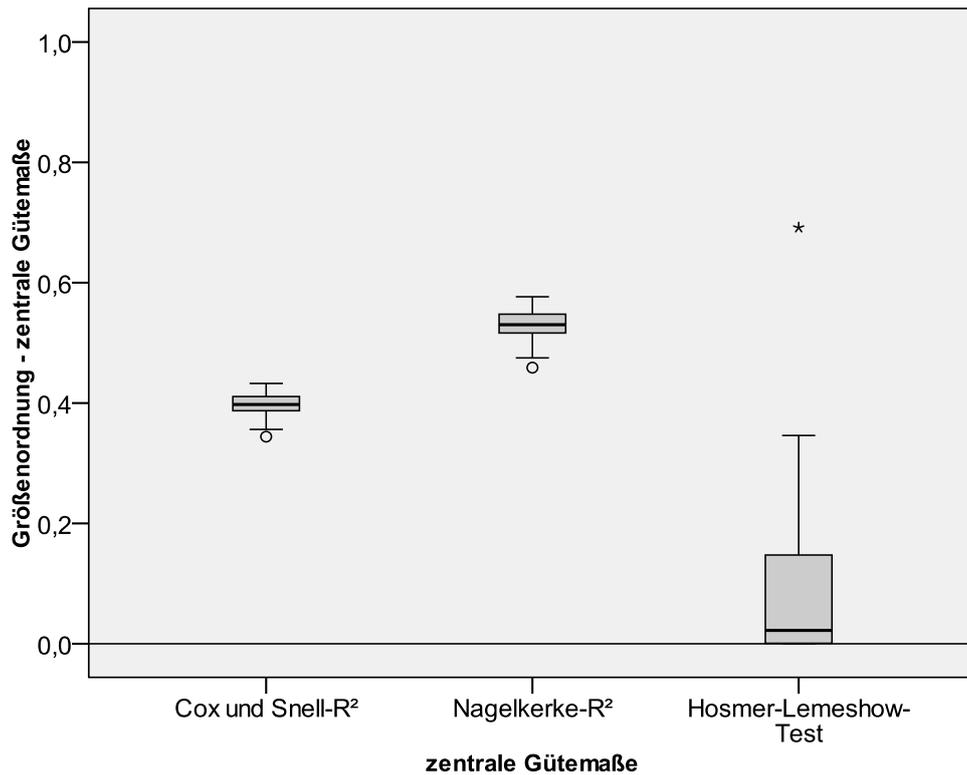
Das Hauptmerkmal der logistischen Regression ist, dass nicht die Gruppenzugehörigkeit ( $y = 1$ ) direkt modelliert wird, sondern die Wahrscheinlichkeit der Gruppenzugehörigkeit  $p$  ( $y = 1$ ). Die statistischen Berechnungen wurden in dieser Arbeit mit Hilfe der Software SPSS - Version 19, einem modular aufgebauten Programmpaket zur statistischen Analyse von Daten, ausgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen zahlenmäßigen Verteilung der Leitungen nach der Einteilung des Leitungszustandes in schadhafte und nicht schadhafte HZL, ergibt sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhafte HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhafte HZL (siehe folgende Auswertungen je Schadensart). Um diesen Effekt auszuschalten wurden 30 Einzelstichproben mittels Randomisierung gezogen (siehe Kapitel 7.3.2). Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Leitungszustandes wurden die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell, mittels der schrittweisen Rückwärts-Methode für die 30 randomisierten Stichproben, überprüft. Unter Verwendung der 30 zufällig gewählten Einzelstichproben wurden jeweils einzelne Regressionsmodelle berechnet. Für diese 30 Einzelmodelle wurden die Regressionsgleichung, die Gütemaße zur Beurteilung der Modellanpassung, die signifikanten Regressionskoeffizienten und die Odds Ratios je Regressionskoeffizient bestimmt. Die ermittelte Regressionsgleichung wurde mittels der Klassifizierung der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge kalibriert und schließlich am Gesamtdatensatz validiert.

#### 7.4.1.1 BLRA

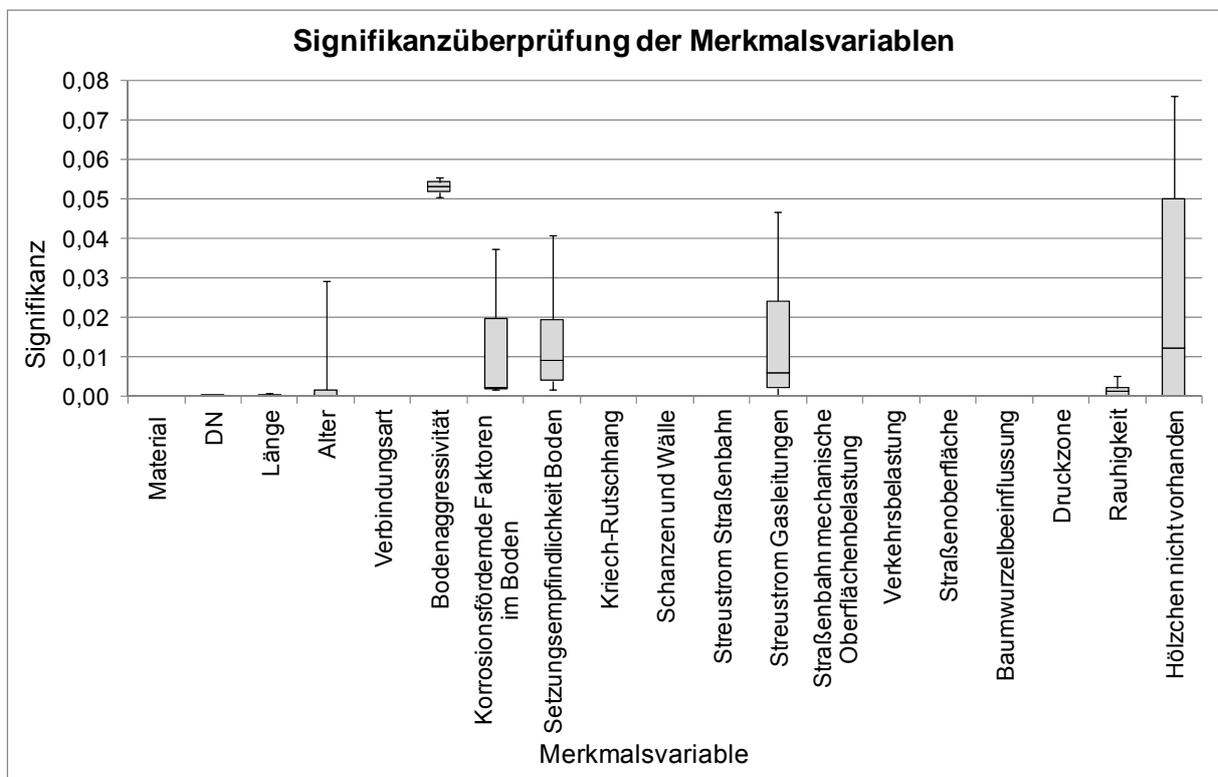
##### 7.4.1.1.1 BLRA Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU A

Aufgrund der Verteilung der Leitungen nach dem Leitungszustand mit 2,4 % schadhafte HZL (n = 394) und 97,6 % (n = 15 885) nicht schadhafte HZL ergibt sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhafte HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhafte HZL. Um diesen Effekt auszuschalten wurden 30 Einzelstichproben randomisiert gezogen. Diese Stichproben weisen 455 Schäden auf 394 HZL mit der Schadensart „Schaden allgemein“ und 455 nicht schadhafte HZL auf. HZL weisen vereinzelt mehrere Schäden, auch unterschiedlicher Schadensart, auf einem Abschnitt auf und daher werden in der Berechnung der BLRA die absolut beobachtete Schadensanzahl mit der Schadensart „Schaden allgemein“ und nicht die dahinter stehende Leitungsanzahl verwendet. Unter Anwendung der schrittweisen Rückwärts-Methode wurden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Zustandes „Schaden allgemein“ die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell für die 30 randomisierten Stichproben überprüft. Dabei ergaben sich bei Anwendung der schrittweisen Vorwärts- oder Rückwärts-Methode die gleichen Einflussvariablen als signifikant. Für die 30 zufällig gezogenen Stichproben wurden jeweils Regressionsgleichungen berechnet. Für diese 30 Einzelgleichungen wurden die Gütemaße zur Beurteilung der Modellanpassung berechnet. Die Verteilung der einzelnen Werte der 30 Gleichungen im Größenbereich von 0,40 für Cox und Snell-R<sup>2</sup> (entspricht guter Modellgüte) und > 0,5 für Nagelkerke-R<sup>2</sup> (entspricht sehr guter Modellgüte) sind in Abbildung 36 dargestellt. Mit dem Hosmer-Lemeshow-Test wird die Nullhypothese für die jeweiligen 30 Einzelstichproben, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich null ist, überprüft. In der dargestellten Verteilung für die 30 Einzelstichproben wird ersichtlich, dass das geforderte Signifikanzniveau von größer 70 % nicht erreicht wurde (siehe Abbildung 36).

Neun der 19 betrachteten Einflussfaktoren erwiesen sich in den 30 Einzelgleichungen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit „Schaden allgemein“ als nicht signifikant (siehe Abbildung 37) und wurden daher nicht in das Modell aufgenommen. Diese sind Verbindungsart, Kriech-Rutschhang, Schanzen und Wälle, Streustrom Straßenbahn, Straßenbahn mechanische Belastung, Verkehrsbelastung, Straßenoberfläche, Baumwurzelbeeinflussung und Druckzone.



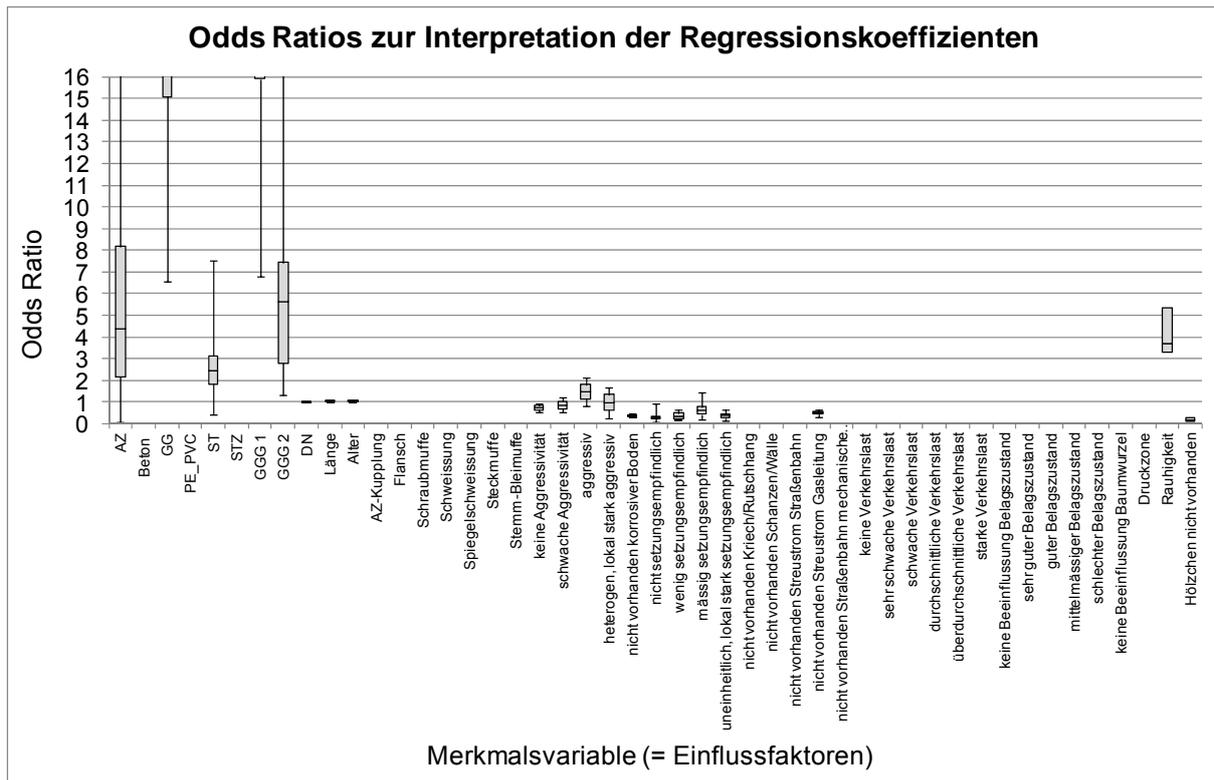
**Abbildung 36: Boxplot Pseudo-R<sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an 30 Einzelstichprobenmengen**



**Abbildung 37: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren (= Merkmalsvariablen)**

Die Einflussfaktoren Material, DN, Länge, Alter, korrosionsfördernde Faktoren im Boden, Setzungsempfindlichkeit Boden, Streustrom Gasleitungen und Rauigkeit weisen für alle 30 Stichproben geringe Streuungen in der Signifikanz auf und sind somit hoch signifikante unabhängige Einflussvariablen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit der Schadensart „Schaden allgemein“. Der Einflussfaktor Bodenaggressivität liegt im Signifikanzbereich von 5 bis 5,5 % und wird aufgrund der Nähe zum Ausschlussgrenzwert von 5 % in die Modellentwicklung mit einbezogen. Die unabhängige Variable „Hölzchen nicht vorhanden“ streut zwar sehr weit, gilt aber mit einem Medianwert von 1,2 % als signifikant und wurde daher in das Modell aufgenommen. In Abbildung 38 ist die Verteilung der Odds Ratios für die 30 Einzelgleichungen zur Interpretation aller signifikanten Regressionskoeffizienten dargestellt. Für die metrisch skalierten Einflussfaktoren Länge, Alter und Rauigkeit ergab ein Anstieg in der Größe des Einflusses auch ein Ansteigen der Auftrittswahrscheinlichkeit. Für den metrisch skalierten Einflussfaktor DN verhält es sich genau umgekehrt, d. h. eine Zunahme im DN ergab eine Verringerung der Auftrittswahrscheinlichkeit. Für den nominal skalierten Einflussfaktor Bodenaggressivität ergaben „keine“, „schwach aggressive Böden“ und „heterogen, lokal stark aggressive Böden“ eine Verringerung und „aggressive Böden“ ein Ansteigen der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit in Bezug zur Referenzkategorie „stark aggressive Böden“. Für den binär kodierten Einflussfaktor „korrosionsfördernder Boden“ ergibt das Vorhandensein eines „nicht korrosionsfördernden Bodens“ eine Verringerung der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit in Bezug zur Referenzkategorie „korrosionsfördernder Boden vorhanden“. Für den nominal kodierten Einflussfaktor Setzungsempfindlichkeit ergeben „nicht“, „wenig“, „mäßig“ und „uneinheitlich, lokal stark setzungsempfindliche Böden“ eine Verringerung der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit in Bezug zur Referenzkategorie „stark setzungsempfindliche Böden“. Ein „nicht Vorhandensein“ von Streustrom Gasleitung und Hölzchen resultiert in einer Abnahme der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit.

Bezogen auf die Referenzkategorie GGG 3 ergibt ein Medianwert für das Material AZ von 4,4, GG von 19, ST von 2,4, GGG 1 von 30,5 und GGG 2 von 5,6 einen Anstieg und im Gegensatz dazu ein Medianwert von jeweils null für die Materialien Beton, PE\_PVC und Steinzeug eine Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit.



**Abbildung 38: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten**

Die ermittelten 30 Regressionsgleichungen wurden anhand der Klassifizierungsergebnisse in Form der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge (= 910 HZL-Abschnitte) kalibriert (= Modell-Kalibrierung an randomisierten Datensätzen (# 910 HZL) mit 30 Einzelmodellen) und schließlich auf den Gesamtdatensatz von 16 279 HZL-Abschnitten validiert (= Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 16 279 HZL) mit 30 Einzelmodellen) (siehe Abbildung 39). Für die Modell-Kalibrierung an den randomisierten Datensätzen (# 910 HZL) mit den 30 Einzelgleichungen ergab sich eine Trefferquote im Bereich von 82 bis 87 % und eine Quote falscher Alarme von 20 bis 30 %. Für die Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 16 279 HZL) mit den 30 Einzelgleichungen resultierte eine Klassifizierungsgüte mit einer Trefferquote im Bereich von 82 bis 86 % und eine Quote falscher Alarme von 21 bis 28 %. In der Validierung der 30 Einzelgleichungen auf die gesamten 16 279 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 40) wurden für 10 089 Abschnitte (= 62 %) der beobachtete Leitungszustand von allen 30 Gleichungen richtig errechnet und für 2 193 Abschnitte (= 13,5 %) konnte keine der 30 Einzelgleichungen den beobachteten Zustand richtig ermitteln. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit den 30 Einzelgleichungen zeigt aufgrund des Stichprobeneffektes eine etwas geringere Trefferquote als die Modell-Kalibrierung mit den 30 randomisierten Stichproben. Die Streuung der Kalibrierungs- und Validierungspunkte im Klassifikationsdiagramm ist sehr gering und daher bilden die randomisierten Stichproben die Grundgesamtheit des Gesamtdatensatzes sehr gut ab. Zur Bestimmung der statistisch signifikantesten Einzelgleichung, welche den

Zusammenhang zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, werden die Validierungsergebnisse der 30 Einzelgleichungen mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei werden einerseits die erzeugten Flächen unterhalb der Punkte der Einzelgleichungen im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 39) und eine Residuen- bzw. Ausreißerdiagnostik je HZL-Abschnitt je Einzelgleichung als Rangordnungskriterium verwendet. Das Einzelmodell mit der Stichprobennummer 24 weist zur Berechnung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit „Schaden allgemein“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringsten Abweichungen in der Residuenanalyse auf und bildet somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 39). Die fünf Einflussfaktoren Material, DN, Länge, Alter und Streustrom Gasleitung bilden die signifikanten Einflussvariablen im finalen Einzelmodell 24.

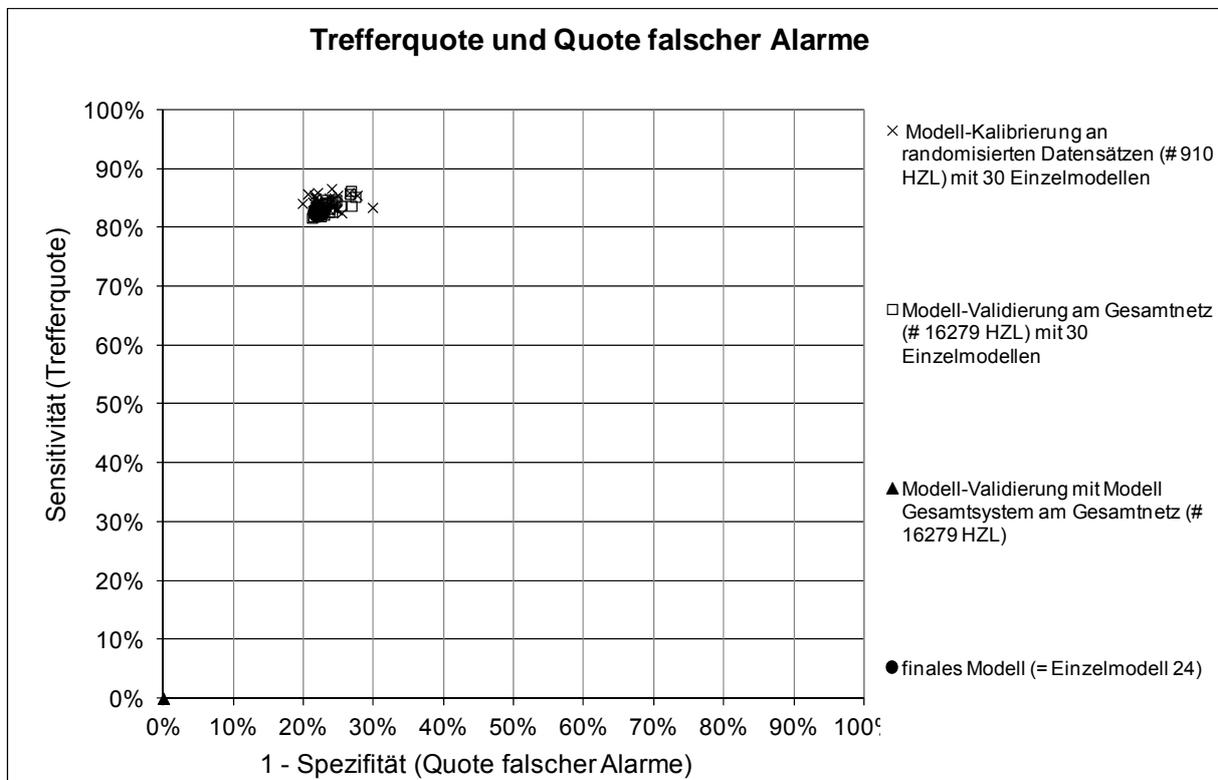
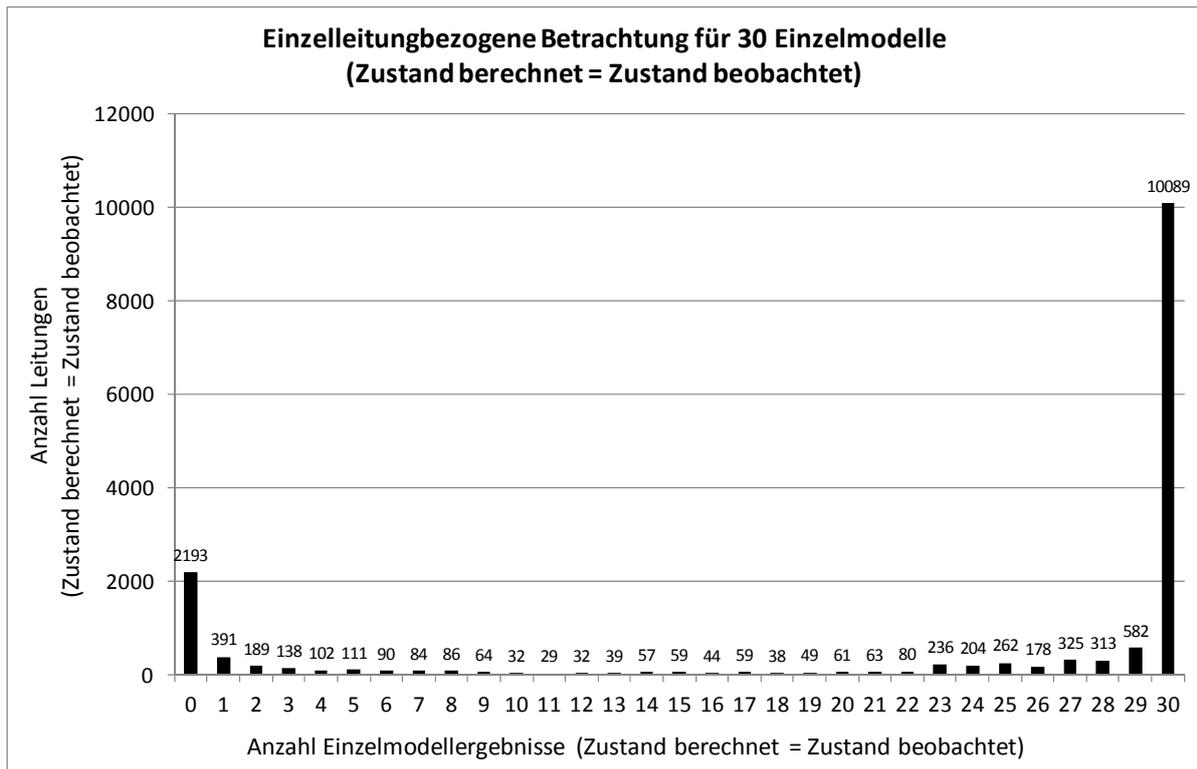


Abbildung 39: Trefferquote und Quote falscher Alarme

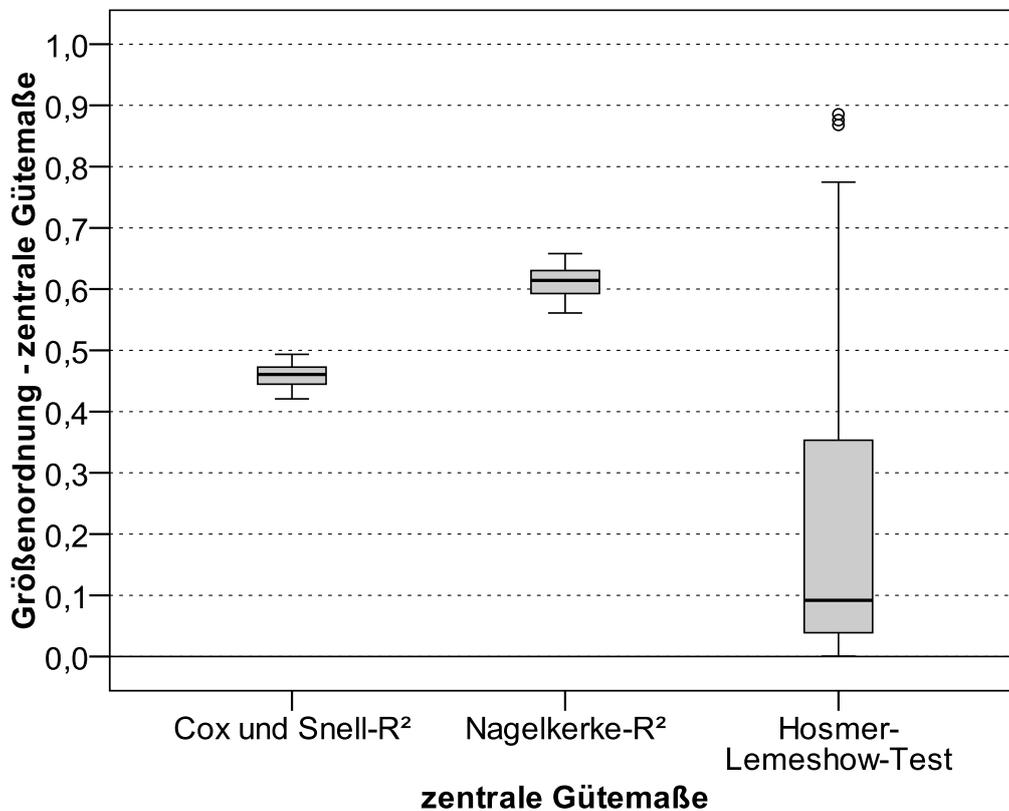


**Abbildung 40: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet**

#### 7.4.1.1.2 BLRA Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A

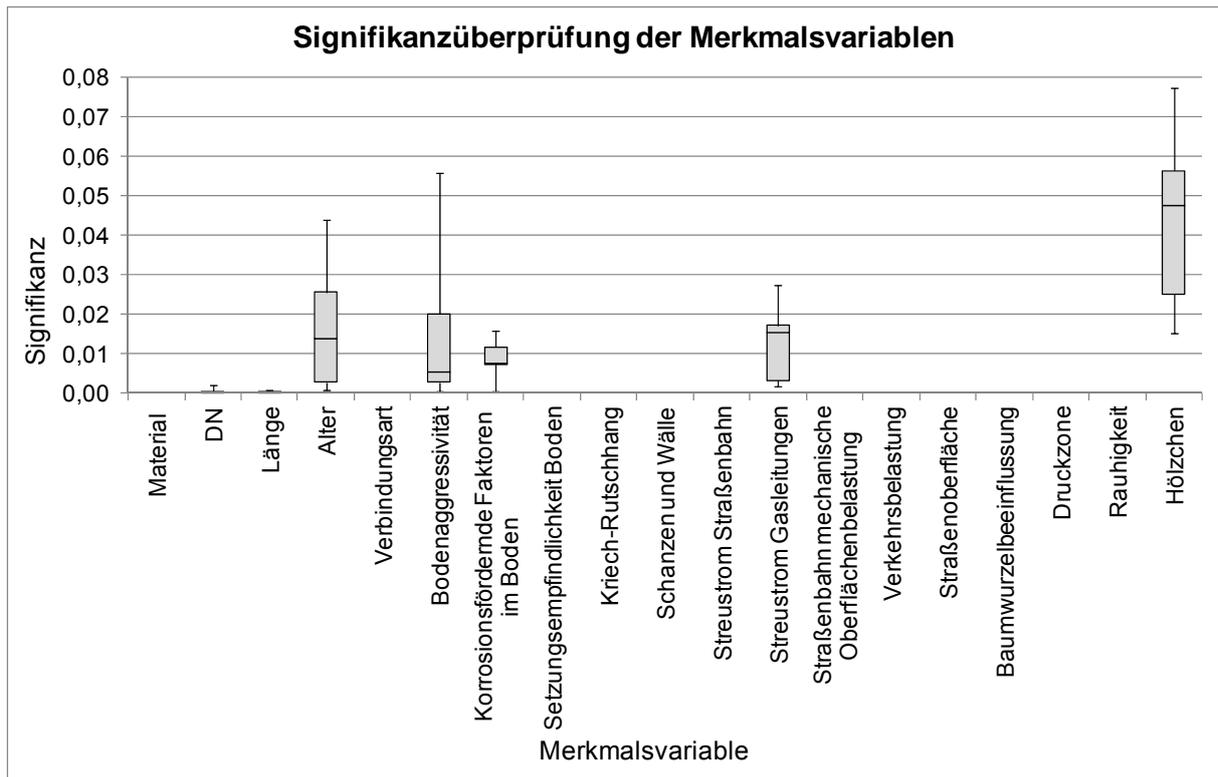
Aufgrund der Verteilung der Leitungen nach dem Leitungszustand mit 1,6 % schadhafte HZL (# 269) und 98,4 % (# 16 010) nicht schadhafte HZL ergibt sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhafte HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhafte HZL. Um diesen Effekt auszuschalten wurden 30 Einzelstichproben randomisiert gezogen. Diese Stichproben weisen 304 Schäden auf 269 HZL mit der Schadensart „Korrosionsloch“ und 304 nicht schadhafte HZL auf. HZL weisen vereinzelt mehrere Schäden, auch unterschiedlicher Schadensart, auf einem Abschnitt auf und daher werden in der Berechnung der BLRA die absolut beobachtete Schadensanzahl mit der Schadensart „Korrosionsloch“ und nicht die dahinter stehende Leitungsanzahl verwendet. Unter Anwendung der schrittweisen Rückwärts-Methode wurden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Zustandes „Korrosionsloch“ die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell für die 30 randomisierten Stichproben überprüft. Dabei ergaben sich bei Anwendung der schrittweisen Vorwärts- oder Rückwärts-Methode die gleichen Einflussvariablen als signifikant. Für die 30 zufällig gezogenen Stichproben wurden jeweils Regressionsgleichungen berechnet. Für diese 30 Einzelgleichungen wurden die Gütemaße zur Beurteilung der Modellanpassung berechnet. Die Verteilung der einzelnen Werte der 30 Gleichungen im Größenbereich von 0,46 für Cox und Snell-  $R^2$  (entspricht gute Modellgüte) und  $> 0,6$  für Nagelkerke- $R^2$  (entspricht sehr gute Modellgüte) sind in Abbildung 41 dargestellt. Mit dem Hosmer-

Lemeshow-Test wird die Nullhypothese für die jeweiligen 30 Einzelstichproben, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich null ist, überprüft. In der dargestellten Verteilung für die 30 Einzelstichproben wird ersichtlich, dass das geforderte Signifikanzniveau von größer 70 % nicht für alle 30 Einzelstichproben erreicht wird (siehe Abbildung 41).



**Abbildung 41: Boxplot Pseudo-R<sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge**

Elf der 19 betrachteten Einflussfaktoren erwiesen sich in den 30 Einzelgleichungen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit „Korrosionsloch“ als nicht signifikant (siehe Abbildung 42) und wurden daher nicht in das Modell aufgenommen. Diese sind Verbindungsart, Setzungsempfindlichkeit Boden, Kriech-Rutschhang, Schanzen und Wälle, Streustrom Straßenbahn, Straßenbahn mechanische Belastung, Verkehrsbelastung, Straßenoberfläche, Baumwurzelbeeinflussung, Druckzone bzw. Rohrrinnendruck und Rauigkeit.

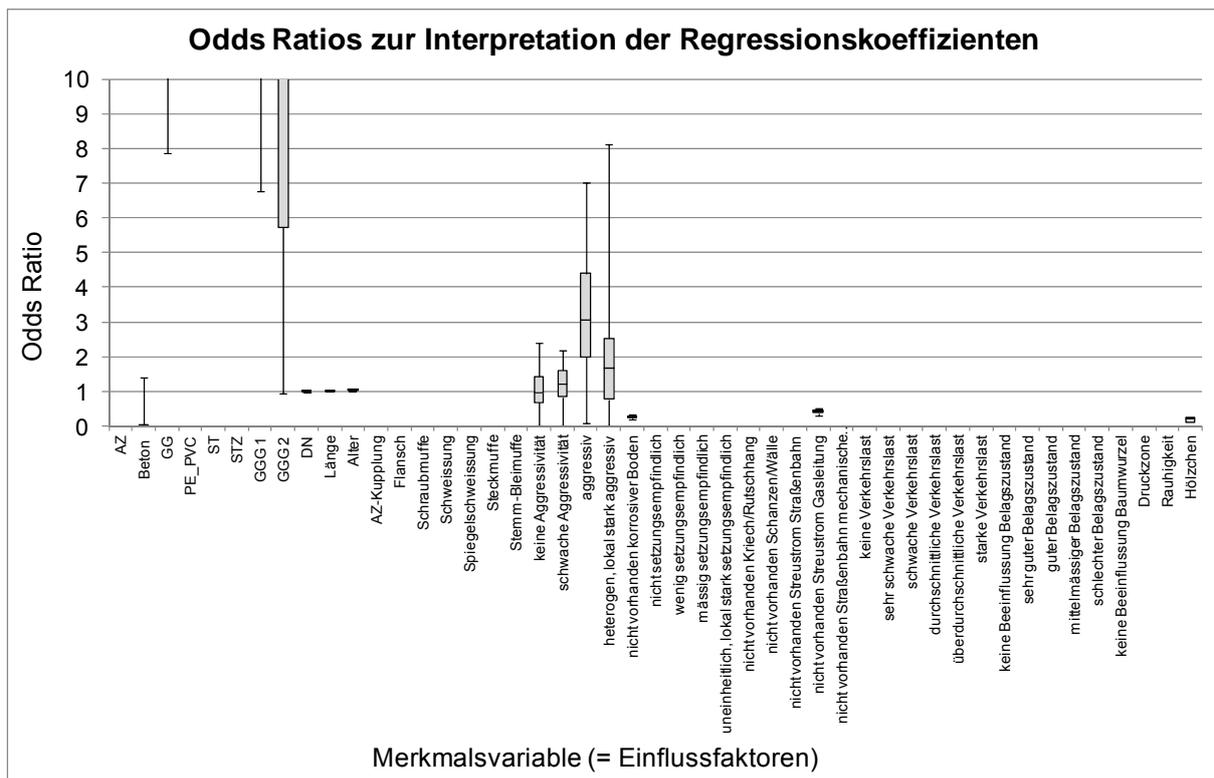


**Abbildung 42: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren**

Die Einflussfaktoren Material, DN, Länge, Alter, Bodenaggressivität, korrosionsfördernde Faktoren im Boden und Streustrom Gasleitungen weisen für alle 30 Stichproben geringe Streuungen in der Signifikanz auf und sind somit hochsignifikante unabhängige Einflussvariablen zur Berechnung der Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Korrosionsloch“. Die unabhängige Variable Hölzchen streut sehr weit und gilt aber mit einem Medianwert von 4,7 % als signifikant. In Abbildung 43 ist die Verteilung der Odds Ratios für die 30 Einzelgleichungen zur Interpretation aller signifikanten Regressionskoeffizienten dargestellt. Für die metrisch skalierten Einflussfaktoren Länge und Alter ergab ein Anstieg in der Größe des Einflusses auch ein Ansteigen der Auftretswahrscheinlichkeit. Für den metrisch skalierten Einflussfaktor DN verhält es sich genau umgekehrt, d. h. eine Zunahme im DN ergab eine Verringerung der Auftretswahrscheinlichkeit. Für den nominal skalierten Einflussfaktor Bodenaggressivität ergaben „kein aggressiver Boden“ eine Verringerung und „schwach aggressive“, „aggressive“ und „heterogen, lokal stark aggressive Böden“ ein Ansteigen der Schadensauftretswahrscheinlichkeit in Bezug zur Referenzkategorie „stark aggressive Böden“. Dies ist aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Leitungen in Bezug zur Kategorie Bodenaggressivität begründet. Für den binär kodierten Einflussfaktor „korrosionsfördernder Boden“ ergibt das Vorhandensein eines „nicht korrosionsfördernden Bodens“ eine Verringerung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit in Bezug zur Referenzkategorie „korrosionsfördernder Boden vorhanden“. Ein nicht Vorhandensein von Streustrom

Gasleitung und Hölzchen resultiert in einer Abnahme der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit.

Bezogen auf die Referenzkategorie GGG 3 ergibt ein Medianwert für das Material GG von 50, GGG 1 von 100 und GGG 2 von 15 einen Anstieg und im Gegensatz dazu die Materialart Beton eine Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit – alle anderen Materialarten sind nicht signifikant bzw. schadhafte Rohrleitungen aus Stahl, STZ und PE\_PVC liegen nicht vor.



**Abbildung 43: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten**

Die ermittelten Regressionsgleichungen wurden, siehe Abbildung 44, anhand der Klassifizierungsergebnisse in Form der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge (608 HZL-Abschnitte) kalibriert (= Modell-Kalibrierung an randomisierten Datensätzen (# 608 HZL) mit 30 Einzelmodellen) und schließlich auf den Gesamtdatensatz von 16 279 HZL-Abschnitten validiert (= Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 16 279 HZL) mit 30 Einzelmodellen).

Für die Modell-Kalibrierung an den randomisierten Datensätzen (# 608 HZL) mit den 30 Einzelgleichungen ergibt sich eine Trefferquote im Bereich von 80 bis 87 % und eine Quote falscher Alarme von 16 bis 24 %. Für die Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 16 279 HZL) mit den 30 Einzelgleichungen resultiert eine Klassifizierungsgüte mit einer Trefferquote im Bereich von 79 bis 86 % und eine Quote falscher Alarme von 20 bis 25 %. In der Validierung der 30 Einzelmodelle auf die gesamten 16 279 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 45) werden für 10 688 Abschnitte (= 66 %) für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand richtig

errechnet und für 2 250 Abschnitte (= 14 %) konnte keine der 30 Einzelgleichungen den beobachteten Zustand richtig ermitteln. Die Modellvalidierung am Gesamtnetz mit den 30 Einzelgleichungen zeigt aufgrund des Stichprobeneffektes eine etwas geringere Trefferquote als die Modell-Kalibrierung mit den 30 randomisierten Stichproben. Die Streuung der Kalibrierungs- und Validierungspunkte im Klassifikationsdiagramm ist sehr gering und daher bilden die randomisierten Stichproben die Grundgesamtheit des Gesamtdatensatzes sehr gut ab. Zur Bestimmung der statistisch signifikantesten Einzelgleichung, welche den Zusammenhang zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, werden die Validierungsergebnisse der 30 Einzelgleichungen mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei werden einerseits die erzeugten Flächen unterhalb der Punkte der Einzelgleichungen im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 44) und eine Residuen- bzw. Ausreißerdiagnostik je HZL-Abschnitt je Einzelgleichung als Rangordnungskriterium verwendet. Das Einzelmodell mit der Stichprobennummer 01 weist zur Berechnung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit „Korrosionsloch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringsten Abweichungen in der Residuenanalyse auf und bildet somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 44). Die fünf Einflussfaktoren Material, DN, Länge, Alter und Hölzchen bilden die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell 01.

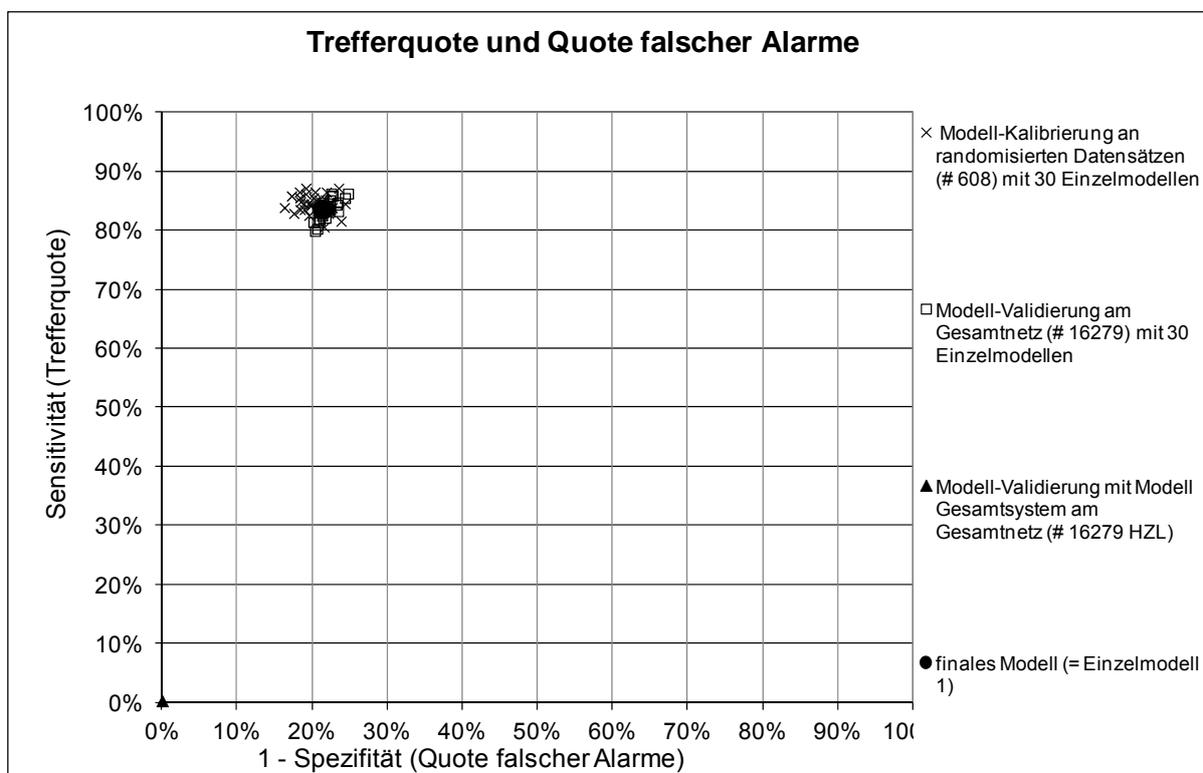
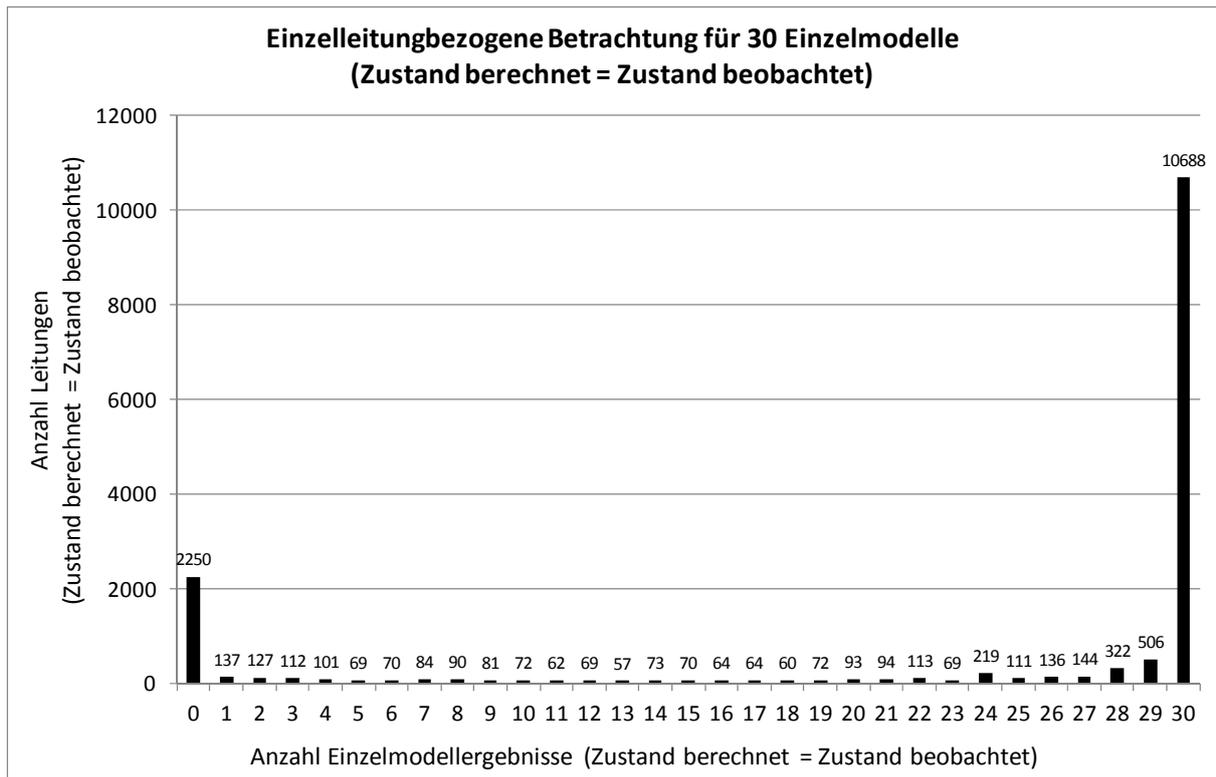


Abbildung 44: Trefferquote und Quote falscher Alarme

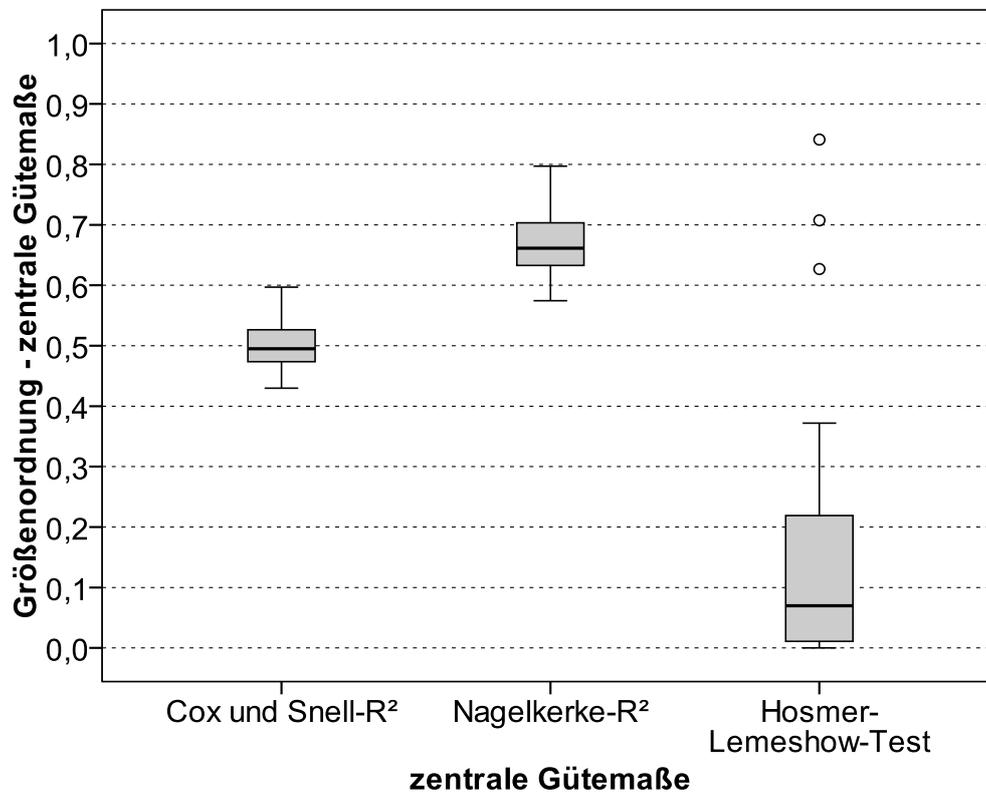


**Abbildung 45: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet**

#### 7.4.1.1.3 BLRA Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - WVU A

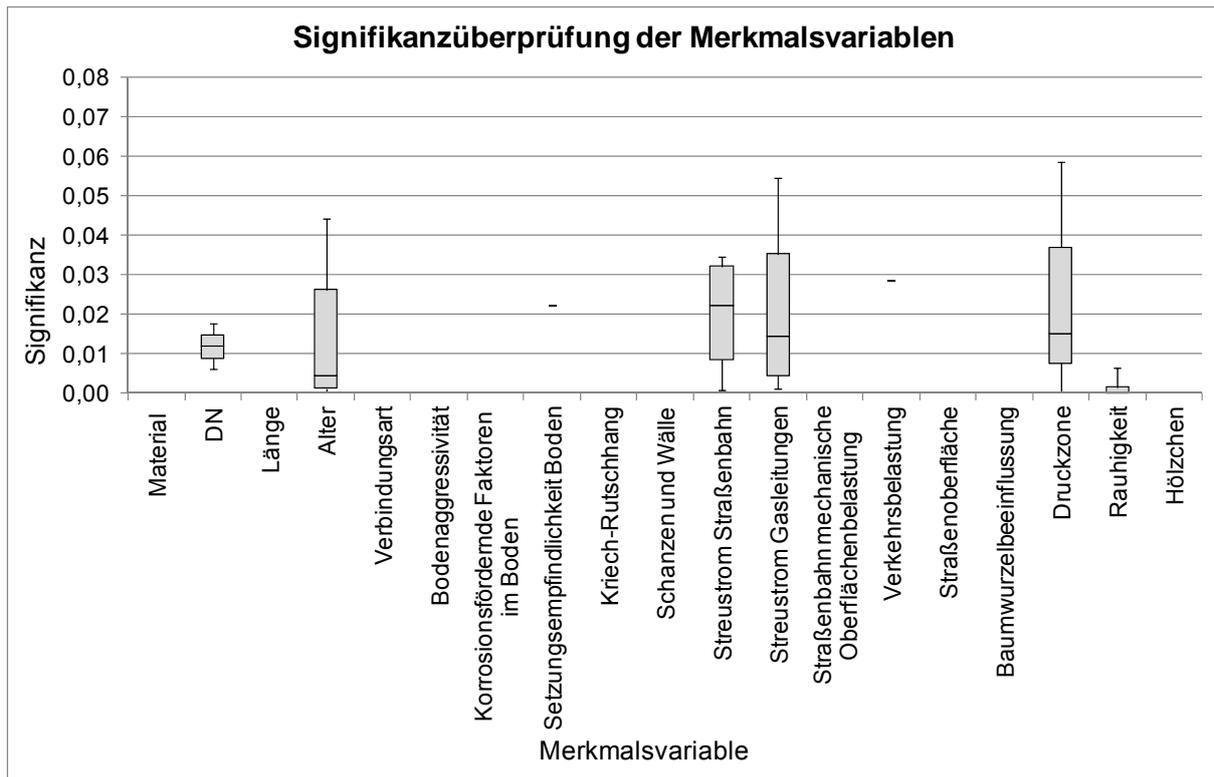
Aufgrund der Verteilung der Leitungen nach dem Leitungszustand mit 0,5 % schadhaften HZL (# 83) und 99,5 % (# 16 196) nicht schadhaften HZL ergibt sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhaften HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhaften HZL. Um diesen Effekt auszuschalten wurden 30 Einzelstichproben randomisiert gezogen. Diese Stichproben weisen 102 Schäden auf 83 HZL mit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ und 102 nicht schadhafte HZL auf. HZL weisen vereinzelt mehrere Schäden, auch unterschiedlicher Schadensart, auf einem Abschnitt auf und daher werden in der Berechnung der BLRA die absolut beobachtete Schadensanzahl mit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ und nicht die dahinter stehende Leitungsanzahl verwendet. Unter Anwendung der schrittweisen Rückwärts-Methode wurden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Zustandes die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell für die 30 randomisierten Stichproben überprüft. Dabei ergaben sich bei Anwendung der schrittweise Vorwärts- oder Rückwärts-Methode die gleichen Einflussvariablen als signifikant. Für die 30 zufällig gezogenen Stichproben wurden jeweils Regressionsgleichungen berechnet. Für diese 30 Einzelgleichungen wurden die Gütemaße zur Beurteilung der Modellanpassung berechnet. Die Verteilung der einzelnen Werte der 30 Gleichungen im Größenbereich von 0,49 für Cox und Snell-  $R^2$  (entspricht guter Modellgüte) und  $> 0,66$  (entspricht sehr guter Modellgüte) für Nagelkerke- $R^2$  sind in Abbildung 46

dargestellt. Mit dem Hosmer-Lemeshow-Test wird die Nullhypothese für die jeweiligen 30 Einzelstichproben, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich null ist, überprüft. In der dargestellten Verteilung für die 30 Einzelstichproben wird ersichtlich, dass das geforderte Signifikanzniveau von größer 70 % nicht für alle Stichproben erreicht wurde (siehe Abbildung 46).



**Abbildung 46: Boxplot Pseudo-R<sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge**

Elf der 19 betrachteten Einflussfaktoren erwiesen sich in den 30 Einzelgleichungen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ als nicht signifikant (siehe Abbildung 47) und wurden daher nicht in das Modell aufgenommen. Diese sind Material, Länge, Verbindungsart, Bodenaggressivität, korrosionsfördernde Faktoren im Boden, Kriech-Rutschhang, Schanzen und Wälle, Straßenbahn mechanische Belastung, Straßenoberfläche, Baumwurzelbeeinflussung und Hölzchen.



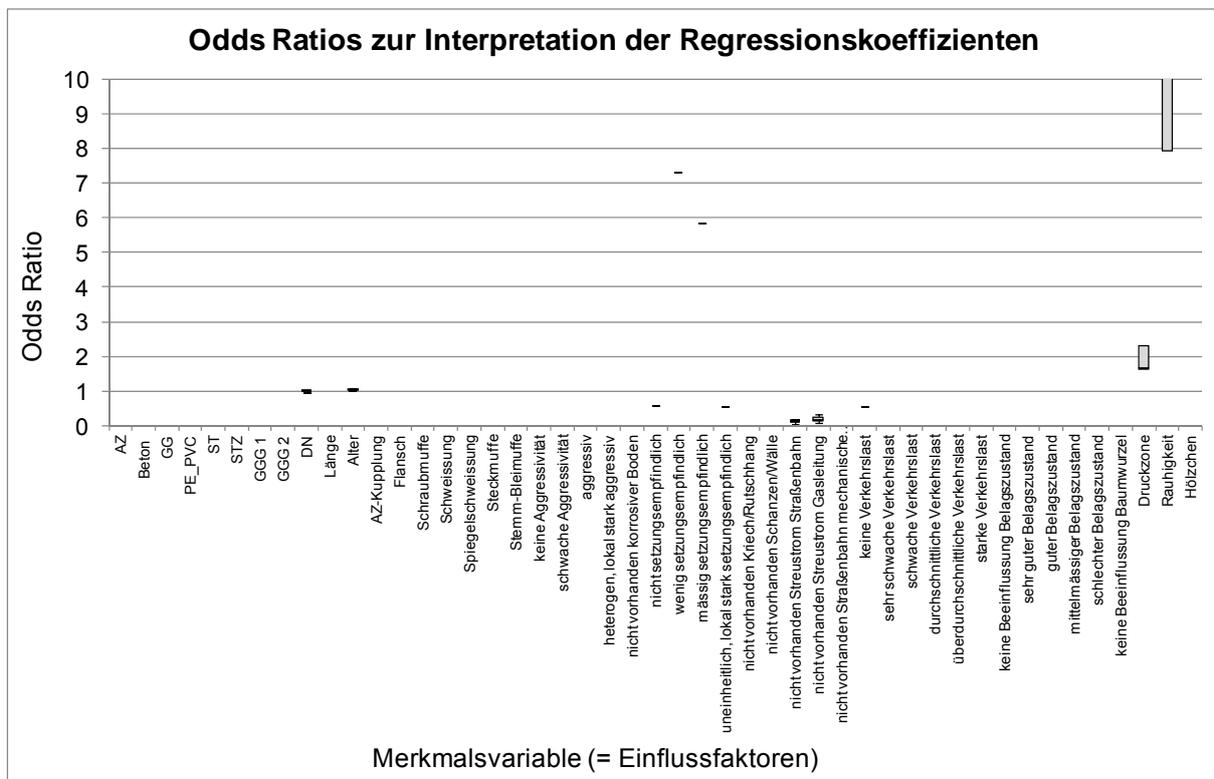
**Abbildung 47: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren**

Die Einflussfaktoren DN, Alter, Setzungsempfindlichkeit, Streustrom Straßenbahn, Streustrom Gasleitungen, Verkehrsbelastung, Druckzone und Rauigkeit bilden die signifikanten unabhängigen Variablen für alle 30 Stichproben zur Berechnung der Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“. In Abbildung 48 ist die Verteilung der Odds Ratios für die 30 Einzelmodelle zur Interpretation aller signifikanten Regressionskoeffizienten dargestellt. Für die metrisch skalierten Einflussfaktoren Alter, Druck und Rauigkeit ergibt ein Anstieg in der Größe des Einflusses auch ein Ansteigen der Auftretswahrscheinlichkeit. Für den metrisch skalierten Einflussfaktor DN verhält es sich genau umgekehrt – eine Zunahme im DN ergibt eine Verringerung der Auftretswahrscheinlichkeit der spezifischen Schadensart „Rundriss/Längsriss/ Scherbenbruch“.

Für den nominal skalierten Einflussfaktor Setzungsempfindlichkeit von Böden ergeben „nicht setzungsempfindliche“ und „uneinheitlich, lokal stark setzungsempfindliche Böden“ eine Verringerung und „wenig“ und „schwach setzungsempfindliche Böden“ ein Ansteigen der Schadensauftretswahrscheinlichkeit in Bezug zur Referenzkategorie „stark setzungsempfindliche Böden“. Dies ist aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Leitungen in Bezug zur Kategorie Setzungsempfindlichkeit begründet. Ein nicht Vorhandensein von Streustrom Straßenbahn und Streustrom Gasleitung resultiert in einer Abnahme der Schadensauftretswahrscheinlichkeit.

Für den nominal skalierten Einflussfaktor Verkehrsbelastung ergeben „keine Verkehrslast“, „sehr schwache“ und „durchschnittliche Verkehrslast“ eine

Verringerung und „schwache“ und „überdurchschnittliche Verkehrslast“ ein Ansteigen der Schadensauftretswahrscheinlichkeit in Bezug zur Referenzkategorie „stark Verkehrsbelastung“.

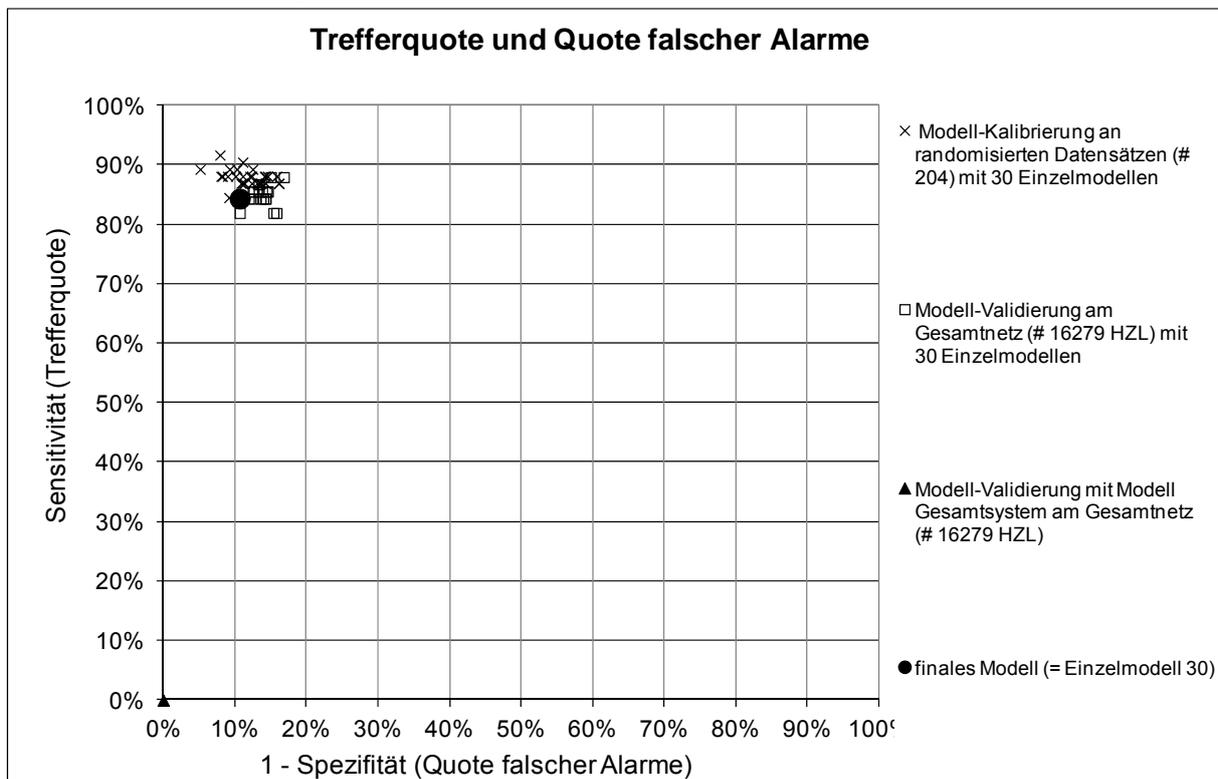


**Abbildung 48: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten**

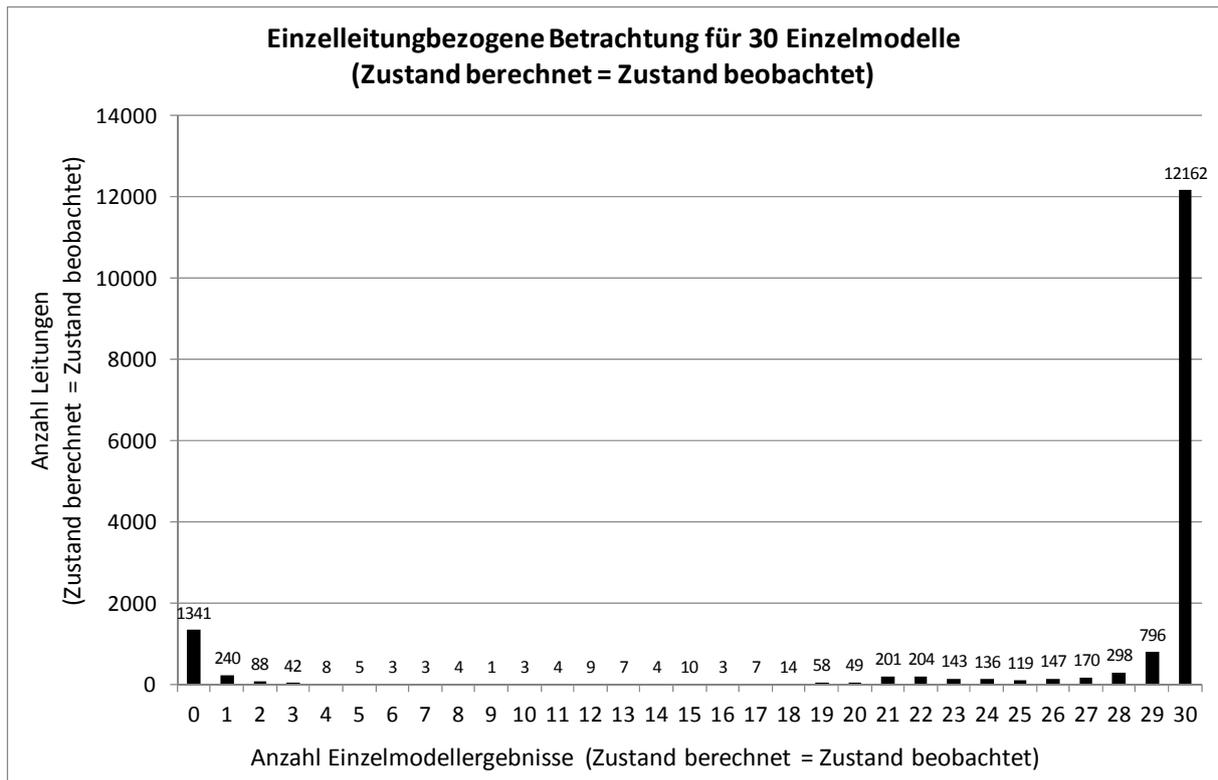
Die ermittelten Regressionsgleichungen wurden anhand der Klassifizierungsergebnisse in Form der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge (204 HZL-Abschnitte) kalibriert (= Modell-Kalibrierung an randomisierten Datensätzen (# 204 HZL) mit 30 Einzelmodellen) und schließlich auf den Gesamtdatensatz von 16 279 HZL-Abschnitten validiert (= Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 16 279 HZL) mit 30 Einzelmodellen).

Für die Modell-Kalibrierung an den randomisierten Datensätzen (# 204 HZL) mit den 30 Einzelgleichungen ergab sich eine Trefferquote im Bereich von 84 bis 92 % und eine Quote falscher Alarme von 5 bis 16 %. Für die Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 16 279 HZL) mit den 30 Einzelmodellen resultierte eine Klassifizierungsgüte mit einer Trefferquote im Bereich von 82 bis 88 % und eine Quote falscher Alarme von 10 bis 17 %. In der Validierung der 30 Einzelmodelle auf die gesamten 16 279 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 50) wurden für 12 162 Abschnitte (= 75 %) für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand von allen 30 Gleichungen errechnet, wobei für verbleibende 1 341 Abschnitte (= 8 %) konnte keine der 30 Einzelgleichungen den beobachteten Zustand richtig ermitteln. Die Modellvalidierung am Gesamtnetz mit den 30 Einzelgleichungen zeigte aufgrund des Stichprobeneffektes eine etwas geringere Trefferquote als die Modell-Kalibrierung mit den 30 randomisierten Stichproben. Die Streuung der Kalibrierungs-

und Validierungspunkte im Klassifikationsdiagramm ist sehr gering und daher bilden die randomisierten Stichproben die Grundgesamtheit des Gesamtdatensatzes sehr gut ab. Zur Bestimmung der statistisch signifikantesten Einzelgleichung, welche den Zusammenhang zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, werden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei werden einerseits die maximal erzeugten Flächen unterhalb der Punkte der Einzelgleichungen im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 49) und eine Residuen- bzw. Ausreißerdiagnostik je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet. Das Einzelmodell 30 weist zur Berechnung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit „Rundriss/Längsriss/ Scherbenbruch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringsten Abweichungen in der Residuenanalyse auf und bildet somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 49). Die zwei Einflussfaktoren Alter und Rauigkeit bilden die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell 30.



**Abbildung 49: Trefferquote und Quote falscher Alarme**

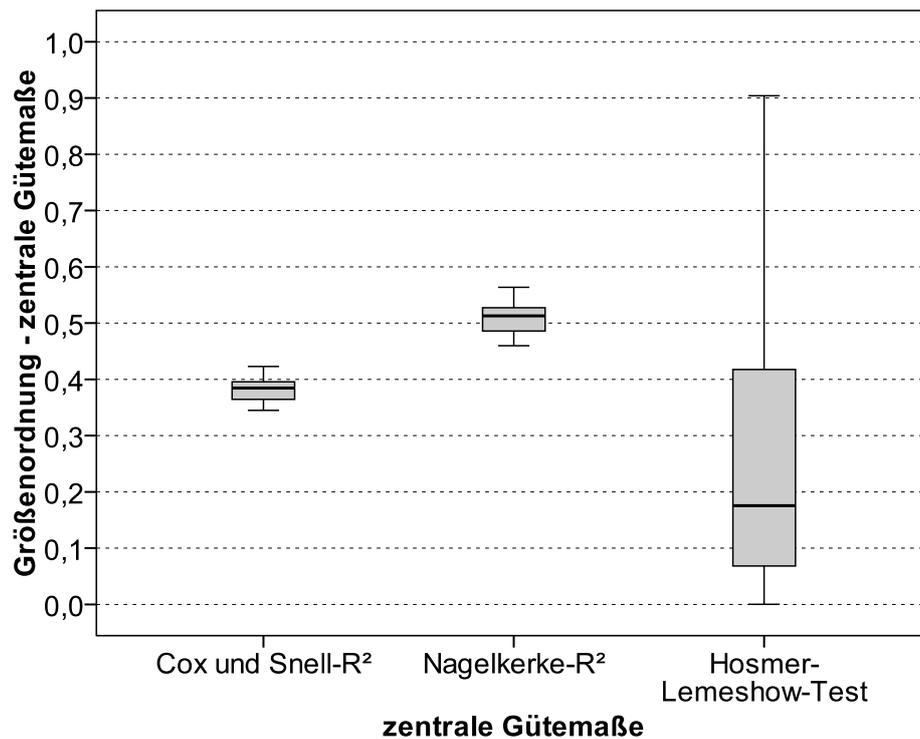


**Abbildung 50: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet**

#### 7.4.1.1.4 BLRA Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU B

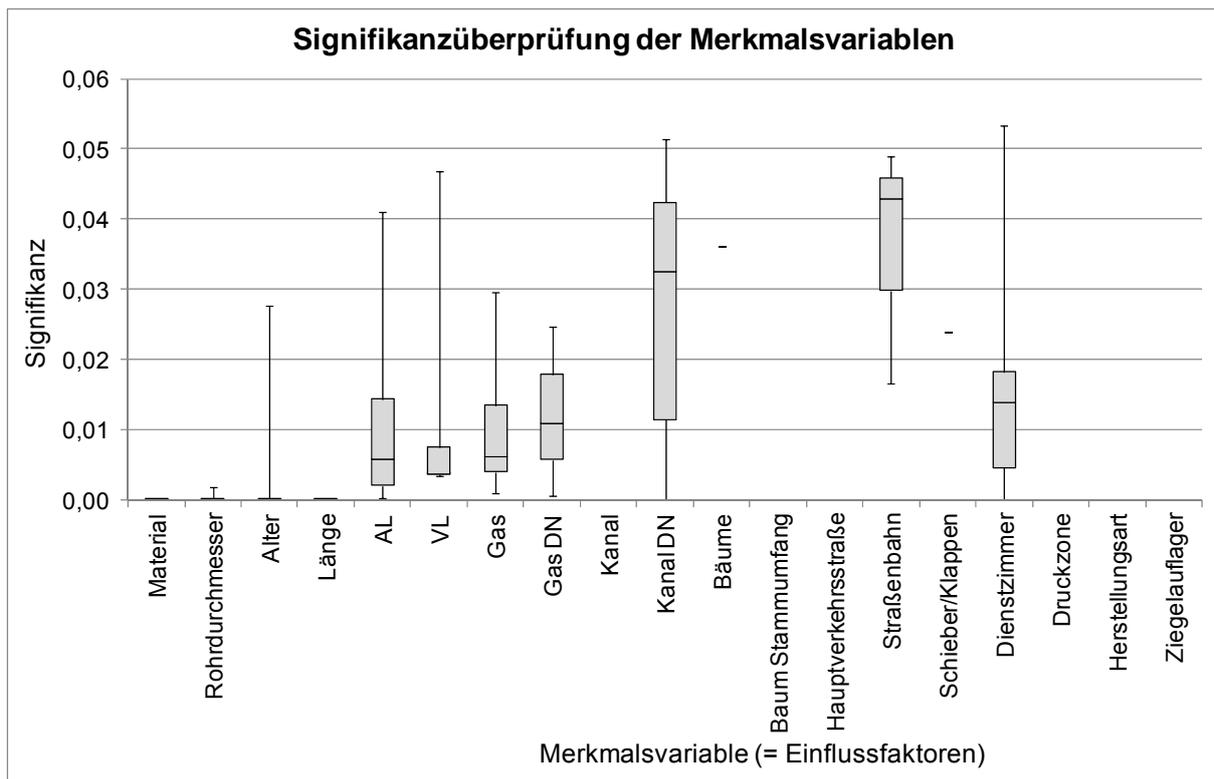
Aufgrund der Verteilung der Leitungen nach dem Leitungszustand mit 6 % schadhaften HZL (# 226) und 94 % (# 3 500) nicht schadhaften HZL ergibt sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhaften HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhaften HZL. Um diesen Effekt auszuschalten wurden 30 Einzelstichproben randomisiert gezogen. Diese Stichproben weisen 324 Schäden auf 226 HZL mit der Schadensart „Schaden allgemein“ und 324 nicht schadhafte HZL auf. HZL weisen vereinzelt mehrere Schäden, auch unterschiedlicher Schadensart, auf einem Abschnitt auf und daher wurden in der Berechnung der BLRA die absolut beobachtete Schadensanzahl mit der Schadensart „Schaden allgemein“ und nicht die dahinter stehende Leitungsanzahl verwendet. Jedoch bezieht sich die Validierung der Einzelmodelle auf das Gesamtnetz und somit auf die tatsächliche gesamte Leitungsanzahl. Unter Anwendung der schrittweisen Rückwärts-Methode wurden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Zustandes „Schaden allgemein“ die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell für die 30 randomisierten Stichproben überprüft. Dabei ergeben sich bei Anwendung der schrittweise Vorwärts- oder Rückwärts-Methode die gleichen Einflussvariablen als signifikant. Für die 30 zufällig gezogenen Stichproben wurden jeweils Regressionsgleichungen berechnet. Für diese 30 Einzelmodelle wurden die Gütemaße zur Beurteilung der Modellanpassung berechnet. Die Verteilung der einzelnen Werte der 30 Gleichungen im Größenbereich von knapp unter 0,40 für Cox

und Snell-  $R^2$  (entspricht guter Modellgüte) und 0,5 für Nagelkerke- $R^2$  (entspricht sehr guter Modellgüte) sind in Abbildung 51 dargestellt. Mit dem Hosmer-Lemeshow-Test wurde die Nullhypothese für die jeweiligen 30 Einzelstichproben, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich null ist, überprüft. In der dargestellten Verteilung für die 30 Einzelstichproben wurde ersichtlich, dass das geforderte Signifikanzniveau von größer 70 % für einen Großteil der 30 Stichproben nicht erreicht wurde (siehe Abbildung 51).



**Abbildung 51: Boxplot Pseudo- $R^2$  Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge**

Sechs der 19 betrachteten Einflussfaktoren erwiesen sich in den 30 Einzelgleichungen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit „Schaden allgemein“ als nicht signifikant (siehe Abbildung 52) und wurden daher nicht in das Modell aufgenommen. Diese sind Kanal, Baum Stammumfang, Einfluss von Hauptverkehrsstraßen, Druckzone, Herstellungsart und Ziegelaufleger.

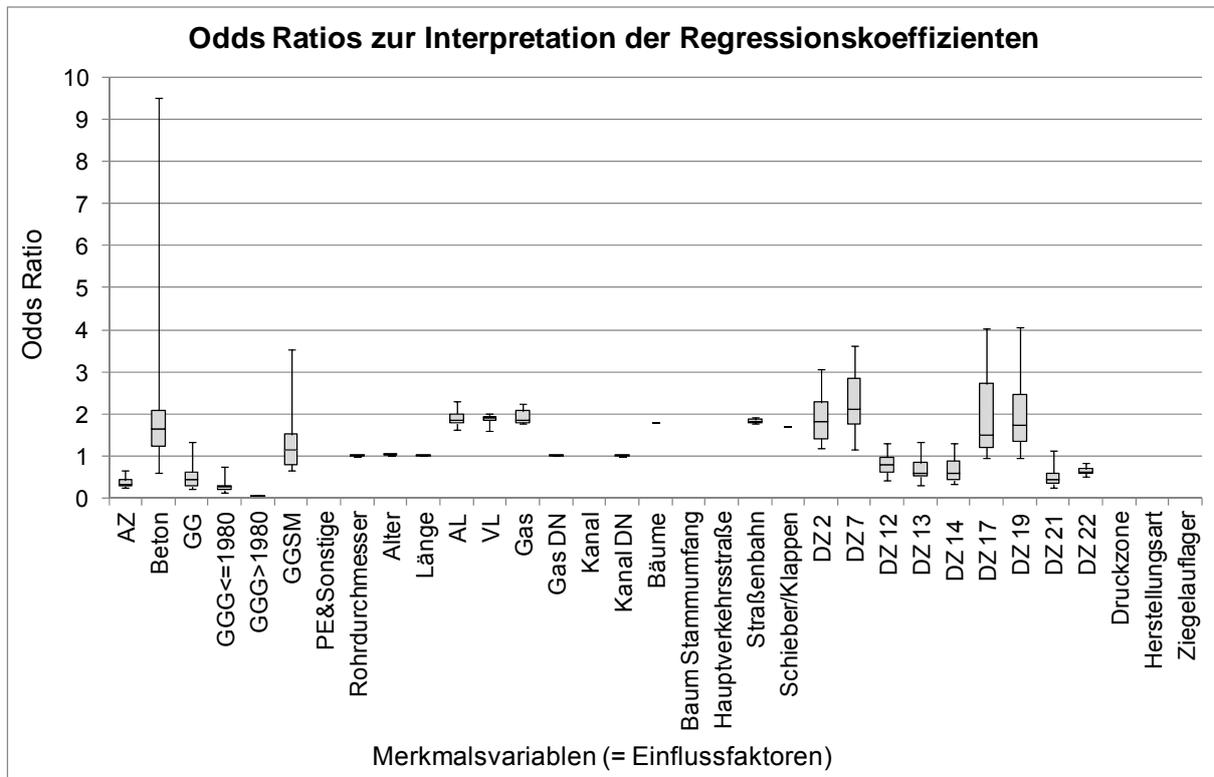


**Abbildung 52: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren**

Die Einflussfaktoren Material, Rohrdurchmesser, Alter (ausser für eine Stichprobe) und Länge der HZL weisen für alle 30 Stichproben geringe Streuungen in der Signifikanz auf und stellen gemeinsam mit AL, VL und Gas mit Medianwerten < 0,01 hochsignifikante unabhängige Einflussvariable zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit der Schadensart „Schaden allgemein“ dar. Alle restlichen Merkmalsvariablen weisen eine gewisse Streuung in der Signifikanz für die 30 betrachteten Einzelmodelle mit Medianwerten im Bereich kleiner 5 % auf und sind somit auch als signifikant zu betrachten.

In Abbildung 53 ist die Verteilung der Odds Ratios für die 30 Einzelgleichungen zur Interpretation aller signifikanten Regressionskoeffizienten dargestellt. Für die metrisch skalierten Einflussfaktoren Alter, Länge, Gas DN und Kanal DN ergab ein Anstieg in der Größe des Einflusses auch ein Ansteigen der Auftrittswahrscheinlichkeit. Für den metrisch skalierten Einflussfaktor Rohrdurchmesser verhält es sich genau umgekehrt, d. h. eine Zunahme im Rohrdurchmesser ergab eine Verringerung der Auftrittswahrscheinlichkeit der spezifischen Schadensart „Schaden allgemein“. Für die binär kodierten Einflussfaktoren AL, VL, Gas, Bäume, Straßenbahn und Schieber/Klappen ergab eine Beeinflussung bzw. das Vorhandensein dieser Faktoren ein Ansteigen der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit. Für die in diesem Beispiel signifikanten nominal skalierten Einflussfaktoren Material und Dienstzimmer (DZ) ist das Definieren einer Referenzkategorie notwendig. Bezogen auf die Referenzkategorie Stahl ergaben die Materialien Beton und GGSM mit Medianwerten > 1 ein Ansteigen und im Gegensatz dazu alle anderen Materialien eine Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit in

Bezug zur Materialart ST. Die DZ 2, 7, 17, und 19 bewirkten einen Anstieg bzw. alle restlichen DZ eine Verringerung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit bezogen auf das Referenz-DZ 23.

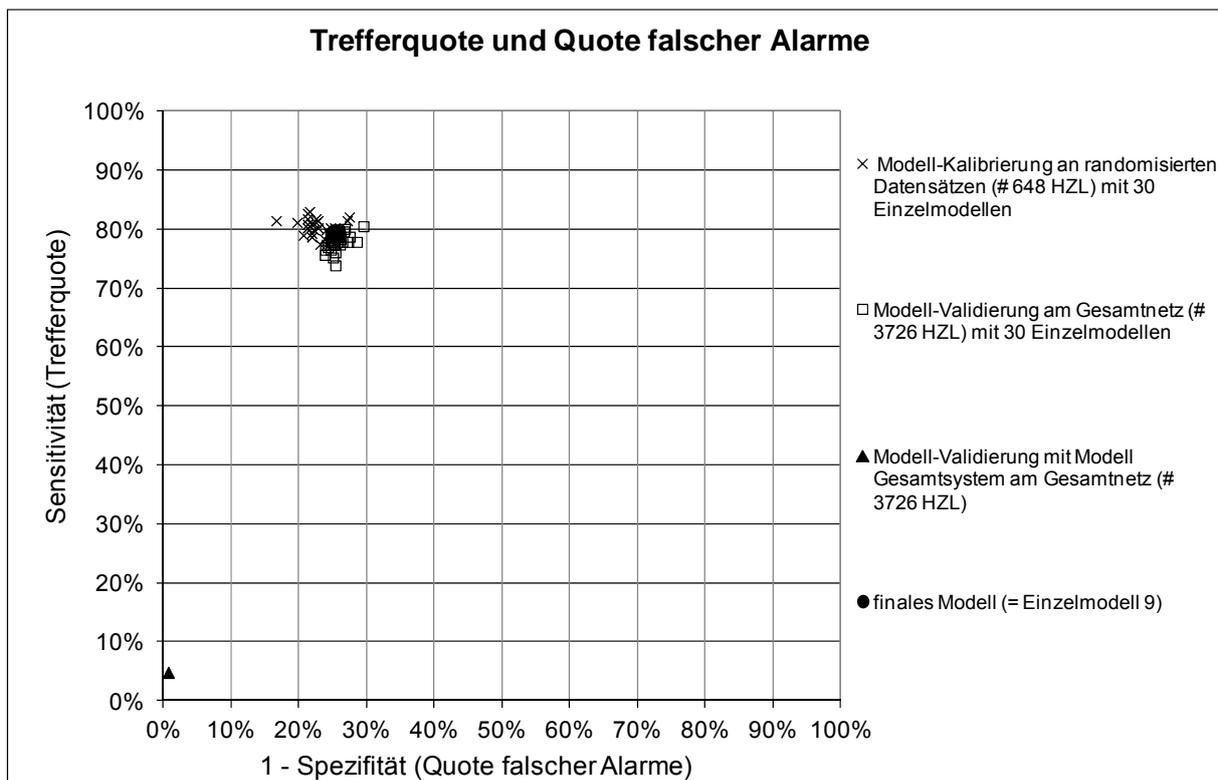


**Abbildung 53: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten**

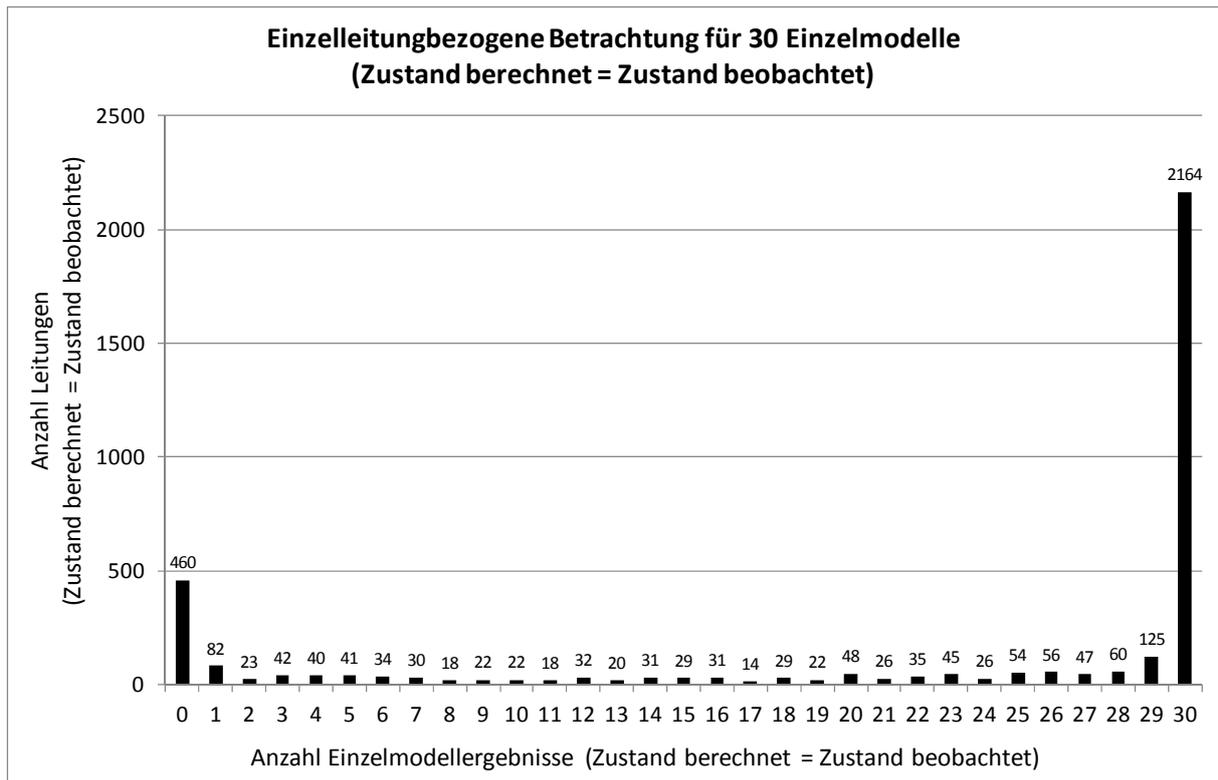
Die ermittelten Regressionsgleichungen wurden anhand der Klassifizierungsergebnisse in Form der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge (648 HZL-Abschnitte) kalibriert (= Modell-Kalibrierung an randomisierten Datensätzen (# 648 HZL) mit 30 Einzelmodellen) und schließlich auf den Gesamtdatensatz von 3 726 HZL-Abschnitten validiert (= Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3726 HZL) mit 30 Einzelmodellen).

Für die Modell-Kalibrierung an den randomisierten Datensätzen (# 648 HZL) mit den 30 Einzelgleichungen ergab sich eine Trefferquote im Bereich um 80 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 20 bis 25 %. Für die Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3 726 HZL) mit den 30 Einzelgleichungen resultierte eine etwas geringere Klassifizierungsgüte mit einer Trefferquote im Bereich von 75 bis 80 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 25 bis 30 %. In der Validierung der 30 Einzelgleichungen auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 55) werden für 2 164 Abschnitte (= 58 %) für alle Einzelgleichungen der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 460 Abschnitte (= 12 %) keines der 30 Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte. Die Modellvalidierung am Gesamtnetz mit den 30 Einzelgleichungen zeigte aufgrund des Stichprobeneffektes eine etwas geringere Trefferquote als die Modell-Kalibrierung mit den 30 randomisierten Stichproben. Die Streuung der Kalibrierungs- und

Validierungspunkte im Klassifikationsdiagramm ist sehr gering und daher bilden die randomisierten Stichproben die Grundgesamtheit des Gesamtdatensatzes sehr gut ab. Zur Bestimmung der statistisch signifikantesten Einzelgleichung, welche den Zusammenhang zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die maximal erzeugten Flächen unterhalb der Punkte der Einzelgleichungen im Klassifikationsdiagramm und eine Residuen- bzw. Ausreißerdiagnostik je HZL-Abschnitt je Einzelgleichung als Rangordnungskriterium verwendet. Das Einzelmodell 09 weist zur Berechnung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit „Schaden allgemein“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringsten Abweichungen in der Residuenanalyse auf und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 54). Die sechs Einflussfaktoren Material, Rohrdurchmesser, Alter, Länge, AL und Kanal DN bilden die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell 9.



**Abbildung 54: Trefferquote und Quote falscher Alarme**

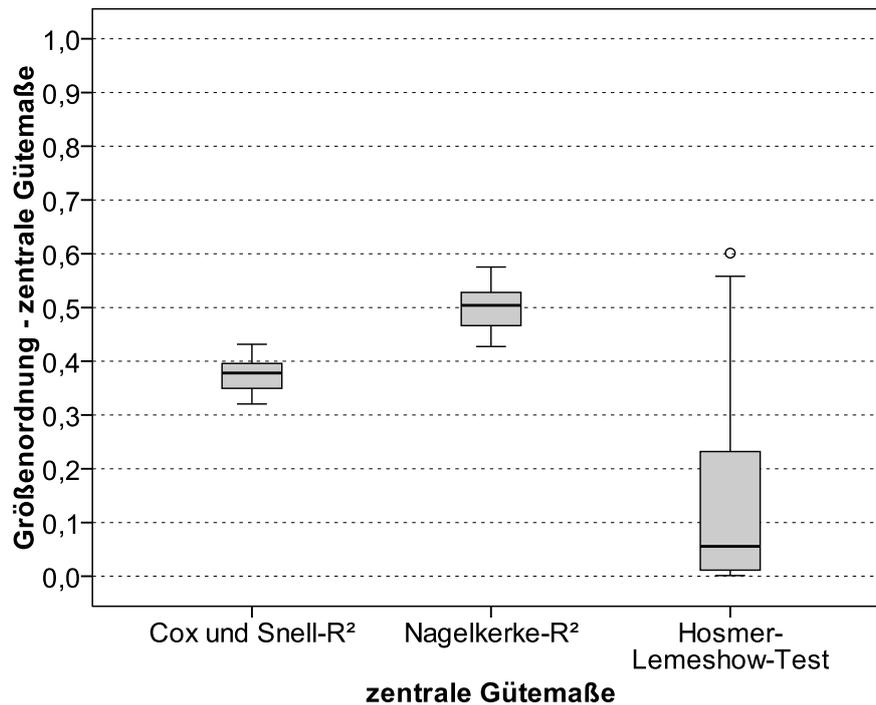


**Abbildung 55: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet**

#### 7.4.1.1.5 BLRA Schadensart „Verbindung undicht“ – WVU B

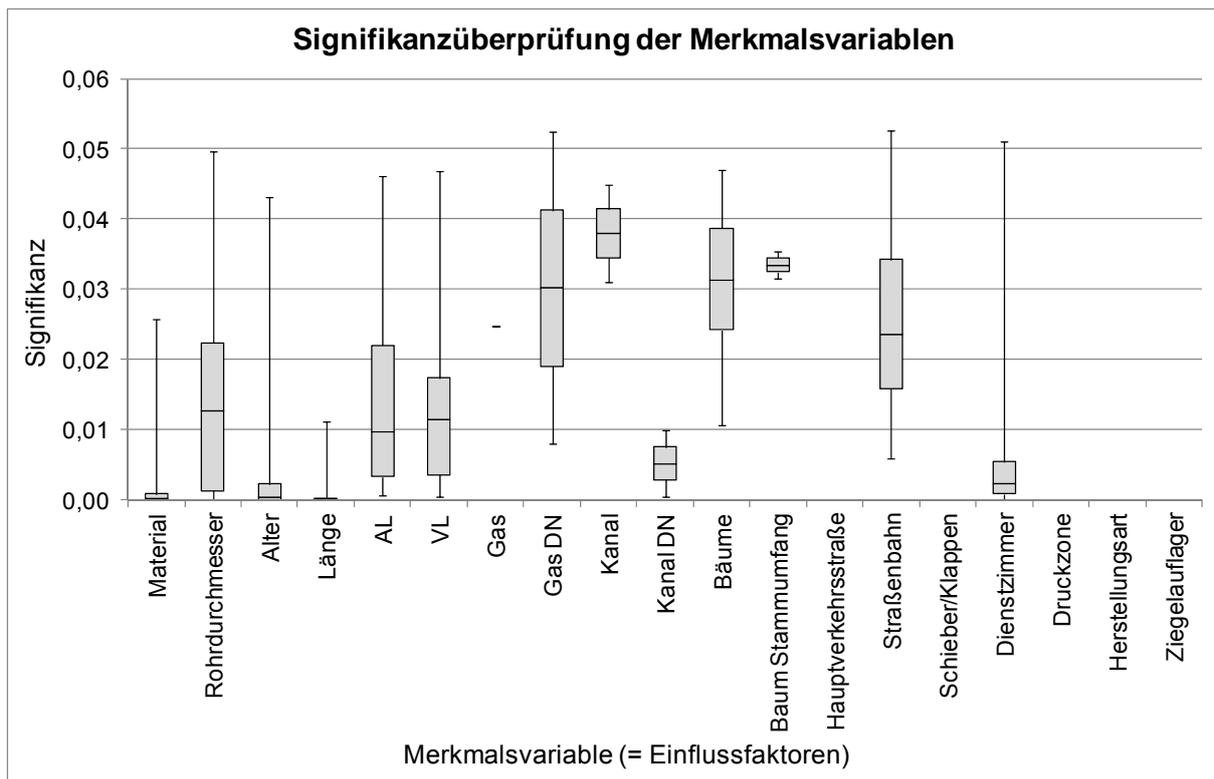
Aufgrund der Verteilung der Leitungen nach dem Leitungszustand mit 4,3 % schadhaften HZL (# 159) und 95,7 % nicht schadhaften HZL (# 3567) ergibt sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhaften HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhaften HZL. Um diesen Effekt auszuschalten wurden 30 Einzelstichproben randomisiert gebildet. Diese Stichproben weisen 226 Schäden auf 159 HZL mit der Schadensart „Verbindung undicht“ und 159 nicht schadhafte HZL auf. Unter Anwendung der schrittweisen Rückwärts-Methode wurden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Zustandes „Verbindung undicht“ die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell für die 30 randomisierten Stichproben überprüft. Dabei ergaben sich bei Anwendung der schrittweise Vorwärts- oder Rückwärts-Methode die gleichen Variablen als signifikant. Unter Verwendung der 30 zufällig gewählten Einzelstichproben wurden jeweils einzelne Regressionsmodelle berechnet. Die Verteilung der einzelnen Werte der 30 Gleichungen im Größenbereich von knapp unter 0,40 für Cox und Snell-R<sup>2</sup> (entspricht akzeptabler Modellgüte) und 0,5 für Nagelkerke-R<sup>2</sup> (entspricht sehr guter Modellgüte) sind in Abbildung 56 dargestellt. Mit dem Hosmer-Lemeshow-Test wird die Nullhypothese für die jeweiligen 30 Einzelstichproben, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich null ist, überprüft. Dazu wurden die Beobachtungsfälle mit den geschätzten Wahrscheinlichkeiten in 10 ungefähr gleich große Gruppen unterteilt. Zur Überprüfung der Güte der Anpassung

an den 30 Einzelstichproben wurde das geforderte Signifikanzniveau von größer 70 % nicht erreicht (siehe Abbildung 56).



**Abbildung 56: Boxplot Pseudo-R<sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge**

5 der 19 betrachteten Einflussfaktoren erwiesen sich in den 30 Einzelmodellen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit „Verbindung undicht“ als nicht signifikant (siehe Abbildung 57) und wurden nicht berücksichtigt. Diese sind Einfluss von Hauptverkehrsstraßen, Schieber/Klappen, Druckzone, Herstellungsart und Ziegelaufleger.

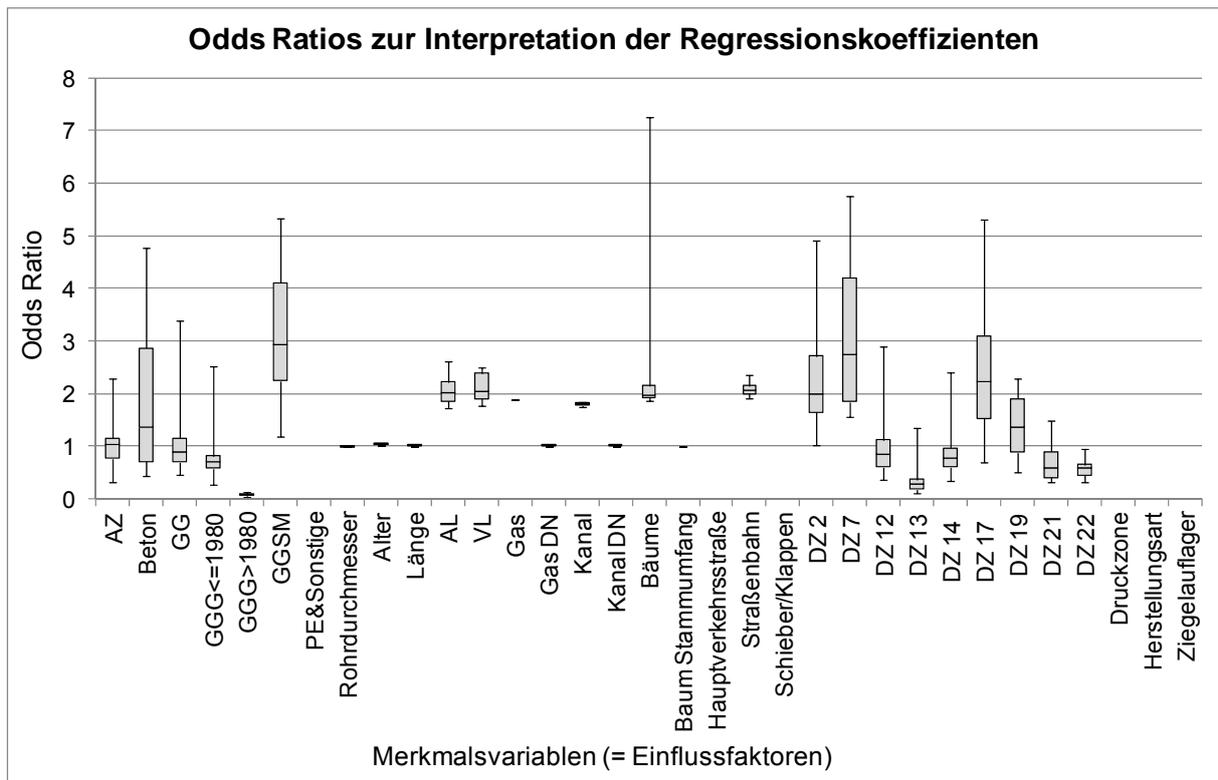


**Abbildung 57: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren**

Die Einflussfaktoren Material, Alter, Länge der HZL, Kanal, Kanal DN, Baum Stammumfang und DZ wiesen für alle 30 Stichproben geringe Streuungen in der Signifikanz auf und sind somit hochsignifikante unabhängige Variable zur Berechnung der Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Verbindung undicht“. Alle restlichen Merkmalsvariablen wiesen eine gewisse Streuung in der Signifikanz für die 30 betrachteten Einzelmodelle im Bereich kleiner 5 % auf und sind somit auch als signifikant zu betrachten.

In Abbildung 58 ist die Verteilung der Odds Ratios für die 30 Einzelmodelle zur Interpretation aller signifikanten Regressionskoeffizienten dargestellt. Für die metrisch skalierten Einflussfaktoren Alter, Länge, Gas DN, Kanal DN und Baum Stammumfang ergab ein Anstieg in der Größe des Einflusses auch ein Ansteigen der Auftretswahrscheinlichkeit. Für den metrisch skalierten Einflussfaktor Rohrdurchmesser verhält es sich genau umgekehrt – eine Zunahme im Rohrdurchmesser ergab eine Verringerung der Auftretswahrscheinlichkeit der spezifischen Schadensart „Verbindung undicht“. Für die binär kodierten Einflussfaktoren AL, VL, Gas, Kanal, Bäume und Straßenbahn ergab eine Beeinflussung bzw. das Vorhandensein dieser Faktoren ein Ansteigen der Schadensauftretswahrscheinlichkeit. Für die in diesem Beispiel signifikanten nominal skalierten Einflussfaktoren Material und Dienstzimmer (DZ) ist das Definieren einer Referenzkategorie notwendig. Bezogen auf die Referenzkategorie Stahl ergaben die Materialien AZ, Beton und GGSM mit Medianwerten  $> 1$  ein Ansteigen und im Gegensatz dazu alle anderen Materialien eine Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit in Bezug zur Materialart ST. Die DZ 2, 7, 17, und 19

bewirkten einen Anstieg bzw. alle restlichen DZ eine Verringerung der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit bezogen auf das Referenz-DZ 23.



**Abbildung 58: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten**

Die ermittelten Regressionsgleichungen wurden, siehe Abbildung 59, mittels der Klassifizierungsergebnisse in Form der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge (452 HZL-Abschnitte) kalibriert (= Modell-Kalibrierung an randomisierten Datensätzen (# 452 HZL) mit 30 Einzelmodellen) und schließlich auf den Gesamtdatensatz von 3 726 HZL-Abschnitten validiert (= Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3726 HZL) mit 30 Einzelmodellen).

Für die Modell-Kalibrierung an den randomisierten Datensätzen (# 452 HZL) mit den 30 Einzelmodellen ergab sich eine Trefferquote im Bereich von 75 bis 85 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 20 bis 25 %. Für die Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3726 HZL) mit den 30 Einzelmodellen resultierte eine etwas geringere Klassifizierungsquote mit einer Trefferquote im Bereich von 70 bis 80 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 25 bis 30 %. In der Validierung der 30 Einzelmodelle auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 60) wurden für 1 805 Abschnitte für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 336 Abschnitte keines der 30 Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches den Zusammenhang zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei werden einerseits die maximal erzeugte Fläche

unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 59) und eine Residuen- bzw. Ausreißerdiagnostik je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet. Das Einzelmodell 05 weist zur Berechnung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit „Verbindung undicht“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringsten Abweichungen in der Residuenanalyse auf und bildet somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 59). Die sechs Einflussfaktoren Material, Rohrdurchmesser, Alter, Länge, AL und DZ bilden die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell 05.

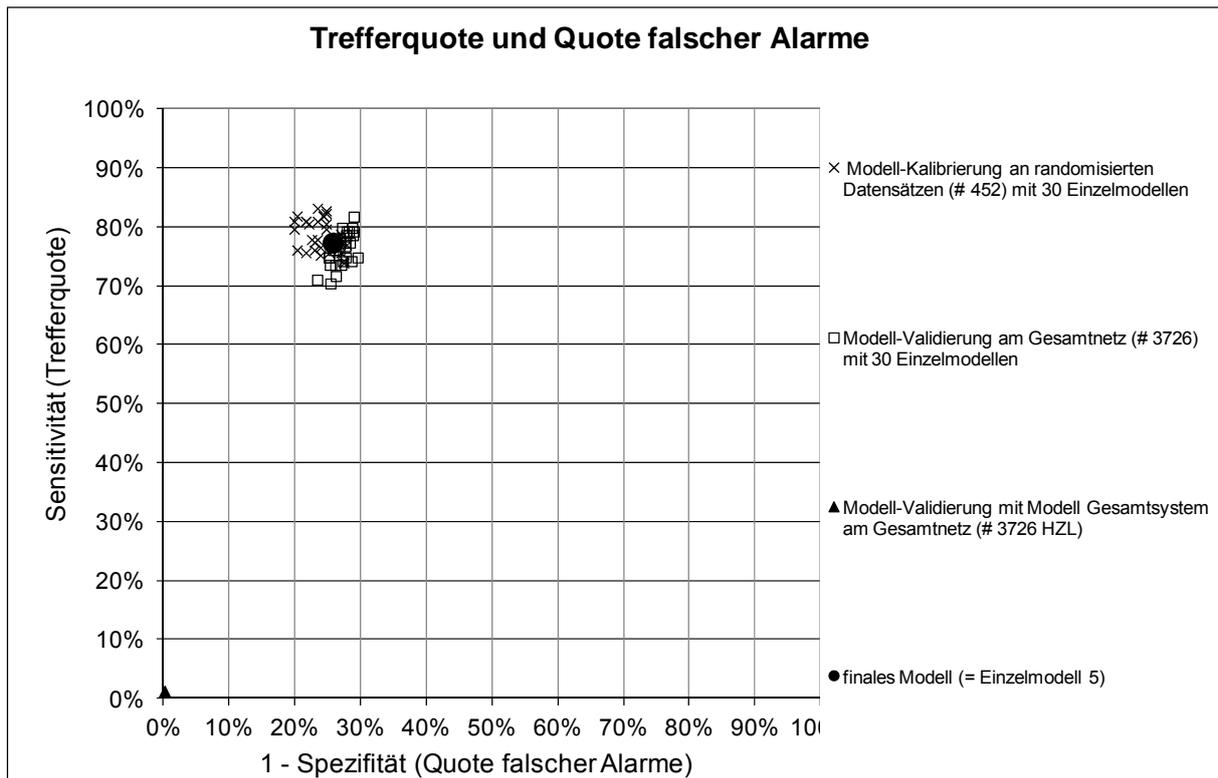
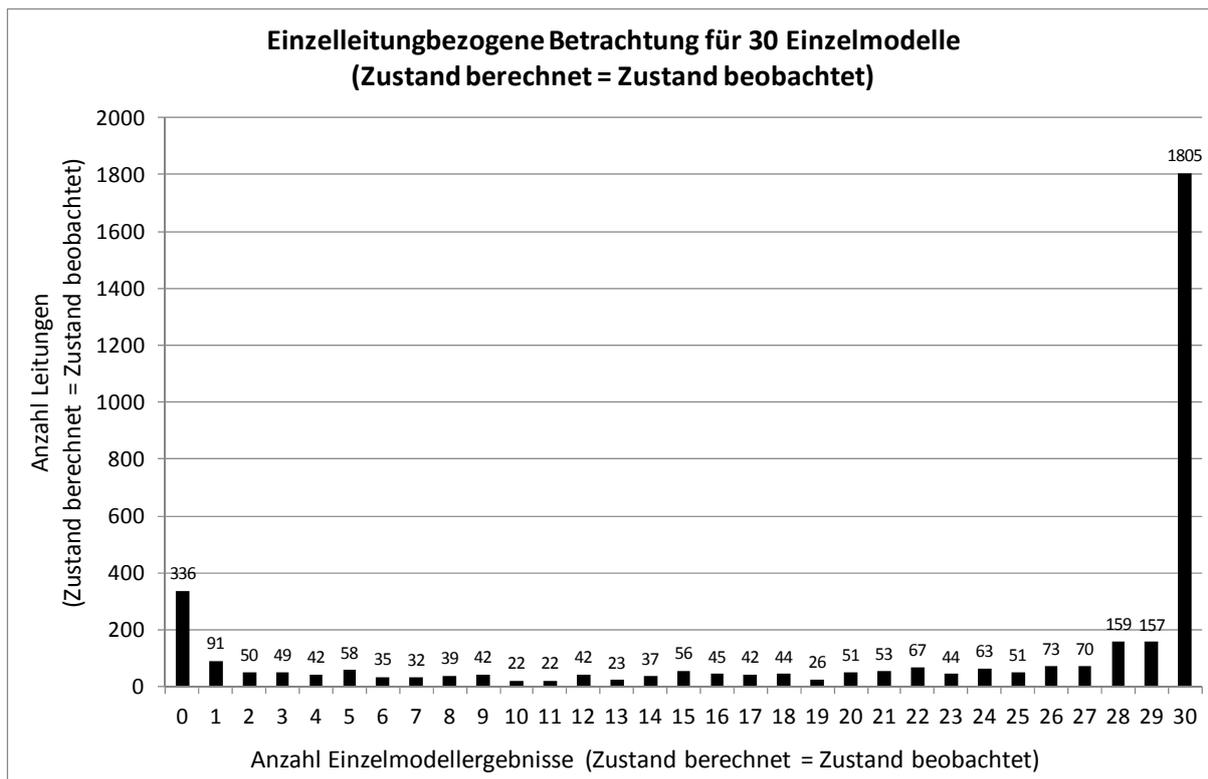


Abbildung 59: Trefferquote und Quote falscher Alarme

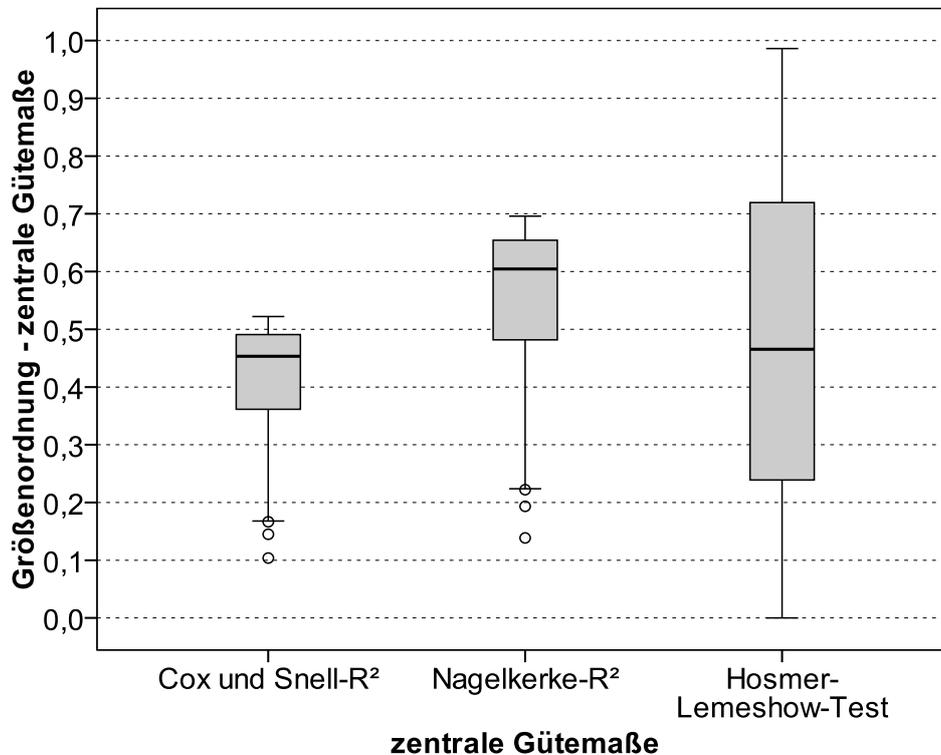


**Abbildung 60: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet**

#### 7.4.1.1.6 BLRA Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU B

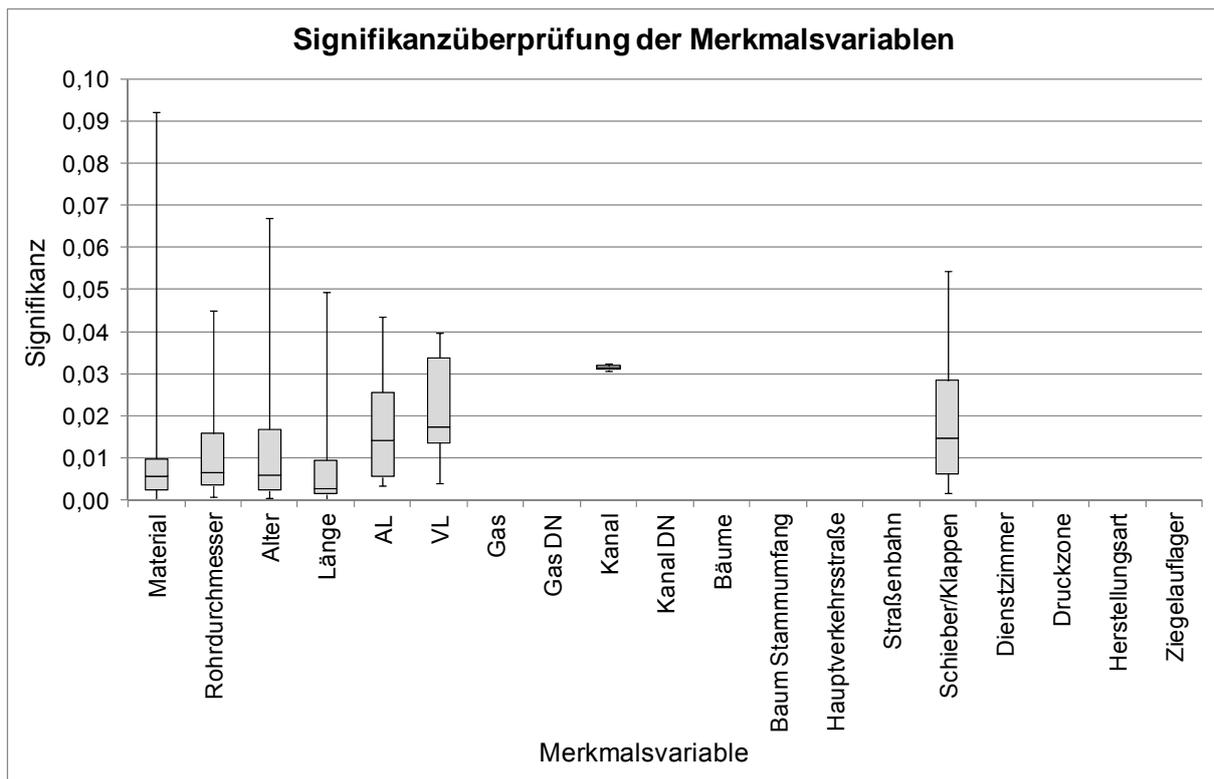
Aufgrund der Verteilung der Leitungen nach dem Leitungszustand mit 1,1 % schadhaften HZL (# 42) und 98,9 % nicht schadhaften HZL (# 3 684) ergibt sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhaften HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhaften HZL. Um diesen Effekt auszuschalten wurden, 30 Einzelstichproben randomisiert gebildet. Diese Stichproben weisen 49 Schäden auf 42 HZL mit der Schadensart „Korrosionsloch“ und 49 nicht schadhafte HZL auf. Unter Anwendung der schrittweisen Rückwärts-Methode wurden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Zustandes „Korrosionsloch“ die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell für die 30 randomisierten Stichproben überprüft. Dabei ergaben sich bei Anwendung der schrittweise Vorwärts- oder Rückwärts-Methode die gleichen Variablen als signifikant. Unter Verwendung der 30 zufällig gewählten Einzelstichproben wurden jeweils einzelne Regressionsmodelle berechnet. Die Verteilung der einzelnen Werte der 30 Gleichungen im Größenbereich von knapp unter 0,50 für Cox und Snell-R<sup>2</sup> (entspricht guter Modellgüte) und 0,60 für Nagelkerke-R<sup>2</sup> (entspricht sehr guter Modellgüte) sind in Abbildung 61 dargestellt. Mit dem Hosmer-Lemeshow-Test wird die Nullhypothese für die jeweiligen 30 Einzelstichproben, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich Null ist, überprüft. Dazu wurden die Beobachtungsfälle mit den geschätzten Wahrscheinlichkeiten in 10 ungefähr gleich große Gruppen unterteilt. Zur Überprüfung der Güte der Anpassung

an den 30 Einzelstichproben wird das geforderte Signifikanzniveau von größer 70 % mit einem Medianwert von 46,5 % für einen Großteil der 30 Stichproben nicht erreicht (siehe Abbildung 61).



**Abbildung 61: Boxplot Pseudo-R<sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge**

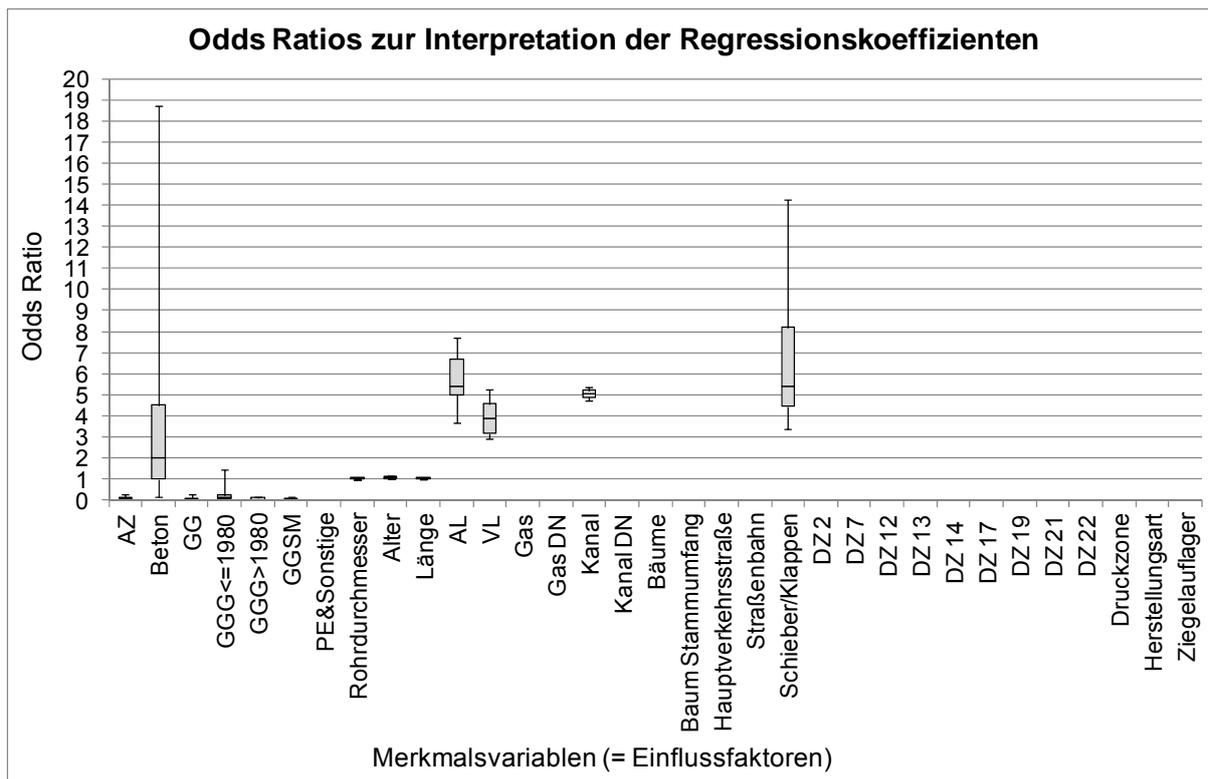
11 der 19 betrachteten Einflussfaktoren erwiesen sich in den 30 Einzelmodellen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit „Korrosionsloch“ als nicht signifikant (siehe Abbildung 62) und wurden nicht berücksichtigt. Diese sind Gas, Gas DN, Kanal DN, Bäume, Baum Stammumfang, Einfluss von Hauptverkehrsstraßen, Straßenbahn, DZ, Druckzone, Herstellungsart und Ziegelaufleger.



**Abbildung 62: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren**

Die Einflussfaktoren Material, Rohrdurchmesser, Alter, Länge der HZL, AL, VL, Kanal und Schieber/Klappen sind somit die hochsignifikanten unabhängigen Variablen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit der Schadensart „Korrosionsloch“.

In Abbildung 63 ist die Verteilung der Odds Ratios für die 30 Einzelmodelle zur Interpretation aller signifikanten Regressionskoeffizienten dargestellt. Für die metrisch skalierten Einflussfaktoren Alter und Länge ergab ein Anstieg in der Größe des Einflusses auch ein Ansteigen der Auftrittswahrscheinlichkeit. Für den metrisch skalierten Einflussfaktor Rohrdurchmesser verhält es sich genau umgekehrt – eine Zunahme im Rohrdurchmesser ergab eine Verringerung der Auftrittswahrscheinlichkeit der spezifischen Schadensart „Korrosionsloch“. Für die binär kodierten Einflussfaktoren AL, VL, Kanal und Schieber/Klappen ergibt eine Beeinflussung bzw. das Vorhandensein dieser Faktoren ein Ansteigen der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit. Für den in diesem Beispiel signifikanten nominal skalierten Einflussfaktor Material ist das Definieren einer Referenzkategorie notwendig. Bezogen auf die Referenzkategorie Stahl ergibt nur die Materialart Beton mit einem Medianwerte  $> 2$  ein Ansteigen und im Gegensatz dazu alle anderen Materialien eine Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit in Bezug zur Materialart Stahl.



**Abbildung 63: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten**

Die ermittelten Regressionsgleichungen wurden, siehe Abbildung 64, mittels der Klassifizierungsergebnisse in Form der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge (98 HZL-Abschnitte) kalibriert (= Modell-Kalibrierung an randomisierten Datensätzen (# 98 HZL) mit 30 Einzelmodellen) und schließlich auf den Gesamtdatensatz von 3 726 HZL-Abschnitten validiert (= Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3726 HZL) mit 30 Einzelmodellen).

Für die Modell-Kalibrierung an den randomisierten Datensätzen (# 98 HZL) mit den 30 Einzelmodellen ergab sich eine Trefferquote im Bereich von 70 bis 88 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 12 bis 40 %. Für die Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3726 HZL) mit den 30 Einzelmodellen resultiert eine etwas geringere Klassifizierungsquote mit einer Trefferquote im Bereich von 65 bis 85 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 20 bis 40 %. In der Validierung der 30 Einzelmodelle auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 65) wurden für 777 Abschnitte für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 132 Abschnitte keines der 30 Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelt. Im Vergleich der einzelleitungsbezogenen berechneten zu beobachteten HZL-Zuständen ist ein markanter Anstieg ab 20 übereinstimmenden Modellergebnisse zu erkennen. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches den Zusammenhang zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, werden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei werden einerseits die maximal erzeugte Fläche

unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 64) und eine Residuen- bzw. Ausreißerdiagnostik je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet. Das Einzelmodell 05 weist zur Berechnung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit „Korrosionsloch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringsten Abweichungen in der Residuenanalyse auf und bildet somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 64). Die fünf Einflussfaktoren Material, Rohrdurchmesser, Alter, Länge und Schieber/Klappen bilden die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell 5.

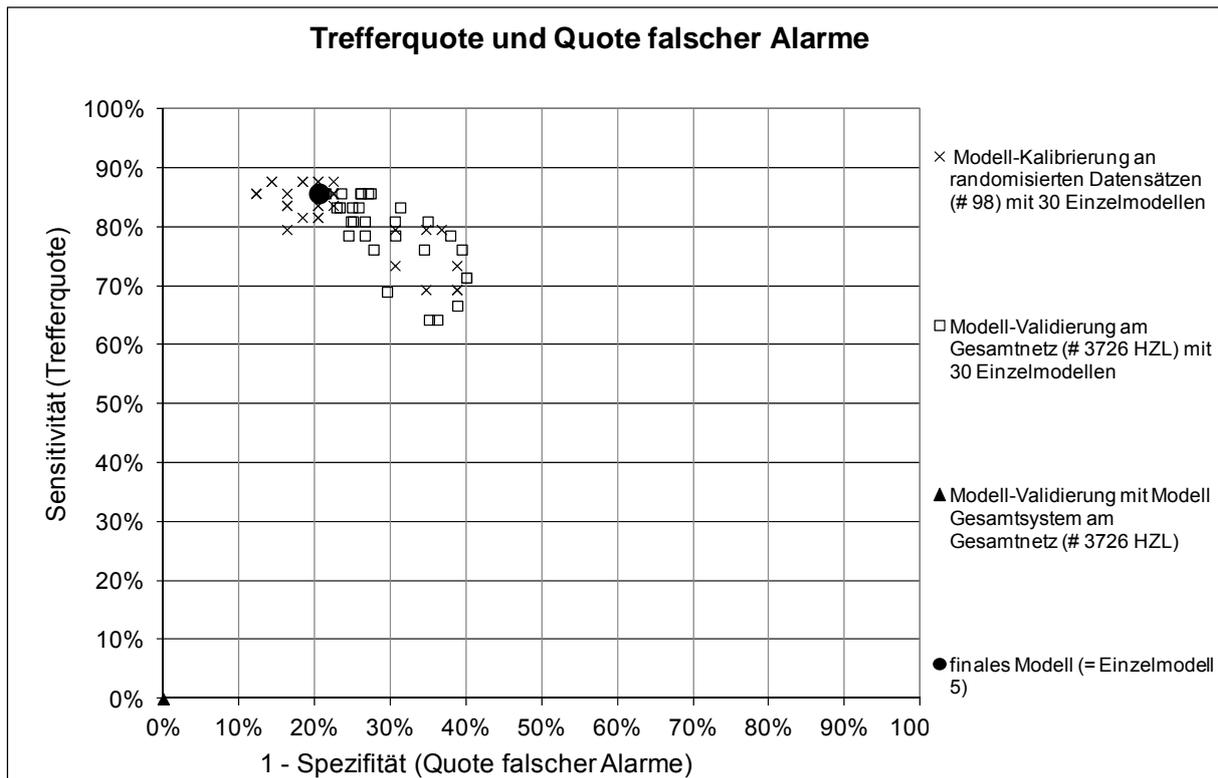
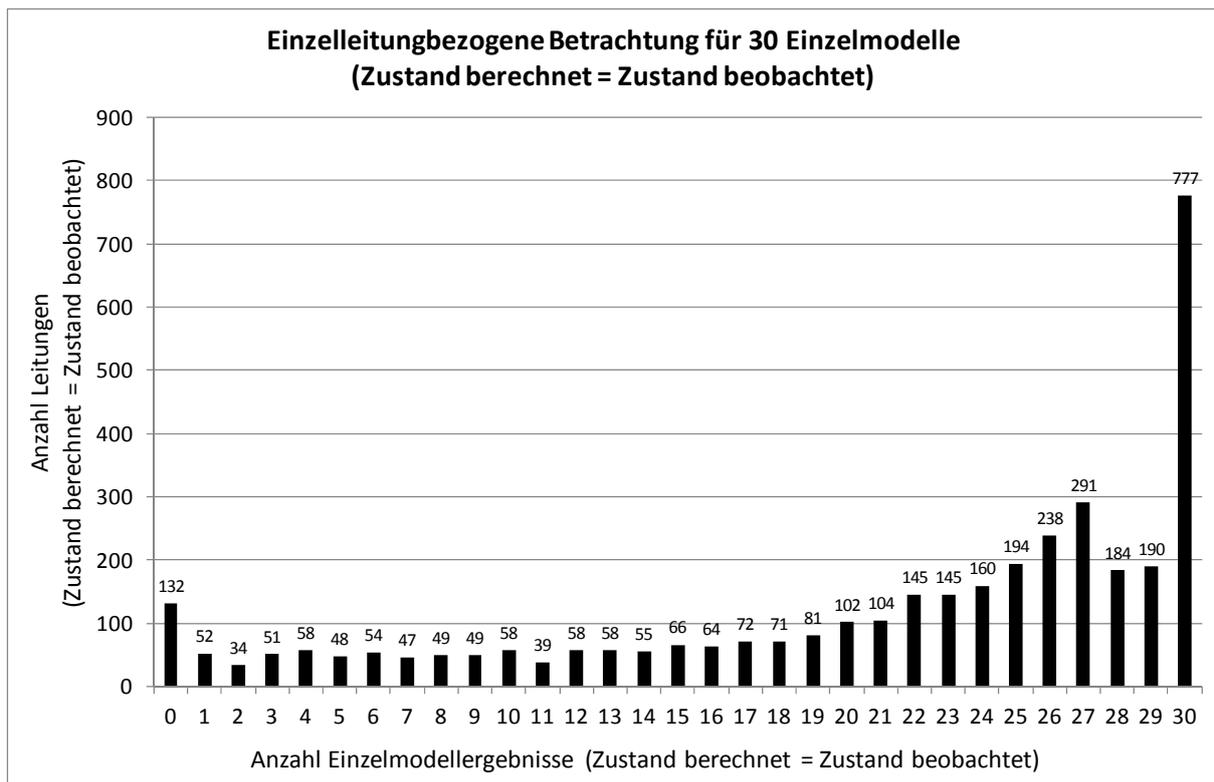


Abbildung 64: Trefferquote und Quote falscher Alarme

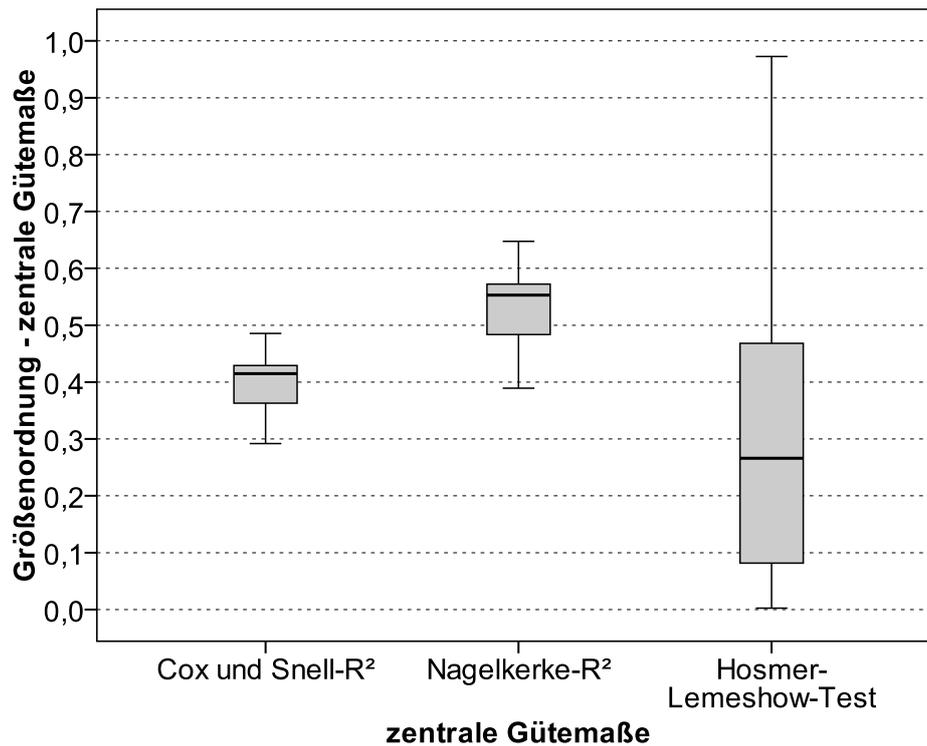


**Abbildung 65: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet**

#### 7.4.1.1.7 BLRA Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbe“ – WVU B

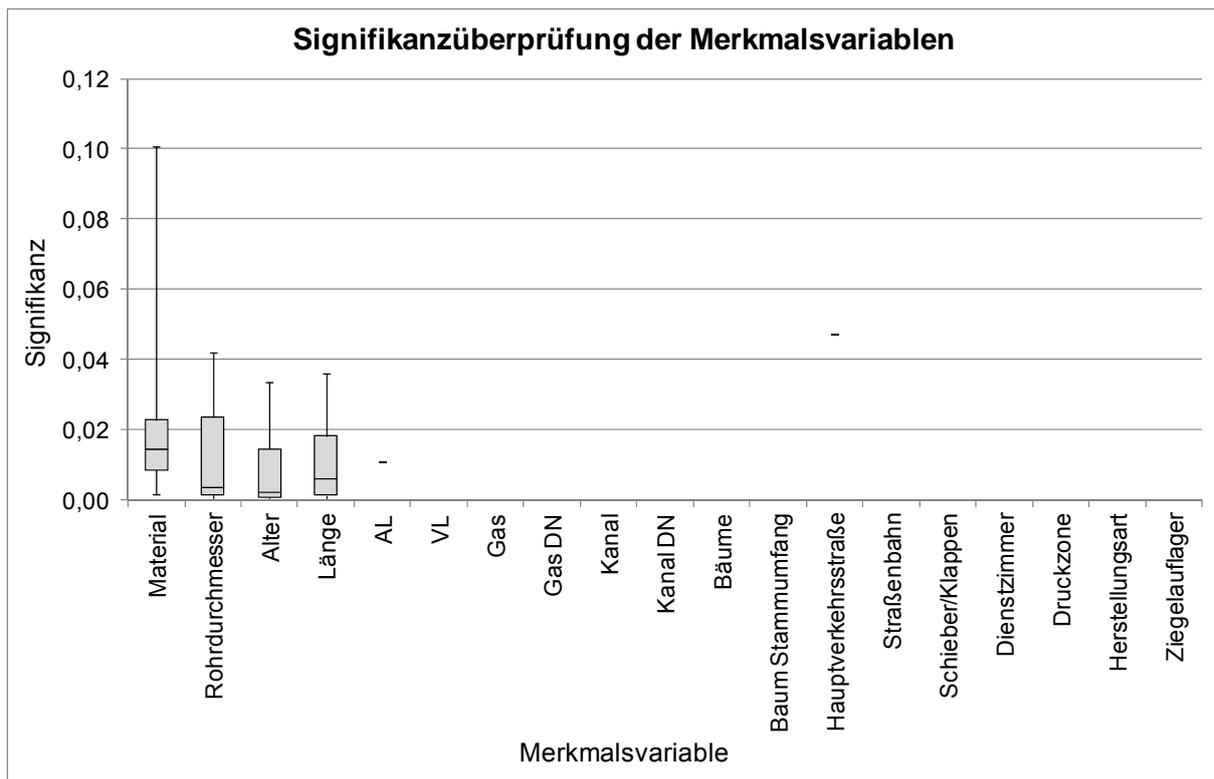
Aufgrund der Verteilung der Leitungen nach dem Leitungszustand mit 1,2 % schadhaften HZL (# 46) und 98,8 % nicht schadhaften HZL (# 3 680) ergab sich im Modellergebnis eine geringe Trefferquote in der Verifizierung der schadhaften HZL am Gesamtsystem und eine Konzentration in der Klassifizierung auf die nicht schadhaften HZL. Um diesen Effekt auszuschalten wurden 30 Einzelstichproben randomisiert gebildet. Diese Stichproben weisen 49 Schäden auf 46 HZL mit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ und 49 nicht schadhafte HZL auf. Unter Anwendung der schrittweisen Rückwärts-Methode wurden zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Zustandes „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ die vorhandenen Einflussfaktoren auf statistische Signifikanz und Aufnahme ins Modell für die 30 randomisierten Stichproben überprüft. Dabei ergaben sich bei Anwendung der schrittweise Vorwärts- oder Rückwärts-Methode die gleichen Variablen als signifikant. Unter Verwendung der 30 zufällig gewählten Einzelstichproben wurden jeweils einzelne Regressionsmodelle berechnet. Die Verteilung der einzelnen Werte der 30 Gleichungen im Größenbereich von 0,40 für Cox und Snell-R<sup>2</sup> (entspricht guter Modellgüte) und 0,55 für Nagelkerke-R<sup>2</sup> (entspricht sehr guter Modellgüte) sind in Abbildung 66 dargestellt. Mit dem Hosmer-Lemeshow-Test wird die Nullhypothese für die jeweiligen 30 Einzelstichproben, dass die Differenz zwischen vorhergesagten und beobachteten Werten gleich Null ist, überprüft. Zur Überprüfung der Güte der Anpassung an den 30 Einzelstichproben wird das geforderte Signifikanzniveau von

größer 70 % mit einem Medianwert von 27 % für einen Großteil der 30 Stichproben nicht erreicht (siehe Abbildung 66).



**Abbildung 66: Boxplot Pseudo-R<sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge**

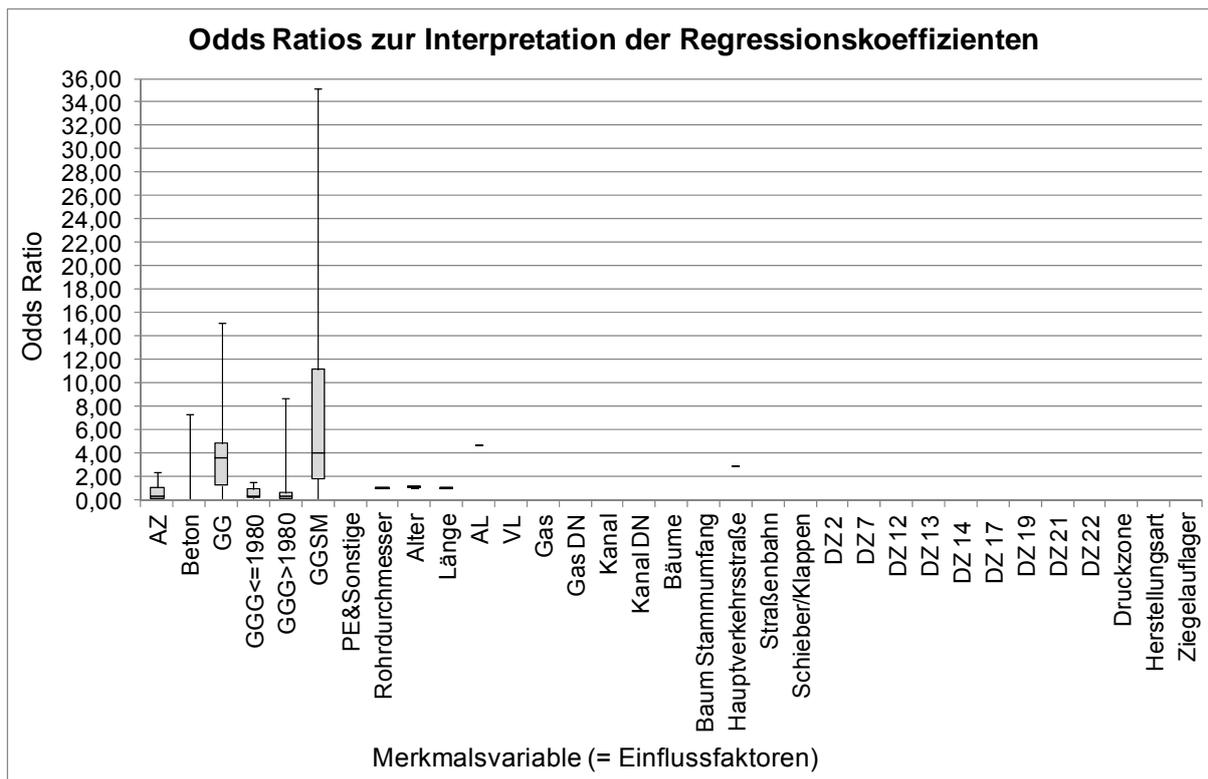
13 der 19 betrachteten Einflussfaktoren erwiesen sich in den 30 Einzelmodellen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ als nicht signifikant (siehe Abbildung 67) und wurden nicht berücksichtigt. Diese waren VL, Gas, Gas DN, Kanal, Kanal DN, Bäume, Baum Stammumfang, Straßenbahn, Schieber/Klappen, DZ, Druckzone, Herstellungsart und Ziegelaufleger.



**Abbildung 67: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren**

Die Einflussfaktoren Material, Rohrdurchmesser, Alter und Länge sind somit die hochsignifikanten unabhängigen Variablen zur Berechnung der Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“. Die Einflussfaktoren AL und Hauptverkehrsstraße treten zwar nur jeweils einmal in den 30 Einzelmodellen auf, sind aber dem signifikanten Bereich zuzuordnen.

In Abbildung 68 ist die Verteilung der Odds Ratios für die 30 Einzelmodelle zur Interpretation aller signifikanten Regressionskoeffizienten dargestellt. Für die metrisch skalierten Einflussfaktoren Alter und Länge ergab ein Anstieg in der Größe des Einflusses auch ein Ansteigen der Auftretswahrscheinlichkeit. Für den metrisch skalierten Einflussfaktor Rohrdurchmesser verhält es sich genau umgekehrt – eine Zunahme im Rohrdurchmesser ergab eine Verringerung der Auftretswahrscheinlichkeit der spezifischen Schadensart „Schaden allgemein“. Für die binär kodierten Einflussfaktoren AL und Einfluss von Hauptverkehrsstraßen ergab eine Beeinflussung bzw. das Vorhandensein dieser Faktoren ein Ansteigen der Schadensauftretswahrscheinlichkeit. Für den in diesem Beispiel signifikanten nominal skalierten Einflussfaktor Material ist das Definieren einer Referenzkategorie notwendig. Bezogen auf die Referenzkategorie Stahl ergaben die Materialarten GGSM und GG mit Medianwerte im Bereich von 4 ein Ansteigen und im Gegensatz dazu alle anderen Materialien eine Verringerung der Schadenswahrscheinlichkeit in Bezug zur Rohrmaterialart Stahl.

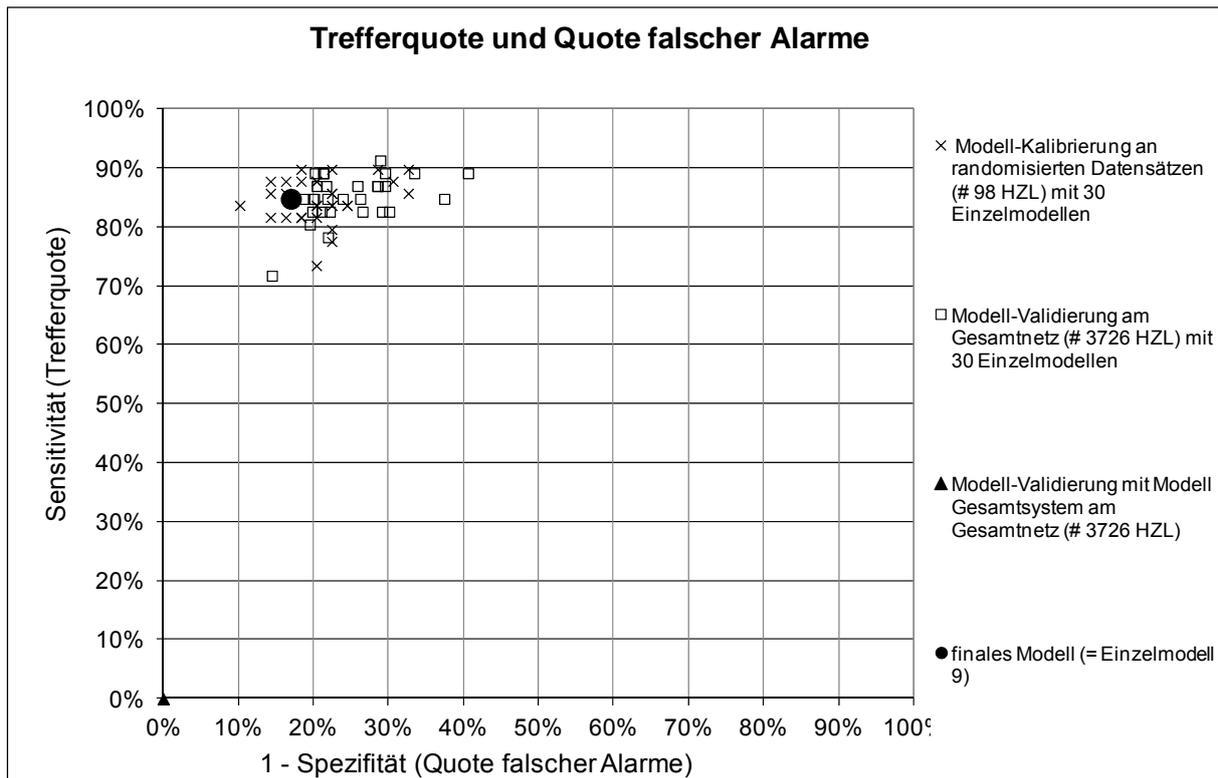


**Abbildung 68: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten**

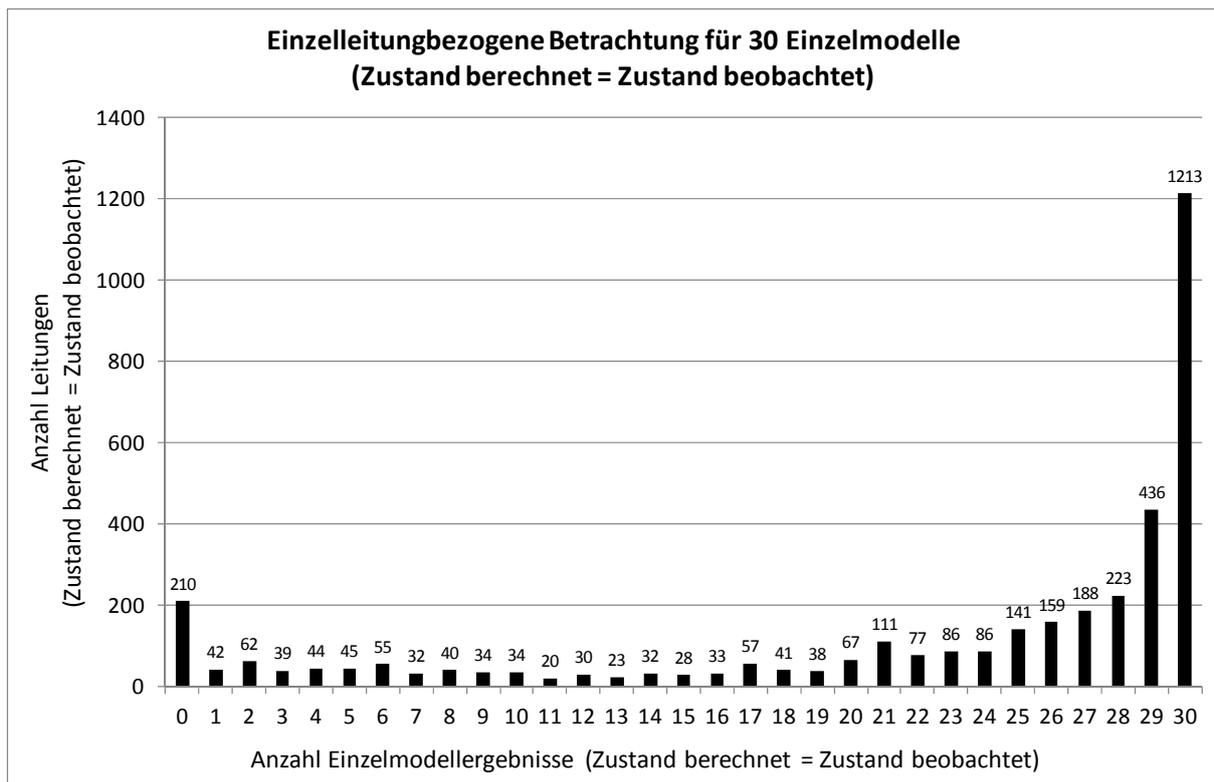
Die ermittelten Regressionsgleichungen wurden, siehe Abbildung 69, mittels der Klassifizierungsergebnisse in Form der Trefferquote und Quote falscher Alarme an der Stichprobenmenge (98 HZL-Abschnitte) kalibriert (= Modell-Kalibrierung an randomisierten Datensätzen (# 98 HZL) mit 30 Einzelmodellen) und schließlich auf den Gesamtdatensatz von 3 726 HZL-Abschnitten validiert (= Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3726 HZL) mit 30 Einzelmodellen).

Für die Modell-Kalibrierung an den randomisierten Datensätzen (# 98 HZL) mit den 30 Einzelmodellen ergab sich eine Trefferquote im Bereich von 73 bis 90 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 10 bis 32 %. Für die Modell-Validierung am Gesamtnetz (# 3726 HZL) mit den 30 Einzelmodellen resultiert eine etwas geringere Klassifizierungsquote mit einer Trefferquote im Bereich von 72 bis 91 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 14 bis 40 %. In der Validierung der 30 Einzelmodelle auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 70) werden für 1213 Abschnitte für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 210 Abschnitte keines der 30 Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelt. Im Vergleich der einzelleitungsbezogenen berechneten zu beobachteten HZL-Zuständen ist ein markanter Anstieg ab 25 übereinstimmenden Modellergebnisse zu erkennen. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches den Zusammenhang zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, werden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei werden einerseits die maximal erzeugte Fläche

unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 69) und eine Residuen- bzw. Ausreißerdiagnostik je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet. Das Einzelmodell 09 weist zur Berechnung der Schadens-Auftrittswahrscheinlichkeit „Rundriss/Längsriss/ Scherbenbruch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringsten Abweichungen in der Residuenanalyse auf und bildet somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 69). Die drei Einflussfaktoren Material, Rohrdurchmesser und Länge bilden die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell 09.



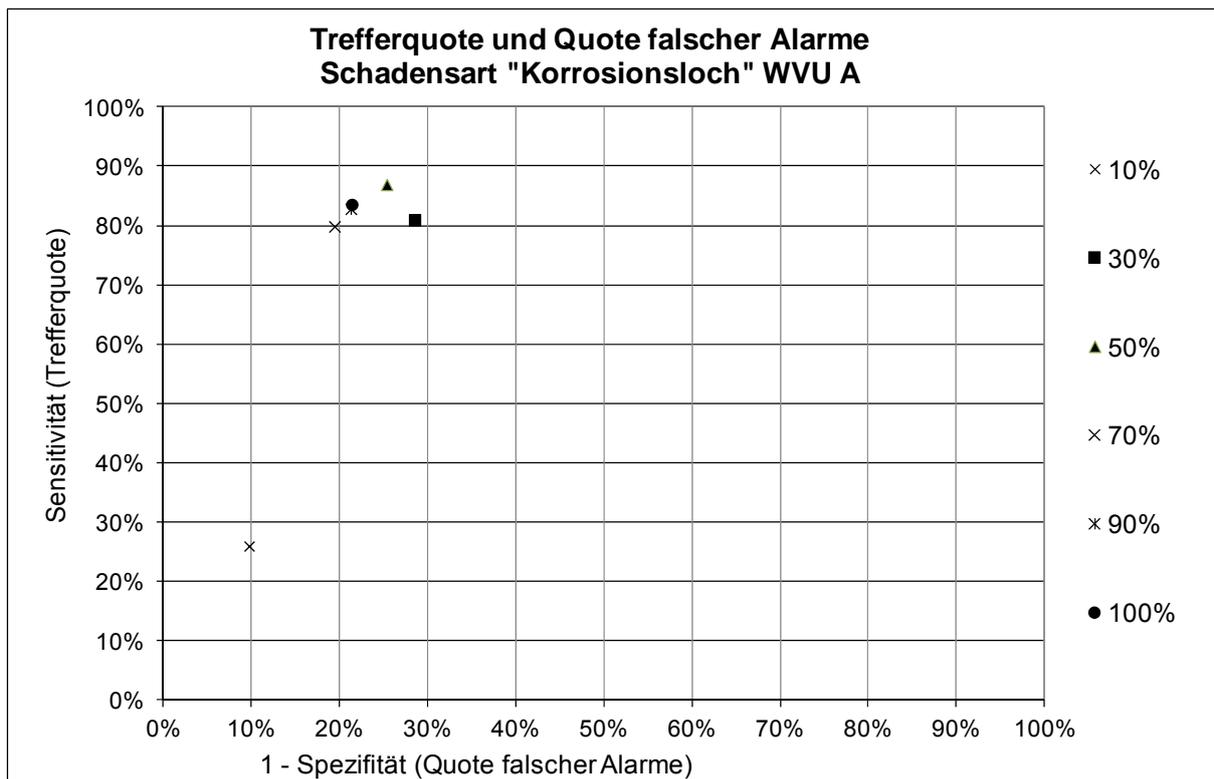
**Abbildung 69: Trefferquote und Quote falscher Alarme**



**Abbildung 70: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet**

#### **7.4.2 Auswirkung der Stichprobengröße auf die Ergebnisse der BLRA am Beispiel Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU A**

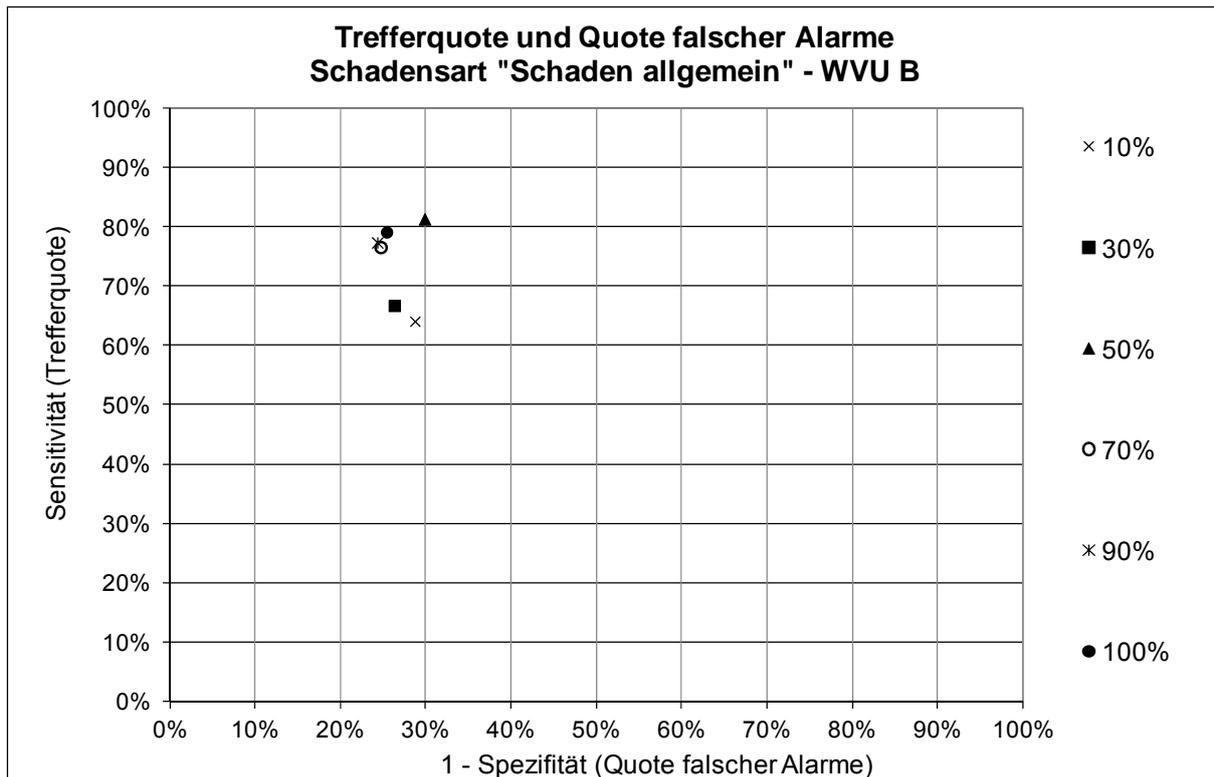
In Abbildung 71 ist die Verbesserung der Klassifizierungs- und Validierungsergebnisse durch die Darstellung unterschiedlich großer Grunddatenmengen in einer ausgewählten Stichprobe für das WVU A dargestellt. Die randomisierte Stichprobe 01 der Schadensart „Korrosionsloch“, welche die Einzelgleichung mit der höchsten Modellgüte ergab, wurde dafür verwendet. Für diese Stichprobe 01 mit insgesamt 608 Leitungen (304 HZL mit Schadensart „Korrosionsloch“ und 304 randomisiert gewählten nicht schadhafte HZL) wurden unterschiedliche Regressionsgleichungen in Abhängigkeit der berücksichtigten Leitungsanzahl dieser Stichprobe von 10 bis 100 % der 608 HZL-Abschnitte kalibriert und am Gesamtdatensatz der 16 279 validiert. Diese Stichprobenanteile (10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 % und 100 %) wurden auch mittels Zufallsgenerator (SPSS Version 19) zufällig aus der Stichprobe 01 gezogen. Die Validierungsergebnisse der einzelnen Gleichungen (10 %, 30 %, ...) näherten sich immer mehr an die der Gesamtstichprobengröße von 608 Abschnitten an, je größer die berücksichtigte Leitungsanzahl dieser Stichprobengröße wurde, d. h. größere Stichprobenmengen ergaben eine höhere Modellgüte und bessere Klassifizierungsergebnisse.



**Abbildung 71: Variable Datenmengen - Trefferquote und Quote falscher Alarme bezüglich der Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A**

### 7.4.3 Auswirkung der Stichprobengröße auf die Ergebnisse der BLRA am Beispiel „Schaden allgemein“ – WVU B

In Abbildung 72 ist die Verbesserung der Klassifizierungs- und Validierungsergebnisse durch die Darstellung unterschiedlich großer Grunddatenmengen in einer ausgewählten Stichprobe für das WVU B dargestellt. Die randomisierte Stichprobe 09 der Schadensart „Schaden allgemein“, welche die Einzelgleichung mit der höchsten Modellgüte ergab, wurde dafür verwendet. Für diese Stichprobe 09 mit insgesamt 648 Leitungen (324 HZL mit Schadensart „Schaden allgemein“ und 324 randomisiert gewählte nicht schadhafte HZL) wurden unterschiedliche Regressionsgleichungen in Abhängigkeit der berücksichtigten Leitungsanzahl von 10 bis 100 % der 648 HZL-Abschnitte kalibriert und am Gesamtdatensatz der 3 729 HZL validiert. Diese Stichprobenanteile (10 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 % und 100 %) wurden mittels Zufallsgenerator (SPSS Version 19) zufällig aus der Stichprobe 09 gezogen. Die Validierungsergebnisse der einzelnen Gleichungen (10 %, 30 %, ...) näherten sich immer mehr an die der Gesamtstichprobengröße von 648 Abschnitten an, je größer die berücksichtigte Leitungsanzahl dieser Stichprobengröße wurde, d. h. größere Stichprobenmengen ergaben eine höhere Modellgüte und bessere Klassifizierungsergebnisse.



**Abbildung 72: variable Datenmenge - Trefferquote und Quote falscher Alarme bezüglich der Schadensart „Schaden allgemein“ WVU B**

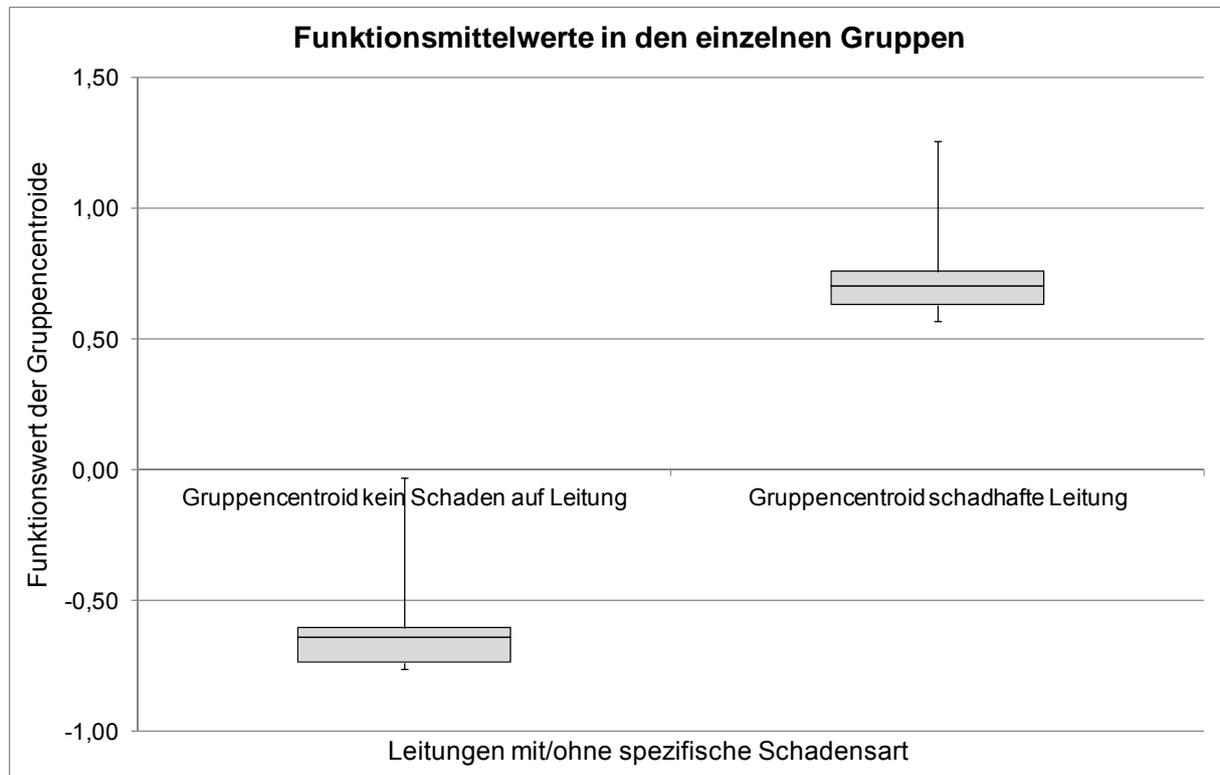
#### 7.4.3.1 Diskriminanzanalyse

##### 7.4.3.1.1 Diskriminanzanalyse Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU A

Die fünf Einflussfaktoren Rohrdurchmesser, Alter, Länge der HZL-Abschnitte, Betriebsdruck und Rauigkeit waren die in der Datenbasis des WVU A rein metrisch skalierten Einflussfaktoren. Die ordinal skalierten Einflussfaktoren in der Datenbasis des WVU A umfassen die zwölf Einflussfaktoren Bodenaggressivität, korrosionsfördernder Boden, Streustrom Straßenbahn, Streustrom Gasleitung, Hölzchen-Auflager, Setzungsempfindlichkeit des Bodens, Kriech-Rutschhang, Schanzen und Wälle, Straßenbahn mechanische Belastung, Verkehrsbelastung, Belagszustand und Baumbeflussung. Die Variablen Material und Verbindungsart lagen nominal skaliert vor und wurden aufgrund der Nichterfüllung der Anwendungsbedingungen zur Diskriminanzanwendung in der Berechnung nicht berücksichtigt. Zur Bestimmung der optimalen Diskriminanzfunktion wurden drei Gruppen an Eingangsdaten zur Diskriminanzberechnung berücksichtigt. Die Datenbasis für die erste und zweite Gruppe bildeten die fünf randomisierten Stichproben der BLRA, welche die höchste Modell- und Ergebnisgüte bezüglich der Schadensart „Schaden allgemein“ aufwiesen. Für die erste Gruppe wurden nur die oben angeführten fünf vorliegenden metrisch skalierten Variablen in der Berechnung verwendet. Die zweite Gruppe berücksichtigte die fünf vorliegenden metrisch skalierten und zusätzlich die zwölf oben angeführten ordinal skalierten Variablen. Die dritte Gruppe berücksichtigt alle HZL-Abschnitte des Gesamtsystems zur Findung

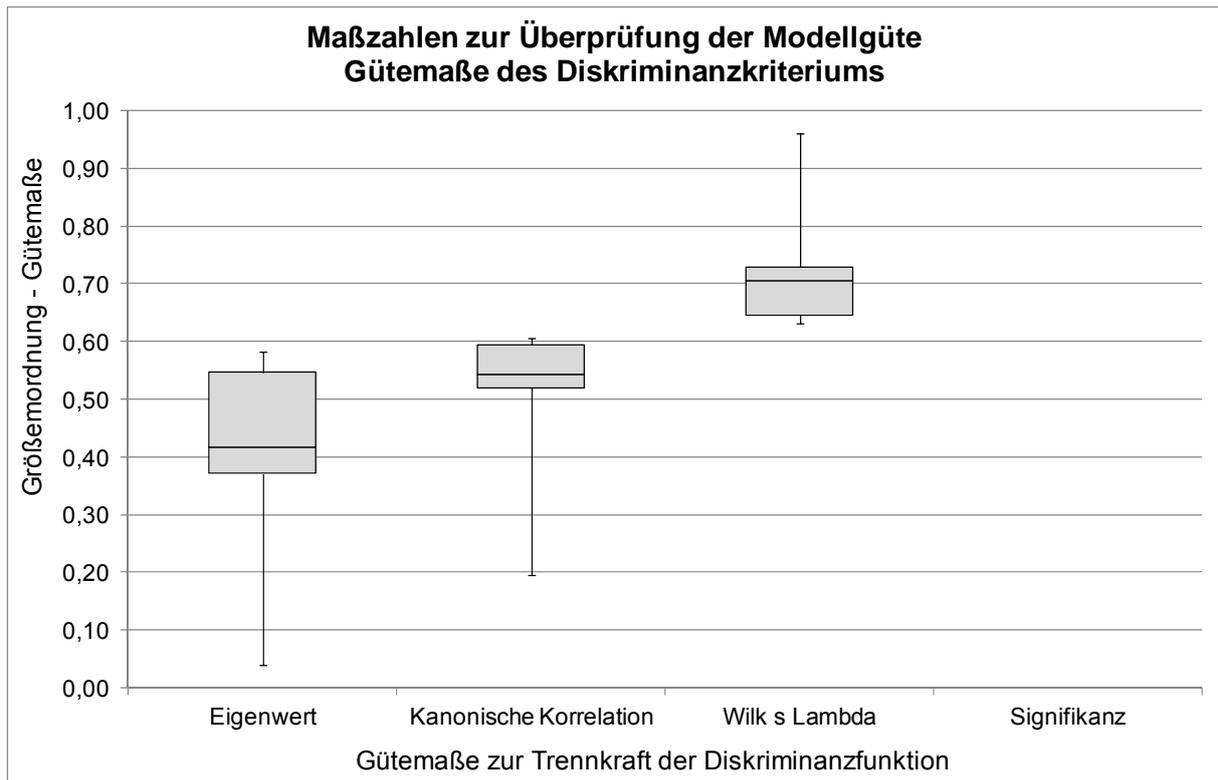
der optimalen Diskriminanzfunktion. Die Validierung dieser drei Gruppen der Eingangsdaten-Stichproben wurde jeweils am Gesamtdatensatz durchgeführt.

Die Schätzung der Diskriminanzfunktion und die Ermittlung der Diskriminanzkoeffizienten trennt die mit Hilfe der Abstände der Gruppencentroide (siehe Abbildung 73) untersuchten Zustandsgruppen der HZL in die Gruppen „schadhafte Leitung“ und „kein Schaden auf Leitung“.



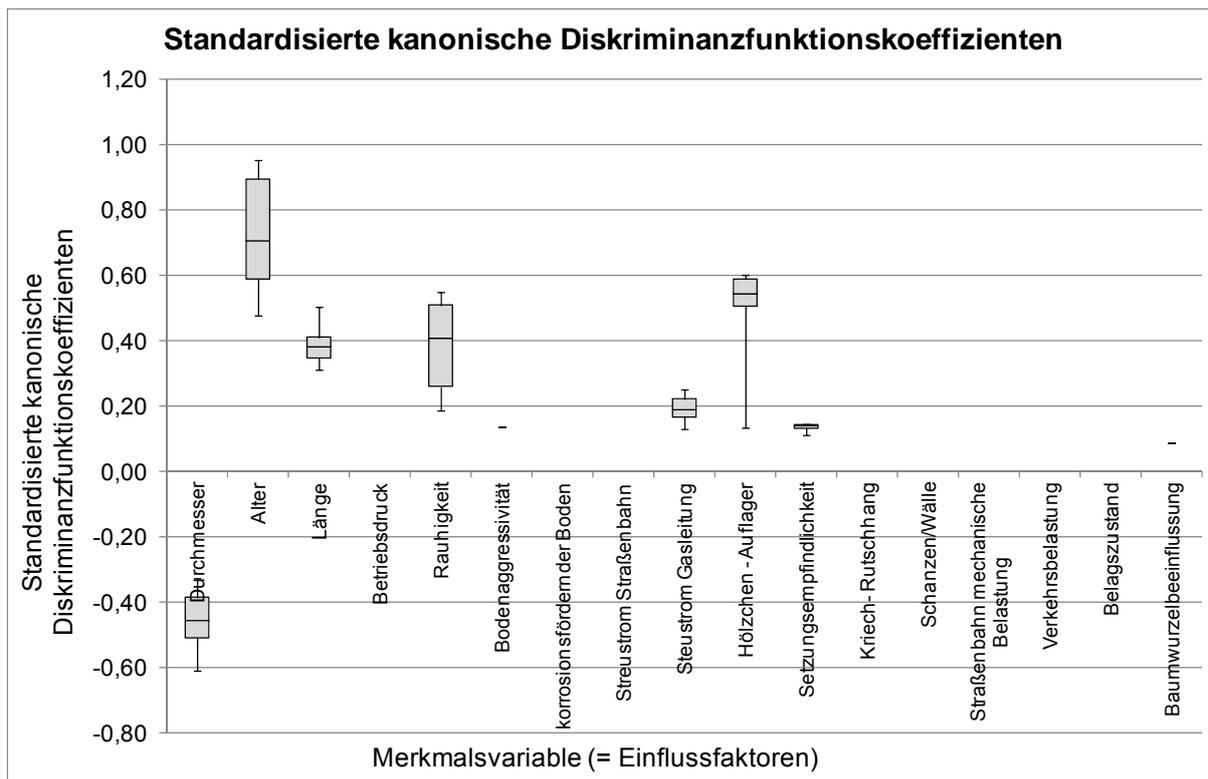
**Abbildung 73: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit**

Die Prüfung der Diskriminanzfunktion erfolgte mit Hilfe der Betrachtung des Eigenwertes, der kanonischen Korrelation, Wilk's Lambda und dem Signifikanzniveau. In Abbildung 74 zeigt die Betrachtung des Eigenwertes, dass die Streuung zwischen den Gruppen das 0,41fache (= Medianwert) der Streuung innerhalb der Gruppen darstellt. Dies bestätigt einen gewissen Erklärungswert des Modells. Der kanonische Korrelationskoeffizient in Abbildung 74 stellt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der gesamten Streuung mit einem Medianwert von 0,54 dar. Ein kanonischer Korrelationskoeffizient im Bereich zwischen 0,5 und 0,6 bestätigte eine akzeptable Trennung zwischen den Gruppen schadhaft ja/nein. Mit einem Medianwert von 0,70 für Wilk's Lambda wurde ein gewisser Erklärungswert des Modells gezeigt. Die vorhandenen Signifikanzwerte  $< 0,001$  bestätigten eine hohe Vertrauenswahrscheinlichkeit des vorhandenen Modells und es konnte folglich die Hypothese abgelehnt werden, dass in der Daten-Grundgesamtheit keine Unterscheidung der Leitungszustände schadhaft ja/nein möglich war und dadurch eine hoch signifikante Zustandsunterscheidung vorlag.

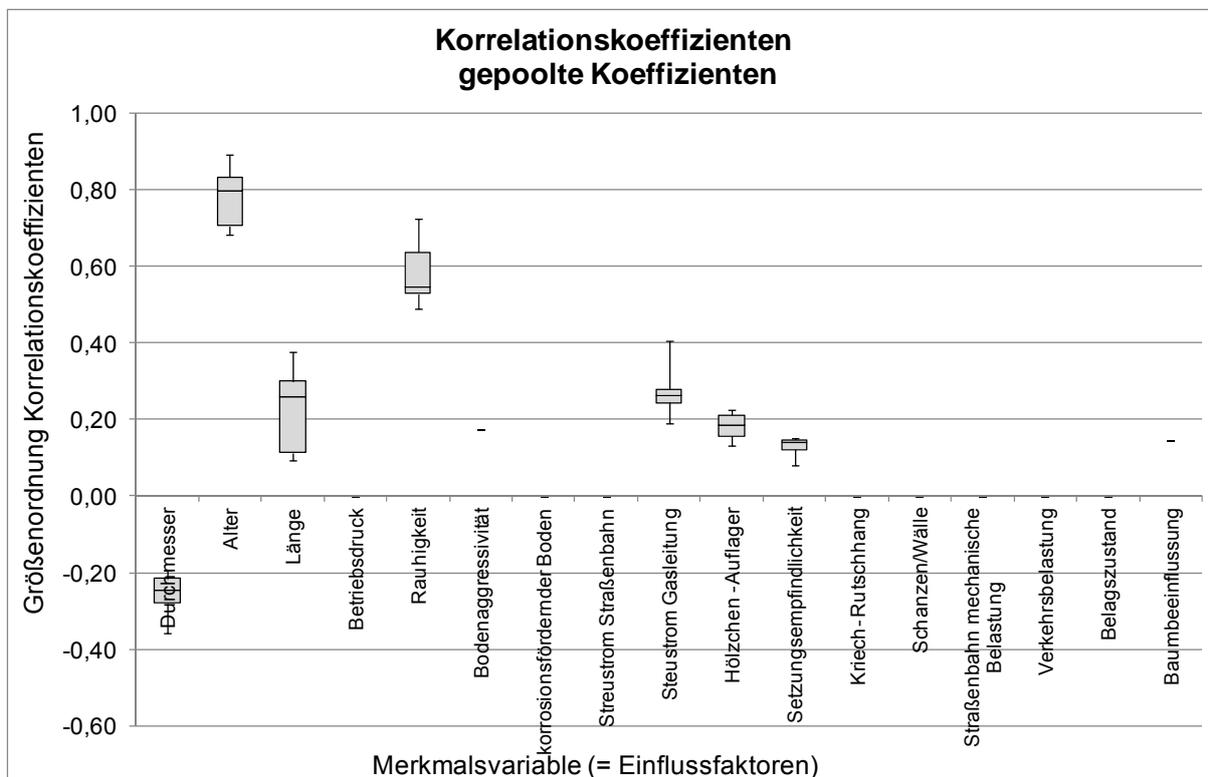


**Abbildung 74: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums**

In der Zustandsgruppenzuordnung der Schadensart „Schaden allgemein“ waren folgende neun Einflussfaktoren signifikant (siehe Abbildung 75): Durchmesser, Alter, Länge, Rauigkeit, Bodenaggressivität, Streustrom Gasleitung, Hölzchen-Auflager, Setzungsempfindlichkeit und Baumwurzelbeeinflussung. Alle nicht signifikanten Merkmalsvariablen wurden ausgeschlossen. Ein Anstieg in der Größenordnung der Einflüsse von Alter, Länge, Rauigkeit, Streustrom Gasleitung, Hölzchen-Auflager, Setzungsempfindlichkeit und Baumwurzelbeeinflussung bewirkte eine Gruppenzuordnung in Richtung „Schaden vorhanden“. Im Gegensatz dazu wirkte ein Anstieg des Durchmessers in Richtung eines nicht schadhafte Leitungszustandes. In Abbildung 76 ist die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Diskriminanzfunktion mittels der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die Variablen Alter und Rauigkeit zeigten die höchsten Korrelationskoeffizienten und trugen daher am stärksten zur Gruppenunterscheidung bei.



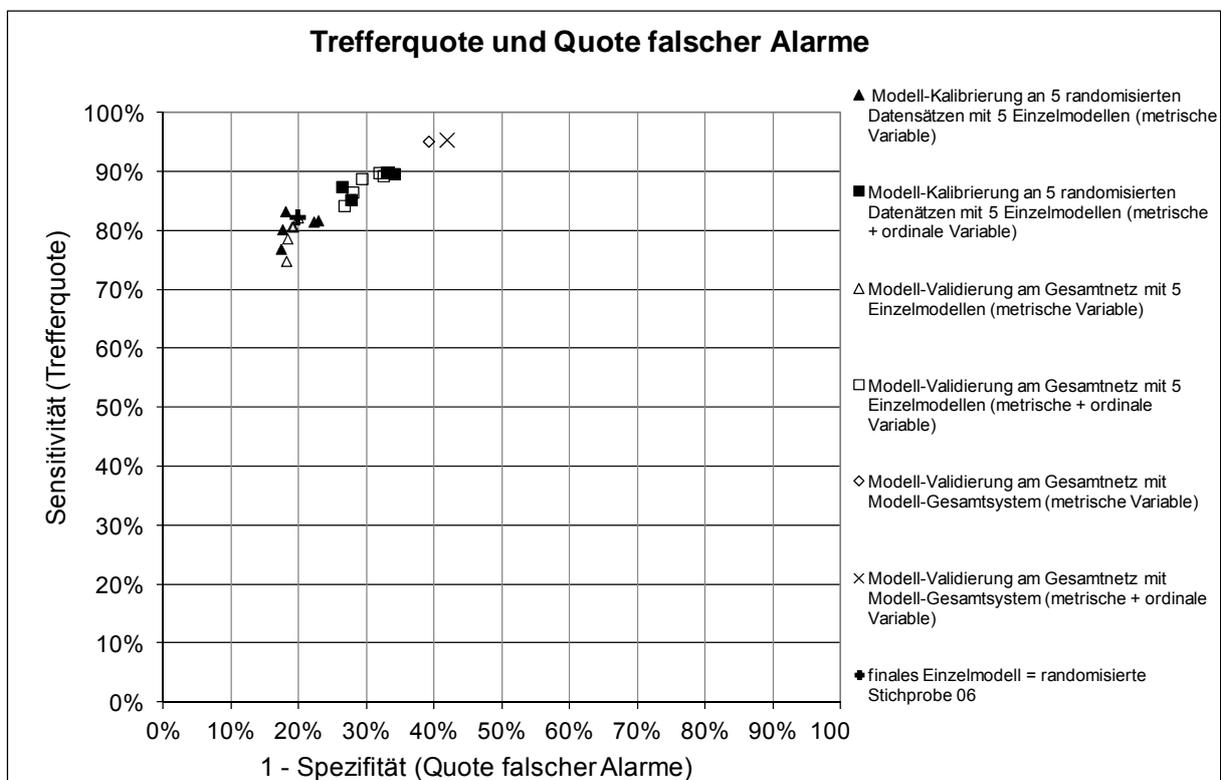
**Abbildung 75: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**



**Abbildung 76: Boxplot Korrelationskoeffizienten**

In Abbildung 77 sind die Klassifizierungsergebnisse der oben beschriebenen drei Gruppen der Eingangsdaten dargestellt. Die Modellkalibrierung an fünf randomisierten Datensätzen mit fünf Einzelmodellen basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 77 bis 82 %

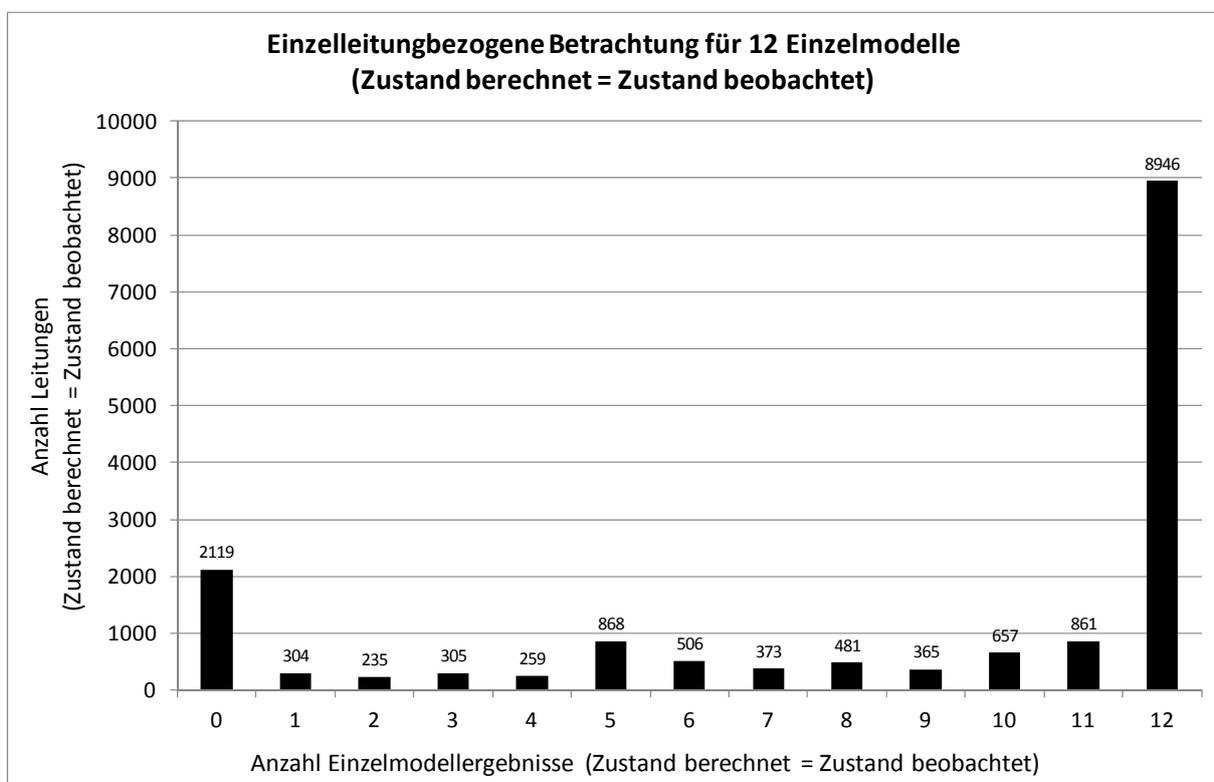
und eine Quote falscher Alarme von 17 bis 23 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen fünf Einzelmodellen ergab eine modellbedingt geringfügig niedrigere Trefferquote im Bereich von 75 bis 82 % und eine niedrigere Quote falscher Alarme von 18 bis 20 %. Die Modellkalibrierung an fünf randomisierten Datensätzen mit fünf Einzelmodellen basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 85 bis 90 % und eine Quote falscher Alarme von 26 bis 34 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen fünf Einzelmodellen ergab eine Trefferquote im Bereich von 84 bis 90 % und eine Quote falscher Alarme von 26 bis 32 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, ergab eine Trefferquote von 95 % und eine Quote falscher Alarme von 39 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, ergab eine Trefferquote von 95 % und eine Quote falscher Alarme von 42 %. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches die Gruppenzuordnung zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die maximal erzeugten Flächen unterhalb der Punkte der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 77) und die Summe der Diskriminanz-Funktionswerte für falsche Alarme je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet.



**Abbildung 77: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme**

Das Einzelmodell der Stichprobe 06 beinhaltet zur Berechnung der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit „Schaden allgemein“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringste Summe der falsch klassifizierten Diskriminanz-Funktionswerte auf und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 77). Die Einflussfaktoren Durchmesser, Alter und Länge der HZL-Abschnitte waren die signifikanten Variablen in der finalen Einzelgleichung der Stichprobe 06.

In der Validierung der zwölf Einzelgleichungen auf die gesamten 16 279 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 78) wurden für 8 946 Abschnitte (= 55 %) der beobachtete Leitungszustand richtig errechnet, wobei für 2 119 Abschnitte (= 13 %) keines der zwölf Einzelgleichungen den beobachteten Zustand richtig ermittelte.



**Abbildung 78: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle**

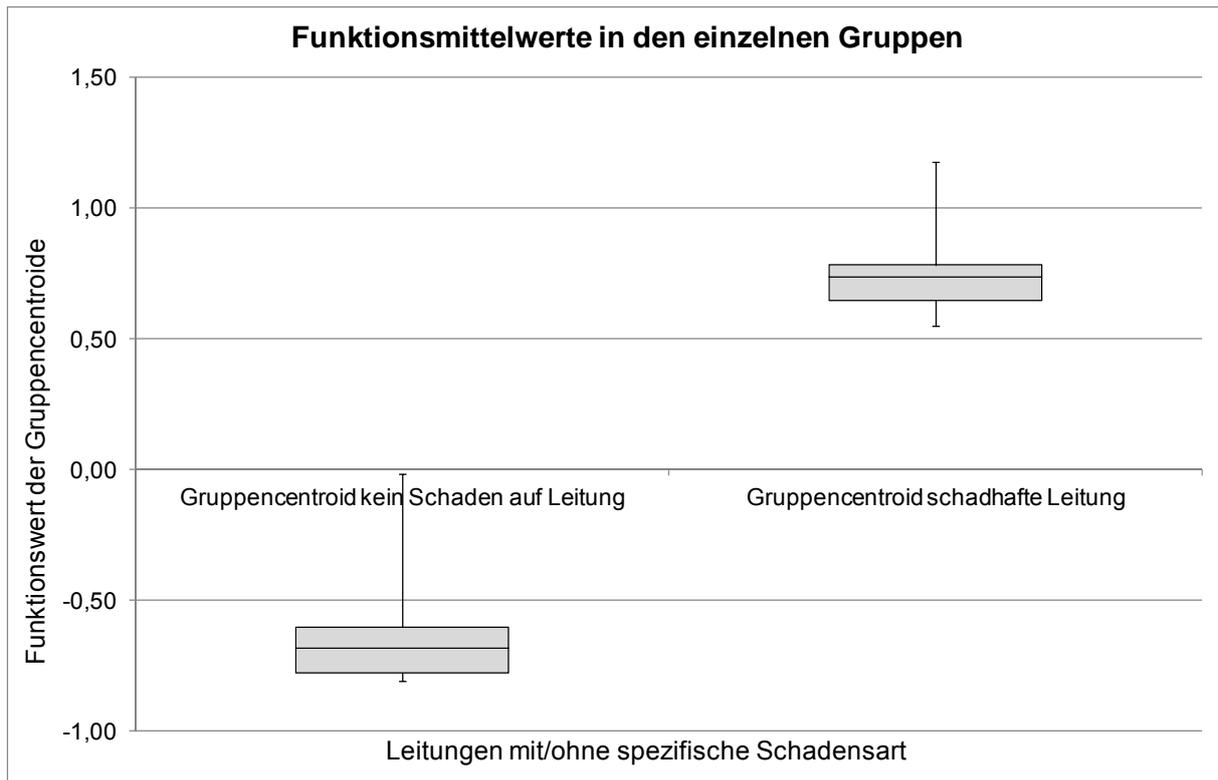
#### 7.4.3.1.2 Diskriminanzanalyse Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A

Aufgrund sachlogischer Überlegungen des Rohr-Boden-Systems und der Schadensmechanismen betreffend der Schadensart „Korrosionsloch“ wird eine Modellformulierung aufgestellt, bei der die zehn möglichen Einflussgrößen der unabhängigen Variablen auf die Auftretswahrscheinlichkeit der abhängigen Variable „Schadensart“ berücksichtigt wurden.

Die fünf Einflussfaktoren Durchmesser, Alter, Länge der HZL, Betriebsdruck und Rauigkeit bildeten in der Datenbasis des WVU A die rein metrisch skalierten Einflussfaktoren. Die fünf Einflussfaktoren Bodenaggressivität, korrosionsfördernder Boden, Streustrom Straßenbahn, Streustrom Gasleitung und Hölzchen-Auflager

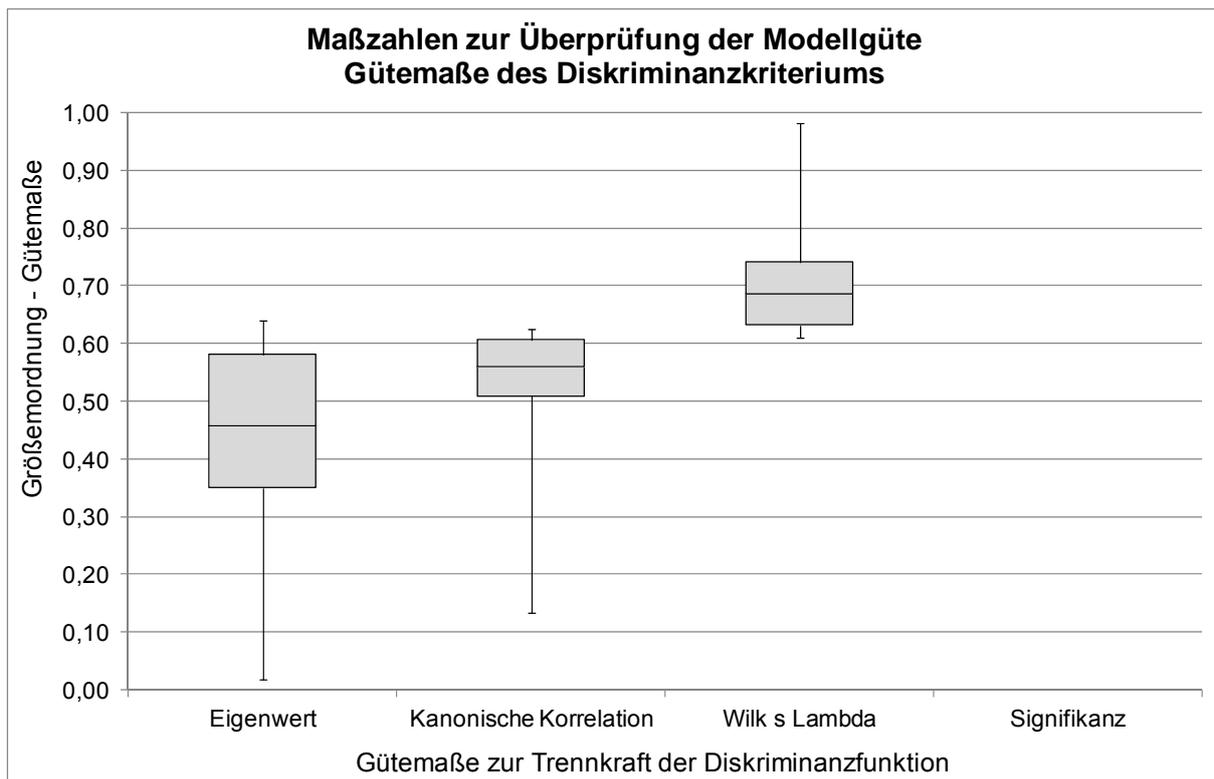
umfassten die ordinal skalierten Einflussfaktoren in der Datenbasis des WVU A. Die Variablen Material und Verbindungsart lagen nominal skaliert vor und wurden aufgrund der Nichterfüllung der Anwendungsbedingungen zur Diskriminanzanwendung nicht in der Berechnung berücksichtigt. Zur Bestimmung bzw. Formulierung der optimalen Diskriminanzfunktion wurden drei Gruppen der Eingangsdaten zur Diskriminanzberechnung berücksichtigt. Die Datenbasis für die erste und zweite Gruppe bildeten die fünf randomisierten Stichproben der BLRA, welche die höchste Modell- und Ergebnisgüte für die Schadensart „Korrosionsloch“ aufwiesen. Für die erste Gruppe wurden nur die oben angeführten fünf vorliegenden metrisch skalierten Variablen in der Berechnung verwendet. Die zweite Gruppe berücksichtigte die fünf vorliegenden metrisch skalierten und zusätzlich die fünf oben angeführten ordinal skalierten Variablen. Die dritte Gruppe berücksichtigte die Daten des Gesamtsystems zur Findung der optimalen Diskriminanzfunktion. Da die Klassifikation bzw. Kalibrierung der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wurde, wie für die Schätzung der Diskriminanzfunktion verwendet wurde, ergab sich eine überhöhte Trefferquote, da die Diskriminanzfunktion die Trefferquote der verwendeten Stichprobe maximiert. Somit wurden diese drei Gruppen der Eingangsdaten-Stichproben jeweils am Gesamtdatensatz validiert.

Die Schätzung der Diskriminanzfunktion und die Ermittlung der Diskriminanzkoeffizienten trennt die mit Hilfe des Diskriminanzkriteriums bzw. der Abstände der Gruppencentroide (siehe Abbildung 79) untersuchten Zustandsgruppen der HZL in die Gruppe spezifische Schadensart „Korrosionsloch“ vorhanden oder HZL ist nicht schadhaft.



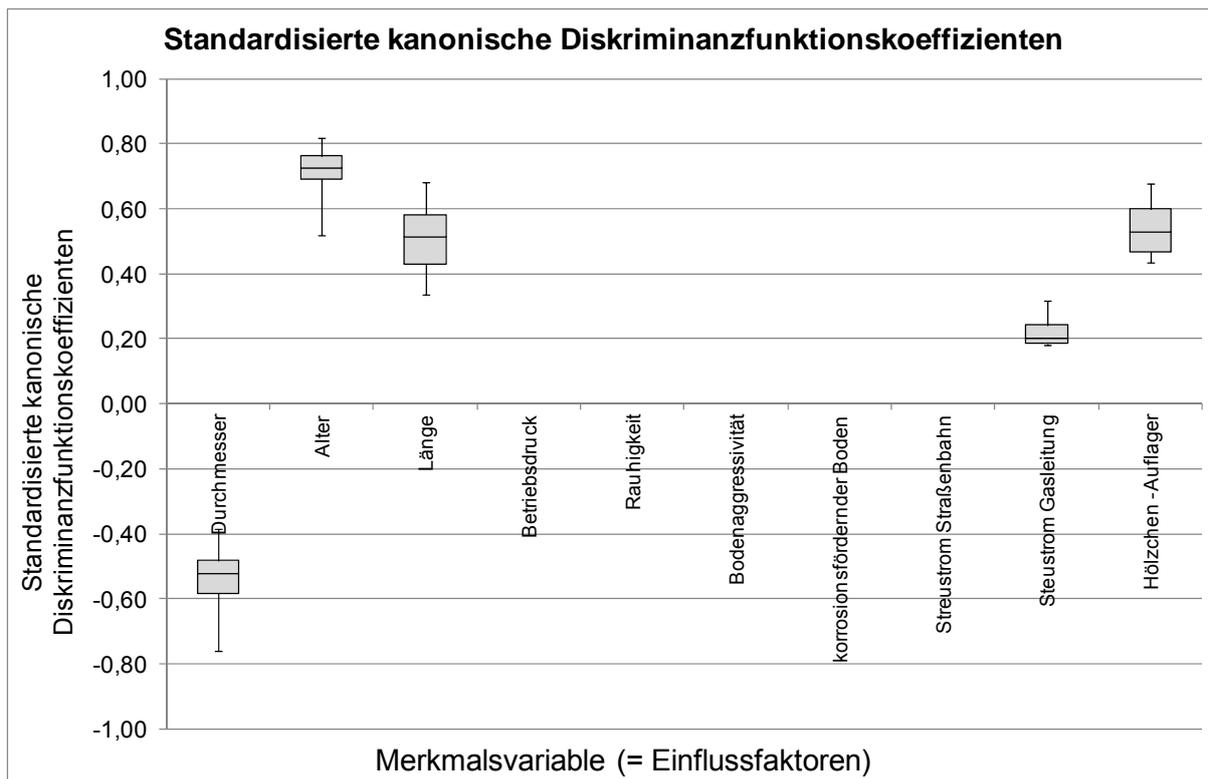
**Abbildung 79: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit**

Die Prüfung der Diskriminanzfunktion erfolgt mit Hilfe der Betrachtung des Eigenwertes, der kanonischen Korrelation, Wilk's Lambda und dem Signifikanzniveau. In Abbildung 80 zeigt die Betrachtung des Eigenwertes, dass die Streuung zwischen den Gruppen das 0,45fache (= Medianwert) der Streuung innerhalb der Gruppen darstellt. Dies bestätigt einen gewissen Erklärungswert des Modells. Der kanonische Korrelationskoeffizient in Abbildung 80 stellt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der gesamten Streuung mit einem Medianwert von 0,56 dar. Mit einem Medianwert von 0,69 wurde ein gewisser Erklärungswert des Modells bestätigt. Die vorhandenen Signifikanzwerte  $< 0,001$  bestätigten eine hohe Vertrauenswahrscheinlichkeit des vorhandenen Modells und es konnte folglich die Hypothese, dass in der Daten-Grundgesamtheit keine Unterscheidung der Leitungszustände schadhafte ja/nein möglich war, abgelehnt werden und eine hoch signifikante Zustandsunterscheidung bestätigt werden.

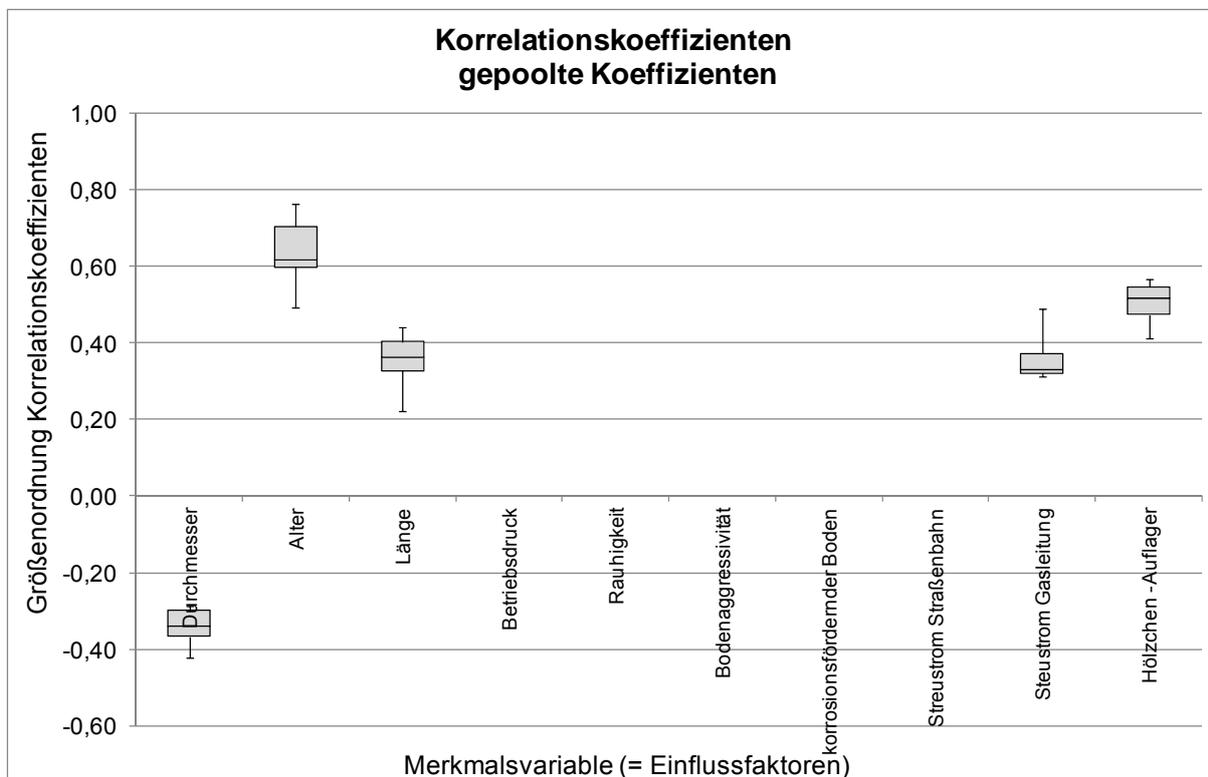


**Abbildung 80: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums**

Die Prüfung der Merkmalsvariablen bzw. Einflussfaktoren erfolgte mittels der Betrachtung der standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten und der Korrelationskoeffizienten, die Aufschluss über den Beitrag der einzelnen Einflussfaktoren zur Trennung in die Zustandsgruppen schadhaft ja/nein geben. Mit Hilfe dieser Koeffizienten werden Skalierungseffekte neutralisiert und, wie für die Beta-Koeffizienten bei der BLRA, können Einflussfaktoren unterschiedlicher Dimensionen miteinander verglichen werden. In der Zustandsgruppenzuordnung der Schadensart „Korrosionsloch“ waren folgende fünf Einflussfaktoren signifikant. Diese waren Durchmesser, Alter, Länge, Streustrom Gasleitung und Hölzchen-Auflager – alle anderen wurden als nicht signifikante Merkmalsvariable im Modell nicht eingeschlossen. Ein Anstieg in der Größenordnung der Einflüsse von Alter und Länge bewirkte eine Gruppenzuordnung in Richtung Schaden vorhanden. Im Gegensatz dazu wirkte ein Anstieg in der Größenordnung des Durchmessers in Richtung eines nicht schadhaften Leitungszustandes. In Abbildung 82 ist die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Diskriminanzfunktion mittels der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die Variablen Alter und Hölzchen weisen die höchsten Korrelationskoeffizienten auf und tragen daher am stärksten zur Gruppenunterscheidung bei.



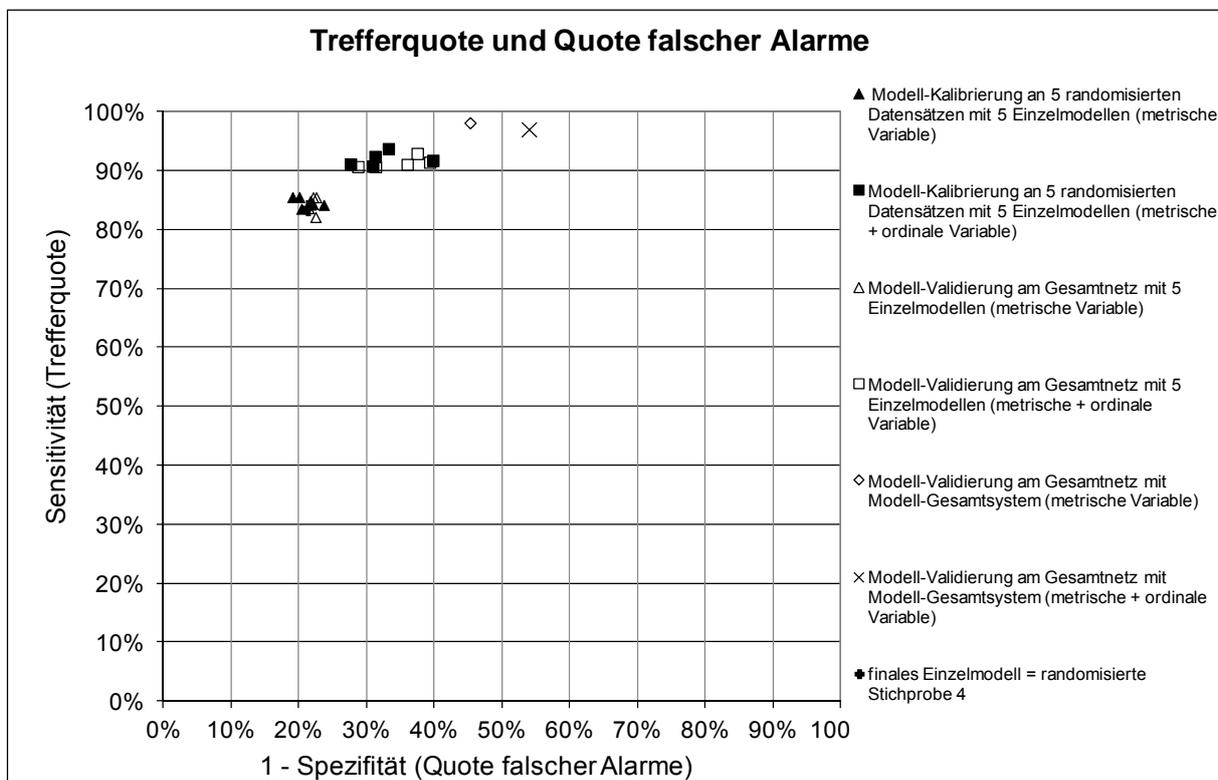
**Abbildung 81: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**



**Abbildung 82: Boxplot Korrelationskoeffizienten**

In Abbildung 83 sind die Klassifizierungsergebnisse der anfangs beschriebenen drei Gruppen von Eingangsdaten dargestellt. Die Modellkalibrierung an fünf randomisierten Datensätzen mit fünf Einzelmodellen basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 83 bis 85 %

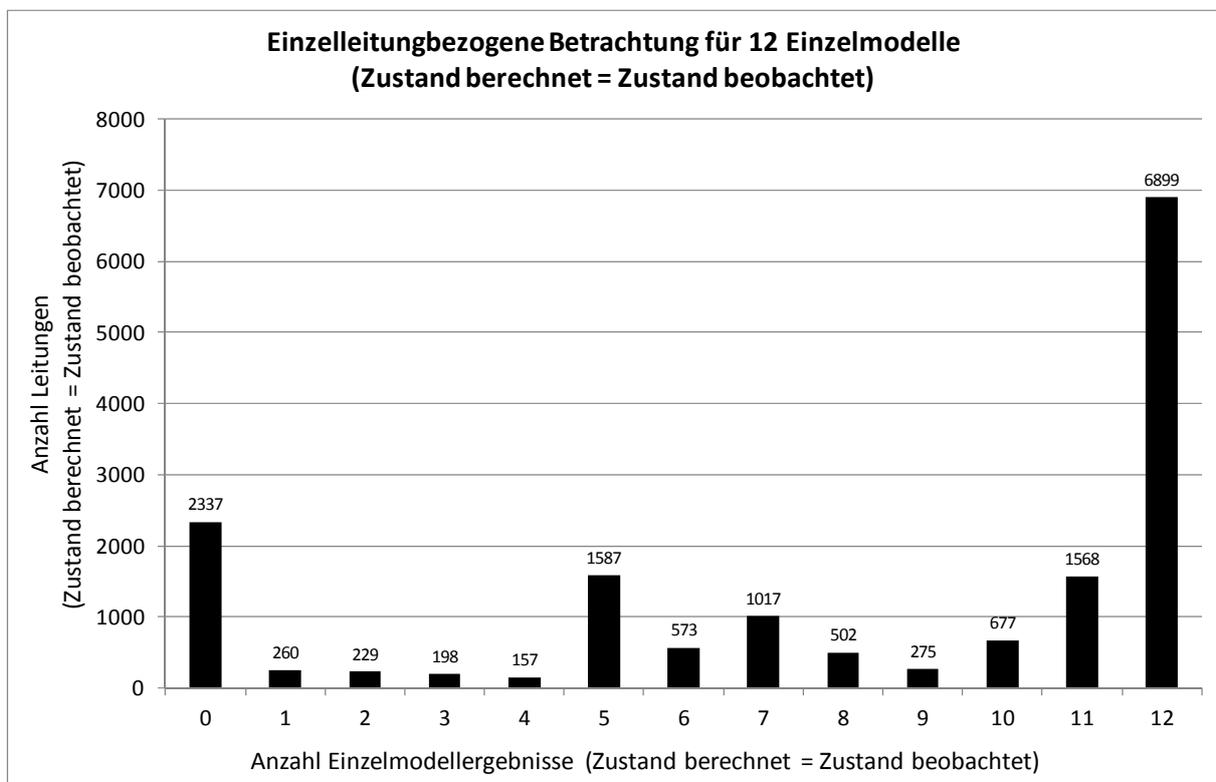
und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 19 bis 23 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen fünf Einzelmodellen ergab eine modellbedingt geringfügig niedrigere Trefferquote im Bereich von 83 bis 85 % und eine niedrigere Quote falscher Alarme im Bereich von 22 %. Die Modellkalibrierung an fünf randomisierten Datensätzen mit fünf Einzelmodellen basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 90 bis 94 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 27 bis 40 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen 5 Einzelmodellen ergab eine Trefferquote im Bereich von 90 bis 93 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 27 bis 39 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, ergibt eine Trefferquote von 98 % und eine Quote falscher Alarme von 45 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, ergab eine Trefferquote von 97 % und eine Quote falscher Alarme von 53 %. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches die Gruppenzuordnung zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die maximal erzeugte Fläche unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 83) und die Summe der Diskriminanz-Funktionswerte für falsche Treffer je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet.



**Abbildung 83: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme**

Das Einzelmodell der Stichprobe 04 beinhaltetete zur Berechnung der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit „Korrosionsloch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringste Summe der falsch klassifizierten Diskriminanz-Funktionswerte auf und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 83). Die Einflussfaktoren Durchmesser, Alter und Länge der HZL-Abschnittet bildeten die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell der Stichprobe 04.

In der Validierung der 12 Einzelmodelle auf die gesamten 16 279 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 84) wurden für 6 899 Abschnitte für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 2 337 Abschnitte keines der 12 Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte.



**Abbildung 84: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle**

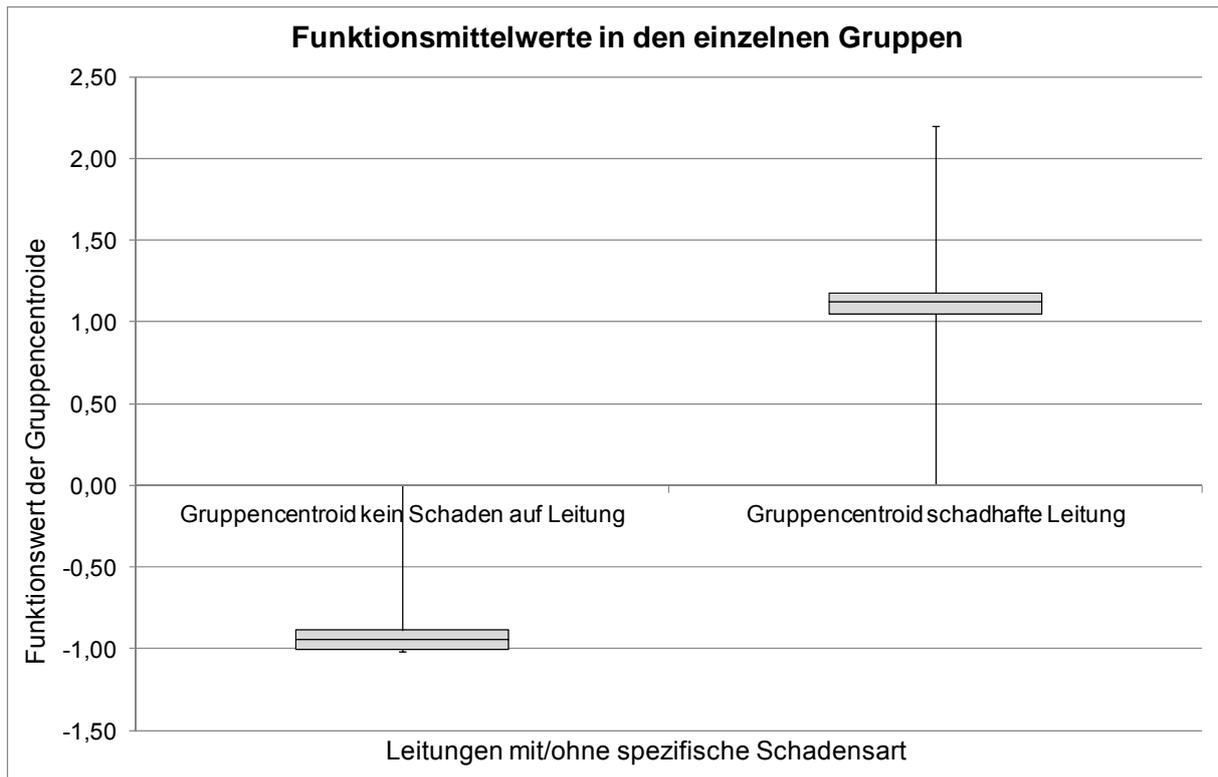
#### 7.4.3.1.3 Diskriminanzanalyse Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - WVU A

Aufgrund sachlogischer Überlegungen des Rohr-Boden-Systems und der Schadensmechanismen betreffend der Schadensart „Rundriss-Längsriss-Scherbenbruch“ wurde eine Modellformulierung aufgestellt, bei der die 17 möglichen Einflussgrößen der unabhängigen Variablen auf die Aufttrittswahrscheinlichkeit der abhängigen Variable berücksichtigt wurden.

Die fünf Einflussfaktoren Durchmesser, Alter, Länge der HZL, Betriebsdruck und Rauigkeit bildeten in der Datenbasis des WVU A die rein metrisch skalierten Einflussfaktoren. Die fünf Einflussfaktoren Bodenaggressivität, korrosionsfördernder

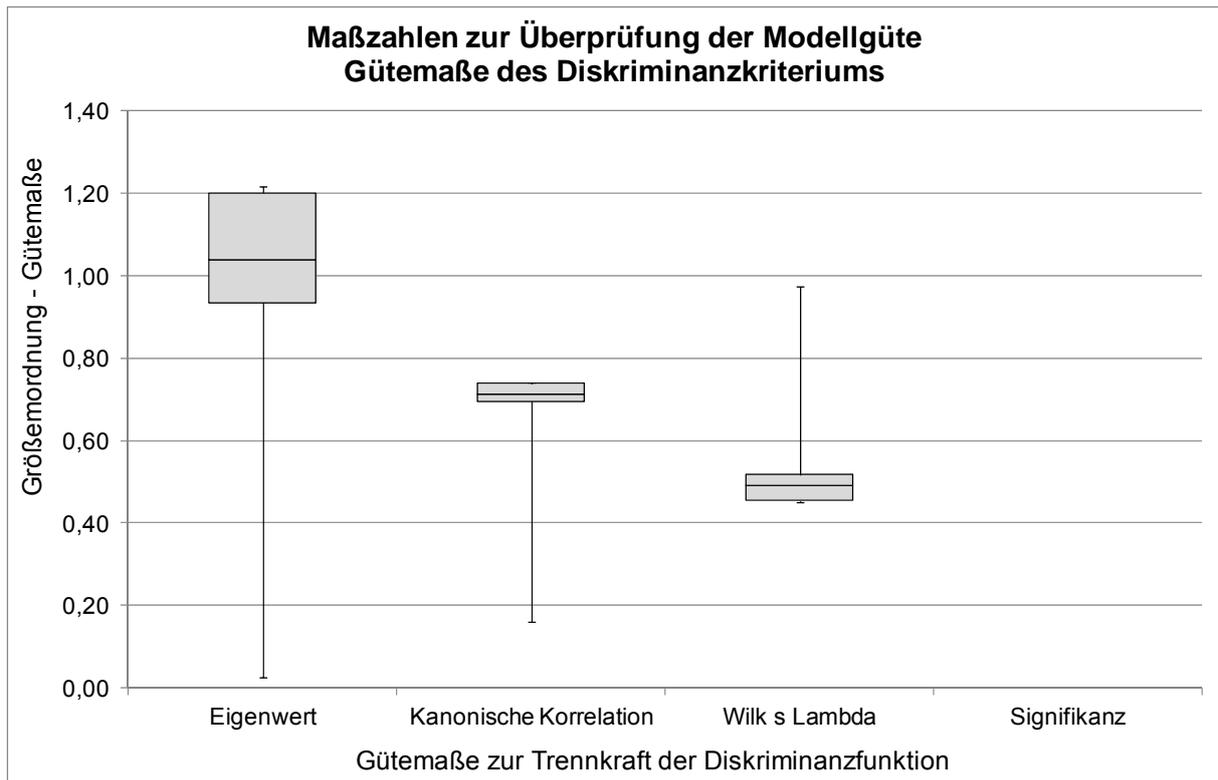
Boden, Streustrom Straßenbahn, Streustrom Gasleitung und Hölzchen-Auflager bildeten die korrosionsfördernden Einflussaktoren. Die sieben Einflussvariablen Setzungsempfindlichkeit des Bodens, Kriech-Rutschhang, Schanzen und Wälle, Straßenbahn mechanische Oberflächenbelastung, Verkehr, Belagszustand und Baumwurzeleinfluss umfassten die sieben mechanischen ordinal skalierten Einflussfaktoren in der Datenbasis des WVU A. Die Variablen Material und Verbindungsart lagen nominal skaliert vor und wurden aufgrund der Nichterfüllung der Anwendungsbedingungen zur Diskriminanzanwendung nicht in der Berechnung berücksichtigt. Zur Bestimmung bzw. Formulierung der optimalen Diskriminanzfunktion wurden drei Gruppen der Eingangsdaten zur Diskriminanzberechnung berücksichtigt. Die Datenbasis für die erste und zweite Gruppe bildeten die fünf randomisierten Stichproben der BLRA, welche die höchste Modell- und Ergebnisgüte für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ aufwiesen. Für die erste Gruppe wurden nur die oben angeführten fünf vorliegenden metrisch skalierten Variablen in der Berechnung verwendet. Die zweite Gruppe berücksichtigte die fünf vorliegenden metrisch skalierten und zusätzlich die zwölf oben angeführten ordinal skalierten Variablen. Die dritte Gruppe berücksichtigt die Daten des Gesamtsystems zur Findung der optimalen Diskriminanzfunktion. Da die Klassifikation bzw. Kalibrierung der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wurde, wie für die Schätzung der Diskriminanzfunktion verwendet wurde, ergab sich eine überhöhte Trefferquote, da die Diskriminanzfunktion die Trefferquote der verwendeten Stichprobe maximiert. Somit wurden diese drei Gruppen der Eingangsdaten-Stichproben jeweils am Gesamtdatensatz validiert.

Die Schätzung der Diskriminanzfunktion und die Ermittlung der Diskriminanzkoeffizienten trennt die mit Hilfe des Diskriminanzkriteriums bzw. der Abstände der Gruppencentroide (siehe Abbildung 85) untersuchten Zustandsgruppen der HZL in die Gruppe spezifische Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ vorhanden oder HZL ist nicht schadhaft.



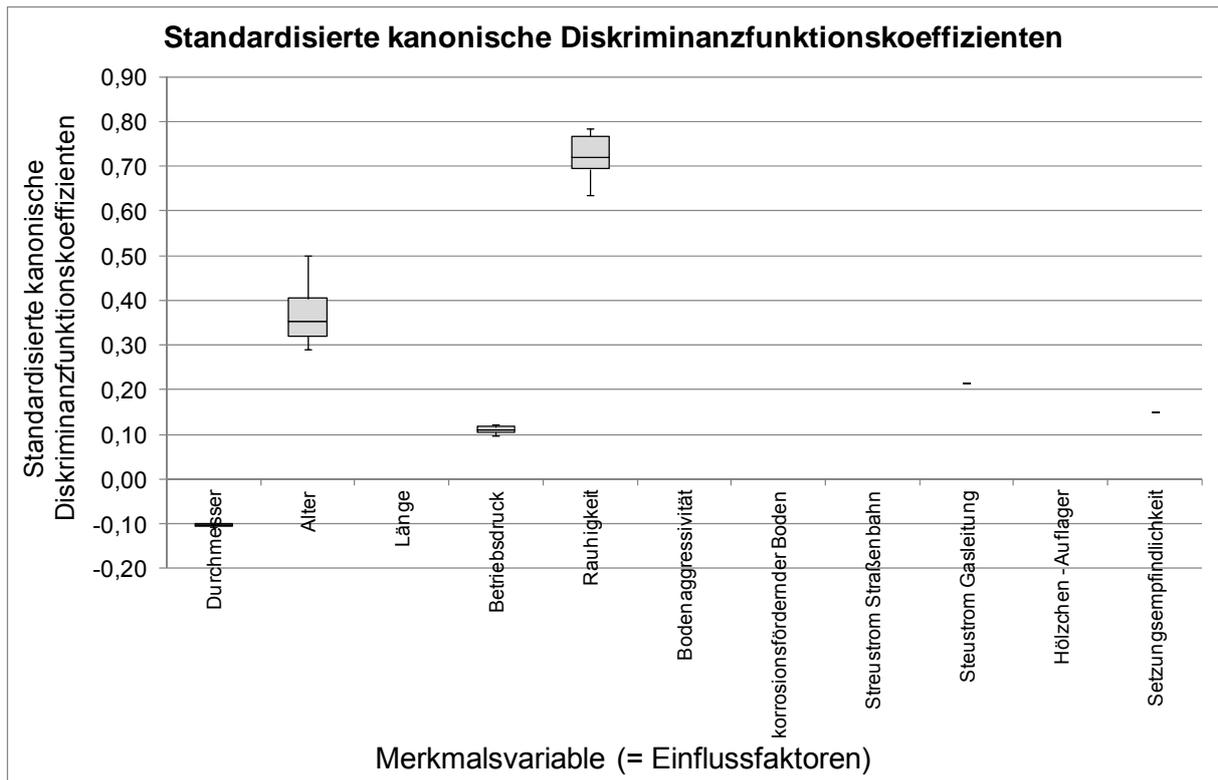
**Abbildung 85: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit**

Die Prüfung der Diskriminanzfunktion erfolgte mit Hilfe der Betrachtung des Eigenwertes, der kanonischen Korrelation, Wilk's Lambda und dem Signifikanzniveau. In Abbildung 80 zeigt die Betrachtung des Eigenwertes, dass die Streuung zwischen den Gruppen das 0,45fache (= Medianwert) der Streuung innerhalb der Gruppen darstellte. Dies bestätigte einen gewissen Erklärungswert des Modells. Der kanonische Korrelationskoeffizient in Abbildung 80 stellt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der gesamten Streuung mit einem Medianwert von 0,56 dar. Mit einem Medianwert von 0,69 für Wilk's Lambda wurde ein gewisser Erklärungswert des Modells bestätigt. Die vorhandenen Signifikanzwerte  $< 0,001$  bestätigten eine hohe Vertrauenswahrscheinlichkeit des vorhandenen Modells und es kann folglich die Hypothese, dass in der Daten-Grundgesamtheit keine Unterscheidung der Leitungszustände schadhaft ja/nein möglich war, abgelehnt werden und eine hoch signifikante Zustandsunterscheidung bestätigt werden.

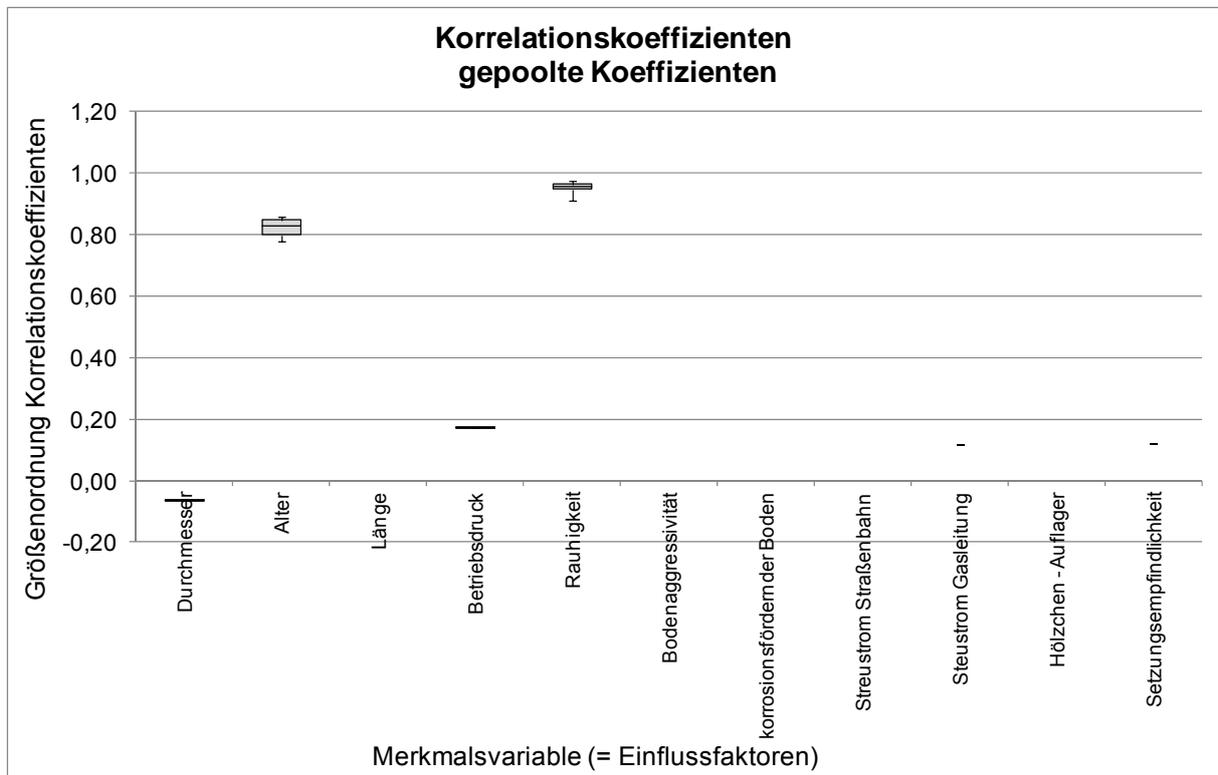


**Abbildung 86: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums**

Die Prüfung der Merkmalsvariablen bzw. Einflussfaktoren erfolgte mittels der Betrachtung der standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten und der Korrelationskoeffizienten, die Aufschluss über den Beitrag der einzelnen Einflussfaktoren zur Trennung in die Zustandsgruppen schadhaft ja/nein geben. Mit Hilfe dieser Koeffizienten wurden Skalierungseffekte neutralisiert und, wie für die Beta-Koeffizienten bei der BLRA, können Einflussfaktoren unterschiedlicher Dimensionen miteinander verglichen werden. In der Zustandsgruppenzuordnung der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ waren folgende sechs Einflussfaktoren signifikant. Diese sind Durchmesser, Alter, Betriebsdruck, Rauigkeit, Streustrom Gasleitung und Setzungsempfindlichkeit – alle anderen wurden als nicht signifikante Merkmalsvariable im Modell nicht eingeschlossen. Ein Anstieg in der Größenordnung der Einflüsse von Alter, Betriebsdruck, Rauigkeit und Setzungsempfindlichkeit und das Vorhandensein von Streustrom Gasleitung bewirkte eine Gruppenzuordnung in Richtung Schaden vorhanden. Im Gegensatz dazu wirkte ein Anstieg in der Größenordnung des Durchmessers in Richtung eines nicht schadhafte Leitungszustandes. In Abbildung 88 ist die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Diskriminanzfunktion mittels der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die Variablen Alter und Rauigkeit beinhalteten die höchsten Korrelationskoeffizienten und trugen daher am stärksten zur Gruppenunterscheidung bei.



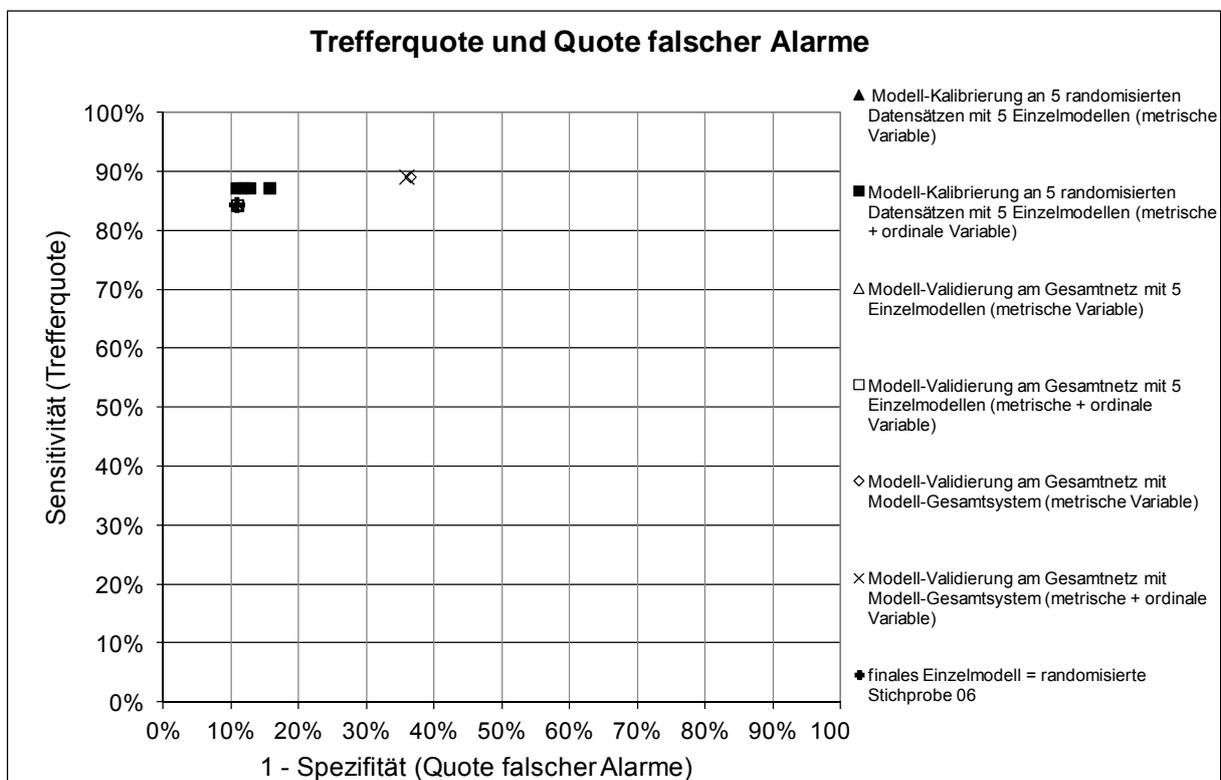
**Abbildung 87: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**



**Abbildung 88: Boxplot Korrelationskoeffizienten**

In Abbildung 89 sind die Klassifizierungsergebnisse der anfangs beschriebenen drei Gruppen von Eingangsdaten dargestellt. Die Modellkalibrierung an fünf randomisierten Datensätzen mit fünf Einzelmodellen basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote von 87 % und eine Quote

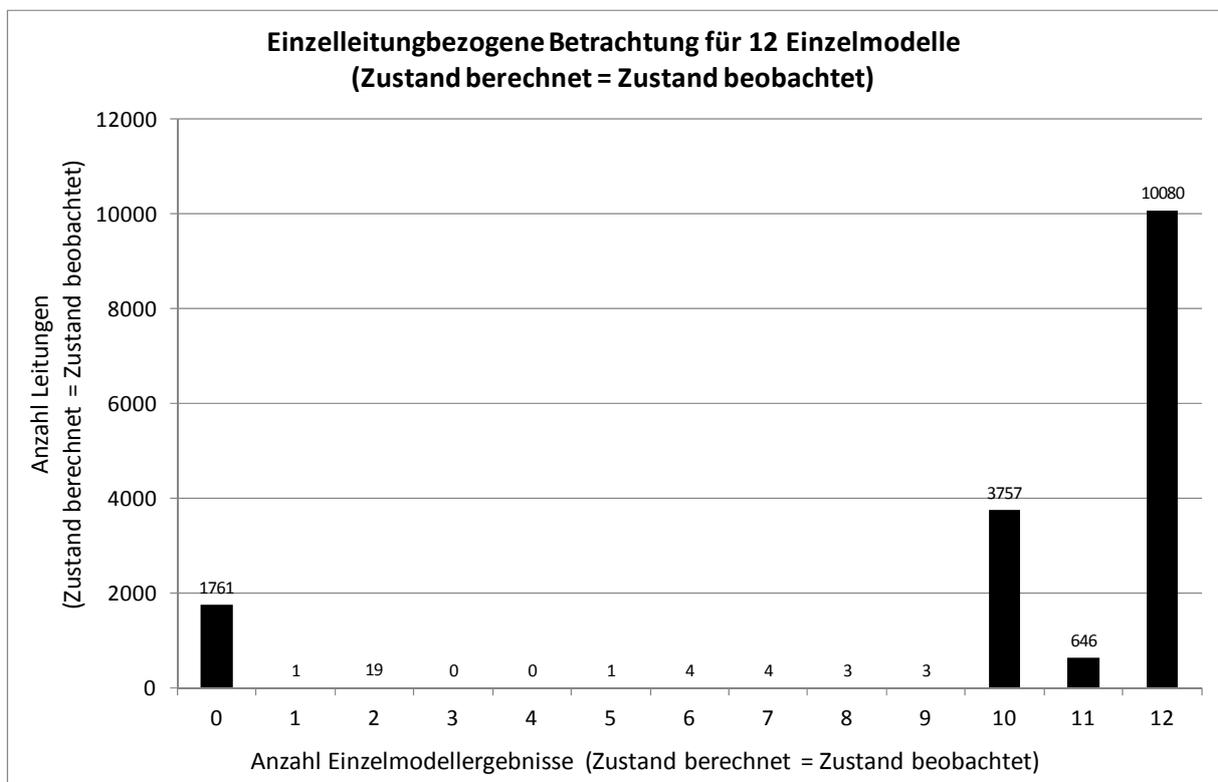
falscher Alarme im Bereich von 10 bis 15 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen fünf Einzelmodellen ergab eine Trefferquote von 84 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 10 %. Die Modellkalibrierung an fünf randomisierten Datensätzen mit fünf Einzelmodellen basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote von 87 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 10 bis 15 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen fünf Einzelmodellen erreichte eine Trefferquote von 84 % und eine Quote falscher Alarme von 10 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, ergab eine Trefferquote von 89 % und eine Quote falscher Alarme von 35 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, erreichte eine Trefferquote von 89 % und eine Quote falscher Alarme von 34 %. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches die Gruppenzuordnung zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die maximal erzeugte Fläche unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 89) und die Summe der Diskriminanz-Funktionswerte für falsche Treffer je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet.



**Abbildung 89: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme**

Das Einzelmodell der Stichprobe 06 zeigte zur Berechnung der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringste Summe der falsch klassifizierten Diskriminanz-Funktionswerte und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 89). Die Einflussfaktoren Alter und Betriebsdruck bildeten die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell der Stichprobe 06.

In der Validierung der zwölf Einzelmodelle auf die gesamten 16 279 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 90) wurden für 10 080 Abschnitte für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 1 761 Abschnitte keines der zwölf Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte.



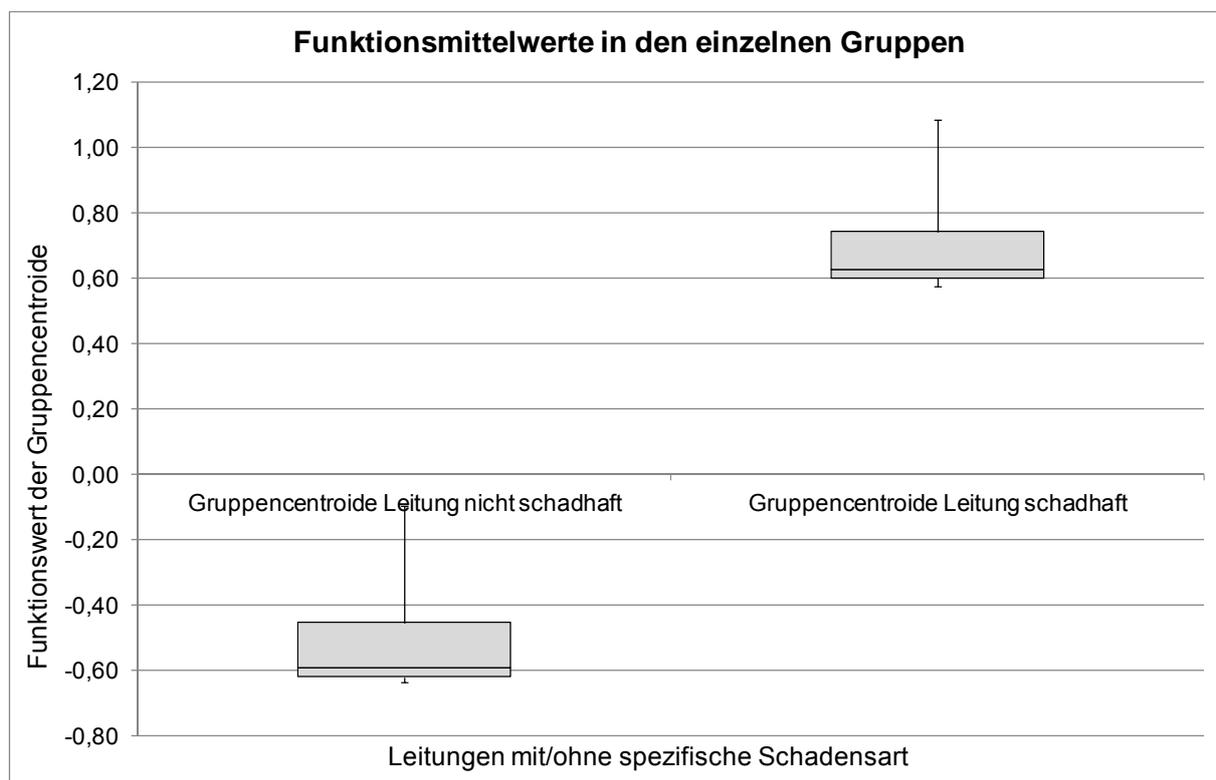
**Abbildung 90: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle**

#### 7.4.3.1.4 Diskriminanzanalyse Schadensart „Schaden allgemein“ - WVU B

Die sechs Einflussfaktoren Rohrdurchmesser, Alter, Länge der HZL, DN Gas, DN Kanal und Baum Stammumfang bildeten in der Datenbasis des WVU B die rein metrisch skalierten Einflussfaktoren. Die neun Einflussfaktoren AL, VL, Gas, Kanal, Bäume, Hauptverkehrsstraße, Straßenbahn, Schieber/Klappen und Ziegelaufleger umfassten die ordinal skalierten Einflussfaktoren in der Datenbasis des WVU B. Die vier Variablen Material, DZ, Druckzone und Herstellungsart lagen nominal skaliert vor und wurden aufgrund der Nichterfüllung der Anwendungsbedingungen zur Diskriminanzanwendung nicht in der Berechnung berücksichtigt. Zur Bestimmung bzw. Formulierung der optimalen Diskriminanzfunktion wurden drei Gruppen der

Eingangsdaten zur Diskriminanzberechnung berücksichtigt. Die Datenbasis für die erste und zweite Gruppe bildeten die drei randomisierten Stichproben der BLRA, welche die höchste Modell- und Ergebnisgüte für die Schadensart „Schaden allgemein“ aufwiesen. Für die erste Gruppe wurden nur die oben angeführten sechs vorliegenden metrisch skalierten Variablen in der Berechnung verwendet. Die zweite Gruppe berücksichtigte die sechs vorliegenden metrisch skalierten und zusätzlich die neun oben angeführten ordinal skalierten Variablen. Die dritte Gruppe berücksichtigt die Daten des Gesamtsystems zur Findung der optimalen Diskriminanzfunktion. Da die Klassifikation bzw. Kalibrierung der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wurde, wie für die Schätzung der Diskriminanzfunktion verwendet wurde, ergab sich eine überhöhte Trefferquote, da die Diskriminanzfunktion die Trefferquote der verwendeten Stichprobe maximiert. Somit wurden diese drei Gruppen der Eingangsdaten-Stichproben jeweils am Gesamtdatensatz validiert.

Die Schätzung der Diskriminanzfunktion und die Ermittlung der Diskriminanzkoeffizienten trennt die mit Hilfe des Diskriminanzkriteriums bzw. der Abstände der Gruppencentroide (siehe Abbildung 91) untersuchten Zustandsgruppen der HZL in die Gruppe spezifische Schadensart „Schaden allgemein“ vorhanden oder HZL ist nicht schadhaft.

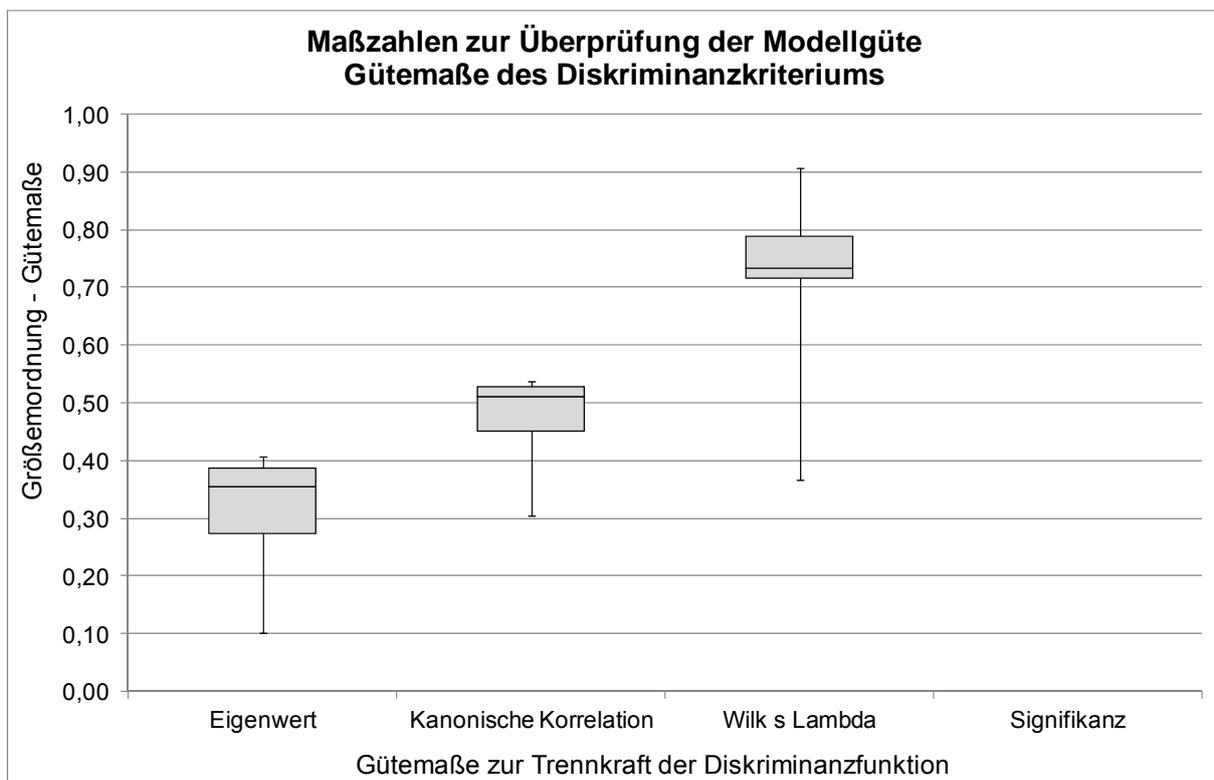


**Abbildung 91: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit**

Die Prüfung der Diskriminanzfunktion erfolgte mit Hilfe der Betrachtung des Eigenwertes, der kanonischen Korrelation, Wilk's Lambda und dem Signifikanzniveau. In Abbildung 92 zeigte die Betrachtung des Eigenwertes, dass die Streuung zwischen den Gruppen das 0,35fache (= Medianwert) der Streuung

innerhalb der Gruppen darstellt. Dies bestätigte einen gewissen Erklärungswert des Modells. Der kanonische Korrelationskoeffizient in Abbildung 92 stellt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der gesamten Streuung mit einem Medianwert von 0,51 dar. Mit einem Medianwert von 0,73 für Wilk's Lambda wurde ein gewisser Erklärungswert des Modells bestätigt. Die vorhandenen Signifikanzwerte  $< 0,001$  bestätigten eine hohe Vertrauenswahrscheinlichkeit des vorhandenen Modells und es kann folglich die Hypothese, dass in der Daten-Grundgesamtheit keine Unterscheidung der Leitungszustände schadhaft ja/nein möglich war, abgelehnt werden und eine hoch signifikante Zustandsunterscheidung bestätigt werden.

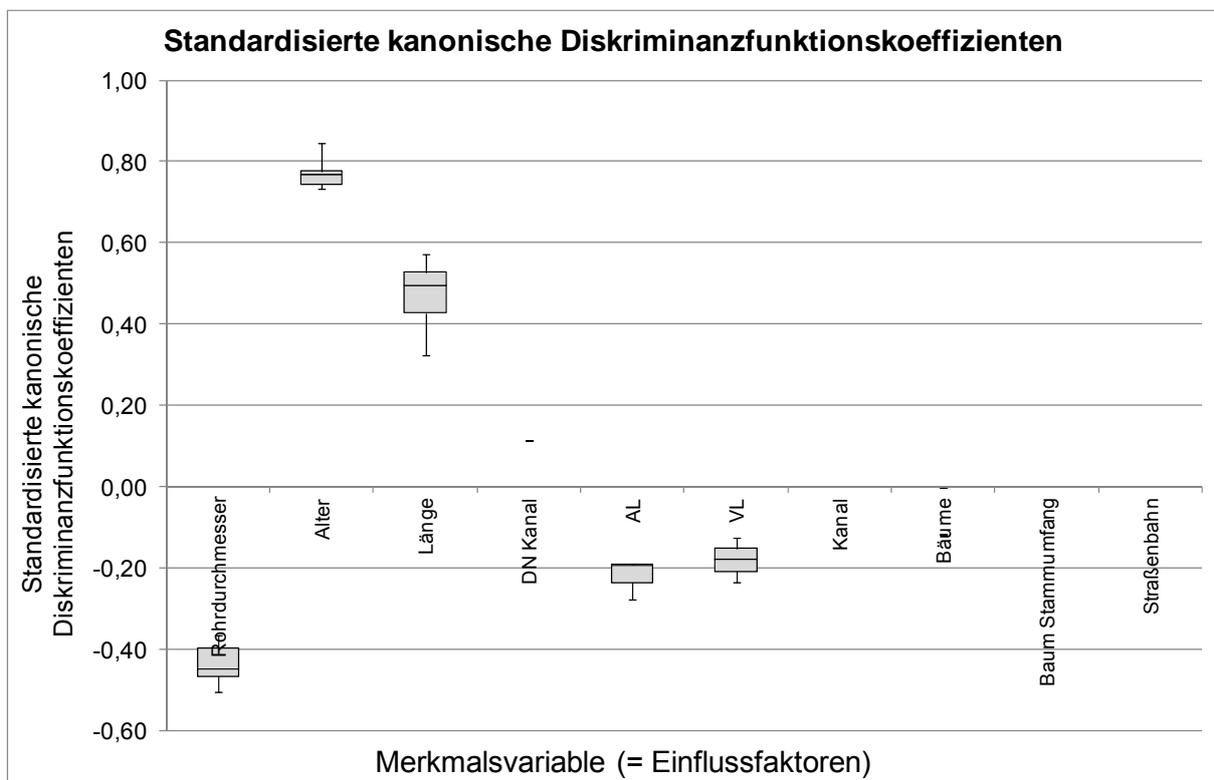
Aufgrund sachlogischer Überlegungen des Rohr-Boden-Systems und der Schadensmechanismen betreffend der Schadensart „Schaden allgemein“ wird eine Modellformulierung aufgestellt, bei der die 15 möglichen Einflussgrößen der unabhängigen Variablen auf die Auftrittswahrscheinlichkeit der abhängigen Variable berücksichtigt werden.



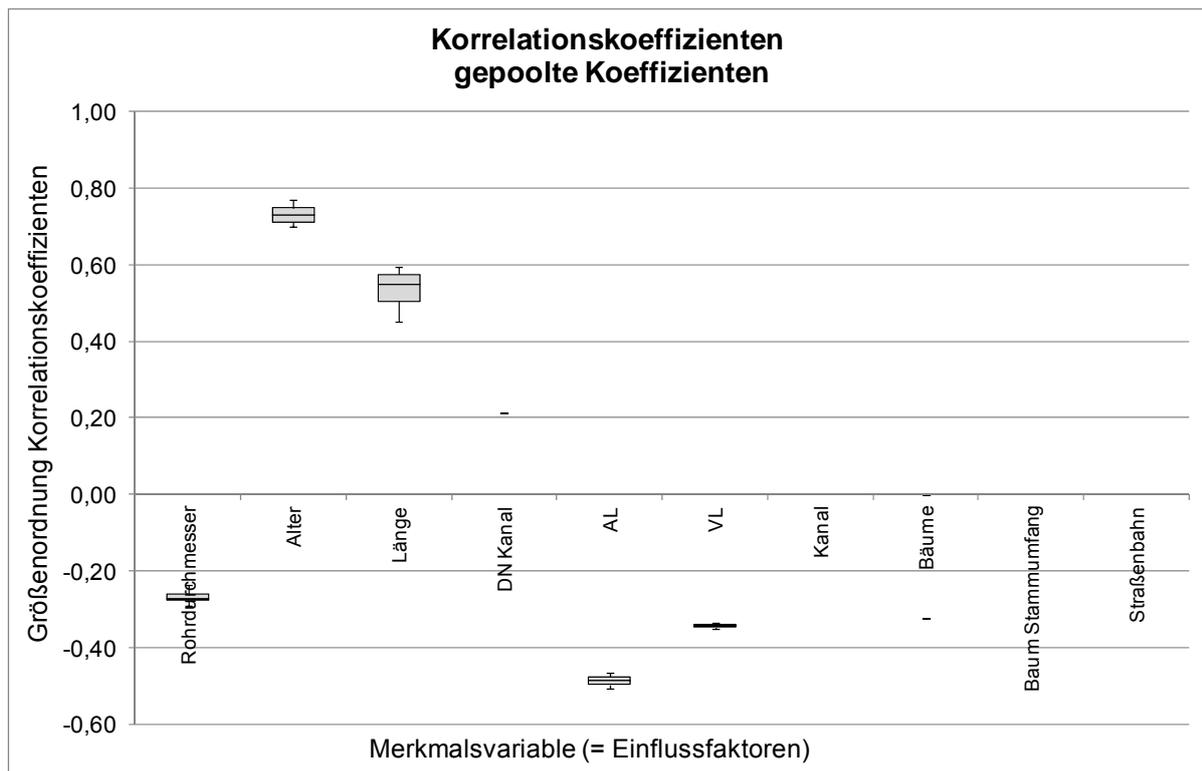
**Abbildung 92: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums**

Die Prüfung der Merkmalsvariablen bzw. Einflussfaktoren erfolgte mittels der Betrachtung der standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten und der Korrelationskoeffizienten, die Aufschluss über den Beitrag der einzelnen Einflussfaktoren zur Trennung in die Zustandsgruppen schadhaft ja/nein geben. Mit Hilfe dieser Koeffizienten wurden Skalierungseffekte neutralisiert und, wie für die Beta-Koeffizienten bei der BLRA, können Einflussfaktoren unterschiedlicher Dimensionen miteinander verglichen werden. In der Zustandsgruppenzuordnung der Schadensart „Schaden allgemein“ waren folgende sieben Einflussfaktoren

signifikant: Rohrdurchmesser, Alter, Länge, DN Kanal, AL, VL und Bäume – alle anderen wurden als nicht signifikante Merkmalsvariable im Modell nicht eingeschlossen. Ein Anstieg in der Größenordnung der Einflüsse von Alter, Länge, DN Kanal bewirkte eine Gruppenzuordnung in Richtung Schaden vorhanden. Im Gegensatz dazu wirkten ein Anstieg in der Größenordnung des Durchmessers und das Nichtvorhandensein von AL, VL und Bäumen in Richtung eines nicht schadhafte Leitungszustandes. In Abbildung 94 ist die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Diskriminanzfunktion mittels der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die Variablen Alter, Länge und AL beinhalteten die höchsten Korrelationskoeffizienten und trugen daher am stärksten zur Gruppenunterscheidung bei.



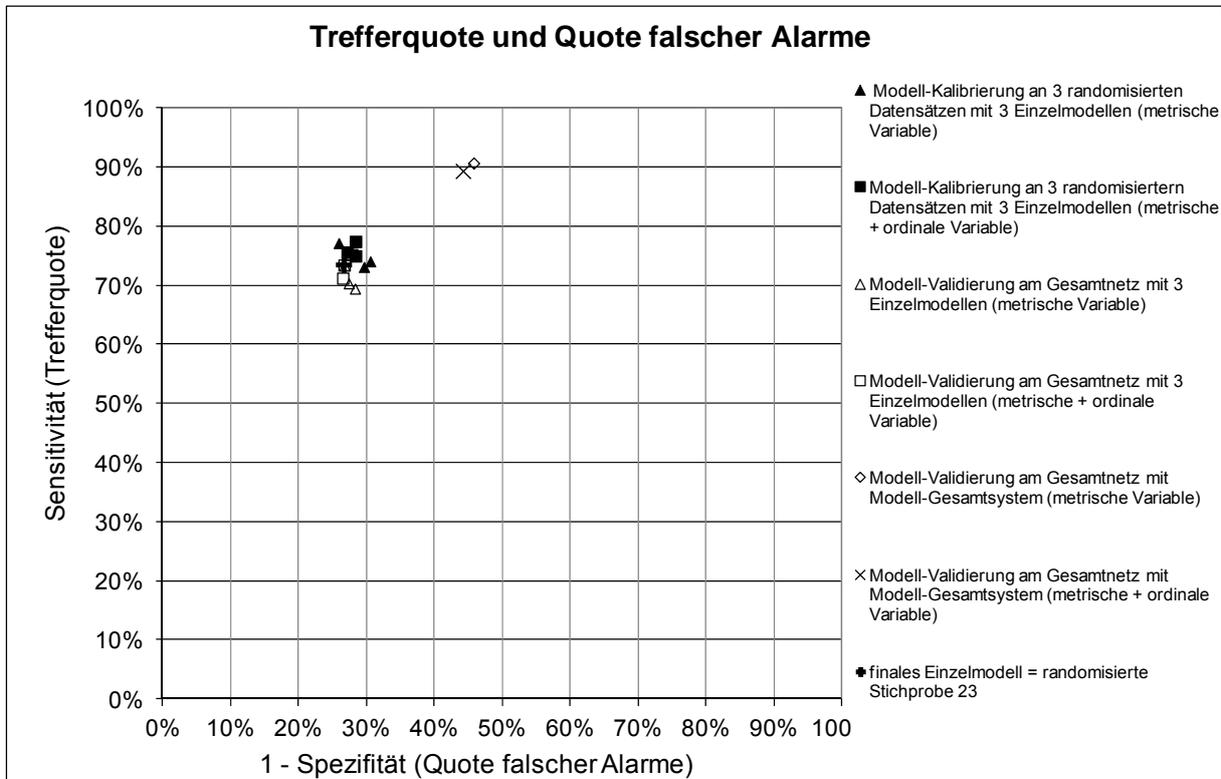
**Abbildung 93: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**



**Abbildung 94: Boxplot Korrelationskoeffizienten**

In Abbildung 95 sind die Klassifizierungsergebnisse der anfangs beschriebenen drei Gruppen von Eingangsdaten dargestellt. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 73 bis 77 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 25 bis 30 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen ergab eine modellbedingt geringfügig niedrigere Trefferquote im Bereich von 69 bis 73 % und eine niedrigere Quote falscher Alarme im Bereich von 26 bis 28 %. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 75 bis 77 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 27 bis 28 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen erreichte eine Trefferquote im Bereich von 71 bis 75 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 26 bis 27 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, ergab eine Trefferquote von 90 % und eine Quote falscher Alarme von 45 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, erreichte eine Trefferquote von 89 % und eine Quote falscher Alarme von 44 %. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches die Gruppenzuordnung zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die

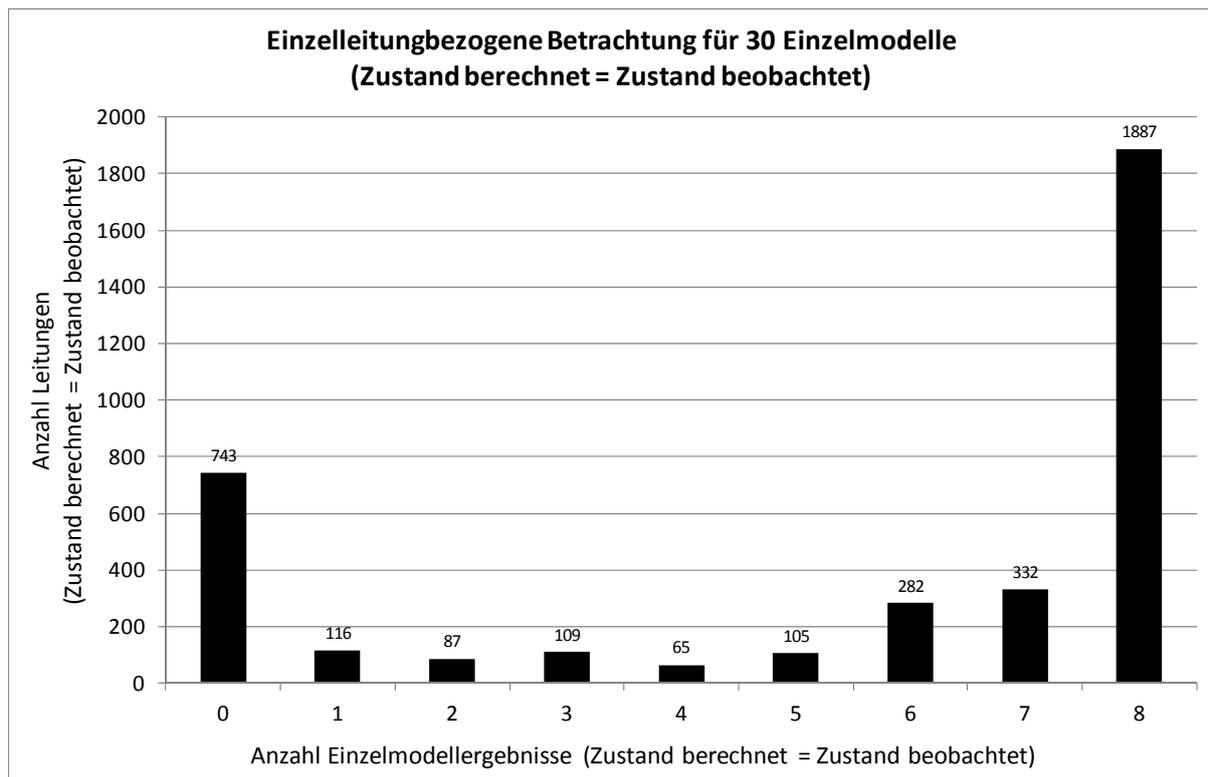
maximal erzeugte Fläche unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 95) und die Summe der Diskriminanz-Funktionswerte für falsche Treffer je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet.



**Abbildung 95: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme**

Das Einzelmodell der Stichprobe 23 erreichte zur Berechnung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit „Schaden allgemein“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringste Summe der falsch klassifizierten Diskriminanz-Funktionswerte und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 95). Die vier Einflussfaktoren Durchmesser, Alter, Länge der HZL-Abschnittet und AL bildeten die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell der Stichprobe 23.

In der Validierung der acht Einzelmodelle auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 96) wurden für 1 887 Abschnitte für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 743 Abschnitte keines der acht Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte.



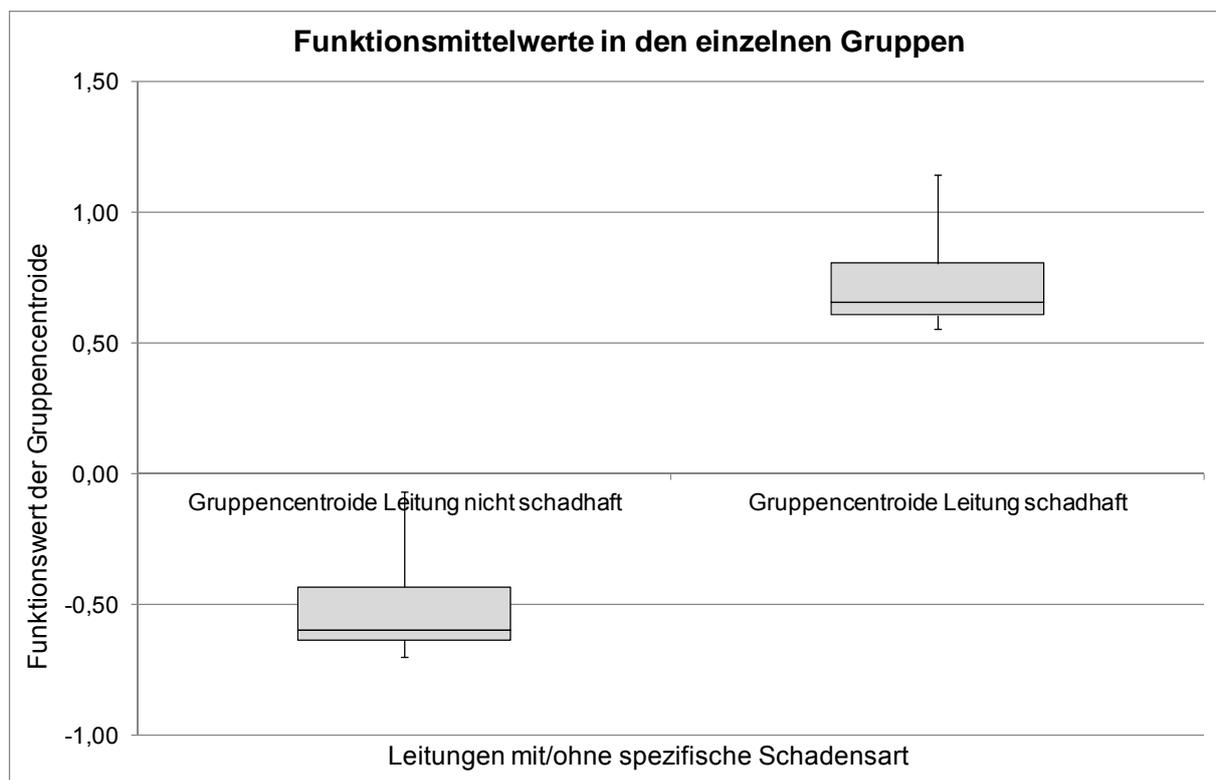
**Abbildung 96: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle**

#### 7.4.3.1.5 Diskriminanzanalyse Schadensart „Verbindung undicht“ - WVU B

Die sechs Einflussfaktoren Rohrdurchmesser, Alter, Länge der HZL, DN Gas, DN Kanal und Baum Stammumfang bildeten in der Datenbasis des WVU B die rein metrisch skalierten Einflussfaktoren. Die neun Einflussfaktoren AL, VL, Gas, Kanal, Bäume, Hauptverkehrsstraße, Straßenbahn, Schieber/Klappen und Ziegelaufleger umfassten die ordinal skalierten Einflussfaktoren in der Datenbasis des WVU B. Die vier Variablen Material, DZ, Druckzone und Herstellungsart lagen nominal skaliert vor und wurden aufgrund der Nichterfüllung der Anwendungsbedingungen zur Diskriminanzanwendung nicht in der Berechnung berücksichtigt. Zur Bestimmung bzw. Formulierung der optimalen Diskriminanzfunktion wurden drei Gruppen der Eingangsdaten zur Diskriminanzberechnung berücksichtigt. Die Datenbasis für die erste und zweite Gruppe bildeten die drei randomisierten Stichproben der BLRA, welche die höchste Modell- und Ergebnislänge für die Schadensart „Verbindung undicht“ aufwiesen. Für die erste Gruppe wurden nur die oben angeführten sechs vorliegenden metrisch skalierten Variablen in der Berechnung verwendet. Die zweite Gruppe berücksichtigte die sechs vorliegenden metrisch skalierten und zusätzlich die neun oben angeführten ordinal skalierten Variablen. Die dritte Gruppe berücksichtigt die Daten des Gesamtsystems zur Findung der optimalen Diskriminanzfunktion. Da die Klassifikation bzw. Kalibrierung der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wurde, wie für die Schätzung der Diskriminanzfunktion verwendet wurde, ergab sich eine überhöhte Trefferquote, da die Diskriminanzfunktion die Trefferquote

der verwendeten Stichprobe maximiert. Abschließend wurden diese drei Gruppen der Eingangsdaten-Stichproben jeweils am Gesamtdatensatz validiert.

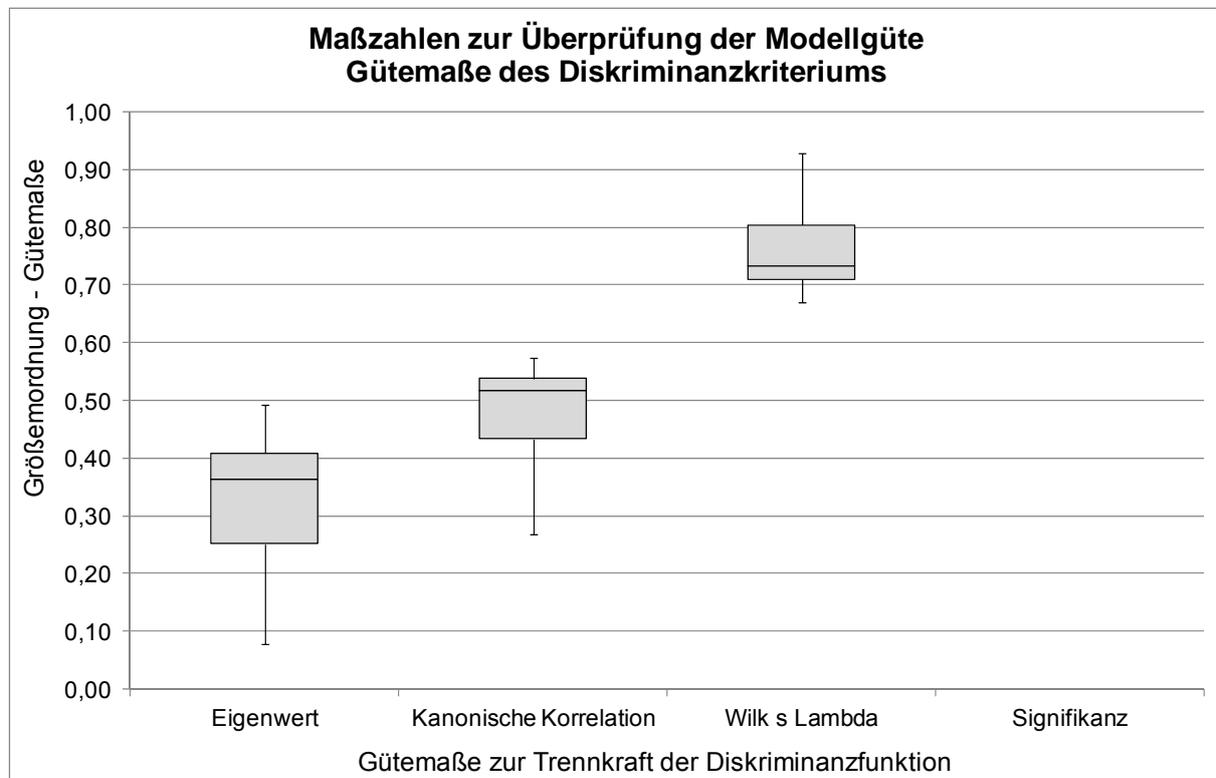
Die Schätzung der Diskriminanzfunktion und die Ermittlung der Diskriminanzkoeffizienten trennt die mit Hilfe des Diskriminanzkriteriums bzw. der Abstände der Gruppencentroide (siehe Abbildung 97) untersuchten Zustandsgruppen der HZL in die Gruppe spezifische Schadensart „Verbindung undicht“ vorhanden oder HZL ist nicht schadhaf.



**Abbildung 97: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit**

Die Prüfung der Diskriminanzfunktion erfolgte mit Hilfe der Betrachtung des Eigenwertes, der kanonischen Korrelation, Wilk's Lambda und dem Signifikanzniveau. In Abbildung 98 zeigt die Betrachtung des Eigenwertes, dass die Streuung zwischen den Gruppen das 0,36fache (= Medianwert) der Streuung innerhalb der Gruppen darstellt. Dies bestätigte einen gewissen Erklärungswert des Modells. Der kanonische Korrelationskoeffizient in Abbildung 98 stellt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der gesamten Streuung mit einem Medianwert von 0,51 dar. Mit einem Medianwert von 0,73 für Wilk's Lambda wurde ein gewisser Erklärungswert des Modells bestätigt. Die vorhandenen Signifikanzwerte  $< 0,001$  bestätigten eine hohe Vertrauenswahrscheinlichkeit des vorhandenen Modells und es konnte folglich die Hypothese, dass in der Daten-Grundgesamtheit keine Unterscheidung der Leitungszustände schadhaf ja/nein möglich war, abgelehnt werden und eine hoch signifikante Zustandsunterscheidung bestätigt werden.

Aufgrund sachlogischer Überlegungen des Rohr-Boden-Systems und der Schadensmechanismen betreffend der Schadensart „Verbindung undicht“ wurde eine Modellformulierung aufgestellt, bei der die 15 möglichen Einflussgrößen der unabhängigen Variablen auf die Auftrittswahrscheinlichkeit der abhängigen Variable berücksichtigt wurden.



**Abbildung 98: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums**

Die Prüfung der Merkmalsvariablen bzw. Einflussfaktoren erfolgte mittels der Betrachtung der standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten und der Korrelationskoeffizienten, die Aufschluss über den Beitrag der einzelnen Einflussfaktoren zur Trennung in die Zustandsgruppen schadhaft ja/nein geben. Mit Hilfe dieser Koeffizienten wurden Skalierungseffekte neutralisiert und, wie für die Beta-Koeffizienten bei der BLRA, können Einflussfaktoren unterschiedlicher Dimensionen miteinander verglichen werden. In der Zustandsgruppenzuordnung der Schadensart „Verbindung undicht“ waren folgende acht Einflussfaktoren signifikant. Diese lauteten Rohrdurchmesser, Alter, Länge, DN Kanal, AL, Kanal, Bäume und Baum Stammumfang – alle anderen wurden als nicht signifikante Merkmalsvariable im Modell nicht eingeschlossen. Ein Anstieg in der Größenordnung der Einflüsse von Alter, Länge, DN Kanal und Baum Stammumfang bewirkte eine Gruppenzuordnung in Richtung Schaden vorhanden. Im Gegensatz dazu bewirkten ein Anstieg in der Größenordnung des Rohrdurchmessers und das Nichtvorhandensein von AL, Kanal und Bäumen in Richtung eines nicht schadhafte Leitungszustandes. In Abbildung 100 ist die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Diskriminanzfunktion mittels der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die

Einflussvariablen Alter, Länge und AL weisen die höchsten Korrelationskoeffizienten auf und trugen daher am stärksten zur Gruppenunterscheidung bei.

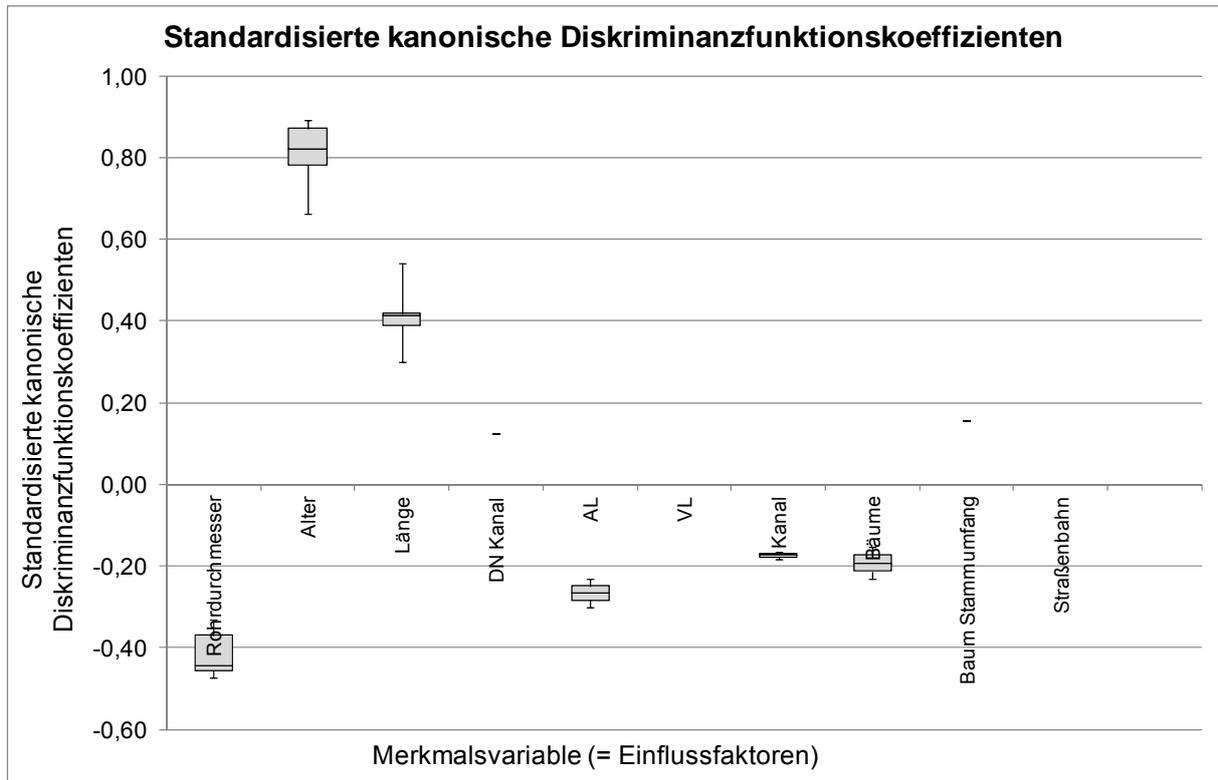


Abbildung 99: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten

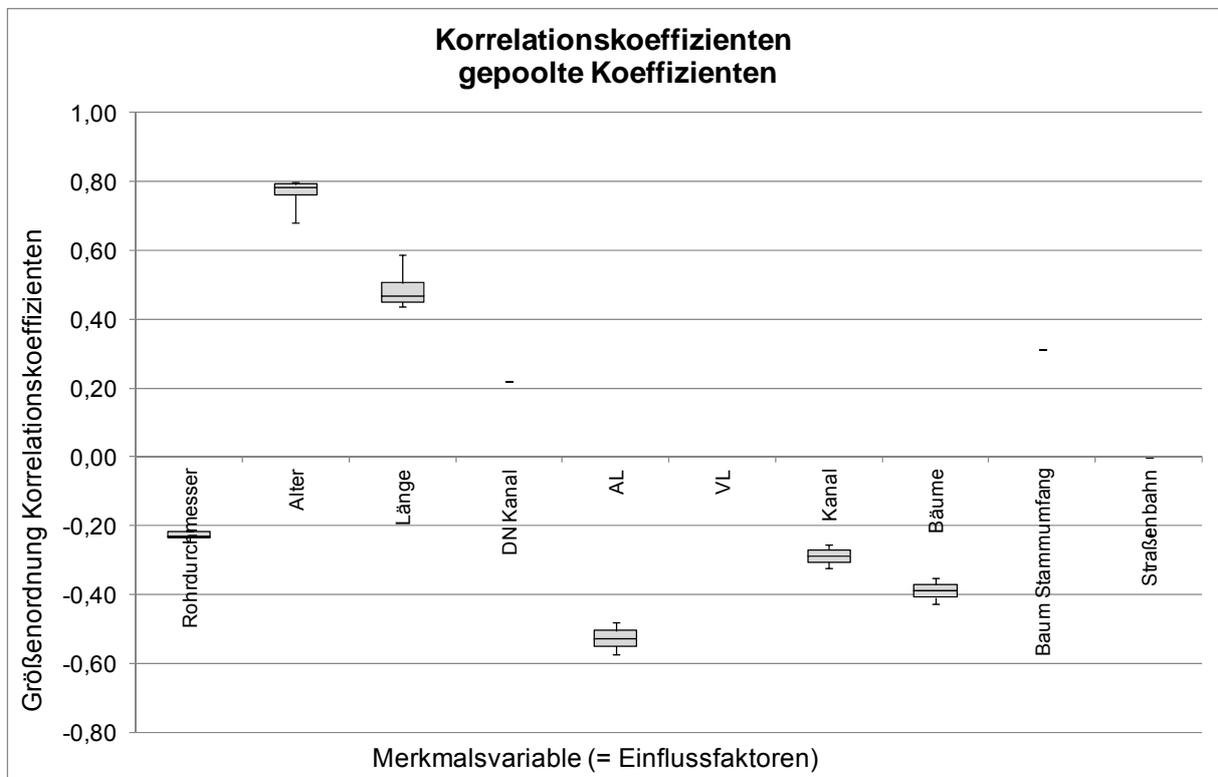
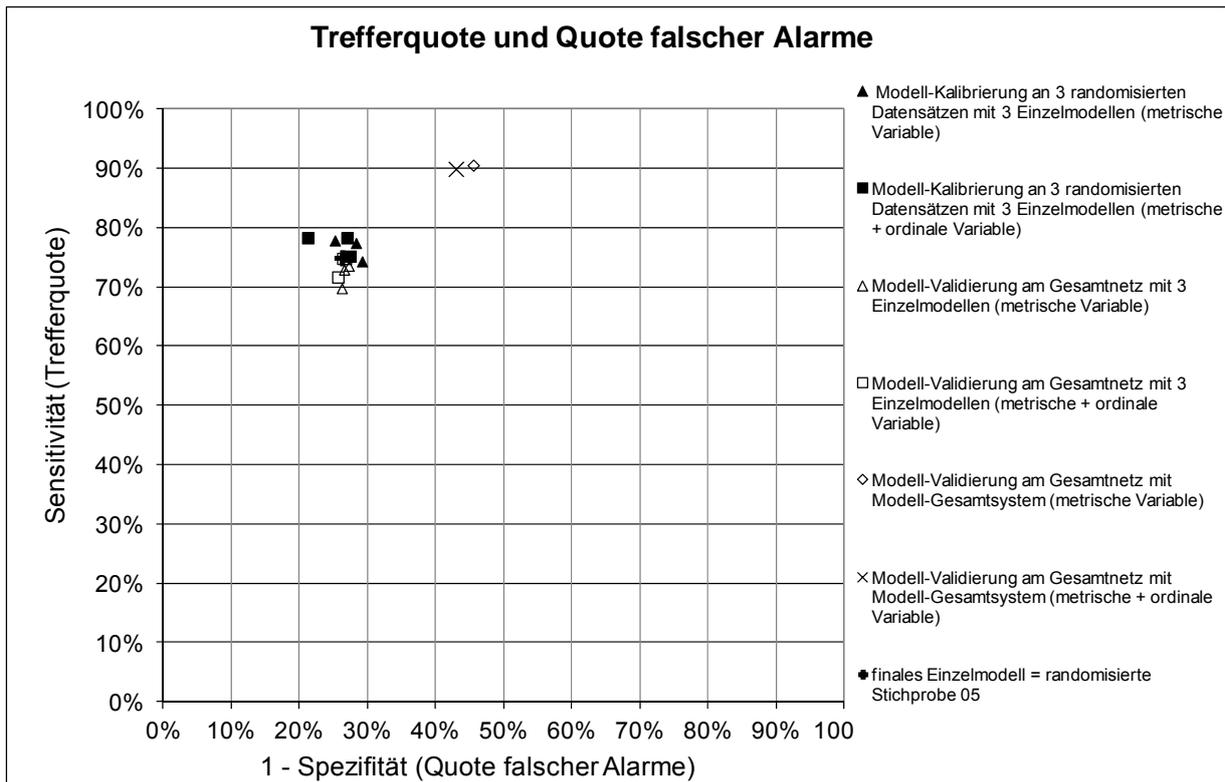


Abbildung 100: Boxplot Korrelationskoeffizienten

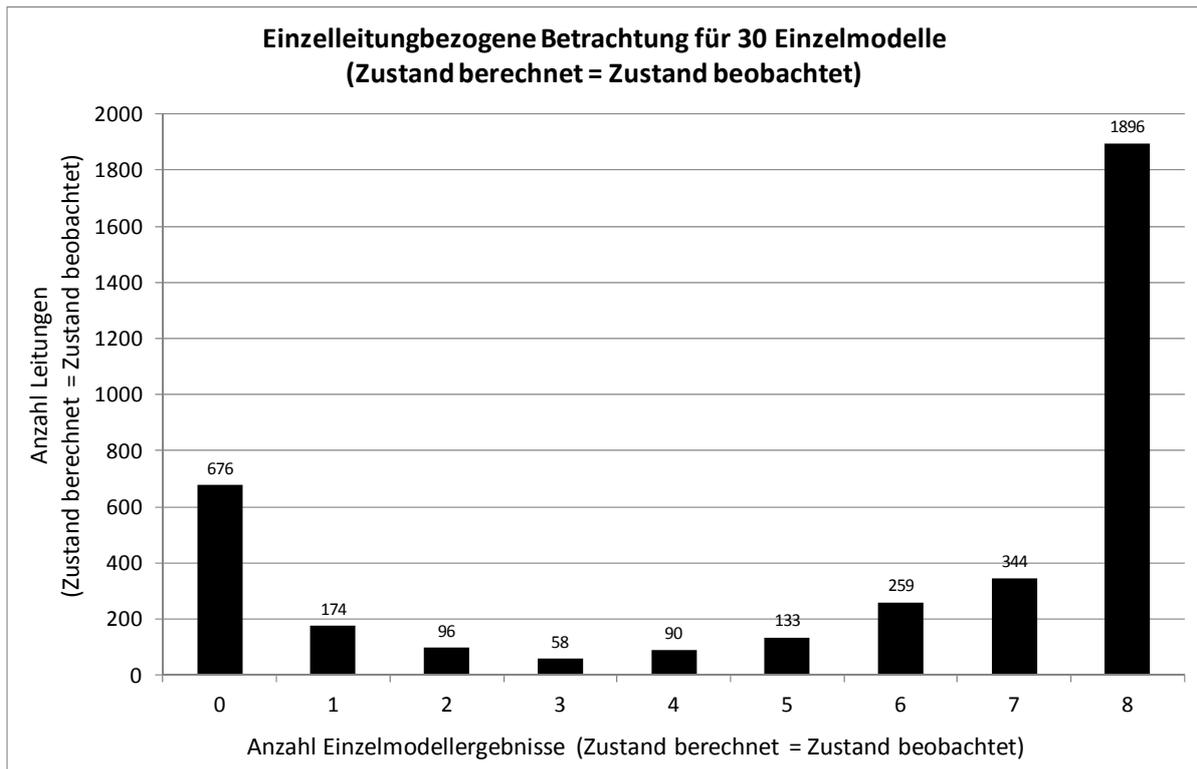
In Abbildung 101 wurden die Klassifizierungsergebnisse der anfangs beschriebenen drei Gruppen von Eingangsdaten dargestellt. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 74 bis 77 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 25 bis 29 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen erreichte eine modellbedingt geringfügig niedrigere Trefferquote im Bereich von 69 bis 72 % und eine niedrigere Quote falscher Alarme im Bereich von 26 bis 27 %. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 75 bis 78 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 21 bis 27 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen ergab eine Trefferquote im Bereich von 71 bis 74 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 25 bis 26 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, erreichte eine Trefferquote von 90 % und eine Quote falscher Alarme von 45 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, resultierte in einer Trefferquote von 89 % und einer Quote falscher Alarme von 43 %. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches die Gruppenzuordnung zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die maximal erzeugte Fläche unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 101) und die Summe der Diskriminanz-Funktionswerte für falsche Treffer je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet.



**Abbildung 101: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme**

Das Einzelmodell der Stichprobe 05 erzeugte zur Berechnung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit „Verbindung undicht“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringste Summe der falsch klassifizierten Diskriminanz-Funktionswerte und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 101). Die vier Einflussfaktoren Rohrdurchmesser, Alter, Länge der HZL-Abschnittet und Kanäle bilden die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell der Stichprobe 05.

In der Validierung der acht Einzelmodelle auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 102) wurden für 1 896 Abschnitte für alle acht Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 676 Abschnitte keines der acht Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte.



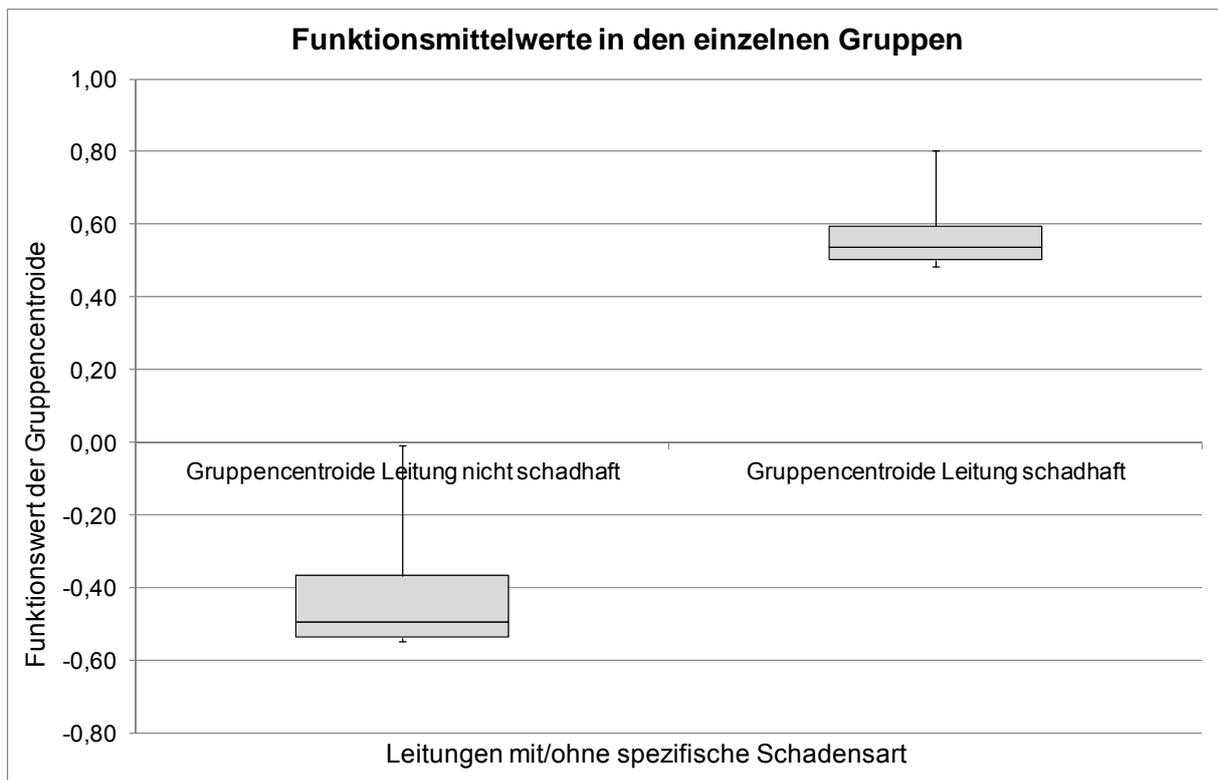
**Abbildung 102: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle**

#### 7.4.3.1.6 Diskriminanzanalyse Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU B

Die sechs Einflussfaktoren Rohrdurchmesser, Alter, Länge der HZL, DN Gas, DN Kanal und Baum Stammumfang bildeten in der Datenbasis des WVU B die rein metrisch skalierten Einflussfaktoren. Die neun Einflussfaktoren AL, VL, Gas, Kanal, Bäume, Hauptverkehrsstraße, Straßenbahn, Schieber/Klappen und Ziegelaufleger umfassten die ordinal skalierten Einflussfaktoren in der Datenbasis des WVU B. Die vier Variablen Material, DZ, Druckzone und Herstellungsart lagen nominal skaliert vor und wurden aufgrund der Nichterfüllung der Anwendungsbedingungen zur Diskriminanzanwendung nicht in der Berechnung berücksichtigt. Zur Bestimmung bzw. Formulierung der optimalen Diskriminanzfunktion wurden drei Gruppen der Eingangsdaten zur Diskriminanzberechnung berücksichtigt. Die Datenbasis für die erste und zweite Gruppe bildeten die drei randomisierten Stichproben der BLRA, welche die höchste Modell- und Ergebnislänge für die Schadensart „Korrosionsloch“ aufwiesen. Für die erste Gruppe wurden nur die oben angeführten sechs vorliegenden metrisch skalierten Variablen in der Berechnung verwendet. Die zweite Gruppe berücksichtigte die sechs vorliegenden metrisch skalierten und zusätzlich die neun oben angeführten ordinal skalierten Variablen. Die dritte Gruppe berücksichtigte die Daten des Gesamtsystems zur Findung der optimalen Diskriminanzfunktion. Da die Klassifikation bzw. Kalibrierung der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wurden, wie für die Schätzung der Diskriminanzfunktion verwendet wurde, ergab sich eine überhöhte Trefferquote, da die Diskriminanzfunktion die Trefferquote der verwendeten Stichprobe maximiert.

Abschließend wurden diese drei Gruppen der Eingangsdaten-Stichproben jeweils am Gesamtdatensatz validiert.

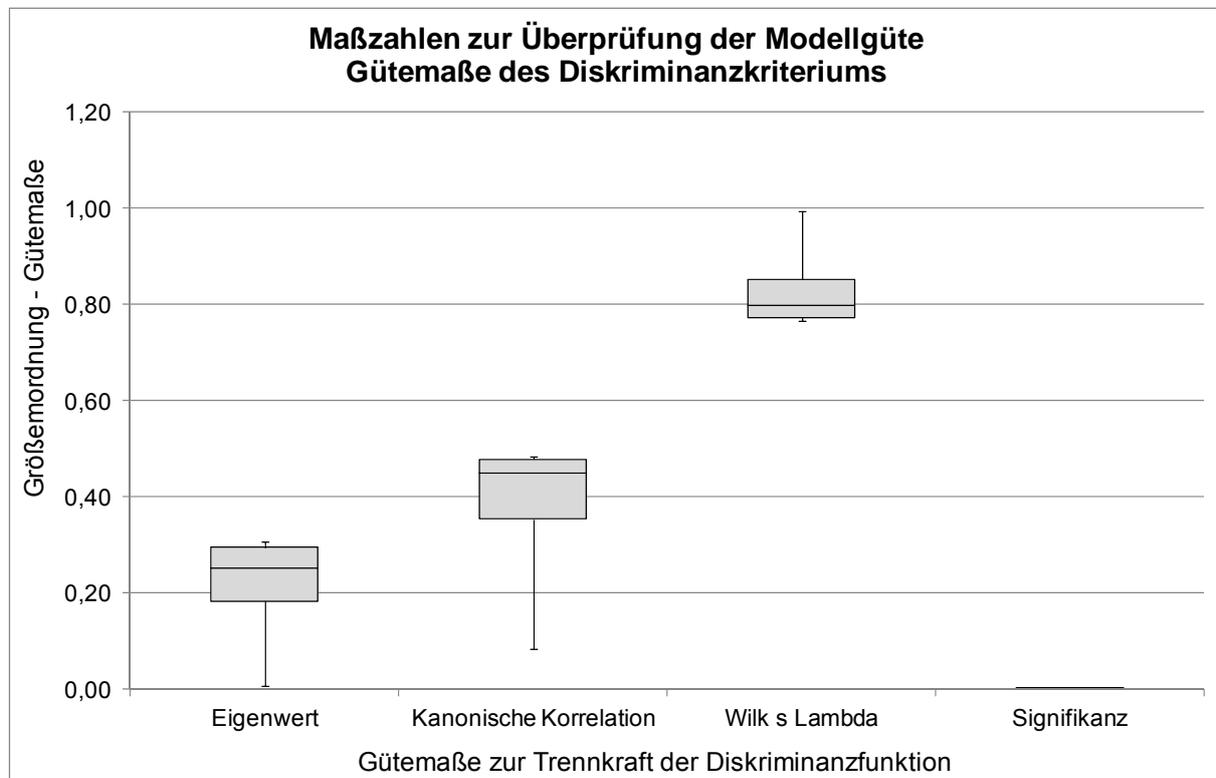
Die Schätzung der Diskriminanzfunktion und die Ermittlung der Diskriminanzkoeffizienten trennt die mit Hilfe des Diskriminanzkriteriums bzw. der Abstände der Gruppencentroide (siehe Abbildung 103) untersuchten Zustandsgruppen der HZL in die Gruppe spezifische Schadensart „Korrosionsloch“ vorhanden oder HZL ist nicht schadhaft.



**Abbildung 103: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit**

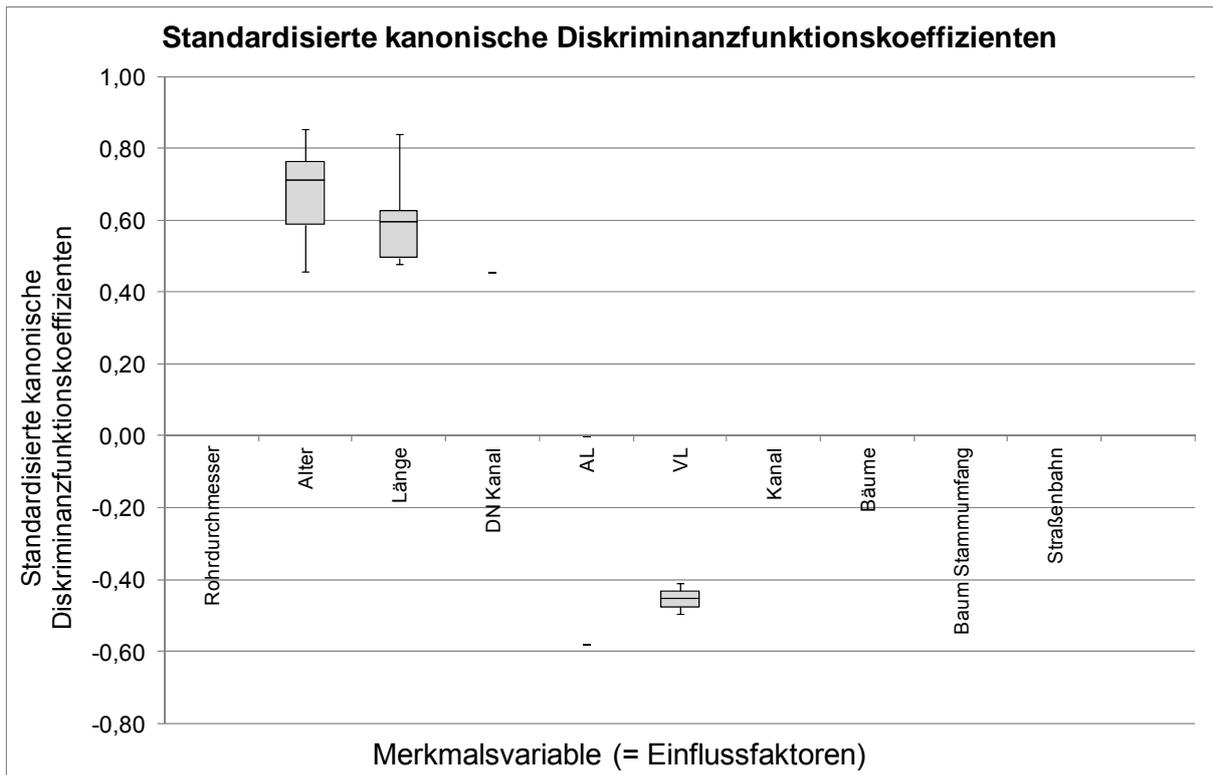
Die Prüfung der Diskriminanzfunktion erfolgte mit Hilfe der Betrachtung des Eigenwertes, der kanonischen Korrelation, Wilk's Lambda und dem Signifikanzniveau. In Abbildung 104 zeigt die Betrachtung des Eigenwertes, dass die Streuung zwischen den Gruppen das 0,25fache (= Medianwert) der Streuung innerhalb der Gruppen darstellt. Dies bestätigt einen gewissen Erklärungswert des Modells. Der kanonische Korrelationskoeffizient in Abbildung 104 stellt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der gesamten Streuung mit einem Medianwert von 0,45 dar. Mit einem Medianwert von 0,79 wird ein gewisser Erklärungswert des Modells bestätigt. Die vorhandenen Signifikanzwerte  $< 0,001$  bestätigten eine hohe Vertrauenswahrscheinlichkeit des vorhandenen Modells und es konnte folglich die Hypothese, dass in der Daten-Grundgesamtheit keine Unterscheidung der Leitungszustände schadhaft ja/nein möglich war, abgelehnt werden und eine hoch signifikante Zustandsunterscheidung bestätigt werden.

Aufgrund sachlogischer Überlegungen des Rohr-Boden-Systems und der Schadensmechanismen betreffend der Schadensart „Korrosionsloch“ wird eine Modellformulierung aufgestellt, bei der die 15 möglichen Einflussgrößen der unabhängigen Variablen auf die Auftrittswahrscheinlichkeit der abhängigen Variable berücksichtigt wurden.

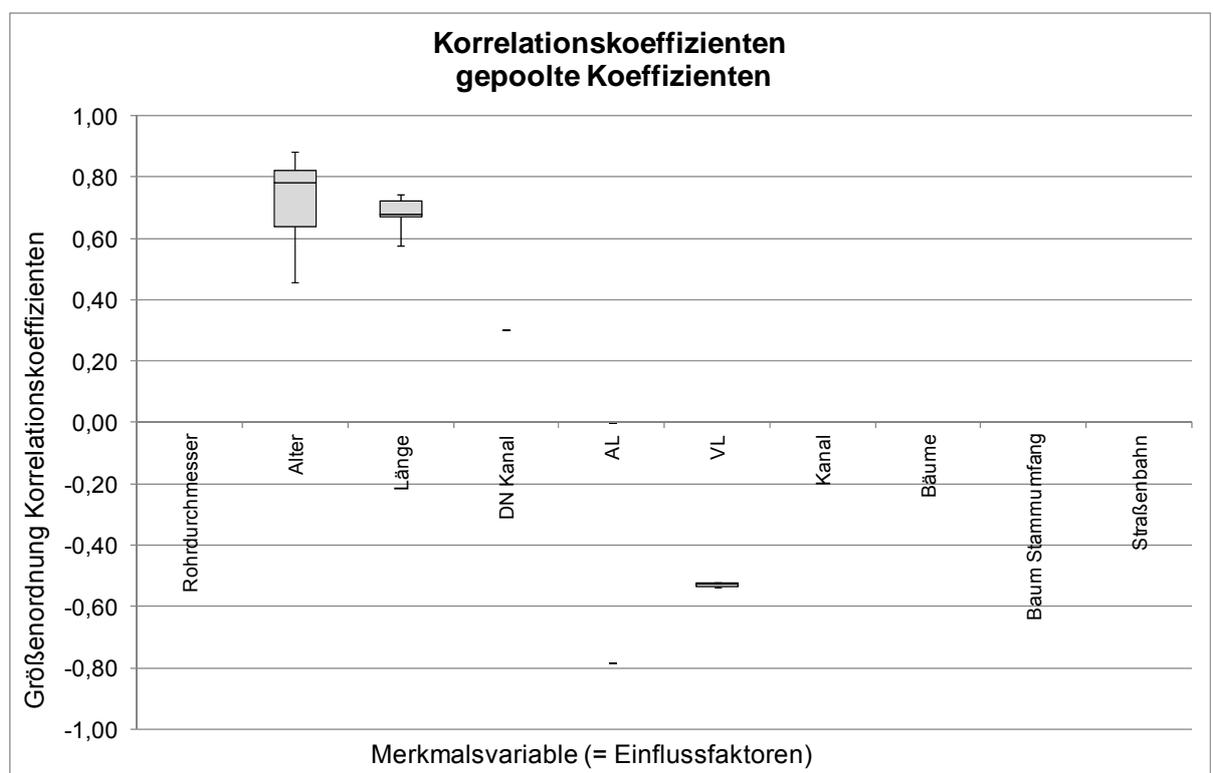


**Abbildung 104: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums**

Die Prüfung der Merkmalsvariablen bzw. Einflussfaktoren erfolgte mittels der Betrachtung der standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten und der Korrelationskoeffizienten, die Aufschluss über den Beitrag der einzelnen Einflussfaktoren zur Trennung in die Zustandsgruppen schadhaft ja/nein gaben. Mit Hilfe dieser Koeffizienten wurden Skalierungseffekte neutralisiert und, wie für die Beta-Koeffizienten bei der BLRA, konnten Einflussfaktoren unterschiedlicher Dimensionen miteinander verglichen werden. In der Zustandsgruppenzuordnung der Schadensart „Korrosionsloch“ waren folgende fünf Einflussfaktoren signifikant: Alter, Länge, DN Kanal, AL und VL – alle anderen wurden als nicht signifikante Merkmalsvariable im Modell nicht eingeschlossen. Ein Anstieg in der Größenordnung der Einflüsse von Alter, Länge, DN Kanal bewirkte eine Gruppenzuordnung in Richtung Schaden vorhanden. Im Gegensatz dazu bewirkte das Nichtvorhandensein von AL und VL in Richtung eines nicht schadhafte Leitungszustandes. In Abbildung 106 ist die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Diskriminanzfunktion mittels der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die Variablen Alter, Länge, AL und VL zeigten die höchsten Korrelationskoeffizienten und trugen daher am stärksten zur Gruppenunterscheidung bei.



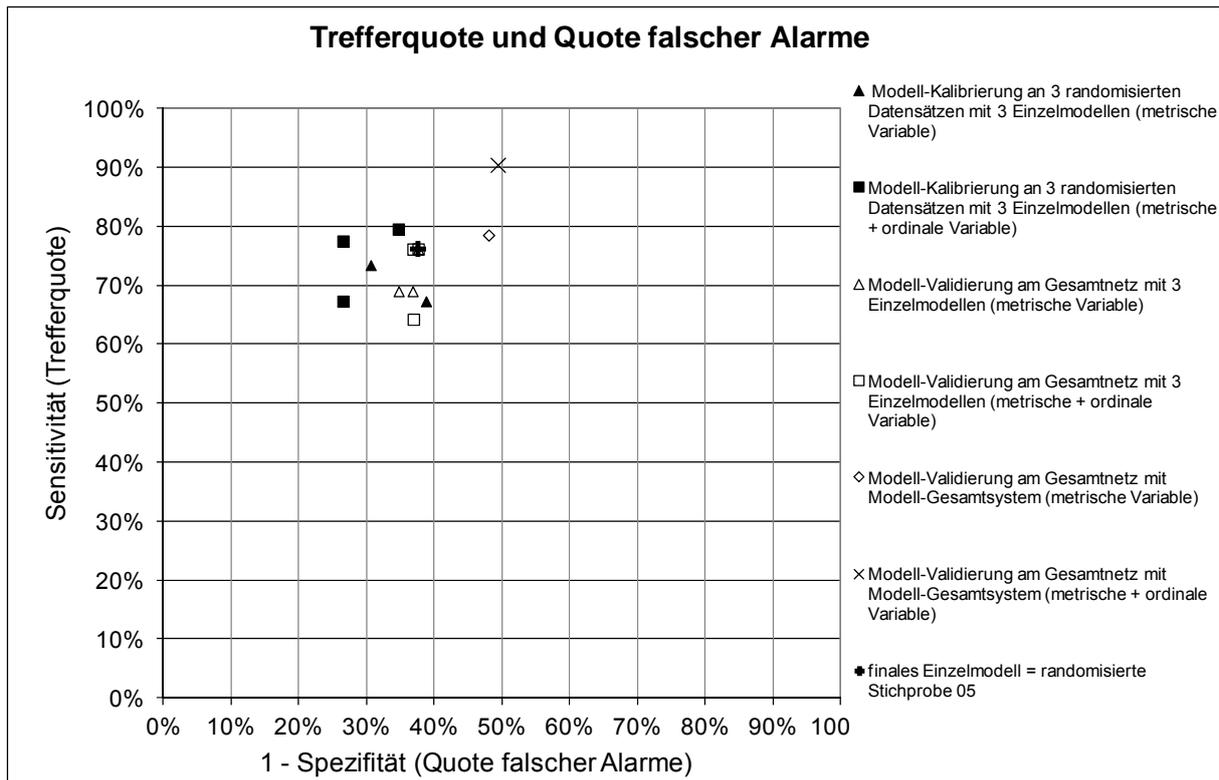
**Abbildung 105: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**



**Abbildung 106: Boxplot Korrelationskoeffizienten**

In Abbildung 107 sind die Klassifizierungsergebnisse der anfangs beschriebenen drei Gruppen von Eingangsdaten dargestellt. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf ausschließlich

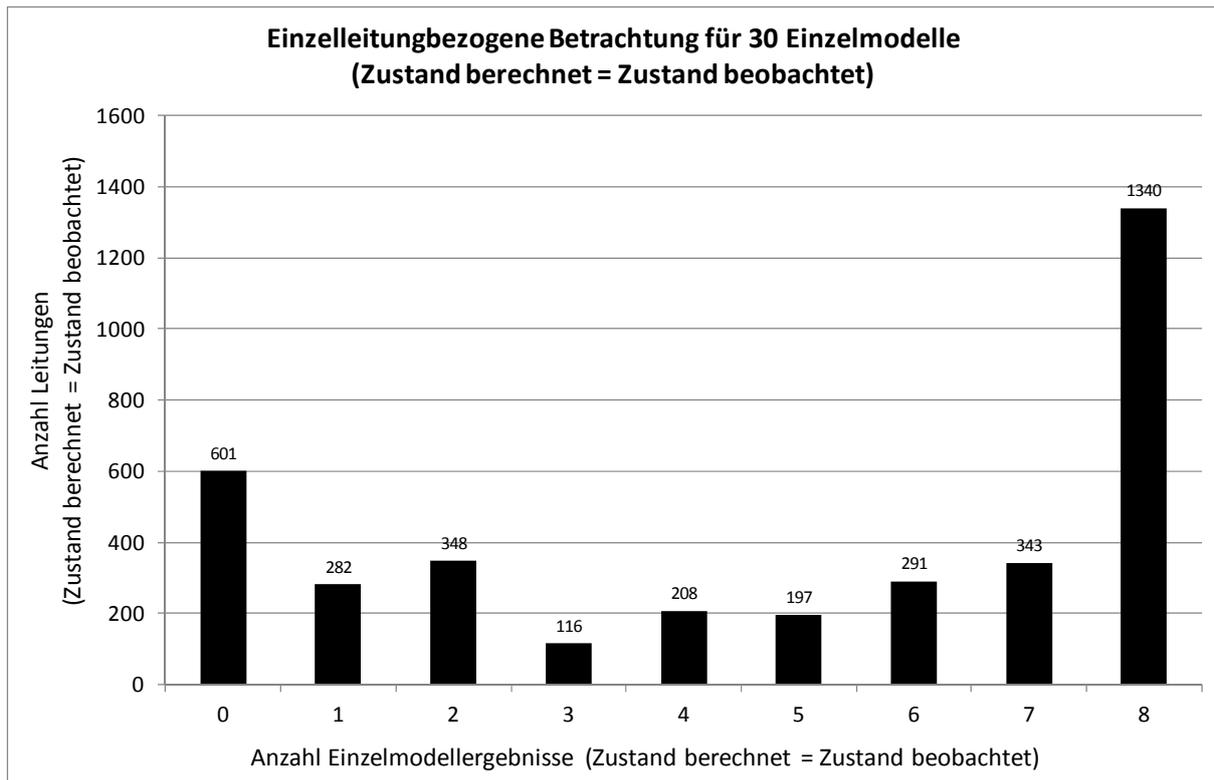
metrischen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 67 bis 79 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 30 bis 38 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen erreichte eine modellbedingt geringfügig niedrigere Trefferquote im Bereich von 69 bis 76 % und eine niedrigere Quote falscher Alarme im Bereich von 34 bis 37 %. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen ergab eine Trefferquote im Bereich von 67 bis 79 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 26 bis 34 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen erzielte eine Trefferquote im Bereich von 64 bis 76 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 36 bis 37 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, erreichte eine Trefferquote von 78 % und eine Quote falscher Alarme von 48 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, ergab eine Trefferquote von 90 % und eine Quote falscher Alarme von 49 %. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches die Gruppenzuordnung zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären kann, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die maximal erzeugte Fläche unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm und die Summe der Diskriminanz-Funktionswerte für falsche Treffer je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet.



**Abbildung 107: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme**

Das Einzelmodell der Stichprobe 05 erreichte zur Berechnung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit „Korrosionsloch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringste Summe der falsch klassifizierten Diskriminanz-Funktionswerte auf und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 107). Die zwei Einflussfaktoren Alter und Länge der HZL-Abschnitte bildeten die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell der Stichprobe 05.

In der Validierung der acht Einzelmodelle auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 108) wurden für 1 340 Abschnitte für alle acht Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 601 Abschnitte keines der acht Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte.



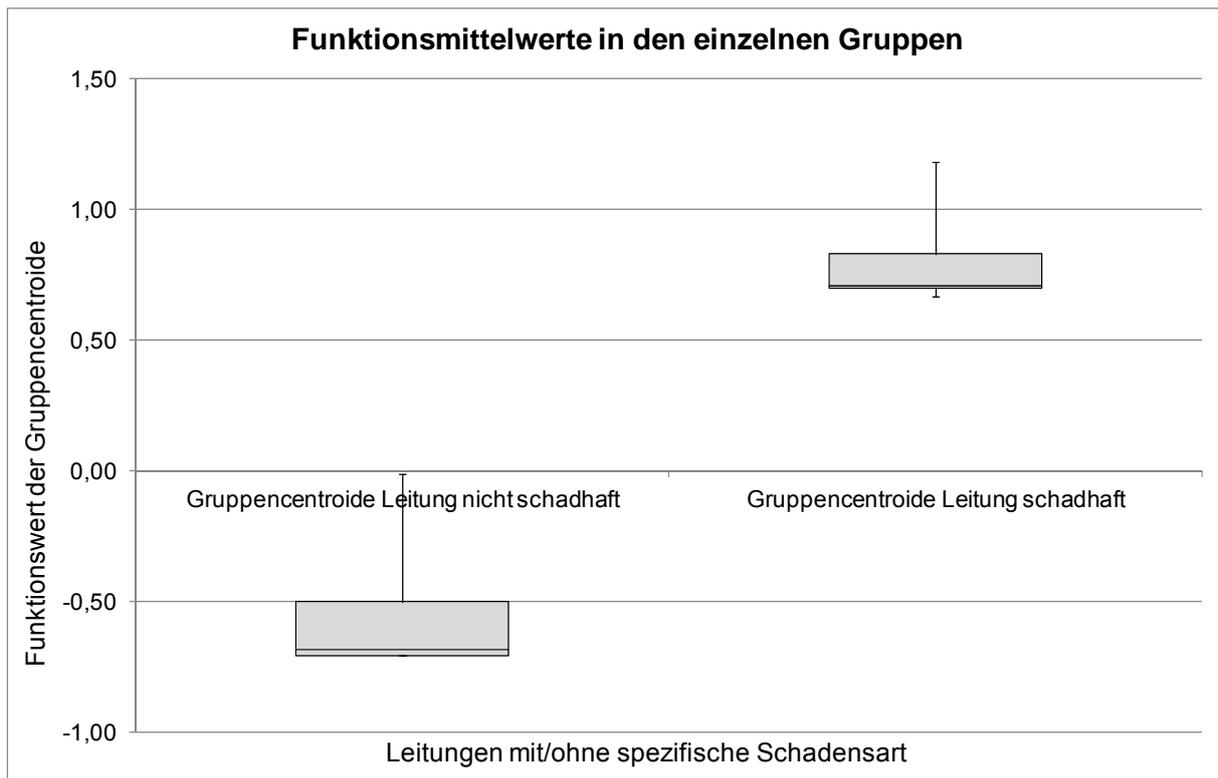
**Abbildung 108: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle**

#### 7.4.3.1.7 Diskriminanzanalyse Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ - WVU B

Die sechs Einflussfaktoren Rohrdurchmesser, Alter, Länge der HZL, DN Gas, DN Kanal und Baum Stammumfang bildeten in der Datenbasis des WVU B die rein metrisch skalierten Einflussfaktoren. Die neun Einflussfaktoren AL, VL, Gas, Kanal, Bäume, Hauptverkehrsstraße, Straßenbahn, Schieber/Klappen und Ziegelaufleger umfassten die ordinal skalierten Einflussfaktoren in der Datenbasis des WVU B. Die Variablen Material, DZ, Druckzone und Herstellungsart lagen nominal skaliert vor und wurden aufgrund der Nichterfüllung der Anwendungsbedingungen zur Diskriminanzanwendung nicht in der Berechnung berücksichtigt. Zur Bestimmung bzw. Formulierung der optimalen Diskriminanzfunktion wurden drei Gruppen der Eingangsdaten zur Diskriminanzberechnung berücksichtigt. Die Datenbasis für die erste und zweite Gruppe bildeten die drei randomisierten Stichproben der BLRA, welche die höchste Modell- und Ergebnisgüte für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ aufwiesen. Für die erste Gruppe wurden nur die oben angeführten sechs vorliegenden metrisch skalierten Variablen in der Berechnung verwendet. Die zweite Gruppe berücksichtigte die sechs vorliegenden metrisch skalierten und zusätzlich die neun oben angeführten ordinal skalierten Variablen. Die dritte Gruppe berücksichtigte die Daten des Gesamtsystems zur Findung der optimalen Diskriminanzfunktion. Da die Klassifikation bzw. Kalibrierung der Leitungen auf Basis derselben Stichprobe berechnet wurde, wie für die Schätzung der Diskriminanzfunktion verwendet wurde, ergab sich eine überhöhte

Trefferquote, da die Diskriminanzfunktion die Trefferquote der verwendeten Stichprobe maximiert. Abschließend wurden diese drei Gruppen der Eingangsdaten-Stichproben jeweils am Gesamtdatensatz validiert.

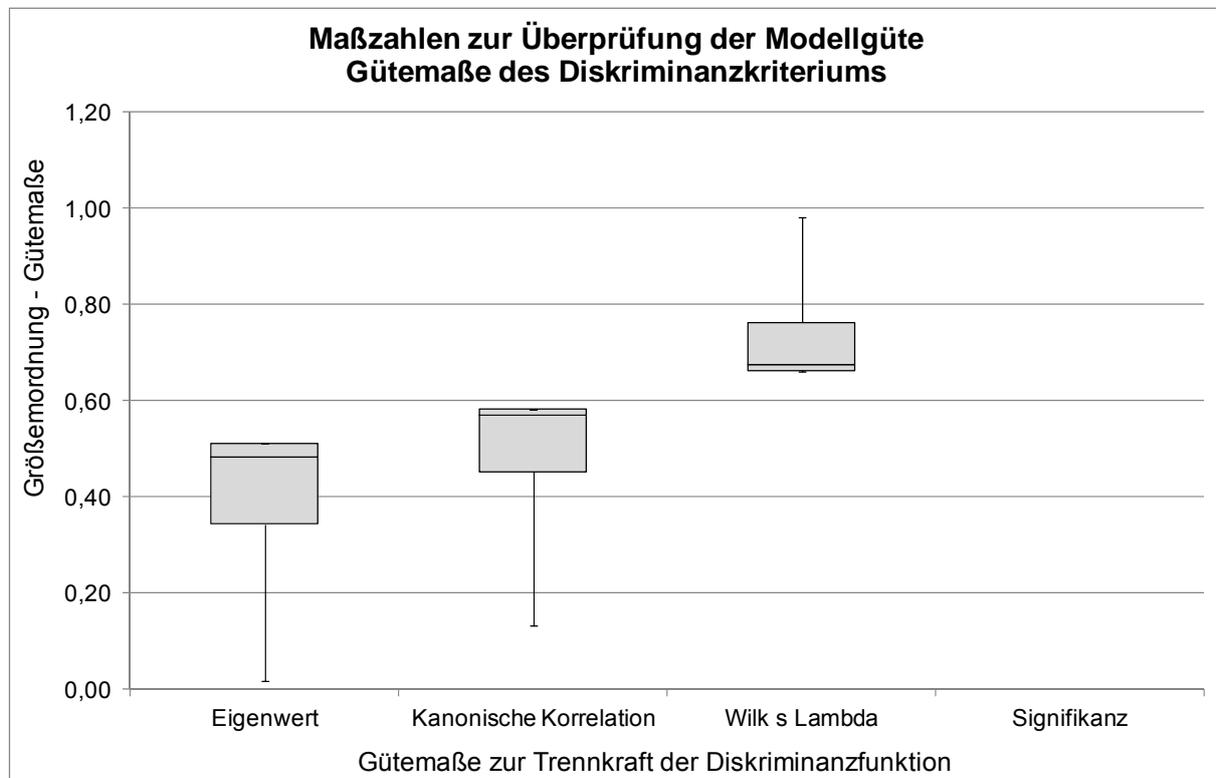
Die Schätzung der Diskriminanzfunktion und die Ermittlung der Diskriminanzkoeffizienten trennt die mit Hilfe des Diskriminanzkriteriums bzw. der Abstände der Gruppencentroide (siehe Abbildung 109) untersuchten Zustandsgruppen der HZL in die Gruppe spezifische Schadensart „Schaden allgemein“ vorhanden oder HZL ist nicht schadhaft.



**Abbildung 109: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit**

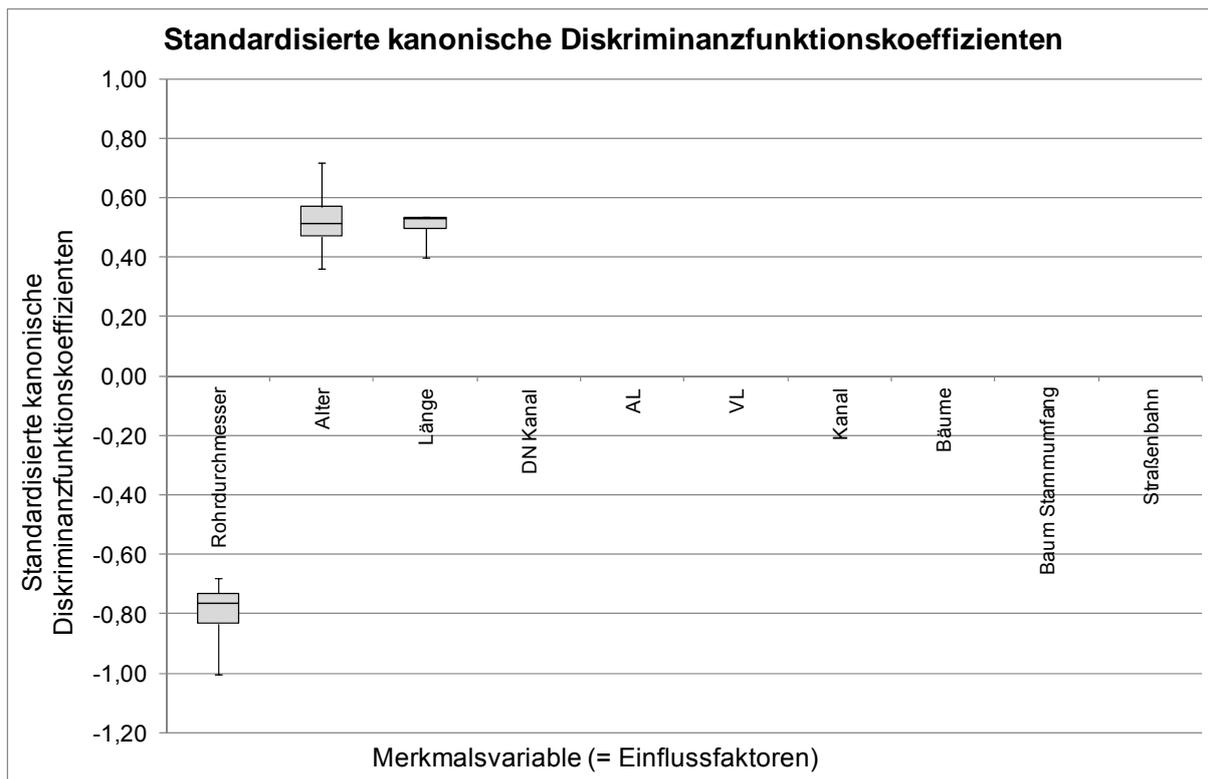
Die Prüfung der Diskriminanzfunktion erfolgte mit Hilfe der Betrachtung des Eigenwertes, der kanonischen Korrelation, Wilk's Lambda und dem Signifikanzniveau. In Abbildung 110 zeigt die Betrachtung des Eigenwertes, dass die Streuung zwischen den Gruppen das 0,48fache (= Medianwert) der Streuung innerhalb der Gruppen darstellt. Der kanonische Korrelationskoeffizient in Abbildung 92 stellt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der gesamten Streuung mit einem Medianwert von 0,57 dar. Mit einem Medianwert von 0,67 wurde ein gewisser Erklärungswert des Modells bestätigt. Die vorhandenen Signifikanzwerte  $< 0,001$  bestätigten eine hohe Vertrauenswahrscheinlichkeit des vorhandenen Modells und es konnte folglich die Hypothese, dass in der Daten-Grundgesamtheit keine Unterscheidung der Leitungszustände schadhaft ja/nein möglich war, abgelehnt werden und eine hoch signifikante Zustandsunterscheidung bestätigt werden.

Aufgrund sachlogischer Überlegungen des Rohr-Boden-Systems und der Schadensmechanismen betreffend der Schadensart „Schaden allgemein“ wurde eine Modellformulierung aufgestellt, bei der die 15 möglichen Einflussgrößen der unabhängigen Variablen auf die Auftrittswahrscheinlichkeit der abhängigen Variable berücksichtigt wurden.

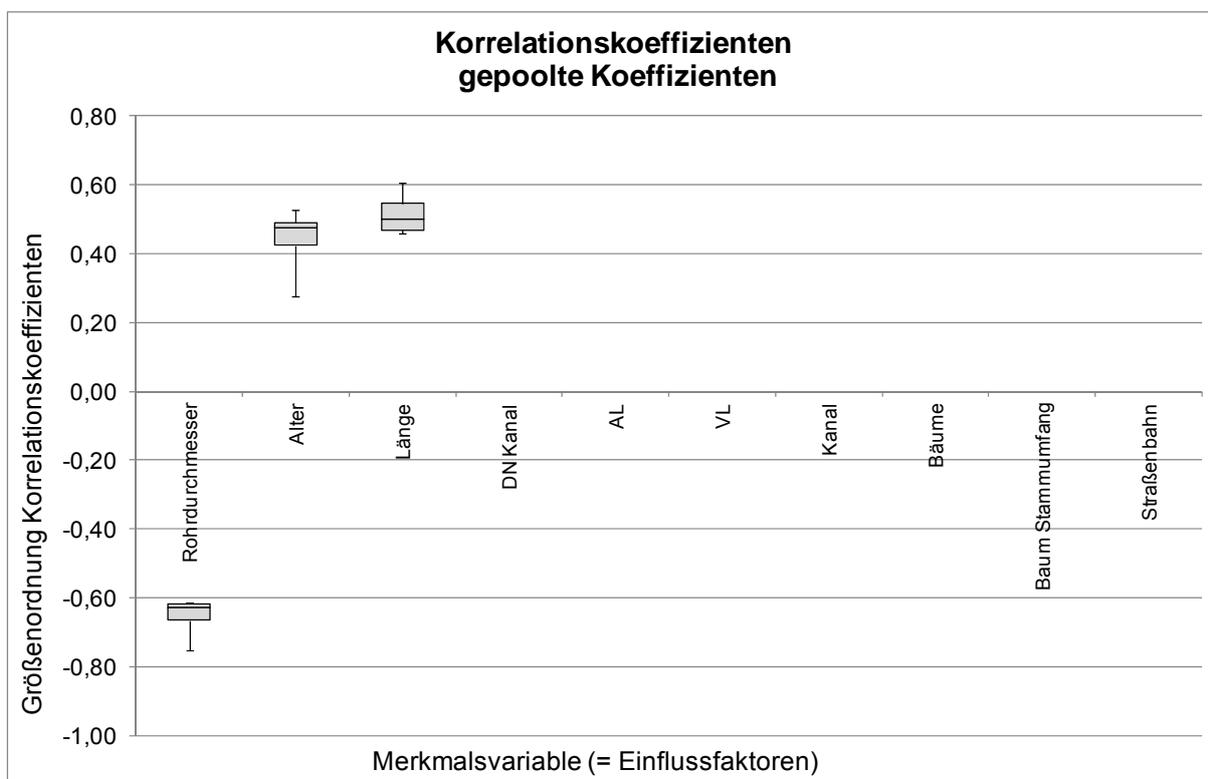


**Abbildung 110: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums**

Die Prüfung der Merkmalsvariablen bzw. Einflussfaktoren erfolgte mittels der Betrachtung der standardisierten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten und der Korrelationskoeffizienten, die Aufschluss über den Beitrag der einzelnen Einflussfaktoren zur Trennung in die Zustandsgruppen schadhaft ja/nein gaben. Mit Hilfe dieser Koeffizienten wurden Skalierungseffekte neutralisiert und, wie für die Beta-Koeffizienten bei der BLRA, konnten Einflussfaktoren unterschiedlicher Dimensionen miteinander verglichen werden. In der Zustandsgruppenzuordnung der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ waren folgende drei Einflussfaktoren signifikant: Rohrdurchmesser, Alter und Länge – alle anderen wurden als nicht signifikante Merkmalsvariable im Modell nicht eingeschlossen. Ein Anstieg in der Größenordnung der Einflüsse von Alter und Länge bewirkte eine Gruppenzuordnung in Richtung Schaden vorhanden. Im Gegensatz dazu ergab ein Anstieg in der Größenordnung des Durchmessers in Richtung eines nicht schadhafte Leitungszustandes. In Abbildung 112 ist die Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Diskriminanzfunktion mittels der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die drei signifikanten Variablen Rohrdurchmesser, Alter und Länge weisen hohe Korrelationskoeffizienten auf und formulieren daher die Gruppenunterscheidung.



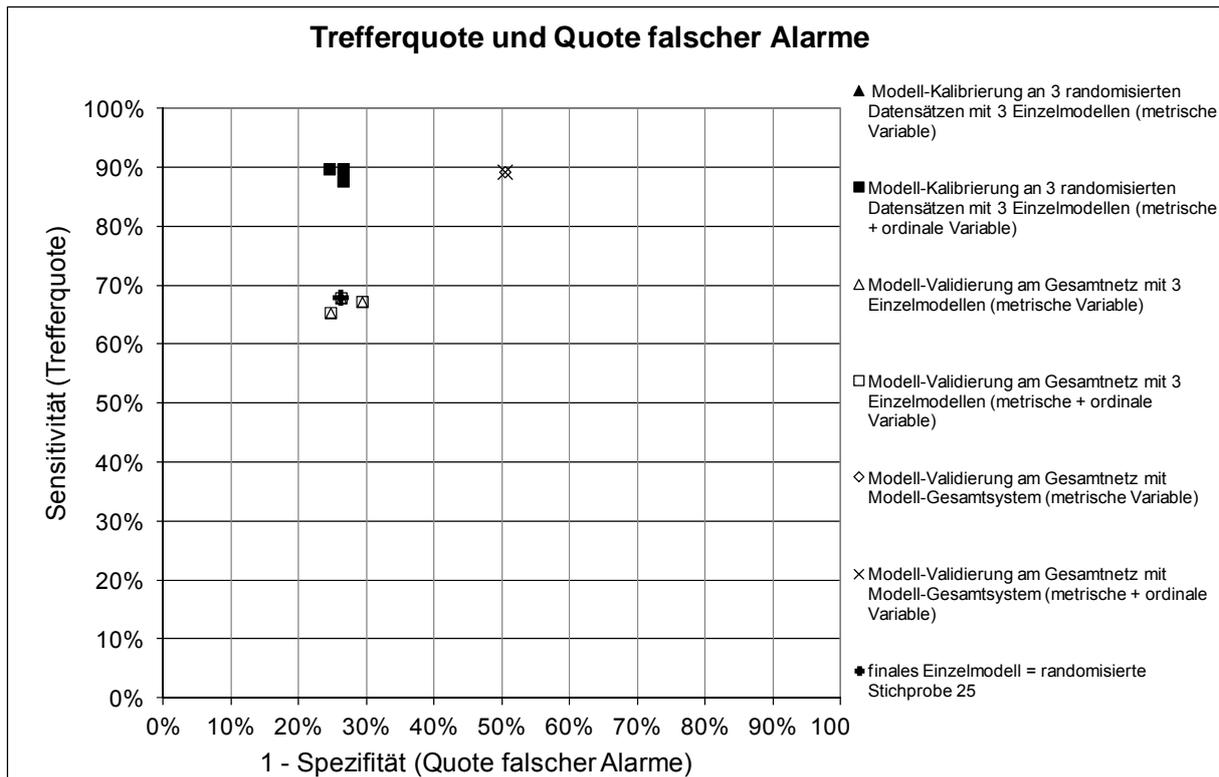
**Abbildung 111: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten**



**Abbildung 112: Boxplot Korrelationskoeffizienten**

In Abbildung 113 sind die Klassifizierungsergebnisse der anfangs beschriebenen drei Gruppen von Eingangsdaten dargestellt. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf ausschließlich

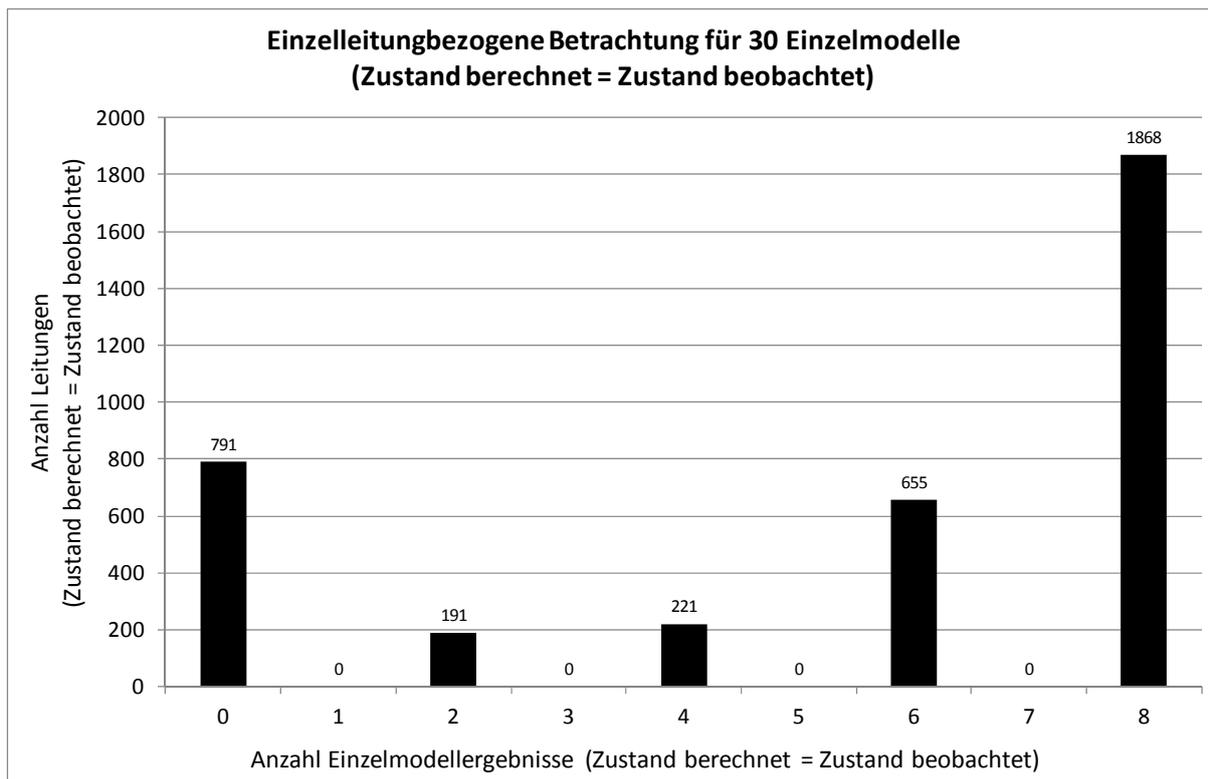
metrischen Merkmalsvariablen ergaben eine Trefferquote im Bereich von 87 bis 89 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 24 bis 26 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen erreichte eine Trefferquote im Bereich von 65 bis 67 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 24 bis 29 %. Die Modellkalibrierung an drei randomisierten Datensätzen mit drei Einzelmodellen basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen erzeugte eine Trefferquote im Bereich von 87 bis 89 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 24 bis 26 %. Die Modell-Validierung am Gesamtnetz mit diesen drei Einzelmodellen ergab eine Trefferquote im Bereich von 65 bis 67 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 24 bis 29 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf ausschließlich metrischen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, erreichte eine Trefferquote von 89 % und eine Quote falscher Alarme von 50 %. Die Modellvalidierung am Gesamtsystem, basierend auf metrischen und ordinalen Merkmalsvariablen und der am Gesamtdatensatz kalibrierten Funktion, erzeugte eine Trefferquote von 89 % und eine Quote falscher Alarme von 50 %. Zur Bestimmung des statistisch signifikantesten Einzelmodelles, welches die Gruppenzuordnung zwischen den beobachteten Leitungszuständen und allen signifikanten Einflussfaktoren maximal erklären konnte, wurden die Validierungsergebnisse mit Hilfe zweier Kriterien in eine ordinale Reihung überführt. Dabei wurden einerseits die maximal erzeugte Fläche unterhalb des Punktes der Einzelmodelle im Klassifikationsdiagramm (siehe Abbildung 113) und die Summe der Diskriminanz-Funktionswerte für falsche Treffer je HZL-Abschnitt je Einzelmodell als Rangordnungskriterium verwendet.



**Abbildung 113: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme**

Das Einzelmodell der Stichprobe 25 erzeugte zur Berechnung der Schadensauftretswahrscheinlichkeit „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ die größte Fläche unterhalb des Punktes im Klassifikationsdiagramm und die geringste Summe der falsch klassifizierten Diskriminanz-Funktionswerte und bildete somit das optimale Einzelmodell (siehe Abbildung 113). Die drei Einflussfaktoren Rohrdurchmesser, Alter und Länge der HZL-Abschnitte bildeten die signifikanten Variablen im finalen Einzelmodell der Stichprobe 25.

In der Validierung der acht Einzelmodelle auf die gesamten 3 726 HZL-Abschnitte (siehe Abbildung 114) wurden für 1 868 Abschnitte für alle Einzelmodelle der beobachtete Leitungszustand auch errechnet, wobei für verbleibende 797 Abschnitte keines der acht Einzelmodelle den beobachteten Zustand richtig ermittelte.



**Abbildung 114: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle**

#### 7.4.4 Modellberechnung physikalische Modelle (Ergebnisse)

##### 7.4.4.1 Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A

Im ersten Schritt der Anwendung der physikalischen Modelle auf die Daten des WVU A wurde die Schadensart „Korrosionsloch“ anhand dreier Korrosionsmodelle analysiert. Es lagen 304 dokumentierte Schäden auf 269 Leitungen vor. Die vorhandenen Daten aus Tabelle 11 wurden in die für die drei Korrosionsmodellberechnungen benötigten Datenformate überführt und am Gesamtdatensatz mit 16 279 Leitungen validiert. Als Startzeitpunkt des Korrosionsprozesses wurde das Verlegejahr der HZL-Abschnitte definiert. Unter Anwendung der Korrosionsmodelle nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987), Rajani et al. (2000) und Rossum (1969) auf diesen Datensatz ergaben sich die in Abbildung 115 dargestellten Klassifizierungsergebnisse. Das Korrosionsmodell nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987) erreichte eine Trefferquote von 28 % und eine Quote falscher Alarme von 7 %. Mit dem Korrosionsmodelle nach Rajani et al. (2000) wurden eine Trefferquote von 30 % und eine Quote falscher Alarme von 15 % erreicht. Mit dem Korrosionsmodelle nach Rossum (1969) wurden eine Trefferquote von 5 % und eine Quote falscher Alarme von 3 % ermittelt.

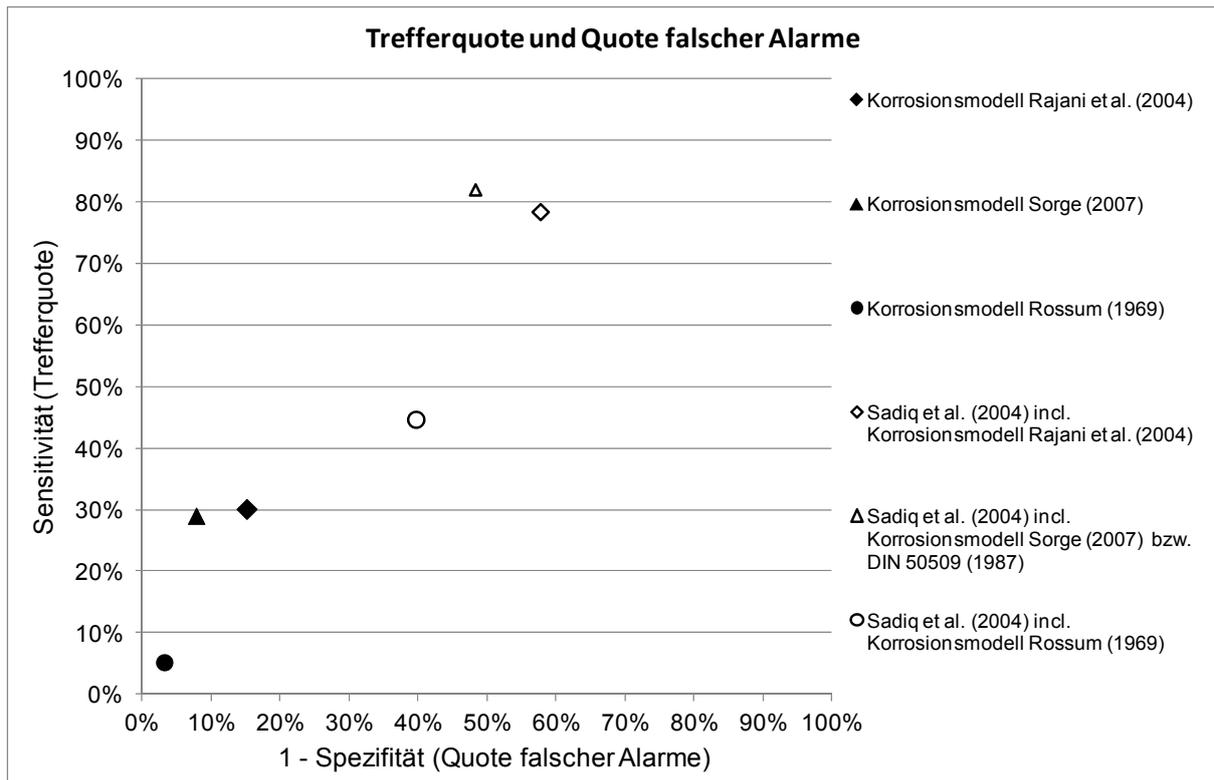
#### 7.4.4.2 Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch und Korrosionsloch“ - WVU A

Im zweiten Schritt wurden die oben genannten Korrosionslöcher gemeinsam mit 102 dokumentierten Schäden der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ auf 83 Leitungen analysiert.

Dies wurde mit der Anwendung des Sadiq et al. (2004)-Modelles unter Berücksichtigung der drei in Schritt 1 verwendeten Korrosionsmodelle nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987), Rajani et al. (2000) und Rossum (1969) durchgeführt. Die vorhandenen Daten aus Tabelle 11 wurden dafür in die für das Berechnungsmodell nach Sadiq et al. (2004) benötigte Datenstruktur überführt und am Gesamtdatensatz mit 16 279 Leitungen validiert.

Das Sadiq et al. (2004)-Modell mit Berücksichtigung der Korrosionsabtragung nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987) erreichte eine Trefferquote von 82 % und eine Quote falscher Alarme von 48 %. Unter Berücksichtigung des Korrosionsmodelles nach Rajani et al. (2000) wurde eine Trefferquote von 78 % und eine Quote falscher Alarme von 57 % erzeugt. Durch Kombination mit dem Korrosionsmodell nach Rossum (1969) wurden eine Trefferquote von 44 % und eine Quote falscher Alarme von 39 % ermittelt.

In Abbildung 115 wird ersichtlich, dass die drei Korrosionsmodelle alleine und die Modelle in Kombination mit Sadiq et al. (2004) zueinander jeweils ähnlich verteilt sind. Der Unterschied dieser Modelle liegt in einer höheren Trefferquote und einer gleichzeitig auch höheren Quote falscher Alarme für die Modelle „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch und Korrosionsloch“ im Vergleich zu „Korrosionsloch“ alleine. Die Anwendung komplexerer Modelle, wie Sadiq et al. (2004), führt somit zwar einerseits zu einer höheren Trefferquote, erhöht aber auch andererseits die Quote falscher Alarme und verschlechtert somit die Klassifizierungsgüte des Modells. Die Problematik der Transformation der Einflussfaktoren in die von den physikalischen Modellen bedingten Datenformate könnte mitunter einen Grund dieser geringen Modellgüte bedingen.



**Abbildung 115: Vergleich dreier Korrosionsmodelle und die Kombination von Sadiq et al. (2004) mit diesen drei Korrosionsmodellen**

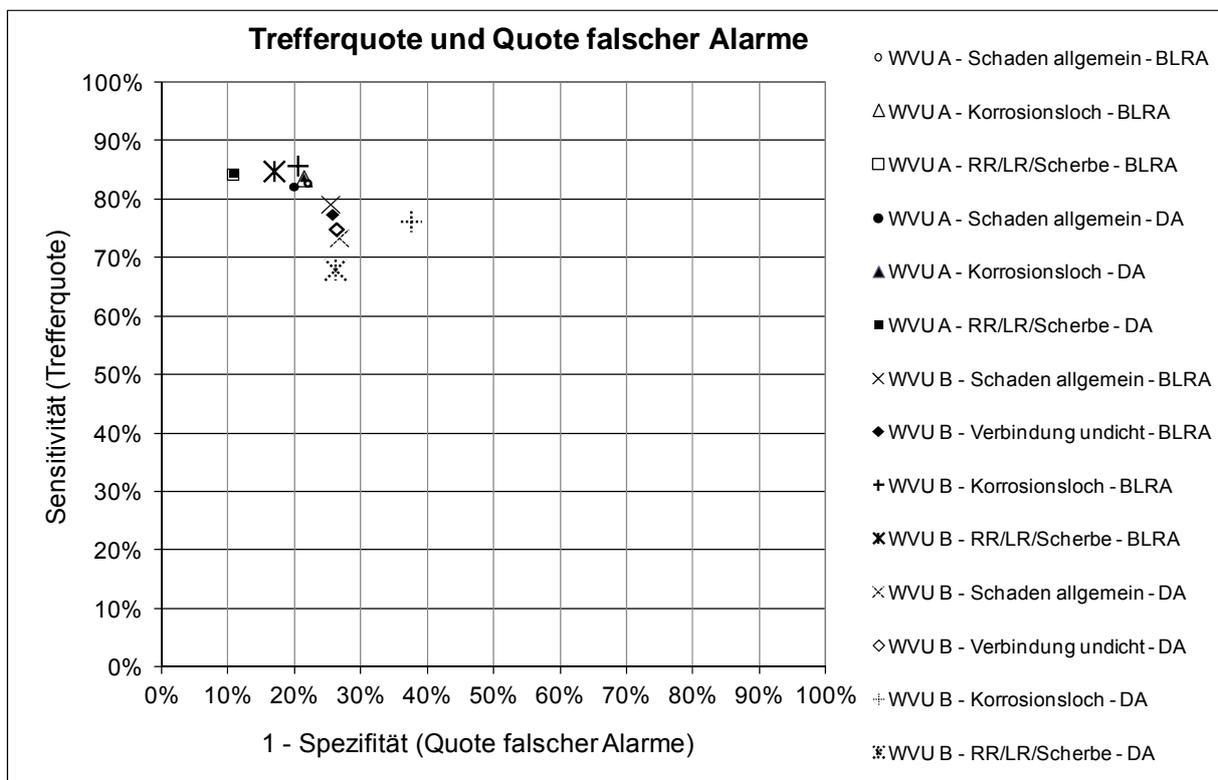
#### 7.4.4.3 Modellberechnung physikalische Modelle (Ergebnisse) - WVU B

Aufgrund der unzureichenden Datenlage bezüglich der benötigten Eingangsdaten für das WVU B konnten keine physikalischen Modelle berechnet werden.

#### 7.4.4.4 Zusammenfassung der Klassifizierungsergebnisse unter Anwendung der BLRA und DA für das WVU A und WVU B

In Abbildung 116 ist die Trefferquote und die Quote falscher Alarme in Form der Klassifikations-Ergebnisse unter Anwendung der zwei statistischen Berechnungsmethoden zur spezifischen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit – BLRA und DA – für die Datenstruktur des WVU A und B beschrieben. Für die jeweils betrachteten Schadensarten je WVU wurde die in dieser Arbeit entwickelte Methodik, siehe Abbildung 14, angewendet. Die Ergebnisse der am besten klassifizierenden Einzelmodelle zur Ermittlung der momentan vorliegenden Wahrscheinlichkeiten sind abgebildet. In der Betrachtung der Schadensarten „Schaden allgemein“ und „Korrosionsloch“ weichen die Ergebnisse für das WVU A prinzipiell nicht weit voneinander ab. Die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ erreicht die beste Trefferquote im Bereich von 85 % und eine Quote falscher Alarme im Bereich von 11 % für das WVU A. In den dargestellten Ergebnissen für das WVU A traten, bezogen auf die Anwendung der BLRA und der DA, keine großen Abweichungen auf und daher ist mit der vorhandenen Datengrundlage des WVU A eine sehr gute Klassifizierung bzw. Validierung mit beiden statistischen Methoden auf das Gesamtnetz erreichbar. In Abbildung 116 sind weiters die Ergebnisse der am besten

klassifizierenden Einzelmodelle unter Anwendung der BLRA und DA auf die Datengrundlage des WVU B dargestellt. In der Datenstruktur des WVU B stehen im Vergleich zum WVU A nicht so viele aussagekräftige Einflussfaktoren zur Verfügung und deshalb wurden nicht so gute Klassifizierungsergebnisse wie für das WVU A erreicht. Weiters lagen die Ergebnisse zwischen der BLRA und der DA weiter auseinander und erreichten eine geringere Klassifizierungsgüte als für das WVU A. Die Reihenfolge der Modellgüte für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ und „Korrosionsloch“ wird für beide WVU A und B in gleicher Weise erreicht. Zusammenfassend betrachtet sind die Zustandswahrscheinlichkeitsergebnisse für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ für beide WVU am höchsten.



**Abbildung 116: Vergleich der Klassifikationsergebnisse der BLRA und DA am Datensatz WVU A und B**

## 8 Diskussion, Schlussfolgerung

### 8.1 Allgemeines

Aufgrund der an fünf österreichischen WVU durchgeführten Auswertungen betreffend Qualität der Schadensartendokumentation auf VL-Systemen kann für Gesamt-Österreich generalisiert ausgesagt werden, dass für einen Großteil der WVU keine detaillierte Zuordnung der allgemeinen Schadensdokumentation auf die spezifische Schadensart möglich ist. Die in dieser Arbeit anfangs vorliegenden Schadensdatenbanken der großstädtischen übergeordneten Trinkwassernetze des WVU A und WVU B zur Unterscheidung von detaillierten Schadensarten konnten auch erst nach intensiver Nachbearbeitung verwendet werden.

Bezüglich Bestandsinformationen der HZL stehen oftmals nur verlässliche Daten über Rohrmaterialart, Verlegejahr und RD samt der zugehörigen Lage im GIS zur Verfügung. Zustandsinformationen über HZL liegen als Schadensdaten mit Kenntnis des Schadensdatums und einer Skizze des betroffenen Leitungsbereiches samt der zugehörigen Lage im GIS bei durchgeführten Reparaturen vor.

Weiters liegen umfassende Informationen zur Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik Großteils nicht in den GIS der WVU vor. In Abhängigkeit der für das jeweilige WVU auftretenden und bekannten Schadensartencharakteristiken sollten diese Basisdaten zur Anwendung der entwickelten Methodik zukünftig langfristig erhoben werden.

Für das WVU A und WVU B sollten die sich in dieser Arbeit ergebenden signifikanten Einflussfaktoren hinsichtlich spezifischer Schadensarten im Rahmen von Wartungs-, Inspektions- und Reparaturmaßnahmen im Detail zukünftig weiter erhoben werden und durch Einbeziehung von aktualisierten Informationen, wie beispielsweise Einflüsse aufgrund anderer Leitungsträger, die Datenqualität ständig erweitert und verbessert werden.

Zur detaillierten Dokumentation von Schadensartenereignissen (samt der Schadensfläche) bzw. Reparaturmaßnahmen für HZL liegt das detaillierte Schadensdokumentationsblatt von Fuchs-Hanusch et al. (2011a) und Gmoser (2012) vor und kann als Erweiterung zur ÖVGW Mitteilung 105 (2011) eingesetzt werden. Dadurch wäre eine langfristige optimale Dokumentationsqualität von Schadensartenauftreten gewährleistet.

Prinzipiell kann die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von spezifischen Schadensarten für Netzgrößen und Altersstrukturen aller Art angewendet werden. Die statistischen Voraussetzungen betreffend Datendichte und Datenqualität zur Anwendung der Methodik müssen allenfalls gegeben sein. Bei einem Hinzukommen von Einflussfaktoren im GIS von WVU sollte die in dieser Arbeit entwickelte Methodik unter Miteinbeziehung dieser zusätzlichen Einflussfaktoren wiederholt werden. Dadurch kann ein möglicher

signifikanter Zusammenhang bei der Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von spezifischen Schadensarten unter Berücksichtigung der zusätzlichen Einflussfaktoren ermittelt werden.

Eine größere Anzahl an signifikanten Einflussfaktoren führt bei der Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von spezifischen Schadensarten zu besseren Klassifikationsergebnissen und somit zu besseren Ergebnissen als bei alleiniger Miteinbeziehung der Basisdaten von Rohrmaterialart, Alter und RD.

Die in dieser Arbeit ermittelten Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Zustandsverschlechterung können schließlich mit Untersuchungen an Abwasserleitungen und Trinkwasserleitungen, welche ebenso die logistische Regressionsanalyse und Diskriminanzanalyse zur Beschreibung der Verschlechterung verwendeten, verglichen werden. Diese vergleichbaren Studien wurden am Londoner Trinkwasser-HZL-System von Cooper et al. (2000) mittels BLRA, an einem kanadischen Kanalsystem von Ariaratnam et al. (2001) mittels BLRA, an einem Kanalsystem im Vereinigten Königreich von Davies et al. (2001) mittels BLRA, an einem belgischen Kanalsystem von Ana et al. (2009) mit Hilfe von BLRA, an einem österreichischen Kanalsystem von Fuchs-Hanusch et al. (2012) und an einem australischen Regenwasserkanalsystem von Tran et al. (2006) mittels DA durchgeführt. In Cooper et al. (2000) ergaben sich vier von elf Einflussfaktoren zur Beschreibung der Zustandsverschlechterung als signifikant. In Ariaratnam et al. (2001) ergaben sich drei von fünf Einflussfaktoren, in Davies et al. (2001) acht von 18 und in Ana et al. (2009) drei von zehn Einflussfaktoren als signifikant zur Schadenswahrscheinlichkeitsberechnung für Abwasserleitungen. In Fuchs-Hanusch et al. (2012) wurden sieben maßgebliche Einflussfaktoren identifiziert, die eine Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von einsturzurelevanten Schadensbildern für Abwasserleitungen ermöglichen. Tran et al. (2006) erreichte durch Anwendung der DA mit Hilfe von acht signifikanten Einflussfaktoren eine Prognoseleistung von < 50 %. Dabei ist zu ergänzen, dass im Bereich Kanal noch zusätzlich im Rohrrinneren auftretende Einflüsse und Schadensmechanismen aufgrund der Abwasserzusammensetzung auftreten, die aber in dieser Arbeit für den Trinkwasserbereich natürlich nicht berücksichtigt wurden. Für die beschriebenen Untersuchungen wurde nur ein Schadensauftritt bzw. der Kanalzustand allgemein und nicht die detaillierte spezifische Betrachtung der Schadensarten untersucht. Ableitbar ist, dass eine höhere Anzahl an Einflussfaktoren die Zahl der signifikanten Variablen nicht automatisch erhöht. Jedes Rohrleitungssystem ist durch bestimmte Charakteristiken gekennzeichnet und somit ergibt sich stets eine unterschiedliche Anzahl an signifikanten Einflussfaktoren.

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse und Zusammenhänge der einzelnen Einflussfaktoren kurz eingegangen.

## **8.2 Rohrmaterial**

Die Rohrherstellungsverfahren, Verbindungstechniken und Beschichtungen unterliegen einer ständigen technischen Weiterentwicklung und beeinflussen dadurch in Abhängigkeit der verlegten Rohrmaterialart die unterschiedliche Zustandsverschlechterung von Rohrleitungen. Beim Ausbau der HZL-Systeme wurden unterschiedlichste Rohrmaterialien eingesetzt und somit liegt für jedes WVU ein bestimmter Materialmix mit einer charakteristischen inhomogenen Netzstruktur vor. Die in dieser Arbeit vorliegenden Rohrmaterialarten weisen in Abhängigkeit der Einflussfaktoren unterschiedliche Tendenzen in der Auftretswahrscheinlichkeit von Schadensarten mit Hilfe der Betrachtung der Odds Ratios auf. Der Einflussfaktor Rohrmaterialart wurde nur mittels der BLRA in der Modellberechnung berücksichtigt, da das vorhandene nominale Skalenniveau die Datenanforderungen zur Verwendung der Diskriminanzanalyse nicht erfüllte. Die Rohrmaterialien AZ, Beton und GGSM erhöhen die Auftretswahrscheinlichkeit bezogen auf die Referenzkategorie Materialart Stahl in der BLRA für das HZL-System des WVU B für die Schadensart „Verbindung undicht“. Bezüglich der Schadensart „Korrosionsloch“ sind GG, GGG 1, GGG 2 und GGG 3 für das WVU A und die Materialien Stahl und Beton, hier ist speziell die Betonkorrosion darunter zu verstehen, für das WVU B die signifikanten Materialarten. In der Betrachtung der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ ist die Materialart als Einflussfaktor für das WVU A nicht signifikant wohingegen für das WVU B die Materialarten GG und GGSM signifikant die Odds Ratio bezogen auf das Referenzmaterial Stahl erhöhen.

## **8.3 Rohrdurchmesser (Nennweite)**

Der Einflussfaktor Rohrdurchmesser steht nicht nur für die Information der Nennweite allein, sondern stellvertretend für viele weitere Informationen, die nicht direkt erfassbar und messbar sind. Ein Anstieg der Größen des metrischen Einflussfaktors Rohrdurchmesser führt in der Betrachtung der Odds Ratios in der BLRA und der Diskriminanzkoeffizienten und Korrelationskoeffizienten in der Diskriminanzanalyse zu einem Verringern der Auftretswahrscheinlichkeit für alle betrachteten Schadensarten. Der Rohrdurchmesser gilt als Ersatzgröße für die Rohrwandstärke und diese steigt mit größer werdendem Rohrdurchmesser. Aus diesem Grunde ergeben sich für größere Rohrdurchmesser auch höhere Widerstandsmomente und deshalb tragfähigere Rohrquerschnitte und folglich ein größerer Widerstand gegenüber inneren und äußeren Belastungen. HZL wurden in der Regel mit größeren Rohrdurchmessern und aufgrund deren Versorgungswichtigkeit mit größerer Sorgfalt verlegt und bearbeitet.

## **8.4 Alter (Verlegejahr)**

Der Einflussfaktor Alter bewertet den Leitungsabschnitt aufgrund des Alters zum Betrachtungszeitpunkt. Mit Hilfe der Berücksichtigung des Alters in Verbindung mit

dem zugehörigen Verlegejahr können Einflüsse wie z. B. Rohrmaterial-Herstellungsverfahren, Transport- und Lagerungsmethoden, Verlegequalität, Verlegemethoden, Bettungsqualität, Verdichtungsqualität, verwendete Wiederverfüllmaterialien und Qualifikation der ausführenden Firmen und Arbeiter in Abhängigkeit dieses zutreffenden Zeitraumes zugeordnet werden. In vielen wissenschaftlichen Untersuchungen (u.a. Lester und Farrar, 1979) wird aber auch auf einen fehlenden linearen Zusammenhang zwischen Alter und Schadenshäufigkeiten auf Rohrleitungen verwiesen. Untersuchungen zeigten, dass das Alter einer Leitung kein alleiniges Kriterium für den Zustand einer Rohrleitung ist, sondern dass bei z. B. metallischen Leitungen Herstellungsverfahren, Korrosionsschutz und weitere Faktoren maßgebend sind und zu Schäden führen können. Dies bestätigt die komplexe Materie der Zustands- und Verschlechterungsbeschreibung von Leitungen. In der Betrachtung der Odds Ratios in der BLRA und der standardisierten Diskriminanz- und Korrelationskoeffizienten steigt die Auftretswahrscheinlichkeit aller Schadensarten mit einem Anstieg in der Größe des Alters für HZL-Systeme der WVU A und B.

#### **8.4.1 Limitation in der Vorgehensweise der Methodik bei der Betrachtung des Einflussfaktors Alter und Folgeschäden auf HZL-Abschnitten**

In der Berechnung der spezifischen Schadensarten-Auftretswahrscheinlichkeit mit Hilfe physikalischer Modelle wurde einerseits für die schadhafte HZL-Abschnitte der Einflussfaktor Alter bis zum Schadensauftret als Zeitraum zwischen dem Verlegejahr und dem Schadenseintrittsjahr und andererseits für nicht schadhafte HZL-Abschnitte das Alter als Zeitraum zwischen dem Verlegejahr und dem Betrachtungsjahr bzw. Bezugsjahr der Berechnung (= 2011) definiert und verwendet. Diese Vorgehensweise berücksichtigt das tatsächliche Alter der schadhafte Leitungen zum damaligen Schadenszeitpunkt und für nicht schadhafte Leitungen den Zeitpunkt der Leitungszustandszuweisung (= kein Schaden) im Bezugsjahr 2011.

Bei der Anwendung der statistischen Methoden wurde das Alter der HZL-Abschnitte stets als Zeitraum zwischen dem Verlegejahr und dem Bezugsjahr (= 2011) als Modellannahme berücksichtigt. Der Zeitraum der Schadensaufzeichnungen für das WVU A zwischen den Jahren 1937 bis 2011 und für das WVU B zwischen 1969 bis 2011 wurde somit auf das Bezugsjahr der Leitungszustands-Berechnung (= 2011) transformiert. Dadurch geht der Einflussfaktor Alter beim Schadensauftret für schadhafte HZL nicht mit dem tatsächlichen Alter in die Berechnung ein. Dies stellt für die Vorgehensweise in dieser Methodik somit eine konservativere Betrachtung des Einflussfaktors Alter dar, da bei Zuordnung des tatsächlichen Alters beim Schadensauftret für schadhafte HZ-Abschnitte der Einfluss des Alters tatsächlich noch größer wäre. Für nicht schadhafte Leitungen wird das tatsächliche Alter bei der Leitungszustandszuweisung im Bezugszeitjahr 2011 richtig berücksichtigt.

Mehrere Schadensauftritte bzw. Folgeschäden auf HZL-Abschnitten mit unterschiedlich auftretenden Schadensarten wurden nur in gesonderter Betrachtung berücksichtigt. In diesem Fall wurden diese HZL-Abschnitte mit mehreren zugehörigen Schadensarten jeweils einzeln nur mit einer Schadensart in der Modellierung betrachtet. Somit trat eine Leitung mit gleichen Eigenschaften und Einflussfaktoren in Abhängigkeit der Anzahl der dokumentierten Schadensarten öfters in der Berechnung auf.

### **8.5 Länge (*Einzelrohrlänge* ≠ *Abschnittslänge*)**

In Abhängigkeit der Einzelrohrlänge können bei frei liegenden Rohrlängen überhöhte Längsspannungen zu Rundrissen führen. Die Einzelrohrlänge wurde in dieser Arbeit nicht in Abhängigkeit der Rohrmaterialarten in der Modellierung berücksichtigt. Abschnittsbezogene Leitungslängen entstehen durch GIS-Operationen oder aufgrund der Abschnittsbildung durch Berücksichtigung gleicher Rohreigenschaften wie beispielsweise Rohrmaterial, RD, Verlegejahr und Straßename. Die abschnittsbezogene Leitungslänge führt bei steigenden Längen naturgemäß zu größeren Schadenshäufigkeiten. In der Betrachtung der Odds Ratios in der BLRA und der standardisierten Diskriminanz- und Korrelationskoeffizienten steigt die Auftrittswahrscheinlichkeit aller Schadensarten mit einem Anstieg in der Größe der HZL-Abschnittslänge für HZL-Systeme der WVU A und WVU B.

### **8.6 Verbindungsart**

Ständige Weiterentwicklungen im Bereich der Rohrverbindungstechnik ergeben eine Vielzahl vorhandener Flansch-, Muffen- und Schweißverbindungsarten. Der Einflussfaktor der alleinigen Information Verbindungsart hat sich für alle betrachteten Schadensarten in dieser Arbeit als nicht signifikante Variable ergeben. Die Verbindungsproblematik wurde speziell mit der Betrachtung der Schadensart „Verbindung undicht“ für das WVU B untersucht. In Abhängigkeit der Materialgeneration wurden bestimmte Verbindungsarten eingesetzt, die als stellvertretende Information dafür gelten. Für das WVU B ergaben sich Gummidichtungen für AZ- und Betonleitungen, Stemmmuffenverbindungen für GG- und Stahlrohre und Schraubmuffenverbindungen von GG als signifikante Einflussfaktoren der Auftrittswahrscheinlichkeit der Schadensart „Verbindung undicht“.

### **8.7 Qualifikation der ausführenden Firmen und Personen**

Die Qualifikation der ausführenden bzw. handelnden Personen trägt maßgebend zur Qualität des Systems Boden-Rohr bei und bestimmt schließlich die Zeitdauer bis zum Schadensauftritt einer Rohrleitung. Britton (1982) beschreibt die Qualität der Verlegung bzw. mangelhafte Bauausführung als primäre Schadensursache an Rohrleitungen. Die Rohrsysteme wurden oftmals in Realität nicht nach den

bestehenden Vorgaben von Normen, Richtlinien und Regelwerken eingebaut, da wirtschaftliche Überlegungen und Zeitdruck den Alltag bestimmen. Somit ist jeder Versuch einer Leitungszustandsmodellierung eine Annäherung der Abbildung der Realität, da alle relevanten Einflussfaktoren niemals ermittelt, quantifiziert und in der Berechnung berücksichtigt werden können. Der Faktor Mensch trägt somit maßgebend zur Zustandsverschlechterung von Rohrsystemen bei, kann aber nicht quantitativ in der Modellierung bewertet werden.

### **8.8 Verlegetiefe**

Der Einflussfaktor der Verlegetiefe bzw. Rohrscheitelüberdeckung konnte nicht berücksichtigt werden, da diesbezüglich eine zu geringe Datendichte für die WVU A und WVU B vorlagen. Im Regelfall wird lt. normativer Vorgabe eine Rohrüberdeckung von 1,50 m für Trinkwasserleitungen in Österreich vorgeschrieben (ÖNORM B 2533, 2004). In der Auswertung der vorhandenen Daten des WVU B ergaben sich aber Rohrüberdeckungen im Bereich von 1 bis 5 Meter, da in der Praxis Trinkwasserleitungen in Abhängigkeit vorhandener Einbauten bzw. Kreuzungspunkte von Infrastrukturen unterschiedlich tief verlegt werden. Im Hinweisblatt DVGW W 397 (2004) werden die Vorgehensweise und die zu berücksichtigenden Faktoren zur Ermittlung der erforderlichen Verlegetiefen von Wasseranschlussleitungen beschrieben.

### **8.9 Bodenaggressivität und korrosionsfördernder Boden**

Im Arbeitsblatt DVGW GW 9 (1986) ist die Beurteilung von Böden hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens auf erdverlegte Rohrleitungen aus Eisenwerkstoffen beschrieben. Die in dieser Arbeit für das WVU A und WVU B berücksichtigten und zugleich signifikanten Korrosionsfaktoren sind die Bodenaggressivität, korrosionsfördernde Faktoren, wie Grundwasserschwankungen und Torfböden, Streuströme aufgrund kathodisch geschützter Gasleitungen und als Bettungsaufleger verwendete Hölzchen unter Leitungen. Der Korrosionsprozess kann beispielsweise durch eine Verletzung der Schutzschicht beim Transport oder Einbau initiiert werden und die Korrosionsgeschwindigkeit ist schließlich von der Umgebung bzw. dem an der Rohrleitung anstehenden Boden abhängig. Einflüsse, wie Streuströme, das Austrocknen von Tonböden und eine dadurch erhöhte Bodenbelüftung, schwankender Grundwasserspiegel, saure Böden und aggressives Grundwasser beschleunigen mitunter den Korrosionsprozess.

### **8.10 Angrenzende Tiefbaumaßnahmen und setzungsempfindliche Böden**

Angrenzende Tiefbaumaßnahmen verursachen auf Rohrleitungen aufgrund von Bodenbewegungen und Erschütterungen verschiedene Schadensarten in Form von Undichtigkeiten im Verbindungsbereich oder Rohrquerschnittversagen in Form von

Rissen und Brüchen. Diese Schadensarten treten meist zeitlich verzögert zu den angrenzenden Tiefbaumaßnahmen auf und daher ist eine direkte Schadensverursachung nachträglich oft nur schwierig zuzuordnen. In vielen Normen und Regelwerken sind die zulässigen horizontalen und vertikalen Abstände von benachbarten Infrastrukturen festgelegt. Die in dieser Arbeit berücksichtigten Einflussfaktoren für das WVU B betreffend angrenzende Tiefbaumaßnahmen sind AL, VL, Gas und Kanal. Auch unter Einhaltung aller Vorgaben können Bodenbewegungen im Laufe der Zeit durch Ausspülung von feinkörnigem Material aufgrund kleiner Leckagen auftreten. Diese Bodenbewegungen führen einerseits zu einer Überbeanspruchung des bereits aufgrund Korrosion geschwächten Rohrquerschnittes und verursachen die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ und beeinflussen andererseits signifikant die Schadensart „Verbindung undicht“ aufgrund von Bodenbewegungen im Muffenbereich. Die Größe des Rohrdurchmessers von Gas- und Abwasserleitungen ist ein stellvertretendes Maß für den Einfluss der angrenzenden Tiefbaumaßnahmen bezüglich Störung des Untergrundes und der Lage der Trinkwasserleitung, da größere Rohrdurchmesser von Gas- und Abwasserleitungen breitere Grabenweiten und größere Verlegetiefen bedingen. Ein Anstieg in der Größe der Rohrdurchmesser von Gas- und Abwasserleitungen erhöht in der Betrachtung der Odds Ratios die Auftretswahrscheinlichkeit von allen betrachteten Schadensarten. Im Merkblatt DVGW W 380 (1993) liegt eine Bewertung von Baumaßnahmen im Bereich von Wasserversorgungsanlagen vor, worin auch spezielle Einflüsse und Schutzmaßnahmen vorgegeben werden.

Zur Gruppe der setzungsempfindlichen Einflussfaktoren für das WVU A zählen die Setzungsempfindlichkeit, Kriech-Rutschhang und Schanzen und Wälle. Die Setzungsempfindlichkeit von Böden als stellvertretende Information möglicher Bodenbewegungen bewirkt einen signifikanten Einfluss auf die Schadensarten „Verbindung undicht“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“. Die Einflussfaktoren Kriech-Rutschhang und Schanzen und Wälle ergeben sich in der Betrachtung aller Schadensarten als nicht signifikant.

Zur Gruppe der von oben einwirkenden Einflussfaktoren (= Oberflächenlasten) zählen die Verkehrsbelastung, mechanische Belastungen durch Straßenbahnen und der Belagszustand.

### **8.11 Verkehr und Straßenbelagszustand**

Verkehr verursacht Bodenbewegungen und Erschütterungen im Verlegebereich von Rohrleitungen. Weiters kommt es lt. Friedl (2007) zu einer maßgebenden Überbeanspruchung von Rohrleitungen durch die Belastung von Baugeräten, wie schwere Verdichtungswalzen, bei unzureichender Rohrüberdeckung im Falle einer Straßenoberbausanierung. Der Einflussfaktor Verkehr erhöht die Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ für

das WVU A und B und dieser signifikante Schadensmechanismus wird dadurch bestätigt. Der Belagszustand der Straßenoberfläche und mechanische Belastungen durch Straßenbahnen hingegen bewirken keinen signifikanten Einfluss auf das Entstehen eines Schadens bzw. aller betrachteten Schadensarten.

### **8.12 Bäume bzw. Baumwurzelbeeinflussung**

Baumwurzeln, die sich im Rohrleitungsbereich im Untergrund ausbreiten, können einerseits die Lage von Leitungen beeinflussen und andererseits in die Muffenbereiche eindringen. Undichte Verbindungen mit folglichem Wasseraustritten sowie die im Zuge der Künettenverfüllung verwendete Körnung können eine Baumwurzelbeeinflussung erleichtern und begünstigen. Der Einfluss von Bäumen und Baumwurzeln erhöht die Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Verbindung undicht“ für das WVU B. Die zusätzliche Information des Baumstammdurchmessers dient als stellvertretende Ersatzvariable für das Alter und die Größe des Baumes bzw. Wurzelbereiches und erwies sich mit der Berechnungsmethode der BLRA und DA für die Schadensart „Verbindung undicht“ für das WVU B als signifikant. Ein Anstieg des Baumstammdurchmessers erhöht die Schadensarten-Auftretswahrscheinlichkeit „Verbindung undicht“. Eine weiterführende Unterscheidung der Bäume nach deren Wurzelcharakter in Tiefwurzler und Flachwurzler konnte aufgrund der nicht gesamtheitlich vorliegenden Informationen diesbezüglich nicht durchgeführt werden.

### **8.13 Herstellungs- und einbaubedingte Einflüsse**

Rohrmaterialherstellungsfehler liegen in Form von verborgenen Fehlern, wie z. B. Haarrisse, die nur bis in eine bestimmte Tiefe reichen, ungleiche Wanddicken, Lunkerbildung (Hohlräume) bei der Sandgussherstellung, Schlacken und Formsandeinschlüssen vor. Haarrisse können zusätzlich durch unsachgemäßen Transport oder bei Sandgussherstellung durch Gussspannungen aufgrund ungleichem und zu schnellem Abkühlen nach dem Gießen verursacht werden. Diese Einflüsse verursachen eine verringerte Zugfestigkeit und Ausgangspunkte für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“. Materialherstellungsfehler, unsachgemäßer Transport, fehlerhafte Lagerung, mangelhafte Bettung und Verdichtung und unterschiedliche Bettungsmaterialqualität in Rohrleitungslängsrichtung bzw. Bodeneigenschaften stellen im Rahmen zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen wichtige Einflussfaktoren auf die Rohrzustandsverschlechterung dar. Diese Einflüsse können jedoch aufgrund der nicht vorliegenden Informationen für das WVU A und WVU B in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

### **8.14 Betriebsdruck und Rauigkeit**

Der Einflussfaktor Betriebsdruck in Zusammenhang mit der Rauigkeit der Rohrrinnenwand tritt als innere Belastung auf den Rohrleitungsquerschnitt auf. Bezogen auf die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ erhöhen Betriebsdruck und Rauigkeit signifikant die Auftretswahrscheinlichkeit. Belastungen in Form von Druckschwankungen und plötzlich auftretenden Druckstößen liegen in der Datenstruktur des WVU A und WVU B nicht vor und konnten daher in dieser Form als betriebliche Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden.

### **8.15 Zusammenfassung der Schlussfolgerung**

Zusammenfassend betrachtet erhöhen die Einflussfaktoren AZ, Beton, GGSM, Stahl, Alter, Abschnittslänge, Streustrom Straßenbahn, AL, VL, Gas, DN Gas, Kanal, DN Kanal, Baum, Baum Stammumfang und DZ die Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Verbindung undicht“. Dadurch ist die Schadensart „Verbindung undicht“ signifikant von den Einflüssen Rohrmaterialart, dem Alter, angrenzender Tiefbaumaßnahmen, der Setzungsempfindlichkeit von Böden und der Baumwurzelbeeinflussung abhängig. Die Information der Zugehörigkeit zu einem DZ kann als stellvertretende Information der Setzungsempfindlichkeit von Böden für das WVU B verwendet werden.

Eine Erhöhung der Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Korrosionsloch“ wird aufgrund der signifikanten Einflussfaktoren Material (GG, GGG), Alter, Länge, Bodenaggressivität, korrosionsfördernder Boden, Streustrom Gasleitung und Hölzchen verursacht. Dies bestätigt den Zusammenhang der Schadensart „Korrosionsloch“ mit den korrosionsfördernden Einflussfaktoren.

Die Einflussfaktoren Alter, Länge, Streustrom Straßenbahn, Streustrom Gasleitung, Setzungsempfindlichkeit des Bodens, Verkehrsbelastung, Rohrrinnendruck und Rohrrauigkeit erhöhen die Auftretswahrscheinlichkeit der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ signifikant. Der Schadensmechanismus der Korrosionsschwächung des Rohrleitungsquerschnittes und die Superposition der inneren und äußeren Belastungen in Zusammenhang mit der Setzungsempfindlichkeit des Bodens erklären und verifizieren den komplexen Entstehungsprozess der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“.

## 9 Zusammenfassung

Haupt- und Zubringerleitungen (HZL) bilden die Grundstruktur und damit das Rückgrat der öffentlichen Wasserversorgung. Der Ausbau der öffentlichen Wasserversorgungsnetze ist in Österreich weitgehend abgeschlossen und der Fokus des Anlagenmanagements verlagert sich vom Neubau in Richtung Instandhaltung, bestehend aus Wartung, Inspektion und Instandsetzung von HZL. Aufgrund der hohen Versorgungswichtigkeit und dem großen Schadensausmaß sollten bezüglich der Instandhaltung für HZL die Strategie der Schadensfrüherkennung und Schadensvermeidung angestrebt werden.

Zur Umsetzung dieser Strategien stehen verschiedene Berechnungsansätze zur Verfügung. Für Versorgungsleitungen (VL) werden unterschiedliche Schadensprognosemodelle basierend auf der Analyse von Schadenshäufigkeiten bereits in der Praxis eingesetzt. Diese Berechnungsansätze lassen sich aber nicht für den Bereich der HZL anwenden, da diese zu geringe Schadenshäufigkeiten zur Berechnung aussagekräftiger Ergebnisse aufweisen. Für HZL ist es daher zielführender im Sinne effizienter Instandhaltungsstrategien ein Risikobewertungsmodell zu verwenden.

Das Ziel von Risikobewertungsmodellen ist die Priorisierung von HZL hinsichtlich Wartung, Inspektion, Erneuerung oder Reparatur. Die theoretische Grundlage dieser Risikomodelle beruht in der Betrachtung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaßes. In dieser Arbeit wurde der Fokus auf die Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von „Schaden allgemein“ und drei spezifischen Schadensarten, - nämlich „Verbindung undicht“, „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/ Scherbenbruch“ - gerichtet. In der Literatur wurden für verschiedene Infrastrukturbereiche, wie Abwasserleitungen, Straßen und Brückenbau, Risikobewertungsmodelle eingesetzt. Eine detaillierte Einzelbetrachtung der spezifischen Schadensbilder bzw. Schadensarten wurde dabei nicht ausgeführt. Die potenziell zur Materialzustandsverschlechterung, dem Entstehen von Leckagen und dem Auftreten von spezifischen Schadensarten beitragenden Einflüsse wurden in rohrphysikalische, umweltbedingte, betriebliche und herstellungsbedingte Faktoren und aufgrund der zeitlichen Veränderlichkeit in statische (Rohrmaterial, Nennweite, Bodenart, usw.) und dynamische Einflussfaktoren (Alter, Druckzonenwechsel, Rohrrauigkeitsveränderung, usw.) unterteilt.

Diese Systeme, in denen unterschiedlichste Materialien und Durchmesser zu verschiedenen Bauperioden mit abweichender Qualität eingebaut wurden, verschlechtern sich aufgrund dieser Einflussfaktoren in nicht gleichbleibender Geschwindigkeit. Schäden treten auf HZL in Abhängigkeit der Rohrwerkstoffe und der Einwirkungen auf die Rohrleitung in Form unterschiedlichster Schadensarten bzw. Schadensbilder auf. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen, Belastungen und Schadensmechanismen durchschreiten die spezifischen Schadensarten die

einzelnen Phasen der Schadensentwicklung bis aufgrund einer gewissen Wasserverlustmenge der Schaden detektiert oder an der Oberfläche sichtbar wird und es zu einer anschließenden Reparatur kommt.

Als Grundlage der Berechnung wurden Daten zweier mitteleuropäischer großstädtischer Wasserversorgungsunternehmen (WVU) betreffend Rohrmaterialien, Einflussfaktoren und reparierten Schäden verwendet. Die Berechnungen zur Auftretswahrscheinlichkeit von Schadensarten wurden mit Hilfe von verschiedenen physikalischen Modellen und statistischen Modellen – binäre logistische Regressionsanalyse (BLRA) und Diskriminanzanalyse (DA) – durchgeführt.

Physikalische Modelle beschreiben durch vereinfachte Formulierungen der in der Natur auftretenden Mechanismen den komplexen Prozess der Zustandsverschlechterung bis hin zum Schadensauftritt. Diese Modelle sind nur auf die Berechnung von einer oder gleichzeitig mehrerer bestimmter Schadensarten unter Einbeziehung bestimmter festgelegter Einflussfaktoren festgelegt. Die derzeit in der Literatur beschriebenen physikalischen Modelle beschränken sich größtenteils auf metallische Rohrmaterialien. Dadurch sind lediglich die Schadensarten „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch gemeinsam mit Korrosionsloch“ direkt berechenbar. Für den Fall der Schadensart „Korrosionsloch“ erreichten die physikalischen Modelle eine geringe Trefferquote der reparierten Schäden und eine geringe Quote der bei der Berechnung irrtümlich als schadhaft prognostizierten, aber in der Realität, intakten Leitungen (= falsche Alarme). Bei der Betrachtung der Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch gemeinsam mit Korrosionsloch“ erreichten die physikalischen Modelle prinzipiell eine gute Trefferquote, aber auch eine hohe Rate an falschen Alarmen. Die berücksichtigten physikalischen Modelle sind zur Berechnung der Schadensarten-Auftretswahrscheinlichkeit aufgrund der nicht ausreichend zur Verfügung stehenden notwendigen Daten der beiden WVU daher nicht optimal geeignet.

Mit Hilfe der statistischen Methoden wurden die signifikanten Einflussfaktoren bezüglich „Schaden allgemein“ und der Schadensarten „Verbindung undicht“, „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ ermittelt. Ein signifikanter statistischer Zusammenhang zwischen der Schadensart „Korrosionsloch“ und den korrosionsfördernden Faktoren wurde anhand beider Modelle bestätigt. Die Schadensart „Verbindung undicht“ wird von den Einflussfaktoren Rohrmaterialart, Alter, angrenzende Tiefbaumaßnahmen und Baumwurzelbeeinflussung signifikant beeinflusst und gilt als sehr komplexe Schadensart in Zusammenwirken mit vielen Schadensmechanismen in der Entstehung des Schadens. Die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ hängt mit der Setzungsempfindlichkeit des Bodens Rohrrinnendruck, Rohrrauigkeit, Verkehrsbelastung und korrosionsfördernden Böden signifikant zusammen. Letzteres wird dadurch erklärt, dass die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ als Folge einer Korrosionsbeeinflussung als Ausgangspunkt des Schadens und erhöhten inneren und äußeren Belastungen auftreten kann. Für die Schadensart

„Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ wurden mit beiden statistischen Methoden die besten Klassifizierungsergebnisse für die Datenstruktur des WVU A und WVU B erzielt. Für das WVU A ergaben sich keine großen Unterschiede im Klassifizierungsergebnis unter Anwendung der BLRA und DA. Der unterstellte Nachteil bei Anwendung der DA bezüglich hoher Datenstrukturanforderungen wirkt sich somit für das WVU A nicht nachteilig aus. Für das WVU B stehen im Vergleich zum WVU A nicht so viele aussagekräftige Einflussfaktoren zur Verfügung und deshalb wurde eine geringere Klassifizierungsgüte mit der BLRA und DA für das WVU B im Vergleich zum WVU A erzielt. Für das WVU B wurden prinzipiell mit der BLRA bessere Klassifizierungsergebnisse erreicht als mit der DA. Somit wirkt sich für das WVU B der Einfluss der Datenqualität in der Anwendung der BLRA und DA zugunsten der BLRA aus. In der Berechnung der Schadensart „Schaden allgemein“ konnten die in der Einzelbetrachtung nachgewiesenen Zusammenhänge zwischen den spezifischen Schadensarten und den jeweiligen Einflussfaktoren bestätigt werden.

Mit der vorhandenen Datenlage der beiden WVU ist die Berechnung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit unter Anwendung statistischer Modelle mit hoher Trefferquote und geringer falscher Alarme möglich. Grundsätzlich sind beide verwendeten statistischen Modelle zur Berechnung der Schadensartenauftretswahrscheinlichkeit geeignet, wobei die BLRA signifikantere Ergebnisse als die DA erzielt, speziell für das WVU A. Ein Grund dafür ist die Bedingung der Verwendung von ausschließlich metrischen Einflussvariablen bei der DA im Gegensatz zur BLRA, welche alle Skalenniveaus von Einflussfaktoren in der Berechnung berücksichtigt. In der Überprüfung des Zusammenhanges von Modellgüte, Trefferquote und Eingangsdaten wurde eine Modellverbesserung mit einer steigenden Anzahl von vorhandenen Einflussfaktoren und Leitungsabschnitten bestätigt. Untersuchungen bezüglich Fehlklassifikationen von Leitungszuständen mit Hilfe der BLRA und DA zeigten, dass es nicht möglich war den Leitungszustand perfekt durch eine bestimmte Anzahl von Einflussfaktoren zu berechnen, da in Realität nicht erfassbare oder nicht quantifizierbare Einflüsse auf den Leitungszustand einen Einfluss ausüben und nicht berücksichtigt werden können. Für die Schadensarten „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ werden für das WVU A und B bessere Klassifizierungsergebnisse (höhere Trefferquoten und geringere Quote falscher Alarme) als bei alleiniger Betrachtung der Schadensart „Schaden allgemein“ erzielt. Eine einzeln betrachtete Schadensart in Verbindung mit den maßgebenden Einflussfaktoren erreichte somit bessere Modellergebnisse als die Betrachtung der Schadensart „Schaden allgemein“. Der Grund dafür ist, dass unter den Begriff der Schadensart „Schaden allgemein“ viele unterschiedliche Schadensbilder, Schadensmechanismen und Einflussfaktoren sich vermischen und eine Leitungszustandsunterscheidung erschwert wird. Die Schadensart „Verbindung undicht“ (nur für das WVU B vorliegend) erzielte im Vergleich zu „Korrosionsloch“ und „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ keine

besseren Klassifizierungsergebnisse als die Schadensart „Schaden allgemein“. Dies wird aufgrund der sehr komplexen Entstehung der Schadensart „Verbindung undicht“ und durch das Nichtvorhandensein wichtiger Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Information der Setzungsempfindlichkeit des Bodens, für das WVU B begründet.

Die Klassifizierungsergebnisse (speziell die Trefferquote) verbesserten sich für die DA bei Berücksichtigung von metrisch und ordinal skalierten Einflussfaktoren als bei alleiniger Einbeziehung von metrischen Variablen in die Berechnung. Damit konnte festgelegt werden, dass eine größere zur Verfügung stehende Menge an Einflussfaktoren zu besseren Ergebnissen in der Berechnung des Leitungszustandes von HZL führt. Die Verbesserung der Klassifizierungsergebnisse aufgrund einer größer werdenden Stichprobenmenge für Kalibrierung der Modellgleichungen wurden für das WVU A (am Beispiel Schadensart „Korrosionsloch“) und WVU B (am Beispiel Schadensart „Schaden allgemein“) bestätigt.

Im Vergleich der physikalischen und statistischen Modelle ist bei der momentanen Datenlage der beiden untersuchten WVU den statistischen Modellen der Vorzug zu geben. Dies zeigt den Vorteil der Verwendung von inferentiellen Einflussfaktoren und der vorhandenen Schadensartendokumentation zur Berechnung des Rohrleitungszustandes mit Hilfe statistischer Modelle. Kostenintensive detaillierte Datenerhebungen als Voraussetzung der Anwendung von physikalischen Modellen sind somit zur Anwendung statistischer Modelle nicht notwendig. Zur sinnvollen zukünftigen praktischen Nutzung der vorhandenen physikalischen Modelle sollten die dafür notwendigen Daten vorab ermittelt werden, da die Trefferquote und Aussagekraft dieser physikalischen Modelle nur so gut sind, wie die Qualität und Dichte der Eingangsdaten. Im Wasserversorgungsbereich sind die zur Berechnung von physikalischen Modellen notwendigen Daten meist nicht vollständig verfügbar oder die Ermittlung dieser Informationen ist mit hohen Kosten verbunden. Auch bei Vorhandensein aller notwendigen Eingangsdaten zur Berechnung von physikalischen Modellen ist aufgrund vieler in der Realität vorliegender Imperfektionen eine perfekte Trefferquote von Leitungszuständen dadurch auch nicht erreichbar.

Prinzipiell können abschließend in Abhängigkeit der mit dieser Methodik prognostizierten Schadensarten bestimmte Inspektionstechnologien verwendet werden. Der Einsatz bestimmter Technologien, wie Ultraschall, ist stets von der Rohrmaterialart der Rohrleitung abhängig. Nach Vergleich der derzeit entwickelten und am Markt vorhandenen Inspektionstechnologien können akustische Inspektionsverfahren universell eingesetzt werden, da diese unter bestimmten Voraussetzungen für alle Rohrmaterialarten und Schadensarten anwendbar sind.

## **10 Ausblick**

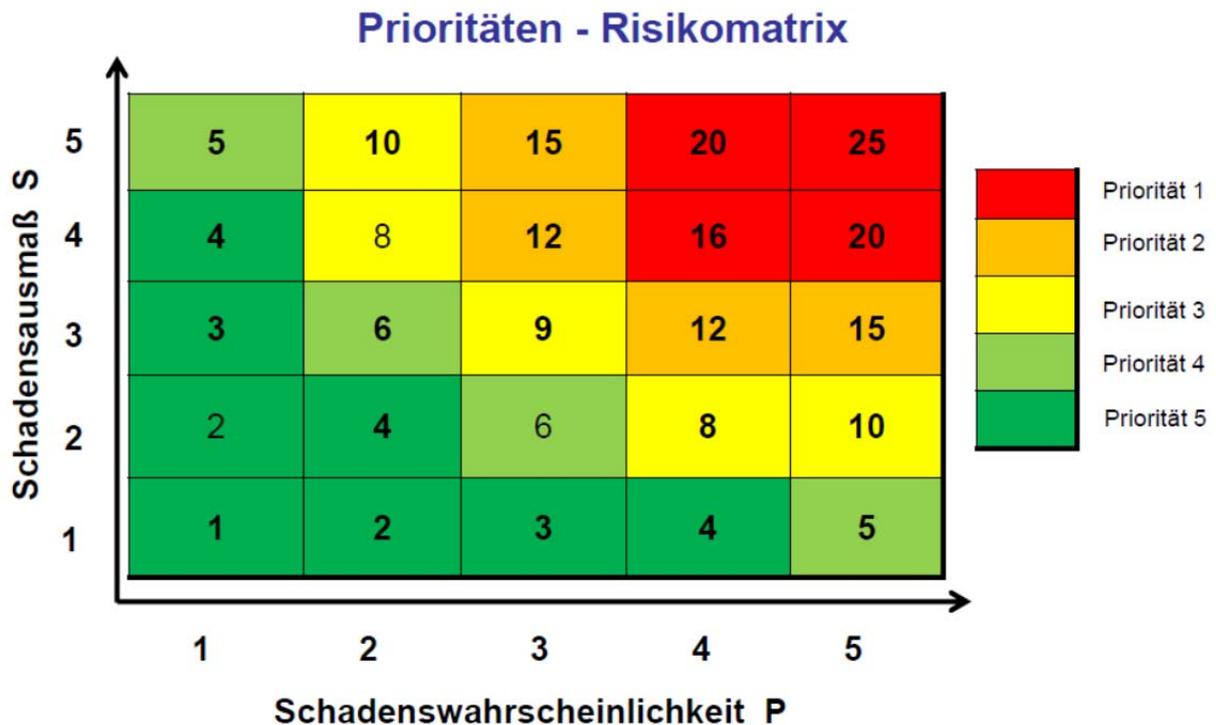
Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Ermittlung der einzelleitungsbezogenen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit dient weiterführend zur Risikoberechnung und Priorisierung von HZL. Mit der Anwendung der statistischen Methoden der BLRA und DA auf die Datensätze der WVU A und B konnten die signifikanten Einflussfaktoren bezogen auf die Zustandsverschlechterung von spezifischen Schadensarten identifiziert werden. Dadurch ist eine Prognose der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der zeitlich veränderlichen Einflussfaktoren (z. B. Rohralter, Änderung von Rohrrinnendruck und Rauigkeit, usw.) möglich.

### **10.1 *Prognose der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit je HZL***

Eine Untersuchung der Auswirkungen in der Priorisierung von HZL durch die Veränderung von signifikanten Einflussfaktoren in der zukünftigen Risikoprognose ist von großem Interesse seitens der WVU. Dadurch könnten mittels Szenarioanalysen die Beeinflussungen aufgrund geplanter Baumaßnahmen angrenzender Leitungsträger, wie z. B. Kanal, Gas, Fernwärme, Straße, usw. in die Berechnung der zukünftigen spezifischen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit von HZL berücksichtigt werden und Entscheidungshilfen zu koordinierten Baumaßnahmen gegeben werden.

### **10.2 *Risikoermittlung je HZL***

Mittels einer abschnittsbezogenen risikobasierten Prioritätenermittlung können jene Leitungsabschnitte identifiziert werden, welche im Sinne einer Risikominimierung rechtzeitig entsprechenden Maßnahmen zugeführt werden sollen. Dazu zählt eine intensivierete Wartung und Kontrolle, die nähere Zustandserfassung (direkte innere Inspektion, Materialprüfung, usw.), der aktive Korrosionsschutz oder aber die Erneuerung des kritischen Leitungsabschnittes. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Berechnung der einzelleitungsbezogenen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit liefert die erste wichtige Grundlage zur abschnittsbezogenen risikobasierten Prioritätenermittlung. Dadurch sind die Verknüpfung der Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit mit dem Schadensausmaß und eine detaillierte Eingrenzung des Risikos je HZL-Abschnitt möglich (siehe Abbildung 117).



**Abbildung 117: Risikomatrix mit Darstellung der Prioritäten**

Das Ergebnis der Schadensarten-Auftretswahrscheinlichkeit wird in eine Klassifizierung (= Punktesystem) auf der x-Achse von 1 (= nicht vorhanden) bis 5 (= sehr hoch) transformiert. Somit könnten aber beispielsweise die betroffenen HZL-Abschnitte der Schadenswahrscheinlichkeitsklasse 5 den Risikoprioritätsgruppen aufgrund der fehlenden Schadensausmaßinformation 1 bis 4 angehören. Mit der zusätzlichen Betrachtung der Schadensausmaßseite ist dadurch eine abschließende Zuordnung (= Eingrenzung) aller HZL-Abschnitte in eine Risikoprioritätsklasse definierbar. Somit ist auch zur Umsetzung optimierter Instandhaltungsstrategien, wie z. B. Wartung, Inspektion, Reparatur oder Rehabilitation, die Ermittlung der Schadensausmaßseite von großer Bedeutung und notwendig. Schwachstellen könnten im übergeordneten Trinkwassernetz identifiziert und Schäden früher erkannt und vermieden werden. Zukünftige Forschungsaufgaben zur Eingrenzung des Schadensausmaßes in Abhängigkeit der Schadensarten-Auftretswahrscheinlichkeit auf HZL sind von großem Interesse. Folglich werden daher die Einflussparameter auf das Schadensausmaß in Abhängigkeit der unterschiedlichen Schadensarten kurz als Ausblick erläutert.

### 10.3 Einflussparameter auf das Schadensausmaß von HZL

Mit dem Begriff Schadensausmaß werden einerseits Konsequenzen und Auswirkungen auf die benachbarte Infrastruktur und den Siedlungsraum (Jo und Ahn, 2005) und andererseits systeminterne Auswirkungen (Friedl et al., 2012), welche die Versorgungssicherheit beeinflussen, berücksichtigt.

In Abhängigkeit der vorliegenden Umgebungsbedingungen und der einwirkenden Belastungen treten durch verschiedene Schadensmechanismen unterschiedliche Schadensarten auf bestimmten Rohrmaterialien auf. Das Ausmaß der Schäden ist maßgebend von der Schadensart und der Größe der Schadensfläche (= Leckagegröße) am Rohr abhängig. Die Leckagegröße ist dabei von der Materialart und den einwirkenden Schadensursachen abhängig. Spröbruchgefährdete Leitungen neigen zu Rundrissen mit Wasseraustritt über den gesamten Querschnitt. Metallische Werkstoffe neigen zu lochförmigen Leckagen infolge Korrosion. In der Entwicklung der Schadensart Korrosion ist die Austrittsfläche anfangs relativ klein und in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Zustandsverschlechterung führt dies bei fehlendem Korrosionsschutz zu größeren Leckageflächen.

Mashford et al. (2009) und Van Zyl and Clayton (2005) befassten sich z. B. mit dem druckabhängigen Ausflussverhalten bei Rohrbrüchen, welches wesentlich von der Geometrie der Fläche des Bruches bzw. der Leckage abhängt.

Die Schadensfläche bestimmt somit die austretende Wasserverlustmenge und in Abhängigkeit des anstehenden Bodens die Auswirkungen an Dritten durch Unterspülung und Überflutung (z. B. Beschädigungen an benachbarten Objekten oder Personenschäden) in Form von Wiederinstandsetzungs- und Schadensersatzkosten. Zusätzlich werden in Abhängigkeit der Schadensart verschiedene Reparaturarten, wie Reparaturschelle, Kupplungen oder Teilerneuerungen, an der Rohrleitung ausgeführt.

Die Auswirkungen an Dritten aufgrund von Wasserverlusten und daraus resultierenden Überflutungen können mittels hydraulischen Oberflächenabflussmodellen abgebildet werden. Dabei werden die austretende Wassermenge mit der Charakteristik der Oberfläche, der Geländeneigung, der Bordsteinkantenhöhen, der Abflussmöglichkeit in den nächsten Kanal, usw. in Beziehung gebracht und die mögliche Konsequenz auf benachbarte Objekte abgeschätzt.

Nicht gemeldete und nicht detektierbare Wasserverluste führen zu lang laufenden Leckagen im Untergrund. Aufgrund dieser Wasseraustritte, welche durch die Phase drei des Entwicklungsmodells in Abbildung 9 beschrieben werden, kann es bei angrenzenden Leitungsträgern, wie Strom, Gas, Fernwärme, Kanal, usw. zu Unterspülungen führen, die diese Infrastruktureinrichtung beschädigen und folglich zu hohen Schadensersatzkosten führen können. Im Falle von undichten Kanälen können große Mengen an Bodenmaterial aufgrund von Leckagen an HZL in den eventuell undichten Kanal gespült werden und betrieblichen Behinderungen, wie Ablagerungen oder Verstopfungen, im Kanal verursachen.

Die Fläche der Künettenwiederherstellung und alle weiteren angrenzenden beschädigten Straßenoberflächen ergeben die gesamte Wiederinstandsetzungsfläche. Soziale Kosten, wie z. B. Verkehrsbeeinträchtigungen und Behinderung von wirtschaftlichen und industriellen Prozessen, werden von der

Reparaturart, welche die Größe der Reparaturkünette vorgeben, und der resultierenden Wiederinstandsetzungsfläche bestimmt. Längsrisse führen in der Regel zu größeren Wiederinstandsetzungsflächen der Künette aufgrund der Längsausstreckung des Schadensbildes als z. B. Rundrisse oder Korrosionslöcher.

In Abhängigkeit der Eigenschaften des um die Rohrleitung anstehenden Bodens und der Oberbauart ergeben sich unterschiedliche Laufzeiten von Wasseraustritten für die Phasen drei und vier im Entwicklungsmodell. Im Falle von versickerungsfähigen und kompakt gelagerten Kiesböden ist es sehr schwierig Leckagen zu detektieren, da diese im Untergrund ungehindert versickern können und nicht an die Oberfläche kommen bzw. gemeldet werden. Es kann somit zu einer sehr langen Dauer der Phase drei für bestimmte Schadensarten, wie Korrosionslöcher, führen. Die Oberbauart und Straßenbelagsart, wie z. B. Makadam-, Asphalt oder Beton, bestimmen weiters die Konsequenzen im Schadensfall. Wenn Betondeckenfelder als Straßenoberbau über HZL verwendet werden, können aufgrund von Leckagen großflächige Unterspülungen des Straßenoberbaus auftreten, da die Detektion des Wasseraustrittes unter den geschlossenen Straßenbelags-Betonfeldern an der Oberfläche erst sehr spät und meist nicht an der direkten HZL-Leckagestelle möglich ist.

Systeminterne hydraulische Beeinträchtigungen im Leitungsnetz – sogenannte Vulnerabilitäten – sind von großer Relevanz. Turner et al. (2003) beschreibt die Vulnerabilität als Auswirkung einer lokalen Veränderung auf das Gesamtsystem.

Auftretende Druckschwankungen, Unterdrücke und Druckstöße können lt. Abbildung 9 während der Phase vier und fünf als Konsequenz eines Schadens auftreten. Reparaturbedingte Absperrungen von HZL führen weiters zu Fließrichtungswechsel und Fließgeschwindigkeitsänderungen im System. Diese Konsequenzen können als kurzfristig zusätzliche Belastungen in Form von Innendruckvariationen bestehende Schwachstellen auf HZL plötzlich zum Versagen bringen. Teilweise vorhandene Rundrisse am Rohrquerschnitt können sich zu einem durchgehenden Rundriss fortpflanzen und Längsrisse können sich entweder in Längsrichtung noch weiter ausbreiten oder in großflächige Scherbenbrüche übergehen.

In Abhängigkeit der Situierung von Absperrarmaturen auf HZL kann die Wasserversorgung im Reparaturfall an die direkt angeschlossenen VL und weiter indirekt verbundenen AL nicht aufrecht erhalten werden und führen somit zu einer Versorgungsunterbrechung.

Unterschiedliche Schadensbilder führen in der Praxis in Abhängigkeit der angrenzenden Infrastruktur bzw. Flächenwidmung und der umgesetzten Reparaturart zu unterschiedlichen Dauern der Versorgungsunterbrechung. Die Dauer der Schadensbehebungen und zugleich Versorgungsunterbrechungen können in Form von CML (= Customer Minutes Lost) bewertet werden.

Auch Wasserqualitätsbeeinträchtigungen können im Schadensfall durch das Eindringen von Verunreinigungen in die Rohrleitung hervorgerufen werden. Dies kann für Leitungen aufgrund von Unterdrücken im normalen Betrieb in der Rohrleitung zutreffen und zu einem Einsaugen des verunreinigten Wassers in die Rohrleitung führen. Zusätzlich können Verunreinigungen in der Phase vier, d. h. in der Zeit der Schadensmeldung bis zur Absperrung, und in der Phase fünf, während der Reparaturzeit, in die Rohrleitung gelangen und sich ausbreiten. Normalerweise wird diese Art von Verunreinigungen im Rahmen der verpflichtenden nachträglichen Leitungsspülung wieder aus dem System entfernt.

Abschließend sei noch auf die Konsequenz Imageverlust des WVU im Schadensfall erwähnt. Aufsehen erregende Schadensfälle führen stets zu großem Medieninteresse und stehen somit auch im politischem Diskussionsfeld.

Zur Berechnung des Risikos gilt als Voraussetzung, dass das Schadensausmaß normiert wird, um dieses mit der Schadensartenauftrittswahrscheinlichkeit multiplizieren zu können. Die Bewertung von Konsequenzen kann in Form von monetären Betrachtungen, qualitativen Einschätzungen oder Bewertungsfunktionen vorliegen.

Bewertungsfunktionen werden auf Basis von hydraulischer oder qualitativer Simulationen berechnet und definiert (Fuchs-Hanusch et al., 2011a). Die Erfassung der Änderung der hydraulischen System-Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Einwirkungen ist das Ziel der Entwicklung von Bewertungsfunktionen. Dadurch kann das Potenzial von Schäden und der damit verbundenen Vulnerabilität messbar gemacht und in der Risikobetrachtung verwendet werden.

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit aber in der Berechnung der Schadenswahrscheinlichkeit mittels statistischen und physikalischen Methoden lag, wird auf die Ermittlung des detaillierten Schadensausmaßes zur Risikoberechnung nicht weiter eingegangen.

## 11 Literaturverzeichnis

- Ana, E., Bauwens, W., Pessemier, M., Thoeye, S., Smolders, S., Boonen, I. & De Guedre, G. (2009) An investigation of factors influencing sewer structural degradation, *Urban Water Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 303-312.
- Ariaratnam, S.T. (1984) The investigation of methods to assist decision-makers regarding bridge maintenance, repair or restoration activities, Ph.D. dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois.
- Ariaratnam, S.T., El-Assaly, A. & Yang, Y. (2001) Assessment of Infrastructure Inspection Needs Using Logistic Regression Models, *Journal of Infrastructure Systems*, no. 12, pp. 160-165.
- ATV DVWK A 127 (2000) Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen, Arbeitsblatt A127, Deutscher Verein für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, August 2000.
- Baur, R., Zielichowski-Haber, W. & Kropp, I. (2004) Statistical analysis of inspection data for the asset management of sewer networks, In: Proceedings 19th EJSW on Process Data and Integrated Urban Water Modeling, Lyon, Frankreich.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. (2010) Multivariate Analysemethoden – eine anwendungsorientierte Einführung, Springer-Verlag Heidelberg, ISBN 978-3-642-16490-3.
- BGBL 14 (2011) Wasserrechtsgesetz 1959, <[www.ris.bka.gv.at](http://www.ris.bka.gv.at)>, Stand: 12.09.2012.
- BGBL 121 (2007) Trinkwasserverordnung; <[www.ris.bka.gv.at](http://www.ris.bka.gv.at)>, Stand: 12.09.2012.
- Britton, R.J. (1982) Sewer deterioration studies, collapse investigations, preliminary report, WRc External Report No. 85E.
- Brosius, F. (1998) SPSS 8: Professionelle Statistik unter Windows, 13. Auflage, ISBN: 3826604377.
- Butt, A.A., Feighan, K.J., Shahin, M.J. & Carpenter, S. (1987) Pavement performance prediction model using the Markov-Process, Transportation Research, Record 1123, Washington, DC: Transportation Research Board.
- Carstensen, J., Vanrolleghem, P., Rauch, W. & Reichert, P. (1997) Terminology and methodology in modelling for water quality management – A discussion starter, *Water Science and Technology*, vol. 36, no. 5, pp. 157-168.
- Cooper, N.R., Blakey, G., Sherwin, C., Ta, T., Whiter, J.T. & Woodward, C.A. (2000) The use of GIS to develop a probability-based trunk mains burst risk model, *Urban Water*, vol. 2, pp. 97-103.
- Davies, J.P., Clarke, B.A., Whiter, J.T., Cunningham, R.J. & Leidi, A. (2001) The structural condition of rigid sewer pipes: a statistical investigation, *Urban Water*, vol. 3, pp. 277-286.
- DIN 50905-1 (1987) Korrosion der Metalle – Korrosionsuntersuchungen – Teil 1: Grundsätze.
- DIN 4046 (1983) Wasserversorgung, Begriffe, Technische Regel des DVGW.

- Dirksen, J., Goldina, A., ten Veldhuis, J.A.E. & Clemens, F.H.L.R. (2007) The role of uncertainty in urban drainage decisions: Uncertainty in inspection data and their impact on rehabilitation decisions. In: Proceedings IWA 2nd Leading-Edge Conference in Asset Management, Lissabon, Portugal.
- Doleac, M.L. (1979) Time-to failure analysis of cast iron water mains, Report submitted to the City of Vancouver by CH2 M Hill, BC, Canada.
- Doleac, M.L., Lackey, S.L. & Bratton, G.N. (1980) Prediction of time to failure for buried cast iron pipe, Proceedings of American water works association annual conference, pp. 21-28, Denver, CO.
- DVGW GW 9 (1986) Technische Regel – Arbeitsblatt, Beurteilung von Böden hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens auf erdverlegte Rohrleitungen und Behälter aus unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen; Stand März 1986.
- DVGW W 380 (1993) Technische Mitteilung, Merkblatt - Bewerten von Baumaßnahmen im Bereich von Wasserversorgungsanlagen – Einflüsse und Schutzmaßnahmen, Stand (05/93).
- DVGW W 397 (2004) Technische Mitteilung - Hinweis, Ermittlung der erforderlichen Verlegetiefen von Wasseranschlussleitungen, Stand August 2004.
- DVGW W 400-3 (2006) Technische Regel – Arbeitsblatt, Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb und Instandhaltung, Stand September 2006.
- DVGW W 402 (2009) Technische Regel – Arbeitsblatt, Netz- und Schadensstatistik – Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen.
- DVGW W 392-2 (2011) Arbeitsblatt, Inspektion, Wartung und Betriebsüberwachung von Wasserverteilungsanlagen - Teil 2: Fernwasserversorgungssysteme; Maßnahmen, Verfahren und Bewertungen, Stand März 2011.
- EN 752 (2008) Drain and Sewer Systems outside buildings, European Committee for Standardization.
- Friedl, F. (2007) Einfluss der Verkehrslast auf die Schadenshäufigkeit von Trinkwassernetzen, Diplomarbeit, Technische Universität Graz.
- Friedl, F. & Fuchs-Hanusch, D. (2011) Risk Assessment of Transmission Water Mains to Support Efficient Rehabilitation Decisions, First IWA Danube - Black Sea Regional Young Water Professional Conference, Bukarest, Romania, 14.-15. June 2011, pp. 270-279.
- Friedl, F. & Fuchs-Hanusch, D. (2012) Prognose maßgeblicher Versagensarten als Grundlage der Risikobewertung übergeordneter Trinkwassernetze. *Oesterreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, vol. 64, no. 9/10, (DOI) 10.1007/s00506-012-0018-6, Springer-Verlag.
- Friedl, F., Möderl, M., Rauch, W., Liu, Q., Schrotter, S. & Fuchs-Hanusch, D. (2012) Failure Propagation for Large-Diameter Transmission Water Mains Using

- Dynamic Failure Risk Index, EWRI 2012. Albuquerque, USA: ASCE - American Society of Civil Engineering.
- Fuchs-Hanusch, D., Friedl, F. & Möderl, M. (2011a) Zwischenbericht zum Projekt - Risikobasierte Zustandserfassung von Zubringer- und Hauptleitungen - ZuHaZu, Magistratsabteilung 31 – Wiener Wasserwerke.
- Fuchs-Hanusch, D., Friedl, F. & Kainz, H. (2011b) Endbericht zum Projekt - Vertiefende risikoorientierte Prioritätenbewertung von Rohrabschnitten des Zubringerleitungsnetzes zur Unterstützung der Planung von Erneuerungen für den Wasserleitungsverband Nördliches Burgenland.
- Fuchs-Hanusch, D., Friedl, F. & Kogseder, B. (2011c) Effect of Seasonal Climatic Variance on Water Main Failures in Moderate Climate Regions, Conference Proceedings of LESAM 11, Leading Edge in Strategic Asset Management 27.-29. Sep. 2011, Germany.
- Fuchs-Hanusch, D., Kornberger, B., Friedl, F. & Scheucher, R. (2011d) Whole of Life Cost Calculations for Water Supply Pipes, Lesam 2011, Mülheim, IWA, 4, S7, 1-11.
- Fuchs-Hanusch, D., Friedl, F., Möderl, M., Sprung, W., Plihal, H., Kretschmer, F. & Ertl, T. (2012) Risk and Performace Oriented Sewer Inspection Planning, EWRI 2012, Albuquerque, USA, ASCE - American Society of Civil Engineering.
- Gmoser, C. (2012) Ein Beitrag zur Verbesserung der Schadensdokumentation von Trinkwasserleitungen und eine Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Schadensart und Material, Nennweite oder Alter der Rohrleitung, Masterprojekt, Technische Universität Graz.
- Günther, M. (2012) Methodik der Datenaufbereitung von Trinkwasserleitungen als Grundlage der statistischen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeitsberechnung, Masterprojekt, Technische Universität Graz.
- Gujer, W. (2008) System Analysis for Water Technology, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, ISBN 978-3-540-77277-4.
- Harwod, D.W., St. John, A.D. & Bauer, K.M. (1982) Application of statistical techniques to gas operations, Chicago, IL: Gas Research Institution.
- Hedderich, J. & Sachs, L. (2012) Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R, 14. Auflage, Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-24400-1.
- Hoffman, F., Gao, X.Z., Olhofer, M. & Satyadas, A. (2005) Editorial. *Journal of Applied Soft Computing*, vol. 5, pp. 221-264.
- IBM SPSS Statistics (2010) SPSS Version 19.
- Jo, Y.D. & Ahn, B. J. (2005) A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas, *Journal of Hazardous Materials*, vol. A123, pp. 1–12.
- Kainz, H., Friedl, F., Fuchs-Hanusch, D., Schweiger, H. & Tschuchnigg, F. (2011) Endbericht Projekt Vertiefende Untersuchungen zur Abschätzung der Beeinflussung der

- Trinkwasserzubringerleitung im Bereich Lagergasse/Puchstraße im Zuge der Baumaßnahme - Sanierung der Altlast ST 23 Alpentee, Holding Graz.
- Kern, J. (1954) Die praktische Arbeit im Wasserleitungs-Rohrnetz, Magistratsabteilung 31, Wiener Wasserwerke, Verlag für Jugend und Volk, Wien.
- Kleiner, Y. & Rajani, B.B. (2000) Forecasting Variations and Trends in Water Main Breaks, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE.
- Kleiner, Y. & Rajani, B.B. (2001) Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistically based models, *Urban Water*, vol. 3, no. 3, pp. 131-150.
- Kleiner, Y. & Rajani, B.B. (2012) Comparison of four models to rank failure likelihood of individual pipes, *Journal of Hydroinformatics*, vol. 14, no. 3, pp. 659-681.
- Kleiner, Y. (2001) Scheduling inspection and renewal of large infrastructure assets, *Journal of Infrastructure Systems*, vol.7, no. 4, pp. 136-143.
- Kleiner, Y., Rajani, B.B. & Sadiq, R. (2005) Risk Management of Large-Diameter Water Transmission Mains; AWWA Research Foundation, ISBN 1-58321-400-3.
- Kleiner, Y., Sadiq, R. & Rajani, B.B. (2006) Modelling the deterioration of buried infrastructure as a fuzzy Markov process, *Journal of Water Supply Research and Technology: Aqua*, vol. 55, no. 2, pp. 67-80.
- Kleiner, Y. & Rajani, B. (2007) Static and dynamic effects in prioritizing individual water mains for renewal, *CCWI2007 SUWM2007 Conference*. Leicester, UK.: Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, Ontario, K1A 0R6, Canada.
- König, A. (2005) CARE-S WP2 External Corrosion model description, SINTEF-Report, Trondheim, Norwegen, SIN-TEF Technology and Society.
- Kohn, W. (2005) Statistik, Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung, Springer-Verlag, ISBN 3-540-21677-4.
- KPC (2010) Kommunalkredit Public Consulting GmbH, Datenbank Stand 2010.
- Le Gat, Y. (2008) Modelling the deterioration process of drainage pipelines, *Urban Water*, vol. 5, no. 2, pp. 97-106.
- Lester, J. & Farrar, D.M. (1979) An examination of the defects observed in 6 km of sewers, TRRL Supplementary Report 531.
- Lille, K., Reed, C. & Rodgers, M. (2004) Workshop on Condition Assessment Inspection Devices for Water Transmission Mains, AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- Liu, Z., Kleiner, Y., Rajani, B., Wang, L. & Condit, W. (2012) Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems. In: LABORATORY, N. R. M. R., DEVELOPMENT, O. O. R. A., AGENCY, U. S. E. P. & CINCINNATI, O. (eds.). U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Liu, Q. (2012) Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik für Bauingenieure, Vorlesungsskriptum 221.480, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Graz.

- Makar, J.M. (2000) A preliminary analysis of failures in grey cast iron water pipes, *Engineering Failure analysis*, vol. 7, pp. 43-53.
- Makar, J.M., Desnoyers, R. & McDonald, S.E. (2001) Failure Modes and mechanisms in grey cast iron pipe, in *Underground Infrastructure Research: Municipal, Industrial and Environmental Applications*. Edited by M. Knight and N. Thomson, Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema.
- Makar, J.M., Rogge, R. & McDonald, S.E. (2002) Circumferential failures in grey cast iron pipes, *AWWA Infrastructure Conference*, Chicago, 13.10.2002, pp. 1-18.
- Makar, J.M. & McDonald, S.E. (2007) Mechanical behaviour of spun-cast grey iron pipe, *Journal of Materials in Civil engineering*, vol. 19, no. 10, pp. 826-833.
- Mashford, J., De Silva, D., Marney, D. & Burn, S. (2009) An approach to leak detection in pipe networks using analysis of monitored pressure values by support vector machine. In: *3rd International Conference on Network and System Security*, Gold Coast, Australia.
- Mehle, J.J., O'Keefe, S.M. & Wrase, P.E. (2001) An examination of methods for condition rating of sewer pipelines. Center for Development of Technical Leadership, University of Minnesota.
- Merill, M.S., Lukas, A., Palmer, R.N. & Hahn, M.A. (2004) Development of a tool to prioritize sewer inspections, Virginia, USA, Water Environmental Research Foundation.
- Möderl, M., Kleidorfer, M., Sitzenfrei, R. & Rauch, W. (2009) Identifying weak points of urban drainage systems by means of VulNetUD, *Water Science and Technology*, vol. 60, no. 10, pp. 2507-2513.
- Möderl, M.; Sitzenfrei, R.; Hellbach, C.; Lammel, J. und Rauch, W. (2011): The role of exposure in risk analysis for critical water infrastructure. In: *World Environmental & Water Resources Congress*, Palm Springs, California, 22.-26.May.
- ÖNORM EN 805 (2000) Wasserversorgung – Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden, <www.oenorm.at> Stand: 12.09.2012.
- ÖNORM B 2538 (2002) Transport-, Versorgungs- und Anschlussleitungen von Wasserversorgungsanlagen - Ergänzende Bestimmungen zu ÖNORM EN 805, <www.oenorm.at>.
- ÖNORM B 2533 (2004) Koordination unterirdischer Einbauten – Planungsrichtlinie, <www.oenorm.at> Stand: 12.09.2012.
- ÖNORM B 2539 (2005) Technische Überwachung von Trinkwasserversorgungs-Anlagen – <www.oenorm.at>, Regelwerk der ÖVGW (W 59).
- ÖNORM B 5012 (2005) Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen, Österreichisches Normungsinstitut, <www.oenorm.at>, Oktober 2005.
- ÖVGW G 58 (2000) Gasrohrleitungen aus Stahl - Schadensbilder, Beurteilung und Behandlung von Schadensbildern an Gasrohrleitungen aus Stahl für Betriebsdrücke > 16 bar, ÖVGW, Wien, Stand Februar 2000.

- ÖVGW RICHTLINIE W 100 (2007) Wasserverteileitungen, *Betrieb und Instandhaltung*, Wien, ÖVGW - Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.
- ÖVGW Richtlinie W 85 (2008) Betriebs- und Wartungshandbuch für Trinkwasserversorgungsunternehmen – Grundsätze für die Erstellung und Führung von Betriebs- und Wartungshandbüchern in Trinkwasserversorgungs-Unternehmen, Wien, ÖVGW - Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.
- ÖVGW BENCHMARKING STUFE C (2008) Unternehmensbenchmarking (Stufe C) Datenbasis 2007, Wien, ÖVGW - Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.
- ÖVGW W 63 (2009) Wasserverluste in Trinkwasserversorgungssystemen - Ermittlung, Bewertung und Maßnahmen zur Verminderung, Wien, ÖVGW - Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.
- ÖVGW DW 1 (2009) Daten – Wasser Statistik DW 1, Wien, ÖVGW - Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.
- ÖVGW Mitteilung W 105 (2011) Schadensstatistik – Erfassung und Verarbeitung von Schadensereignissen, Wien, ÖVGW - Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.
- Park, S., Vega, R., Choto, Z. & Grewe, M. (2010) Risk-Based Asset Prioritization of Water Transmission/Distribution Pipes for the City of Tampa, *Florida Water Resources Journal*, pp. 22-28.
- Park, S. & Longanathan, G. V. (2002). Optimal pipe replacement analysis with a new pipe prediction model. *Journal of Korean Society - Water and Wastewater*, vol. 16, no. 6, pp. 710-716.
- Pate-Cornell, M.E. (1996) Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 54, pp. 95-111.
- Randall-Smith, M., Russel, A. & Oliphant, R. (1992) Guidance manual for the structural condition assessment of trunk mains, Swindon, UK, Water Research Centre.
- Rajani, B.B. & McDonald, S.E. (1995) Water mains break data on different pipe materials for 1992 and 1993, Report No. A-7019.1, National Research Council, Ottawa, ON.
- Rajani, B.B. & Zhan, C. (1996) On the estimation of frost load, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 34, no. 4, pp. 629-641.
- Rajani, B.B., Zhan, C. & Kuraoka, S. (1996) Pipe-soil interaction analysis for jointed water mains, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, no. 3, pp. 393-404.
- Rajani, B.B., Makar, J., McDonald, S.E., Zhan, C., Kuraoka, S., Jen, CK. & Viens, M. (2000) Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life, American Water Works Association Research Foundation, Denver, Colo.
- Rajani, B.B. & Makar, J.M. (2000) A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 27, pp. 1259-1279.
- Rajani, B.B. & Kleiner, Y. (2001) Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models, *Urban Water*, vol. 3, no. 3, pp. 151-164.

- Rajani, B.B. & Tesfamariam, S. (2004) Uncoupled axial, flexural and circumferential pipe-soil interaction analyses of partially supported jointed water mains, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 41, pp. 997-1010.
- Rajani, B.B. & Kleiner, Y. (2004) Non-destructive inspection techniques to determine structural distress indicators in water mains, Evaluation and Control of Water Loss in Urban Water Networks, Valencia, Spanien, 21.-24. Juni 2004, pp. 1-20.
- Rajani, B.B., Kleiner, Y. & Sadiq, R. (2006) Translation of Pipe Inspection Results into Condition Ratings Using the Fuzzy Synthetic Evaluation Technique, *Journal of Water Supply Research and Technology*, vol. 55, pp. 11-24.
- Reid, F. (2000) unpublished data collected for the research project „main breaks prediction, prevention and control“ under the auspices of the American Water Works Association Research Foundation, Denver.
- Richter, H.W. (2010) Instandhaltung von Wasserrohrnetzen. Leitfaden für den kostenreduzierenden und qualitätssichernden Umgang mit Wasserversorgungsnetzen, 1. Auflage, Vulkan-Verlag.
- Roscher, H., Sorge, H.-C., Berger, W. & Mälzer, D. (2004) Sanierung und Erneuerung von Ver- und Entsorgungsnetzen. 4. Auflage. Weimar, Bauhaus-Univ., Unterrichtsmaterialien für Wasser und Umwelt, Siedlungswasserwirtschaft.
- Rossum, J.R. (1969) Prediction of pitting rates in ferrous metals from soil parameters, *Journal of the American Water Works Association*, vol. 61, pp. 305–310.
- Ruwanpura, J., Ariaratnam, S. & El-Assaly, A. (2004) Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation, *Journal of Civil Engineering and Environmental Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 169-185.
- Sadiq, R., Rajani, B.B. & Kleiner, Y. (2004) Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 86, no. 1, pp. 1-10.
- Spangler, M.G. (1941) The structural design of flexible pipe culverts, Iowa Engineering Experimental Station, Bulletin No. 53, Ames, Iowa.
- Sorge, H.C. (2007) Technische Zustandsbewertung metallischer Wasserversorgungsleitungen als Beitrag zur Rehabilitationsplanung. Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2007.
- Sorge, H.C. (2011) Development and implementation of a high resolution risk-based approach, LESAM 2011, Mülheim an der Ruhr, 28th September 2011.
- SN 640 312 a (1992) Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke, Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute.
- SVGW G 1001 d (2004) Regelwerk, Empfehlungen für die Sicherheitsbeurteilung von Erdgasleitungen mit Betriebsdruck bis 5 bar, Stand Juli 2004.
- SVGW W 4 (2012) Richtlinien für Planung, Projektierung sowie Bau, Betrieb und Unterhalt von Trinkwasserversorgungssystemen außerhalb von Gebäuden (Status: in Druck).

- Tran, D.H., Ng, A.W.M., Perera, B.J.C. & Davis, P. (2006) Application of probabilistic neural networks in modeling structural deterioration of stormwater pipes, *Urban Water Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 175-184.
- Tran, D.H. (2007) Investigations of deterioration models for stormwater pipelines. Doctoral Dissertation, School of Architectural, Civil and Mechanical Engineering and Science, Victoria University.
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A. & Schiller, A. (2003) A framework for vulnerability analysis in sustainability science. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 100, no. 14, pp. 8074-8079.
- Van Zyl, J.E. & Clayton, C.R.I. (2005) The effect of pressure on leakage in water distribution systems. In: 8th Int. Conf. on Computing and Control for the Water Industry, Exeter, UK.
- Water Services Association of Australia (2003) Common failure modes in pressurised pipeline systems.
- Watkins, R.K. & Spangler, M.G. (1958) Some characteristics of the modulus of passive resistance of soil – a study in similitude, *Highway Research Board Proceedings*, vol. 37, pp. 576-583.
- WHO (2009) Water safety plan manual (WSP manual) - Step-by-step risk management for drinking-water suppliers - How to develop and implement a Water Safety Plan - A step-by-step approach using 11 learning modules; WHO (World Health Organization); International Water Association; Number of pages: 108; ISBN 978 92 4 156263 8.
- Zhan, C., & Rajani, B.B (1997) On the estimation of frost load in a trench: theory and experiment, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 34, no. 4, pp. 568-579.

## 12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der abgerechneten Investitionskosten im Zeitraum 2001 bis 2010 und Abschätzung der Investitionskosten im Zeitraum 2011 bis 2015 in (€ Mio.) für Wasserleitungen in Österreich (KPC, 2010) .....	2
Abbildung 2: Lebenszykluskostenbetrachtung VL (links) und HZL (rechts) (nach Liu et al., 2012) .....	4
Abbildung 3: Verteilungsentwicklung der Trinkwasserleitungslängen je Leitungsart in Österreich von 2006 bis 2009 (ÖVGW DW 1, 2009).....	8
Abbildung 4: Verteilung Länge HZL und VL in Abhängigkeit der Urbanität (ÖVGW Benchmarking Stufe C, 2008) .....	9
Abbildung 5: Leitungsanteil in Prozent und mittleres Alter in Jahren in Österreich je Materialgruppe für HZL und VL gemeinsam betrachtet (ÖVGW Benchmarking Stufe C, 2008) .....	11
Abbildung 6: SR und RR für HZL und VL in Österreich (ÖVGW Benchmarking Stufe C, 2008) .....	13
Abbildung 7: Aufgaben bzw. Bereiche der Instandhaltung von Trinkwasserleitungen (ÖVGW W 100, 2007) .....	14
Abbildung 8: Komponenten in der Betrachtung einer Schadensentstehung.....	26
Abbildung 9: Zustands-Entwicklungsstufen am Beispiel der Schadensart „Korrosionsloch“ ..	32
Abbildung 10: Rundriss auf Rohrmaterial GG (Makar, 2000).....	37
Abbildung 11: Längsriss auf Rohrmaterialart GG (Makar, 2000) .....	39
Abbildung 12: Riss an der Verbindung (Glockenmuffe) von einem Punkt ausgehend auf Rohrmaterial GG (Makar, 2000).....	40
Abbildung 13: Scherbenbruch von a) Punktkorrosion oder b) Längskorrosion ausgehend auf Rohrmaterial GG(Makar, 2000).....	41
Abbildung 14: Entwickelte Methodik zur Berechnung der einzelleitungsbezogenen Schadensarten-Auftrittswahrscheinlichkeit von HZL .....	48
Abbildung 15: Wahrscheinlichkeitsdichte bei unterschiedlicher Stichprobenmenge n (= df) (Liu, 2012) .....	55
Abbildung 16: Randomisierungs-Prozedur zur Bildung von Einzelstichproben .....	56
Abbildung 17: Ablaufschritte der logistischen Regressionsanalyse (Backhaus et al., 2010) ..	62
Abbildung 18: Grundlegende Zusammenhänge zwischen den Betrachtungsgrößen der logistischen Regressionsanalyse .....	63
Abbildung 19: Verlauf der logistischen Funktion in Abhängigkeit von $\beta_0$ und $\beta_j$ .....	64
Abbildung 20: 6 Teilschritte der Durchführung der Diskriminanzanalyse (Backhaus et al., 2010) .....	71
Abbildung 21: Konstruktion einer Diskriminanzachse am Beispiel zweier Einflussfaktoren...	74

Abbildung 22: Diskriminanzachse mit Centroiden der Gruppen und kritischem Diskriminanzwert (Trennkriterium) .....	74
Abbildung 23: berücksichtigte Einflussfaktoren in Abhängigkeit der physikalischen Modelle	84
Abbildung 24: HZL-Verlegelängen pro Jahr – WVU B .....	91
Abbildung 25: Anzahl HZL-Schäden und Schadensrate pro 100 km und Jahr – WVU B .....	92
Abbildung 26: Anzahl der HZL-Schäden und Anzahl der betroffenen Leitungen je Schadensart – WVU B .....	93
Abbildung 27: Verteilung der Längen und Schäden bezogen auf die Nennweite .....	94
Abbildung 28: Histogramm Leitungslängen WVU B.....	94
Abbildung 29:Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Schaden allgemein“ – WVU A .....	98
Abbildung 30: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU A .....	99
Abbildung 31: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ – WVU A.....	100
Abbildung 32: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Schaden allgemein“ – WVU B .....	101
Abbildung 33: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Verbindung undicht“ – WVU B.....	102
Abbildung 34: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Korrosionsloch“ – WVU B .....	102
Abbildung 35: Übersicht der Mehrfachauswahl im Rahmen der Randomisierung für die Schadensart „Rundriss/Längsriss/Scherbenbruch“ – WVU B.....	103
Abbildung 36: Boxplot Pseudo-R <sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an 30 Einzelstichprobenmengen .....	108
Abbildung 37: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren (= Merkmalsvariablen)	108
Abbildung 38: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten .....	110
Abbildung 39: Trefferquote und Quote falscher Alarme .....	111
Abbildung 40: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet.....	112
Abbildung 41: Boxplot Pseudo-R <sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge .....	113
Abbildung 42: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren.....	114
Abbildung 43: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten .....	115
Abbildung 44: Trefferquote und Quote falscher Alarme .....	116

Abbildung 45: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet.....	117
Abbildung 46: Boxplot Pseudo-R <sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge .....	118
Abbildung 47: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren.....	119
Abbildung 48: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten .....	120
Abbildung 49: Trefferquote und Quote falscher Alarme .....	121
Abbildung 50: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet.....	122
Abbildung 51: Boxplot Pseudo-R <sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge .....	123
Abbildung 52: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren.....	124
Abbildung 53: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten .....	125
Abbildung 54: Trefferquote und Quote falscher Alarme .....	126
Abbildung 55: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet.....	127
Abbildung 56: Boxplot Pseudo-R <sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge .....	128
Abbildung 57: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren.....	129
Abbildung 58: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten .....	130
Abbildung 59: Trefferquote und Quote falscher Alarme .....	131
Abbildung 60: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet.....	132
Abbildung 61: Boxplot Pseudo-R <sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge .....	133
Abbildung 62: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren.....	134
Abbildung 63: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten .....	135
Abbildung 64: Trefferquote und Quote falscher Alarme .....	136
Abbildung 65: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet.....	137
Abbildung 66: Boxplot Pseudo-R <sup>2</sup> Statistiken und Beurteilung der Klassifikationsergebnisse an Stichprobenmenge .....	138
Abbildung 67: Boxplot Signifikanzüberprüfung der Einflussfaktoren.....	139

Abbildung 68: Boxplot Odds Ratios der Einflussfaktoren zur Interpretation der Regressionskoeffizienten .....	140
Abbildung 69: Trefferquote und Quote falscher Alarme .....	141
Abbildung 70: einzelleitungsbezogener Vergleich für Zustand berechnet = Zustand beobachtet.....	142
Abbildung 71: Variable Datenmengen - Trefferquote und Quote falscher Alarme bezüglich der Schadensart „Korrosionsloch“ - WVU A.....	143
Abbildung 72: variable Datenmenge - Trefferquote und Quote falscher Alarme bezüglich der Schadensart „Schaden allgemein“ WVU B .....	144
Abbildung 73: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit .....	145
Abbildung 74: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums .....	146
Abbildung 75: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten .....	147
Abbildung 76: Boxplot Korrelationskoeffizienten .....	147
Abbildung 77: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme.....	148
Abbildung 78: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle .....	149
Abbildung 79: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit .....	151
Abbildung 80: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums .....	152
Abbildung 81: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten .....	153
Abbildung 82: Boxplot Korrelationskoeffizienten .....	153
Abbildung 83: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme.....	154
Abbildung 84: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle .....	155
Abbildung 85: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit .....	157
Abbildung 86: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums .....	158
Abbildung 87: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten .....	159
Abbildung 88: Boxplot Korrelationskoeffizienten .....	159
Abbildung 89: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme.....	160
Abbildung 90: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle .....	161
Abbildung 91: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit .....	162
Abbildung 92: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums .....	163
Abbildung 93: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten .....	164

Abbildung 94: Boxplot Korrelationskoeffizienten .....	165
Abbildung 95: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme.....	166
Abbildung 96: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle .....	167
Abbildung 97: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit .....	168
Abbildung 98: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums .....	169
Abbildung 99: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten.....	170
Abbildung 100: Boxplot Korrelationskoeffizienten .....	170
Abbildung 101: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme.....	172
Abbildung 102: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle .....	173
Abbildung 103: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit.....	174
Abbildung 104: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums .....	175
Abbildung 105: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten....	176
Abbildung 106: Boxplot Korrelationskoeffizienten .....	176
Abbildung 107: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme.....	178
Abbildung 108: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle .....	179
Abbildung 109: Boxplot Gruppencentroide für Leitungen mit/ohne Schadensartenzugehörigkeit.....	180
Abbildung 110: Boxplot Gütemaße des Diskriminanzkriteriums .....	181
Abbildung 111: Boxplot Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten....	182
Abbildung 112: Boxplot Korrelationskoeffizienten .....	182
Abbildung 113: Klassifizierungstabelle mit Trefferquote und Quote falscher Alarme.....	184
Abbildung 114: Einzelleitungsbezogene Betrachtung der Zustandsermittlung für 12 Einzelmodelle .....	185
Abbildung 115: Vergleich dreier Korrosionsmodelle und die Kombination von Sadiq et al. (2004) mit diesen drei Korrosionsmodellen.....	187
Abbildung 116: Vergleich der Klassifikationsergebnisse der BLRA und DA am Datensatz WVU A und B .....	188
Abbildung 117: Risikomatrix mit Darstellung der Prioritäten .....	203
Abbildung 118: Schadenerhebungsblatt in Anlehnung an ÖVGW W 105, 2011 (Gmoser, 2012) (Seite 1 von 2).....	223
Abbildung 119: Schadenerhebungsblatt in Anlehnung an ÖVGW W 105 (2011) (Fuchs-Hanusch et al. 2011a; Gmoser, 2012) (Seite 2 von 2).....	224

## 13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inferentielle Einflussfaktoren der Leitungs-Zustandsverschlechterung .....	27
Tabelle 2: Verwertbarkeit der Information Schadensart am Beispiel 5 österreichischer Schadensstatistiken (Fuchs-Hanusch et al., 2011a; Gmoser, 2012) .....	29
Tabelle 3: Schadensarten in Abhängigkeit der Rohrmaterialart.....	33
Tabelle 4: Einflussfaktoren auf das Korrosionsverhalten von metallischen Rohrleitungen (Kleiner et al., 2005; DVGW GW 9, 1986; Sorge, 2007).....	35
Tabelle 5: Zusammenfassung von Inspektionstechnologien für HZL in Abhängigkeit der Rohrmaterialart (Liu et al., 2012).....	45
Tabelle 6: Skalenniveaus und ihre Gruppierung, Merkmale bzw. mögliche rechnerische Handhabung (Backhaus et al., 2010).....	51
Tabelle 7: Kombinationsmöglichkeiten der Korrelationsberechnung zweier Einflussfaktoren in Abhängigkeit der vorliegenden Skalenniveaus .....	54
Tabelle 8: Interpretation der betragsmäßigen Werte der Korrelationskoeffizienten (KK) (Kohn, 2005) .....	54
Tabelle 9: Berücksichtigte Einflussfaktoren bei der Berechnung von spezifischen Korrosionsmodellen.....	57
Tabelle 10: Schadensarten mit spezifischem physikalischen Modell berechenbar.....	84
Tabelle 11: Abhängige Zustandsvariable und beeinflussende unabhängige Merkmalsvariablen (= Einflussfaktoren) für das WVU A (inkl. Abkürzungen) .....	90
Tabelle 12: Abhängige Zustandsvariable und beeinflussende unabhängige Merkmalsvariablen für das WVU B .....	96
Tabelle 13: Zusammenfassung der Randomisierungsergebnisse - WVU A .....	100
Tabelle 14: Zusammenfassung der Randomisierungsergebnisse - WVU B .....	104
Tabelle 15: Umwandlung vom Einflussfaktor Bodenaggressivität in spezifische Zahlen (= Ersatzinformationen) zur Berechnung von physikalischen Modellen.....	105

## 14 Formelverzeichnis

Formel 1: Auftrittswahrscheinlichkeit P - BLRA.....	61
Formel 2: Wahrscheinlichkeitsfunktion - BLRA .....	61
Formel 3: Eintrittswahrscheinlichkeit $\pi$ - BLRA.....	62
Formel 4: Chancenverhältnis (Odds) .....	62
Formel 5: Cox und Snell-R <sup>2</sup> .....	66
Formel 6: Nagelkerke-R <sup>2</sup> .....	66
Formel 7: Trefferquote.....	67
Formel 8: Quote falscher Alarme .....	67
Formel 9: Residuenberechnung.....	68
Formel 10:standardisierte Residuen .....	68
Formel 11: Wald-Statistik .....	69
Formel 12: Diskriminanzfunktion .....	72
Formel 13: Diskriminanzwert-Berechnung (Centroid) .....	72
Formel 14: Diskriminanzwert-Gruppendifferenz.....	73
Formel 15: Diskriminanzfunktion für 2 Merkmalsvariable.....	73
Formel 16: Steigung der Diskriminanzachse.....	73
Formel 17:Klassifizierung mittels Diskriminanzwert Y* .....	74
Formel 18: Diskriminanzkriterium.....	75
Formel 19: Diskriminanzkriterium.....	75
Formel 20: Eigenwert (Diskriminanzanalyse).....	76
Formel 21: kanonischer Korrelationskoeffizient (Diskriminanzanalyse) .....	77
Formel 22: Wilks' Lambda (Diskriminanzanalyse) .....	77
Formel 23: A-posteriori-Wahrscheinlichkeit (Diskriminanzanalyse) .....	79
Formel 24: A-priori-Wahrscheinlichkeit (Diskriminanzanalyse) .....	79
Formel 25: Korrosionsmodell nach Sorge (2007) bzw. DIN 50905 (1987).....	81
Formel 26: Korrosionsmodell nach König (2005) .....	82
Formel 27: Korrosionsmodell nach Rajani et al. (2000) .....	82
Formel 28: Korrosionsmodell nach Rossum (1969) .....	83
Formel 29: definierter Sicherheitsfaktor (FOS = Factor of Safety) (Modell Sadiq et al., 2004) .....	86
Formel 30: zulässige materialspezifische Spannung unter Einbeziehung der Schwächung durch Korrosion (N/mm <sup>2</sup> ).....	86
Formel 31: vorhandene Längsspannung (N/mm <sup>2</sup> ) am Rohr.....	86

Formel 32: vorhandene Ringspannung (N/mm<sup>2</sup>) am Rohr .....86

# 15 Anhang

<b>Schadenerhebungsblatt</b> In Anlehnung an ÖVGW W 105 - 2010					
<b>Reparatur-Verantwortlicher vor Ort:</b>				<b>Schadensnr.:</b>	
<b>Datum der Schadensaufnahme:</b>		<b>Schadensort:</b>			
<p><b>Lageskizze</b></p> <p>Folgende Angaben sind empfehlenswert (alle Angaben beziehen sich auf den Zustand zum Zeitpunkt des Schadenseintritts):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Leitungen im betroffenen Bereich mit Angabe von Dimension, Material, Überdeckung</li> <li>• Angabe von Fremdleitungen im Grabungsbereich</li> <li>• Einmessung der Schadensstelle bzw. der erneuerten Bauteile (Spernmaße)</li> <li>• Vorhandene Festpunkte im Nahbereich: Gebäudeecken, Grenzsteine, Vermessungspunkte</li> <li>• Angabe von Straßennamen und Hausnummern</li> <li>• Angaben zu den neuen Bauteilen</li> </ul>					
					
<p><b>Schadensortung</b></p> <input type="checkbox"/> sichtbarer Wasseraustritt <input type="checkbox"/> Gasprüfverfahren <input type="checkbox"/> akustisches Verfahren <input type="checkbox"/>					
<p><b>Rohrstrangsperrung</b></p> außer Betrieb: am                      um                      Uhr			<p><b>Rohrstrangfrelgabe</b></p> wieder In Betrieb: am                      um                      Uhr		
<p><b>Leitungsart</b></p> <input type="checkbox"/> Zubringerleitung <input type="checkbox"/> Versorgungsleitung <input type="checkbox"/> Hauptleitung <input type="checkbox"/> Anschlussleitung			<p><b>Reparaturart</b></p> <input type="checkbox"/> Reparaturschelle <input type="checkbox"/> Stemmuffenreparaturschelle <input type="checkbox"/> Formstück erneuern <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Teilemuerung <input type="checkbox"/> Stemmuffe neu verschlagen <input type="checkbox"/> Armatur erneuern		
<b>Erd- u. Baumeisterarbeiten</b>			<b>Installationsarbeiten</b>		
<p><b>Durchmesser</b></p> Innen-Ø:                      mm Außen-Ø:                     mm		<b>Druckstufe</b>	<b>Verlegejahr</b>	<p><b>Material</b></p> <input type="checkbox"/> AZ <input type="checkbox"/> PE-... <input type="checkbox"/> GGG <input type="checkbox"/> GFK <input type="checkbox"/> PVC <input type="checkbox"/> GG <input type="checkbox"/> Stahl <input type="checkbox"/> sonstiges:	

jedes Feld ausfüllen  
**Basisdaten**

Abbildung 118: Schadenerhebungsblatt in Anlehnung an ÖVGW W 105, 2011 (Gmoser, 2012) (Seite 1 von 2)

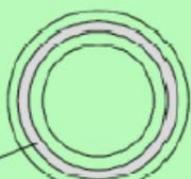
Umgebung / Baugrube	<b>Oberfläche/Bodenaufbau bei Schadenseintritt</b> (zutreffende Spalte ausfüllen)		
	<input type="checkbox"/> Straße <input type="checkbox"/> Gehsteig  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Oberbau Material:  <input type="checkbox"/> Asphalt <input type="checkbox"/> Beton  <input type="checkbox"/> Pflasterung <input type="checkbox"/></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ungebundene Tragschicht Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> wie Hauptverfüllung</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Hauptverfüllung Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> Erdreich <input type="checkbox"/> Beton <input type="checkbox"/> SSM</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Leitungszone Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> Lehm/Ton <input type="checkbox"/> Sand <input type="checkbox"/> Fels  <input type="checkbox"/> wie Hauptverfüllung  wenn Kies: mit Feinteilen aufgefüllt <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</div>	<input type="checkbox"/> befestigter Weg  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ungebundene Tragschicht Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> Recyclingmaterial</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Hauptverfüllung Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> Erdreich</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Leitungszone Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> Lehm/Ton <input type="checkbox"/> Sand <input type="checkbox"/> Fels  <input type="checkbox"/> wie Hauptverfüllung  wenn Kies: mit Feinteilen aufgefüllt <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</div>	<input type="checkbox"/> unbefestigt  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Hauptverfüllung Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> Erdreich</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Leitungszone Material:  <input type="checkbox"/> Kies kantig <input type="checkbox"/> Kies rund  <input type="checkbox"/> Lehm/Ton <input type="checkbox"/> Sand <input type="checkbox"/> Fels  <input type="checkbox"/> wie Hauptverfüllung  wenn Kies: mit Feinteilen aufgefüllt <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</div>
jedes Feld ausfüllen	<b>neu Instandzusetzende Fläche:</b> <span style="float: right;"><b>m<sup>2</sup></b></span>		
	<b>Baugrube allgemein</b> Überdeckungshöhe (siehe Spalten oben): ..... cm Leitung im Grundwasser: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein wenn ja: Abstand Geländeoberfläche bis Grundwasser: ..... cm Wurzelwerk: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	<b>benachbarte Leitungsträger in der Künette</b> (Lageverhältnisse zusätzlich in der Lageskizze auf der Vorderseite einzeichnen) Richtung: <input type="checkbox"/> parallel <input type="checkbox"/> kreuzend Art: <input type="checkbox"/> Abwasser <input type="checkbox"/> Fernwärme <input type="checkbox"/> Gas <input type="checkbox"/> Strom <input type="checkbox"/> Telekom Skizze: benachbarte Leitung einzeichnen und die Achsabstände zum Wasserrohr benennen (horizontal und vertikal) <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 100px; margin: 10px auto;"></div>	
Schaden allgemein	<b>Schadensart</b>		<b>Schadensursache</b>
	<input type="checkbox"/> Längsriss (L= ..... cm, B= ..... cm) <input type="checkbox"/> Rundriss (B= ..... cm) <input type="checkbox"/> Scheibenbruch (L= ..... cm, B= ..... cm) <input type="checkbox"/> Loch (mittlerer Ø= ..... cm) <input type="checkbox"/> sonstiges:		<input type="checkbox"/> Verbindung undicht <input type="checkbox"/> Formstück defekt/undicht <input type="checkbox"/> Armatur defekt/undicht <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Fremdverschulden <input type="checkbox"/> Korrosion <input type="checkbox"/> Druckstoß <input type="checkbox"/> sonstiges:
Rohr	<b>Längsansicht</b> (Schaden zum Betrachter gedreht) Schaden einzeichnen, einmessen und bemessen		<b>Aufriss</b> Schadensort mit <b>X</b> kennzeichnen, Schadensfläche schraffieren und bemessen
			
nur zutreffendes Feld ausfüllen	<b>Außenbeschichtung</b>		<b>Innenbeschichtung</b>
	<input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Zementmörtel <input type="checkbox"/> Pulverbeschichtung <input type="checkbox"/> Zink und Bitumen <input type="checkbox"/> PP <input type="checkbox"/> PE <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Teerpech		<input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Zementmörtel <input type="checkbox"/> Pulverbeschichtung <input type="checkbox"/> Bitumen <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Teerpech
Verbindung	<b>Verbindungsart</b>	<b>Aufriss</b>	<b>Bauteil</b>
	<input type="checkbox"/> Stemmuffe <input type="checkbox"/> Schweißung <input type="checkbox"/> Steckmuffe <input type="checkbox"/> Flansch <input type="checkbox"/> Schraubmuffe <input type="checkbox"/> Gewinde <input type="checkbox"/> Klemmverbinder <input type="checkbox"/> Kupplung <input type="checkbox"/>	undichte Fläche schraffieren und bemessen 	<input type="checkbox"/> T-Stück <input type="checkbox"/> Krümmer <input type="checkbox"/> Reduktion <input type="checkbox"/> Kreuzstück <input type="checkbox"/> Blindflansch <input type="checkbox"/> Reparaturschelle <input type="checkbox"/> Bogen <input type="checkbox"/> sonstiges:
<input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Zementmörtel <input type="checkbox"/> Pulverbeschichtung <input type="checkbox"/> Bitumen <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Teerpech		<input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Zementmörtel <input type="checkbox"/> Pulverbeschichtung <input type="checkbox"/> Bitumen <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Teerpech	<b>Armatur</b> <input type="checkbox"/> Schieber <input type="checkbox"/> Klappe <input type="checkbox"/> Hydrant <input type="checkbox"/> Be-/Entlüftung <input type="checkbox"/> Entleerung <input type="checkbox"/> Anschlussventil <input type="checkbox"/> Anbohrschelle <input type="checkbox"/> sonstiges:
Unterschrift Reparatur-Verantwortlicher vor Ort		Unterschrift Bearbeiter	

Abbildung 119: Schadenerhebungsblatt in Anlehnung an ÖVGW W 105 (2011) (Fuchs-Hanusch et al. 2011a; Gmoser, 2012) (Seite 2 von 2)

## Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Konstruktiven Wasserbau der Technischen Universität Graz

### Bisher erschienene Hefte:

- |      |    |        |   |
|------|----|--------|---|
| Heft | 1  | (1959) | VEDER, C.: Neue Verfahren zur Herstellung von untertägigen Wänden und Injektionsschirmen in Lockergesteinen und durchlässigem Fels (vergriffen)   |
| Heft | 2  | (1959) | BEER, O.: Hochwasserentlastungsanlagen österreichischer Talsperren  |
| Heft | 3  | (1960) | WEHRSCHÜTZ, F.: Wasserentnahme aus alpinen Abflüssen  |
| Heft | 4  | (1961) | TSCHADA, H.: Die Spiralauslässe des Kraftwerkes St.Pantaleon  |
| Heft | 5  | (1962) | GRENGG, H.: Funktion, Ordnung und Gestalt im konstruktiven Wasserbau  |
| Heft | 6  | (1962) | PIRCHER, W.: Wehreichungen an der Enns  |
| Heft | 7  | (1962) | WEHRSCHÜTZ, F.: Füll- und Entleerungssysteme von Schiffsschleusen mit großen Fallhöhen  |
| Heft | 8  | (1962) | REITZ, A.: Das Stauwerk im Bogen  |
| Heft | 9  | (1963) | PIRCHER, W.: Die Bautypen der Wasserkraft   |
| Heft | 10 | (1964) | WEHRSCHÜTZ, F.: Kritische Betrachtung der Modellgesetze   |
| Heft | 11 | (1965) | SIMMLER, H.: Das neue Institut für Wasserbau  |
| Heft | 12 | (1964) | RADLER, S.: Die Berechnung der Abflüsse im natürlichen Gerinne  |
| Heft | 13 | (1965) | ALTENBURGER, H.: Der Spiralauslaß als Hochwasserentlastung bei Donaukraftwerken   |
| Heft | 14 | (1965) | KRESNIK, E.: Kunststoffe im wasserbaulichen Versuchswesen und deren rauigkeitsmäßige Erfassung  |
| Heft | 15 | (1970) | SVEE, R.: Untersuchungen über die Stabilität bei Wasserkraftanlagen mit idealer Regelung  |
| Heft | 16 | (1971) | DROBIR, H.: Die Registrierung eines zeitlich rasch veränderlichen Wasserspiegels mit kapazitiven Meßsonden<br>ROTH, G.: Meßanlage zum Studium instationärer Vorgänge mit Hilfe eines Digitalcomputers |
| Heft | 17 | (1971) | DROBIR, H.: Der Ausfluß aus einem Speicher beim Bruch einer Talsperre   |
| Heft | 18 | (1972) | GRENGG, H.: Wörterbuch der Wasserkraftnutzung;<br>Französisch – Deutsch, Deutsch – Französisch  |
| Heft | 19 | (1973) | DRAXLER, A.: Mathematisches Modell für die Zuflußprognose als Hilfsmittel zur Optimierung des KW-Betriebes  |
| Heft | 20 | (1974) | GRENGG, H.: Die Technisierung großer Ströme in Verbindung mit der Wasserkraft   |
| Heft | 21 | (1975) | GRENGG, H.: Die großen Wasserkraftanlagen des Weltbestandes   |
| Heft | 22 | (1977) | GRENGG, H.: Die großen Wasserkraftanlagen des Weltbestandes, 2. Teil<br>KRAUSS, H.: Lufteinzug durch den Wasserabfluß in Vertikalrohren   |

## Veröffentlichungen

---

- Heft 23 (1979) LIEBL, A.: Die Lehre aus der Katastrophe beim Aufstau des Tarbela-Dammes in Pakistan aus der Sicht der Stahlwasserbauer  
(1980) KRÖLL, A.: Die Stabilität von Steinschüttungen bei Sohlen- und Uferbefestigungen in Wasserströmungen
- Heft 24 (1981) TSCHERNUTTER, P.: Grundsatzüberlegungen zur Rentabilität und zum Ausbau von Kleinwasserkraftwerken
- Heft 25 (1984) Helmut Simmler – Zur Vollendung seines 65. Lebensjahres gewidmet von seinen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern an der TU Graz

## **Publikation des Institutes für Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie der Technischen Universität Graz**

### **Bisher erschienene Bände:**

- SACKL, B. (1987) Ermittlung von Hochwasser - Bemessungsganglinien in beobachteten und unbeobachteten Einzugsgebieten

## **Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungs- und Industrieresourcennutzung, Grundwasserhydraulik, Schutz- und Landwirtschaftlichen Wasserbau der Technischen Universität Graz**

### **Bisher erschienene Bände:**

- Band 1 (1977) RENNER, H.: Die Berücksichtigung nichtbindiger überdeckender Schichten bei der Bemessung von Wasserschutzgebieten
- Band 2 (1977) KAUCH, E.P.: Untersuchung des Bewegungsgesetzes für die Filterströmung, im besonderen bei höheren Geschwindigkeiten einschließlich der teilturbulenten Strömung
- Band 3 (1977) PONN, J.: Geschwindigkeitsverteilungen in radial durchströmten Nachklärbecken – Verwendung einer neu entwickelten Thermosonde
- Band 4 (1978) Festschrift zum 60. Geburtstag von E.P. Nemecek
- Band 5 (1979) RENNER, H.: Die Entwicklung einer biologischen Kläranlage für kleinste Verhältnisse
- Band 6 (1980) Forschungsberichte 1979/80
- Band 7 (1980) KAUCH, E.P.: Der Pumpversuch im ungespannten Grundwasserleiter
- Band 8 (1982) DITSIOS, M.: Untersuchungen über die erforderliche Tiefe von horizontal durchströmten rechteckigen Nachklärbecken von Belebungsanlagen
- Band 9 (1982) GEIGER, D.: Einfluß der Schlammräumung im Nachklärbecken auf die erreichbare Feststoffkonzentration im Belebungsbecken
- Band 10 (1984) Forschungsbericht 1983/84, vergriffen
- Band 11 (1984) Beeinträchtigung der Grundwasservorkommen in qualitativer und quantitativer Hinsicht
- Band 12 (1986) KOTOULAS, K.: Natürliche Entwicklung der Längen- und Querprofilform der Flüsse - ein Beitrag zum naturnahen Flußbau
- Band 13 (1987) KAUCH, E.P., M. DITSIOS: Schlamm Bilanz in Belebungsanlagen - Einfluß der hydraulischen Betriebsparameter für Trockenwetter- und Regenwetterfall

- 
- Band 14 (1988) Festschrift zum 70. Geburtstag von Ernst P. Nemecek  
 Band 15 (1988) Vorträge über Siedlungs- und Industrierwasserbau  
 Band 16 (1991) KAINZ, H.: Auswirkungen von Stoßbelastungen auf den  
 Feststoffhaushalt einer Belebungsanlage  
 Band 17 (1991) KLAMBAUER, B.: Grundwasserschutz und Landwirtschaft –  
 Situation in Mitteleuropa

### Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft Technische Universität Graz

#### Bisher erschienene Bände:

- Band 1 (1992) Hermann Grengg – zum 100. Geburtstag <sup>1)</sup>  
 Band 2 (1992) ZITZ, W.: Die Mitbehandlung angefaulter Sammelgrubenabwässer in  
 einer kommunalen, schwach belasteten Belebungsanlage <sup>2)</sup>, vergriffen  
 Band 3 (1992) ÜBERWIMMER, F.: Untersuchung der Ressourcen gespannter  
 Grundwassersysteme mit hydraulischen und hydrologischen  
 Modellen <sup>1), 2)</sup>  
 Band 4 (1992) Hochwasserrückhaltebecken – Planung, Bau und Betrieb <sup>1), 2)</sup>  
 Band 5 (1992) MOLNAR, T.: Rechnerunterstütztes Projektieren von  
 Bewässerungssystemen <sup>1), 2)</sup>  
 Band 6 (1993) Klärschlamm Entsorgung in der Steiermark <sup>2)</sup>  
 Band 7 (1993) FRIEDRICH, Ch., WINDER, O.: Lebensraum Grazer  
 Murböschungen – Zoologisch-botanische Untersuchungen  
 einschließlich Planungsvorschläge <sup>2)</sup>  
 Band 8 (1993) REICHL, W.: Mehrdimensionale Optimierung quantitativ und  
 qualitativ bewertbarer Zielfunktionen in der Wasserwirtschaft <sup>1)</sup>  
 Band 9 (1993) WELLACHER, J.: Instationäre Strömungsvorgänge in  
 Hochwasserrückhaltebecken <sup>1)</sup>  
 Band 10 (1993) STUBENVOLL, H. : Analyse der zeitlichen Struktur von  
 Niederschlagsereignissen auf der Grundlage zeitvariabler  
 Datenaufzeichnung;  
 ZEYRINGER, T.: Untersuchung des räumlichen Verhaltens von  
 Niederschlagsereignissen auf zeitvariabler Datengrundlage <sup>1), 2)</sup>  
 Band 11 (1993) Ingenieurbiologie im Schutzwasserbau <sup>2)</sup>  
 Band 12 (1994) Ländlicher Raum: Abwasserentsorgung in der Sackgasse? <sup>2)</sup>,  
 vergriffen  
 Band 13 (1994) SACKL, B.: Ermittlung von Hochwasser-Bemessungsganglinien in  
 beobachteten und unbeobachteten Einzugsgebieten <sup>1), 2)</sup>  
 Band 14 (1995) Leben mit dem Hochwasser – Gefahr und Anpassung <sup>2)</sup>  
 Band 15 (1995) Betrieb, Erhaltung und Erneuerung von Talsperren und  
 Hochdruckanlagen – Symposium <sup>1)</sup>  
 Band 16 (1995) RICHTIG, G.: Untersuchungen zur Abflußentstehung bei  
 Hochwasserereignissen in kleinen Einzugsgebieten <sup>2)</sup>  
 Band 17 (1995) KNOBLAUCH, H.: Dissipationsvorgänge in Rohrleitungssystemen <sup>1)</sup>  
 Band 18 (1995) Fremdwasser in Abwasseranlagen <sup>2)</sup>  
 Band 19/1 (1996) XVIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische

## Veröffentlichungen

---

- Band 19/2 Vorhersagen und hydrologisch-wasserwirtschaftliche Grundlagen <sup>1), 2)</sup>
- Band 20 (1996) STRANNER, H.: Schwallwellen im Unterwasser von Spitzenkraftwerken und deren Reduktion durch flußbauliche Maßnahmen <sup>1)</sup>
- Band 21 (1996) DUM, T.: Verifikation eines numerischen Strömungsmodells anhand physikalischer Modelle <sup>1)</sup>
- Band 22 (1996) VASVÁRI, V.: Ein numerisches Modell zur Bewirtschaftung gespannter Grundwasservorkommen am Beispiel des Mittleren Safentales <sup>1), 2)</sup>
- Band 23 (1996) HYDROLOGISCHE MONOGRAPHIE des Einzugsgebietes der Oberen Raab <sup>1), 2)</sup>
- Band 24 (1997) Niederwasser <sup>1), 2)</sup>
- Band 25 (1997) KRALL, E.: Untersuchung der Gesamtwahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen in kleinen, unbeobachteten Einzugsgebieten Österreichs auf der Grundlage von Gebietskennwerten <sup>1), 2)</sup>
- Band 26 (1997) Abwasserentsorgung bei fehlenden Vorflutern <sup>2)</sup>
- Band 27 (1997) Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Günther Heigerth <sup>1)</sup>
- Band 28 (1997) MEDVED, N.: Simulation und systematische Erfassung von Spülvorgängen in verlandeten Flusstauräumen <sup>1)</sup>
- Band 29 (1998) Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr.h.c. Heinz Bergmann <sup>1), 2)</sup>
- Band 30 (1998) Festschrift anlässlich des 80. Geburtstages von Herrn em.O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.h.c. Dr. techn. Ernst P. Nemecek <sup>2)</sup>
- Band 31 (1999) BEUTLE, K.: Untersuchungen zur Schlammstabilisierung bei diskontinuierlich belüfteten Belebungsanlagen <sup>2)</sup>
- Band 32 (1999) REINHOFER, M.: Klärschlammvererdung mit Schilf <sup>2)</sup>
- Band 33 (1999) GRUBER, G.: Der biologisch abbaubare Kohlenstoffgehalt in der Abwassertechnik, BTOC und BDOC als Alternative zum BSB <sup>2)</sup>
- Band 34 (2000) Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen - Symposium <sup>1)</sup>
- Band 35 (2001) FUCHS, D.: Decision Support Systeme für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen <sup>2)</sup>
- Band 36 (2001) Untersuchungen im Einzugsgebiet der Oberen Raab über hydrologische Folgen einer möglichen Klimaänderung <sup>1), 2)</sup>
- Band 37 (2001) HABLE, O.: Multidimensional probabilistic design concept for the estimation of the overtopping probability of dams <sup>1), 2)</sup>
- Band 38 (2001) VASVÁRI, V.: Geohydraulische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen in geklüfteten Grundwasserleitern <sup>1), 2)</sup>
- Band 39 (2002) SCHATZL, R.: Skalenabhängiger Vergleich zwischen Wetterradaraten und Niederschlagsmessungen <sup>2)</sup>
- Band 40 (2002) GUNDAKER, F.: Untersuchungen zur Schlammstabilisierung bei diskontinuierlich belüfteten Belebungsanlagen bei tiefen Temperaturen <sup>2)</sup>
- Band 41 (2003) Wasserbau neu – Die Wasserbauschule an der Technischen Universität Graz <sup>2)</sup>

- 
- Band 42 (2004) Innovative Messtechnik in der Wasserwirtschaft – Konzeption und Praxiserfahrungen mit einem modularen Monitoringnetzwerk zur universellen Anwendung in der Wasserwirtschaft <sup>2)</sup>
- Band 43 (2005) 7. Treffen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler deutschsprachiger Wasserbauinstitute <sup>1)</sup>
- Band 44 (2005) HOCHEDLINGER, M.: Assessment of Combined Sewer Overflow Emissions <sup>2)</sup>
- Band 45 (2006) NEMECEK, E.P., H.HAERTL, H.GERNEDEL und H.NICKL: Horizontalfilterbrunnen <sup>2)</sup>
- Band 46 (2006) WASSERBAUSYMPIOSIUM GRAZ 2006 Stauhaltungen und Speicher – Von der Tradition zur Moderne <sup>1)</sup>
- Band 47 (2006) KAN(())FUNK – Überprüfung, Bewertung und Sicherstellung der Funktionsfähigkeit von Kanalisationsanlagen in Österreich <sup>2)</sup>
- Band 48 (2007) PATZIGER, M.: Untersuchung der Schlamm Bilanz in Belebungsstufen aufbauend auf den Prozessen im Nachklärbecken <sup>2)</sup>
- Band 49 (2007) Abwassergebührensplitting, ÖWAV – TU Graz Seminar <sup>2)</sup>
- Band 50 (2007) dex Fachsymposium 2007 – Abwasserableitung, Abwasser- und Klärschlammbehandlung <sup>2)</sup>
- Band 51 (2008) BADURA, H.: Feststofftransportprozesse während Spülungen von Flusstauräumen am Beispiel der oberen Mur <sup>1)</sup>
- Band 52 (2008) ARCH, A.: Luftein- und Austragsprozesse bei Anlagen mit Pelton turbinen im Gegendruckbetrieb <sup>1)</sup>
- Band 53 (2008) GANGL, G.: Rehabilitationsplanung von Trinkwassernetzen <sup>2)</sup>
- Band 54 (2008) Instandhaltung von Trinkwasser- und Abwasserleitungen; ÖWAV – TU Graz Symposium <sup>2)</sup>
- Band 55 (2009) Optimierte Bemessung von Mischwasserentlastungsanlagen, Erfahrungen mit der Anwendung des neuen ÖWAV-Regelblattes 19; ÖWAV – TU Graz Seminar <sup>2)</sup>
- Band 56 (2009) KÖLBL, J.: Process Benchmarking in Water Supply Sector: Management of Physical Water Losses <sup>2)</sup>
- Band 57 (2009) Wasserverluste in Trinkwassernetzen, ÖVGW – TU Graz Symposium <sup>2)</sup>
- Band 58 (2009) MAYR, D.: Hydraulic Studies on Trifurcations<sup>1)</sup>
- Band 59 (2009) MUNALA, G.K.: A Viable Pro-poor Public-Private Partnership Management Model for Water Supply Services; Co-sharing Option for Kisumu, Kenya <sup>2)</sup>
- Band 60 (2010) Management in der Trinkwasserwirtschaft ÖVGW – TU Graz Symposium <sup>2)</sup>
- Band 61 (2010) LARCHER, M.: The Three Chamber Surge Tank – A new way of construction for the tail water area of pumped storage schemes <sup>1)</sup>
- Band 62 (2011) Aqua Urbanica 2011 – Niederschlags- und Mischwasserbewirtschaftung im urbanen Bereich, D-A-CH Gemeinschaftstagung <sup>2)</sup>
- Band 63 (2011) SINDELAR, C.: Design of a Meandering Ramp <sup>1)</sup>
- Band 64 (2011) GAMERITH, V.: High resolution online data in sewer water quality modelling <sup>2)</sup>
-

- Band 65 (2011) ZETINIGG, H.: Regeln für den Schutz von Trinkwasserfassungen in Österreich <sup>2)</sup>, vergriffen
- Band 66 (2013) VICUINIK, R.: Untersuchungen zur Dynamik der Feststoffsedimentation in Absetzbecken <sup>2)</sup>
- Band 67 (2013) ASLAM, M.T.: Settling of solids in raw wastewater - primary settling tanks and storm water tanks <sup>2)</sup>
- Band 68 (2013) DOBLER, W.: Hydraulic investigations of a y-bifurcator <sup>1)</sup>
- Band 69 (2014) FRIEDL, F.: Vergleich von statistischen und physikalischen Modellen zur Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Schadensarten auf Trinkwasser-Haupt- und Zubringerleitungen <sup>2)</sup>

### Die Bände sind zu beziehen bei:

- 1) Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Technische Universität Graz, Stremayrgasse 10/II, 8010 Graz, Österreich  
Tel. +43(0)316/873-8361, Fax +43(0)316/873-8357  
E-Mail: [hydro@tugraz.at](mailto:hydro@tugraz.at)
- 2) Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau  
Technische Universität Graz, Stremayrgasse 10/I, 8010 Graz, Österreich  
Tel. +43(0)316/873-8371, Fax +43(0)316/873-8376  
E-Mail: [office-sww@tugraz.at](mailto:office-sww@tugraz.at)
- 3) Verlag der technischen Universität Graz  
Technische Universität Graz, Technikerstraße 4, 8010 Graz, Österreich  
Tel. +43(0)316/873-6157  
E-Mail: [verlag@tugraz.at](mailto:verlag@tugraz.at)