



Dipl.-Ing. Andreas Höhenberger

# **Beitrag zur Ermittlung der Restlebensdauer von Kanälen auf Basis des Ist - Zustandes**

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Harald Kainz

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

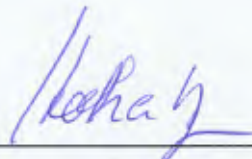
## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG **AFFIDAVIT**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

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

27.9.2014

Datum / Date



Unterschrift / Signature

### *Danksagung*

Ich bedanke mich bei all jenen, die mich bei der Verfassung dieser Dissertation unterstützt und vorangetrieben haben. Besonders hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang meinen Doktorvater Prof. DI Dr. Harald Kainz, der mir zu dieser Arbeit die Möglichkeit gegeben hat, sowie meinem zweiten Betreuer Dr. Bischoff für die stets freundliche und kompetente Unterstützung bei der programmtechnischen Umsetzung meiner Ideen. Widmen möchte ich diese Arbeit jedoch meiner lieben Ehefrau, die in den vergangenen Jahren vor allem am Abend sehr oft auf meine Gesellschaft verzichten musste und dies immer in der ihr eigenen Art und Weise wohlwollend zur Kenntnis nahm. Besonderer Dank gebührt aber auch den Mitarbeitern in meinem Büro für die sorgfältige Mithilfe bei der Recherche des verwendeten Datenmaterials sowie dem Amt der Burgenländischen Landesregierung Abteilung 9 für die stets konstruktive Zusammenarbeit und Unterstützung.

Oberwart,  
den 21. Oktober 2014

Andreas Höhenberger

### *Kurzfassung*

Nach dem zweiten Weltkrieg wurde auch in Österreich sehr viel Geld in die Errichtung von Kanälen investiert. Seit dem Jahre 2005 werden diese nun untersucht und der vorgefundene Zustand wird bewertet. Die Einteilung der Bewertungsergebnisse erfolgt dabei in einem Schulnotensystem. Dabei offenbart sich nun ein teilweise erhebliches Schadenspotential. In dieser Arbeit soll zunächst geklärt werden, ob sich eine Weiterentwicklung dieser Schäden feststellen lässt und somit ein klar definierter Alterungsprozess in den Kanälen abläuft. In einem zweiten Schritt wird auf Basis von bereits existierenden Forschungsergebnissen ein Verfahren vorgestellt, mit dem es möglich sein sollte, jenen Zeitraum zu bestimmen, in dem die untersuchten Rohrleitungssysteme einen vorher definierten kritischen Zustand erreichen. Verwendet wird dazu das bekannte Prinzip der Markov-Ketten in Verbindung mit vom Rohralter abhängigen Übergangswahrscheinlichkeiten. Das Verfahren erlaubt außerdem die Berücksichtigung sowohl von Initialeinflüssen als auch von Einflüssen, welche die Alterungsgeschwindigkeit bestimmen. Als Ergebnis erhält man schlussendlich eine Aufstellung jener Haltungen im Untersuchungsgebiet, welche statistisch gesehen das höchste Versagensrisiko besitzen. Das Versagen wird dabei jedoch mit dem Erreichen der vorletzten Schadensklasse gleichgesetzt, um den Handlungsspielraum im Zusammenhang mit allfälligen Sanierungsmaßnahmen etwas zu erhöhen und um den Schwerpunkt der Instandhaltung mehr in Richtung Pflege zu verlagern.

### *abstract*

After World War II a lot of money in Austria has been invested in the establishment of wastewater systems. Since 2005 there is a program to investigate our pipe systems. Therefore the determined conditions will be classified within a system of grades. The results of this classification show a high potential of possible damages. Therefore, it is one aim of this work to resolve the question if there is any development of these damages and if there is a clearly defined deterioration of our wastewater pipes. In a second step, we will show a procedure based on existing research results that calculates a period, when the investigated pipes will reach a critical condition. In order to do this, we are applying the well known concept of Markov-chains in combination with transition probabilities, which are dependent on the age of the pipes. We can also observe initial influences as well as ones which might have an effect on the speed of deterioration. The result of this procedure will be a list of the pipes, which have the highest risk of collapsing statistically. The collapse is further designated as having reached the second highest damage class to gain some time for any repairs and to shift the focus in the direction of maintenance.

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. Grundlagen</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1. Einführung</b>   | <b>10</b> |
| 1.1. Motivation für diese Arbeit . . . . .                       | 10        |
| 1.2. Abwassertechnische Verhältnisse im Südburgenland . . . . .  | 12        |
| 1.2.1. Oberwart, Güssing, Jennersdorf - Organisation . . . . .   | 14        |
| 1.3. Zielsetzung der Arbeit . . . . .                            | 15        |
| 1.4. Der methodische Ansatz . . . . .                            | 17        |
| 1.4.1. Datenerhebung und Speicherung . . . . .                   | 17        |
| 1.4.2. Zusammenhang zwischen Alter und Haltungszustand . . . . . | 18        |
| 1.4.3. Hinweis zur Terminologie . . . . .                        | 19        |
| 1.4.4. Etablierung eines Prognoseanteils . . . . .               | 20        |
| 1.4.5. Prüfung des Ansatzes und des Verfahrens . . . . .         | 21        |
| <b>2. Stand der Technik und Wissenschaft</b>                     | <b>23</b> |
| 2.1. Verfahren zur Klassifizierung . . . . .                     | 23        |
| 2.1.1. Ausgangssituation . . . . .                               | 23        |
| 2.1.2. Aktuelle Verfahren in der Zustandserfassung . . . . .     | 24        |
| 2.1.2.1. Videoinspektion . . . . .                               | 24        |
| 2.1.2.2. Dichtheitsprüfung und andere . . . . .                  | 28        |
| 2.1.3. Durchführung der Klassifizierung . . . . .                | 28        |
| 2.1.3.1. Verfahren nach DWA . . . . .                            | 29        |
| 2.1.3.2. Verfahren nach ISYBAU . . . . .                         | 30        |
| 2.1.4. Vergleich der Verfahren und der Ergebnisse . . . . .      | 35        |
| 2.1.5. Verfahren in anderen Ländern . . . . .                    | 36        |
| 2.1.5.1. Norwegen . . . . .                                      | 36        |
| 2.1.5.2. Großbritannien . . . . .                                | 37        |
| 2.2. Modellierung des Alterungsprozesses . . . . .               | 39        |
| 2.2.1. Untersuchung mittels logistischer Regression . . . . .    | 39        |
| 2.2.2. Die Ketten von Markow . . . . .                           | 41        |
| 2.2.3. Das Semi-Markow Modell . . . . .                          | 44        |
| 2.2.4. Die Überlebensfunktion . . . . .                          | 45        |
| 2.2.4.1. Die Herz-Verteilung . . . . .                           | 45        |

## *Inhaltsverzeichnis*

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.2.4.2.   | Die Weibull-Verteilung . . . . .                                  | 46        |
| 2.2.4.3.   | Die Gompertz-Verteilung . . . . .                                 | 47        |
| <b>II.</b> | <b>Methodik zur Ermittlung der Restlebensdauer</b>                | <b>49</b> |
| <b>3.</b>  | <b>Ermittlung der Restlebensdauer</b>                             | <b>50</b> |
| 3.1.       | Digitaler Leitungskataster als Grundlage . . . . .                | 50        |
| 3.1.1.     | Allgemeines . . . . .   | 50        |
| 3.1.2.     | Erfassung der Stammdaten . . . . .                                | 51        |
| 3.1.3.     | Erfassung und Analyse der Zustandsdaten . . . . .                 | 52        |
| 3.1.4.     | Überlegungen zur Präzision der Zustandserfassung . . . . .        | 53        |
| 3.1.5.     | Herkunft und Qualität der Daten . . . . .                         | 54        |
| 3.2.       | Der Alterungsprozess im Allgemeinen . . . . .                     | 56        |
| 3.3.       | Der Alterungsprozess im Kanal . . . . .                           | 57        |
| 3.3.1.     | Feststellung signifikanter Einflussparameter . . . . .            | 58        |
| 3.3.1.1.   | Transportiertes Medium . . . . .                                  | 58        |
| 3.3.1.2.   | Verwendete und untersuchte Materialien . . . . .                  | 61        |
| 3.3.1.3.   | Rohrdimension und Form . . . . .                                  | 64        |
| 3.3.1.4.   | Die verbleibenden globalen Faktoren . . . . .                     | 66        |
| 3.3.1.5.   | Nichtberücksichtigung von lokalen Einflüssen . . . . .            | 66        |
| 3.3.1.6.   | Verteilung der Schadensklassen . . . . .                          | 67        |
| 3.3.1.7.   | Zusammenfassung und Fazit . . . . .                               | 69        |
| 3.3.2.     | Bestimmung des Alters einer Haltung . . . . .                     | 69        |
| 3.3.2.1.   | Allgemeine Überlegungen . . . . .                                 | 69        |
| 3.3.2.2.   | Bestimmung der maximalen systemischen Lebensdauer . . . . .       | 74        |
| 3.3.2.3.   | Bestimmung des Alterungspfades . . . . .                          | 76        |
| 3.3.2.4.   | Verfeinerung der Schadensklasse . . . . .                         | 77        |
| 3.3.2.4.1. | Haltung hat das systemische Alter noch nicht erreicht . . . . .   | 78        |
| 3.3.2.4.2. | Haltung hat das systemische Alter bereits überschritten . . . . . | 78        |
| 3.3.2.4.3. | Haltung befindet sich in der vorletzten Schadensklasse . . . . .  | 78        |
| 3.3.2.5.   | Berücksichtigung der Schadensentwicklung . . . . .                | 79        |
| 3.3.2.5.1. | Schäden ohne Weiterentwicklung . . . . .                          | 79        |
| 3.3.2.5.2. | Schäden mit Weiterentwicklung . . . . .                           | 80        |
| 3.3.2.5.3. | Gegenüberstellung Isybau96 und EN 13508-2 . . . . .               | 80        |
| 3.3.2.5.4. | Schäden und ihre Ursachen . . . . .                               | 81        |
| 3.3.2.5.5. | Weg zum strukturellen Kollaps . . . . .                           | 81        |

## Inhaltsverzeichnis

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| 3.3.2.5.6. | Bemerkung zur Betriebssicherheit . . .                                    | 82  |
| 3.4.       | Verwendete Software und Datenmodell . . . . .                             | 82  |
| 3.5.       | Praktische Umsetzung . . . . .  | 83  |
| 3.5.1.     | Der Einfluss der Datenqualität . . . . .                                  | 84  |
| 3.5.2.     | Beschreibung des Rechenverfahrens . . . . .                               | 84  |
| 3.5.3.     | Durchführung der Kalibrierung . . . . .                                   | 85  |
| 3.5.3.1.   | Aufbau der Datensätze . . . . .   | 86  |
| 3.5.3.2.   | das Steuerfile . . . . .  | 87  |
| 3.5.3.3.   | Beschreibung des Ergebnisvektors für den In-<br>itialeinfluss . . . . .   | 87  |
| 3.5.3.4.   | Beschreibung des Ergebnisvektors für den Ein-<br>fluss der Zeit . . . . . | 88  |
| 3.5.3.5.   | Probleme mit der Konvergenz . . . . .                                     | 88  |
| 3.5.3.6.   | Ergebnisse basierend auf dem gesamten Daten-<br>pool . . . . .            | 89  |
| 3.5.4.     | Durchführung der Kalibrierung getrennt nach Materialien                   | 90  |
| 3.5.4.1.   | Kunststoffrohre - PVC . . . . .   | 91  |
| 3.5.4.2.   | Steinzeug . . . . .   | 101 |
| 3.5.4.2.1. | Analyse der Einzelschäden . . . . .                                       | 106 |
| 3.5.4.3.   | Beton . . . . .   | 116 |
| 3.5.4.3.1. | Analyse der Einzelschäden . . . . .                                       | 122 |
| 3.5.5.     | Zusammenfassung der Materialanalyse . . . . .                             | 136 |
| 3.5.6.     | Praktische Durchführung der Ermittlung der Restle-<br>bensdauer . . . . . | 137 |
| 3.5.6.1.   | Allgemeine Bemerkungen . . . . .  | 137 |
| 3.5.6.2.   | Berechnung der Übergangsfunktionen . . . . .                              | 138 |
| 3.5.6.3.   | Berechnung der systemischen Lebensdauer . . .                             | 140 |
| 3.5.6.4.   | Vergleichsberechnung im lokalen Leitungsnetz .                            | 144 |
| 3.5.6.5.   | Vorgehen bei Haltungen in der Grenzklasse . .                             | 145 |
| 3.5.7.     | Zusammenfassung . . . . .   | 147 |
| 3.5.8.     | Ausblick . . . . .  | 148 |

## III. Anhang 149

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| .1.   | Ausgangsdatensätze - Haltungen . . . . .                   | 150 |
| .2.   | Ausgangsdatensätze - Zustände nach Isybau96 . . . . .      | 151 |
| .3.   | Ausgangsdatensätze - Zustände nach EN 13508-2 . . . . .    | 152 |
| .4.   | Datenfile zur Berechnung der Übergangsfunktionen . . . . . | 153 |
| .5.   | Befahrungsprotokoll nach EN 13508-2 . . . . .              | 154 |
| .6.   | Klassifizierung nach Isybau2012 . . . . .                  | 155 |
| .7.   | verwendete Software - Screenshots . . . . .                | 156 |
| .7.1. | Startseite - Datenimport . . . . .                         | 156 |

## *Inhaltsverzeichnis*

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| .7.2. | Ergebnisseite numerisch . . . . . | 157 |
| .7.3. | Analyseseite . . . . .            | 158 |
| .7.4. | Datenbankanbindung . . . . .      | 159 |



# Teil I.

## Grundlagen

# 1. Einführung

## 1.1. Motivation für diese Arbeit

Im Südburgenland wurde der überwiegende Anteil der Abwasserentsorgungsanlagen in den Jahren 1960 bis 1995 errichtet. Im Detail sind die Verhältnisse im Kap.1.2 kurz dargestellt. Gemäß den damals vorhandenen technischen Möglichkeiten konnten die Unterlagen, welche die Errichtung sowie die Dokumentation des Bestandes betrafen, lediglich in analoger Form bearbeitet und konserviert werden. Erst mit dem Einzug der digitalen Technik in der Mitte der 80er Jahre war eine dauerhafte Speicherung der Ausführungsunterlagen in elektronischer Form wirtschaftlich möglich. Fakt ist, dass eine Neuvermessung der errichteten Bauwerke erst in den letzten zwei Jahrzehnten stattgefunden hat und seither zumindest eine geodätische Aufnahme der Sammler und Transportkanäle im großen Umfang vorliegt.

Eine Überprüfung des Zustandes der Kanalleitungen wurde aufgrund der fehlenden finanziellen Mittel und einhergehend mit einem fehlenden Problembewusstsein nur vereinzelt durchgeführt. Es musste jedoch vor der Abnahme von neu errichteten Anlagenteilen die Dichtheit derselben nachgewiesen werden. Eine abschließende Inspektion im Wege einer Kamera-befahrung vor der Inbetriebnahme ist erst seit Ende der 90er Jahre üblich bzw. vorgeschrieben. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass vor allem im ländlichen Raum Bestandspläne nur in analoger Form und Zustandsbewertungen überhaupt nicht vorhanden sind. Dies mag auch damit zusammenhängen, dass jene mit der Verwaltung dieser Daten betrauten Personen zwar fleißig und bemüht sind, in dieser Hinsicht aber eine entsprechende Ausbildung meistens fehlt.

Im Jahre 2007 wurde seitens der Kommunalkredit Public Consulting (KPC) ein Förderprogramm gestartet, das zum Ziel hatte, die Erhebung des Bestandes im Zusammenhang mit der kommunalen Abwasserbeseitigung voranzutreiben. Kurz gesagt fördert der Bund und zum Teil die Länder die Erstellung des sogenannten digitalen Leitungskatasters (DLK). Zumindest im Südburgenland gibt es bisher kaum Gemeinden, die ihre Infrastruktur digital erfasst haben. Man verlässt sich hier eher auf das »überlieferte« Wissen der

## 1. Einführung

Gemeindebediensteten. Oft wurden auch im Laufe der Zeit die Kanalsysteme entweder umgebaut oder erweitert, sodass sich die Verhältnisse, welche zum Zeitpunkt der Errichtung der Anlagen herrschten, wesentlich verändert haben. Ebenso erkennt man die fallweise nicht mehr vorhandene hydraulische Leistungsfähigkeit an, in zunehmender Häufigkeit, überfluteten Straßenzügen.

Im Rahmen der Erstellung des DLK von Abwasserbeseitigungsanlagen schreibt die KPC außerdem vor, den Zustand der Haltungen, Leitungen und den der Schächte zu bewerten. Dies ist insofern von Bedeutung, weil abgeschätzt werden soll, mit welchem Investitionsvolumen bei der Sanierung von schadhafte Anlagenteilen zu rechnen ist. In diesem Zusammenhang wäre es auch wichtig den Betreibern und der Förderstelle Informationen darüber zu vermitteln, mit welchem Zeitrahmen bei notwendigen Maßnahmen zu rechnen ist. Überdies sollte auch die Nachhaltigkeit dieser Maßnahmen abgeschätzt werden können. Es liegt auf der Hand, dass eine ökonomische Sanierungsplanung erst mit der Kenntnis des Ist-Zustandes durchführbar ist.

Es zeigt sich nämlich, dass die unterirdische Infrastruktur, nicht nur in Österreich, erstmals seit dem 2. Weltkrieg ein Alter erreicht hat, welches sich zunehmend der vermuteten Lebensdauer der Anlagenteile annähert. Die Tatsache, dass in der Vergangenheit die Instandhaltung der Rohrleitungssysteme eher vernachlässigt wurde, verschärft die Situation. Hinzu kommt, dass sich in den letzten 50 Jahren sowohl Umweltbedingungen als auch Lebensweise gravierend verändert haben. Besonders problematisch ist in diesem Zusammenhang die zunehmende Versiegelung der Oberfläche in den urbanen Gebieten. Eine Folge davon ist mittlerweile ein regelmäßiger Überstau unserer Entwässerungssysteme.

Vereinzelte Probleme können sich ebenfalls durch die stattgefundene Erhöhung der Verkehrsbelastung ergeben. Dies beeinflusst überwiegend seicht liegende Rohrleitungssysteme, welche der dynamischen Beanspruchung durch den Verkehr auf Dauer nicht mehr standhalten können. Versteckte Mängel in der damaligen Herstellung (schlechte seitliche Bettung etc.) beginnen sich nun offensichtlich auszuwirken.

Eine weitere Besonderheit im Südburgenland ist die deutliche Dominanz des Mischsystems. Auf diesen Umstand wird an späterer Stelle (Kap.1.2) noch einmal näher eingegangen.

Folgt man diesem Gedankengang und berücksichtigt zusätzlich bereits vorhandene Klassifizierungsergebnisse, so wird ein massives Schadenspotential offenkundig. Als erschwerend erweist sich nun der Umstand, dass zwar die

## 1. Einführung

Neuerrichtung von Abwasserableitungsanlagen sehr gut gefördert wurde, aber die Gemeinden zum Teil noch immer die damals aufgenommenen Kredite abstatten. Als Planer gerät man deswegen in einen gewaltigen Argumentationsnotstand, wenn man in dieser Situation auf die Schadhaftheit der »eben erst« errichteten Kanäle hinweist. Dies bedeutet, dass bei der Beratung zumindest kreative Wege beschritten werden müssen. Auch im Zusammenhang mit der budgetären Situation kann die Stoßrichtung nur die sein, vorhandene Geldmittel möglichst so einzusetzen, dass die Lebensdauer der Anlagenteile deutlich erhöht wird.

Die Motivation zu dieser Arbeit ergab sich daher aus der Notwendigkeit den Betreiber von Abwasserableitungsanlagen ein Werkzeug in die Hände zu geben, welches einerseits erlaubt, vorhandene finanzielle Mittel möglichst optimal im Rahmen der Sanierung einzusetzen. Andererseits sollte es möglich sein, auch Prognosen über die Entwicklung des Zustandes der Leitungssysteme abzugeben.

### 1.2. Abwassertechnische Verhältnisse im Südburgenland

Geografisch betrachtet besteht das Südburgenland aus den Bezirken Oberwart, Güssing und Jennersdorf (Abb. 1.1). Nahezu alle Gemeinden werden im Mischsystem entwässert und sind mittelfristig auch nicht in der Lage auf ein Trennsystem umzusteigen, obwohl es immer mehr Überlegungen in diese Richtung gibt.

Die dominante Stellung des Mischsystems im Burgenland hat historische Gründe und wurde vor der Errichtung der Kanalsysteme mit dem Vorhandensein nur begrenzter finanzieller Mittel argumentiert. Kurz gesagt bestand der eindeutige politische Auftrag, mit einer begrenzten Geldsumme das Burgenland möglichst flächendeckend zu kanalisieren. Der Vorteil, nur ein Leitungssystem bauen zu müssen, wurde somit schlagend. In diesem Zusammenhang wirkte sich natürlich auch der überdurchschnittliche Anteil an Streusiedlungen im Burgenland aus. Dies und die Vorschreibung, jedes Objekt an das Kanalsystem anzuschließen, führte notgedrungen zu einem hohen Anteil an Transportleitungen mit zum Teil ganz geringer Auslastung.

Unabhängig davon können heute folgende Nachteile dieser Entwässerungsart als erwiesen angesehen werden:

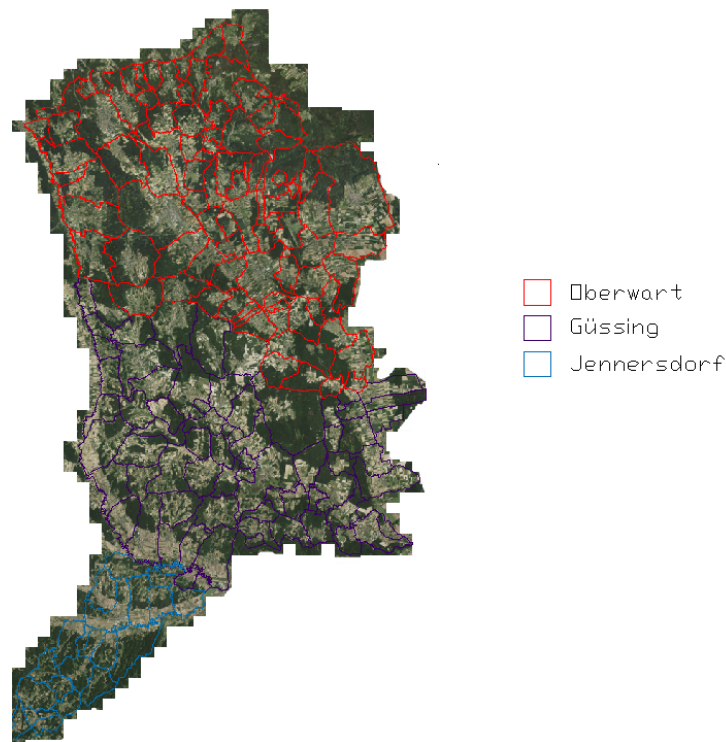
- große Rohrquerschnitte bei gleichzeitig hydraulisch schlechter Auslastung

## 1. Einführung

und damit übermäßige Neigung zur Ausbildung von Ablagerungen durch zu geringe Schleppspannung

- Vorfluterbelastung durch Mischwasserentlastungen im Regenwetterfall
- schlechte Reinigungswirkung bei Mischwasserabfluss in der biologischen Klärstufe

Auch wenn sich für das Mischsystem vorteilhafte Argumente, wie z.B. die Unmöglichkeit von Fehlan schlüssen, finden lassen, so wird das Trennsystem und das qualifizierte Mischsystem derzeit als der Stand der Technik betrachtet. Die Entscheidung, welches der genannten Verfahren nun tatsächlich zum Einsatz kommt, wird vor allem von den lokalen Verhältnissen (Grad der Versiegelung, Größe des Einzugsgebietes etc.) abhängig gemacht. Dies hat zur Folge, dass bereits seit einem längeren Zeitraum in Erweiterungsgebieten der Gemeinden nur noch das Trennsystem ausgeführt werden darf und auch langsam bei den Entscheidungsträgern die Erkenntnis wächst, dass ein Umbau und die Anpassung bestehender Systeme an den Stand der Technik durchaus zielführend ist.



**Abbildung 1.1.:** Südburgenland-Geografische Übersicht [Luftbild : Amt der bgl. Landesregierung 2013]

## 1. Einführung

### 1.2.1. Oberwart, Güssing, Jennersdorf - Organisation

Die Abwasserentsorgung des Südburgenlandes wird überwiegend über Abwasserverbände abgewickelt. Die Verhältnisse im Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit der einzelnen Kläranlagen ist in Abb. 1.2 grafisch dargestellt. Eine kartografische Übersicht kann der Abb. 1.3 entnommen werden.

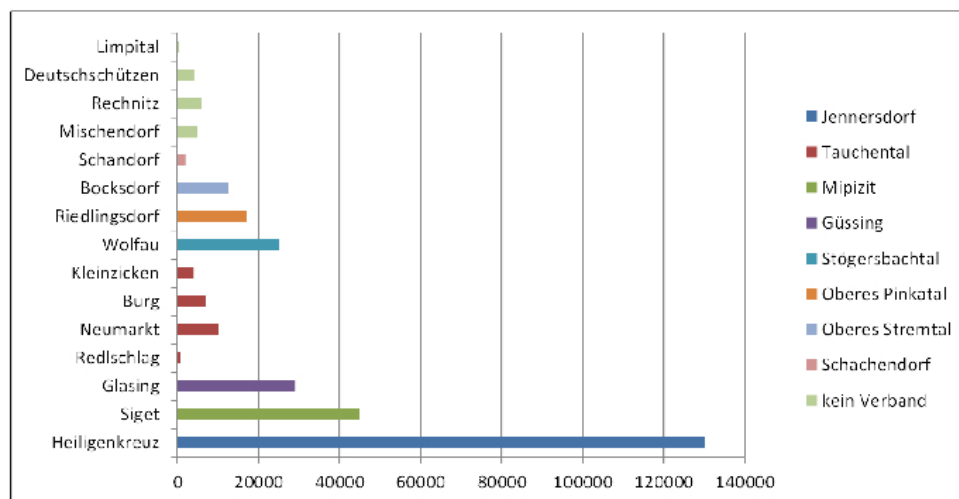


Abbildung 1.2.: Kläranlagen - Übersicht und Kapazitäten

Offensichtlich ist, dass alle Gemeinden dieser drei Bezirke ihre Abwässer in die oben genannten Kläranlagen einleiten. Es lässt sich auch deutlich erkennen, dass im Südburgenland überwiegend der Weg der zentralen Abwasserbehandlung verfolgt wird. Das bedeutet einerseits einen höheren Aufwand bei der Errichtung und Erhaltung der Transportleitungen, dem jedoch ein geringerer Aufwand beim Betrieb der gemeinsamen Kläranlagen gegenübersteht.

## 1. Einführung

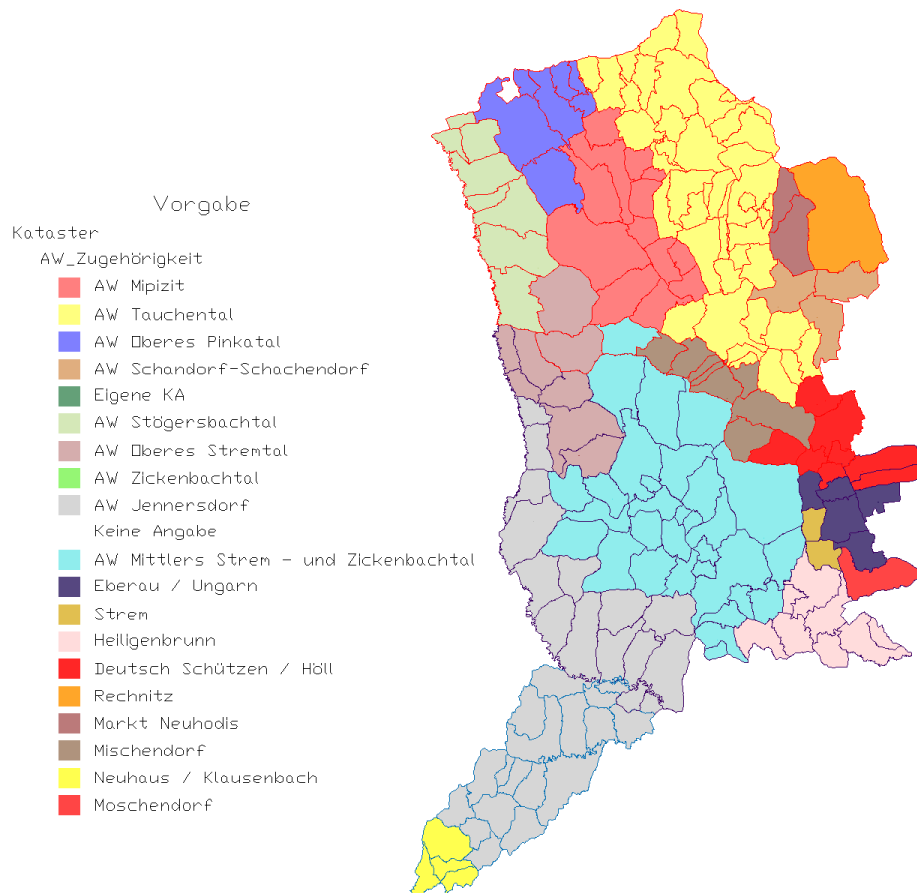


Abbildung 1.3.: Abwasserverbände-Übersicht

### 1.3. Zielsetzung der Arbeit

Um im Weiteren konkrete Aussagen über die Lebensdauer der Kanalsysteme im Südburgenland machen zu können, muss in einem ersten Schritt der Ist-Zustand des Systems flächendeckend erhoben werden. Es muss an dieser Stelle auch explizit gesagt werden, dass ohne Kenntnis des Ist-Zustandes eine Prognose unmöglich ist.

Die Erhebung impliziert natürlich die Zustandsklassifizierung d.h. die Einteilung der vorgefundenen Schäden in definierte Schadensklassen. Dass auch diese Klassifizierung mitunter problematisch sein kann, wird später noch beschrieben (Kap.3.1.4), aber es ist nicht das Ziel dieser Arbeit das Klassifizierungssystem zu hinterfragen. Vielmehr wird vorausgesetzt, dass das verwendete Datenmaterial grundsätzlich in Ordnung ist.

## 1. Einführung

Die beiden zur Zeit im deutschen Sprachraum gängigen Bewertungsverfahren laut ISYBAU [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012] und laut ATV [*Merkblatt DWA M 149-3 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden*, 2010] zielen darauf ab, auf Basis der Einzelschäden zu einer Klassifizierung des Gesamtzustandes der Haltung zu gelangen. Diese Bewertung ist einerseits stark abhängig von der Schwere des Einzelschadens und lässt andererseits kaum eine Prognose hinsichtlich der Schadensweiterentwicklung zu. Das Ergebnis des ganzen Bewertungsvorganges ist dann eine eher ungenaue Aussage darüber, wann eine Sanierung durchzuführen ist. Außer Streit stehen hier lediglich die beiden Extremfälle, wo einerseits die Haltung in einem neuwertigen Zustand ist und andererseits sofortiger Handlungsbedarf besteht. Dazwischen sind die Grenzen eher fließend, und der empfohlene Zeitrahmen liegt zwischen »kurzfristig« und »langfristig«. Dies in einer bestimmten Anzahl von Jahren auszudrücken ist verhältnismäßig schwierig und mit einem großen Interpretationsspielraum behaftet. Auch die Entscheidung, ob Haltungen saniert, ertüchtigt oder neu errichtet werden sollen, ist dabei nicht immer einfach zu treffen.

**Das Ziel der Arbeit ist daher für die Bewertung und Klassifizierung von Kanalsystemen einen erweiterten Ansatz zu entwickeln, der die Dauer bis zum strukturellen Versagen einer Haltung möglichst genau bestimmt.**

Dies bringt vor allem für die Betreiber den Vorteil, dass anschaulich in einem Gesamtsystem zwischen alten und neuen Anlagenteilen unterschieden werden kann. Zusätzlich lässt sich der Nutzen von vorgesehenen Sanierungsmaßnahmen einfach über die Erhöhung dieses Zeitraumes beschreiben. Es wird besonderer Wert darauf gelegt, das empfohlene Zeitfenster für einen Handlungsbedarf so weit wie möglich einzugrenzen.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Ermittlung der Restlebensdauer von einzelnen Haltungen. Leider hat sich im Zuge der Bearbeitung dieses Themas gezeigt, dass zwar im Bereich des Südburgenlandes mittlerweile umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung steht. Es fehlen aber nach wie vor verlässliche Aussagen zu den Errichtungsjahren der Systeme. Diese sind jedoch für die Auswertung mit dem gewählten Verfahren zwingend notwendig.

Ich war daher gezwungen auf Datenmaterial zurückzugreifen, welches mir freundlicherweise von zwei nicht näher genannten deutschen Abwasserverbänden zur Verfügung gestellt wurde.

Ich bin jedoch trotzdem überzeugt, dass sich die Ergebnisse dieser Arbeit



## 1. Einführung

problemlos auf mein unmittelbares berufliches Umfeld anwenden lassen, sofern in naher Zukunft genügend vergleichbare Daten vorliegen.

Ein weiteres Ziel ist es, den Vorgang der Datenextraktion aus der verwendeten Datenbank weitgehend zu automatisieren. Die Grundlage bildet jenes Datenmodell, das in den [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012] vorgeschlagen wird. Dieses Datenmodell wurde von einem deutschen Unternehmen kommerziell umgesetzt, und die Perfektion dieser Umsetzung macht der sprichwörtlichen »deutschen Gründlichkeit« alle Ehre. An dieser Stelle gebührt besonderer Dank meinem zweiten Betreuer Dr. Bischoff, dessen Unternehmen mich immer vorbehaltlos bei der Verfassung dieser Arbeit unterstützte.

Der Vorteil für mich ist in diesem Zusammenhang, dass ein offenes System vorliegt, auf das man ohne Einschränkungen zugreifen kann. Im Anhang werden beispielhaft einige Datensätze angeführt, um zu demonstrieren, wie diese für die weitere Bearbeitung aufbereitet werden mussten.

### 1.4. Der methodische Ansatz

Die Methode, mit der das oben definierte Ziel erreicht werden soll, lässt sich wie folgt in mehreren Stufen kurz beschreiben.

#### 1.4.1. Datenerhebung und Speicherung

Die wichtigste Voraussetzung für das verwendete Verfahren ist umfassendes Datenmaterial mit einer heterogenen Zusammensetzung in Bezug auf das Alter der betrachteten Haltungen. Überdies ist es zwingend notwendig, dass eine Zustandsbewertung und Zustandsklassifizierung dieser Haltungen vorliegt.

Es ist unbestritten, dass der Vorgang der Klassifizierung mit Unschärfen behaftet ist. Dieser Umstand wurde bereits diskutiert [D. Schwarz ,2013]. Demzufolge ist es durchaus so, dass durch Mängel bei der Dokumentation von Zuständen zwangsläufig unrichtige Zustandsklassen ermittelt werden. Es ist aber unmöglich, dies im Vorfeld auszuschließen oder sogar bei den nachfolgenden Betrachtungen entsprechend zu würdigen. Man sollte sich aber immer vor Augen halten, dass auch die Einteilung in Schadensklassen international unterschiedlich erfolgt und daher eine gewisse Willkür bei der Definition der jeweiligen Grenzwerte unterstellt werden darf. Dessen ungeachtet war es im

## 1. Einführung

Vorfeld notwendig, möglichst viele repräsentative Daten zusammenzutragen. Besonderer Wert wurde dabei naturgemäß darauf gelegt, von jeder Haltung vollständige Datensätze zu erhalten.

Das Datenmodell muss anbieten, dass mehrere zeitlich unterschiedliche Inspektionen derselben Haltung verwaltet werden können. In Kap.3.1.2 ist kurz beschrieben, mit welcher Software diese Anforderungen erfüllt werden konnten. Der Einfluss von - in einem gewissen Abstand - wiederholten Befahrungen auf die Ergebnisse konnte, vorweg gesagt, qualitativ nicht abgeschätzt werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei Vorhandensein von entsprechenden Datensätzen die Qualität der Prognose verbessert werden kann. Zumindest ist man in der Lage die Entwicklung der Einzelschäden zu beobachten und daraus genauere Schlüsse zu ziehen. Im Zusammenhang mit dem zeitlichen Abstand von wiederholten Inspektionen gehen die Meinungen auseinander, aber ich bin überzeugt, dass gerade diese Arbeit bei der Entscheidungsfindung wertvolle Dienste leisten wird.

Als erschwerend bei der Datenrecherche erwies sich die Tatsache, dass es im Burgenland nicht möglich war, ein einheitliches und kompatibles Datenmodell für die Abgabe des fertigen DLK zu definieren. So waren Erhebungen, welche von anderen Ingenieurbüros durchgeführt worden waren, für diese Arbeit praktisch nicht verwendbar.

### 1.4.2. Zusammenhang zwischen Alter und Haltungszustand

Das Hauptproblem, das sich bei der Ermittlung der Lebensdauer eines Kanalsystems stellt, ist der mehr als dürftige Datenbestand. Der Idealfall wäre unbestritten, wenn ein und dasselbe System in regelmäßigen Abständen kontrolliert und die Ergebnisse protokolliert würden. Damit wäre - abgesehen von der oben erwähnten Problematik in der Klassifizierung - eine Vergleichbarkeit von Zuständen in gewissen Zeitabständen gegeben. Es stellt sich aber sehr rasch heraus, dass ohne Verwendung eines tragfähigen statistischen Verfahrens das gesteckte Ziel nicht erreicht werden kann. In Kap.2.2 sind einige der derzeit verwendeten Verfahren zur Beschreibung des Alterungsprozesses angeführt.

Im Zuge der Recherchen zu diesem Thema stieß ich auf eine Arbeit von [T.Schmidt ,2009], in der ein vielversprechender Ansatz - basierend auf einer Arbeit von [Y.LeGat ,2006] - vorgestellt wurde. Dieser zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass er sich einer relativ einfach beherrschbaren Mathe-

## 1. Einführung

matik bedient. Überdies lassen sich vorhandene Daten komfortabel in das Rechenmodell integrieren. Da auch eine entsprechende programmtechnische Umsetzung bereits vorhanden war, erschien dies für meine Zwecke als am besten geeignet, sodass ich mich entschloss, meine weiteren Überlegungen auf diesem Rechenmodell aufzubauen. Als nachteilig stellte sich später heraus, dass zwar das verwendete Iterationsverfahren meistens stabil konvergiert, aber trotzdem im Vorfeld in den Datenbestand eingegriffen werden muss, um diese Konvergenz sicherzustellen.

Dabei wird unter Verwendung der logistischen Regression in Verbindung mit einer Markow-Kette [A.Markov ,2006] in einem ersten Schritt ein Zusammenhang zwischen dem Alter einer Haltung und der Zustandsklasse derselben hergestellt. Dies impliziert die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der die Haltung innerhalb einer bestimmten Zeit in die nächstschlechtere Schadensklasse wechselt. Wie später noch gezeigt wird (Kap.3.3.2.3), ist die Schadensklasse kein singulärer Wert, sondern hat eine bestimmte Bandbreite. Anders ausgedrückt kann sich der Zustand einer Haltung entweder näher bei der besseren Schadensklasse bewegen oder eben näher bei der nächstschlechteren. Dies ist im Wesentlichen von der Ausprägung der Einzelschäden abhängig.

Für die Restlebensdauer bzw. die Übergangswahrscheinlichkeiten sind daher zwei Grenzwerte möglich, abhängig davon, an welcher Stelle innerhalb der Schadensklasse sich die Einzelhaltung befindet. Um diese Unschärfe zu berücksichtigen bietet sich vordergründig die Möglichkeit an, die jeweiligen Schadensklassen weiter zu unterteilen. Dies scheitert jedoch an der Güte des vorhandenen Datenmaterials. Hinzu kommt, dass unterschiedliche Schadensarten gleichzeitig in die Bewertung eingehen. Im Anhang ist eine Klassifizierung beispielhaft durchgeführt, um diesen Umstand zu dokumentieren.

### 1.4.3. Hinweis zur Terminologie

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass bei dem verwendeten Klassifizierungsverfahren nach ISYBAU die Einzelschäden entsprechend ihrer Ausprägung in Zustandsklassen eingeteilt werden. Danach werden die Einzelschäden zu einer sogenannten »Objektklasse« verdichtet. Auch diese Objektklasse orientiert sich am Schulnotensystem. In dieser Arbeit wurde der Begriff Objektklasse dem Begriff Schadensklasse gleichgesetzt und es ist daher ausschließlich von Schadensklassen die Rede. Meiner Ansicht nach ist dies gerechtfertigt, da die Objektklasse immer vom größten Schaden bestimmt wird. Außerdem soll konsequent dokumentiert werden, dass der bauliche Zustand vor allem von

## 1. Einführung

Rohrschäden bestimmt wird und nicht von Betriebsstörungen.

### 1.4.4. Etablierung eines Prognoseanteils

Das Versagen einer Haltung kann nun definitionsgemäß auf drei Arten erfolgen: statisch (Rohrbruch), betrieblich (Verstopfung) und die Haltung kann schlussendlich undicht werden. Dies ergibt sich aus den in den Normen definierten Schutzziele. In dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch eindeutig auf dem strukturellen Kollaps, da sich dieser aus vorangegangenen (weniger dramatischen) Schäden ableiten lässt und möglicherweise einer zeitlichen Entwicklung unterliegt.

Eine betriebliche Störung, auch wenn diese zu einer schlechten Schadensklasse führt, bedeutet auf der anderen Seite noch nicht das Totalversagen der Haltung. Eine Ausnahme bildet aber dabei der Wurzeleinwuchs, der wohl alle drei Schutzziele gleichermaßen ungünstig beeinflusst.

Der strukturelle Kollaps impliziert natürlich auch den Verlust der Dichtheit. Auch gibt es nicht den Begriff eines »bedingt« dichten Systems. An dieser Stelle verbirgt sich wohl das größte Konfliktpotential, wenn von der Wasserrechtsbehörde »bedingungslos« dichte Systeme gefordert werden.

Der Ausgangspunkt für die Prognose ist somit die Schadensklasse der Haltung. Unter Verwendung des oben beschriebenen Verfahrens wird zunächst das »fiktive« Alter der Haltung bestimmt. Dabei gehen ausdrücklich nur Parameter ein, welche das gesamte System gleichermaßen betreffen. Anders ausgedrückt erhält man eine von allen Schadensbildern abhängige »globale« Verteilung der Übergangswahrscheinlichkeiten. In diesem Schritt gehen jedoch lokale Einflussparameter weitgehend verloren und werden sozusagen statistisch geglättet, weil an dieser Stelle nicht berücksichtigt wird, welche Art eines Schadens für die ermittelte Schadensklasse hauptverantwortlich ist.

Auf dieser Basis werden jetzt die Einzelschäden im Zusammenhang mit ihrer Weiterentwicklung betrachtet und in der Reihenfolge ihrer Entstehung in Beziehung gesetzt. So ist beispielsweise für eine bereits vorhandene Rissbildung im Rohr eine schon früher aufgetretene Verformung sehr wahrscheinlich. Auch wird eine Scherbenbildung oder der Einbruch eines Rohres nicht ohne vorhergehende Rissbildung auftreten. Es werden demzufolge auf Basis der Einzelschäden die Schadensklassen neu definiert und von der Schadensklasse der Haltung weitgehend entkoppelt. Diesem Ansatz folgend ist eine Verformung der erste Schritt zum Einbruch des Rohres und ist daher mit der

## 1. Einführung

Klasse 1 zu besetzen, wobei dann entsprechend unserem Schulnotensystem dem Rohrbruch die Klasse 5 zugewiesen wird. Auf diese Weise sollte es dann möglich sein, den Zeitraum vom ersten Auftreten einer Verformung bis zum Kollaps sehr gut zu bestimmen. Dabei wird auch den Erkenntnissen von [D. Schwarz ,2013] Rechnung getragen und auf eine Berücksichtigung von quantitativen Werten (z.B: Rissbreiten) weitgehend verzichtet.

Wesentlich ist jedoch, dass bei der Bearbeitung der Einzelschäden die selben Überlebensfunktionen verwendet werden wie bei der Betrachtung der Einzelhaltungen. Dies lässt sich sicher dermaßen argumentieren, dass die Entwicklung des größten Einzelschadens für den Wechsel der Haltung in die nächstschlechtere Schadensklasse verantwortlich zeichnet und es dabei keinen Sinn macht, dies statistisch unterschiedlich zu behandeln.

Jener Vorgang, der am schnellsten zum Kollaps führt, bestimmt somit die maximale Restlebensdauer. Naturgemäß beschränkt sich diese Betrachtung auf das strukturelle Versagen. Die Schutzziele »Dichtheit und Betriebssicherheit«, welche ebenfalls die Schadensklasse bestimmen können, lassen sich dabei nur indirekt berücksichtigen, als dass beispielsweise bereits ein Haarriss zu einer undichten Haltung führen kann, dies sich jedoch im Betrieb noch nicht bemerkbar macht.

Für die tatsächliche Ermittlung der Restlebensdauer bedarf es jedoch nach wie vor eines gehörigen Maßes an Interpretation der errechneten Werte, da es bei der Definition im Zusammenhang mit dem Kollaps einer Haltung immer Diskussionen geben wird.

Auch weise ich darauf hin, dass die angestellten Überlegungen keinesfalls zu einer technisch exakten Lösung führen können. Dies ist schon allein wegen des rudimentären Datenbestandes unmöglich. Ziel ist es, den Betreibern von Abwasserbeseitigungsanlagen einen möglichst anschaulichen Anhaltspunkt zu liefern, wie sich in naher Zukunft der Zustand der Systeme ändern könnte. Auch alle Versuche einer möglichst exakten Kalibrierung können meiner Ansicht nach das Ergebnis nur leicht verbessern. Nichtsdestotrotz liegen die gezeigten Ansätze auf der sprichwörtlich »sicheren« Seite und bevorzugen somit unsere Umwelt.

### 1.4.5. Prüfung des Ansatzes und des Verfahrens

Leider muss die Möglichkeit einer deterministischen Prüfung ausgeschlossen werden. Dies scheitert - wie oben bereits beschrieben - am vorhandenen Datenmaterial und an der mangelnden Vergleichbarkeit von mehreren Inspek-

## *1. Einführung*

tionen derselben Haltung zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Eine mögliche Änderung der Vorschriften, Verbesserungen in der technischen Ausstattung sowie unterschiedliche Qualifikationen des Inspektionspersonals mögen diese Argumentation untermauern.

Übrig bleiben daher nur anerkannte statistische Testverfahren, wie beispielsweise der Chi-Quadrat Test, die zwar ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sind, aber im gegenständlichen Fall einzige Möglichkeit der Prüfung darstellen. Es wird daher möglichst heterogenes Datenmaterial für die Bearbeitung verwendet und das Verfahren wird derartig aufgebaut, dass die Ergebnisse mit zunehmend besseren Daten verfeinert werden können.

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

### 2.1. Verfahren zur Klassifizierung

#### 2.1.1. Ausgangssituation

Vor dem Jahr 2004 wurde überwiegend das in Deutschland entwickelte Isybausystem zur Dokumentation von Zustandsdaten verwendet. Das Isybau-Austauschformat gewährleistete einen standardisierten Datenaustausch zwischen Kommunen, Ingenieurbüros und Betreibern. Das Format stellt eine Co-Struktur zur Verfügung, mit der sowohl Bestands- als auch Zustandsdaten von abwassertechnischen Anlagen dokumentiert werden können. Dieses Projekt wurde stetig weiterentwickelt und liegt derzeit in der Version 2013 vor. Am 1.2.2004 erlangte die EN-13508/1 und EN-13508/2 Gültigkeit und kann derzeit als Stand der Technik hinsichtlich der Dokumentation von Zustandsdaten im europäischen Raum angesehen werden. Als wesentliche Neuerung wurde die zwingende Messung bzw. Quantifizierung von Beobachtungen eingeführt. So ist es beispielsweise möglich über die gemessene Rissbreite dem beobachteten Einzelschaden eine Schadensklasse zuzuweisen.

Die Erfahrung des Verfassers ist jedoch jene, dass die derzeit noch in Verwendung befindlichen Kamerasysteme noch nicht mit den benötigten Messeinrichtungen ausgestattet sind, sodass die Qualität der Befahrung wiederum sehr stark von der Qualifikation und dem »Augenmaß« des Bedienungspersonals abhängt - dies ist eigentlich ein Umstand, den die neue Norm entschärfen wollte. Es sei aber auch hinzugefügt, dass sich die Situation laufend verbessert. Der Ansatz ist mit Sicherheit zielführend, weil die Ermittlung der sogenannten Einzelschadensklassen automatisiert erfolgen kann und im Weiteren eine objektive Vergleichsmöglichkeit gegeben ist und somit eine Aussage über die Zustandsentwicklung getroffen werden könnte. Schlussendlich sind diese Daten die Grundlage für alle weiteren Betrachtungen und somit die Basis für die Beurteilung des Zustands des gesamten Systems.

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

### 2.1.2. Aktuelle Verfahren in der Zustandserfassung

#### 2.1.2.1. Videoinspektion

Während die Daten im Isybau96-Format noch innerhalb einer einfach editierbaren Textdatei weitergegeben wurden, werden aktuell alle Beobachtungen im sogenannten XML-Format gespeichert. Dies lässt zwar eine wesentliche größere Datendichte zu, Eingabefehler im Feld lassen sich aber nur schwer korrigieren.

Zur Illustration sind an dieser Stelle zwei Musterdatensätze (siehe Abb. 2.1 und Abb. 2.2) dargestellt.

| H 0601 |            | 15.10.2009     |             |                      |          |           |   |         |
|--------|------------|----------------|-------------|----------------------|----------|-----------|---|---------|
| H      |            |                |             |                      |          |           |   |         |
| H1     | 15.09.2009 | Oberwart       |             | DCC-Prüftechnik GmbH |          |           |   |         |
| H2     | 50000      | Grazer Strasse |             |                      |          |           |   |         |
| H3     | 50000      | 50000          | 11589       | 1                    | 900 1350 | Bcto kcin | 0 | 69.98 1 |
| H4     | 50000      | -0,5           | 0           |                      |          | HA        |   |         |
| H4     | 50000      | 0              | 0           |                      |          | PA        |   |         |
| H4     | 50000      | 16,09          | 00033700CDR | 00033700.1           |          | SN-O3     |   |         |
| H4     | 50000      | 18,57          | 00043600CDR | 00043600.1           |          | SN-O3     |   |         |
| H4     | 50000      | 33,47          | 00063700CDR | 00063700.1           |          | SN-O3     |   |         |
| H4     | 50000      | 45,7           | 00090800CDR | 00090800.1           |          | SN-L3     |   |         |
| H4     | 50000      | 54,76          | 00104800CDR | 00104800.1           |          | SN-L3     |   |         |
| H4     | 50000      | 58,97          |             | 121100               |          | PE        |   |         |
| H4     | 50000      | 69,48          |             | 122800               |          | EH        |   |         |
| H4     | 50000      | 69,48          |             | 0                    |          | HL        |   | 69.98   |

| Legende   |                              |
|---|------------------------------|
| <span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>      | Haltungsname                 |
| <span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>  | Startschacht                 |
| <span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>   | Endschacht                   |
| <span style="background-color: lightorange; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> | Stationierung                |
| <span style="background-color: lightgrey; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>   | Dimension / Material         |
| <span style="background-color: lightpurple; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> | Kodierung                    |
| <span style="background-color: tan; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>         | Profilart                    |
| <span style="background-color: cyan; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>        | Haltungs- / Inspektionslänge |
| <span style="background-color: lightgrey; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>   | Timer / Speichermedium       |
| <span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>      | Fotonummer                   |

Abbildung 2.1.: Beispieldatensatz ISYBAU96



## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

```
<RZustand>
<Station>0.00</Station>
<Timecode>00000001</Timecode>
<InspektionsKode>BCD</InspektionsKode>
<Charakterisierung1>XP</Charakterisierung1>
<Verbindung>0</Verbindung>
</RZustand>
<RZustand>
<Station>0.00</Station>
<Timecode>00010401</Timecode>
<InspektionsKode>BDD</InspektionsKode>
<Charakterisierung1>B</Charakterisierung1>
<Verbindung>0</Verbindung>
<Quantifizierung1Numerisch>10</Quantifizierung1Numerisch>
<Streckenschaden>A</Streckenschaden>
<StreckenschadenLfdNr>1</StreckenschadenLfdNr>
<Klassifizierung>2</Klassifizierung>
<FotoDatei>1_1_2_10112011_073535_A.JPG</FotoDatei>
<FotoSpeichermedium>WDT</FotoSpeichermedium>
<Fotonummer>HF0000</Fotonummer>
</RZustand>
```

**Abbildung 2.2.:** Beispieldatensatz XML-ISYBAU2010

In dieser Arbeit werden Daten aus beiden Formaten verarbeitet. Auf die Problematik der schlechten Abwärtskompatibilität wird etwas später genauer eingegangen.

Da die genaue Erfassung und Dokumentation der Einzelschäden von essentieller Bedeutung für das weitere Verfahren ist, werden die aktuellsten Entwicklungen auf diesem Gebiet kurz zusammengefasst.

Im Bereich der Kamertechnik haben sich zwei Verfahren durchgesetzt:

- \* Digitaler Videofilm (Format mpg)
- \* Hochauflösende Einzelfotos (System Panorama)

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

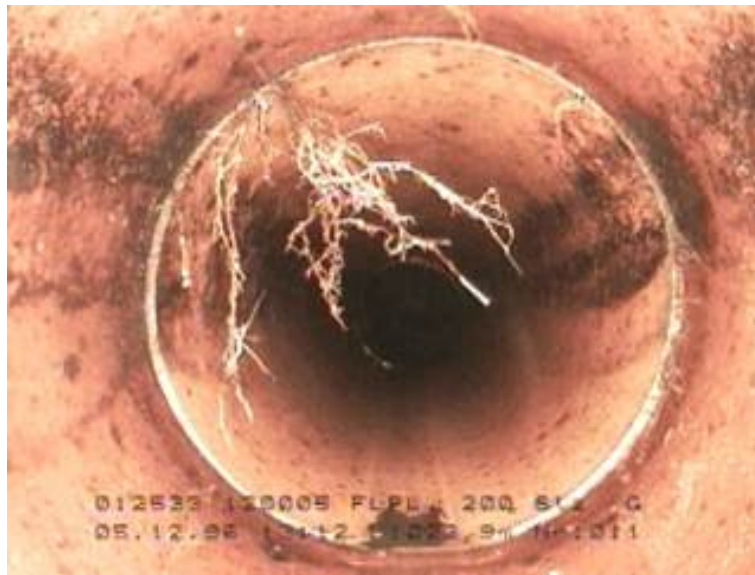


**Abbildung 2.3.:** Inspektionskamera [de.academic.ru 2012]

Bei ersterem wird eine, auf einem Fahrwerk montierte, Videokamera durch den Kanal geschickt (siehe Abb. 2.3), welche den gesamten Aufenthalt in der Haltung mitfilmt. Nahezu alle Kamerasysteme bieten mittlerweile einen 320°-Rundumblick an, sodass eine Haltung entlang ihres gesamten Umfangs überprüft werden kann. Die derzeit übliche Auflösung beträgt 752 x 582 Bildpunkte und ist im Vergleich zu den mittlerweile gängigen Formaten (HD etc.) nicht unbedingt üppig. Das Bedienungspersonal dokumentiert sozusagen »Live« die Beobachtungen am Computer im Begleitfahrzeug. Einzelschäden werden zusätzlich als Digitalfoto, logischerweise in derselben Auflösung, erfasst. Da die Versorgungsleitung vom Kameraschlitten gezogen werden muss, ist die Reichweite dieses Systems naturgemäß durch das Gewicht und die Reibung der Leitung begrenzt. Viele Produkte sind mittlerweile auch mit einer Rissbreitenmessvorrichtung ausgestattet, sodass einer ordentlichen Quantifizierung der Beobachtungen Rechnung getragen werden kann. Nicht zu vernachlässigen und zu unterschätzen ist das Datenvolumen, welches hier anfällt und in der Verwaltung zu einem nicht unerheblichen Problem werden kann. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens ist, dass eine Prüfung und gegebenenfalls eine Korrektur der übergebenen Daten nur mit einem großen Aufwand und spezieller Software möglich ist. Man ist daher der Qualifikation des Bedienungspersonals übermäßig stark ausgeliefert. Beispielhaft ist ein Digitalfoto in der Abb. 2.4 dargestellt.

Das zweite System arbeitet mit einem mittlerweile patentgeschützten Kugelbildscanner (siehe Abb. 2.5). Die dabei aufgenommenen halbsphärischen Bilder können rechnerisch zu einem dreidimensionalen Modell der Haltung zusammengesetzt werden. Beeindruckend ist in diesem Fall die Höhe der

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft



**Abbildung 2.4.:** Wurzeinwuchs Höhenberger Engineering - Befahrung 2009

Bildauffösung und die Möglichkeit, die Inspektion im Büro zu bearbeiten und zu kontrollieren. Auch die Fahrtgeschwindigkeit (Herstellerangabe = 35cm/sec) ist deutlich höher als bei anderen Verfahren. Der größte Vorteil liegt



**Abbildung 2.5.:** Kugelbildscanner [IBAK Katalog 2012]

mit Sicherheit in der maßstabsgetreuen Erfassung und Abwicklung der Roh-rinnenseite (siehe Abb. 2.6). Rissbreiten, einragende Anschlüsse und ähnliche betriebs - und strukturelevante Sachverhalte können so sehr genau vermessen und dokumentiert werden. Leider unterstützen aufgrund der komplexen Verhältnisse des Datenformats derzeit nur sehr wenige Softwarehersteller dieses Produkt.

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

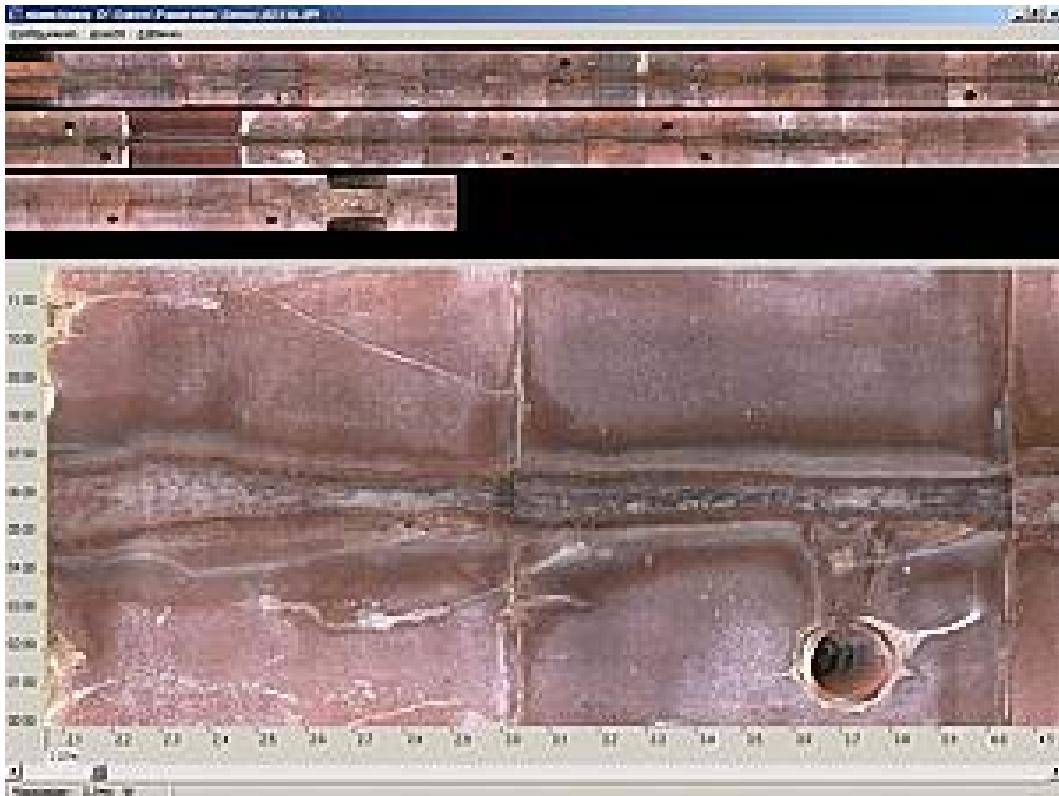


Abbildung 2.6.: 3D-Abwicklung einer Haltung [IBAK Katalog 2012]

### 2.1.2.2. Dichtheitsprüfung und andere

Im Zuge der Abnahme von neu gebauten Kanälen ist ein Nachweis der Dichtigkeit vorgeschrieben. Die Prüfung der Dichtigkeit ist jedoch bei der Zustandsbewertung nicht unbedingt zielführend, da maximal zwei Zustände festgestellt werden können - dicht oder eben undicht. Auch thermografische oder sonar-basierte Verfahren sind eher Sonderlösungen, die für einen flächendeckenden Einsatz eher nicht vorgesehen sind.

### 2.1.3. Durchführung der Klassifizierung

Der Vorgang der Klassifizierung soll kurz an einem Beispiel erläutert werden. Die Ausgangsdaten werden aus dem Videinspektionsfile übernommen und sehen sinngemäß wie in Abb. 2.1 oder Abb. 2.2 aus. Zusätzlich werden natürlich auch die Stammdaten (z.B. Material und Nennweite) der Haltung protokolliert. In Verbindung mit dem Gefälle und der Art des transportierten Mediums erhält man eine sehr gute Beschreibung des Zustandes der Haltung und ist im

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

nächsten Schritt in der Lage eine Zustandsbewertung vorzunehmen bzw. das Ergebnis dieser Bewertung in Schadensklassen einzuordnen. In diesem Punkt unterscheiden sich nun die einzelnen Verfahren. Im Detail wurde diese Problematik bereits in [T. Ertl , 2007] behandelt und wird hier lediglich noch einmal kurz zusammengefasst.

### 2.1.3.1. Verfahren nach DWA

Die Zustandsklassifizierung erfolgt nach dem Merkblatt DWA-M 149-3 (Stand 2010). Die folgenden Ausführungen werden dem oben genannten Merkblatt sinngemäß entnommen. Es müssen drei Kriterien betrachtet werden:

- der größte Einzelschaden
- Häufigkeit und Ausmaß der weiteren Schäden
- Längenausdehnung der Einzelschäden

Es werden laut Abb. 2.7 fünf Zustandsklassen hinsichtlich der Schwere der Schäden definiert. Die strenge Einordnung in Klassen schafft die Voraussetzung für eine objektive Vergleichbarkeit sowohl der Haltungen untereinander als auch zwischen mehreren Inspektionen derselben Haltung (Inspektionshistorie). Zur Klassifizierung werden Tabellen verwendet, die nach relevanten Einflussfaktoren wie z.B. Material und Nennweite, differenziert sind. Jeder Schaden beeinflusst nun abhängig von seiner Ausprägung unterschiedlich die drei sogenannten Schutzziele:

- Dichtheit
- Standsicherheit
- Betriebssicherheit

Es müssen daher für jeden Einzelschaden drei (meist unterschiedliche) Zustandsklassen bestimmt werden.

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

| Hauptkode | Charakterisierung |         | Anforderungen |   |   | Maßeinheit | Zustandsklasse    |     |           |           |             | Geltungsbereich |                   |
|-----------|-------------------|---------|---------------|---|---|------------|-------------------|-----|-----------|-----------|-------------|-----------------|-------------------|
|           | Ch1               | Ch2     | D             | S | B |            | 0                 | 1   | 2         | 3         | 4           |                 |                   |
| BAB       | A                 | A       | x             |   |   | mm         |                   |     |           |           |             | alle            |                   |
|           | B,C               | A,B,C,D | x             |   |   |            | mm                | >=2 | >=1<br><2 | <1        |             |                 |                   |
|           |                   | A       | x             |   |   |            | mm                | >=8 | >=5<br><8 | >=3<br><5 | >=1<br><3   | <1              | allgemein         |
|           |                   |         | x             |   |   |            | mm                | >=3 | >=2<br><3 | >=1<br><2 | >=0,5<br><1 | <0,5            | <=DN300           |
|           |                   |         | x             |   |   |            | mm                | >=5 | >=3<br><5 | >=2<br><3 | >=1<br><2   | <1              | >DN300<br><=DN500 |
|           |                   |         | x             |   |   |            | mm                | >=8 | >=4<br><8 | >=3<br><4 | >=2<br><3   | <2              | >DN500<br><=DN700 |
|           |                   | B       | x             |   |   |            | mm                |     |           |           |             |                 | alle              |
|           | C,D               | x       |               |   |   | mm         | Einzelbetrachtung |     |           |           |             |                 |                   |

**Abbildung 2.7.:** Zustandsklassen Rissbildung [*Merkblatt DWA M 149-3 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden*, 2010]

Beispielhaft ist eine entsprechende Tabelle in Abb. 2.7 zur Illustration angegeben. Konkret beschreibt hier die Charakterisierung 1 die Art der Rissbildung und die Charakterisierung 2 den Verlauf derselben. Die gemessene Rissbreite bestimmt sodann die Zustandsklasse der jeweiligen Anforderung. Die Objektklasse K bzw. die Zustandsklasse der gesamten Haltung ist gemäß dem Merkblatt die schlechteste Zustandsklasse des größten Einzelschadens. Dieses Vorgehen führt in dieser Phase der Klassifizierung leider dazu, dass wegen eines einzigen großen Schadens der Gesamtzustand der betroffenen Haltung als mangelhaft ausgewiesen wird. Eine Berücksichtigung der weiteren Schäden in ihrer Häufigkeit und Ausdehnung sowie von relevanten Randbedingungen erfolgt erst in einem zweiten Schritt.

### 2.1.3.2. Verfahren nach ISYBAU

Da dieses Verfahren grundlegend die weitere Vorgehensweise beeinflusst, wird es an dieser Stelle etwas ausführlicher beschrieben. Auch hier erfolgt die Zustandsklassifizierung jeweils für die Schutzziele Dichtheit, Standsicherheit und Betriebssicherheit in Abhängigkeit von der Schadensart und des Schadensausmaßes.

Konkret sind gemäß [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb*

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

von *abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes* ,2012] drei Schritte vorgesehen:

- Klassifizierung des Einzelzustandes
- Bewertung der Randbedingungen des Einzelzustandes
- Beurteilung des Objektes bzw. der Haltung

Im ersten Schritt erhält man abhängig von der Ausprägung des Schadens über entsprechende Tabellen (z.B. Abb. 2.8) die jeweiligen vorläufigen Einzelschadensklassen. Die Ähnlichkeit mit den Tabellen der DWA ist durchaus gewollt und nicht zufällig (vgl. Abb. 2.8). Jeder Einzelschadensklasse ist eine vorläu-

| Hauptkode | Charakterisierung |         | Anforderungen |   |   | Maßeinheit | Zustandsklasse |       |      |      |      |  |
|-----------|-------------------|---------|---------------|---|---|------------|----------------|-------|------|------|------|--|
|           | Ch1               | Ch2     | D             | S | B |            | 1              | 2     | 3    | 4    | 5    |  |
| BAB       | A                 | A,B,C,D | x             |   |   | mm         | alle           |       |      |      |      |  |
|           |                   |         | x             |   |   | mm         |                |       |      |      |      |  |
|           | B                 | A,B,C,D | x             |   |   | mm         |                |       | alle |      |      |  |
|           | B,C               | A,C,D   | x             |   |   | mm         | <0,5           | >=0,5 | >=2  | >=5  | >=10 |  |
|           |                   | B       | x             |   |   | mm         | alle           |       |      |      |      |  |
|           | C                 | A,B,C,D | x             |   |   | mm         |                |       |      | alle |      |  |

**Abbildung 2.8.:** Zustandsklassen Rissbildung [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes* ,2012]

fige Schadenszahl zugeordnet (vgl. Abb. 2.9). Über die Berücksichtigung von diversen Randbedingungen (Abwasserart, Bodenart etc.) gelangt man zu den endgültigen Einzelschadensklassen für das jeweilige Schutzziel. Dabei wird eine vorher definierte Anzahl von Schadenspunkten (vgl. Abb. 2.10) bei ungünstiger Beeinflussung zur vorläufigen Schadenszahl addiert oder eben subtrahiert, sofern der Einfluss der jeweiligen Randbedingung nicht den Zustand verschlechtert. Beispielhaft sind einige Fälle in Abb. 2.10 dargestellt. Die endgültigen Einzelschadensklassen ergeben sich dann wie in Abb. 2.11 dargestellt.

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

| vorläufige Schadensklasse | vorläufige Schadenszahl |
|---------------------------|-------------------------|
| 1                         | 10                      |
| 2                         | 100                     |
| 3                         | 200                     |
| 4                         | 300                     |
| 5                         | 400                     |

**Abbildung 2.9.:** vorläufige Schadensklassen [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012]

| Randbedingung       | Kriterium                | Zusatzpunkte |                  |                     |
|---------------------|--------------------------|--------------|------------------|---------------------|
|                     |                          | Dichtheit    | Stand-sicherheit | Betriebs-sicherheit |
| Entwässerungssystem | Regenwasser              | -30          |                  | 0                   |
|                     | Schmutzwasser            | 30           | Nicht relevant   | 40                  |
|                     | Mischwasser              | 30           |                  | 40                  |
| Abwasserart         | wassergefährdende Stoffe | 150          | Nicht relevant   | Nicht relevant      |

**Abbildung 2.10.:** Randbedingungen [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012]

| endgültige Schadensklasse | endgültige Schadenszahl |
|---------------------------|-------------------------|
| 1                         | 10 - 99                 |
| 2                         | 100 - 199               |
| 3                         | 200 - 299               |
| 4                         | 300 - 399               |
| 5                         | $\geq 400$              |

**Abbildung 2.11.:** endgültige Schadensklassen [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012]

Die vorläufige Objektzahl entspricht weiter der größten endgültigen Einzelschadenszahl. Für die endgültige Klassifizierung des Objektes (Haltung oder Leitung) ist im letzten Schritt noch eine Verknüpfung der Einzelschäden mit der zugehörigen Längenausdehnung notwendig. Punktuelle Schäden werden dabei generell mit einer Länge von 0.3 m berücksichtigt. Die Berechnung der



## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

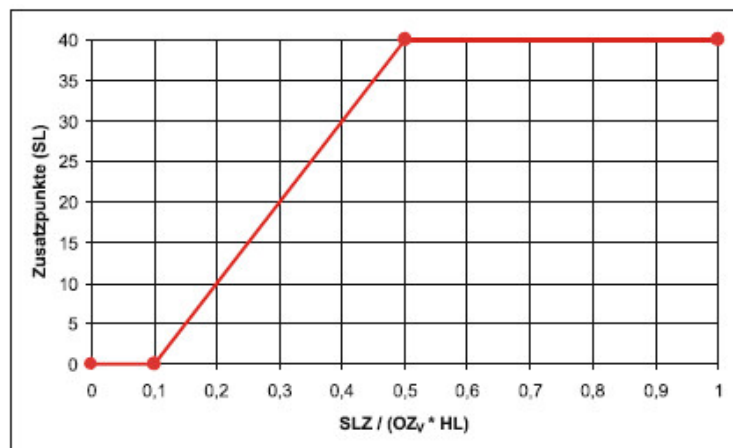
Schadenslängenzahl SLZ erfolgt nach folgender Formel:

$$SLZ = \sum_{i=1}^n MaxSZE_i * dl_i \quad (2.1)$$

In Gleichung 2.1 bedeutet:

- SLZ : Schadenslängenzahl
- MaxSZE<sub>i</sub> : maximale endgültige Einzelschadenzahl
- dl<sub>i</sub> : zugehörige Schadenslänge

Die endgültige Objektzahl setzt sich dann schlussendlich aus der vorläufigen Objektzahl OZ<sub>v</sub> und den Zusatzpunkten SL zusammen, welche aus der Schadenslängenzahl ermittelt werden (vgl. Abb.2.12 und Abb. 2.13).



**Abbildung 2.12.:** Ermittlung der Zusatzpunkte [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012]

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

|  |  |
|--|--|
| $\left(\frac{SLZ}{OZ_v \times HL}\right) \leq 0,1$       | SL = 0   |
| $0,1 < \left(\frac{SLZ}{OZ_v \times HL}\right) \leq 0,5$ | $SL = \left(\frac{SLZ}{OZ_v \times HL}\right) \times 100 - 10$ |
| $\left(\frac{SLZ}{OZ_v \times HL}\right) > 0,5$          | SL = 40  |

**Abbildung 2.13.:** Gleichungen zur Ermittlung der Zusatzpunkte [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012]

In Abb. 2.13 bedeutet:

- HL : Zusatzpunkte lt. Abb. 2.12
- SLZ : Schadenslängenzahl lt. Gl.2.1
- $OZ_v$ : vorläufige Objektzahl
- SL : Schadenszahl

Die endgültige Objektzahl  $OZ_e$  ergibt sich somit zu

$$OZ_e = OZ_v + SL \quad (2.2)$$

Für die Ermittlung der Objektklasse gilt ebenfalls die Abb. 2.11. Weitere Details zur Berechnung können [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012] entnommen werden.

### 2.1.4. Vergleich der Verfahren und der Ergebnisse

In der Abb. 2.14 [T. Ertl , 2007] ist ersichtlich, dass die Schadensklassen gegenläufig definiert sind.

| DWA-M 149-3                            | SK | SK | ISYBAU 2006                        |
|--|----|----|------------------------------------|
| Sehr starker Mangel (Gefahr in Verzug) | 0  | 5  | Umgehender Handlungsbedarf         |
| Starker Mangel                         | 1  | 4  | Kurzfristiger Handlungsbedarf      |
| Mittlerer Mangel                       | 2  | 3  | Mittelfristiger Handlungsbedarf    |
| Leichter Mangel                        | 3  | 2  | Langfristiger Handlungsbedarf      |
| Geringfügiger Mangel                   | 4  | 1  | Ohne unmittelbaren Handlungsbedarf |
| Keine Mängel                           | 5  | 0  | Kein Handlungsbedarf – mängelfrei  |

Abbildung 2.14.: Einteilung der Schadensklassen [T. Ertl , 2007]

Zusätzlich unterscheidet sich in einigen Punkten die Einordnung der Einzelschäden in die Einzelschadensklassen (Abb. 2.15).

| Hauptcode | Charakterisierungen |   | Kriterien |   |   | Einheit | Einzelschadensklasse |      |      |      |      | Geltungsbereich |
|-----------|---------------------|---|-----------|---|---|---------|----------------------|------|------|------|------|-----------------|
|           | 1                   | 2 | D         | S | B |         | SK 0                 | SK 1 | SK 2 | SK 3 | SK 4 |                 |
|           |                     |   |           |   |   |         | SK 5                 | SK 4 | SK 3 | SK 2 | SK 1 |                 |
| BAA       | A,B                 |   |           | x |   | % DN    | ≥ 7                  | ≥ 4  | ≥ 3  | ≥ 1  | < 1  | biegesteif      |
|           |                     |   |           | x |   | % DN    | ≥ 15                 | ≥ 6  | < 6  |      |      | biegesteif      |
|           |                     |   |           | x |   | % DN    | > 15                 | ≥ 10 | ≥ 6  | ≥ 2  | < 2  | biegeweich      |
|           |                     |   |           | x |   | % DN    | ≥ 15                 | ≥ 10 | ≥ 6  | ≥ 2  | < 2  | biegeweich      |
|           |                     |   |           |   | x | % DN    | ≥ 50                 | ≥ 40 | ≥ 25 | ≥ 10 | < 10 |                 |
|           |                     |   |           |   | x | % DN    | ≥ 50                 | ≥ 40 | ≥ 25 | ≥ 10 | < 10 |                 |

Abbildung 2.15.: Vergleich der Einzelschadensklassen - DWA(weiß) / ISYBAU (grau)[T. Ertl , 2007]

Für die vorliegende Arbeit ergeben sich daraus folgende Schlussfolgerungen: Zum einen sind die ermittelten Objektklassen nicht unmittelbar vergleichbar, da das Verfahren nach Isybau bereits an dieser Stelle wesentlich mehr

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

Randbedingungen berücksichtigt. Überdies können sich zum Teil erhebliche Differenzen aus den unterschiedlichen Einzelschadensklassen ergeben.

Grundsätzlich sind die beiden Verfahren natürlich gleichwertig. Bei der Sichtung und Bearbeitung des Datenpools hat sich jedoch herausgestellt, dass alle Haltungen nach Isybau klassifiziert worden waren. Zudem ist die Berechnung der Objektklasse nach DWA M 149-3 wesentlich aufwendiger. Dies betrifft vor allem die Ermittlung der Randbedingungen, bei der man Informationen benötigt, die gerade bei alten Systemen fehlen. Da es auch nicht ohne weiteres möglich ist die Ergebnisse aus beiden Verfahren zu kombinieren gibt der Autor dem Verfahren nach Isybau den Vorzug.

Für die weitere Bearbeitung wird daher streng darauf geachtet, dass entweder nur Rohdaten (originale XML-Files) zur Auswertung herangezogen werden oder eben bereits ausgewertete und nach Isybau 2006 klassifizierte Haltungen.

### 2.1.5. Verfahren in anderen Ländern

Ergänzend zum deutschsprachigen Raum sollen noch die Verfahren anderer europäischer Länder kurz zusammengefasst werden.

#### 2.1.5.1. Norwegen

Die folgenden Ausführungen wurden vollinhaltlich [T.Schmidt ,2009] entnommen und sollen das Klassifizierungssystem in Norwegen illustrieren. Alle aufgetretenen Schäden werden hier gemäß ihrer Ausprägung mit Zustandsnoten (1=besten, 4=schlechtesten) bewertet. Anschließend wird über eine Tabelle ein Wichtungsfaktor (Abb. 2.16) bestimmt, mit dem der Schaden zur Ermittlung der abschließenden Wertungszahl multipliziert wird. In der folgenden Tabelle (Abb. 2.16) sind einige typische Kanalschadensbilder und Wichtungsfaktoren zusammengestellt.

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

| Schaden        | Wichtungsfaktor P |        |        |        |
|----------------|-------------------|--------|--------|--------|
|                | Grad 1            | Grad 2 | Grad 3 | Grad 4 |
| Risse          | 0                 | 1      | 8      | 12     |
| Korrosion      | 0                 | 0      | 3      | 9      |
| Deformation    | 0                 | 1      | 2      | 2      |
| Wurzeleinwuchs | 0                 | 1      | 5      | 9      |
| Infiltration   | 0                 | 1      | 6      | 9      |

**Abbildung 2.16.:** Wichtungssystem in Norwegen [T.Schmidt ,2009]

Die sogenannte Schadenszahl wird mit folgender Formel ermittelt:

$$S = 100 * (P_1 * L_1 + P_2 * L_2 + .. + P_N * L_N) / L \quad (2.3)$$

- L : untersuchte Länge
- P<sub>i</sub> : Gewichtungsfaktoren
- L<sub>i</sub> : Schadensanzahl oder Schadenslänge

| Zustandsklasse  | 1        | 2      | 3        | 4             | 5           |
|-----------------|----------|--------|----------|---------------|-------------|
|                 | sehr gut | gut    | schlecht | sehr schlecht | unbrauchbar |
| Intervall von S | 0<S<5    | 5<S<15 | 15<S<30  | 30<S<70       | 70<S        |

**Abbildung 2.17.:** Zustandsklassen in Norwegen [T.Schmidt ,2009]

Das norwegische System orientiert sich hier offensichtlich nicht nur am schwersten Einzelschaden, sondern auch an Streckenschäden bzw. deren Längsausdehnung. Da eine starke Ähnlichkeit mit den konventionellen deutschen Verfahren gegeben ist, eignen sich diese Daten auch gut für langfristige Zustandsprognosen beispielsweise in [T.Schmidt ,2009].

### 2.1.5.2. Großbritannien

Das in Großbritannien verwendete Zustandsklassifizierungssystem ist im [WRc ,2001] beschrieben. Die Klassifizierung erfolgt hier streng nach strukturellen und betrieblichen Gesichtspunkten. Den erfassten Schäden wird hier in Abhängigkeit vom Schadensausmaß automatisch über ein Computerprogramm eine

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

Punktezahl zugeordnet. Somit ist es möglich sowohl den Spitzenwert (größter Einzelschaden), als auch den Gesamt- und Durchschnittswert zu ermitteln. Die Klassenzuordnung orientiert sich hierbei im Zusammenhang mit der strukturellen Integrität am größten Einzelschaden, während bei betrieblichen Schäden jene Klasse maßgebend wird, die sich aus der Bestimmung des größten Einzelschadens bzw. des entsprechenden Durchschnittswertes ergeben hat. Die folgende Tabelle (Abb. 2.18) möge dies verdeutlichen.

| Zustandsklasse | Strukturell | Betrieblich |              |
|----------------|-------------|-------------|--------------|
|                | Spitzenwert | Spitzenwert | Durchschnitt |
| 1              | < 10        | < 1         | < 0.5        |
| 2              | 10 - 39     | 1 - 1.9     | 0.5 - 0.9    |
| 3              | 40 - 79     | 2 - 4.9     | 1 - 2.4      |
| 4              | 80 - 164    | 5 - 9.9     | 2.5 - 4.9    |
| 5              | > 164       | > 10        | > 5          |

**Abbildung 2.18.:** Zustandsklassen in Großbritannien [T.Schmidt ,2009]

## 2.2. Modellierung des Alterungsprozesses

Im Folgenden soll ein Überblick darüber gegeben werden, welche Möglichkeiten derzeit üblich sind, um den Alterungsprozess von unterirdischer Infrastruktur im Allgemeinen zu beschreiben. Alle zur Diskussion stehenden Verfahren verfolgen das Ziel, brauchbare Prognosemodelle für die Lebensdauer unserer unterirdischen Infrastruktur bereitzustellen. Überdies sind sämtliche Verfahren mit der Tatsache konfrontiert, dass nur sehr wenig Langzeitdaten zur Verfügung stehen, die es erlauben, ein geschlossenes Prognoseverfahren zu etablieren. Es haben sich daher zwei grundlegende Methoden herauskristallisiert, welche an dieser Stelle kurz beschrieben werden sollen.

### 2.2.1. Untersuchung mittels logistischer Regression

Bei der in diesem Unterkapitel beschriebene Methode handelt es sich definitionsgemäß um ein deterministisches Modell. Die logistische Regression [V.Bewick und J.Ball ,2005] erlaubt die Berechnung eines binären Ergebnisses  $y$  (z.B. 0 für den schlechten Zustand einer Haltung und 1 für einen guten Zustand) in Abhängigkeit eines Satzes von  $x_1, \dots, x_p$  Einflussparametern. Der Anteil  $\pi$  der Grundgesamtheit, bei dem  $y=1$  ist, wird wie folgt definiert:

$$\pi = P(y = 1) \quad (2.4)$$

Umgekehrt ergibt sich der Anteil bei dem  $y=0$  ist zu:

$$1 - \pi = P(y = 0) \quad (2.5)$$

Die Chance bei einer Stichprobe Haltungen mit dem Zustand  $y=1$  anzutreffen, folgt daraus mit

$$\frac{\pi}{1 - \pi} \quad (2.6)$$

Für diese Annahmen hat [M.Dayton ,1992] eine Gleichung (2.7) angegeben, die auch als »logit-function« bekannt ist:

$$\ln\left[\frac{P(y = 1 \parallel x_1, \dots, x_p)}{1 - P(y = 1 \parallel x_1, \dots, x_p)}\right] = \alpha + \beta_1 * x_1 + \dots + \beta_p * x_p \quad (2.7)$$

Unter Verwendung einer exponentiellen Transformation lässt sich die Gleichung 2.7 auflösen und es kann die Wahrscheinlichkeit gemäß Gl.2.8 errechnet werden, mit der Haltungen mit  $y=1$  abhängig von den Einflussparametern in der Grundgesamtheit vorhanden sind.  $\alpha$  beschreibt in diesem Zusammenhang

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

den Abschnitt auf der Y-Achse und  $\beta_1 \dots \beta_p$  sind die dazugehörigen Regressionsparameter.

$$P(y = 1 \parallel x_1 \dots x_p) = \frac{e^{\alpha + \sum_{j=1}^p \beta_j * x_j}}{1 + e^{\alpha + \sum_{j=1}^p \beta_j * x_j}} \quad (2.8)$$

Die Werte  $\alpha$  und  $\beta$  müssen nun unter Verwendung des vorhandenen Datenmaterials geschätzt werden. Dazu wird die »maximum likelihood estimation« (MLE) verwendet. In der Kurzfassung wird sie folgendermaßen formuliert:

$$MLE = L = \prod_{i=1}^n P(y_i \parallel x_{p1}, \dots, x_{pi}) \quad (2.9)$$

Die nächste Aufgabe ergibt sich noch durch die Tatsache, dass die Signifikanz der angenommenen Einflussparameter nachgewiesen werden muss. Einerseits wird der Einfluss der Ausgangsparameter durch einen Vergleich zwischen zwei Gruppen a und b gemäß Formel 2.10 abgeschätzt:

$$OR = \frac{\left(\frac{\pi}{1 - \pi}\right)_a}{\left(\frac{\pi}{1 - \pi}\right)_b} \quad (2.10)$$

Dieses Verhältnis wird als Quotenverhältnis oder »odds ratio« bezeichnet. [V.Bewick und J.Ball ,2005] konnte zeigen, dass die Regressionsparameter ( $\beta$ ) für diese Berechnung gemäß Gleichung 2.11 herangezogen werden können:

$$OR = e^\beta \quad (2.11)$$

OR kann dabei drei Wertebereiche annehmen - OR = 1 bedeutet, dass der Einfluss in beiden Gruppen gleich ist, OR > 1 deutet auf einen erhöhten Einfluss in Gruppe a hin, während OR < 1 einen erhöhten Einfluss in Gruppe b unterstellt. Andererseits verwendet man statistische Tests um die Signifikanz der Einzeleinflüsse zu ermitteln. Ein gebräuchliches Standardverfahren ist in diesem Zusammenhang der Wald-Test:

$$Wald_j = \left(\frac{\beta_j}{S.E_j}\right)^2 \quad (2.12)$$

In Gleichung 2.12 bedeutet  $\beta$  den jeweiligen Regressionsparameter und  $S.E_j$  die dazugehörige Standardabweichung. Dies erlaubt jedoch nicht die Interaktion zwischen verschiedenen Parametern zu untersuchen. Für diesen Fall eignet sich unter anderem der »likelihood ratio test«.

$$LR = -2 * (\ln L_0 - \ln L_1) \quad (2.13)$$



## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

Dabei wird schlicht die Devianz eines multivariaten Regressionsmodells mit ( $L_1$ ) und ohne ( $L_0$ ) Einfluss eines oder mehrerer Parameter verglichen. Dieser Test lässt sich formal mit der Fehlerquadratsumme in der klassischen Regressionsanalyse vergleichen. So wurden im Rahmen einer belgischen Studie [EV Ana Jr & W Bauwens ,2009] und [Boonen und Gueldre ,2009] mit dem eben beschriebenen Modell aus elf Einflussparametern jene vier Parameter bestimmt, welche für den Alterungsprozess maßgeblich verantwortlich sind.

Der Einfluss des Rohrmaterials, des Rohralters, der Rohrlänge und des Gefälles stellte sich hierbei als signifikant heraus. Folgende Vereinfachungen mussten jedoch bei der Berechnung in Kauf genommen werden: die Zustandsklassen 1-3 wurden als 'in Ordnung' eingestuft, die Zustandsklassen 4-5 als 'schlecht'. Auch der Einfluss des Alters wurden lediglich so erfasst, dass ausschließlich zwischen vor und nach 1940 errichteten Haltungen unterschieden wurde. Weitere Details zum verwendeten Verfahren können den erwähnten Artikeln [EV Ana Jr & W Bauwens ,2009] und [Boonen und Gueldre ,2009] entnommen werden.

Eine ähnliche Untersuchung nach den im Prinzip selben statistischen Überlegungen ist in [R.Younis ,2010] beschrieben, wo Daten der kanadischen Stadt Niagara Falls ausgewertet wurden. Hier ist jedoch anzumerken, dass der Einfluss des Rohralters wesentlich genauer berücksichtigt wurde. Schlussendlich zeigen aber die prognostizierten Zustandswerte eine sehr gute Übereinstimmung zu den Beobachtungen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich dieses Verfahren gut dazu eignet, den Anteil von schadhafte Haltungen (Zustand  $Y=0$ ) in einem Abwassernetz vorherzusagen. Als nachteilig empfinde ich jedoch die Tatsache, dass, dem Verfahren entsprechend, lediglich zwischen 2 möglichen Zuständen (gut/schlecht) unterschieden werden kann. In [E.V.Ana und Bauwens ,2010] wird jedoch als wesentlicher Vorteil für dieses Verfahren die Einfachheit der Durchführung hervorgehoben, sowie die Möglichkeit jene Einflussparameter zu finden, welche für den Alterungsprozess verantwortlich sind.

### 2.2.2. Die Ketten von Markow

Die Markow-Kette [A.Markov ,2006] (benannt nach Andrej Andrejewitsch Markow) ist ein spezieller stochastischer Prozess und liegt dann vor, wenn man sich in einem diskreten Zustandsraum befindet. Ziel ist es, Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten zukünftiger Zustände anzugeben. Eine wesentliche Eigenschaft der Markow-Ketten ist, dass die Vorgeschichte des betrachteten Prozesses nicht vollständig bekannt sein muss und das Verfahren trotzdem

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

sehr gute Prognosen liefert. Kurz gesagt hängt die Zukunft des Systems ausschließlich vom gegenwärtigen Zustand ab.

Dies lässt sich wie folgt formulieren:

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} \parallel X_t = i_t, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{t+1} = i_{t+1} \parallel X_t = i_t) \quad (2.14)$$

Bei [D.M.Abraham und Wirahadikusumah ,1999] repräsentieren  $X_1, X_2..$  die möglichen Zustandsklassen innerhalb eines Kanalsystems. Verwendet werden hierbei fünf mögliche Zustände (1=perfekt, 5=Totalversagen), welche aus der Zustandsklassifizierung der Haltungen gewonnen wurden. Eine weitere Eigenschaft der diskreten Markow-Ketten ist, dass alle möglichen Zustände  $i$  und  $j$  von der Zeit unabhängig sind. Ferner ist definiert, dass ein System nur immer in den unmittelbar benachbarten (schlechteren) Zustand wechseln kann - es können vereinfacht gesagt keine Zustände übersprungen werden und das System kann sich grob gesprochen auch nicht zufällig verbessern. Der Wechsel von einem Zustand in den nächsten wird als »Übergang« bezeichnet und die Chance, dass dies passiert, als »Übergangswahrscheinlichkeit«. Ein Übergang ist definitionsgemäß auch nicht innerhalb eines Zeitschrittes möglich und die Übergangswahrscheinlichkeit bleibt innerhalb eines Zeitschrittes konstant. Dieses sogenannte »stationäre« Verhalten ist in Gleichung [2.15] dargestellt:

$$P(X_{t+1} = j \parallel X_t = i) = p_{ij} \quad (2.15)$$

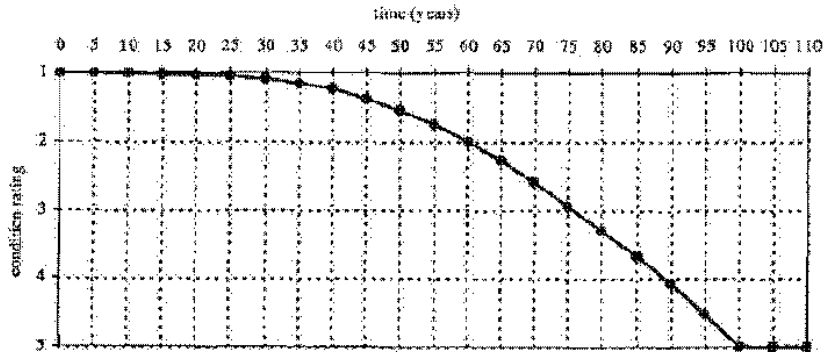
Für den oben geschilderten Fall von fünf möglichen Zuständen lassen sich die Übergangswahrscheinlichkeiten zusammenstellen: In [D.M.Abraham und

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & p_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Abbildung 2.19.:** Übergangswahrscheinlichkeiten [D.M.Abraham und Wirahadikusumah ,1999]

Wirahadikusumah ,1999] wird auf dieser Basis die Untersuchung des Kanalsystems in Indianapolis, Indiana beschrieben. Das Material und die Bettungsverhältnisse der Haltungen stehen hier im Mittelpunkt der Betrachtungen. Die Herausforderung liegt nun darin die entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten richtig zu schätzen. Im erwähnten Artikel wurde zu diesem Zweck die Alterungsfunktion für Haltungen eines bestimmten Materials auf Basis der

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft



**Abbildung 2.20.:** Alterungsfunktion unter idealen Bedingungen [D.M.Abraham und Wirahadikusumah ,1999]

Meinung von Experten, also einer Expertenschätzung, formuliert. Auf Basis dieser Funktion wurden die Übergangswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung der vorhandenen Daten errechnet (2.16):

$$\text{Minimize} = \sum_{t=1}^n Y(t) - E[X(t, P)] \quad (2.16)$$

Darin bedeutet  $n$  die Anzahl der betrachteten Zeitschritte,  $Y(t)$  den gegenwärtigen Zustand der Haltung und  $E[X(t, P)]$  den erwarteten Zustand der Haltung auf Basis der geschätzten Übergangswahrscheinlichkeiten lt. Abb. [2.19]. Durch ein nicht lineares Rechenverfahren wird dabei die Differenz zwischen den prognostizierten und beobachteten Werten minimiert [2.16]. Beispielsweise lässt sich der erwartete Zustand einer Haltung zum Zeitpunkt  $t=n$ , welche sich zur Zeit  $t=0$  im Zustand 1 befindet, wie folgt errechnen:

$$E[X(t = n, P)] = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] * P^{(0)} * [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]^T \quad (2.17)$$

Obwohl es prinzipiell möglich ist die Lebensdauer einer Haltung in mehrere Altersklassen zu unterteilen und mit unterschiedlichen Übergangsmatrizen zu arbeiten um das steigende Risiko mit höherem Alter zu berücksichtigen, bleibt doch der Nachteil des Verfahrens bestehen, dass die Verweildauer einer Haltung in einem bestimmten Zustand unberücksichtigt bleibt. Auch wird in [E.V.Ana und Bauwens ,2010] im Rahmen der Diskussion des Verfahrens auf jene Schwäche hingewiesen, dass oft zu wenig Daten vorhanden sind, um die Übergangswahrscheinlichkeiten plausibel zu ermitteln.

### 2.2.3. Das Semi-Markow Modell

Das Semi-Markow Modell berücksichtigt zusätzlich die Aufenthaltszeit in jedem betrachteten Zustand. Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind nun von dieser Aufenthaltszeit abhängig, wobei diese entweder zufällig gewählt wird oder einer unabhängig definierten Verteilung entspricht. Die Vorgeschichte, innerhalb derer der gegenwärtige Zustand erreicht wurde, ist auch in diesem Fall nicht von Interesse. Folgende Verteilungen im Zusammenhang mit der Aufenthaltsdauer in einem Zustand finden Verwendung:

- Weibull
- Herz
- Normalverteilung
- u. a.

Mit diesen Annahmen ist es nun möglich Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $f_i(t)$  sowie Überlebensfunktionen  $S_i(t)$  zu definieren. Die verschiedenen Möglichkeiten werden im Anschluss an dieses Kapitel kurz zusammengefasst. Weiter ergeben sich die Übergangswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Rohralters nach folgender Formel:

$$p_{i,j+1}(t) = \frac{f_{t-i}(T_{t-i})}{S_{t-i}(T_{t-i}) - S_{t-(i-1)}(T_{t-(i-1)})} \quad (2.18)$$

$$i = (1, 2, \dots, m - 1)$$

Darin bedeuten:

- $m$ : Anzahl der Zeitschritte
- $T$ : Zeitspanne, die notwendig ist um in den nächsten Zustand zu gelangen

Die hier errechneten Übergangswahrscheinlichkeiten können nun entsprechend der Matrix in Abb. 2.19 weiter verwendet werden um die Zustände innerhalb des Systems zu prognostizieren. Für dieses Vorgehen werden jedoch Langzeitdaten benötigt um  $S_i(t)$  und  $f_i(t)$  korrekt bestimmen zu können. Entnommen wurde dieser Ansatz aus einem Aufsatz von [Y.Kleiner ,2001]. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang außerdem, dass beispielsweise die Parameter für eine Weibull-Verteilung ebenfalls geschätzt werden müssen. Schlussendlich wird in [Black und Brailsford ,2005] dieses Verfahren verwendet um den Alterungsprozess von Schaltanlagen zu beschreiben.

### 2.2.4. Die Überlebensfunktion

Wie eben beschrieben spielen die Überlebensfunktionen bei der Verwendung von Semi-Markow Ketten eine Schlüsselrolle. Aus diesem Grund soll kurz beschrieben werden, welche Funktionen dabei zum Einsatz kommen und wie diese hergeleitet werden. Eine Zusammenfassung wurde bereits in [T.Schmidt ,2009] formuliert und wird an dieser Stelle sinngemäß in abgekürzter Form noch einmal wiedergegeben.

Die Nutzungs - bzw. Lebensdauer eines Elements wird als zeitabhängige Zufallsvariable mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung  $f(t)$  definiert. Die Lebensdauer ist dabei schief um einen Mittelwert  $\bar{T}$  verteilt. Die Verteilungsfunktion der Lebensdauer  $F(t)$  ist das Integral über  $f(t)$  und beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Element (Haltung) vor dem Erreichen seiner Lebensdauer ausfällt. Im Gegensatz dazu beschreibt  $S(t) = 1 - F(t)$  jene Wahrscheinlichkeit, mit der ein Element (Haltung) seine Lebensdauer erreicht bzw. überschreitet und wird daher Survival - bzw. Überlebensfunktion genannt. Ein weiterer Zusammenhang wird als Ausfallsrate  $h(t)$  definiert und beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der Elemente (Haltungen) nach Erreichen eines bestimmten Alters ausfallen können.

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.19)$$

Da all diese Funktionen mathematisch voneinander abhängen, genügt es daher eine einzige von ihnen empirisch herzuleiten. Weitere Details können in [R.Herz 1995] nachgeschlagen werden.

Es haben sich nun folgende Verteilungen als besonders geeignet erwiesen um den Alterungsprozess von unterirdischer Infrastruktur zu beschreiben [T.Schmidt ,2009].

#### 2.2.4.1. Die Herz-Verteilung

Dieses Modell wurde in [R.Herz 1995] vorgestellt. Dabei werden drei Parameter zur Beschreibung der Alterung (im Konkreten bei Wasserleitungsrohren) verwendet:

- Alterungsfaktor  $a$
- Ausfallsfaktor  $b$
- Resistenzzeit  $c$

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

Die Resistenzzeit  $c$  beschreibt, bis zu welchem Alter kein Ausfall eintritt, der Alterungsfaktor  $a$  gibt daraufhin an, wie schnell die Alterung einsetzt und der Ausfallfaktor  $b$  beschreibt schlussendlich wie die Alterung anschließend verläuft. Dies hat Herz in folgender Formel zusammengefasst:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < c \\ \frac{(a-1) * b * e^{b*(t-c)}}{(a + e^{b*(t-c)})^2} & \text{für } t \geq c \end{cases} \quad (2.20)$$

Bei Annahme eines sehr hohen Alterungsfaktors  $a$  nähert sich der Verlauf der Normalverteilung an. Ein Vorteil der Herz-Verteilung ist vor allem, dass die Ausfallswahrscheinlichkeit mit zunehmenden Alter nicht ins Unendliche steigt, sondern sich asymptotisch einem Maximalwert nähert und dort sozusagen stagniert. Als Nachteil bei der Verwendung als Übergangsfunktion wird in [T.Schmidt ,2009] angegeben, dass lediglich eine Prognose über das durchschnittliche Verhalten von Teilgruppen (Kohorten) möglich ist und sich keine individuellen Alterungspfade ableiten lassen. Trotzdem hat das Verfahren in einigen Softwarepaketen zur Entwicklung von Instandhaltungsstrategien Eingang gefunden (z.B. Dynastrat - Ingenieurbüro Hochstrate).

### 2.2.4.2. Die Weibull-Verteilung

Die Weibull-Verteilung geht auf den schwedischen Mathematiker Waloddi Weibull zurück und wurde überwiegend zur Beschreibung der Lebensdauer von elektronischen Bauteilen und spröden Werkstoffen verwendet. Es können sowohl konstante als auch steigende oder fallende Ausfallraten technischer Systeme beschrieben werden. Geprägt wird die Verteilungsfunktion durch 3 Parameter:

- Gestaltungsparameter  $\beta$
- Skalierparameter  $\eta$
- Lokationsparameter  $\gamma$

Die entsprechende Formel wird in der Literatur unterschiedlich angegeben, hat aber im Grunde genommen folgendes Aussehen:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq \gamma \\ \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} & \text{für } t > \gamma \end{cases} \quad (2.21)$$

Der Einfluss und die entsprechenden Wertebereiche der einzelnen Parameter können der Literatur entnommen werden. Es sei nur soviel angemerkt, dass

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

der Gestaltparameter für die Modellierung von Alterungsprozessen  $1 \leq \beta \leq 2$  sein muss, da in diesem Bereich die Ausfallrate abhängig von der Zeit zunimmt. Die Weibull-Verteilung wird unter anderem in der Software STATUS-KANAL verwendet.

### 2.2.4.3. Die Gompertz-Verteilung

Die Gompertz-Verteilung wurde vom Mathematiker Benjamin Gompertz (1779-1885) vorgestellt um das Wachstum von Populationen zu modellieren. Das von ihm entwickelte Theorem sagt aus, dass die Differenz aus relativer Wachstumsgeschwindigkeit und relativer Wachstumsbeschleunigung konstant ist (vgl. T.Schmidt ,2009). Für Alterungsprozesse bedeutet dies sinngemäß, dass die Ausfallrate mit zunehmendem Alter exponentiell anwächst. LeGat hat eine modifizierte Form der Gompertz-Verteilung verwendet um Zustandswahrscheinlichkeiten zu errechnen [Y.LeGat ,2006]. Da dies für die weitere Arbeit von wesentlicher Bedeutung ist, wird der verwendete Formelapparat etwas ausführlicher dargestellt. Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Lebensdauer ist wie folgt definiert:

$$f(t) = \beta_1 * \exp[\beta_0 + \beta_1 * t - \exp(\beta_0 + \beta_1 * t)] \quad (2.22)$$

Darin bedeuten:

$t$  : Anzahl der Jahre

$\beta_0$  : Beiwert für Initialeinflüsse auf den Alterungsprozess

$\beta_1$  : Beiwert für laufende Einflüsse auf den Alterungsprozess

Daraus folgt die Verteilungsfunktion der Lebensdauer mit:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2.23)$$

Wie bereits ausgeführt ergibt sich die Überlebensfunktion zu  $S(t) = 1 - F(t)$  bzw. im konkreten Fall

$$S(t) = \exp[-\exp(\beta_0 + \beta_1 * t)] \quad (2.24)$$

und die Ausfallrate kann gemäß 2.19 hergeleitet werden:

$$h(t) = \beta_1 * \exp(\beta_0 + \beta_1 * t) \quad (2.25)$$

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

$\beta_0$  wird dazu verwendet um einen zeitunabhängigen Einfluss auf die Ausfallrate darzustellen,  $\beta_1$  wird benötigt um den zeitabhängigen Anteil zu berücksichtigen. [Y.LeGat ,2006] hat diese Funktion durch eine weitere Aufspaltung insofern erweitert, als dass mehrere Übergänge abgebildet werden können und auch weitere Größen (Kovariablen) in die Betrachtung einfließen. Die Überlebensfunktion nimmt dann folgende Form an:

$$S(t) = \exp[-\exp(\alpha_k + Z_0 * \beta_0 + t * \exp(Z_1 * \beta_1 + u))] \quad (2.26)$$

Eine grafische Darstellung für die Gleichung 2.26 findet man in Abb. 3.14. An späterer Stelle (Kap.3.3.2) wird noch näher auf die Bedeutung der Gleichung eingegangen, LeGat hat aber den eben beschriebenen Formelapparat in ein Programm gepackt, welches für die weiteren Betrachtungen eine tragende Rolle spielt und dankenswerterweise als Sourcecode zur Verfügung gestellt wurde. In der Arbeit von [T.Schmidt ,2009] wurden nun Untersuchungen angestellt, welche die Kalibrierung von Alterungsmodellen auf Basis von zeitlich heterogen verteilten Zustandsdaten zum Thema hatten. Teilweise wird im Weiteren versucht die dort gewonnenen Erkenntnisse auf das vorhandenen Datenmaterial anzuwenden, andererseits lehnt sich der modifizierte Ansatz der Alterungsmodellierung naturgemäß stark an die oben zitierten Arbeiten an. Die zugrunde liegenden Formeln werden ebenfalls an späterer Stelle (Kap.3.3.2) in dieser Arbeit noch grafisch dargestellt und die eigenen Überlegungen zu dem Verfahren formuliert.

Die Entscheidung auf dem oben geschilderten Ansatz aufzubauen wird vor allem damit begründet, dass es möglich ist zwischen Initialeinflüssen und laufenden Einflüssen auf den Alterungsprozess zu unterscheiden. Gerade in der Abwassertechnik bietet es sich an, verschiedene Materialien im Zusammenhang mit der dauernden Belastung durch aggressive Abwässer miteinander zu vergleichen (Beispiel für  $\beta_{1j}$ ). Als Beispiel für einen Initialeinfluss ( $\beta_0$ ) seien die Bettungsverhältnisse nach dem Einbau angeführt. Das Verfahren bietet außerdem die Möglichkeit alle vorstellbaren und bekannten Einflüsse zu kombinieren und daraus entsprechende Schlüsse für die Restlebensdauer zu ziehen.



## Teil II.

# Methodik zur Ermittlung der Restlebensdauer

## 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Wie bereits ausgeführt wird ein tragfähiges statistisches Modell benötigt um die Alterung eines Systems untersuchen zu können. Eine zwingende Forderung ist in diesem Zusammenhang ein umfassender und repräsentativer Datenbestand. Das nächste Kapitel ist daher der Datenerfassung und der Datenorganisation gewidmet. Dies hat für die vorliegende Arbeit insofern eine große Bedeutung, um zu dokumentieren, dass eine sorgfältige und auch vollständige Datenerfassung nicht immer einfach und möglich ist. Auch hat sich im Zuge der Bearbeitung herausgestellt, dass weitgehende Kompromisse zwischen Genauigkeit der Prognose und dem dazu verwendeten Datenpool eingegangen werden müssen. Man muss sich sozusagen sprichwörtlich »nach der Decke strecken« um überhaupt Ergebnisse zu erhalten. Ein diesbezüglicher Hinweis auf die erreichte Qualität der Berechnung wird dabei immer notwendig sein, wobei hinzugefügt werden muss, dass auch die Abschätzung der Güte ein äußerst schwieriges Unterfangen ist.

### 3.1. Digitaler Leitungskataster als Grundlage

#### 3.1.1. Allgemeines

Es gibt seit dem Jahr 2007 in Österreich die Möglichkeit die Erstellung eines digitalen Leitungskatasters fördern zu lassen. Es ist derzeit offen, ob diese Förderschiene weiter finanziert wird, aber zumindest wurde auf diesem Weg die Erhebung unserer unterirdischen Infrastruktur deutlich forciert.

Folgende Daten müssen nun erhoben werden, um einen förderfähigen Leitungskataster zu erhalten:

- Zustandserfassung
- Zustandsklassifizierung
- geodätische Lage

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Zusätzlich müssen diese Daten in einer geeigneten Datenbank zusammengeführt und gespeichert werden. Die Details sind in den Förderrichtlinien der KPC [*Förderrichtlinien*, 2007] bzw. im [*ÖWAV RB 21*, 1989] geregelt. Allerdings gibt es keine Vorschrift für die Verwendung eines speziellen Datenmodells, es muss aber in manchen Bundesländern (Steiermark, Kärnten und Oberösterreich) bei der Abgabe ein definiertes Format [Steiermärkischen Landesregierung, 2010] eingehalten werden. In dieser Arbeit wurde ein Datenmodell gemäß der Isybau 2010 verwendet. Dieses ist in den [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012] genau beschrieben.

#### 3.1.2. Erfassung der Stammdaten

Es gab bis vor kurzem im südlichen Burgenland nur vereinzelt digitales Datenmaterial. Diese Daten und Informationen mussten aber erst aufwendig aufbereitet werden. Einerseits lagen lediglich CAD - Zeichnungen in DXF (Data Exchange Format) vor, andererseits gab es im besten Fall Tabellen im Format von Microsoft Access. Zumindest die Geometrie der Haltungen sowie deren Lage im amtlichen Festpunktnetz konnte relativ problemlos übernommen werden.

Der erste Schritt bestand somit darin, alle sichtbaren Anlagenteile - also im Wesentlichen die Schacht- und Sonderbauwerke - digital zu erfassen bzw. mit den vorhandenen Unterlagen abzugleichen. Dies implizierte sowohl die geodätische Aufnahme von Lage und Höhe der Schachtdeckelmittelpunkte als auch die Erhebung der sogenannten Stammdaten wie zum Beispiel Schachttiefe, Situation der Zu -und Abläufe, sowie Material und Dimension der eingebauten Rohre.

Die wichtigste Grundlage für die Ermittlung der Restlebensdauer mit dem gewählten Verfahren ist jedoch die Kenntnis über die Errichtungsjahre der einzelnen Anlagenteile. Diese konnten nur mühsam über wasserrechtliche Bewilligungsbescheide oder ähnlichen Unterlagen erhoben werden, sofern diese überhaupt auffindbar waren. Es war auch notwendig auf den Erfahrungsschatz der das System betreuenden Gemeindebediensteten zurückzugreifen. Mein Dank gilt daher vor allem jenen Leuten, die es durch ihre Erinnerungen ermöglichten, mir doch ein einigermaßen genaues Bild über die Altersstruktur unserer Netze zu machen. Allerdings bedingt diese Form der Erhebung naturgemäß Ungenauigkeiten und Unschärfen in der Dokumentation. Aber zumindest wurden im Rahmen dieser Arbeit im Burgenland erstmalig derartige Recherchen durchgeführt.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Im zweiten Schritt wurde die Topologie der Anlage grafisch erfasst. Hier war vor allem die eindeutige Festlegung der Fließrichtung wichtig, da dies unmittelbaren Einfluss auf die Bezeichnung der Haltungen hatte - die Haltung hat normalerweise denselben Namen wie der obere Schacht, was voraussetzt, dass es im Schachtbauwerk lediglich einen einzigen Ablauf gibt. Es hat sich gezeigt, dass gerade diese Annahme im städtischen Bereich nicht immer zutraf. Die eben beschriebenen Erhebungen sowie deren plangemäße Darstellung waren schlussendlich die Grundlage für die optische Inspektion mittels Videokamera.

#### 3.1.3. Erfassung und Analyse der Zustandsdaten

Auf Basis der im Vorfeld erhobenen Stammdaten wurden die Zustandsdaten größtenteils optisch im Zuge einer Videobefahrung dokumentiert. Auch der sogenannte »elektronische Spiegel« kam hierbei zum Einsatz. Festgehalten wurden die Beobachtungen streng nach [ÖNORM EN 13508-2 ,2011]. Die verwendeten Codes werden an späterer Stelle im Rahmen der Einzelschadensbewertung noch kurz erläutert. Die Abgabe der Dokumentation erfolgte im Format XML und konnte vom verwendeten EDV-Programm problemlos eingelesen werden. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Analyse und Verwaltung der Daten ein Produkt der Firma CWSM, Magdeburg in Verbindung mit einer Datenbank der Firma Oracle © verwendet. Details zu der verwendeten Software können der jeweiligen Produktinformation [Sagis Kanal,Corp. 2012] entnommen werden. Zur Visualisierung wurde ein Produkt der Firma Autodesk © verwendet.

Wesentlich schwieriger war es bereits vorhandene Zustandsdaten in die Datenbank zu übertragen. An dieser Stelle wird auch festgestellt, dass die Ermittlung des Ist-Zustandes der Leitungssysteme bisher vor allem von der Voraussicht und persönlichen Engagement der Verantwortlichen abhing. Diesem Umstand ist es zu verdanken, dass zum Teil zumindest einige Daten analog (Protokolle auf Papier, VHS-Kassetten) vorlagen. Diese mussten jedoch erst in eine digitale Form gebracht werden, um eine Weiterverarbeitung zu ermöglichen.

Es stellte sich heraus, dass die Übernahme der Zustandsdaten umso besser funktionierte, je sorgfältiger die Vorarbeiten bei der Datenerhebung vom mit der Katastererrichtung beauftragten Ingenieurbüro durchgeführt worden waren. Problematisch wurde es nur dann, wenn im Zuge der optischen Inspektion versteckte bzw. vorher nicht bekannte Schachtbauwerke entdeckt

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

wurden oder der unterstellte Verlauf der Stränge sich als unrichtig herausstellte. Dies erforderte dann ein gehöriges Maß an Nachbearbeitung, da sowohl der Datenbestand in der Datenbank als auch das übergebene Datenfile angepasst werden mussten. Nach erfolgter Übernahme der Zustandsdaten wurde die Ermittlung der Zustandsklassen überwiegend automatisiert durchgeführt. Das Ergebnis dieses Berechnungsvorganges ist Abb. 3.1 beispielhaft dargestellt. Das dabei verwendete Bewertungsverfahren sowie die im deutschsprachigen Raum zum Einsatz gebrachten Alternativen wurde bereits im Kapitel 2.1.3 beschrieben. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass im Rahmen der



**Abbildung 3.1.:** Zustandsbewertung - Beispiel

Erhebungen auch die Haltungen und Schächte eindeutig bezeichnet werden mussten. Leider gibt es in Österreich nach wie vor kein einheitliches System, welches dies unterstützen würde. Das deutsche Nachbarland ist hier bereits so weit fortgeschritten, dass theoretisch jeder einzelnen Haltung im gesamten Bundesgebiet ein eindeutiger Name zugewiesen werden könnte.

#### 3.1.4. Überlegungen zur Präzision der Zustandserfassung

Mittlerweile gibt es Untersuchungen im Zusammenhang mit der Genauigkeit der Dokumentation von Schäden, welche nach ÖNORM EN13508-2 codiert werden. Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die Firmen einem immensen Konkurrenzdruck unterliegen, welcher naturgemäß den Preis und

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

notgedrungen auch die Qualität der Leistung drückt. Der von [D. Schwarz ,2013] veröffentlichten Feststellung, dass eine ungenaue Dokumentation in einem hohen Prozentsatz zu ungenauen Klassifizierungsergebnissen führen muss, wird an dieser Stelle vorbehaltlos zugestimmt.

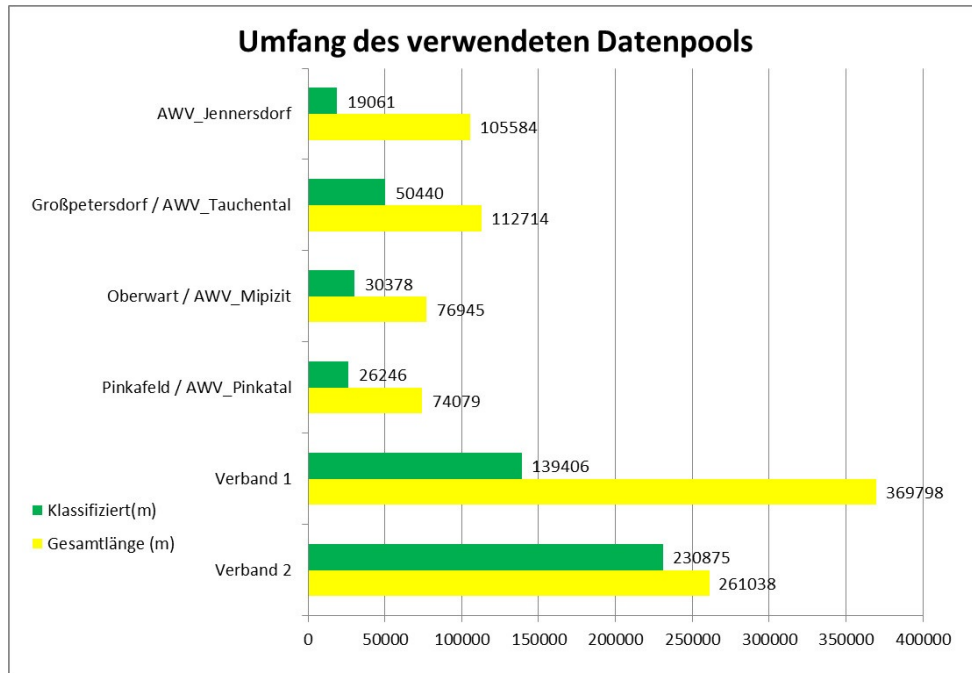
In dieser Arbeit wird aus ähnlichen Überlegungen der quantitative Anteil (z.B. Rissbreite) der Zustandsdokumentation unberücksichtigt gelassen, da dies wahrscheinlich die Genauigkeit der angestrebten Ergebnisse nicht verbessern würde.

Eine qualitätsgesicherte Videoinspektion wäre hier mit Sicherheit wünschenswert, ist aber meiner Ansicht nach nur sehr schwer durchzusetzen. Der Grund liegt ganz einfach darin, dass zwar eine Probefahrt zur Festlegung der gewünschten Qualitätsstandards vereinbart werden kann, aber eine unabhängige Instanz fehlt, die schlussendlich die tatsächlichen Inspektionsergebnisse prüft und evaluiert. Würde man projektbezogen eine derartige Instanz etablieren, wäre dies wieder mit erheblichen Kosten verbunden, welche in der derzeitigen wirtschaftlichen Lage der Betreiber niemand trägt. Da sich der Kreis der monetären Zwänge an dieser Stelle wieder schließt, obliegt es weiterhin den Ingenieurbüros aus den übergebenen Datenmaterial das Beste zu machen - und hier will diese Arbeit einen wesentlichen Beitrag zur Unterstützung leisten.

#### 3.1.5. Herkunft und Qualität der Daten

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit lagen Daten aus den Ortsnetzen mehrerer Gemeinden und Abwasserverbänden aus dem Südburgenland vor. Zusätzlich wurden mir noch von zwei nicht näher genannten deutschen Abwasserverbänden Zustands - und Sachdaten für meine Arbeit zur Verfügung gestellt.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer



**Abbildung 3.2.:** Untersuchtes Datenmaterial in lfm

Insgesamt konnte daher eine Gesamtlänge von 1 000 158 lfm Kanaldaten gesichtet werden. Davon waren 496 406 lfm klassifiziert und wurden somit größtenteils in die Modellbildung eingebunden. In Abb. 3.2 ist das jeweilige Ausmaß der untersuchten und berücksichtigten Haltungslängen zusammengestellt. Es wird aber darauf hingewiesen, dass der mit Gesamtlänge bezeichnete Wert nicht die gesamte Netzlänge in der jeweiligen Gemeinde repräsentiert sondern lediglich den Wert, der zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits in unserer Datenbank eingearbeitet war. Die Grafik zeigt auch, dass sich das Burgenland im Zusammenhang mit der Bewertung seiner unterirdischen Infrastruktur im Vergleich zu Deutschland erst am Anfang befindet.

Nachteilig für das ausgewählte Verfahren wirkt sich aus, dass trotz der hohen Leitungslängen eine breit gestaffelte zeitliche Verteilung im Zusammenhang mit dem Alter zumindest im Südburgenland nicht flächendeckend vorhanden ist. Dies ist aber ein Umstand, der sich erst im Laufe der Recherchen als problematisch herausgestellt hat.

Eine wesentliche Erkenntnis war, dass ohne passende Visualisierung und Zusammenführung der gesammelten Informationen eine zielführende Interpretation nicht möglich ist. So ließen sich beispielsweise problematische Bereiche (schwere Zugänglichkeit u.ä.) über Luftbildauswertungen problemlos

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

identifizieren. An dieser Stelle sei den Mitarbeitern meines Unternehmens gedankt, die im Zuge der Katastererrichtung von diesen Leitungssystemen die Aufgabe der Datenaufbereitung sorgfältig und verlässlich durchführten.

Ich war auch gezwungen nicht mehr aktuelle Klassifizierungen in die Untersuchungen einzubeziehen. Dies war bedingt durch den Umstand, dass diese Daten bereits vor längerer Zeit erhoben wurden und lediglich im Format Isybau96 [*Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes*, 2012] vorlagen. Für das gewählte Verfahren sollte sich dies nicht nachteilig auswirken.

## 3.2. Der Alterungsprozess im Allgemeinen

In der Technik wird der Alterungsprozess üblicherweise mit Verschleiß assoziiert. Die 1997 zurückgezogene DIN 50320 definiert Verschleiß als »fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers hervorgerufen durch mechanische Beanspruchung«. Ein Versagen davon betroffener Anlagenteile tritt erwartungsgemäß dann ein, wenn der Verschleiß einen kritischen Wert überschritten hat. Wenn man den eben erwähnten Materialverlust quantitativ in Abhängigkeit der Zeitdauer seines Auftretens abschätzen kann, so lässt sich der Zeitraum bis zum Versagen relativ genau ermitteln.

Auch die Lebenszykluskostenrechnung (Life-Cycle-Costing bzw. LCC) gewinnt in der heutigen Zeit im Bauwesen immer mehr an Bedeutung und versucht sowohl die Neuerrichtungskosten eines Bauwerkes als auch die Instandhaltungskosten über die gesamte Lebensdauer einer Bauwerkes zu berücksichtigen. Hier spielt natürlich die seriöse Abschätzung der Lebensdauer eines Gebäudes eine tragende Rolle, denn es sollen schlussendlich die Instandhaltungskosten im Verhältnis zu einer Erhöhung der Lebensdauer optimiert werden.

Die beiden oben beschriebenen Beispiele zeigen, dass der Begriff der Alterung sehr unterschiedlich definiert werden kann. Auch unterscheiden sich die beiden Fälle ganz erheblich in jenen ,den Alterungsprozess verursachenden, Umständen. Beim klassischen mechanischen Verschleiß spielen offenbar überwiegend lokale Parameter eine Rolle.

Beispielhaft und ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien im Folgenden einige genannt:

- sich zersetzendes Schmieröl
- Vibrationen



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

- Materialermüdung
- und Ähnliches

Im Gegensatz dazu stellen sich die Dinge bei Bauwerken etwas komplexer dar. Hier zeichnen eher umweltrelevante und auch gesellschaftliche Umstände als für die Alterung verantwortlich. So kann ein Bauwerk als alt oder besser nicht mehr als zeitgemäß empfunden werden, weil sich die ästhetischen Maßstäbe geändert haben. Auch eine an sich gesunde Bausubstanz entspricht dann plötzlich nicht mehr den wärmetechnischen Anforderungen oder es wird eine Nutzungsänderung in den Räumen notwendig - eine daraus resultierende Erhöhung der Nutzlast kann dann vielleicht nicht mehr von der Deckenkonstruktion aufgenommen werden.

Die Fassade wird von der Witterung in Mitleidenschaft gezogen und möglicherweise korrodieren die Stahleinlagen in den Stahlbetonbauteilen zufolge aggressiver Umgebungsbedingungen. All dies wird als Alterung bezeichnet und führt in letzter Konsequenz zu einer Zerstörung der Bausubstanz.

### 3.3. Der Alterungsprozess im Kanal

Für die Alterung eines Kanalsystems können nun ähnliche Überlegungen angestellt werden, welche die Grundlage für die weiteren Betrachtungen bilden. Es wird darauf hingewiesen, dass zwar ausschließlich von Haltungen gesprochen wird, dass sich aber für Schachtbauwerke und andere Anlagenteile dieselben grundlegenden Feststellungen ableiten lassen. Auch werden an dieser Stelle nur druckfreie, über Gravitation funktionierende, Systeme betrachtet.

Zunächst werden Faktoren genannt, welche das Gesamtsystem (Ortskanalsystem oder Sammler) global im Zusammenhang mit dem Verschleiß beeinflussen. In der folgenden Tabelle sind diese zusammengestellt und werden anschließend in ihrer Wirkung näher diskutiert. Auch wird das vorhandene Datenmaterial auf das Vorhandensein entsprechender Datensätze geprüft:

- Rohrmaterial
- Rohrdimension und Form
- Transportiertes Medium bzw. Art der Entwässerung
- Beschaffenheit des Untergrundes
- Grundwasserstand
- Ausführung des Rohrstoßes
- Instandhaltung und Pflege

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Es wäre anzunehmen, dass Haltungen unter denselben Umwelt- und Belastungsbedingungen weitgehend gleichmäßig altern und die annähernd selbe Lebensdauer erreichen sollten. Dass dem offensichtlich nicht so ist, dafür können nun begrenzte, also lokal unterschiedliche, Parameter verantwortlich gemacht werden. Diese lassen sich wie folgt eingrenzen:

- lokale Rohrbettungsverhältnisse
- unterschiedliche Verkehrsbelastung
- unterschiedliche Tiefenlage
- lokal aggressive Abwässer
- Fließgeschwindigkeit und Fülltiefe
- fehlerhafte Errichtung
- Materialfehler

Tatsächlich überlagern sich alle Effekte und bestimmen dermaßen die Geschwindigkeit der Alterung und damit die zu erwartende Restlebensdauer. Auch wird im Weiteren unterschieden, ob die maßgebenden Einflüsse bereits a priori vorhanden waren oder sich erst im Laufe der Zeit entwickeln.

#### 3.3.1. Feststellung signifikanter Einflussparameter

Für die Untersuchungen mit Hilfe der logistischen Regression müssen im Vorfeld die relevanten Einflussparameter aus dem vorhandenen Datenmaterial bestimmt werden. Diese werden anschließend in Beziehung gesetzt.

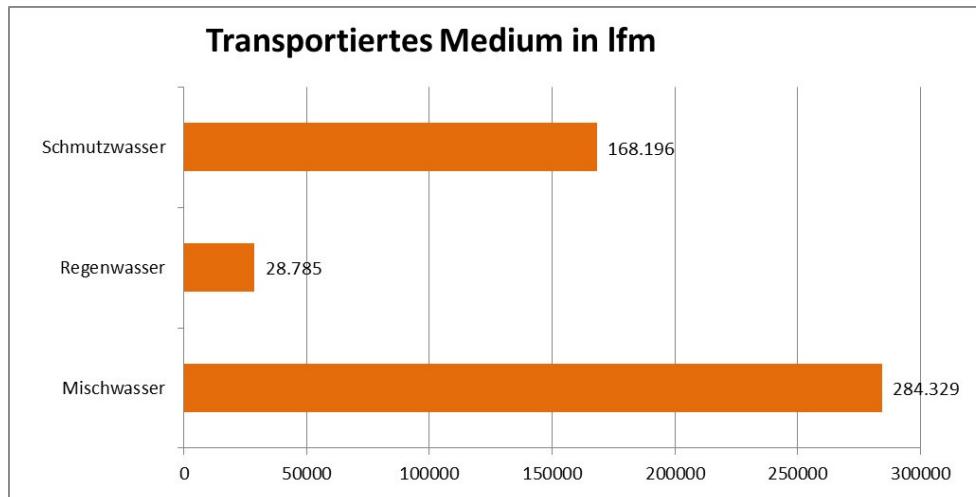
Vice versa werden jene für diese Untersuchung unerheblichen Faktoren ausgeschlossen. Beispielsweise macht es keinen Sinn sich über die Schadentwicklung bei Rohren aus Grauguss Gedanken zu machen, wenn diese nur in verschwindend geringer Anzahl im Datenpool vorhanden sind. Die tabellarischen Auswertungen in den folgenden Abschnitten dienen daher einzig dem Zweck abzuschätzen, ob das vorhandene Datenmaterial die untersuchten Parameter repräsentativ abbilden kann.

##### 3.3.1.1. Transportiertes Medium

Gerade im Südburgenland überwiegt die Entwässerung im Mischsystem und erklärtes Ziel dieser Arbeit ist es, die Alterung in derartigen Systemen zu untersuchen. Es liegen jedoch auch umfangreiche Daten zweier an dieser Stelle nicht näher genannten Abwasserverbände in Deutschland vor, wobei ein Verband ausschließlich im Trennsystem entwässert. Es mag daher interessant sein,

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

ob sich hier Zusammenhänge herausarbeiten lassen, durch die der Einfluss der Abwasserart beschrieben werden kann. Auch die neu errichteten Trennsystemabschnitte im Südburgenland sind daher Teil der Betrachtung.



**Abbildung 3.3.:** Abwasserart im Laufmetern

Abb. 3.3 zeigt die Aufteilung in Misch - und Trennsystem im Rahmen der untersuchten Daten. Zeitliche Zusammenhänge können an dieser Stelle nur insofern abgeleitet werden, als dass eine Beziehung zwischen den Errichtungsjahren und der vorgesehenen Abwasserart hergestellt wird. Man erkennt eine deutliche Dominanz des Mischsystems bis zum Ende der Achzigerjahre (Abb. 3.4).

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

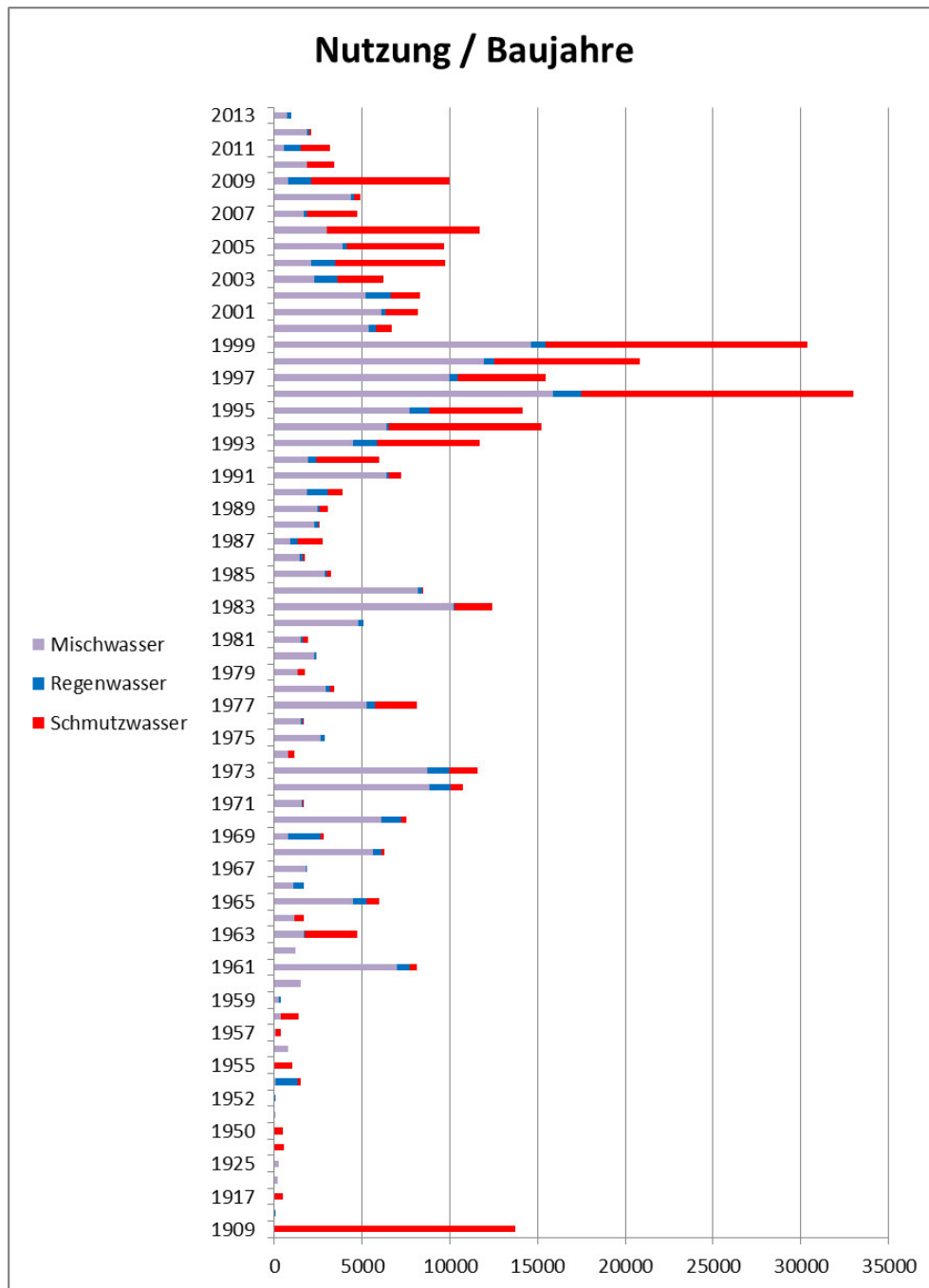


Abbildung 3.4.: Abwasserart gruppiert nach Errichtungsjahren

Im Burgenland ist die Abkehr vom Mischsystem ab diesem Zeitpunkt dokumentiert.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

#### 3.3.1.2. Verwendete und untersuchte Materialien

Bei Mischsystemen ergeben sich zufolge der höheren Abwassermengen von vornherein größere Nenndurchmesser. Dies bedingt, dass die Wahlmöglichkeiten beim verwendeten Rohrmaterial ab einer bestimmten Dimension eingeschränkt sind. Aus den Daten der untersuchten Systeme ergibt sich nun, dass überwiegend Rohre aus vier Materialien eingebaut wurden.

Es sind dies:

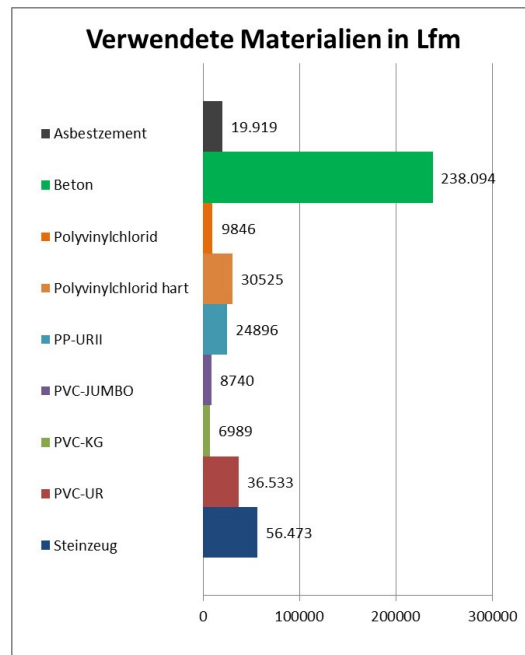
- Beton
- Asbestzement
- PVC und entsprechende Derivate
- Steinzeug

Bei den Betonrohren kamen hauptsächlich vorgefertigte Elemente zum Einsatz und die Videountersuchung hat ergeben, dass diese großteils im Gerinnebereich nicht beschichtet sind. Beton ist naturgemäß ausgesprochen empfindlich gegenüber aggressiven Abwässern und hat nur eine begrenzte Abriebfestigkeit. Als Vorteil kann auch heute zweifellos der niedrige Materialpreis ins Treffen geführt werden. Dieser liegt bei ungefähr 30 Prozent eines vergleichbaren PVC-Rohres.

Asbestzementrohre wurden bis Ende der 80er Jahre eingebaut und konnten nur als Kreisprofile hergestellt werden. Ein innerer Korrosionsschutz war vorgeschrieben und wurde als Bitumenanstrich realisiert. Asbestzementrohre werden heute in dieser Form nicht mehr erzeugt. Sie wurden von Faserzementrohren abgelöst, welche aber in der heutigen Zeit auch nicht mehr verbaut werden.

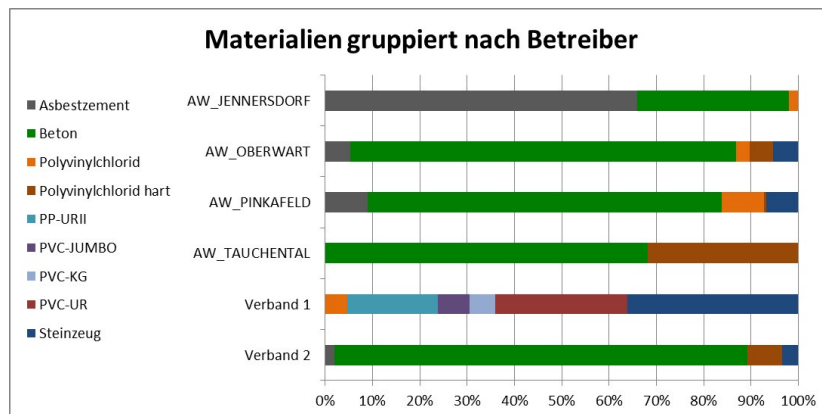
PVC-Rohre wurden vor allem innerhalb der Ortsentwässerungssysteme verwendet und hier nur bis zu einer maximalen Nennweite von DN400. Es zeigt sich, dass PVC zwar unempfindlich gegenüber Korrosion ist, jedoch aufgrund der geringen Wandstärke sehr stark auf schlechte Bettungsverhältnisse reagiert. Auch die damals verwendeten Weichmacher beeinflussen heute das Tragverhalten ausgesprochen ungünstig.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer



**Abbildung 3.5.:** Materialverwendung in den untersuchten Einzugsgebieten in Laufmetern

In Abb. 3.5 wurde ein Auszug aus der Datenbank entsprechend visualisiert. Man erkennt eine deutliche Dominanz des Baustoffes Beton in den untersuchten Netzen.

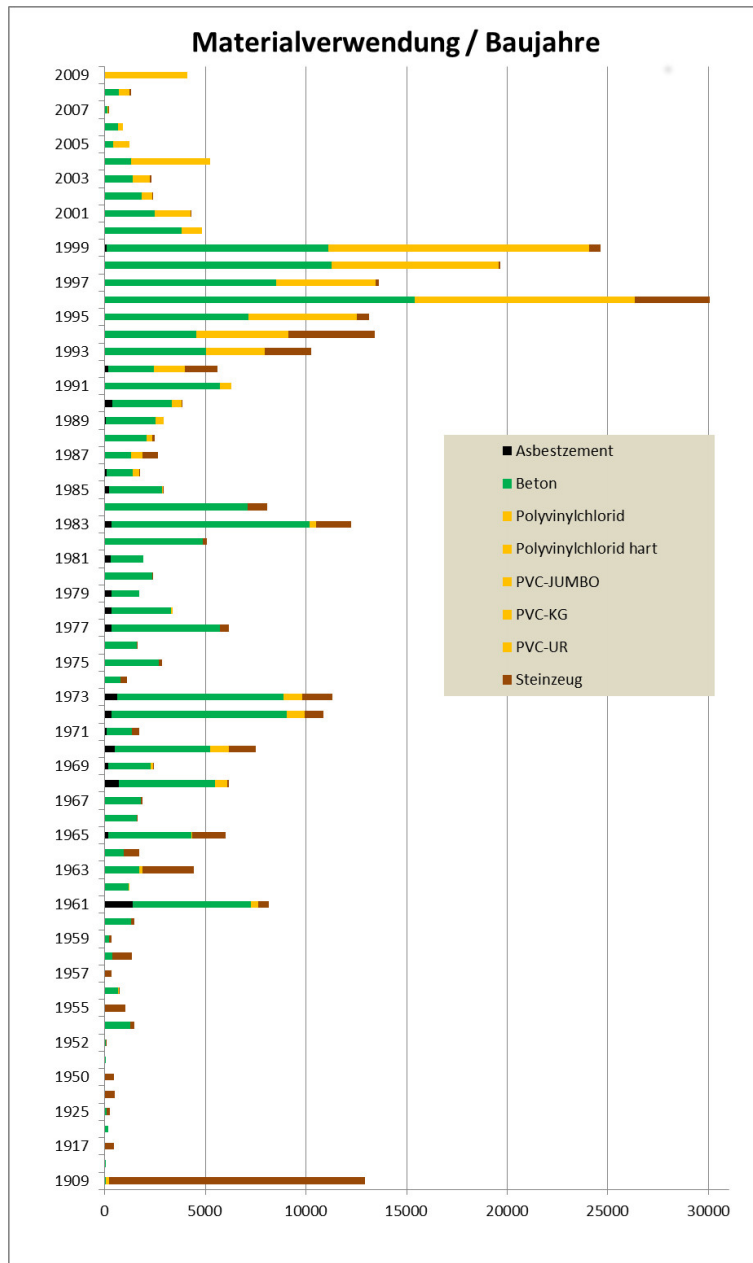


**Abbildung 3.6.:** Materialverwendung gruppiert nach Betreibern

Bei den burgenländischen Verbänden lässt sich in diesem Zusammenhang vermuten, dass die Materialwahl stark von den Vorlieben der Planer und der Betreiber bestimmt wurde und natürlich bei der Errichtung der Preise eine

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

wesentliche Rolle gespielt hat. Im AWW Jennersdorf (Abb. 3.6) wurde den AZ-Rohren der Vorzug gegeben. Schlussendlich kann aber festgestellt werden, dass die Verwendung von »biegesteifen« Materialien deutlich überwiegt.



**Abbildung 3.7.:** Materialverwendung gruppiert nach Baujahren für die untersuchten Abwasserverbände

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

In Abb. 3.7 lässt sich erkennen, dass der Baustoff Beton praktisch in allen untersuchten Zeiträumen verwendet wurde. Erst in neuerer Zeit wurden die Leitungsnetze offensichtlich zunehmend in PVC ausgeführt. Gerade in diesem Fall führt dies zum Problem von verhältnismäßig kurzen Beobachtungszeiträumen, auf welches bereits in [T.Schmidt ,2009] hingewiesen wurde. Steinzeug genießt hier eine Sonderstellung, da es ebenfalls schon sehr lange im Einsatz ist, aber nur verhältnismäßig wenig Haltungslängen zur Untersuchung vorhanden sind.

#### 3.3.1.3. Rohrdimension und Form

Am häufigsten wurde das Kreisprofil (vgl. Abb. 3.8) in den Ortsnetzen verwendet. Ei -und Sonderprofile tauchen lediglich bei großen Transport-sammlern auf. Da diese Profilform ausschließlich in Beton hergestellt wurde, wird daher nur bei diesem Material untersucht, ob die Profilform Einfluss auf die Schadensanfälligkeit hat.

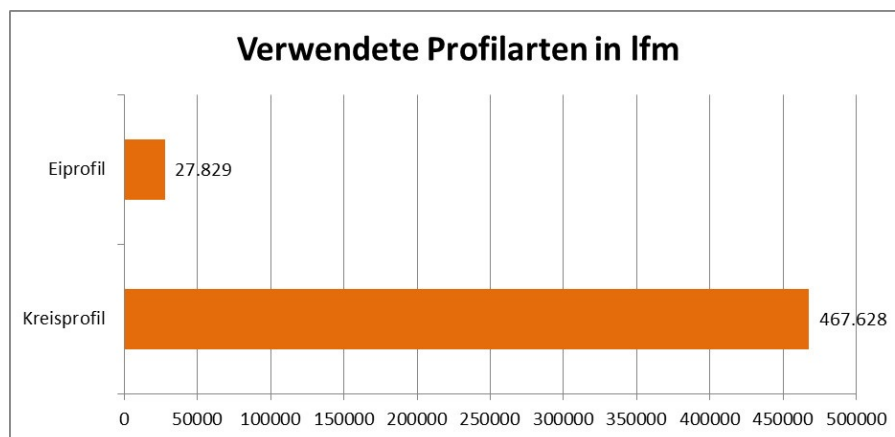


Abbildung 3.8.: Rohrprofile in Prozent der Gesamtlänge



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

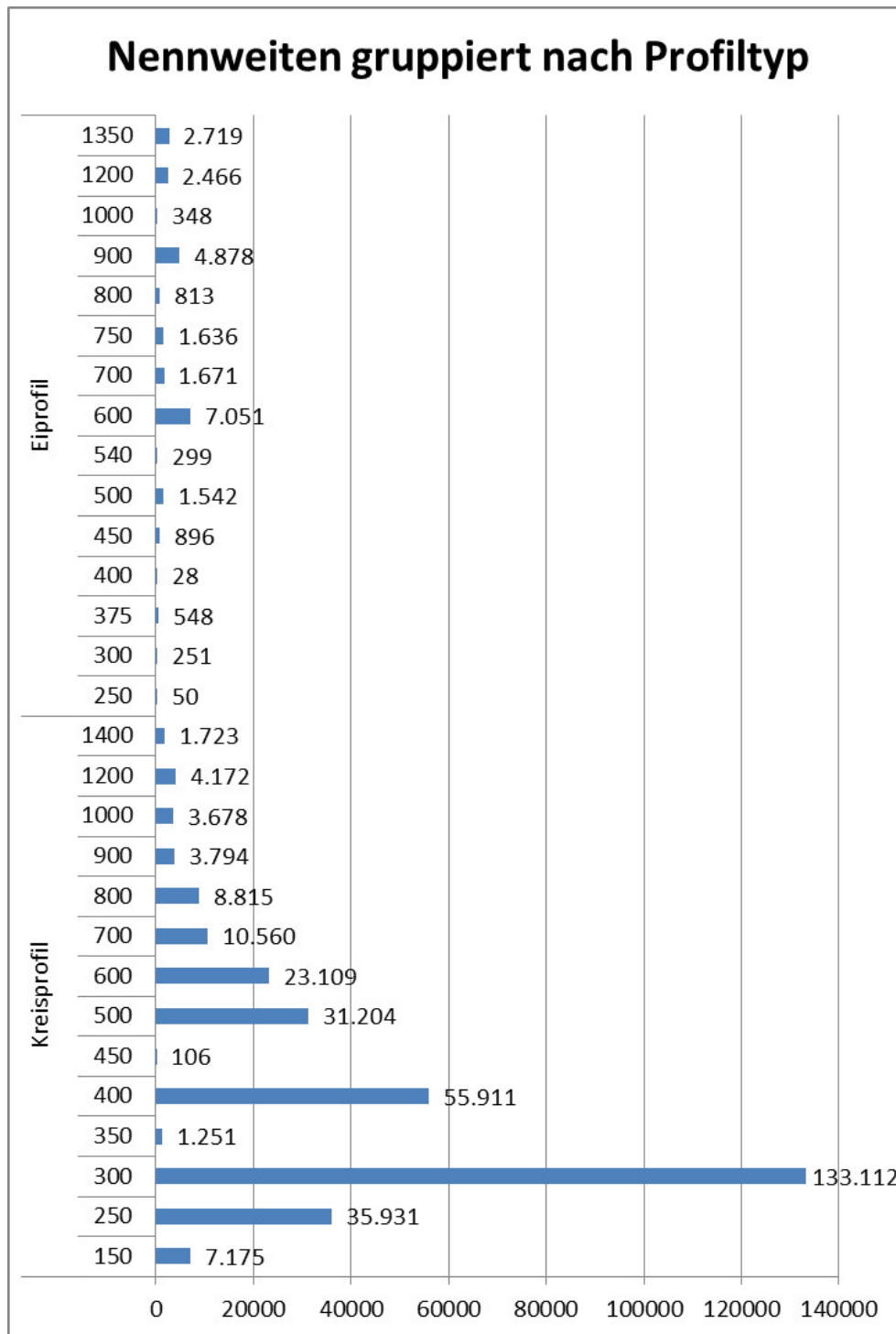


Abbildung 3.9.: Gesamtlänge der Nenndurchmesser in den untersuchten Einzugsgebieten

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

In Abbildung 3.9 ist die Verteilung der Nenndurchmesser ersichtlich. Bei den PVC Rohren sind naturgemäß kleinere Nennweiten üblich, während bei Betonrohren erst ab einer Nennweite von DN300 der Einsatz wirtschaftlich Sinn gemacht hat.

#### 3.3.1.4. Die verbleibenden globalen Faktoren

Leider gibt es über die Beschaffenheit des Untergrundes und über den Grundwasserstand so gut wie keine Informationen. Auch über die Art der Rohrverbindung kann keine flächendeckende Aussage getroffen werden. Fest steht lediglich, dass sowohl Falzmuffen als auch Glockenmuffen zum Einsatz kamen. Als Dichtmaterial diente zumindest beim Betonrohr die Rollgummidichtung. Über die Lebensdauer dieser Dichtungen existieren gesonderte Untersuchungen. Es ist jedoch ein bekanntes Faktum, dass die meisten Fehler beim Einbau der Dichtungen passiert sind. Dies mag mit ein Grund sein, warum Rollgummidichtungen in der heutigen Zeit nicht mehr verwendet werden.

Der positive Einfluss einer durchdachten Pflege und Wartung kann als erwiesen angesehen werden. Es ist mir jedoch in meinem unmittelbaren beruflichen Umfeld keine Gemeinde bekannt, die einen konkreten Instandhaltungsplan verfolgen würde und nicht nur anlassbezogen agiert. So wird bei Problemen die Haltung lediglich gespült und auch die Entfernung von Wurzelholz aus den großen Sammlern erfolgt eher sporadisch bzw. als Reaktion auf offensichtliche Betriebsstörungen. Es wird daher davon auszugehen sein, dass der sich Einfluss der Pflege in allen Bereichen durchschnittlich im selben Rahmen bewegt.

#### 3.3.1.5. Nichtberücksichtigung von lokalen Einflüssen

Diese Parameter lassen sich nur sehr unscharf erfassen und es können aufgrund des nicht vorhandenen Datenmaterials zumindest statistisch keine Zusammenhänge zwischen den beobachteten Schäden und den lokalen Umgebungsparametern hergestellt werden.

Es wird an dieser Stelle der gedankliche Ansatz gewählt, dass Bereiche mit schlechter Bettung, Materialfehlern und vergleichbaren Einflussfaktoren in jedem System vorhanden sind. Überdies wird stillschweigend unterstellt, dass sich diese lokalen Parameter in ähnlicher Ausprägung und in einer bestimmten zeitlichen Reihenfolge als Schäden manifestieren. Letztendlich

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

möge der Hinweis auf deren Einfluss nur eine mögliche Erklärung dafür liefern, warum die Alterung in einem System unterschiedlich schnell abläuft.

#### 3.3.1.6. Verteilung der Schadensklassen

Der wichtigste Parameter für die Bestimmung der Restlebensdauer ist wohl der vorgefundene Zustand zum Zeitpunkt der Inspektion. Analysiert wird zu diesem Zeitpunkt zunächst einmal die globale Verteilung der Schadensklassen mit der Haltung als kleinster Einheit. Diese Verteilung ist Abb. 3.10 zu entnehmen.

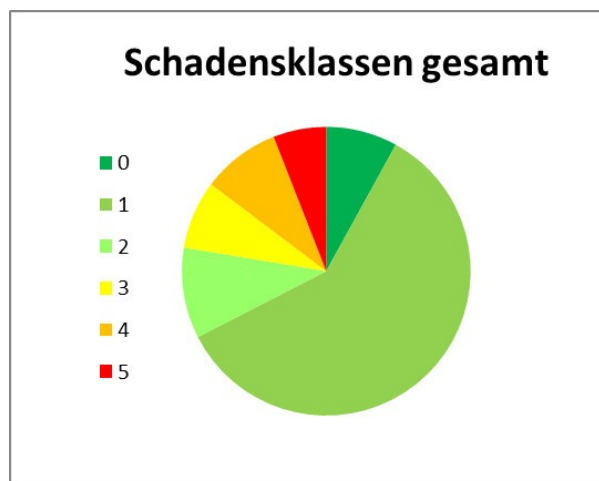


Abbildung 3.10.: Verteilung der Schadensklassen im Datenpool

Die zeitliche Komponente und auch der Einfluss des Materials findet dabei noch keine Berücksichtigung. Die Grafik zeigt lediglich die Tatsache, dass zumindest 15 % der untersuchten Netze in einem schlechten Zustand sind.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

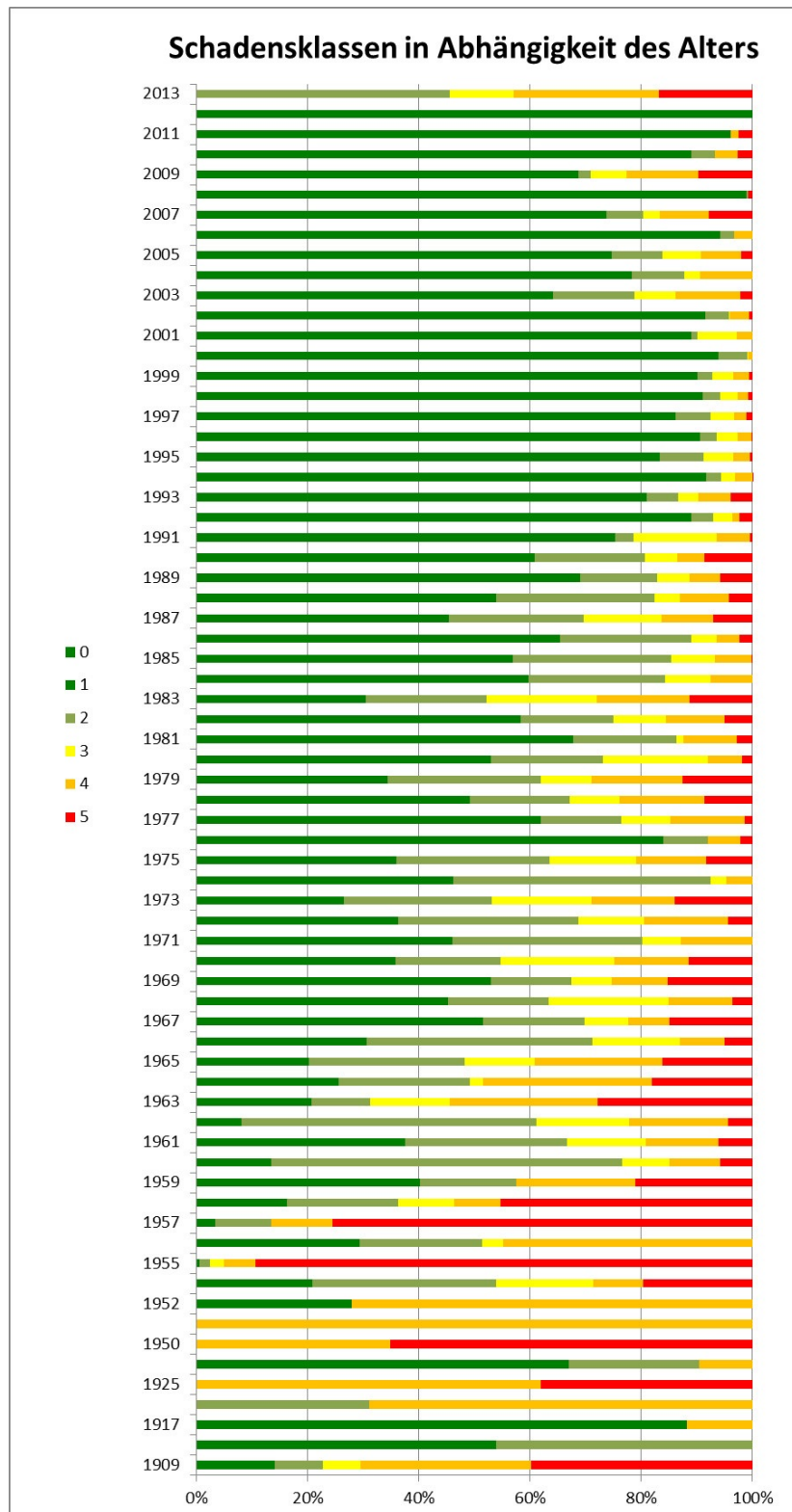


Abbildung 3.11.: Schadensklassen in Abhängigkeit des Alters

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

In Abb. 3.11 wird nun die Verteilung der Schadensklassen in Abhängigkeit des Alters dargestellt. Hier ist eine Verschlechterung des Zustandes mit steigendem Alter offenkundig. »Ausreißer« neueren Herstelldatums haben mit Sicherheit andere Ursachen als den normalen Alterungsprozess und könnten beispielsweise in der Berechnung geringer gewichtet werden.

#### 3.3.1.7. Zusammenfassung und Fazit

Aus der einfachen, mittels einem Tabellenkalkulationsprogramm, durchgeführten Analyse werden nun folgende Fakten abgeleitet:

- die Haltung ist im ersten Schritt die kleinste Einheit
- es liegen genügend Daten in einer heterogenen Zusammensetzung vor.
- es werden drei Materialien (Beton, PVC, Steinzeug) näher untersucht. Für Asbestzement reicht der Datenbestand nicht aus.
- die Nutzung wird als Covariable mitberücksichtigt
- beim Baustoff Beton wird der Einfluss der Profilform untersucht
- die Rohrdimension wird in drei Gruppen unterteilt (<DN300 ; =DN300 ; >DN300) - beim Eiprofil bleibt die Profildimension unberücksichtigt.
- der Zustand der Haltungen verschlechtert sich durchschnittlich mit steigendem Alter.

Wünschenswert wären noch Betrachtungen über die Tiefenlage, das Gefälle und die auftretende Verkehrsbelastung bzw. die Unterscheidung, ob es sich um Haltungen innerhalb oder außerhalb des Ortsgebietes handelt. Leider ist die Information hierbei äußerst dürftig und die Berücksichtigung muss auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden.

### 3.3.2. Bestimmung des Alters einer Haltung

#### 3.3.2.1. Allgemeine Überlegungen

Alle bisher betrachteten Modelle basieren auf extern durchgeführten Bewertungen, welche gemäß eines Schulnotensystems (0 = bester Zustand, 5 = schlechtester Zustand) den Zustand der einzelnen Haltungen beschreiben. Die Ermittlung dieser Zustandszahlen ist in den gängigen Verfahren ähnlich aufgebaut und berücksichtigt alle Schäden, die in einer Haltung auftreten können. Letztendlich wird für die einzelne Haltung eine Sanierungszahl ermittelt, welche den Sanierungsbedarf in einem groben zeitlichen Maßstab

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

einordnet (kurzfristig-mittelfristig-langfristig). Im Grunde genommen wird hier die Notwendigkeit, eine Sanierung innerhalb eines gewissen Zeitrahmens durchzuführen, mit der Restlebensdauer gleichgesetzt.

Im ersten Schritt wird nun auf Basis der oben erwähnten Zustandszahlen das Alter der Haltungen bestimmt. Bezeichnet man den Zeitpunkt der Inspektion mit  $t_{insp}$  und den Zeitpunkt der Inbetriebnahme mit  $t_0$ , so errechnet sich das Rohralter formal mit

$$t = t_{insp} - t_0 \quad (3.1)$$

Dieser ermittelte Wert entspricht nun der Zeitspanne, welche seit der Inbetriebnahme vergangen ist. Für die Ermittlung der Restlebensdauer muss jedoch auch noch deren Zustand zum Zeitpunkt  $t_{insp}$  berücksichtigt werden. Ein ähnlicher Ansatz wird auch in der Immobilienbewertung angewandt, wo anstatt des tatsächlichen Baujahres ein fiktives Baujahr in Abhängigkeit des Erhaltungszustandes bei der Ermittlung der wirtschaftlichen Restnutzungsdauer zum Einsatz kommt. Tatsächlich wird bei Immobilien das fiktive Baujahr im Wege einer sogenannten Expertenschätzung ermittelt und es spielen wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen bei diesem Vorgehen keinerlei Rolle.

Damit unterscheidet sich dieser Ansatz doch sehr deutlich von dem im Folgenden Beschriebenen.

Es handelt sich dabei um eine Strategie, die nichthomogene Markowketten verwendet. Die grundlegende Idee wurden bereits im Kap.[2.2.4.3] bei der Erläuterung der Gompertz-Verteilung dargelegt. Um die Kontinuität bei der Verfahrensbeschreibung zu wahren, wird der zugrunde liegende Sachverhalt noch einmal genauer erläutert und mit Grafiken hinterlegt.

Der Ausgangspunkt ist eine Wahrscheinlichkeitsdichte der Lebensdauer, welche von Gompertz zur Beschreibung der Entwicklung von Populationen vorgeschlagen wurde:

$$f(t) = \beta_1 * \exp[\beta_0 + \beta_1 * t - \exp(\beta_0 + \beta_1 * t)] \quad (3.2)$$

Die Abbildung 3.12 zeigt den Verlauf der Wahrscheinlichkeitsdichte in Abhängigkeit von  $\beta_0$  und  $\beta_1$ .  $\beta_0$  beeinflusst die Lage des Maximums der Funktion, was dermaßen interpretiert werden kann, dass die Lebensdauer bei wenig signifikanten Initialeinflüssen steigt (vgl.  $f_1(t)$ ), wo das Maximum der Funktion bei ungefähr 25 Jahren zu liegen kommt. Zum Vergleich ist  $\beta_1$  für die Geschwindigkeit der Alterung verantwortlich. Dies berücksichtigt Einflüsse, welchen das System über den gesamten Lebenszyklus unterliegt (vgl.  $f_2(t)$ ),

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

wo der absteigende Ast der Funktion wesentlich steiler zum Ende abfällt und das Versagen des Systems mit 40 Jahren prognostiziert wird. Die Funktion  $f_1(t)$  wurde mit einem vergleichsweise kleineren Wert  $\beta_1$  bestimmt, was sich in einem flacheren Funktionsverlauf manifestiert.

Die Diagramme wurden im Übrigen selbst mit der Mathematiksoftware Mathcad erstellt.

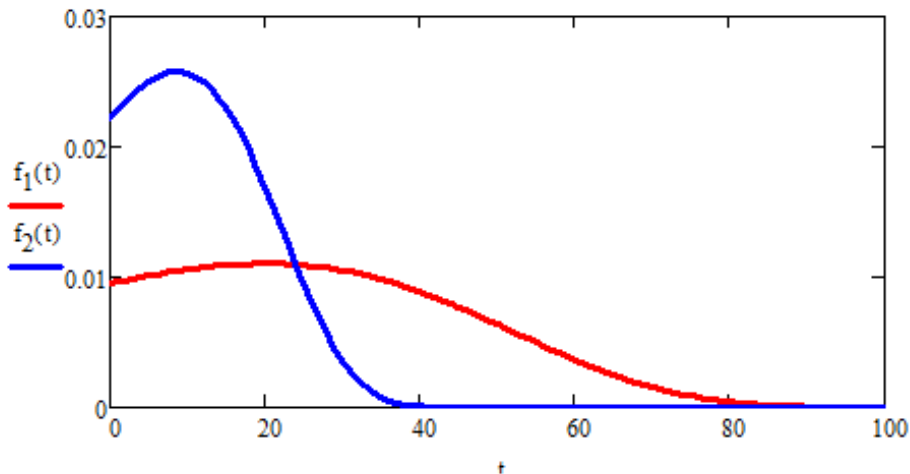


Abbildung 3.12.: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung

Aus 3.2 folgt die Verteilungsfunktion der Lebensdauer mit (Abb. 3.13):

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3.3)$$

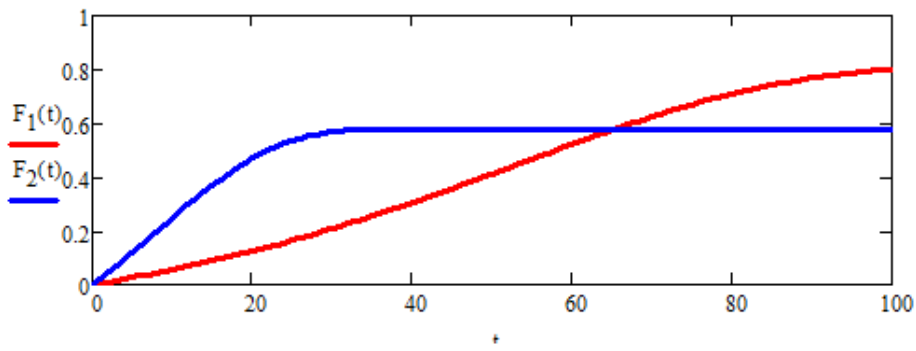


Abbildung 3.13.: Verteilungsfunktion der Lebensdauer

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Die Überlebensfunktion ist definiert mit  $S(t) = 1 - F(t)$  und hat im konkreten Beispiel folgende Form:

$$S(t) = \exp[-\exp(\beta_0 + \beta_1 * t)] \quad (3.4)$$

Die entsprechenden Verläufe sind in 3.14 dargestellt:

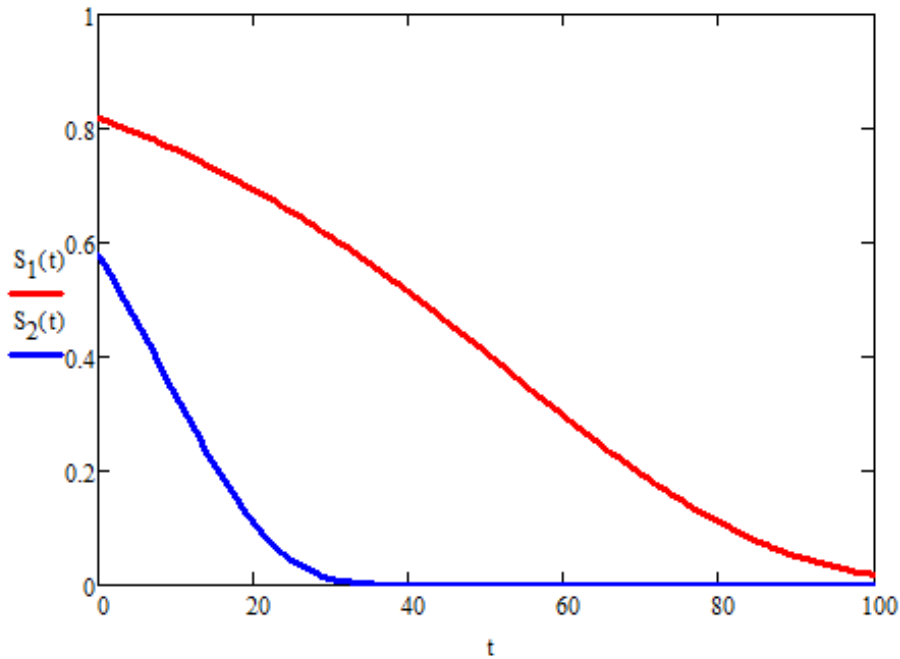


Abbildung 3.14.: Überlebensfunktion

Es lässt sich sehr schön beobachten, dass speziell in der Funktion  $S_1(t)$  die Überlebenswahrscheinlichkeit gleichmäßig mit steigendem Alter sinkt. Dies entspricht auch den Erwartungen im Zusammenhang mit einem geringen Initialeinfluss  $\beta_0$  und einem moderaten Geschwindigkeitsparameter  $\beta_1$ .

Le Gat hat die Funktion 3.4 durch eine zusätzliche Aufspaltung erweitert, als dass gleichzeitig mehrere Übergänge abgebildet werden können und außerdem weitere relevante Größen (Kovariable) in die Betrachtung einfließen. Die Überlebensfunktion nimmt somit folgende Form an:

$$S(t) = \exp[-\exp(\alpha_k + Z_0 * \beta_0 + t * \exp(Z_1 * \beta_1 + u))] \quad (3.5)$$

Eine aus Testdaten generierte Grafik 3.15 soll den Sachverhalt noch einmal



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

illustrieren und zeigt am Beispiel von vier vorhandenen Zustandsklassen drei mögliche Übergangsfunktionen:

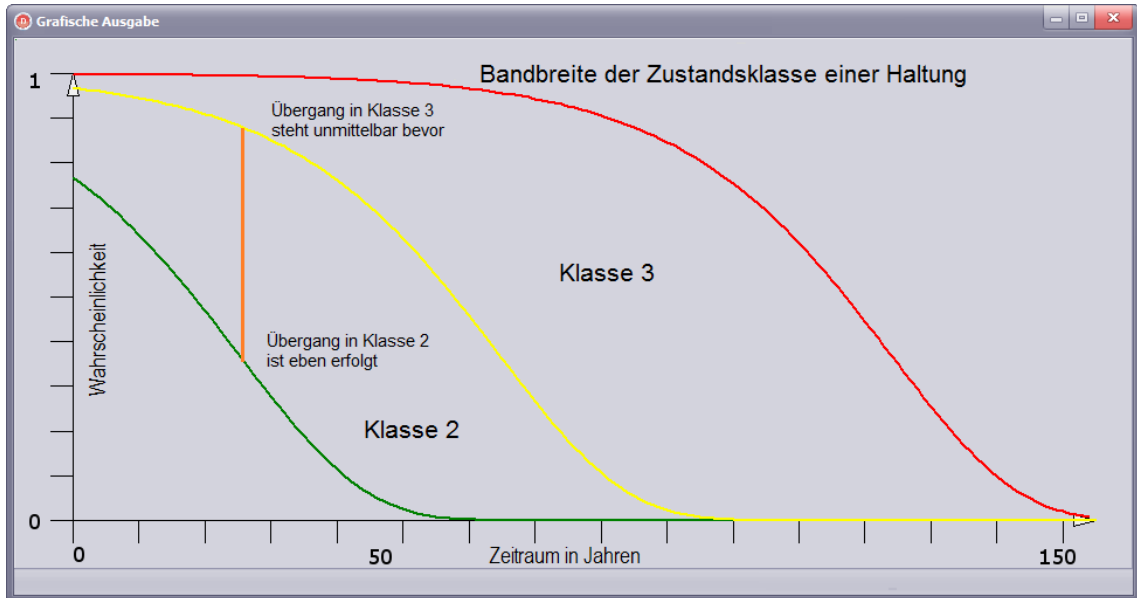


Abbildung 3.15.: Übergangsfunktionen

In der Formel 3.5 muss stets  $\alpha_k > \alpha_{k+1}$  gelten, damit sich die Übergangsfunktionen nicht schneiden.  $Z_0$  und  $Z_1$  sind Kovariablenvektoren und  $\beta_0$  bzw.  $\beta_1$  die dazugehörigen Parametervektoren. Der Index 0 beschreibt den Einfluss auf den Initialzustand und der Index 1 den Einfluss der Alterungsgeschwindigkeit. Der Faktor  $u$  ist der sogenannte IFF (individual frailty factor) der aus einer Normalverteilung gewählt wird um zufälligen Einflüssen Rechnung zu tragen. Auf die Ermittlung und Kalibrierung der hier verwendeten Funktionen wird im Kapitel 3.5 noch genauer eingegangen.

Aus der Grafik in 3.15 lässt sich ableiten, dass die Zustandsklasse einer Haltung zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt mit einer gewissen Bandbreite behaftet ist. So kann sich der Zustand einer Haltung eben erst verschlechtert haben, was gleichbedeutend mit der Lage um unteren Ende des möglichen Bereiches ist. Ebenso kann ein Wechsel in die nächst schlechtere Klasse unmittelbar bevorstehen. Dies entspricht dann der Lage am oberen Ende der betrachteten Zustandsklasse.

Daher wird zunächst auf Basis der bisher vorgestellten Verfahren mehrere Übergangswahrscheinlichkeiten bestimmt, bei denen lediglich haltungsbezogene Zustandszahlen in die Berechnung eingehen. Umgebungsrelevante Parameter wie zum Beispiel Rohrbettung, Grundwasserstand und Verkehrs-

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

belastung werden hierbei nur statistisch in ihrer endgültigen Wirkung auf die Haltung erfasst. Es wird jedoch angemerkt, dass eine genauere Berücksichtigung dieser Parameter aufgrund fehlenden Datenmaterials ohnehin weder möglich noch zielführend ist.

#### 3.3.2.2. Bestimmung der maximalen systemischen Lebensdauer

Grundsätzlich sind in unseren Bewertungssystemen 5 Schadensklassen vorgesehen. Dabei stellt sich nun zunächst einmal die Frage, ob die höchste Schadensklasse (gleichbedeutend mit dem Ausfall der Haltung) überhaupt erreicht werden darf. Im Hinblick auf die derzeitige Rechtslage im deutschsprachigen Raum bin ich der Meinung, dass die Restlebensdauer mit dem Erreichen der vorletzten Schadensklasse limitiert werden sollte. Dies bringt den Vorteil, dass einerseits das Gesamtsystem noch nicht versagt und andererseits in den meisten Fällen genügend Zeit bleibt um Sanierungsmaßnahmen zu ergreifen. Aus diesem Grund wird daher im Weiteren der Ausfall einer Haltung mit dem Wechsel in die vorletzte Schadensklasse gleichgesetzt.

Auf Basis dieser Überlegungen lässt sich nun ein Zeitpunkt ermitteln, an dem eine Haltung ihre maximale Lebensdauer erreicht. Die Restlebensdauer einer Haltung ergibt sich nun logischerweise aus der Differenz zwischen der maximal erreichbaren Lebensdauer und dem Alter der Haltung, welches aber erst mit dem Zustand in Zusammenhang gebracht werden muss. Dies bedeutet jedoch nicht, dass alle Haltungen nach diesem Zeitpunkt versagen müssen. /

Der in Abb. 3.16 dargestellte Wert stellt nun die Wahrscheinlichkeit dar, mit der in einem System Haltungen der Zustandsklasse 4 ab einem bestimmten Alter angetroffen werden. Bei der maximal erreichbaren Lebensdauer müssen die Werte aber nach unten korrigiert werden, denn die ungekürzte Übernahme dieser wahrscheinlichen Lebensdauer würde bedeuten, dass beinahe alle Haltungen in der vorletzten Schadensklasse angetroffen werden. Daher wird an dieser Stelle vorgeschlagen eine weitere Grenze bei der Bestimmung der Lebensdauer einzuziehen.

Diese Grenze kann insofern willkürlich gewählt werden, indem man die Forderung formuliert, dass nur ein bestimmter Prozentsatz aller Haltungen in die vorletzte Schadensklasse wechseln darf bzw. sich bereits darin befindet. Die absolute Größe dieses Prozentsatzes ist mit Sicherheit diskussionswürdig und es können durchaus finanzielle Überlegungen in dessen Festlegung einfließen. Ein möglicher Zugang wäre beispielsweise die finanziellen Möglichkeiten der Betreiber als Anhaltspunkt heranzuziehen. Der Grenzwert würde

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

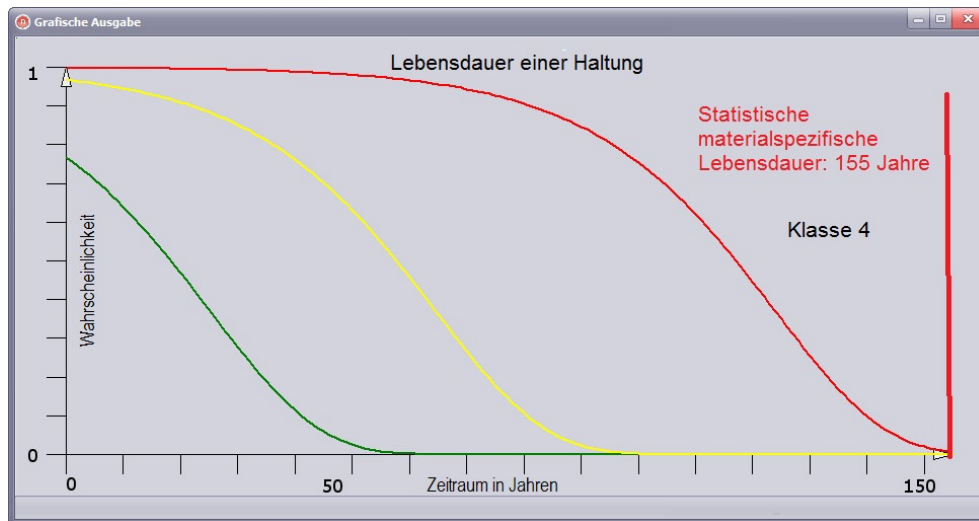


Abbildung 3.16.: Wahrscheinliche Lebensdauer einer Haltung

sich dann einfach nach den aufzubringenden maximalen Sanierungskosten innerhalb eines Netzes richten.

Für den vorgelegten methodischen Ansatz wird zunächst einmal ohne weitere Diskussion eine Ausfallwahrscheinlichkeit von maximal 20% angenommen. Die folgende Grafik (Abb. 3.17) soll den Sachverhalt noch einmal verdeutlichen.

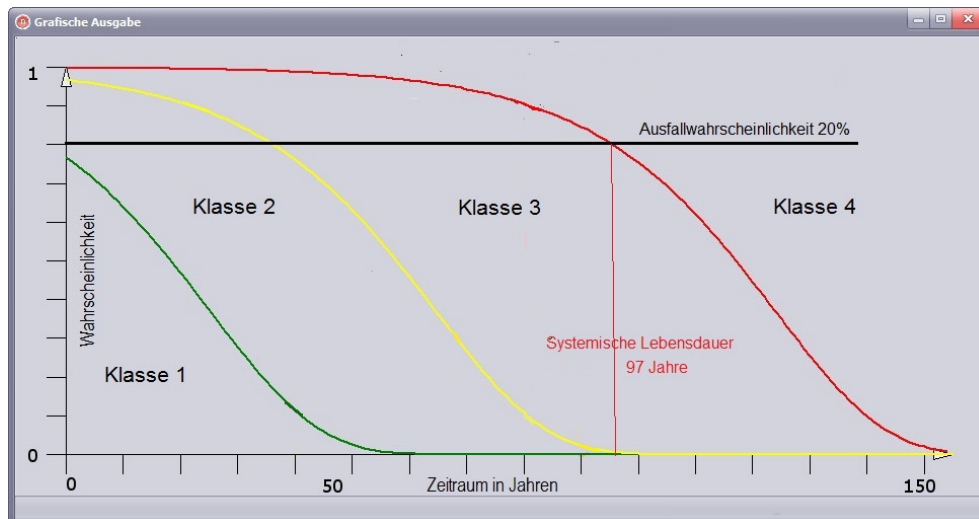


Abbildung 3.17.: Restlebensdauer abhängig von der Ausfallwahrscheinlichkeit

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Legt man die oben genannten Werte der Auswertung zugrunde, so ergibt sich eine »systemische« Lebensdauer von 97 Jahren. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass im Kanalsystem nach 97 Jahren zumindest 20% aller Haltungen die Schadensklasse 4 erreicht haben werden. Es liegt nun auf der Hand, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten natürlich nach jedem größeren Eingriff im System (sei es durch Sanierung, Neubau etc.) angepasst bzw. neu ermittelt werden müssen. Auch lässt sich durch geschickte Wahl dessen, was man in einem System an Schadenshäufigkeit zulassen möchte, die kalkulierte Lebensdauer den tatsächlichen Verhältnissen anpassen. Dies obliegt dann jedoch der Behörde bzw. dem betreuenden Ingenieurbüro.

#### 3.3.2.3. Bestimmung des Alterungspfad

Bei [T.Schmidt ,2009] wird im Rahmen des Kohortenmodells ein horizontaler Alterungspfad abgeleitet. Die folgende Grafik (Abb. 3.18) wurde sinngemäß aus dieser Arbeit übernommen. Es ist zu erkennen, dass in Abhängigkeit des Zustandes bzw. der Bandbreite der Zustandsklasse natürlich die Zeitdauer bis zum Ausfall variiert.

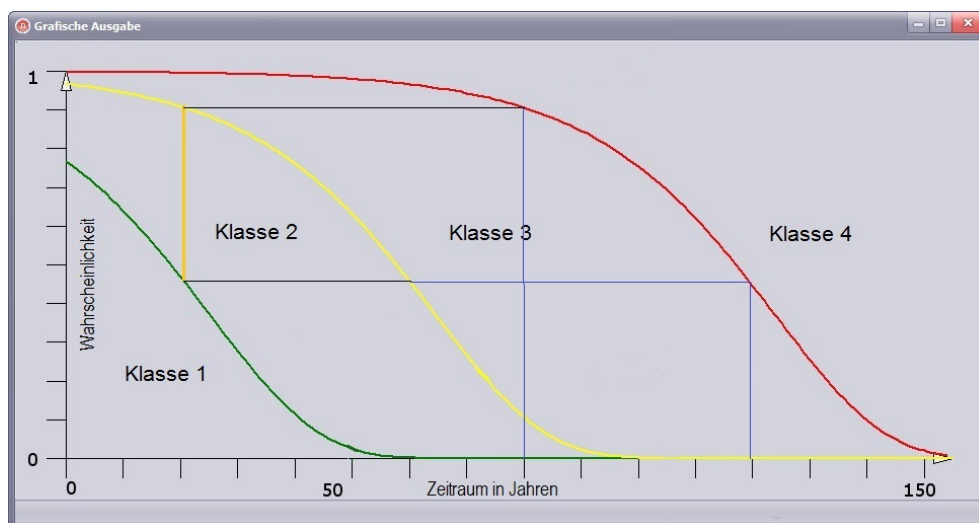


Abbildung 3.18.: Bandbreite des maximal erreichbaren Alters

Im konkreten Beispiel für die maximale Lebensdauer ergibt sich der ungünstigste Fall mit 80 Jahren mit einer Ausfallrate von ca.10%. Im günstigsten Fall erreicht die Haltung ein Alter von maximal 120 Jahren - die Ausfallrate beträgt dabei ca. 50%. Diese Differenz offenbart bereits die Problematik des Verfahrens, da die Schwankungen mitunter sehr groß werden können. Wie bereits an

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

vorderer Stelle dargelegt ist es nicht ohne Weiteres möglich die Schadensklassen feiner zu unterteilen, da dies am vorhandenen Datenmaterial und auch an der Bewertungsstrategie scheitert. Es wird daher versucht einen etwas anderen Weg aufzuzeigen, wobei jedoch trotzdem an der Idee der linearen Alterung festgehalten wird.

#### 3.3.2.4. Verfeinerung der Schadensklasse

Legt man nur die Schadensklasse der Bestimmung der Restlebensdauer zugrunde, so führt dies zwangsläufig zu großen Streuungen in der Prognose. Um das Ergebnis zu verbessern, ist es daher notwendig eine gewisse Differenzierung innerhalb einer Schadensklasse zu formulieren. Dabei gibt es nun mehrere Möglichkeiten - zunächst könnte ein Grenzwert eingeführt werden, demzufolge zum Beispiel die obere Hälfte der jeweiligen Schadensklasse in den Mittelpunkt der Betrachtungen rückt und dabei jener Zeitraum errechnet wird, bei dem dieser Anteil wahrscheinlich ausfällt. Ebenso gut könnte man den betreffenden Bereich in äquidistante Abschnitte teilen (z.B. 10) und dann für jeden Bereich die Restlebensdauer ermitteln. Im Grund genommen lassen sich daher für jede Möglichkeit Argumente dafür und dagegen finden, was gleichbedeutend ist mit der Feststellung, dass aufgrund fehlender Daten jede beliebige Unterteilung möglich scheint.

In Kap.3.5.6 wird nun folgender Ansatz für die Unterteilung vorgeschlagen und an dieser Stelle im Prinzip beschrieben.

Aus dem vorhandenen Datenpool lässt sich in Abhängigkeit der relevanten Kovariablen ein durchschnittliches Alter ermitteln, bei dem eine Haltung eine vorgegebene Ausfallwahrscheinlichkeit erreicht. Innerhalb der betrachteten Schadensklasse wird es Haltungen geben, die bereits das ermittelte durchschnittliche Alter überschritten haben. Diese Haltungen befinden sich am oberen Ende des in Abb. 3.18 dargestellten Bereiches, da ein möglicher Wechsel in die nächste Schadensklasse bereits erfolgt sein müsste.

Genauso gibt es Haltungen, welche das durchschnittliche Alter noch nicht erreicht haben. Dies befinden sich am unteren Ende des oben erwähnten Bereiches, da ein Wechsel in die nächste Schadensklasse mittelfristig wahrscheinlich nicht erfolgen wird.

Die Abbildung Abb. 3.19 zeigt diesen Ansatz. Auf die Berücksichtigung des Anteils aus der Schadensklasse 4 wird dabei bewusst verzichtet um das Verfahren nicht unnötig zu strecken.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

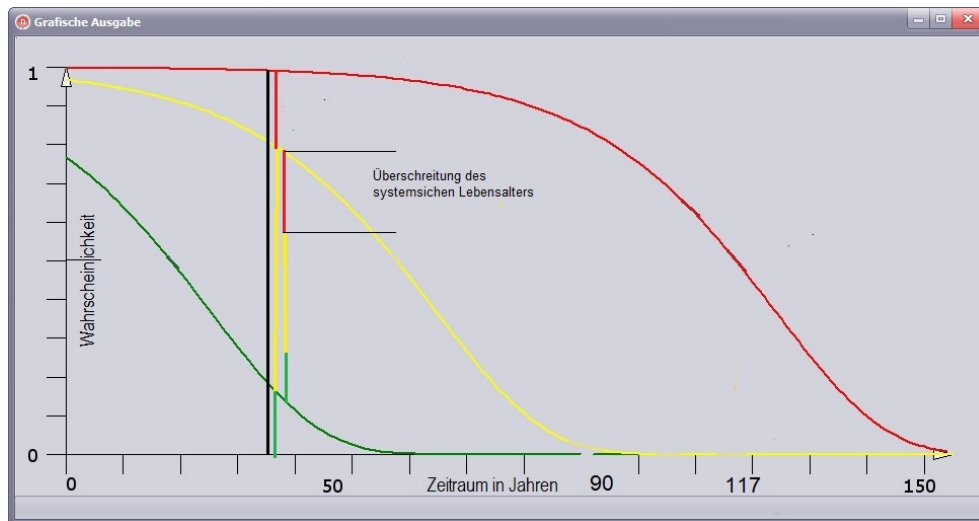


Abbildung 3.19.: Unterteilung der Schadensklassen

Die in Abb. 3.19 dargestellte Unterteilung ist willkürlich und soll lediglich den oben beschriebenen Ansatz visualisieren.

Im Detail sind daher 3 Fälle zu unterscheiden, die wie folgt behandelt werden.

**3.3.2.4.1. Haltung hat das systemische Alter noch nicht erreicht** Dieser Fall bedarf keiner weiteren Erklärung, da statistisch gesehen mit keiner kurzfristigen Verschlechterung zu rechnen ist. Zumindest ist man in der Lage für diesen Anteil eine spezielle Instandhaltungsstrategie zu entwickeln um den Ausfall möglichst weit zu verzögern.

**3.3.2.4.2. Haltung hat das systemische Alter bereits überschritten** Dieser Fall bildet nun das Zentrum dieser Arbeit. Bei den ältesten dieser Haltungen besteht das verhältnismäßig größte Ausfallrisiko. Da auch dieser Anteil in sich zeitlich gestaffelt ist, wird es möglich mittelfristige Sanierungsstrategien zu entwickeln. Einerseits können die Inspektionsintervalle selektiv festgelegt werden und andererseits ist man auch in der Lage das Gesamtsystem laufend zu verbessern, indem man kontinuierlich versucht schadhafte Bereiche zu sanieren.

**3.3.2.4.3. Haltung befindet sich in der vorletzten Schadensklasse** Für diesen Fall wird empfohlen zumindest so viele Haltungen zu sanieren, damit der

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Anteil ausgefallener Haltungen auf den festgelegten Anteil (in diesem Beispiel 20%) gedrückt wird.

#### 3.3.2.5. Berücksichtigung der Schadensentwicklung

Der oben vorgestellte Ansatz berücksichtigt nun aber lediglich die globalen Verhältnisse im Gesamtsystem. Es wird aber tatsächlich so sein, dass sich der Alterungspfad von gewissen Haltungen vom Alterungspfad des Systems deutlich unterscheidet

Wie bereits in der Einleitung dargelegt, werden ab diesem Zeitpunkt zusätzlich Einzelschäden betrachtet, die langfristig zu einem strukturellen Kollaps führen könnten.

In diesem zweiten Schritt werden nun die Übergangswahrscheinlichkeiten auf Basis der Einzelschäden ermittelt und dabei wird die Zustandsklasse der Haltung weitgehend eliminiert. Dies basiert auf der Überlegung, dass sich unterschiedliche Schäden verschieden schnell weiterentwickeln können.

So wäre ein Fall denkbar, bei dem sich zwei Haltungen zum Zeitpunkt  $t=0$  in derselben Zustandsklasse befinden, sich jedoch die Versagenswahrscheinlichkeiten aufgrund der unterschiedlichen Schadensausprägung deutlich voneinander unterscheiden. Als Beispiel sei hier eine bereits eingetretene Haarrissbildung genannt, die dieselbe Zustandsklasse bedingt wie eine hohe Verformung in der Längsrichtung der Haltung.

In beiden Fällen ist vermutlich der Verlust der Rohrbettung die maßgebliche Ursache, jedoch führt wahrscheinlich ein bereits aufgetretener Riss zu einem schnelleren Totalversagen der Haltung. Man kann daher argumentieren, dass sich die Haarrissbildung eher am oberen Ende der Zustandsklasse einordnen lässt und die Verformung am unteren Ende, sofern man den Gedanken an eine bestimmte Bandbreite jeder Zustandsklasse beibehält.

Kurz gesagt besteht die Möglichkeit, dass eine Haltung schneller in die nächst schlechtere Schadensklasse wechselt als oben prognostiziert. Für diesen Fall ist jedoch das Material die am meisten maßgebende Größe, da natürlich die Materialeigenschaften für die zu erwartende Lebensdauer verantwortlich zeichnen. In den nächsten Kapiteln werden dabei vor allem die im Südburgenland verwendeten Materialien näher untersucht.

**3.3.2.5.1. Schäden ohne Weiterentwicklung** Diese Schadensgruppe zeichnet sich dadurch aus, dass zwar die Betriebssicherheit, die Dichtigkeit und auch die Standsicherheit beeinträchtigt werden kann, aber diese Beeinträchtigung im Laufe der Zeit nicht zwingend größer wird. Diese Zustände werden bereits

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

bei der Ermittlung der Schadensklasse der Einzelhaltung berücksichtigt. In der folgenden Tabelle (Abb. 3.20) sind diese Zustände und Schäden auf Basis der EN-13508 zusammengestellt.

| Code | Bedeutung                     | Einheit | D | S | B | Schadensklasse |
|------|-------------------------------|---------|---|---|---|----------------|
| BAG  | einragender Anschluss         | %       |   |   | x | 1 - 5          |
| BAH  | schadhafter Anschluss         |         | x |   |   | 2 - 3          |
| BAI  | einragendes Dichtungsmaterial | %       | x |   | x | 1 - 5          |
| BBA  | Wurzeln                       | %       | x |   | x | 2 - 5          |
| BBB  | anhaftende Stoffe             | %       |   |   | x | 2 - 5          |
| BBC  | Ablagerungen                  | %       |   |   | x | 2 - 5          |
| BBD  | eindringender Boden           | %       | x | x | x | 2 - 5          |
| BBE  | andere Hindernisse            | %       | x |   | x | 1 - 5          |

Abbildung 3.20.: Codes für Schäden ohne Weiterentwicklung

**3.3.2.5.2. Schäden mit Weiterentwicklung** Die Schäden dieser Gruppe haben die Eigenschaft, dass sie sich weiterentwickeln und schlussendlich zum Kollaps des Systems führen können. Diese Gruppe beeinflusst ganz wesentlich die verbleibende Restlebensdauer und steht im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen. Abbildung 3.21 zeigt die entsprechende Zusammenstellung.

| Code | Bedeutung                     | Einheit | D | S | B | Schadensklasse |
|------|-------------------------------|---------|---|---|---|----------------|
| BAA  | Verformung biegeweicher Rohre | %       |   | x | x | 1 - 5          |
| BAA  | Verformung biegesteifer Rohre | %       |   | x | x | 1 - 5          |
| BAB  | Rissbildung                   | mm      | x | x |   | 1 - 5          |
| BAC  | Rohrbruch                     | mm      | x | x | x | 3 - 5          |
| BAF  | Oberflächenschaden            |         | x | x | x | 1 - 5          |
| BAJ  | verschobene Verbindung        | mm      | x | x | x | 1 - 5          |
| BAN  | poröses Rohr                  |         | x | x |   | 3              |
| BAO  | Boden sichtbar                |         | x | x |   | 4              |
| BAP  | Hohlraum sichtbar             |         | x | x |   | 4 - 5          |
| BBD  | eindringender Boden           | %       | x | x | x | 2 - 5          |
| BBF  | Infiltration                  |         | x | x | x | 1 - 4          |
| BBG  | Exfiltration                  |         | x | x |   | 2 und 4        |

Abbildung 3.21.: Codes für Schäden mit Weiterentwicklung

Für beide Gruppen gilt, dass nur jene Codes erfasst wurden, die im Datenmaterial auch tatsächlich vorhanden sind.

**3.3.2.5.3. Gegenüberstellung Isybau96 und EN 13508-2** Da das verwendete Datenmaterial hinsichtlich des Codierungssystems unterschiedlich zusammengesetzt ist, war es notwendig zwischen den beiden Systemen einen möglichst genauen Zusammenhang herzustellen. Die folgende Tabelle (Abb. 3.22) enthält die entsprechende Gegenüberstellung.



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

| Codegegenüberstellung |          |                                   |
|-----------------------|----------|-----------------------------------|
| ISYBAU 96             | EN 13508 | Bedeutung                         |
| D                     | BAA      | Verformung des Rohrquerschnittes  |
| R                     | BAB      | Rissbildung                       |
| B                     | BAC      | Rohrbruch / Einsturz              |
| C                     | BAF      | Oberflächenschaden                |
| SE                    | BAG      | einragender Anschluss             |
| HG                    | BAI      | einragendes Dichtungsmaterial     |
| L                     | BAJ      | verschobene Verbindung            |
|                       | BAO      | Boden sichtbar                    |
|                       | BAP      | Hohlraum sichtbar                 |
| HP                    | BBA      | Wurzeln                           |
|                       | BBB      | Anhaftende Stoffe an der Rohrwand |
|                       | BBC      | Ablagerungen in der Sohle         |
|                       | BBD      | eindringendes Bodenmaterial       |
| U                     | BBF      | Infiltration                      |
| IAB                   | BDC      | Inspektion abgebrochen            |
|                       | BDD      | Wasserspiegel                     |
| TVUW                  | BDG      | keine Sicht                       |

Abbildung 3.22.: Gegenüberstellung EN13508/2 und Isybau96

**3.3.2.5.4. Schäden und ihre Ursachen** Prinzipiell muss zwischen biegeweichen und biegesteifen Rohrmaterialien unterschieden werden. Wie bereits [K.Bölke ,2004] ausführt, haben biegeweiche Rohre (z.B: PVC) ein wesentlich besseres Verformungsvermögen als biegesteife Materialien (z.B. Beton). Für die Dokumentation bedeutet dies, dass bei biegeweichen Rohren die Verformungen des Rohrquerschnittes (Ausbeulen etc.) überwiegen, während es bei biegesteifen Rohren eher zu Ausbiegungen und Lageabweichungen im Bereich der Rohrverbindung kommt. In beiden Fällen können folgende Ursachen dafür verantwortlich sein [ebd.]:

- schlechte Bettung
- mangelnde und falsche Verdichtung
- unsachgemäße Entfernung des Grabenverbaues
- Erhöhung der Verkehrsbelastung
- Bodenbewegungen

Schlussendlich kann aber gesagt werden, dass überwiegend Mängel in der Ausführung für die meisten derartigen Schäden verantwortlich sind. Dies führt zwangsläufig dazu, dass sich diese Ausführungsmängel sehr schnell manifestieren.

**3.3.2.5.5. Weg zum strukturellen Kollaps** In Anlehnung an baustatische Überlegungen kann folgende Entwicklung zum strukturellen Kollaps angenommen werden. Der Bruch eines Rohres beginnt mit einer Verformung. Diese ist

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

natürlich abhängig von der Art des Materials. Biegesteife Materialien (Beton, Steinzeug) reagieren hier naturgemäß wesentlich steifer als biegeweiche Werkstoffe. Diese zeichnen sich durch ein im Vergleich sehr hohes Verformungsvermögen aus und auch eine große Verformung muss nicht zwangsläufig zu einem Bruch des Rohres führen. Biegesteife Werkstoffe reagieren hier wesentlich empfindlicher. Beispielsweise weisen Risse im unbewehrten Beton bereits auf ein bevorstehendes Versagen der Standsicherheit hin. In beiden Fällen scheint es plausibel zu sein, dass der Alterungspfad des Gesamtsystems sich von der Entwicklungsgeschwindigkeit eines Risses hin zum Rohrbruch deutlich unterscheidet. Um dies zu untersuchen wird nun folgender Ansatz gewählt. Man bestimmt drei neue Schadensklassen auf Basis der gefundenen Einzelschäden:

- Schadensklasse 1 : Verformung und Lageabweichung
- Schadensklasse 2 : Rissbildung
- Schadensklasse 3 : Bruch und Scherbenbildung

Diese Einteilung ist losgelöst von den Schadensklassen der Haltungen. Ebenso gehen keine quantifizierten Schadensausprägungen in die Betrachtung ein. Es soll lediglich geprüft werden, ob eine aufgetretene Rissbildung überhaupt zu einem Rohrbruch führen muss. Alle anderen Schadenscodes werden aus der Berechnung eliminiert.

**3.3.2.5.6. Bemerkung zur Betriebssicherheit** Natürlich gibt es auch Fälle, in denen die mangelnde Betriebssicherheit eine globale schlechte Schadensklasse verursacht. Doch bin ich der Ansicht, dass derartige Situationen durch eine intensivere Betreuung des Systems unproblematisch bewältigt werden können. Abgesehen davon, wird später noch gezeigt, dass derartige singuläre Schäden kaum vorhanden sind.

## 3.4. Verwendete Software und Datenmodell

Aus den Ausführungen im letzten Abschnitt ergibt sich, dass die Einzelschäden in einer Haltung mit deren Ausprägungen in Verbindung gebracht werden müssen. Dies ist ohne Unterstützung einer leistungsfähigen Software nicht möglich. Da ein nicht unwesentlicher Teil sich mit der programmtechnischen Umsetzung der oben geschilderten Gedanken beschäftigt, sollen die verwendeten Hilfsmittel kurz beschrieben werden. Als Visualisierungssoftware wird von meinem Büro das Produkt »Map3D« der Firma Autodesk verwendet. Die Daten werden in einer Datenbank des Unternehmens Oracle verwaltet. Das dabei zugrunde liegende Datenmodell bildet die in den [Arbeitshilfen

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

*Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes* ,2012] vorgeschlagene Datenstruktur vollständig ab. Die datenbanktechnische Umsetzung dieses Modells kann bei der Firma CWSM-Magdeburg erworben werden. Alle erhobenen Daten werden in diese Datenbank übertragen, welche dadurch jedwede Art von Verschnitten, Abfragen und Analysen unterstützt. Da die Datensätze in tabellarischer Form verwaltet werden, eignet sich zur externen Bearbeitung naturgemäß ein Tabellenkalkulationsprogramm. Im konkreten Fall wird hier »Excel« von der Microsoft Corporation verwendet.

Während der Bearbeitung hat es sich als schwierig erwiesen Informationen aus unterschiedlichen Tabellen zu kombinieren. Beispielsweise liegt zwischen der Haltung und den Beobachtungen eine klassische 1:n Beziehung vor, bei deren gemeinsamer Auswertung man schnell an die Grenzen der kommerziellen Software stößt. Es war daher ökonomisch und notwendig ergänzende Softwareteile maßgeschneidert zu programmieren. Als Programmiersprache kam dabei »Delphi XE« der Firma Embarcadero zum Einsatz. Damit wurde es möglich aus dem Datenbestand verschiedene Tabellen zusammenzufassen und zur weiteren Bearbeitung an Excel zu übergeben.

Großen Dank möchte ich an dieser Stelle Yves Le Gat aussprechen, der mir sein Programm Gompertz als Source Code in »C« zur Verfügung stellte. Dieses Programm wurde von mir nach »Delphi-Pascal« übersetzt und um eine leistungsfähige GUI und grafische Ausgabe erweitert. Zusätzlich wurde ein Datenimport aus »Excel« implementiert, wodurch eine effiziente Analyse des Datenmaterials erst möglich wurde.

Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen hier zu sehr ins Detail zu gehen. Ein entsprechender Beispieldatensatz mit den dazu gehörigen Tabellen wird im Anhang angegeben.

## 3.5. Praktische Umsetzung

Im folgenden Kapitel werden jene Schritte beschrieben, die notwendig sind um von einem vorhandenen Datenpool auf die Zustände innerhalb eines kleinen urbanen Abwassernetzes zu schließen. Zunächst müssen entsprechende Übergangsfunktionen bestimmt werden. Den Ausgangspunkt dafür bildet die Arbeit von [T.Schmidt ,2009], in der die Problematik der Kalibrierung von Übergangsfunktionen abgehandelt wurde. Seine Erkenntnisse sollen an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

#### 3.5.1. Der Einfluss der Datenqualität

[T.Schmidt ,2009] stellt eindeutig fest, dass nicht nur das Datenvolumen eine entscheidende Rolle für das Ergebnis spielt, sondern vor allem auch die heterogene Zusammensetzung des Datenpools in Bezug auf die Errichtungsjahre. So sind vor allem kurze Beobachtungszeiträume problematisch und können das Ergebnis deutlich verfälschen. Es ist auch wesentlich besser, wenn nicht nur die Zustandszahlen der Haltungen sondern auch die jeweiligen Haltungslängen in die Betrachtung einfließen. Auch gibt es zwei Möglichkeiten Merkmalsunterscheidungen in die Berechnung einzuführen.

Es sind dies

- Stratifizierung
- Parametrisierung

Bei der Stratifizierung werden lediglich Datensätze in die Berechnung aufgenommen, welche eine oder mehrere gemeinsame Eigenschaften besitzen. Diese Schichten (Stratum) werden dann zur Kalibrierung verwendet. So wäre es beispielsweise vorstellbar lediglich Betonrohre eines bestimmten Durchmessers zu untersuchen. Leider scheitert die Stratifizierung oftmals an einem zu geringen Datenvolumen.

Bei der Parametrisierung wird die Gesamtheit hinsichtlich signifikanter Zusammenhänge zwischen übergebenen Parametern untersucht. Damit kann zum Beispiel bestimmt werden, ob innerhalb einer Ortsentwässerung (Gesamtheit) das Material die Alterung beeinflusst.

Zusammenfassend kann für diese Arbeit festgestellt werden, dass sowohl repräsentative Daten vorhanden sind, als auch das Programm mittlerweile die Haltungslängen mitberücksichtigt.

Über die bestmögliche Art der Kalibrierung werden eigene Untersuchungen angestellt. Das zur Verfügung stehende Programm ist nämlich in der Lage beide Methoden zu verarbeiten.

Es muss aber aus heutiger Sicht festgestellt werden, dass der im Burgenland zur Verfügung stehende Beobachtungszeitraum zu klein ist, um ausschließlich mit diesen Daten zu seriösen Ergebnissen zu kommen. Der Dank geht an dieser Stelle vor allem an die Verantwortlichen jener beiden deutschen Abwasserverbände, die mir ihre Verbandsdaten überließen. Ohne diese Hilfe wäre ein erfolgreicher Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

#### 3.5.2. Beschreibung des Rechenverfahrens

[Y.LeGat ,2006] verwendet in seinem Programm die bereits erwähnte »maximum likelihood« Methode zur Schätzung der Funktionsparameter.[E.J.Plate

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

,1993] nennt sie auch die »Methode der größten Mutmaßlichkeit«, bei der angenommen wird, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Messdaten die größte der für die gegebene Verteilungsfunktion möglichen ist. Die Art der Verteilungsfunktion muss daher bekannt sein. Dieses Verfahren hat sich in der Regressionsanalyse weitgehend durchgesetzt.

Zur Iteration der Funktionsparameter wurde in diesem Programm der Levenberg-Marquardt Algorithmus realisiert [Kenneth Levenberg ,1977]. Dies ist im Wesentlichen ein Optimierungsalgorithmus zur Lösung nicht linearer Ausgleichsprobleme mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. In den Berechnungen hat sich dieser Algorithmus als ausgesprochen robust herausgestellt.

Der wichtigste Punkt ist jedoch die Prüfung der Signifikanz. Dafür wurde der Wald-Test gewählt [Wald ,1943]. Dieser prüft grob gesprochen die Wahrscheinlichkeit mit der die sogenannte Null-Hypothese zu Unrecht verworfen wird. Je kleiner das Ergebnis dieses Tests ist, umso wahrscheinlicher wird daher der Einfluss des geprüften Parameters. Es obliegt jedoch der das Testergebnis prüfenden Instanz, welche maximalen Werte hier zugelassen werden.

#### 3.5.3. Durchführung der Kalibrierung

Im ersten Schritt werden alle verfügbaren und vollständigen Datensätze zusammengeführt. Daten aus dem Burgenland standen schlussendlich lediglich aus den beiden Ortsnetzen Oberwart und Pinkafeld zur Verfügung. Auf Daten aus den burgenländischen Verbänden musste bei der Kalibrierung verzichtet werden, weil es nicht möglich war flächendeckend die Errichtungsjahre zu ermitteln. Der Umfang der dabei berücksichtigten Haltungen beträgt rund 347 000 lfm in einer zeitlich ausgesprochen heterogenen Zusammensetzung. Da auch alle Materialien vorhanden sind, sollten sich brauchbare Ergebnisse zeigen. Es ist durchaus beabsichtigt auch den Weg zum endgültigen Kalibrierungsergebnis zu zeigen um auf etwaige Probleme, die sich in diesem Zusammenhang ergeben haben, hinzuweisen.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

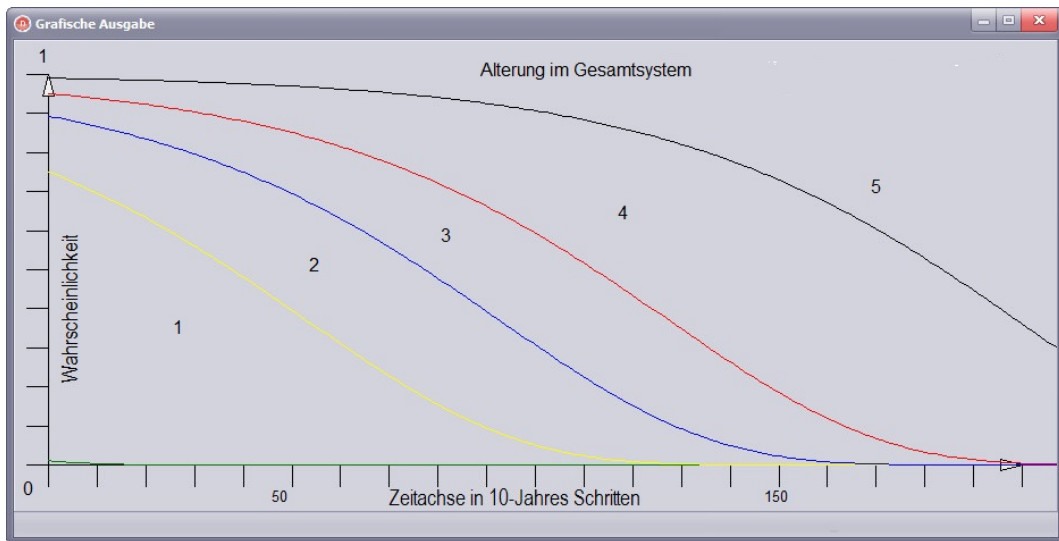


Abbildung 3.23.: Ergebnisse für das Gesamtsystem

#### 3.5.3.1. Aufbau der Datensätze

Wie bereits in Kap.2.2.4.3 dargelegt, wurde die Gl.2.26 von [Y.LeGat ,2006] in einem Computerprogramm realisiert. Im Folgenden wird beschrieben, welche Parameter und welcher Datensatzaufbau notwendig ist, um ein Ergebnis gemäß Abb. 3.23 zu erhalten. Die Verarbeitung erfolgt logischerweise tabellarisch - ein Tabellenkalkulationsprogramm bietet sich dazu als Plattform an. Die Verarbeitung der Datensätze wird zeilenweise abgewickelt, die einzelnen Datenfelder stehen somit in den Spalten. Die ersten sechs Spalten sind obligatorisch wie folgt zu besetzen:

- Spalte 1: Schicht (Stratum) - dies ist jedoch nur dann von Belang, wenn innerhalb eines Rechendurchlaufes mehrere Schichtungen untersucht werden sollen (z.B. alle Materialien innerhalb eines Datenpools)
- Spalte 2: eindeutiger Name der Haltung
- Spalte 3: Einbaujahr
- Spalte 4: Inspektionsjahr
- Spalte 5: Schadensklasse SK (aufsteigend von gut nach schlecht)
- Spalte 6: Wichtungsfaktor - es ist möglich im Rahmen der Kalibrierung bestimmten Haltungen ein unterschiedliches Gewicht in der Berechnung zuzuordnen - von dieser Möglichkeit wurde aber bei den dargestellten Untersuchungen nicht Gebrauch gemacht.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Die übrigen Spalten sind für die Kovariablen reserviert und können sowohl numerisch als auch alphanumerisch vorhanden sein. Typische Kovariablen sind:

- Länge der Haltung in [m] - diese ist obligatorisch
- Nutzung: Schmutzwasser, Regenwasser, Mischwasser
- Verbandszugehörigkeit
- Profilform: Kreisprofil oder Eiprofil
- jede andere Kovariable ist prinzipiell möglich, sofern entsprechende Daten vorhanden sind.

#### 3.5.3.2. das Steuerfile

Hier kann für jede Kovariable definiert werden, ob ein Initialeinfluss vorliegt, nur die Alterungsgeschwindigkeit beeinflusst wird oder die Kovariable in beiden Fällen eine Rolle spielt. Zusammengefasst lässt sich dies im Zusammenhang mit Gl.2.26 formulieren:

- es liegt nur ein Initialeinfluss vor:  $\beta_0 > 0, \beta_1 = 0$
- es liegt nur ein kontinuierlicher Einfluss vor:  $\beta_0 = 0, \beta_1 > 0$
- es liegen beide Einflüsse vor:  $\beta_0 > 0, \beta_1 > 0$

Dies kann für jede Kovariable gesondert definiert werden. Der Effekt auf die jeweilige Wahrscheinlichkeitsdichte ist in Abb. 3.12 sinngemäß dargestellt.

Zusätzlich werden im Steuerfile die Bezeichnungen der Schadensklassen definiert. Diese müssen nicht notgedrungen numerisch sein. Wesentlich ist lediglich, dass die Bezeichnungen aufsteigend (gut nach schlecht) sortiert sind.

#### 3.5.3.3. Beschreibung des Ergebnisvektors für den Initialeinfluss

In Abb. 3.24 ist ein Ergebnisvektor dargestellt. In den ersten Zeilen befinden sich die Werte für  $\alpha_i$  gemäß Gl.2.26. Diese beschreiben die einzelnen Übergangsfunktionen zwischen den Schadensklassen - beispielsweise ist  $\alpha_4$  für den Übergang von Schadensklasse 4 nach Schadensklasse 5 verantwortlich. Zusätzlich wird statistisch geprüft, ob überhaupt ein signifikanter Übergang vorliegt. Dies passiert durch einen Vergleich jedes Wertes  $\alpha_i$  mit dem Wert  $\alpha_0$ .

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Unmittelbar darauf folgt der Initialeinfluss der Haltungslänge.

Die Interpretation der Ergebnisse für den Initialeinfluss der Kovariablen sei an einem Beispiel dargelegt:

im konkreten Fall wurden die Materialien Asbestzement, Beton, Polyvinylchlorid und Steinzeug untersucht. Als Vergleichsmaterial wurde Steinzeug ausgewählt (dies passiert im Programm automatisch nach der alphabetischen Reihenfolge). Das Programm prüft nun, ob signifikante Unterschiede der anderen Materialien in Bezug auf das Vergleichsmaterial vorliegen.

Ist dies der Fall, so wird in der letzten Spalte ( $Pr > Chi^2$ ) ein Wert nahe Null ausgeworfen, was bedeutet, dass die Nullhypothese abgelehnt wird.

Stellt der Test keinen signifikanten Unterschied fest, so wird ( $Pr > Chi^2$ ) deutlich größer als Null und deutet somit auf das Zutreffen der Nullhypothese hin.

#### 3.5.3.4. Beschreibung des Ergebnisvektors für den Einfluss der Zeit

(T) beschreibt generell den Einfluss der Zeitdauer auf das Ergebnis.

Für jene Kovariablen, welche entsprechend definiert wurden, wird ein entsprechender Wert im Ergebnisvektor ausgeworfen. Natürlich erfolgt auch für diesen Fall eine statistische Prüfung zur Gültigkeit der Nullhypothese.

Die Werte  $\alpha_i$  sind von der Zeitdauer unabhängig.

Die praktische Anwendung des Ergebnisvektors ist in Gl.3.6 ausführlich angegeben. Die Berechnungen in Abb. 3.25 basieren auf derselben Formel und wurden im Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt.

#### 3.5.3.5. Probleme mit der Konvergenz

In der Einleitung wurde angedeutet, dass der Datenpool vor der Verwendung manuell geprüft werden musste. Es stellte sich heraus, dass vor allem bei Kovariablen, welche im Datenbestand unterrepräsentiert waren, der Algorithmus nicht konvergierte. Beispielsweise gibt es Probleme, wenn die Nutzung als Kovariable definiert wird, aber von eintausend Haltungen lediglich zehn Regenwasser transportieren. Diese und ähnliche Fälle mussten im Vorfeld eliminiert werden um ein Ergebnis zu produzieren. Hier besteht noch Entwicklungspotential in der verwendeten Software, die eine solche Prüfung selbständig durchführen sollte.



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

#### 3.5.3.6. Ergebnisse basierend auf dem gesamten Datenpool

In Abb. 3.23 ist das Ergebnis, welches sich ohne Rücksicht auf Materialien, Abwasserart und Profil ergeben hat, dargestellt. Es stellt die Alterung eines Gesamtsystems dar. Statistisch gesehen befinden sich nach circa 150 Jahren unsere Systeme überwiegend (80%) in der Schadensklasse 4 und darüber. Auffallend ist mit Sicherheit der zu Beginn sehr flache Verlauf der Übergangsfunktion von SK4 nach SK5. Dies lässt sich nun so interpretieren, dass im Gesamtsystem erst relativ spät ein Totalversagen der Haltungen eintritt. Dieses Erreichen der Schadensklasse 5 ist mit Sicherheit das »worst-case scenario«, welches auf keinen Fall eintreten sollte. Es wird daher an dieser Stelle vorgeschlagen die Restlebensdauer einer Haltung mit dem wahrscheinlichen Erreichen der Schadensklasse 4 zu limitieren. Auch dabei wird für diesen Fall zunächst einmal die Versagenswahrscheinlichkeit mit weniger als 20% angenommen. Dieser Wert ist willkürlich gewählt.

| Covariable               |                  | Estimate  | Std. Error | Chi2     | Pr>Chi2  |
|--------------------------|------------------|-----------|------------|----------|----------|
| Alpha(0)                 | (vs 0)           | 1,50E+00  | 1,48E-01   | 1,03E+02 | 0        |
| Alpha(1)                 | (vs Alpha(0))    | -1,25E+00 | 1,50E-01   | 2,93E+03 | 0        |
| Alpha(2)                 | (vs Alpha(1))    | -2,18E+00 | 1,58E-01   | 7,41E+02 | 0        |
| Alpha(3)                 | (vs Alpha(2))    | -2,99E+00 | 1,70E-01   | 4,49E+02 | 0        |
| Alpha(4)                 | (vs Alpha(3))    | -4,67E+00 | 2,15E-01   | 3,55E+02 | 0        |
| LENGTH                   | (vs 0)           | -6,51E-03 | 1,10E-03   | 3,48E+01 | 0        |
| _MATERIAL [Asbestzement] | (vs Steinzeug)   | -6,62E-01 | 1,54E-01   | 1,84E+01 | 0,000018 |
| _MATERIAL [Beton]        | (vs Steinzeug)   | -4,96E-01 | 1,01E-01   | 2,41E+01 | 0,000001 |
| _MATERIAL [Polyvinylchl] | (vs Steinzeug)   | -5,92E-01 | 7,35E-02   | 6,48E+01 | 0        |
| _DN [(=300)]             | (vs >300)        | 2,37E-02  | 5,43E-02   | 1,91E-01 | 0,661696 |
| _DN [<300]               | (vs >300)        | -6,86E-03 | 1,21E-01   | 3,22E-03 | 0,954738 |
| _GEBIET[AW_OBERWART]     | (vs Verband 2)   | -3,07E+00 | 2,41E-01   | 1,62E+02 | 0        |
| _GEBIET[AW_PINKAFELD]    | (vs Verband 2)   | -1,12E+00 | 1,50E-01   | 5,52E+01 | 0        |
| _GEBIET[Verband1]        | (vs Verband 2)   | -6,00E-01 | 1,02E-01   | 3,44E+01 | 0        |
| T                        | (vs 0)           | -3,75E+00 | 1,09E-01   | 1,18E+03 | 0        |
| T*LENGTH                 | (vs 0)           | 1,06E-02  | 1,00E-03   | 1,12E+02 | 0        |
| T*_NUTZUNG[KM]           | (vs KS)          | 5,78E-02  | 5,92E-02   | 9,54E-01 | 0,328819 |
| T*_NUTZUNG[KR]           | (vs KS)          | 2,35E-01  | 7,28E-02   | 1,04E+01 | 0,001242 |
| T*_PROFIL[Eiprofil]      | (vs Kreisprofil) | -1,48E-02 | 4,82E-02   | 9,39E-02 | 0,759319 |
| T*_DN[(=300)]            | (vs >300)        | 1,56E-02  | 4,41E-02   | 1,26E-01 | 0,722900 |
| T*_DN[<300]              | (vs >300)        | 1,39E-02  | 7,18E-02   | 3,75E-02 | 0,846424 |
| T*_GEBIET[AW_OBERWART]   | (vs Verband 2)   | 1,21E+00  | 1,12E-01   | 1,15E+02 | 0        |
| T*_GEBIET[AW_PINKAFELD]  | (vs Verband 2)   | 3,12E-01  | 1,14E-01   | 7,53E+00 | 0,006066 |
| T*_GEBIET[Verband1]      | (vs Verband 2)   | 4,03E-01  | 1,03E-01   | 1,52E+01 | 0,000096 |
| Sigma                    | (vs 0)           | 6,60E-01  | 2,57E-02   | 6,61E+02 | 0        |

Abbildung 3.24.: Ergebnisse Waldtest

Aus der Abb. 3.24 ist ersichtlich, dass auch der durchgeführte Wald-Test Nullhypothesen (rot gekennzeichnet) in dieser Form mehrfach nicht ablehnt. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass nur unzureichende Daten bei den vorhandenen Testgrößen vorhanden sind. Beispielhaft werden nun auf Basis des errechneten Lösungsvektors (Abb. 3.24) für die vier vorhandenen Materialien

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

unter denselben Randbedingungen entsprechende Übergangswahrscheinlichkeiten ermittelt. Diese dienen dann zum Vergleich mit den nach den Materialien »stratifizierten« Ergebnissen. Die entsprechende Formel wurde bereits angegeben (siehe GL.3.5).

|                   | Beta 0    | Beta (T)  |
|-------------------|-----------|-----------|
| Beton             | -4,96E-01 |           |
| PVC               | -5,92E-01 |           |
| Asbestzement      | -6,62E-01 |           |
| Steinzeug         | 0         |           |
| SK 3 -> SK 4      | -2,99E+00 |           |
| Länge = 45m       | -6,51E-03 | 1,06E-02  |
| Schmutzwasser     |           | 0         |
| Verband 2         | 0         | 0         |
| 50 Jahre          |           |           |
| Einfluss der Zeit |           | -3,75E+00 |
| Beton             | 86,01     |           |
| PVC               | 87,21     |           |
| Asbestzement      | 88,02     |           |
| Steinzeug         | 78,08     |           |

Abbildung 3.25.: Versagenswahrscheinlichkeiten

Als Randbedingungen wurden eine Länge von 45m gewählt, ein Zeitraum von 50 Jahren sowie die Nutzung als Schmutzwasserkanal. Es wird die Übergangswahrscheinlichkeit von der Schadensklasse 3 in die Schadensklasse 4 dargestellt (Abb. 3.25). Anders ausgedrückt besteht z.B. bei Beton eine 86%-ige Chance eine Haltung in einer Schadensklasse 3 (oder besser) anzutreffen. Es lässt sich jedoch nicht abschätzen, inwiefern die unterschiedlichen Materialien im selben Datenpool den Lösungsvektor beeinflussen. Aus diesem Grund werden nun die Daten entsprechend stratifiziert. Wie bereits vorher festgestellt, sollten auch für diesen Fall genügend Daten vorhanden sein - eine Ausnahme bildet hierbei der Asbestzement, welcher daher im Folgenden unberücksichtigt bleiben muss.

#### 3.5.4. Durchführung der Kalibrierung getrennt nach Materialien

Es liegen Daten für Beton, Steinzeug und PVC in ausreichendem Umfang vor. Da auch im Südburgenland diese Materialien überwiegen, werden daher entsprechende Übergangsfunktionen bestimmt.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

#### 3.5.4.1. Kunststoffrohre - PVC

Es wurden 1800 Haltungen mit einer Gesamtlänge von 72824 lfm in die Berechnung aufgenommen. Die ältesten Haltungen wurden 1909 errichtet, die Jüngsten im Jahr 2011.

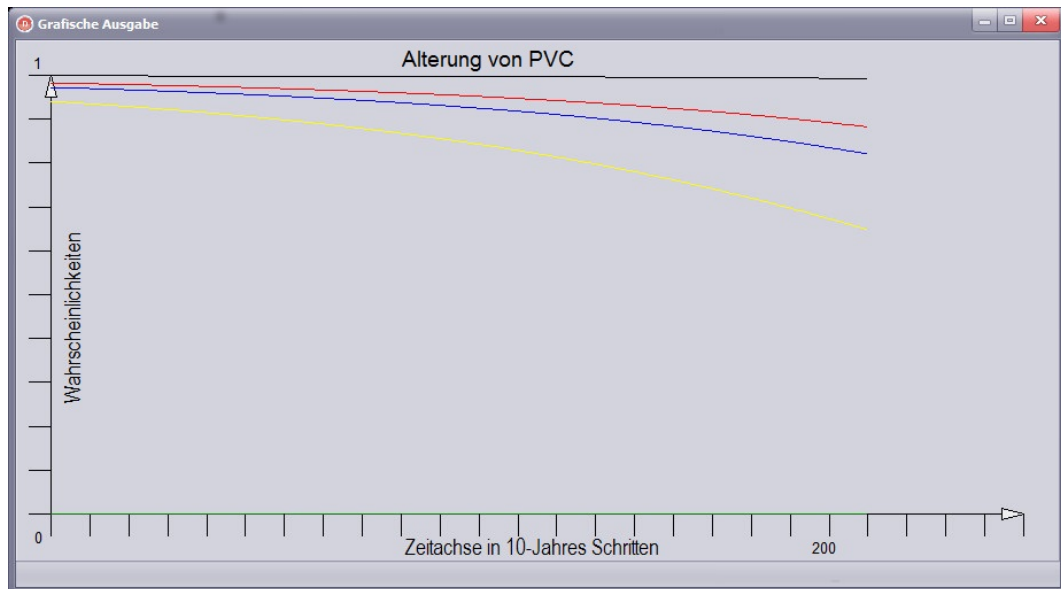


Abbildung 3.26.: Ergebnisse PVC undifferenziert

In Abb. 3.26 sind die sich ergebenden Übergangsfunktionen ohne Berücksichtigung der Covariablen dargestellt. Es zeigen sich völlig andere Kurvenverläufe als im Gesamtsystem. Gemäß den errechneten Werten kann nur ein ausgesprochen langsamer Alterungsverlauf unterstellt werden. Dieses Ergebnis (Abb. 3.30) ist mit Sicherheit auch auf den sehr kurzen Beobachtungszeitraum von ca. dreißig Jahren zurückzuführen - tendenziell lässt sich jedoch feststellen, dass PVC, vor allem auch in den modernen chemischen Zusammensetzungen, ein ausgesprochen langlebiges Material ist.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

| Covariable              |                | Estimate  | Std.Error | Chi2     | Pr>Chi2  |
|-------------------------|----------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Alpha(0)                | (vs 0)         | 2.03E+00  | 2.01E-01  | 1.01E+02 | 0        |
| Alpha(1)                | (vs Alpha(0))  | -2.79E+00 | 1.77E-01  | 6.80E+02 | 0        |
| Alpha(2)                | (vs Alpha(1))  | -3.58E+00 | 2.07E-01  | 6.01E+01 | 0        |
| Alpha(3)                | (vs Alpha(2))  | -4.04E+00 | 2.26E-01  | 2.87E+01 | 0        |
| Alpha(4)                | (vs Alpha(3))  | -6.87E+00 | 4.81E-01  | 4.94E+01 | 0        |
| LENGTH                  | (vs 0)         | -4.52E-03 | 2.76E-03  | 2.69E+00 | 0.101239 |
| _GEBIET[AW_OBERWART]    | (vs Verband 2) | -8.06E+00 | 1.21E+00  | 4.43E+01 | 0        |
| _GEBIET[AW_PINKAFELD]   | (vs Verband 2) | -1.11E+00 | 3.16E-01  | 1.23E+01 | 0.000444 |
| _GEBIET[Verband 1]      | (vs Verband 2) | -1.90E+00 | 1.76E-01  | 1.16E+02 | 0        |
| T                       | (vs 0)         | -5.37E+00 | 4.20E-01  | 1.64E+02 | 0        |
| T*LENGTH                | (vs 0)         | 4.09E-03  | 1.28E-03  | 1.01E+01 | 0.001448 |
| T*_NUTZUNG[KM]          | (vs KS)        | 1.05E+00  | 1.40E-01  | 5.62E+01 | 0        |
| T*_NUTZUNG[KR]          | (vs KS)        | 8.30E-01  | 1.37E-01  | 3.69E+01 | 0        |
| T*_GEBIET[AW_OBERWART]  | (vs Verband 2) | 2.48E+00  | 2.96E-01  | 7.01E+01 | 0        |
| T*_GEBIET[AW_PINKAFELD] | (vs Verband 2) | 1.39E+00  | 2.96E-01  | 2.22E+01 | 0.000002 |
| T*_GEBIET[Verband 1]    | (vs Verband 2) | 1.64E+00  | 2.51E-01  | 4.24E+01 | 0        |
| Sigma                   | (vs 0)         | 1.43E+00  | 1.56E-01  | 8.38E+01 | 0        |

Abbildung 3.27.: Ergebnisvektor und Signifikanz der Covariablen

Durch Verwendung des Ergebnisvektors (siehe Abb. 3.27) ist es nun möglich sozusagen für jede Haltung gemäß ihren Eigenschaften individuelle Übergangsfunktionen zu ermitteln. Für das Material PVC sind im vorliegenden System folgende Einflüsse maßgebend:

- Haltungslänge  $\beta_0 = -0.00452$
- Einfluss der Zeit T  $\beta_1 = -5.3700$
- Haltungslänge über die Zeit  $\beta_1 = 0.00409$

Für eine Haltung im Verband 2 mit der Länge  $L=45$  m, einer beliebigen Nennweite und Schmutzwassernutzung ergibt sich nach 50 Jahren folgende Wahrscheinlichkeit diese in der Schadensklasse 3 ( $\alpha_{3-4} = -4.04$ ) vorzufinden:

$$S(50) = \exp(-\exp(-4.04 + 45 * -0.00452 + 50 * \exp(-5.37 + 45 * 0.00409)) \quad (3.6)$$

$S(50)$  ergibt sich in diesem Fall mit 0.981, was bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit nach 50 Jahren eine Haltung in der Schadensklasse 3 oder besser vorzufinden zumindest 98.1% beträgt. Vice versa wird mit 1.9% -iger Wahrscheinlichkeit diese Haltung in die nächstschlechtere Schadensklasse (SK 4) wechseln. Dieses Ergebnis unterscheidet sich nun deutlich von dem in Abb. 3.23 Errechneten und unterstreicht die Notwendigkeit der nach Materialien getrennten Untersuchung.

Um die Plausibilität der durchgeführten Kalibrierung zumindest grob abschätzen zu können, werden diese Daten nun noch konventionell ausgewertet. Die Auswertung erfolgt über sogenannten Pivot-Tabellen. Dies ist eine Funktionalität, welche von allen Tabellenkalkulationsprogrammen zur Verfügung gestellt wird. Eine gesonderte statistische Betrachtung wird nicht durchgeführt, sondern lediglich der vorliegende Datenpool nach allen sinnhaften Kriterien visualisiert.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer



**Abbildung 3.28.:** Verteilung der Schadensklassen PVC

Die Abb. 3.28 zeigt einen, im Grunde, sehr guten Zustand der Haltungen. Der Anteil der Schadensklassen 3 oder schlechter liegt deutlich unter 20%.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

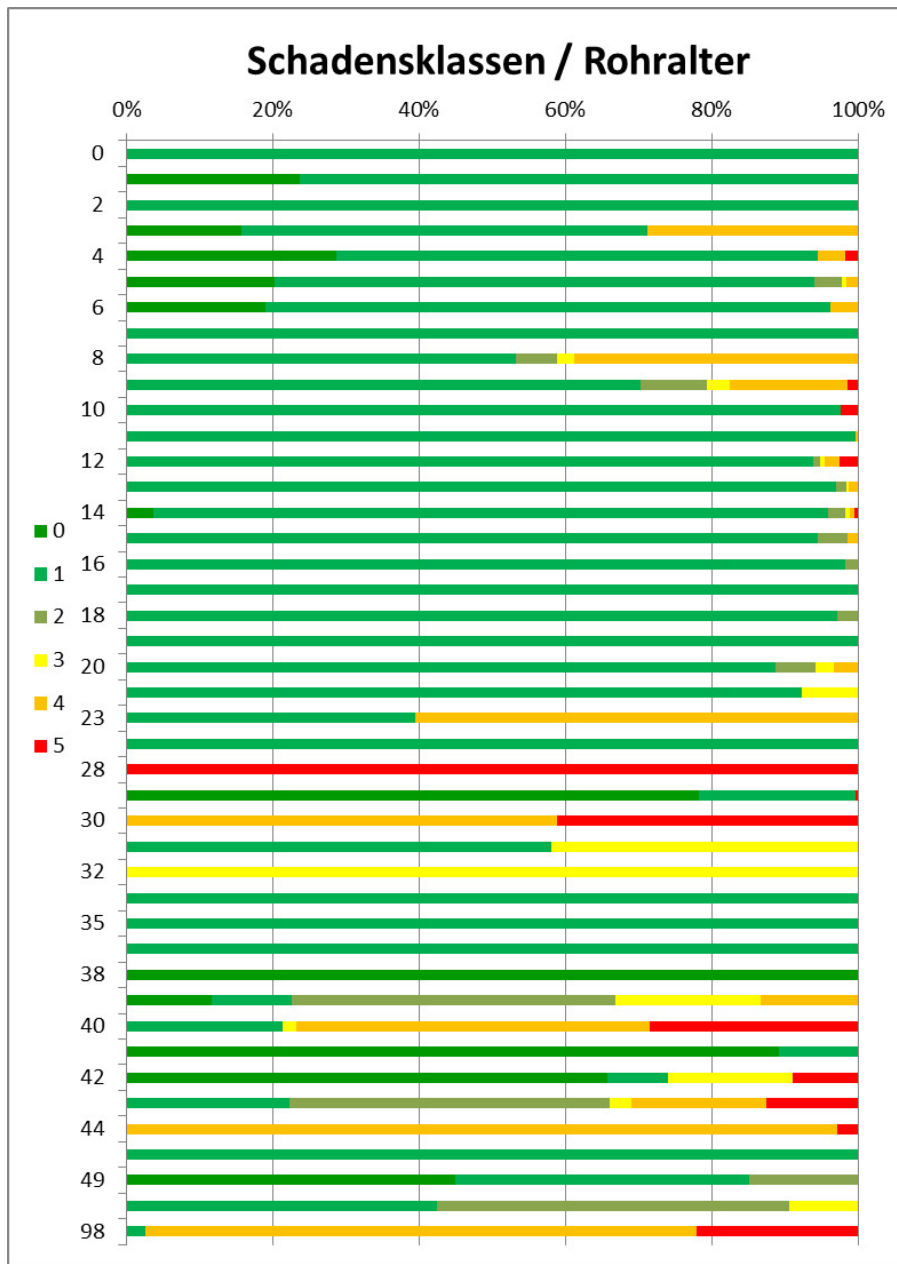


Abbildung 3.29.: Schadensklassen / relativ

In der Abb. 3.29 wird nun die Verteilung der Schadensklassen in Abhängigkeit des Rohralters dargestellt. Alter ist in diesem Zusammenhang der Differenzzeitraum zwischen Errichtung und Erstinspektion. Dabei fällt auf, dass relativ gesehen, kein signifikanter Zusammenhang zwischen Schadenshäufigkeit und Alter festzustellen ist.

Da in dieser Grafik kein Hinweis auf die jeweils errichteten Gesamtlängen

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

existiert, wird in Abb. 3.30 die Verteilung aller Schadensklassen in absoluten Längen dargestellt.

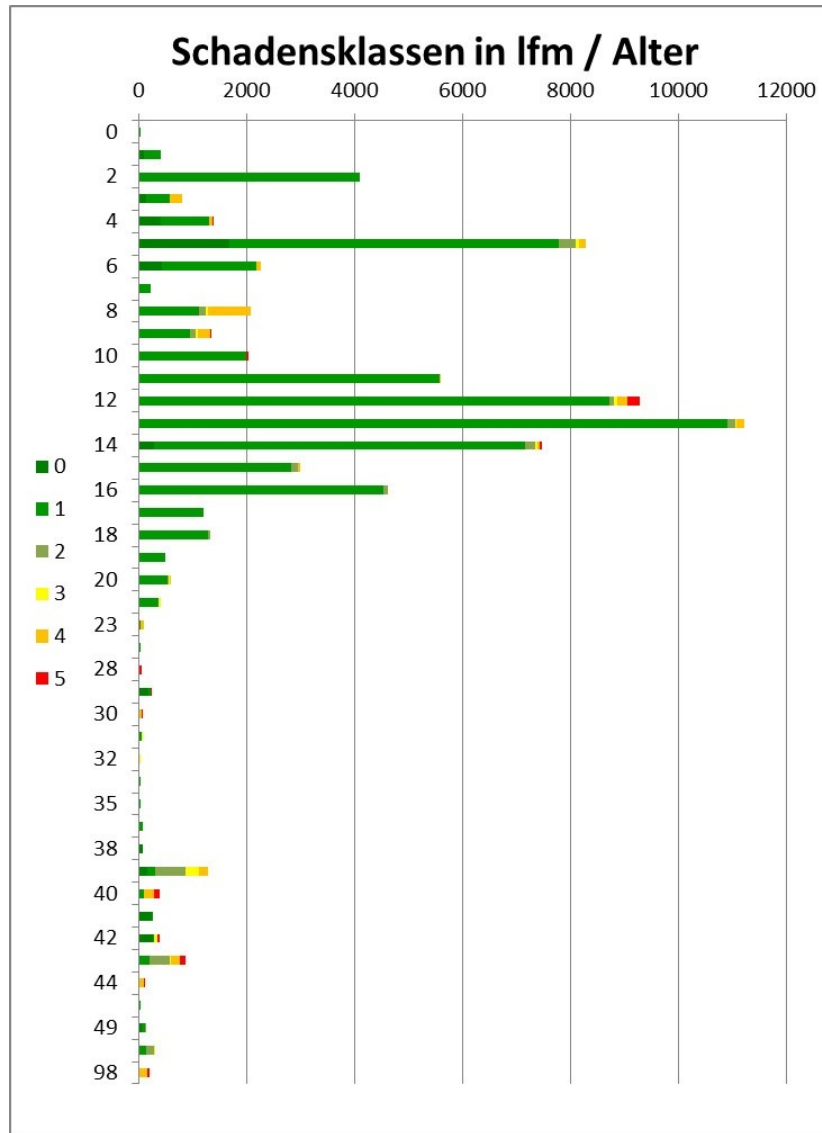


Abbildung 3.30.: Schadensklassen / Ergebnis in lfm

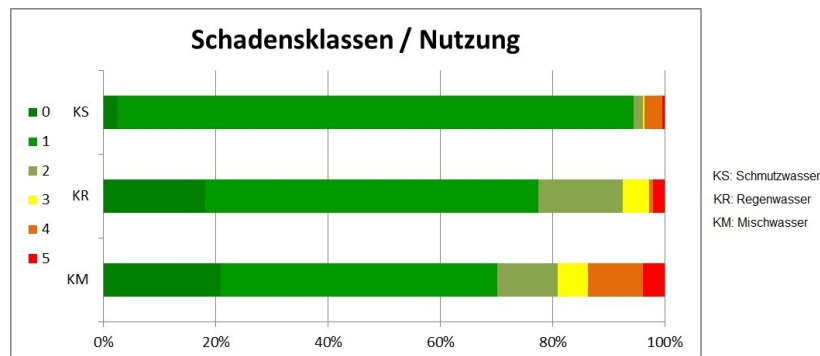
Auch dabei ist eine über die Jahre ähnliche Verteilung der Schadensklassen offensichtlich. Auffällig ist in Abb. 3.30 vor allem, dass Kanäle aus dem Errichtungszeitraum 2003-2005 (Alter 8-10 Jahre) eine bereits sehr hohe Schadensdichte aufweisen. Zumindest dies untermauert den absolut wichtigen Einfluss einer ordentlichen Bauweise. Auch scheint es so zu sein, dass ein

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

qualitätsvoll eingebautes PVC-Rohr erst nach ca. 80-90 Jahren seine maximale Lebensdauer erreicht. Dieser Wert beruht jedoch ebenfalls nur auf einer Extrapolation, wobei natürlich Materialfehler, Einbaufehler und weitere derartige Einflüsse unberücksichtigt bleiben müssen.

Schlussendlich kann aber festgestellt werden, dass auch bei dieser Art der Auswertung kein signifikanter gleichmäßiger Alterungsprozess herausgelesen werden kann. Es gibt offensichtlich Errichtungsjahre mit hoher Schadensdichte, welche sich mit solchen geringer Schadenshäufigkeit abwechseln. Die Reihenfolge gehorcht in diesem Fall keinem Schema, welches man bei einer auftretenden Alterung vermuten würde. Unabhängig davon, dass die verwendete Software zu einem Ergebnis konvergiert, ist dieses mit großer Vorsicht zu genießen.

Nichtsdestotrotz werden noch vertiefende Auswertungen durchgeführt, die möglicherweise Zusammenhänge mit der Nutzung und den Einzelschäden erkennen lassen.

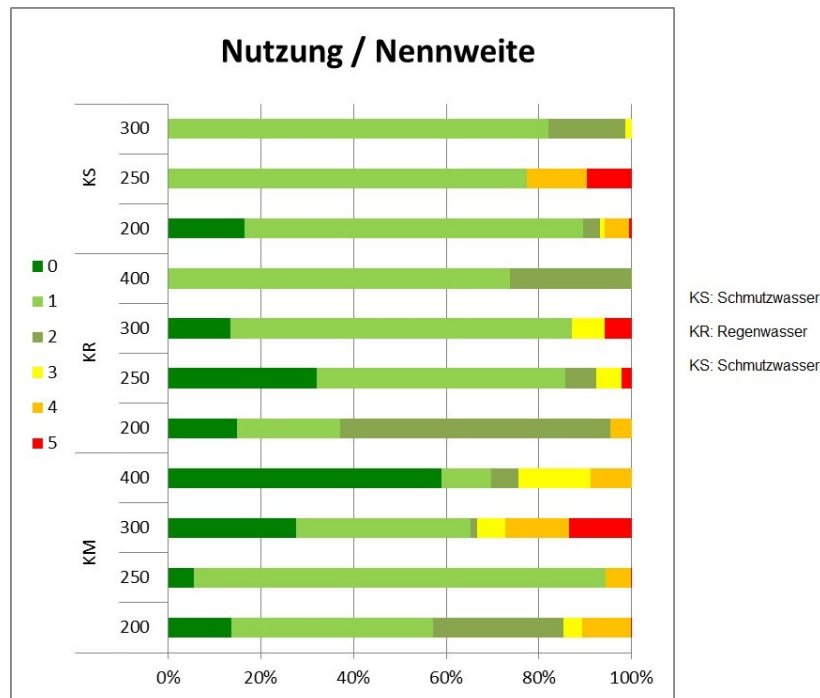


**Abbildung 3.31.:** Schadensklassen / Nutzung / relativ

Abb. 3.31 bestätigt das Ergebnis des Wald-Tests im Zusammenhang mit der Nutzung, wobei die Schadenshäufigkeit in Mischwasserkanälen deutlich höher ist.



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer



**Abbildung 3.32.:** Schadensklassen / Nutzung / Nennweite

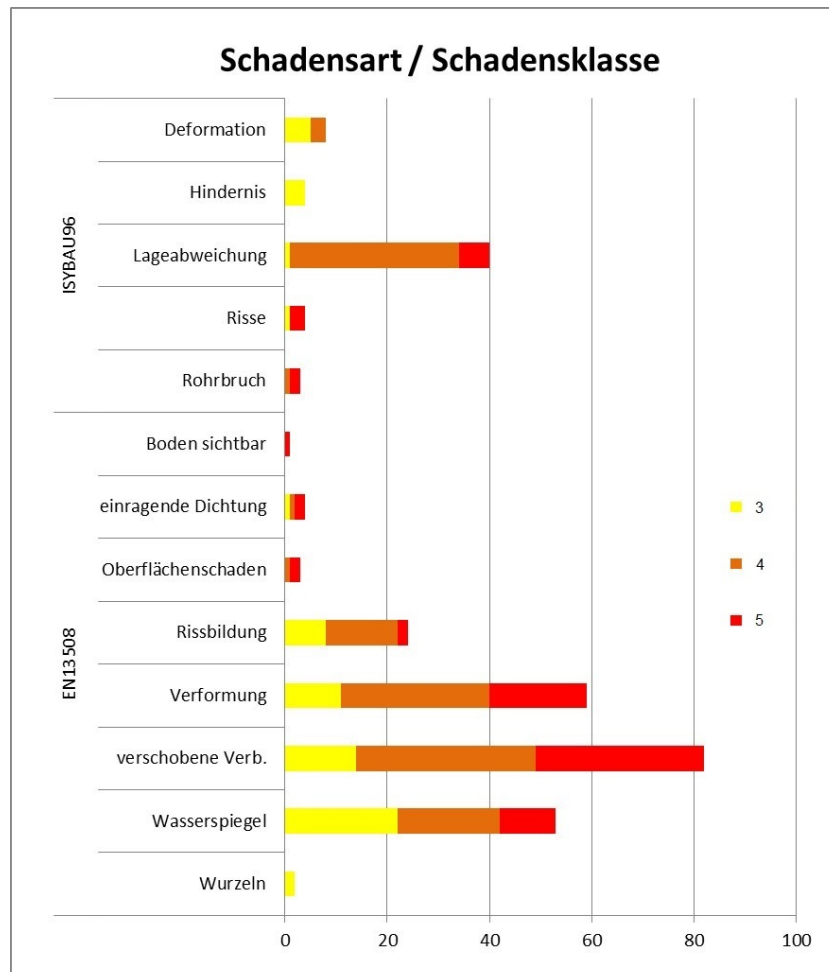
Die Berücksichtigung der Nennweite in der Auswertung (Abb. 3.32) deutet eine höhere Schadensdichte bei den Durchmessern 300mm und 400mm an. Auch dieser Umstand spricht eher für Mängel beim Einbau, da große Nennweiten bei biegeweichen Materialien naturgemäß wesentlich anfälliger gegenüber axialen Verformungen sind.

Die ausgewerteten Daten lassen darauf schließen, dass vor allem die Qualität der Ausführung für die Lebensdauer verantwortlich zeichnet. Ist diese innerhalb eines geschlossenen Gebietes deutlich unterschiedlich, muss jede statistische Betrachtung kippen.

Auch die Verwendung der Haltungszahlen für diese Betrachtungen ist zumindest zu hinterfragen, da einerseits drei Schutzziele die Höhe der Schadensklasse beeinflussen und sich andererseits nicht ableiten lässt, wie die ermittelte Schadensklasse zustande gekommen ist.

Daher wird in einem letzten Schritt untersucht, welche Art von Schäden überhaupt bei den einzelnen Schadensklassen relevant sind.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer



**Abbildung 3.33.:** Schadensklassen / Schadensart

Abb. 3.33 lässt eindeutig erkennen, dass überwiegend Rohrverformungen für die höheren Schadensklassen verantwortlich sind. Auch der Code »Wasserspiegel« lässt auf Lageabweichungen in Rohrlängsrichtung schließen. Kaum anzutreffen sind Rohrbrüche und Rissbildungen, was jedoch bei biegeweichen Materialien nicht wirklich überrascht.

Nun interessiert noch, ob sich die Häufigkeit der Einzelschäden mit dem Rohralter signifikant ändert. Aus Gründen der Übersicht werden beide zur Dokumentation verwendeten Normen getrennt dargestellt.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

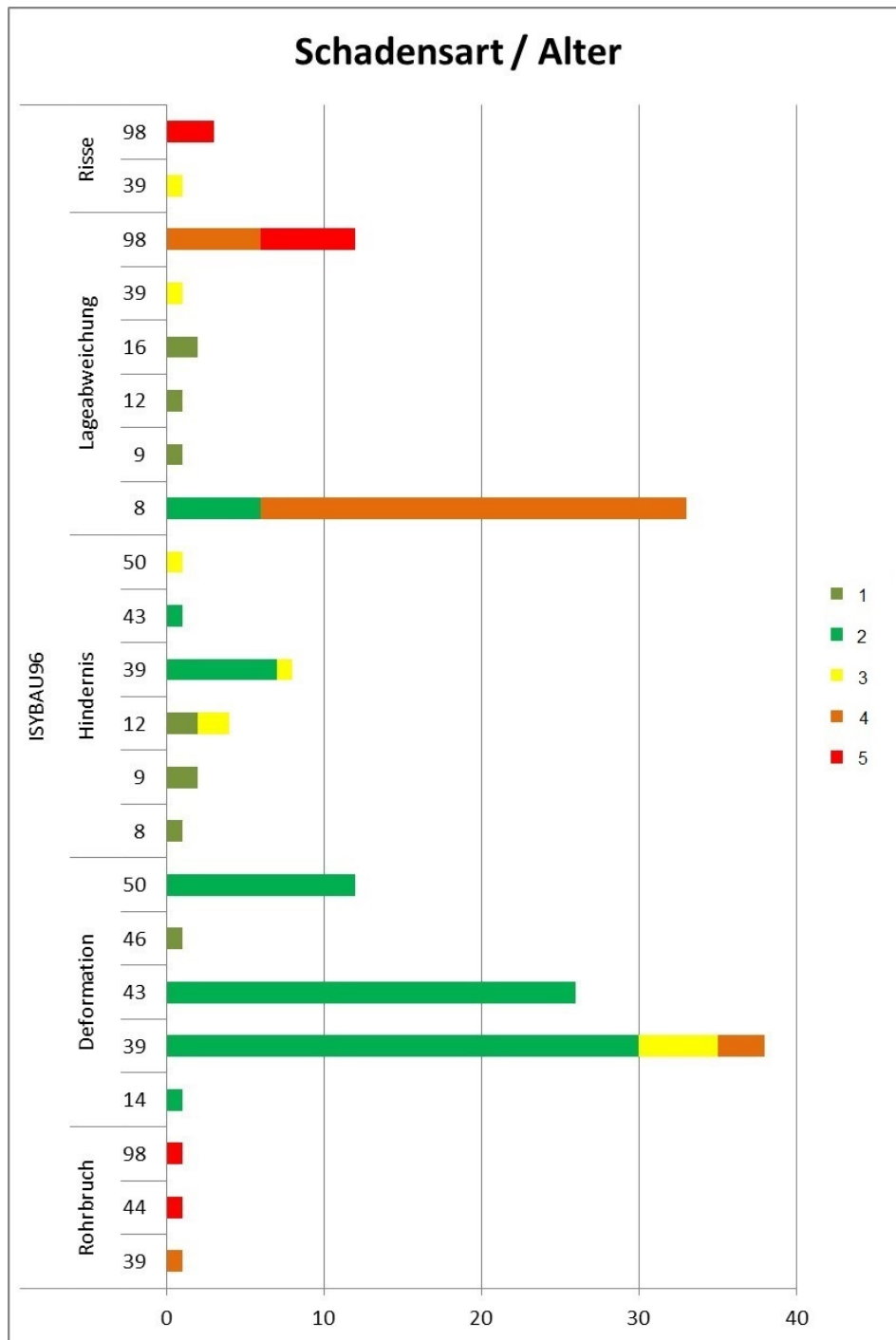


Abbildung 3.34.: Schadenscodes altersabhängig - ISYBAU

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

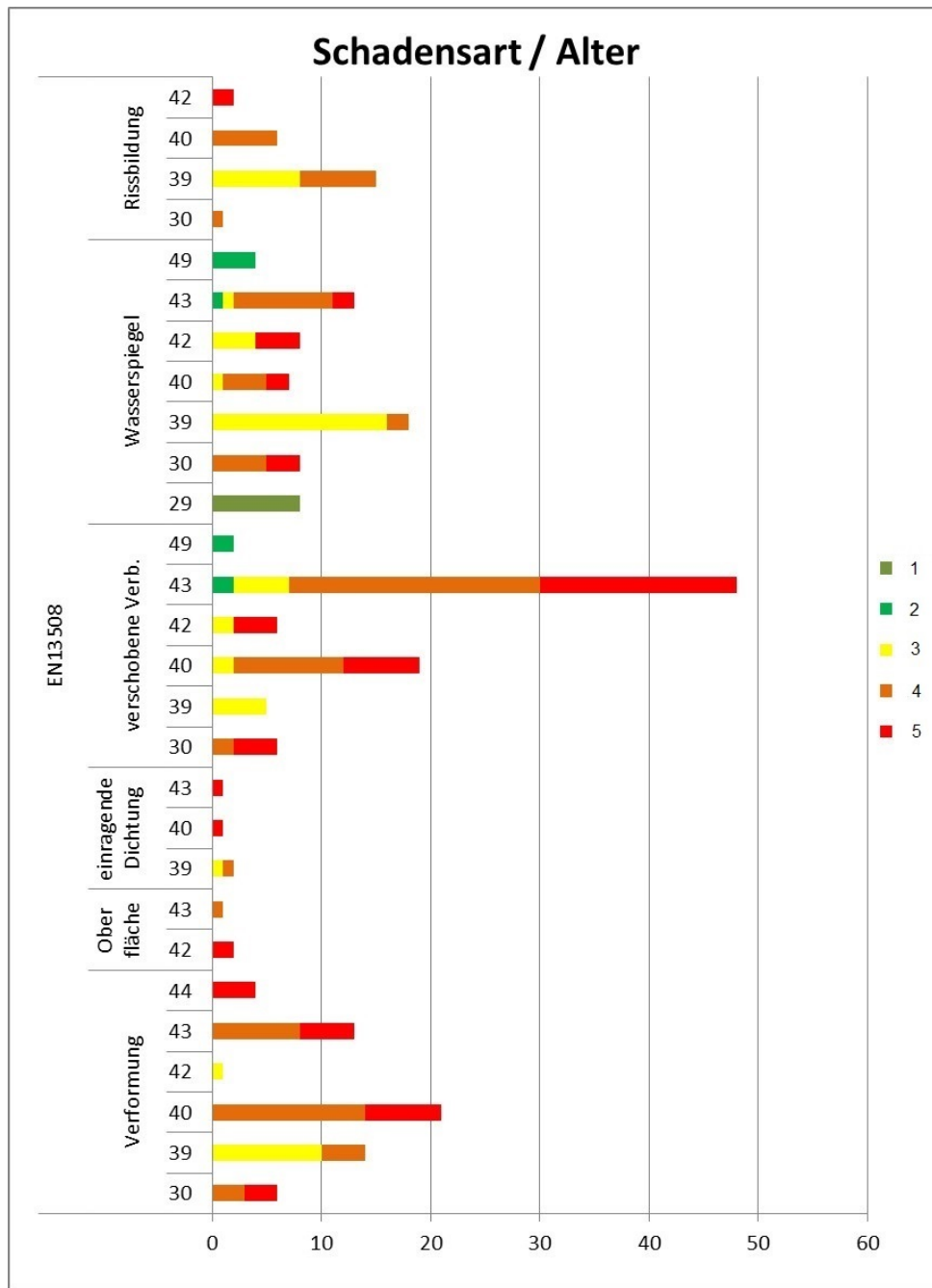


Abbildung 3.35.: Schadenscodes altersabhängig - EN13508

Auch die Abbildungen Abb. 3.34 und Abb. 3.35 lassen bei der Schadensentwicklung keine Ableitung eines Schemas zu, außer dass in einem Alter von ca. vierzig Jahren eine signifikant höhere Schadenshäufigkeit vorhanden ist.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Zusammenfassend kann für das Material PVC festgestellt werden, dass dieses zumindest auf Basis der für die Untersuchung vorhandenen Daten keinen wie immer verlaufenden Alterungsprozess zeigt. Leider konnten weitere möglicherweise maßgebende Faktoren, wie Tiefenlage und dynamische Verkehrsbelastung, nicht mitberücksichtigt werden. Auf eine weitere Untersuchung mit Hilfe der logistischen Regression wird daher für dieses Material verzichtet.

#### 3.5.4.2. Steinzeug

Dieses Material gehört zu den ältesten, welche bei der Errichtung von Kanalsystemen verwendet wurde. Im Gegensatz zum PVC handelt es sich um ein biegesteifes Material. Es werden nun sinngemäß dieselben Auswertungen vorgenommen wie beim PVC. Es lagen Daten von 1171 Haltungen mit einer Gesamtlänge von 45366 lfm vor.

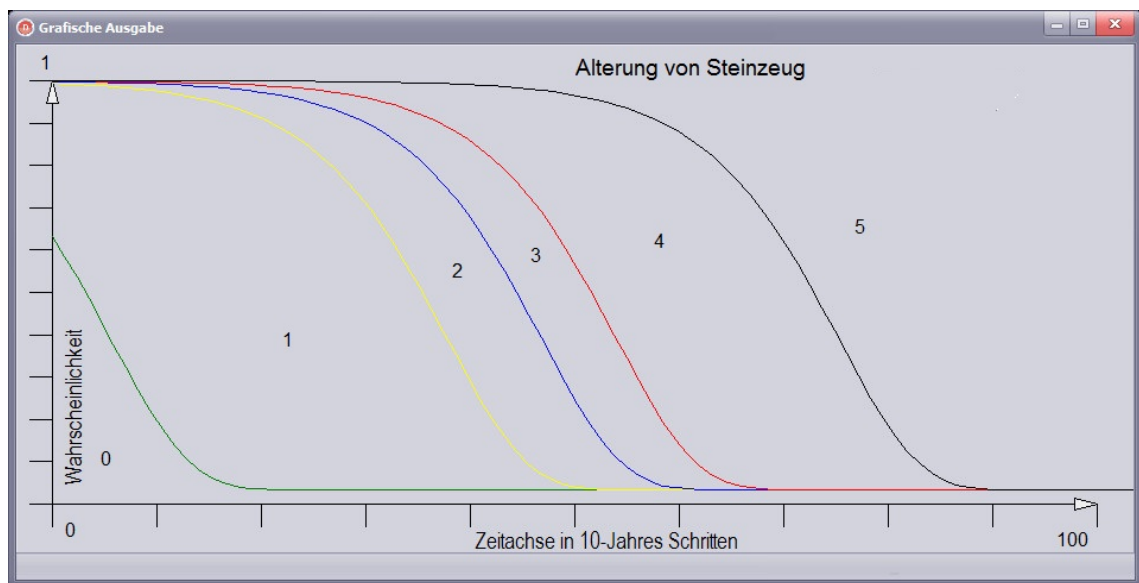


Abbildung 3.36.: Ergebnis für Steinzeug

Die Untersuchung mittels logistischer Regression bringt gemäß Abb. 3.36 durchaus ansehnliche Ergebnisse. Hier zeigt sich der Vorteil von langen Beobachtungszeiträumen.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

| Covariable              |                | Estimate  | Std,Error | Chi2     | Pr>Chi2  |
|-------------------------|----------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Alpha(0)                | (vs 0)         | -7,32E-01 | 4,53E-01  | 2,62E+00 | 0,105616 |
| Alpha(1)                | (vs Alpha(0))  | -4,96E+00 | 5,78E-01  | 1,59E+02 | 0        |
| Alpha(2)                | (vs Alpha(1))  | -6,15E+00 | 7,00E-01  | 3,25E+01 | 0        |
| Alpha(3)                | (vs Alpha(2))  | -7,09E+00 | 8,30E-01  | 2,11E+01 | 0,000004 |
| Alpha(4)                | (vs Alpha(3))  | -9,88E+00 | 1,10E+00  | 5,36E+01 | 0        |
| LENGTH                  | (vs 0)         | 1,02E-02  | 6,35E-03  | 2,56E+00 | 0,109416 |
| DN                      | (vs 0)         | 6,81E-03  | 1,44E-03  | 2,23E+01 | 0,000002 |
| T                       | (vs 0)         | -1,87E+00 | 2,65E-01  | 5,02E+01 | 0        |
| T*LENGTH                | (vs 0)         | 1,66E-03  | 1,85E-03  | 8,07E-01 | 0,369012 |
| T*_NUTZUNG[KM]          | (vs KS)        | 6,28E-02  | 8,99E-02  | 4,89E-01 | 0,484405 |
| T*_NUTZUNG[KR]          | (vs KS)        | 5,62E-01  | 1,60E-01  | 1,24E+01 | 0,00043  |
| T*_GEBIET[AW_OBERWART]  | (vs Verband 2) | -6,52E-01 | 2,07E-01  | 9,94E+00 | 0,001617 |
| T*_GEBIET[AW_PINKAFELD] | (vs Verband 2) | -3,25E-02 | 8,43E-02  | 1,49E-01 | 0,699305 |
| T*_GEBIET[Verband 1)    | (vs Verband 2) | 7,49E-02  | 1,03E-01  | 5,29E-01 | 0,467207 |
| T*DN                    | (vs 0)         | -3,06E-03 | 1,72E-03  | 3,19E+00 | 0,074102 |
| Sigma                   | (vs 0)         | 9,99E-01  | 4,27E-02  | 5,47E+02 | 0        |

Abbildung 3.37.: Ergebnisvektor und Signifikanz der Covariablen

Die Prüfung mit dem Waldtest zeigt eine Abhängigkeit zwischen Schmutz - und Regenwasser. Auch ein Einfluss der Nennweite wird nicht ausgeschlossen. Die Unabhängigkeit von Verbandsgebiet wird vom Wald-Test bestätigt. Dies ist insofern von Bedeutung, als ja die Ergebnisse auf andere Gebiete umgelegt werden sollen. Auffällig und überraschend ist der gegenüber PVC deutlich beschleunigte globale Alterungspfad.

Aus diesem Grund erfolgt auch jetzt die Prüfung der Plausibilität über eine konventionelle Betrachtung mit Pivottabellen. Zunächst interessiert der generelle Zustand aller betrachteten Haltungen.

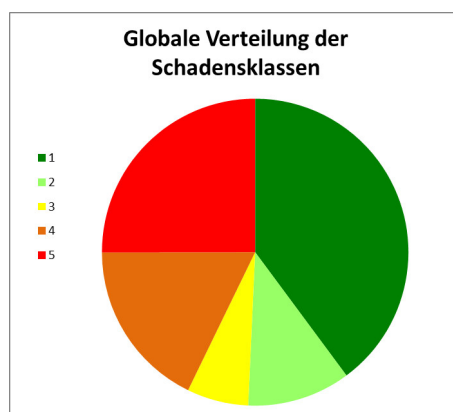


Abbildung 3.38.: Verteilung der Schadensklassen - Steinzeug

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

In Abb. 3.38 erkennt man doch eine im Verhältnis wesentlich höhere Schadenshäufigkeit gegenüber dem Gesamtsystem (Abb. 3.10). Im konkreten Fall sind fast 50% der Steinzeugrohre in einem Zustand der Schadensklasse schlechter oder gleich drei.

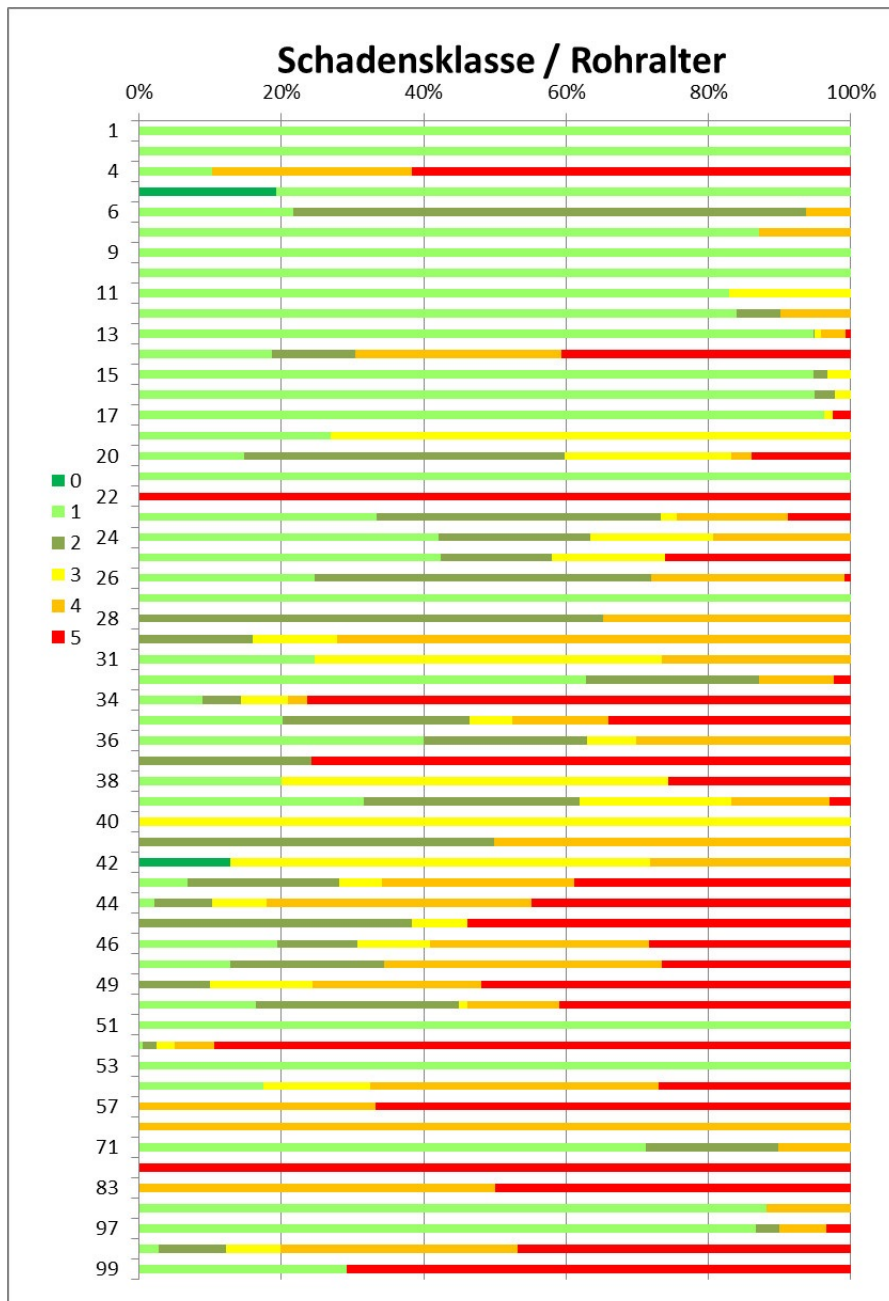
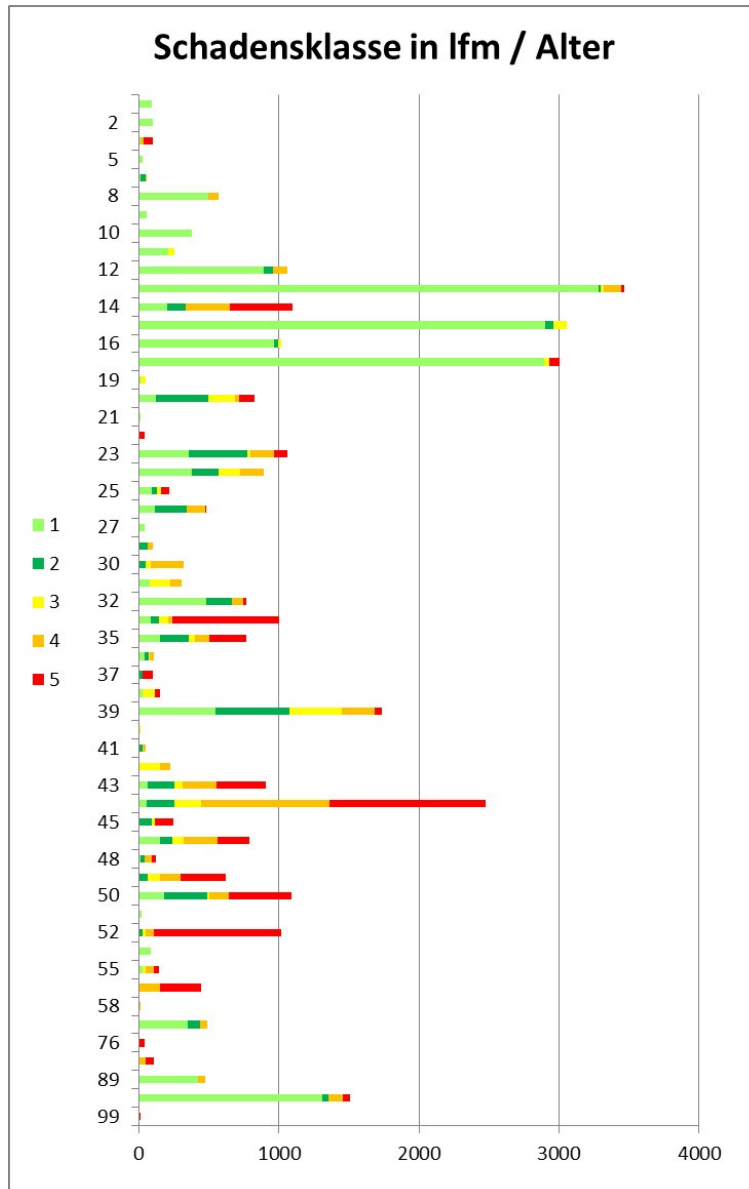


Abbildung 3.39.: Schadensklassen relativ

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Die Auswertung über das Rohralter (Abb. 3.39) bringt ein etwas indifferentes Ergebnis jedoch mit einer offensichtlichen Schadenshäufung im Alter von 37 bis 49 Jahren.



**Abbildung 3.40.:** Schadensklassen Ergebnis in lfm

Noch deutlicher ist dieser Umstand in Abb. 3.40 zu erkennen. Dabei ist jedoch zu bemerken, dass aus Gründen der deutlichen Darstellung die ältesten Haltungslängen (98 Jahre) aus dem Diagramm eliminiert wurden. Wie vom Wald-Test prognostiziert gibt es einen deutlichen Zusammenhang der



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Schadenshäufigkeit mit der Nutzung (Abb. 3.41).

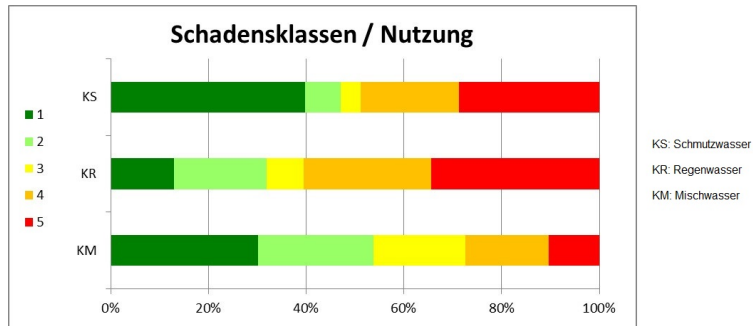


Abbildung 3.41.: Schadensklassen Nutzung relativ

Im Vergleich zum PVC schneidet beim Steinzeug die Mischwassernutzung relativ gesehen am Besten ab. Setzt man nun noch die Nennweite mit der Nutzung in Beziehung (Abb. 3.42), so ergeben sich die schwersten Schäden bei den Nennweiten in der Nähe von DN 300.

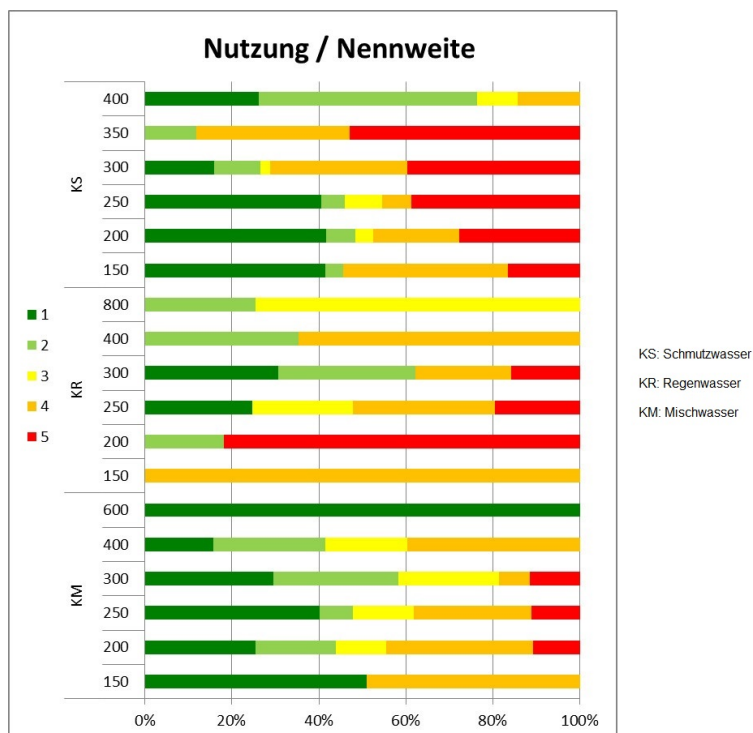
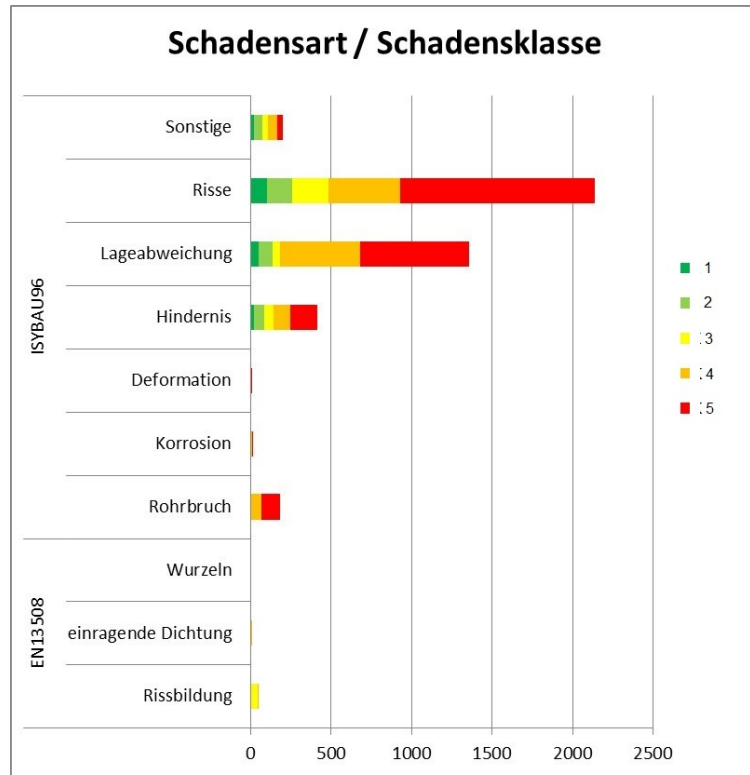


Abbildung 3.42.: Schadensklassen / Nutzung / Nennweite

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

**3.5.4.2.1. Analyse der Einzelschäden** In Abb. 3.43 ist visualisiert, welche Einzelschäden für die Schadensklasse der Haltungen verantwortlich sind.



**Abbildung 3.43.:** Anzahl der Einzelschäden / Schadensklasse

Es ist deutlich zu erkennen, dass überwiegend Lageabweichungen und Risse auftreten. Rohrbrüche sind kaum zu finden.

In den folgenden Abbildungen wird nun eine Beziehung zwischen den Einzelschäden und dem Rohralter hergestellt. Die Darstellung erfolgt dabei sowohl mit den relativen Häufigkeiten als auch den jeweiligen absoluten Anzahlen der Schadenscodes. Zusätzlich wird noch eine Beziehung zu den Haltungslängen hergestellt.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

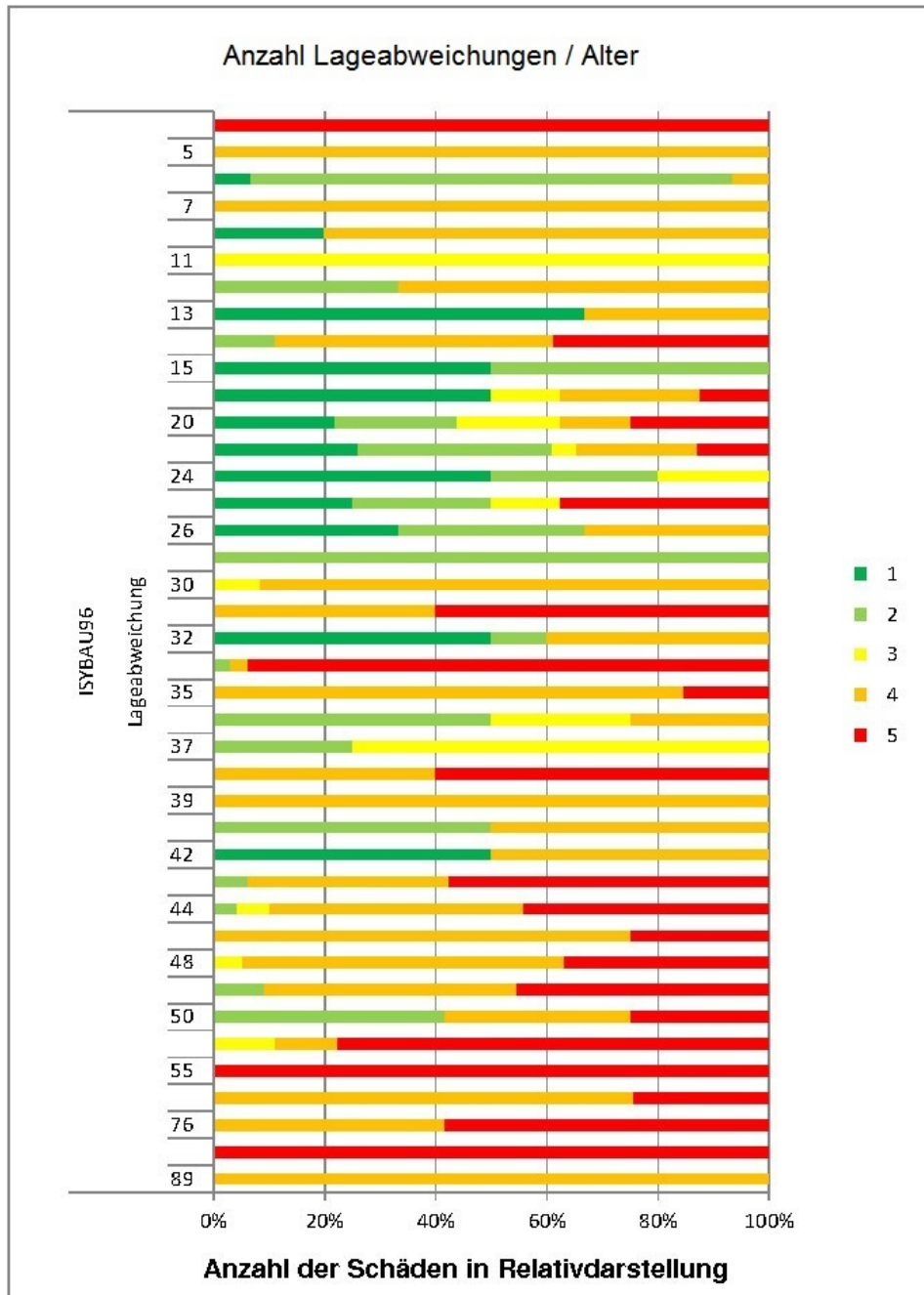


Abbildung 3.44.: Lageabweichung / Rohralter / Verhältniswerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

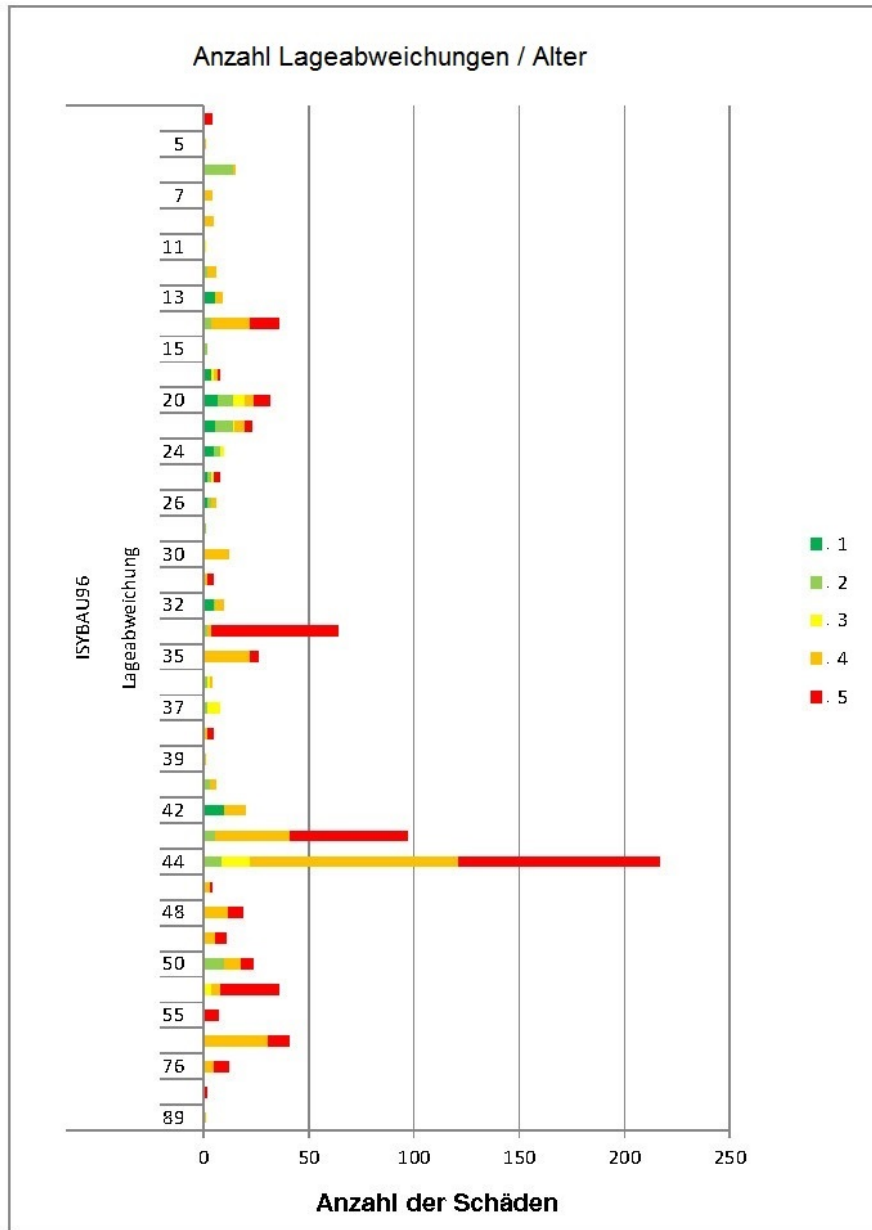


Abbildung 3.45.: Lageabweichung / Rohralter / Absolut

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

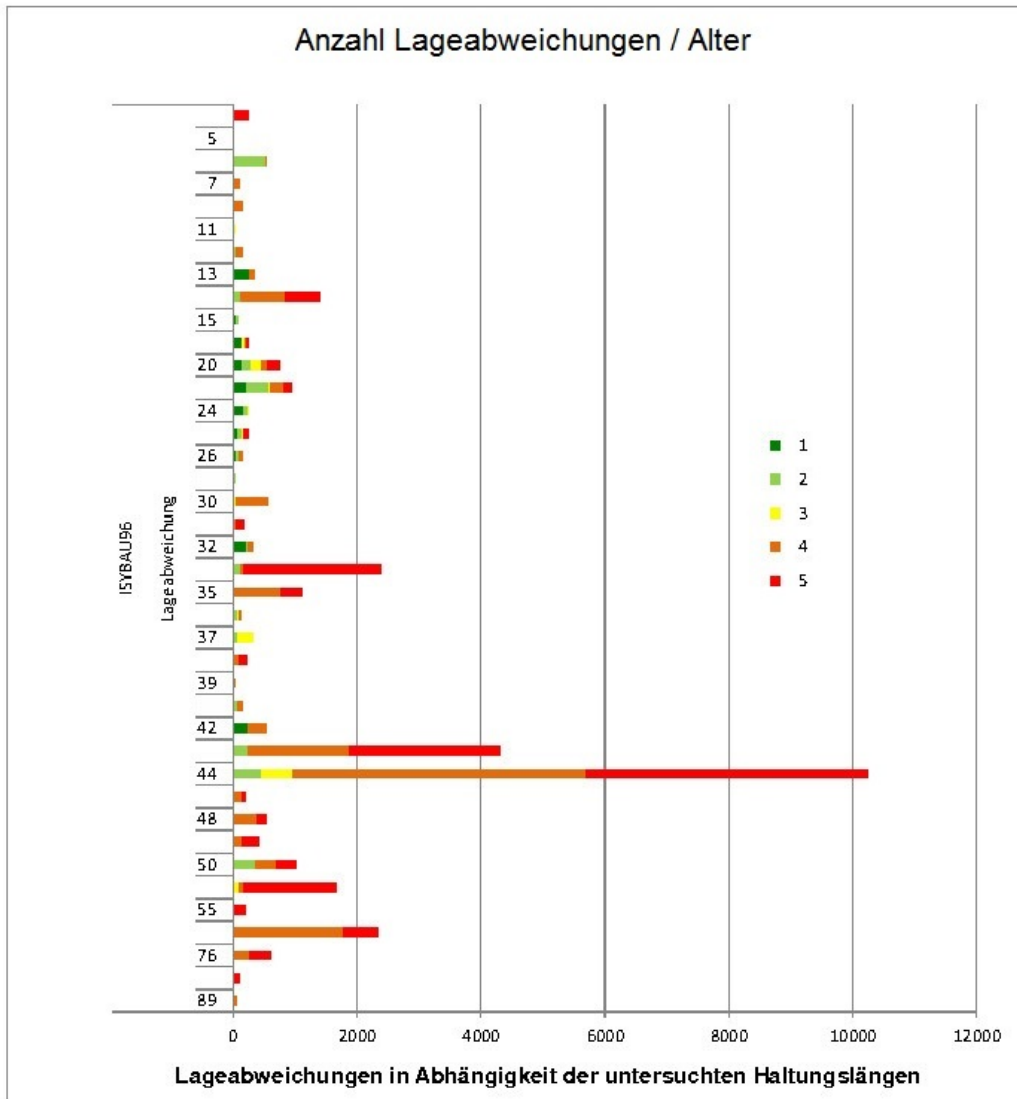


Abbildung 3.46.: Lageabweichung / Rohralter / Haltungslängen

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

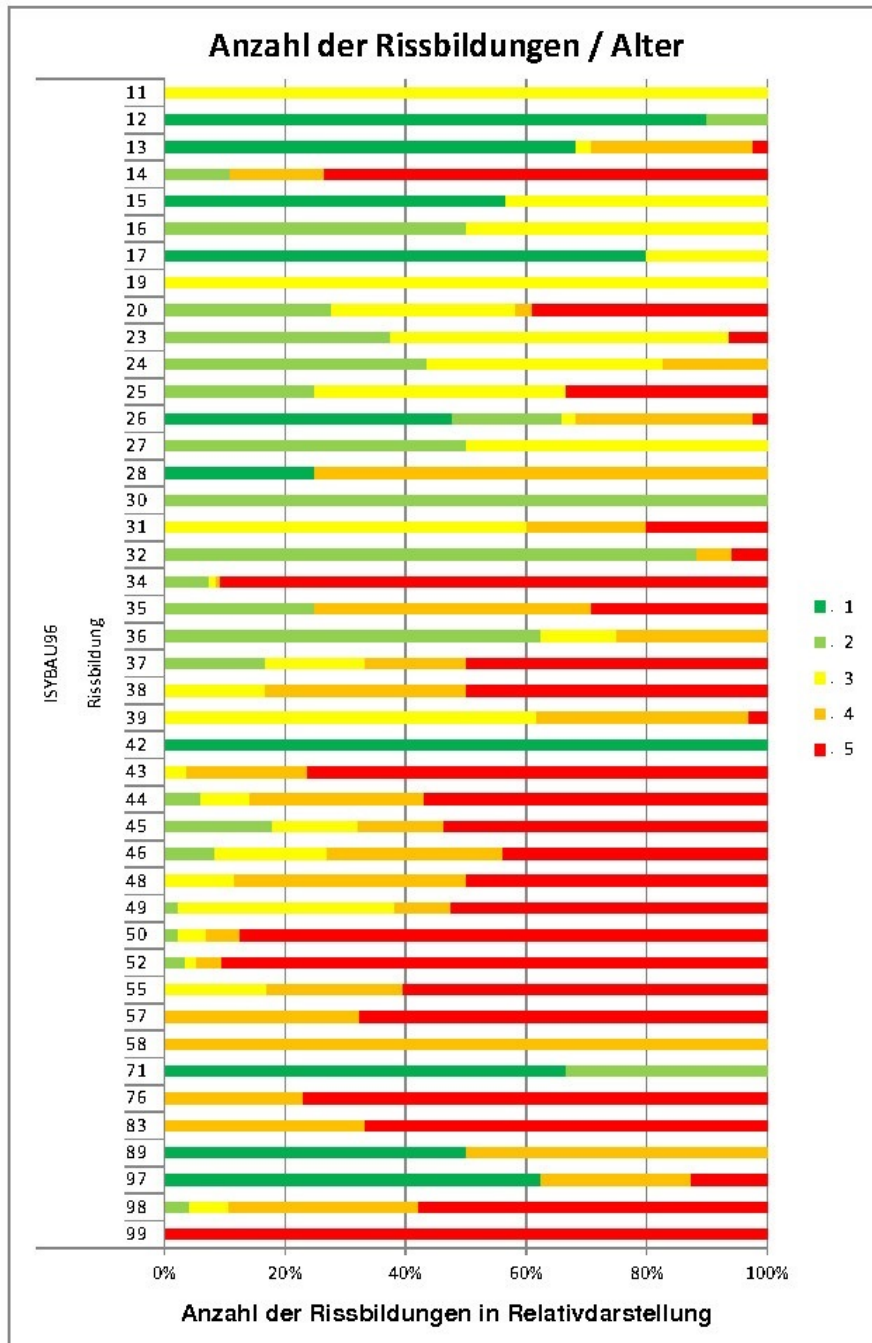


Abbildung 3.47.: Rissbildungen / Rohralter / Verhältniswerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

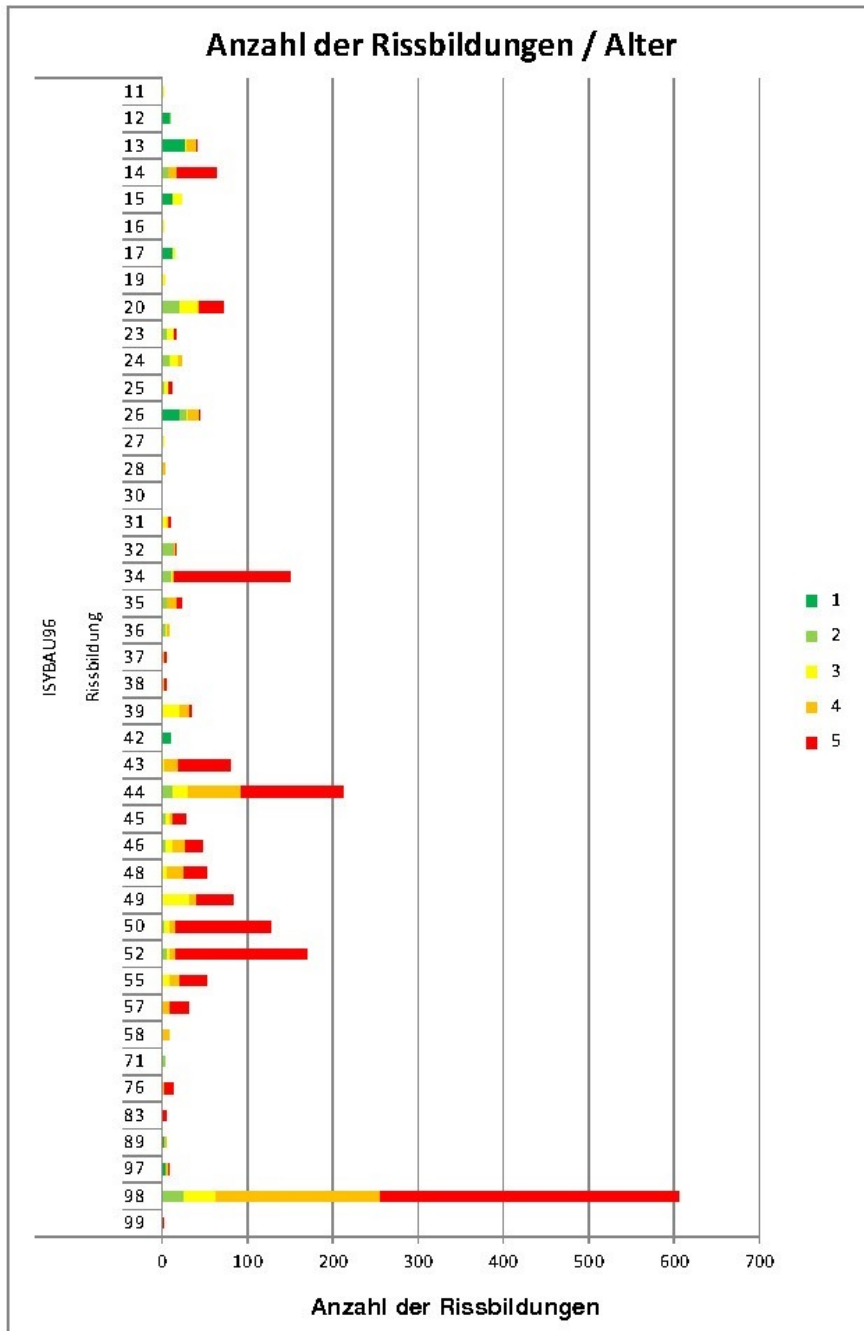


Abbildung 3.48.: Rissbildungen / Rohralter / Absolut

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

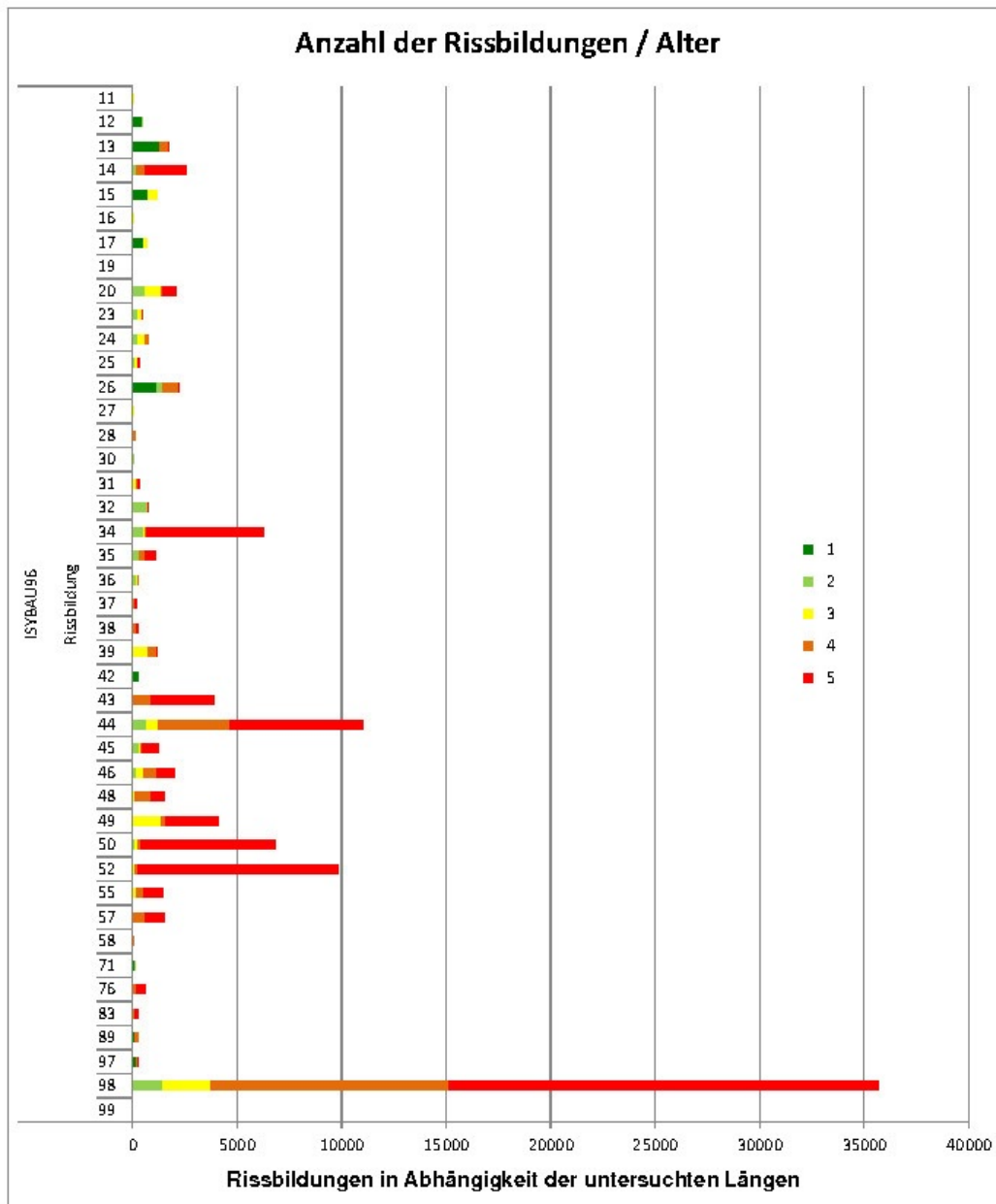


Abbildung 3.49.: Rissbildungen / Rohralter / Haltungslängen



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

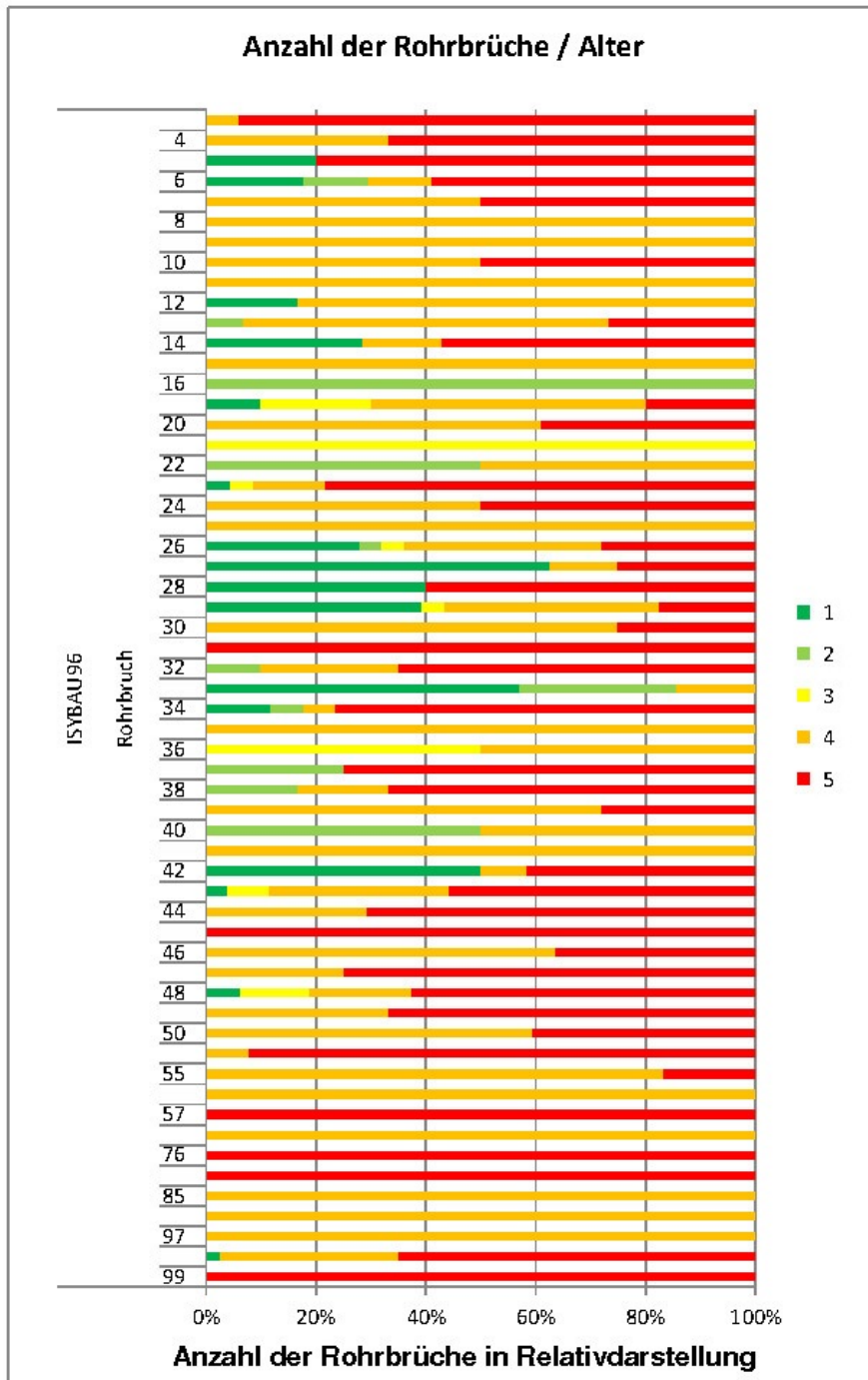


Abbildung 3.50.: Rohrbrüche / Rohralter / Verhältniswerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

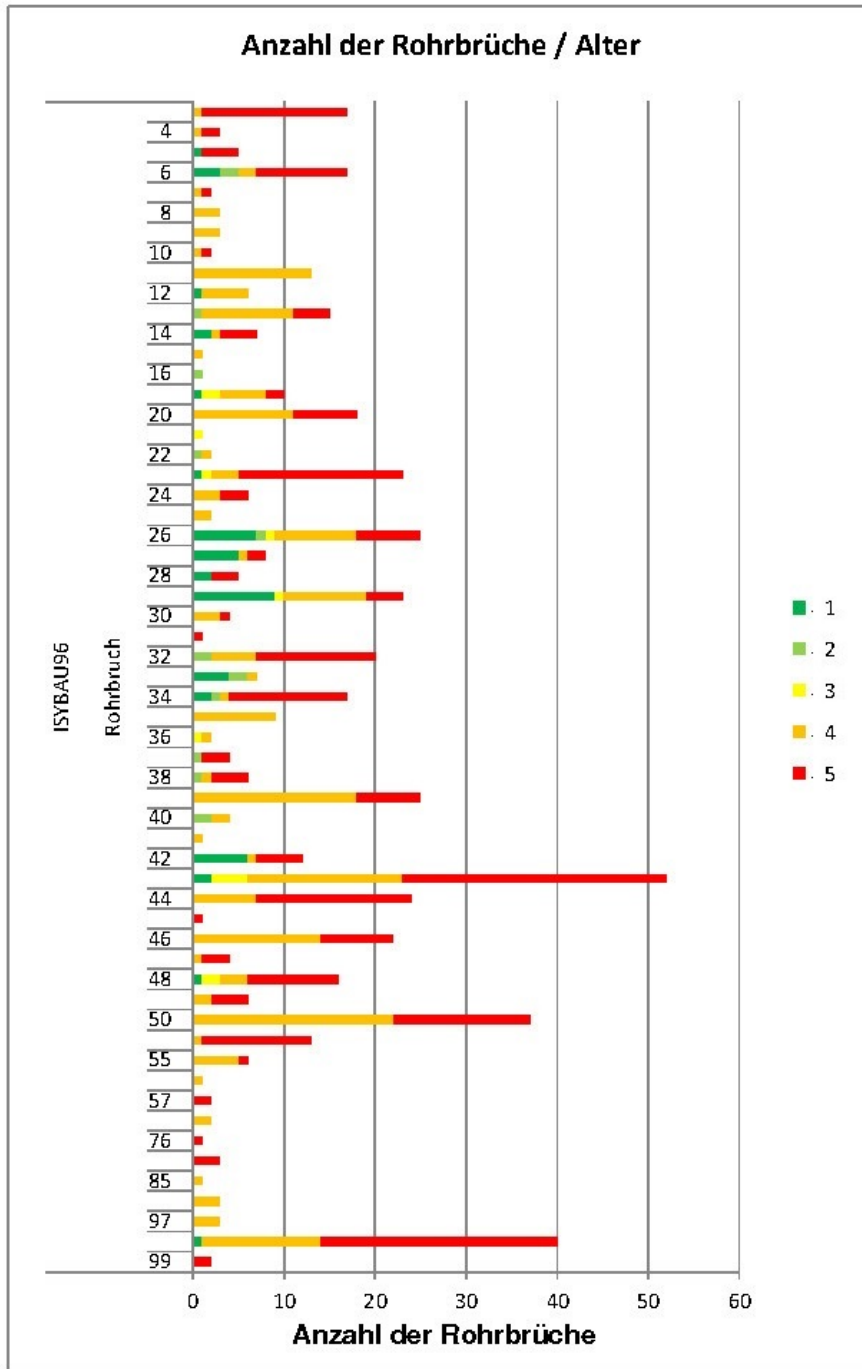


Abbildung 3.51.: Rohrbrüche/ Rohralter / Absolut

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

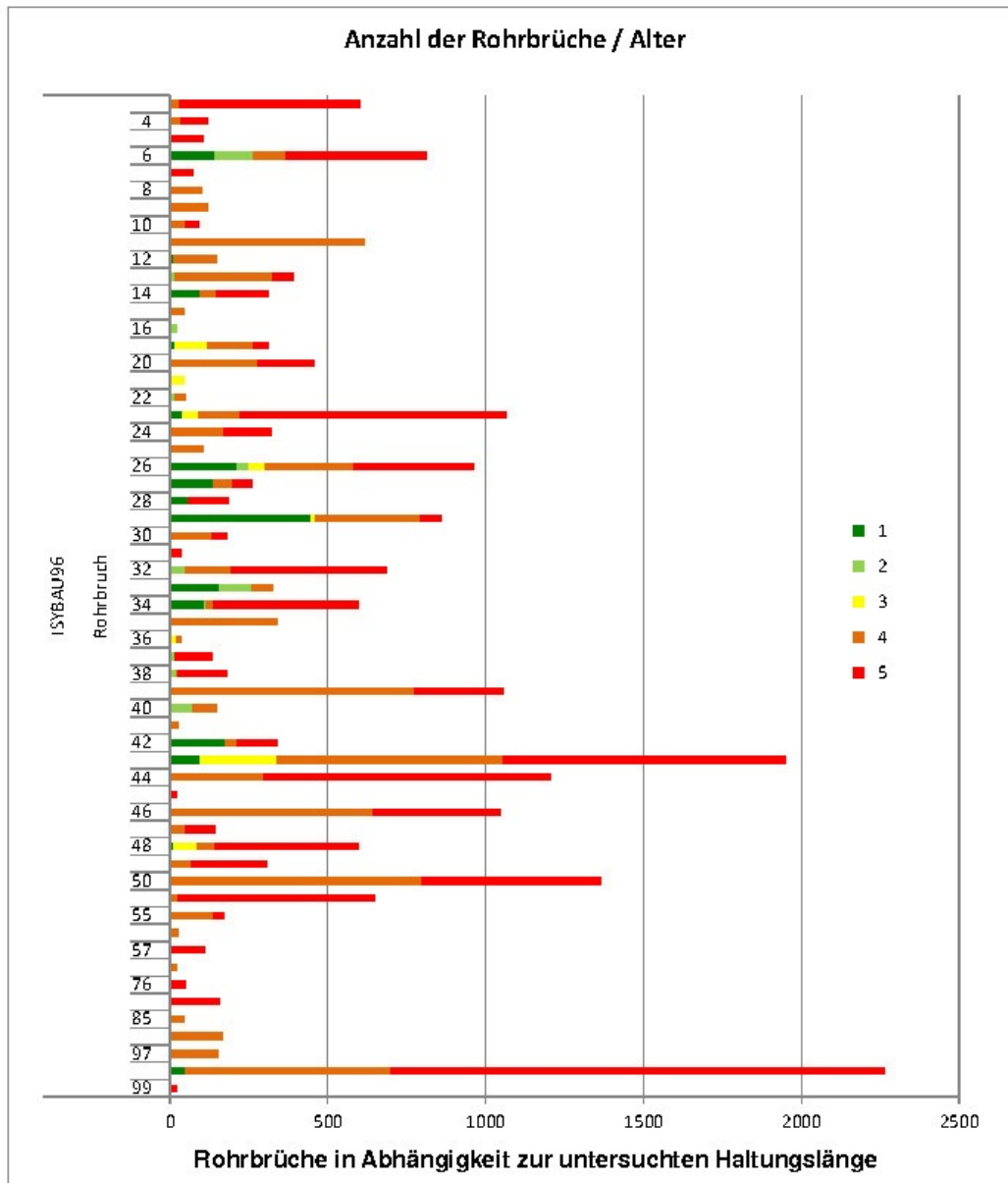


Abbildung 3.52.: Rohrbruch / Rohralter / Haltungslängen

Das Ergebnis ist keinesfalls eindeutig, weil in allen Altersgruppen gleichartige Schäden auftreten. Die Untersuchung mittels logistischer Regression bestätigt, dass Rissbildungen in Steinzeugrohren nicht zwangsläufig zu Rohrbrüchen führen müssen (Abb. 3.53).

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

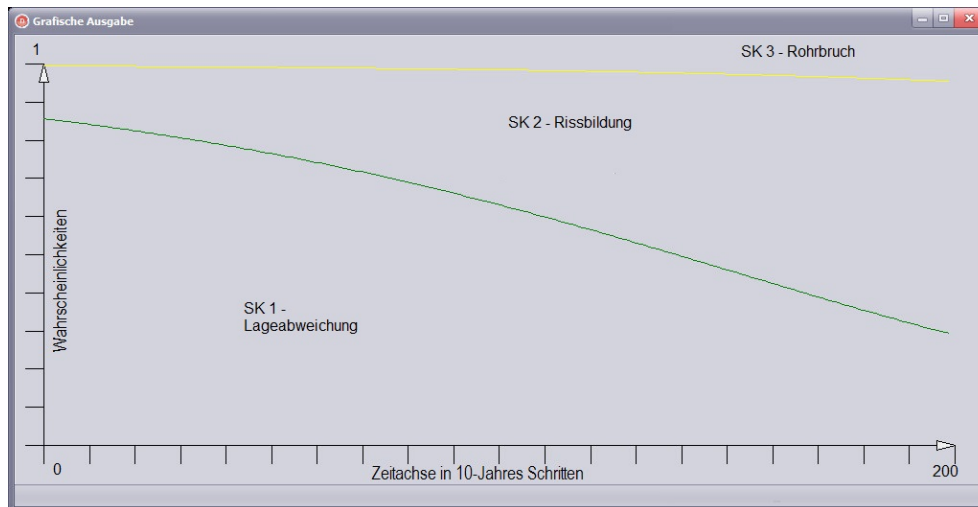


Abbildung 3.53.: Alterung / Einzelschäden

Die Grafik in Abb. 3.53 lässt sich nun derartig interpretieren, dass durchaus ein zeitlich linearer Zusammenhang zwischen einer Lageabweichung und daraus folgender Rissbildung abgeleitet werden kann. Rohrbrüche, sofern sie überhaupt vorkommen, treten offensichtlich sehr spontan auf.

Es bleibt noch das Problem, wie die beiden Alterungspfade in Beziehung gesetzt werden können. Darauf wird nach der Behandlung des Werkstoffes Beton noch näher eingegangen.

#### 3.5.4.3. Beton

Dieses Material dominiert in allen Zeitperioden. Beton ist ebenfalls ein biegesteifes Material. Es werden nun sinngemäß dieselben Auswertungen vorgenommen wie beim Steinzeug. Es lagen Daten von 5388 Haltungen mit einer Gesamtlänge von 188 054 lfm vor.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

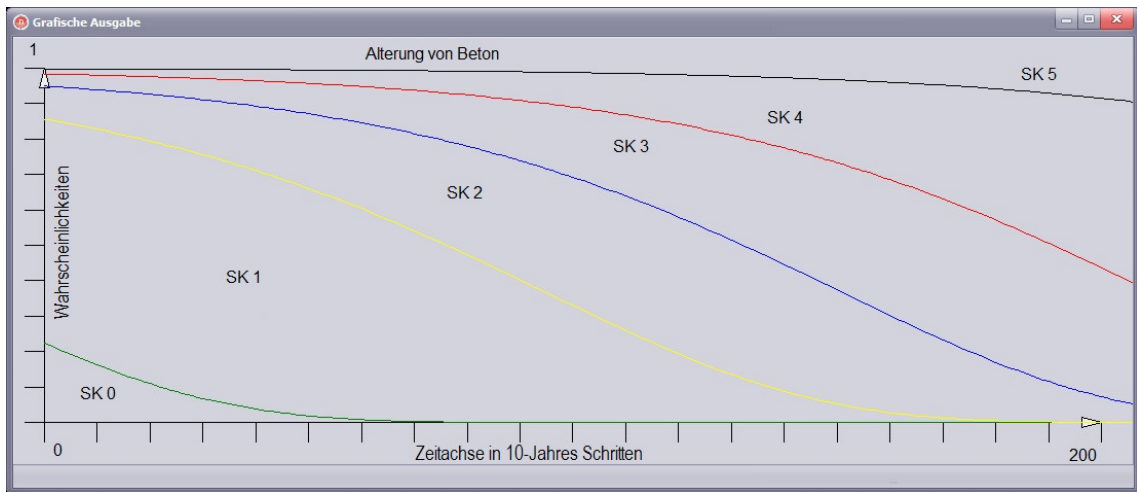


Abbildung 3.54.: Ergebnis für Beton

Die Untersuchung mittels logistischer Regression bringt gemäß Abb. 3.54 durchaus plausible Ergebnisse. Hier zeigt sich ebenfalls der Vorteil von langen Beobachtungszeiträumen.

| Covraibale          |                  | Estimate  | Std.Error | Chi2     | Pr>Chi2  |
|---------------------|------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| Alpha(0)            | (vs 0)           | 4,03E-01  | 5,24E-02  | 5,90E+01 | 0        |
| Alpha(1)            | (vs Alpha(0))    | -1,86E+00 | 7,47E-02  | 1,91E+03 | 0        |
| Alpha(2)            | (vs Alpha(1))    | -2,96E+00 | 1,04E-01  | 4,79E+02 | 0        |
| Alpha(3)            | (vs Alpha(2))    | -4,12E+00 | 1,53E-01  | 2,48E+02 | 0        |
| Alpha(4)            | (vs Alpha(3))    | -6,35E+00 | 3,10E-01  | 1,34E+02 | 0        |
| LENGTH              | (vs 0)           | -5,68E-03 | 1,34E-03  | 1,80E+01 | 0,000022 |
| _Profil[Eiprofil]   | (vs Kreisprofil) | -4,96E-01 | 1,19E-01  | 1,72E+01 | 0,000033 |
| T                   | (vs 0)           | -3,93E+00 | 1,82E-01  | 4,66E+02 | 0        |
| T*LENGTH            | (vs 0)           | 1,22E-02  | 1,61E-03  | 5,72E+01 | 0        |
| T*_NUTZUNG[KM]      | (vs KS)          | 2,71E-01  | 1,58E-01  | 2,94E+00 | 0,086298 |
| T*_NUTZUNG[KR]      | (vs KS)          | 4,53E-01  | 1,63E-01  | 7,78E+00 | 0,005274 |
| T*_Profil[Eiprofil] | (vs Kreisprofil) | 2,70E-01  | 1,13E-01  | 5,75E+00 | 0,016523 |
| Sigma               | (vs 0)           | 9,33E-01  | 4,54E-02  | 4,23E+02 | 0        |

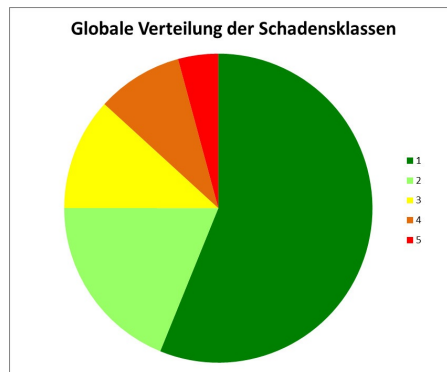
Abbildung 3.55.: Ergebnisvektor und Signifikanz der Covariablen

Die Prüfung mit dem Waldtest zeigt eine Abhängigkeit von der Nutzung und von der Profilform. Andere Abhängigkeiten, wie beispielsweise jene von der Nennweite, konnten mangels genügendem Datenumfangs nicht festgestellt

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

werden.

Wie bei Steinzeug erfolgt auch jetzt die Prüfung der Plausibilität über eine konventionelle Betrachtung mit Pivottabellen. Zunächst interessiert der generelle Zustand aller betrachteten Haltungen.



**Abbildung 3.56.:** Verteilung der Schadensklassen - Beton

In Abb. 3.56 erkennt man eine ähnliche Schadenshäufigkeit wie im Gesamtsystem (Abb. 3.10). Im konkreten Fall sind fast 25% der Betonrohre in einem Zustand der Schadensklasse schlechter oder gleich drei.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

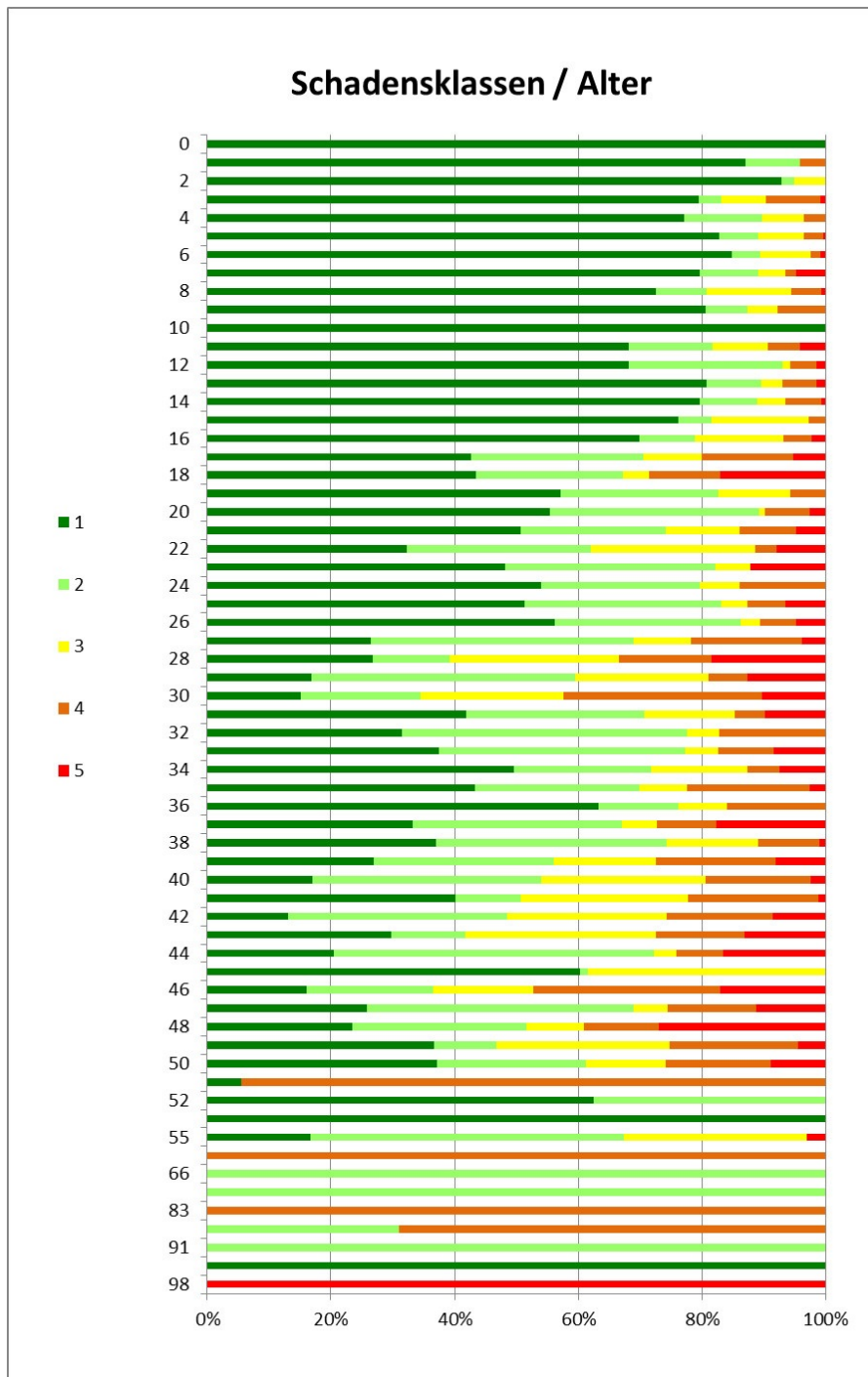


Abbildung 3.57.: Schadensklassen relativ

Die Auswertung über das Rohralter (Abb. 3.57) bringt ein etwas eindeutigeres Ergebnis als beim Steinzeug. So erkennt man doch eine tendenzielle Zunahme

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

von schweren Schäden mit steigendem Alter.

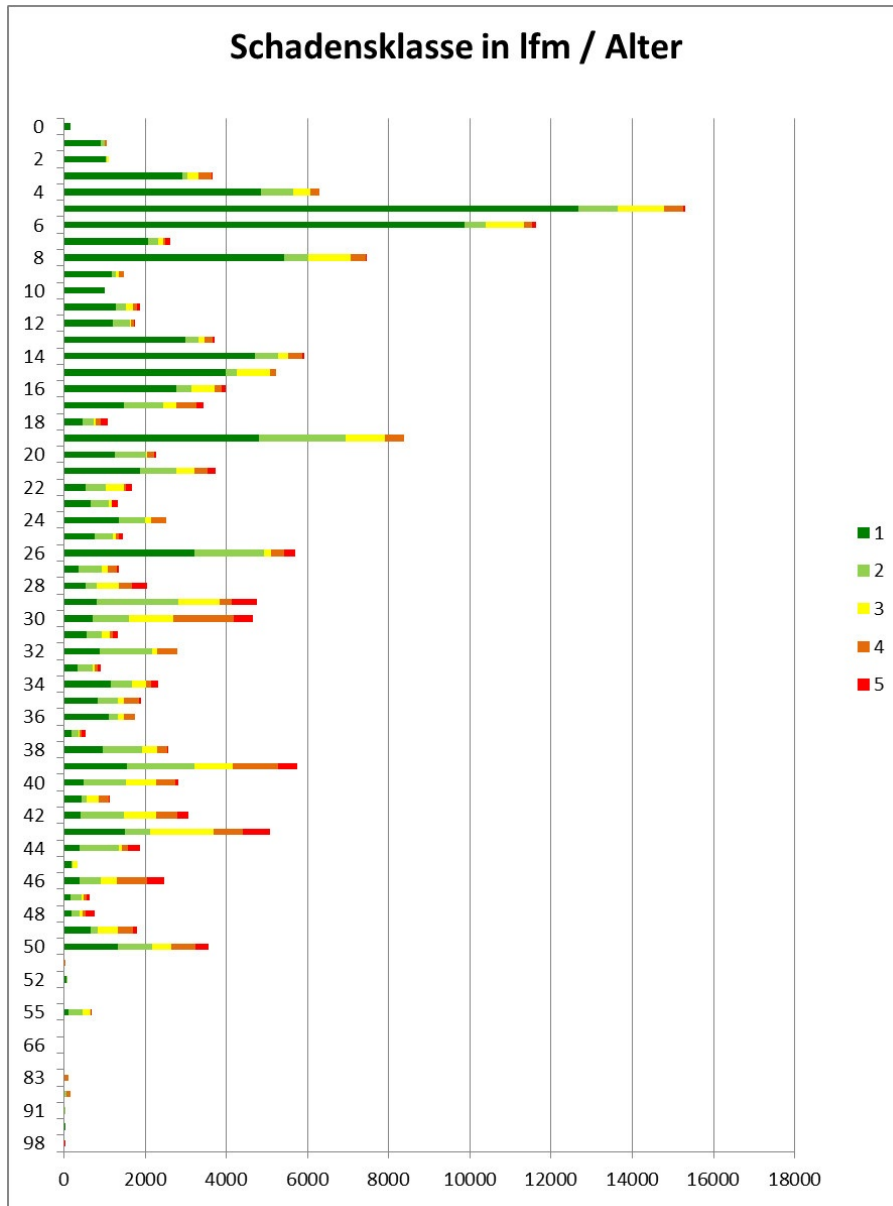


Abbildung 3.58.: Schadensklassen Ergebnis in lfm

Noch deutlicher ist dieser Umstand in Abb. 3.58 zu erkennen. Wie vom Wald-Test prognostiziert gibt es einen leichten Zusammenhang der Schadenshäufigkeit mit der Nutzung (Abb. 3.59).



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

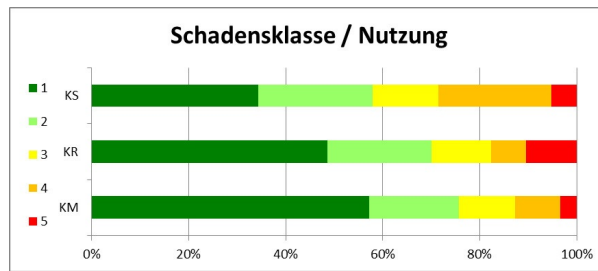


Abbildung 3.59.: Schadensklassen Nutzung relativ

Ähnlich wie beim Steinzeug schneidet beim Beton die Mischwassernutzung relativ gesehen am Besten ab. Setzt man nun noch die Nennweite mit der Nutzung in Beziehung (Abb. 3.60), so ergeben sich die schwersten Schäden bei den Nennweiten in der Nähe von DN 300.

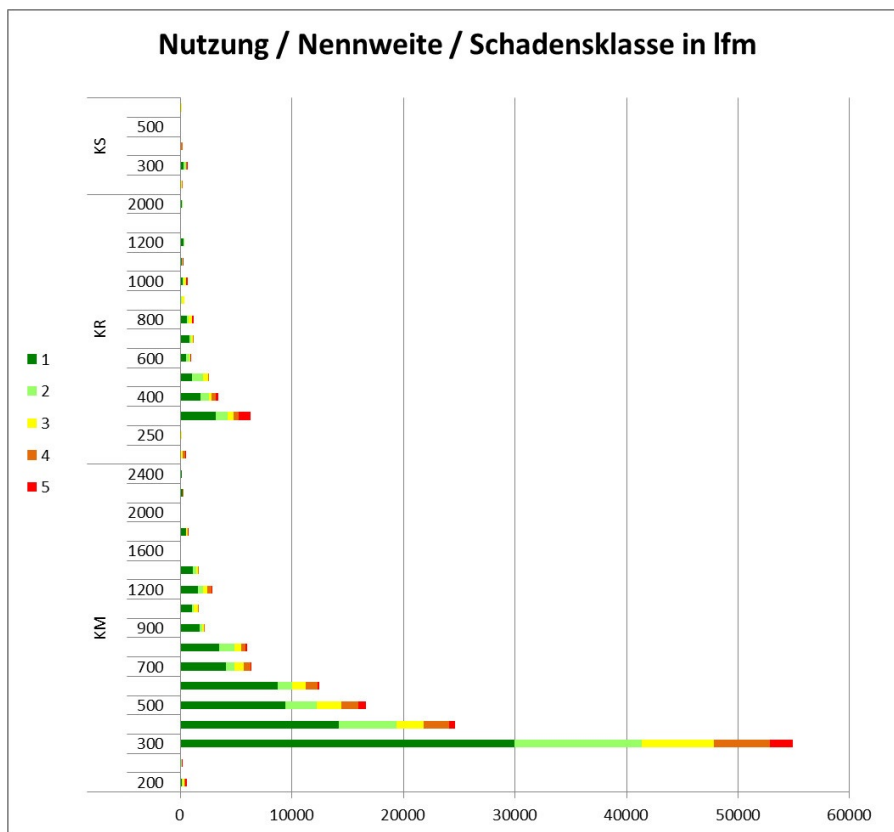
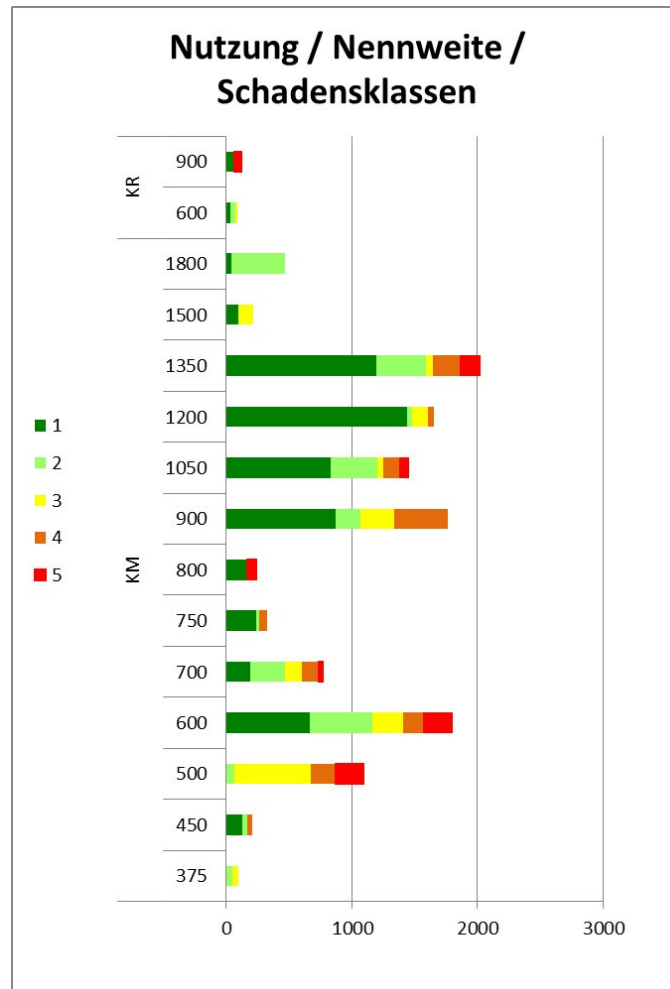


Abbildung 3.60.: Schadensklassen / Nutzung / Nennweite beim Kreisprofil

Ebenfalls gut in Abb. 3.60 zu erkennen ist, dass zwar eine heterogene Zusammensetzung des Datenpools im Zusammenhang mit der Nennweite gegeben

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

ist, es reichen die Daten jedoch nicht aus, um eine Beziehung der Nennweiten untereinander herzustellen.



**Abbildung 3.61.:** Schadensklassen / Nutzung / Nennweite beim Eiprofil

Für das Eiprofil (Abb. 3.61) ergeben sich für alle untersuchten Nennweiten ähnlichen Verteilungen der Schadensklassen. Die Gesamtlänge der untersuchten Haltungen mit einem Eiprofil beträgt jedoch lediglich 12300 lfm und ist damit im Vergleich zur untersuchten Gesamtlängen relativ gering. Weitere Zusammenhänge des Eiprofils mit der Alterung werden daher nicht mehr weiter untersucht.

**3.5.4.3.1. Analyse der Einzelschäden** In Abb. 3.62 wird dargestellt, welche Einzelschäden für die Schadensklasse der Haltungen verantwortlich sind.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Hier wird darauf hingewiesen, dass eine Haltung durchaus mehrere Schadenscodes aufweisen kann. Vereinfacht wird nun die Schadensklasse der Haltung mit der Schadensklasse des Einzelschadens gleichgesetzt. Dies verschiebt die Auswertung naturgemäß auf die etwas schlechtere Seite, weil mehr schwere Schäden angenommen werden als tatsächlich vorhanden sind. Es ist jedoch meine Erfahrung als Ingenieur, dass diese getroffene Annahme durchaus realistisch ist. Es hat sich nämlich oft herausgestellt, dass in einer schlechten Haltung die Ausprägung der Einzelschäden meistens sehr ähnlich ist.

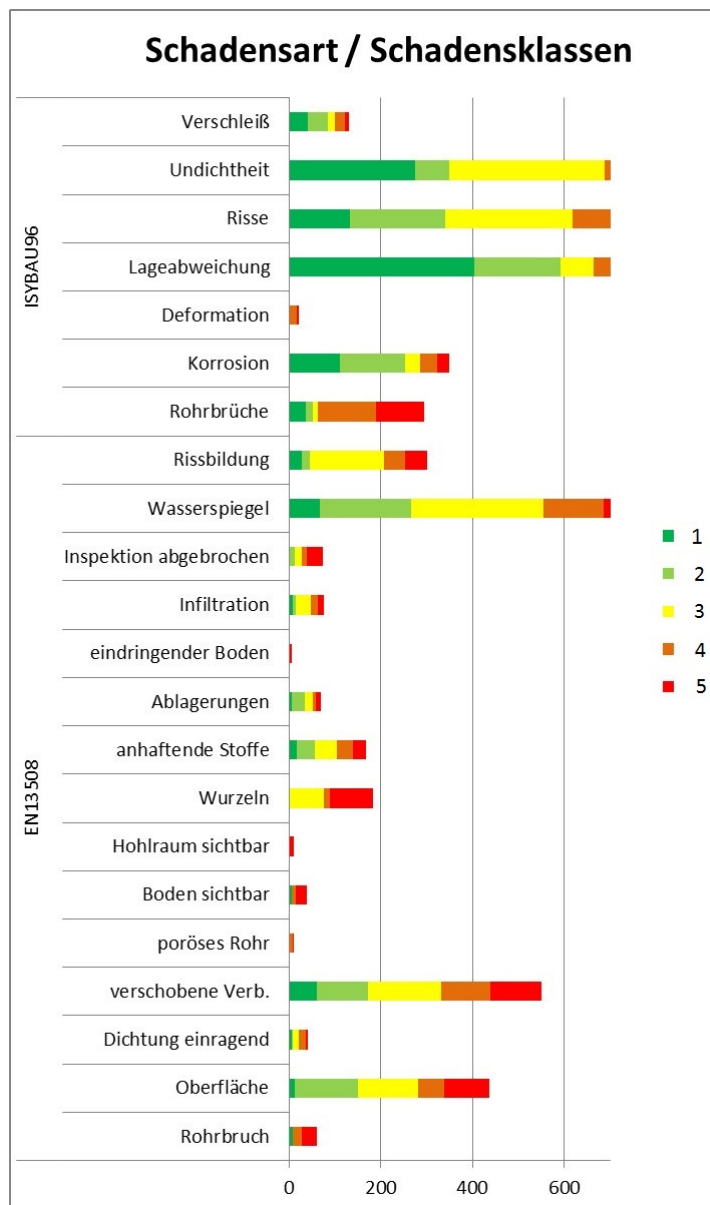


Abbildung 3.62.: Einzelschäden / Schadensklasse

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Es ist zu erkennen, dass die Schadensbilder sehr vielfältig sind. Es wurden jedoch nur jene Schadenscodes in die Auswertung aufgenommen, welche im Zusammenhang mit einer langfristigen strukturellen Schädigung stehen. Es hat sich ebenfalls herausgestellt, dass Beton wesentlich mehr zur Ausbildung von Ablagerungen und Anhaftungen neigt als die beiden anderen untersuchten Materialien. Ebenfalls eine Eigenschaft des Betons ist seine Anfälligkeit gegenüber korrosiven Beanspruchungen. Es werden nun jene Codes zusammengefasst, die ähnliche Auswirkungen auf den Rohrzustand haben und diese dann in ihrem zeitlichen Auftreten analysiert.

In die Schadensgruppe »Verformung« fallen nun die Einzelschäden

- Lageabweichung
- Deformation
- Verformung
- verschobene Verbindung
- Wasserspiegel
- einragende Dichtung

Dies ist die erste Stufe eines entstehenden Rohrbruches. Die zweite Stufe wird von der Schadensgruppe »Rissbildung« bestimmt. Ihr lassen sich folgende Einzelschäden zuordnen:

- Rissbildung
- Infiltration
- Undichtheit
- poröses Rohr

Der Einzelschaden Rohrbruch bzw. »Boden sichtbar« schließt die Entwicklung ab. Ein Sonderfall ist jene Gruppe, die Oberflächenbeeinträchtigungen auslösen. Dazu gehören

- Korrosion
- Ablagerungen
- Anhaftungen
- Wurzeln

Diese Schäden entwickeln sich zwar weiter, lassen sich aber mit dem gewählten Verfahren nur bedingt behandeln, da eine Quantifizierung in Abhängigkeit des Alters meistens fehlt bzw. in dieser Arbeit bewusst darauf verzichtet wurde dies

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

zu berücksichtigen. Aus Gründen der besseren Darstellung werden die oben genannten Gruppen getrennt analysiert und entsprechende Grafiken erstellt.

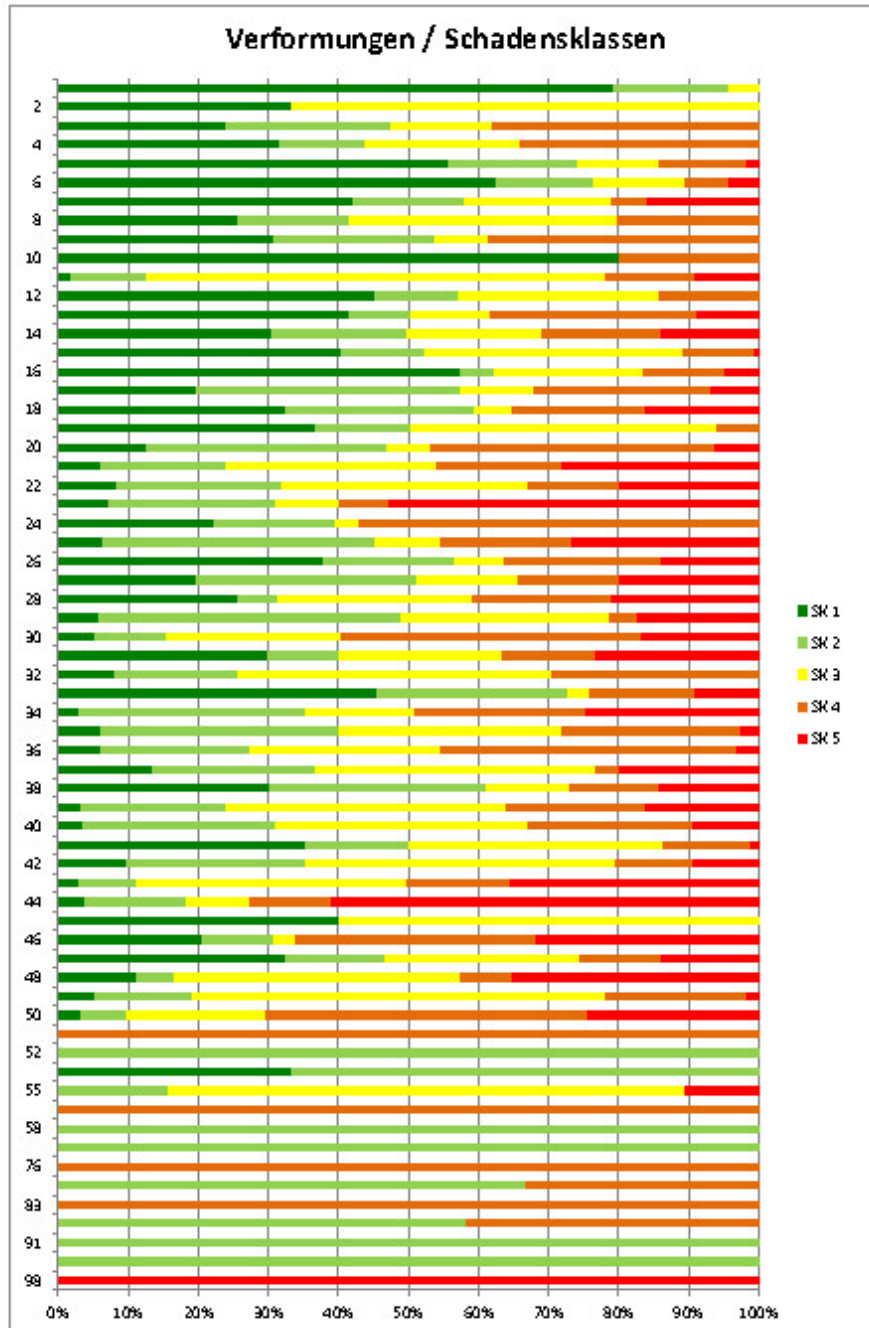


Abbildung 3.63.: Verformungen / Rohralter / Verhältniswerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

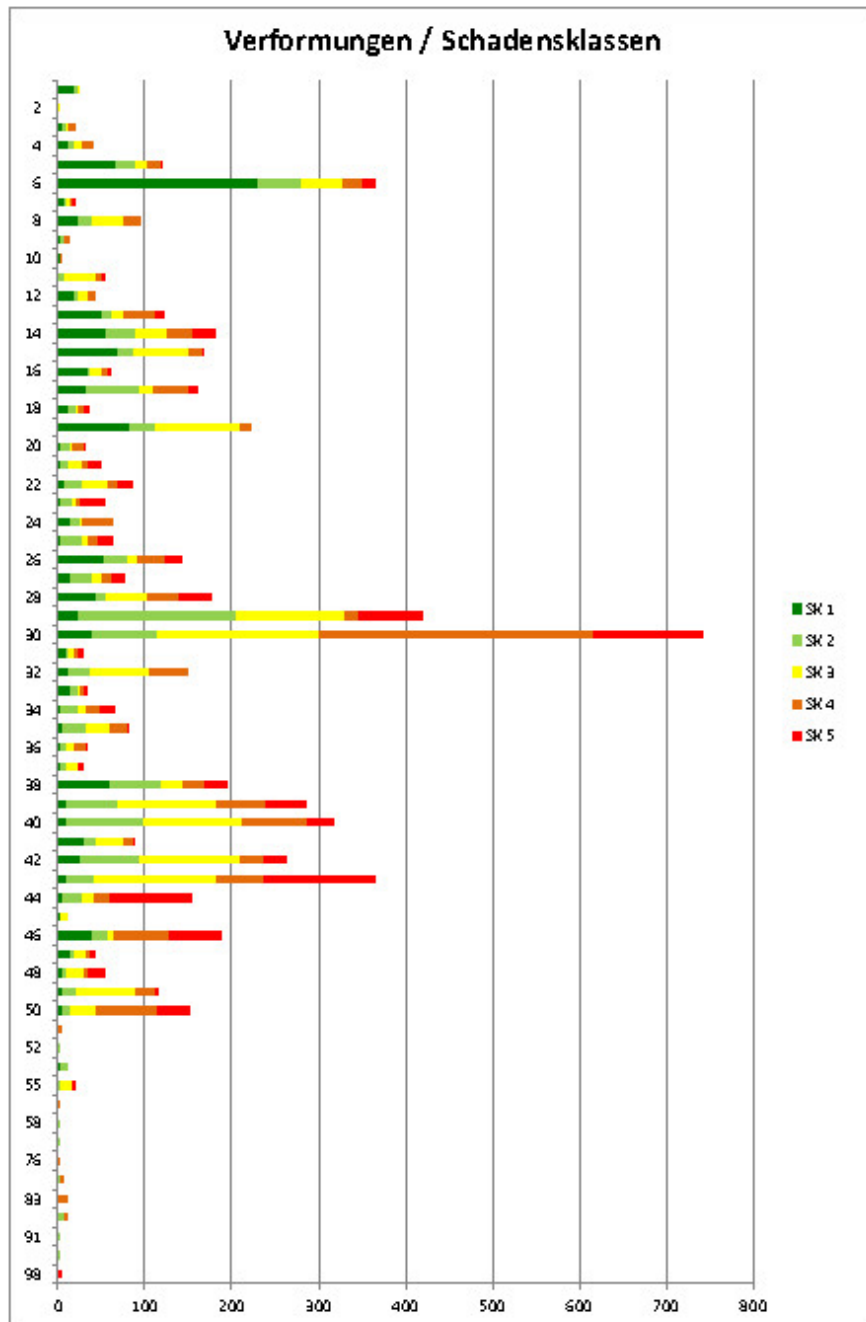


Abbildung 3.64.: Verformungen / Rohralter / Absolutwerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

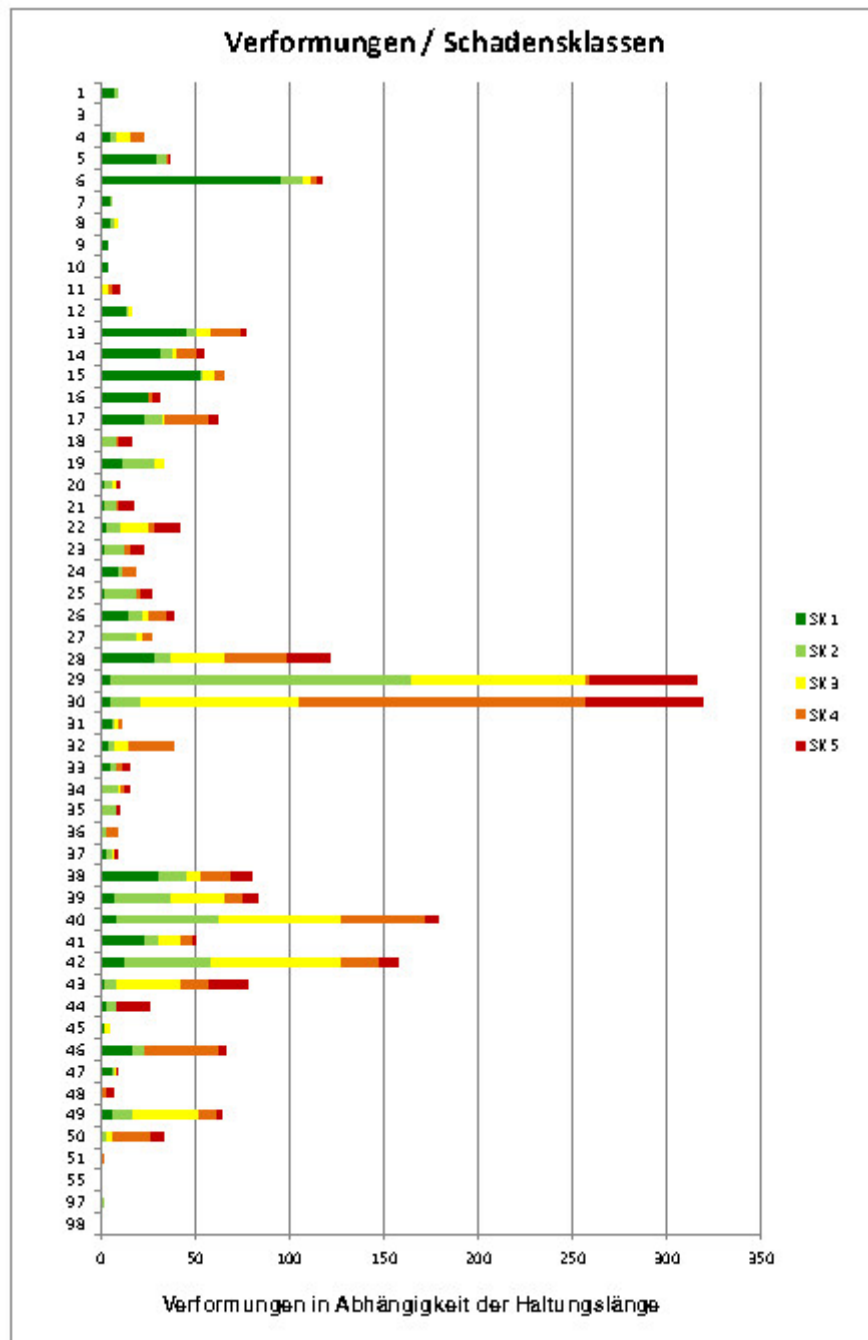


Abbildung 3.65.: Verformungen abhängig von den Haltungslängen

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

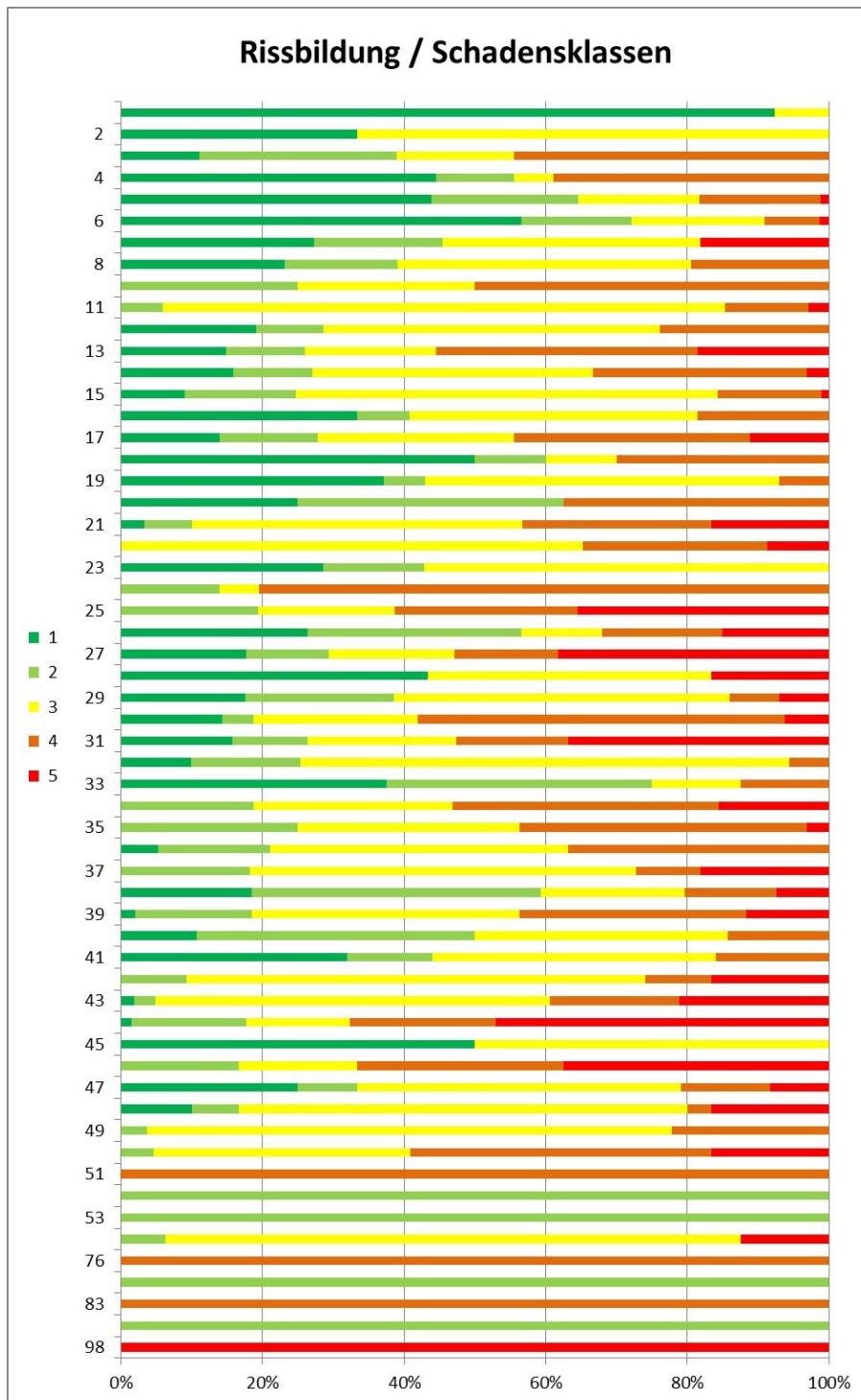


Abbildung 3.66.: Rissbildung / Rohralter / Verhältniswerte



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

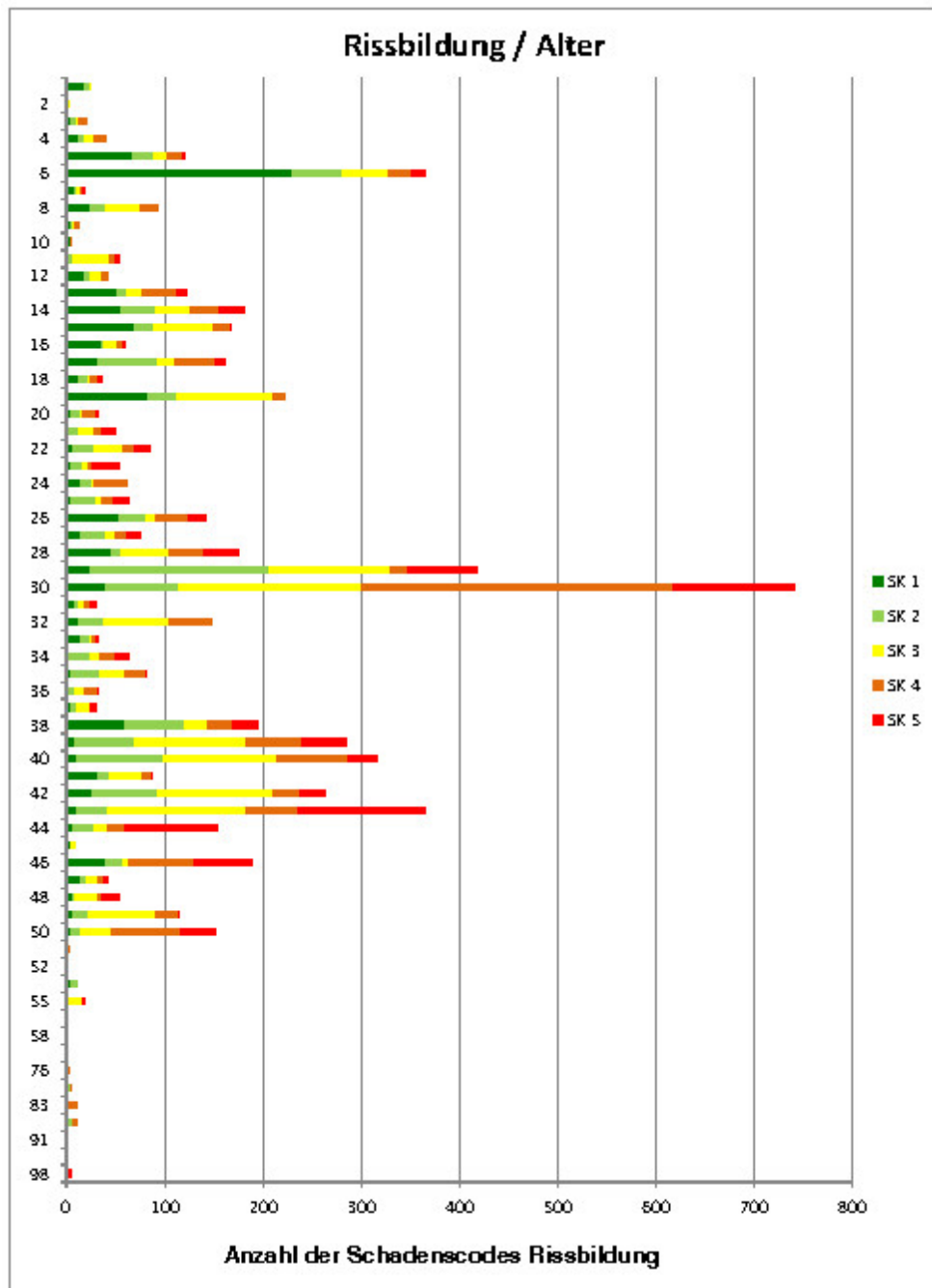


Abbildung 3.67.: Rissbildung / Rohralter / Absolutwerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer



Abbildung 3.68.: Rissbildung abhängig von den Haltungslängen

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

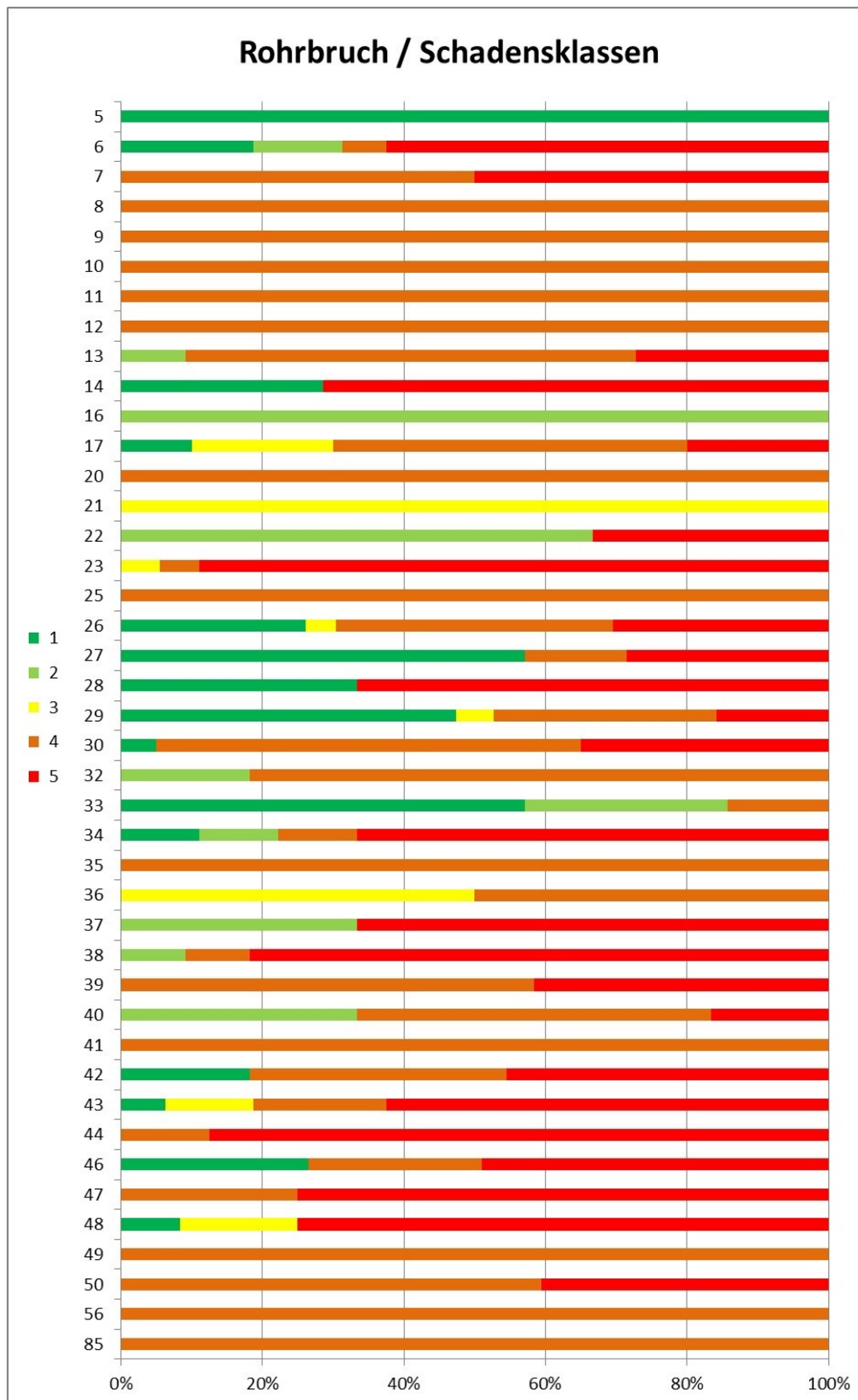


Abbildung 3.69.: Rohrbruch / Rohralter / Verhältniswerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

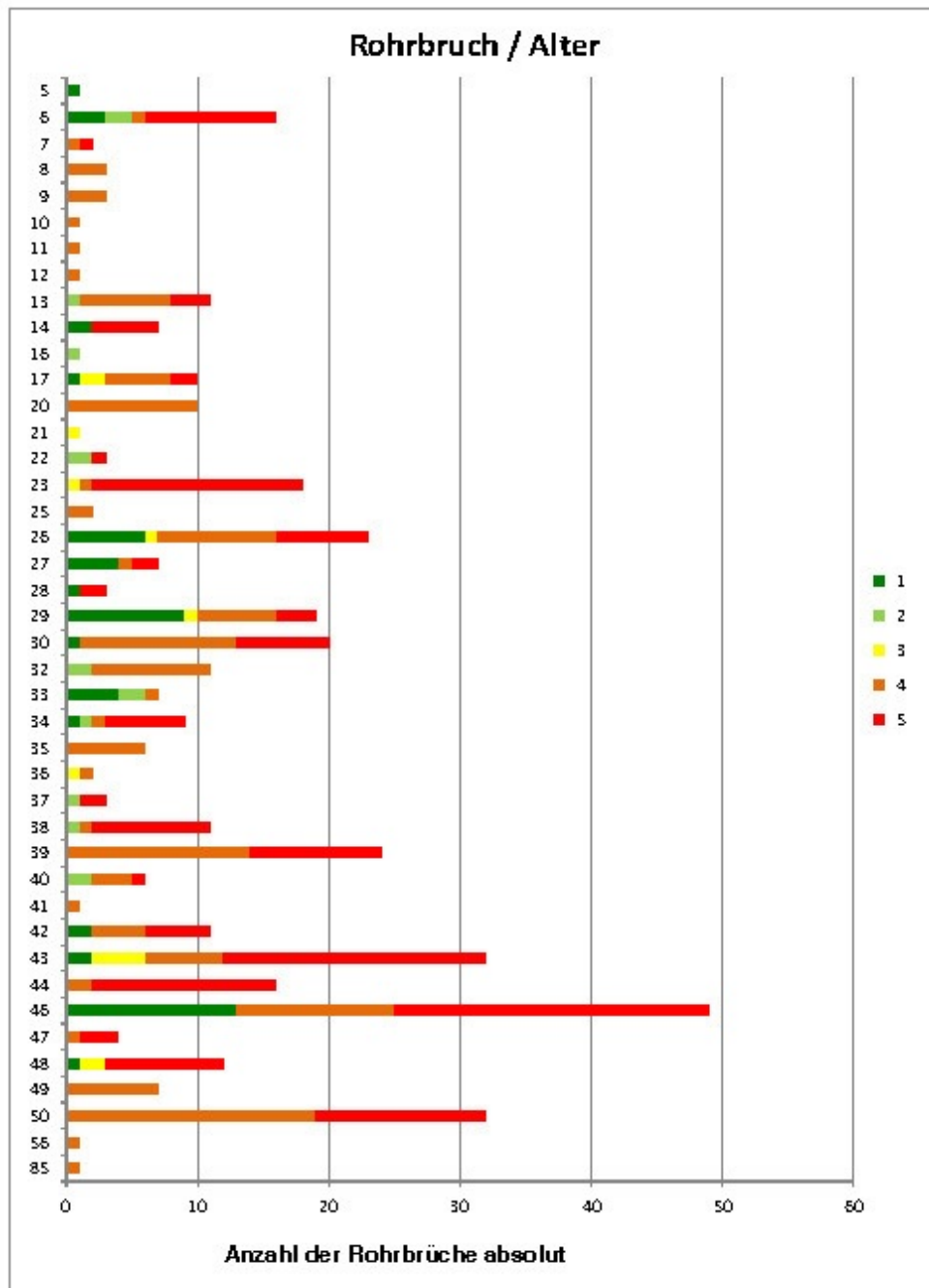


Abbildung 3.70.: Rohrbruch / Rohralter / Absolutwerte

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

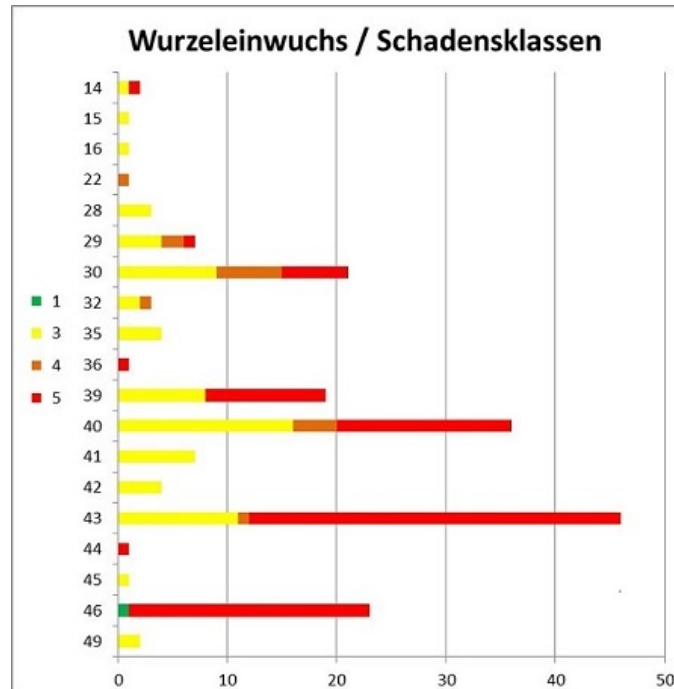


Abbildung 3.71.: Wurzeleinwuchs / Rohralter

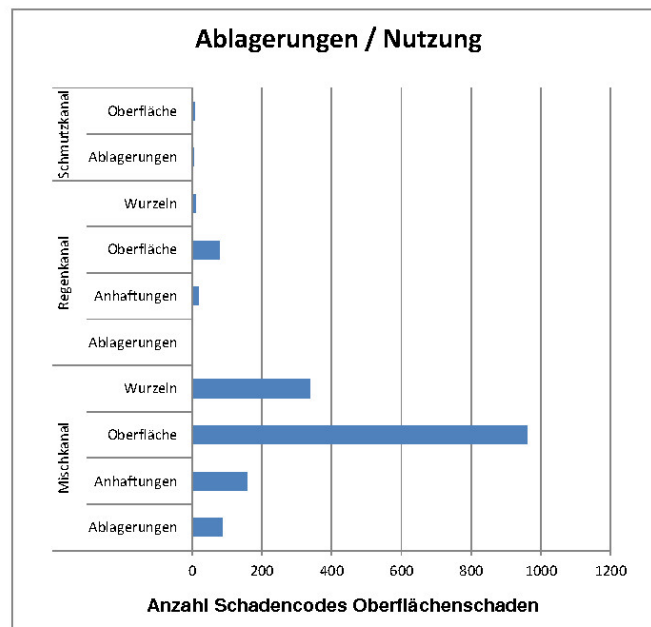


Abbildung 3.72.: Ablagerungen in Abhängigkeit der Nutzung

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

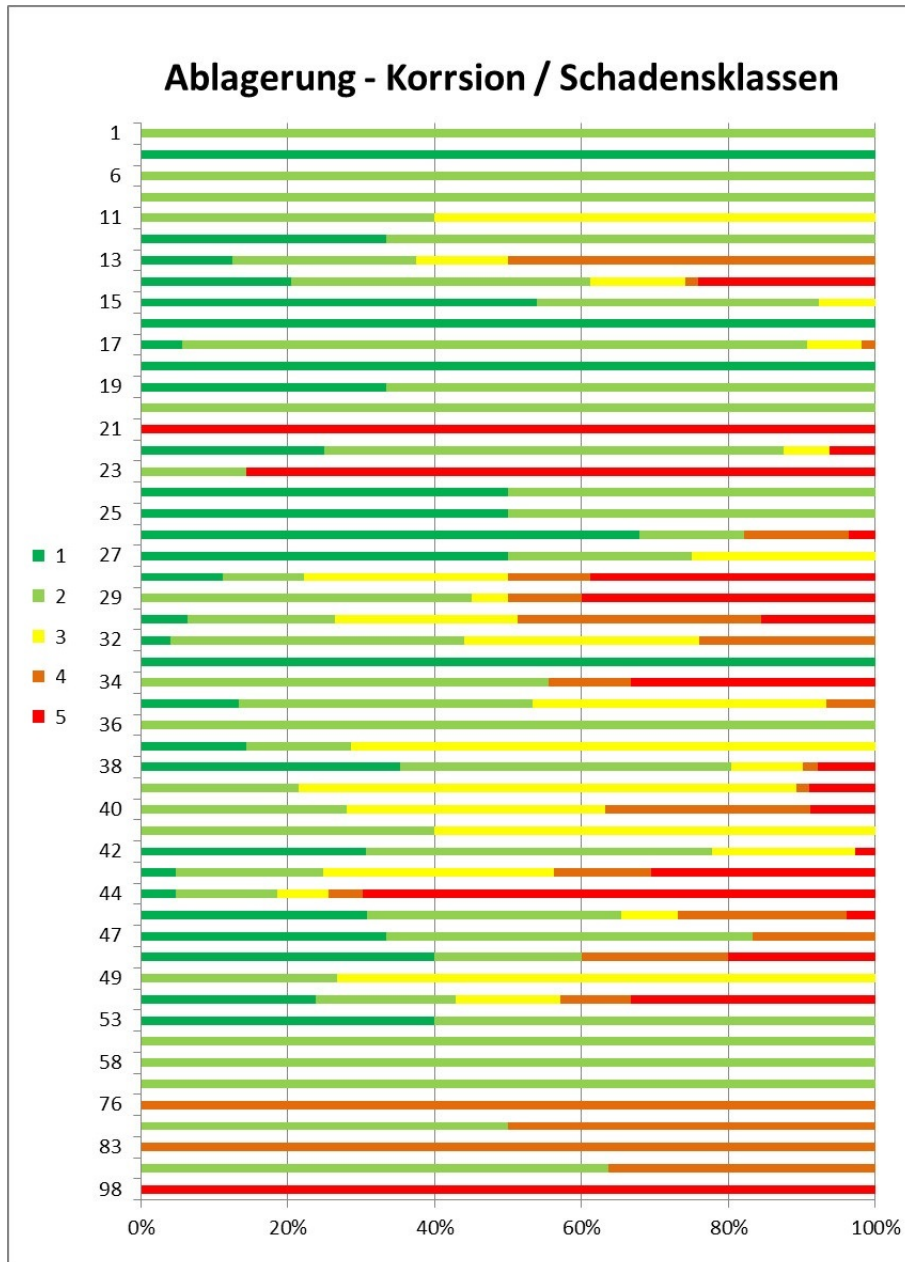


Abbildung 3.73.: Oberflächenschaden / Rohralter

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

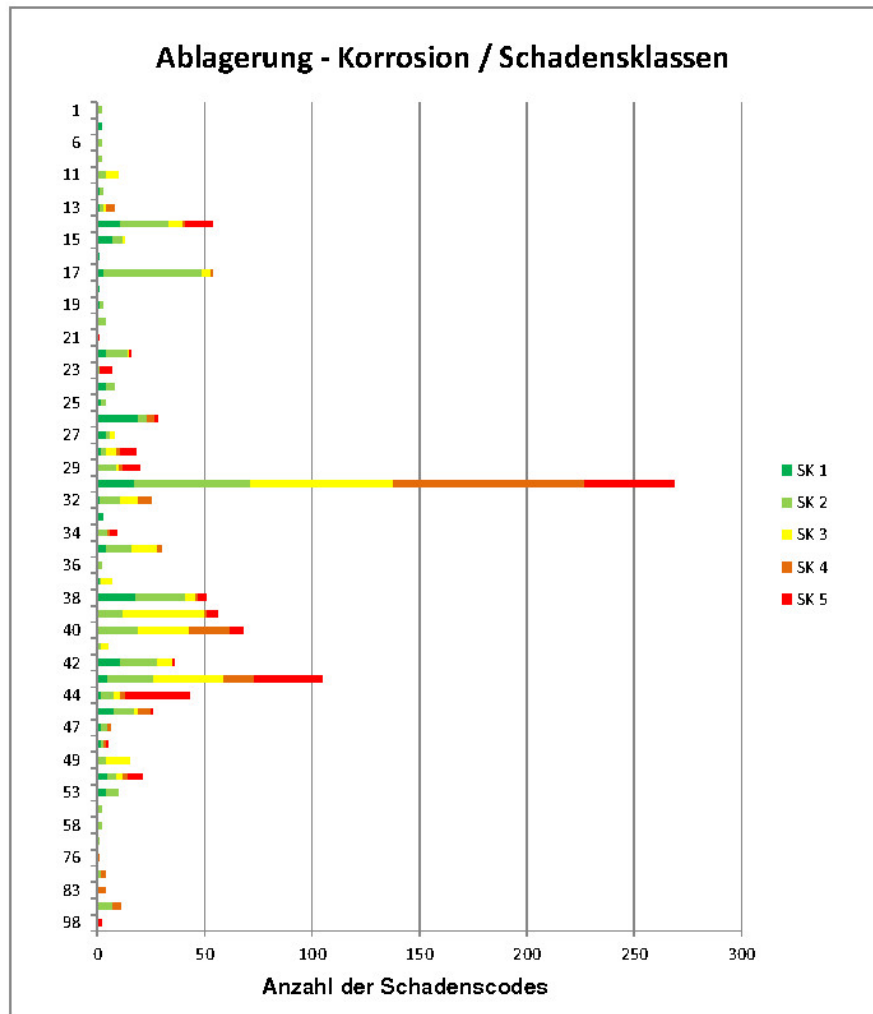


Abbildung 3.74.: Anzahl Codes Oberflächenschaden

Tendenziell zeigt sich eine Zunahme von Verformungen und Rissbildungen mit steigendem Alter. Die Entwicklung der Rohrbrüche ist nicht unbedingt eindeutig. Ich führe das darauf zurück, dass vor allem gravierende Ausführungsmängel vorliegen müssen, um einen Bruch des Rohres zu provozieren. Dies zeigen auch die analysierten Daten, wo derartige schwere Schäden bereits sehr früh auftreten.

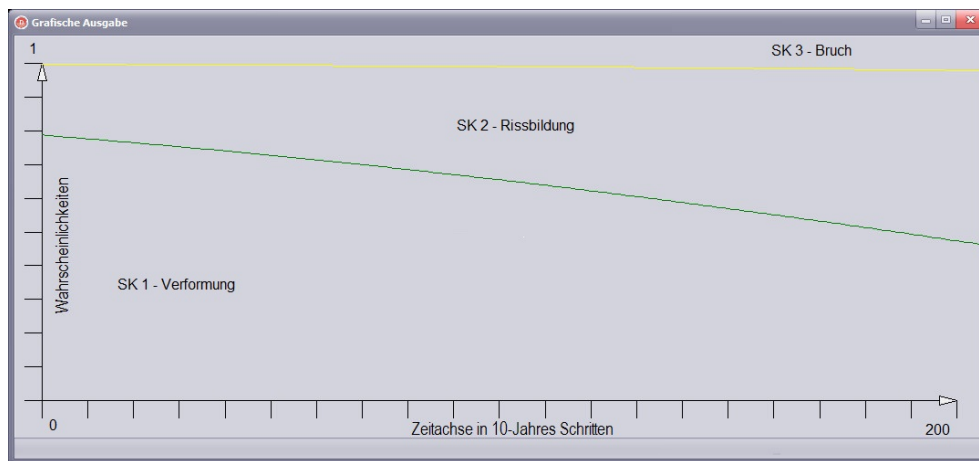
Bei den Oberflächenschäden (Abb. 3.73 und Abb. 3.74) gibt es offensichtlich keinen zeitlichen Zusammenhang. Hier spielen vermutlich überwiegend betriebsspezifische Umstände eine große Rolle. Auch kann ohne Kenntnis von bereits erfolgten Reinigungsmaßnahmen keine verlässliche Aussage über die zeitliche Entwicklung getroffen werden.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Ähnliches gilt für den Wurzeleinwuchs, wobei dieser im Vergleich zur untersuchten Gesamtlänge eine untergeordnete Rolle spielt.

Zumindest rechtfertigt die Entwicklung der Verformungen und Rissbildung (Abb. 3.63 und Abb. 3.66) eine Untersuchung im Zusammenhang mit einer unterschiedlichen Alterungsgeschwindigkeit. Identisch zur Untersuchung von Steinzeug werden auch jetzt den Schadensgruppen folgende entkoppelte Schadensklassen zugewiesen:

- Verformung SK 1
- Rissbildung SK 2
- Rohrbruch SK 3



**Abbildung 3.75.:** Alterung / Einzelschäden

Die Grafik in Abb. 3.75 lässt sich nun ebenfalls dermaßen interpretieren, dass durchaus ein annähernd zeitlich linearer Zusammenhang zwischen einer Verformung und daraus folgender Rissbildung abgeleitet werden kann. Rohrbrüche, sofern sie überhaupt vorkommen, treten auch beim Beton offensichtlich sehr spontan auf.

#### 3.5.5. Zusammenfassung der Materialanalyse

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Entwicklung vom Riss zum Bruch sowohl bei Steinzeug als auch bei Beton sehr langsam erfolgt. Dabei spielen offenbar noch andere Faktoren eine Rolle, über welche jedoch



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

kein Datenmaterial vorliegt. Verkehrsbelastung, Tiefenlage der Rohre, Verhältnisse beim Einbau seien hier beispielhaft genannt. Auch das statisch günstige Verhalten eines Kreisprofils spielt mit Sicherheit eine, im wahrsten Sinn des Wortes, tragende Rolle. Die Untersuchung hat auf jeden Fall gezeigt, dass die Qualität der Ausführung wesentlich ist für die Lebensdauer der Rohre. Steinzeug reagiert dabei offensichtlich besonders empfindlich auf Einbaufehler und entwickelt bereits sehr früh Risse, die sich jedoch nicht zu Rohrbrüchen ausweiten. Beim Beton ist diese Entwicklung nicht so schnell zu beobachten. Dieser neigt vor allem im Mischsystem eher zur Entwicklung von Ablagerungen. PVC wiederum stellt sich als äußerst robustes Material heraus. Dies mag einerseits durch die elastischen Eigenschaften bedingt sein und andererseits durch die mittlerweile sehr weit entwickelten Stoffeigenschaften.

Untersucht wurden ausschließlich solche Schäden, die ein statisches Versagen hervorrufen. Dies impliziert natürlich auch eine Berücksichtigung des Schutzziels »Dichtheit«. Unbeachtet blieb das Schutzziel »Betriebssicherheit«.

Grundsätzlich muss jedoch die Idee von zwei unterschiedlichen Alterungsgeschwindigkeiten (systemisch und bezogen auf den Einzelschaden) fallen gelassen werden. Die statistische Auswertung lässt zumindest mit den vorhandenen Daten keine realistische Schlussfolgerung zu. Es mag sein, dass beispielsweise Korrosion im Beton die Restlebensdauer verringert, jedoch liegt gerade für diesen Fall kein schlüssiges Datenmaterial vor. Es wird daher schlussendlich auf die Berücksichtigung der Einzelschäden verzichtet.

#### 3.5.6. Praktische Durchführung der Ermittlung der Restlebensdauer

##### 3.5.6.1. Allgemeine Bemerkungen

Es ist wurde bereits im Rahmen der Beschreibung des verwendeten Rechenverfahrens dargelegt, dass ein, vor allem hinsichtlich des Rohralters, heterogener Datenpool für die Berechnung notwendig ist. Es wird nun die Annahme getroffen, dass zumindest im deutschsprachigen bzw. im europäischen Raum die Beschaffenheit des Abwassers durchaus ähnlich ist. Dies lässt sich vor allem mit Parallelen in der Lebensweise der europäischen Kulturkreise erklären. Auch die Methoden in der Abwasserbehandlung unterscheiden sich nicht wesentlich. Folgt man dieser Annahme, so lässt sich mit einiger Mühe ein beachtliches Datenvolumen zusammentragen, welches für die Berechnung verwendet werden kann. Die Netzdaten einer einzelnen Gemeinde werden somit als Stichprobe oder als Teilmenge dieser Gesamtheit betrachtet. Dies bringt den

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Vorteil, dass ohne gravierende Datenmanipulation (z.B. über die Gewichtung von Datensätzen) sämtliche Methoden der Statistik verwendet werden können.

Der Einfluss der dynamischen Verkehrsbelastung auf seicht liegende Systemteile konnte leider in dieser Arbeit aufgrund fehlender Daten nicht untersucht werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass in diesem Zusammenhang und in Verbindung mit der Tiefenlage der Kanäle ein nicht zu unterschätzender Faktor vorliegt, der zumindest diskussionswürdig erscheint.

Die Qualität der Übergangsfunktionen könnte diesem Ansatz folgend somit laufend verbessert werden, indem immer mehr Datensätze in die Betrachtung einfließen. Dies wäre nebenbei angemerkt eine sinnvolle Verwendung jener Katasterdaten, welche derzeit in Österreich laufend ermittelt werden. Die Errichtung einer bundesweiten Datenbank (mit weitgehend anonymisierten Datensätzen) erscheint hier naheliegend um den Datenpool permanent zu erweitern. Eine Differenzierung nach Kleingemeinden, Städten und Transportleitungen wäre dabei durchaus vorstellbar. Das bereits erwähnte Datenformat, welches die Förderstelle vorschreibt, ist dabei ausreichend und müsste nur leicht modifiziert und erweitert werden. Auch die behördlichen Strukturen inklusive der dazu notwendigen elektronischen Speichermedien sind bereits vorhanden (s.h. Amt der steirischen Landesregierung).

#### 3.5.6.2. Berechnung der Übergangsfunktionen

In einem allerersten Schritt werden alle verfügbaren Datensätze für die Berechnung eines Lösungsvektors zusammengefasst. Als Kovariable werden das Material, die Nutzung sowie die Profilform in die Betrachtung einbezogen. Dies sind jene Daten, die auf jeden Fall bekannt sein sollten.

Schlussendlich zeigten die durchgeführten Untersuchungen, dass unabhängig vom oben formulierten Ansatz das betrachtete Gebiet eine Rolle spielen kann. Dem wurde insofern Rechnung getragen, als dass auch dies als Kovariable Berücksichtigung fand.

Beispielhaft werden für die nachfolgenden Betrachtungen die Daten von zwei großen Verbänden sowie von 2 burgenländischen Großgemeinden herangezogen. Das Datenmaterial ist hochaktuell und basiert zum Großteil auf Befahrungen und Bewertungen, welche innerhalb der letzten 5 Jahre durchgeführt wurden. Ergänzend sei angemerkt, dass vor der Berechnung nicht relevante Datensätze (Materialien in unerheblicher Menge etc.) ausgeschieden wurden. Ebenso wurden Haltungen der Klasse 0 entfernt, sowie all jene Haltungen, deren Länge 10m unterschritt. Dies war notwendig um eine Konvergenz des Rechenablaufes sicherzustellen.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Zum Vergleich wird werden die Übergangsfunktionen einmal mit und darauf folgend ohne Berücksichtigung von Kovariablen berechnet. Lediglich die Haltungslänge geht in beiden Berechnungen ein. Dieser Vergleich soll vor allem eine Abschätzung ermöglichen, ob auch in Gemeinden mit unvollständigen Datensätzen eine plausible Aussage über die Restlebensdauer getroffen werden kann.

Im Detail wurden 15521 Datensätze verwendet. Es waren konkret 205 Iterationen notwendig um eine Lösung zu erhalten. Der Ergebnisvektor ist in Abb. 3.76 dargestellt. Es ist in der letzten Spalte sehr gut zu erkennen, dass der durchgeführte Wald-Test keine der Hypothesen ablehnt. Anders ausgedrückt beeinflussen alle berücksichtigten Kovariablen die Form der Übergangsfunktionen.

| CoVariable                      | Lösung     | Stand. Fehler | Chi2    | Pr>chi2   |
|---------------------------------|------------|---------------|---------|-----------|
| Alpha 1 vs 0                    | -5,035832  | 0,226047      | 496,3   | 0         |
| Alpha 2 vs 1                    | -8,768606  | 0,308717      | 610,4   | 0         |
| Alpha 3 vs 2                    | -14,065420 | 0,514494      | 382,3   | 0         |
| Alpha 4 vs 3                    | -34,307480 | 1,258063      | 603,7   | 0         |
| Länge (vs 0)                    | 0,016672   | 0,002285      | 53,2    | 3,353E-14 |
| Beton vs Steinzeug              | 0,843110   | 0,187665      | 20,2    | 6,395E-07 |
| Polyvinylchlorid vs Steinzeug   | -6,174040  | 0,411254      | 225,4   | 0         |
| T (vs 0)                        | -1,413480  | 0,038037      | 1380,9  | 0         |
| T Beton vs Steinzeug            | -1,237438  | 0,035174      | 1237,7  | 0         |
| T Polyvinylchlorid vs Steinzeug | -0,724728  | 0,031858      | 517,5   | 0         |
| T KM vs KS                      | -0,475509  | 0,017323      | 753,5   | 0         |
| T KR vs KS                      | 0,314210   | 0,020608      | 232,5   | 0         |
| T Eiprofil vs Kreisprofil       | 1,260600   | 0,024732      | 2598,0  | 0         |
| T AW_OBERWART vs AW_VERBAND_2   | 0,966257   | 0,025201      | 1470,1  | 0         |
| T AW_PINKAFELD vs AW_VERBAND_2  | 0,696429   | 0,023007      | 1518,2  | 0         |
| T AW_VERBAND_1 vs AW_VERBAND_2  | -0,686133  | 0,034825      | 388,2   | 0         |
| Sigma                           | 1,508682   | 0,012864      | 13754,6 | 0         |

Abbildung 3.76.: Ergebnisvektor und Signifikanz mit Kovariablen

| CoVariable   | Lösung     | Stand. Fehler | Chi2    | Pr>chi2    |
|--------------|------------|---------------|---------|------------|
| Alpha 1 vs 0 | -4,284334  | 0,133780      | 1025,61 | 0          |
| Alpha 2 vs 1 | -7,988966  | 0,234394      | 667,47  | 0          |
| Alpha 3 vs 2 | -13,102770 | 0,463379      | 292,06  | 0          |
| Alpha 4 vs 3 | -30,834630 | 0,954977      | 968,42  | 0          |
| Länge (vs 0) | 0,008818   | 0,002302      | 14,67   | 1,0832E-05 |
| T (vs 0)     | -2,154735  | 0,032709      | 4339,68 | 0          |
| Sigma        | 1,495095   | 0,016984      | 7748,82 | 0          |

Abbildung 3.77.: Ergebnisvektor und Signifikanz ohne Kovariable

Zum Vergleich ist in Abb. 3.77 das Ergebnis der Berechnung ohne Kovariable dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Lösungsvektor an gewissen Stellen stark variiert. Welchen Einfluss dies auf die Übergangswahrscheinlichkeiten hat, kann aber nur über einen Vergleich von ausgesuchten Haltungen

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

festgestellt werden. Da dies für die weitere Bearbeitung jedoch nicht relevant ist, wird von einer Durchführung des Vergleiches an dieser Stelle verzichtet.

Statistisch gesehen entspricht der verwendete Datenpool der umfangreichen Stichprobe einer unbekanntem Grundgesamtheit. Auf dieser Basis werden die nun folgenden Untersuchungen und Betrachtungen durchgeführt. Es kann natürlich die Frage aufgeworfen werden, ob das Gros der verwendeten Daten wirklich ohne Weiteres als unmittelbar vergleichbar angesehen werden kann. Dem sei entgegengehalten, dass die Datenerhebung sowie die Datenspeicherung im absolut identischen Datenmodell passiert. Auch die Klassifizierung erfolgt im selben System, unabhängig davon, dass es noch andere Methoden zur Zustandsbewertung gibt. Aus der Sicht eines Praktikers ergeben sich vermutlich teils gravierende Unterschiede in der Herstellung der Haltungen (beispielsweise in der Wahl der Bettungsmaterialien, der Qualität der Verdichtung etc.). Jedoch ist dies ein Einfluss, der auf dieser Basis noch nicht berücksichtigt werden kann. In diesem Punkt ist vermutlich noch erhebliches Potential im Zusammenhang mit der Datenqualität vorhanden.

Schlussendlich sei dies nur ein Hinweis darauf, dass in zukünftigen Arbeiten, welche vielleicht auf diesem Verfahren aufsetzen, diesem Umstand Rechnung getragen wird.

#### 3.5.6.3. Berechnung der systemischen Lebensdauer

Beispielhaft wird der nun folgende Berechnungsvorgang anhand von Daten einer nicht näher genannten burgenländischen Stadtgemeinde hergeleitet. Zunächst muss eine von mir so genannte »Grenzklasse« definiert werden. Dies ist jene Klasse, welche nur zu einem gewissen Prozentsatz erreicht werden darf. Wie etwas weiter vorne ausgeführt, soll dies nicht die letzte erreichbare Schadensklasse sein. In diesem konkreten Fall wird die Klasse 4 als Grenzklasse angenommen. Das Erreichen der Grenzklasse wird im Weiteren mit dem Versagen der Haltung gleichgesetzt.

Aus Gleichung 3.2 und Abb. 3.76 lässt sich mit den jeweiligen Ergebnisvektoren für jedes Alter eine bestimmte Wahrscheinlichkeit ermitteln, mit der eine Haltung in einer Schadensklasse anzutreffen ist. Um die Restlebensdauer zu ermitteln muss der Berechnungsvorgang umgedreht werden um die »systemische« Restlebensdauer zu errechnen.

Die in der Gleichung 3.7 angegebenen Werte  $\beta_0$  und  $\beta_1$  ergeben sich aus den Koeffizienten des errechneten Kovariablenvektors. Eine entsprechendes Beispiel wurde bereits in Gleichung 3.6 gezeigt. Naturgemäß ergeben sich nun für unterschiedliche Randbedingungen differierende Werte im Zusammenhang

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

mit der Übergangswahrscheinlichkeit.

$$S(t) = \exp[-\exp(\alpha_k + \beta_0 + t * \exp(\beta_1 + u))] \quad (3.7)$$

Die Gleichung 3.7 lässt sich nun derartig umformen, dass der Zeitpunkt  $t$  ermittelt werden kann, bei dem statistisch gesehen eine vorgegebene Versagenswahrscheinlichkeit eintritt (Gl.3.8). Anders ausgedrückt wird jener Zeitpunkt errechnet, bei dem im Gesamtsystem ein bestimmter Anteil ( $S$ ) von Haltungen in der Grenzkategorie erwartet wird.

$$t = \frac{\ln(-\ln(S)) - \alpha_k - \beta_0}{\exp(\beta_1 + u)} \quad (3.8)$$

Diskussionswürdig ist nun die Vorgabe dieser Wahrscheinlichkeit » $S$ «. Das Problem dabei ist eine plausible Wahl, denn je höher dieser Wert geschätzt wird umso höher wird logischerweise die Restlebensdauer. Welcher Anteil, an schadhafte Haltungen nun tatsächlich zugelassen wird, hängt vermutlich stark von der Bereitschaft der Betreiber für die Instandhaltung und Pflege der Entwässerungssysteme finanzielle Mittel bereit zu stellen. Wie bereits an früherer Stelle ausgeführt erscheint es plausibel in einem ersten Schritt lediglich einen Anteil von 20% an schadhafte ( $\geq$ SK4) Haltungen zuzulassen. Auch wäre es durchaus denkbar diesen Anteil im Zusammenhang mit dem transportierten Medium zu variieren und so beispielsweise für Regenwasserkanäle eine höhere Schadensrate zuzulassen. Für die Darstellung des Verfahrens werden jedoch derartige Differenzierungen nicht gemacht.

Ein Problem ergibt sich bei der Berücksichtigung der Kovariablen bzw. der Errechnung der Werte  $\beta_0$  und  $\beta_1$ . Im Grunde genommen kann jeder Halter eine sozusagen »persönliche« Übergangswahrscheinlichkeit zugewiesen werden. Bestenfalls ist es möglich Haltungen mit denselben Eigenschaften und demselben Alter zu Gruppen zusammenzufassen. Dies wird jedoch mitunter unübersichtlich, da die Verwendung von verschiedenen Materialien, unterschiedlichen Profilformen sowie einer speziellen Nutzung auch innerhalb eines kleinen Netzes sehr wahrscheinlich ist. Es muss nun die Wahl getroffen werden, ob man bei der Ermittlung der systemischen Lebensdauer die Kovariablen berücksichtigt oder nicht. Es kann passieren, dass beispielsweise im globalen Datenpool ein Material im Vergleich zum betrachteten Gebiet deutlich dominiert. Dies würde zumindest das erwünschte Ergebnis aufgrund falscher Voraussetzungen verfälschen. Verzichtet man auf die Berücksichtigung der Kovariablen, schlägt das Pendel sozusagen in die andere Richtung aus und man verliert auf diese Weise möglicherweise die Genauigkeit der Prognose.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Es kann auf diesem Weg aber keine deutliche Aussage getroffen werden. Versuchsweise wird die nun folgende Berechnung für beiden Fälle durchgeführt und die Ergebnisse werden kritisch gegenübergestellt. Im ersten Fall werden für die Ermittlung des systemischen Maximalalters alle Kovariablen (Abb. 3.76) berücksichtigt. Danach erfolgt die Vergleichsberechnung nur unter dem Einfluss der Länge (Abb. 3.77).

Verwendet werden nun alle vorhandenen Datensätze der entsprechenden Schadensklasse (in diesem Fall SK=3). Dies führt dann abhängig vom jeweiligen Alter und den anderen Covariablen zu einer Gruppe von möglichen Grenzaltern. Aus dieser Gruppe ist nun der plausibelste Wert zu ermitteln. Zunächst erfolgt eine Untersuchung, ob die ermittelten Werte einer Normalverteilung entsprechen. Der durchgeführte Shapiro-Wilk Test hat gezeigt, dass im konkreten Fall keine Normalverteilung vorliegt. Es kommt daher der »zentrale Grenzwertsatz« zur Anwendung und es wird der Mittelwert und ein entsprechender Vertrauensbereich berechnet, in welchem sich zumindest 90% der betrachteten Haltungen befinden sollten. Die Abb. 3.79 zeigt das entsprechende Ergebnis.

An dieser Stelle danke ich einem mittlerweile pensionierten Kollegen, der mir für diese Arbeit seine Statistiktools (Excel) zur Verfügung gestellt hat.

| Vertrauensbereiche für den Median $\zeta$    |                       |                   |        |  |                                    |              |  |  |                      |              |        |
|--|-----------------------|-------------------|--------|--|------------------------------------|--------------|--|--|----------------------|--------------|--------|
| Anzahl der Merkmalswerte in der Stichprobe:  |                       |                   |        |  | n = 869                            |              |  |  |                      |              |        |
| Median der Merkmalswerte in der Stichprobe:  |                       |                   |        |  | $\hat{\zeta} = \bar{x} = 39,63208$ |              |  |  |                      |              |        |
| 1- $\alpha$ - Vertrauensbereiche für $\zeta$ |                       |                   |        | 1- $\alpha$ - Vertrauensbereiche für $\zeta$ |                                    |              |  | 1- $\alpha$ - Vertrauensbereiche für $\zeta$ |                      |              |        |
| $\alpha$                                     | zweiseitig abgegrenzt |                   |        | $\alpha$                                     | nach unten abgegrenzt              |              |  | $\alpha$                                     | nach oben abgegrenzt |              |        |
| 10,0%  | 37,912                | $\leq \zeta \leq$ | 42,940 | 10,0%  | 38,075                             | $\leq \zeta$ |  | 10,0%  |                      | $\zeta \leq$ | 42,714 |
| 5,0%   | 37,881                | $\leq \zeta \leq$ | 43,253 | 5,0%   | 37,912                             | $\leq \zeta$ |  | 5,0%   |                      | $\zeta \leq$ | 42,940 |
| 1,0%   | 37,173                | $\leq \zeta \leq$ | 43,395 | 1,0%   | 37,662                             | $\leq \zeta$ |  | 1,0%   |                      | $\zeta \leq$ | 43,390 |
| 0,1%   | 36,811                | $\leq \zeta \leq$ | 44,349 | 0,1%   | 36,849                             | $\leq \zeta$ |  | 0,1%   |                      | $\zeta \leq$ | 44,275 |

Abbildung 3.78.: Mittelwert und Vertrauensbereich mit Kovariablen

Praktisch angewendet ergibt sich nun folgendes Grenzalter, bei dem ein bestimmter Anteil (20%) von Haltungen mit einer vorgegebenen Schadensklasse wahrscheinlich angetroffen wird.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

| Vertrauensbereiche für den Median $\zeta$    |                       |                   |        |  |                              |              |  |  |                      |              |        |
|--|-----------------------|-------------------|--------|--|------------------------------|--------------|--|--|----------------------|--------------|--------|
| Anzahl der Merkmalswerte in der Stichprobe:  |                       |                   |        |  | n = 895                      |              |  |  |                      |              |        |
| Median der Merkmalswerte in der Stichprobe:  |                       |                   |        |  | $\zeta = \bar{x} = 38,48984$ |              |  |  |                      |              |        |
| 1- $\alpha$ - Vertrauensbereiche für $\zeta$ |                       |                   |        | 1- $\alpha$ - Vertrauensbereiche für $\zeta$ |                              |              |  | 1- $\alpha$ - Vertrauensbereiche für $\zeta$ |                      |              |        |
| $\alpha$                                     | zweiseitig abgegrenzt |                   |        | $\alpha$                                     | nach unten abgegrenzt        |              |  | $\alpha$                                     | nach oben abgegrenzt |              |        |
| 10,0%  | 37,342                | $\leq \zeta \leq$ | 41,942 | 10,0%  | 37,375                       | $\leq \zeta$ |  | 10,0%  |                      | $\zeta \leq$ | 39,829 |
| 5,0%   | 37,317                | $\leq \zeta \leq$ | 42,071 | 5,0%   | 37,342                       | $\leq \zeta$ |  | 5,0%   |                      | $\zeta \leq$ | 41,942 |
| 1,0%   | 36,218                | $\leq \zeta \leq$ | 42,285 | 1,0%   | 37,279                       | $\leq \zeta$ |  | 1,0%   |                      | $\zeta \leq$ | 42,243 |
| 0,1%   | 36,124                | $\leq \zeta \leq$ | 43,316 | 0,1%   | 36,133                       | $\leq \zeta$ |  | 0,1%   |                      | $\zeta \leq$ | 43,226 |

Abbildung 3.79.: Mittelwert und Vertrauensbereich ohne Kovariable

Der Vergleich der beiden Berechnungsergebnisse zeigt zumindest für diesen Fall, dass die Berücksichtigung von Kovariablen kaum eine Rolle spielt. Für die weiteren Berechnungen wird eine untere Vertrauensgrenze von 37 Jahren angenommen und eine obere Vertrauensgrenze von 43 Jahren. Dies führt nun zur Möglichkeit ein pessimistisches und ein optimistisches Szenario zu untersuchen.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

#### 3.5.6.4. Vergleichsberechnung im lokalen Leitungsnetz

Im ersten Fall wird ein Vergleich des Alters der Haltungen mit der unteren Vertrauensgrenze durchgeführt. Dies ist die pessimistische Variante, da das systemische Alter hier ein Minimum hat.

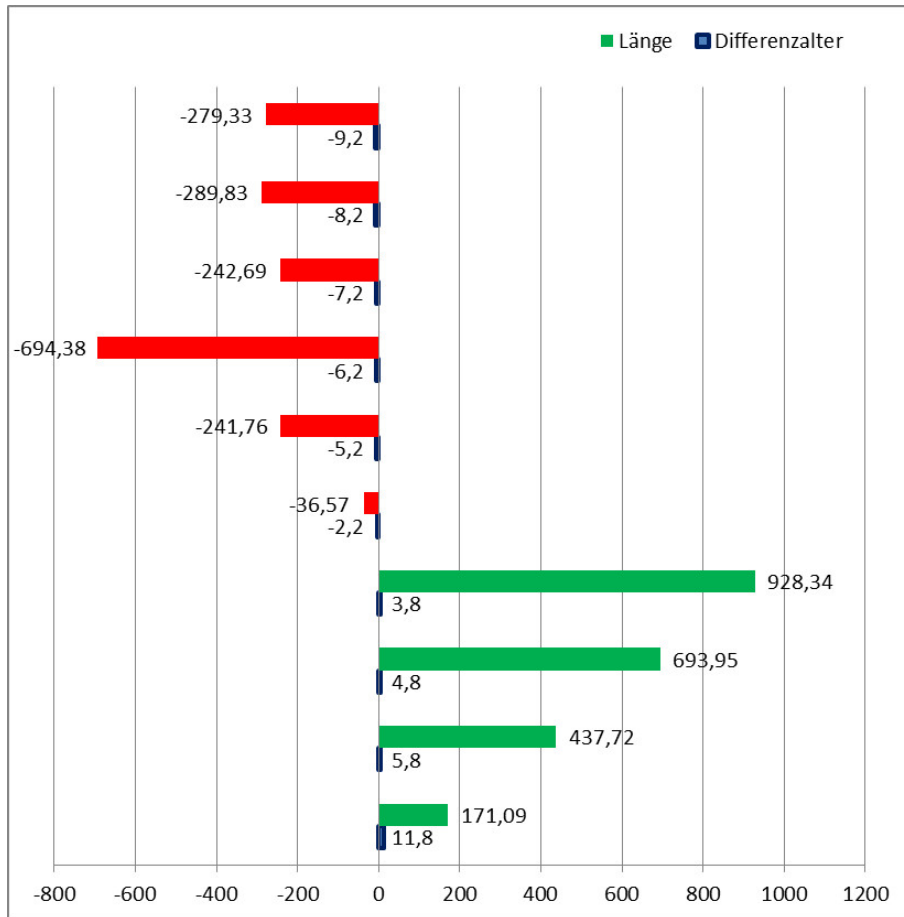


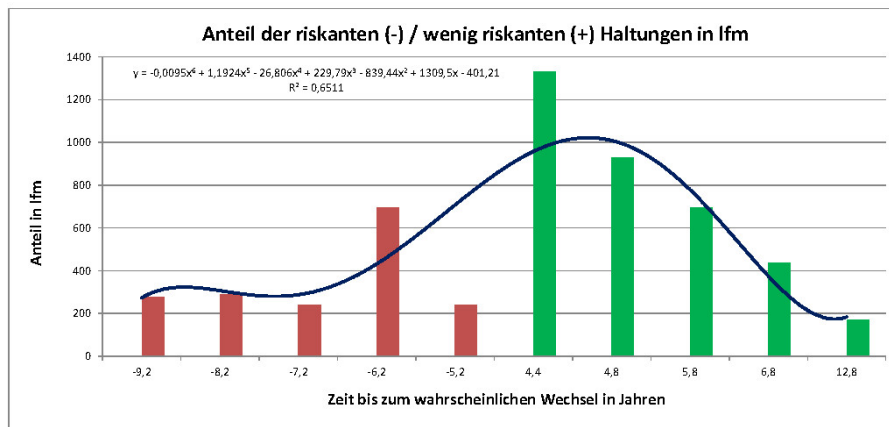
Abbildung 3.80.: Vergleich Haltungsalter - Systemalter für SK3

Abb. 3.80 zeigt das Ergebnis des durchgeführten Vergleiches. Ausgeworfen werden die entsprechenden Längen und das Differenzalter. Rot eingefärbt sind jene Anteile, die bereits mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit »überfällig« sind. Grün dargestellt ist jener Anteil der Haltungen, welche das systemische Grenzalter noch nicht erreicht haben. Die Auswertung erfolgt in diesem Fall diskret, da bei kleinen Gemeinden die Ortsnetze erfahrungsgemäß zügig errichtet wurden und hier wahrscheinlich die Betrachtung innerhalb einer stetigen Funktion keinen Nutzen bringt.



### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Nichtsdestotrotz kann bei großen Netzen durchaus die Frage nach betrachtungswürdigen Zeiträumen auftauchen. Für diesen Fall lässt sich das Diagramm in Abb. 3.80 etwas modifizieren. Das Ergebnis ist für die optimistische Variante in Abb. 3.81 dargestellt.



**Abbildung 3.81.:** Vergleich Haltungsalter - Systemalter für SK3

Es ist nun möglich über eine einfache Integration der Regressionsfunktion und der entsprechenden Normierung auf den Betrachtungszeitraum die Gesamtlänge von betroffenen Haltungen innerhalb von großen Netzen zu ermitteln.

Die Prognose orientiert sich naturgemäß an jenen Haltungen, die das Grenzalter am weitesten überschritten haben. Der Anteil jener Haltungen, die saniert werden sollten, richtet sich wiederum nach den finanziellen Möglichkeiten der Betreiber. Es liegt jedoch eine plausible Abschätzung vor, mit welchen Sanierungslängen in einer bestimmten Zeit zu rechnen ist.

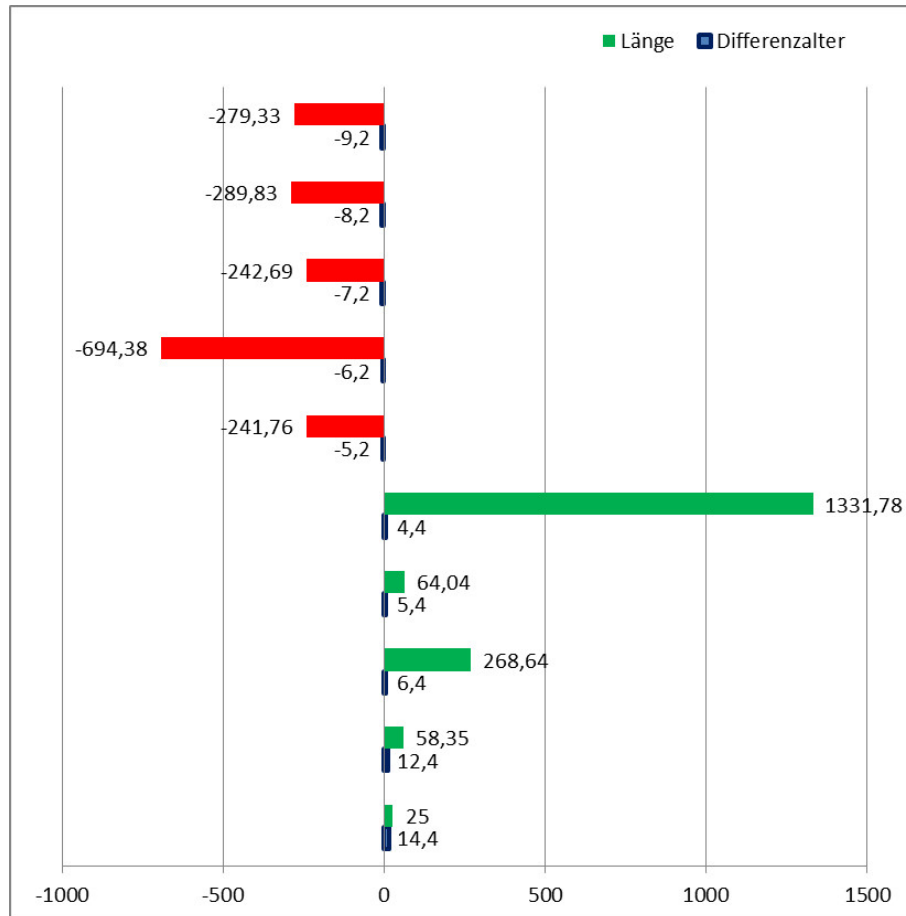
Zum Vergleich wurde auch das optimistische Szenario untersucht. Die obere Grenze war somit das Vergleichsalter. Zufolge der vorliegenden gestrafften Altersstruktur war das Ergebnis jedoch nicht wesentlich anders. Das Ergebnis ist in Abb. 3.82 dargestellt.

#### 3.5.6.5. Vorgehen bei Haltungen in der Grenzklasse

Dies wird vor allem bei älteren Netzen der Regelfall sein und bedarf daher einer besonderen Betrachtung. Die strenge Variante wäre nun sofort eine Sanierung aller betroffenen Haltungen zu empfehlen bzw. vorzuschreiben.

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Es spricht aber nichts dagegen das Vorgehen im letzten Kapitel auf diesen Fall auszudehnen und als Grenzklasse die letzte Erreichbare zu definieren. Lediglich die Wahrscheinlichkeit, mit der Haltungen in die letzte Klasse wechseln können, wird deutlich (auf 10%) reduziert. Für das pessimistische Szenario ergibt sich das in Abb. 3.82 dargestellte Ergebnis.



**Abbildung 3.82.:** Vergleich Haltungsalter - Systemalter für SK4

Der gesamte Handlungsbedarf innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne setzt sich daher aus den in beiden Untersuchungen ermittelten Werten zusammen. Unabhängig davon sind Haltungen der letzten Schadensklasse auf jeden Fall sofort zu sanieren.

#### 3.5.7. Zusammenfassung

Der Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit war die Frage, wie der Alterungsprozess innerhalb eines Kanalsystems beschrieben und die Weiterentwicklung von Einzelschäden prognostiziert werden kann. Auf der Basis eines bereits entwickelten Verfahrens von [Y.LeGat ,2006], wurden die im Südburgenland gebräuchlichsten Materialien untersucht. Dabei wurde auf eine repräsentative und umfassende Datengrundlage besonderer Wert gelegt. Dem Verfahren liegt die Idee zugrunde, dass alle verwendeten Datensätze in ihrer Zusammensetzung identisch sind und die Einflüsse, welche die Alterung bestimmen, sich zumindest im deutschsprachigen Raum gleichen. Der Datenpool kann somit als Grundgesamtheit betrachtet werden und die Netze der untersuchten Gemeinden als umfangreiche Stichprobe.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass zumindest beim Material Beton ein deutliches Alterungsverhalten (die Häufigkeit der Schäden steigt mit zunehmenden Alter) festgestellt werden kann. Ein weiterer Grundgedanke dieser Arbeit muss aber fallengelassen werden. Es war nämlich nicht nachweisbar, dass sich die Verformungen in einem Rohr (sowohl Quetschungen als auch Lageabweichungen) über die Rissbildung zwangsläufig zu Rohrbrüchen entwickeln.

Die Interpretation der Ergebnisse des verwendeten Verfahrens wurde daher lediglich auf die Alterung innerhalb des Systems angewendet. Dabei wurde ein sogenanntes Grenzalter ermittelt. Dies geschah unter der Annahme, dass eine bestimmte Schadensklasse der Haltung innerhalb des Systems nur zu einem gewissen Prozentsatz erreicht werden darf. Es wird sozusagen eine Wahrscheinlichkeit unterstellt, mit der eine Haltung in diese vorletzte Schadensklasse wechselt. Im konkreten Fall war dies die Schadensklasse 4 und die Wahrscheinlichkeit wurde mit 20% angenommen. Die Entscheidung die vorletzte Schadensklasse in der Bewertungsskala heranzuziehen, basierte auf der Annahme, dass ein Totalversagen einer Haltung innerhalb des Systems nicht auftreten darf. Daher wird der Handlungsbedarf bewusst in die Richtung der Instandhaltung und nicht in die Richtung der Sanierung verschoben.

Für die Berechnung des Grenzalters werden alle verfügbaren Datensätze verwendet. Da sich gezeigt hat, dass in der betrachteten Gruppe keine Normalverteilung vorliegt, kann man lediglich einen Median mit einem unteren und oberen Vertrauensbereich ermitteln. In einem letzten Schritt werden dann die Alter der Haltungen der jeweiligen Gemeinde mit dem Grenzalter verglichen. Es gibt nun Haltungen, welche jünger sind als das Grenzalter - für diese besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf. Es treten aber auch

### 3. Ermittlung der Restlebensdauer

Haltungen auf, deren Alter das Grenzalter bereits überschritten hat. Diese hätten bereits zu einem bestimmten Anteil in die nächste Schadensklasse wechseln müssen. Die ältesten dieser Haltungen sind daher am meisten gefährdet und werden somit einer genaueren Betrachtung unterzogen. Da die Gemeinden einen Anhaltspunkt für die Kosten zukünftiger Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen benötigen, ist dies das Endergebnis der Arbeit.

Da sich diese Untersuchung vor allem an die Praktiker richtet, wurde auch besonderer Wert darauf gelegt, die Anwendung des Verfahrens ohne komplizierte Software zu ermöglichen. Sind die Übergangsfunktionen erst einmal ermittelt, genügt prinzipiell ein einfaches Tabellenkalkulationsprogramm um auf eine plausible Lösung zu kommen. Die Ermittlung der Übergangsfunktionen könnte somit durchaus in den universitären Bereich ausgelagert werden und die benötigten Lösungsvektoren wären dann frei verfügbar.

#### 3.5.8. Ausblick

Auf dieser Basis wird nun empfohlen in Österreich eine entsprechende Datenbank aufzubauen, mit der es möglich sein sollte, systemähnliche Datenfamilien zu generieren - beispielsweise wäre es denkbar eine Unterscheidung zwischen Sammlern, Kanälen in Kleingemeinden sowie Kanälen in Städten zu treffen. Die Genauigkeit des Verfahrens sollte mit steigendem Datenumfang deutlich besser werden. Es wäre sogar vorstellbar ohne Befahrungsdaten und nur mit Kenntnis des Rohralters und des Materials Schätzungen über den Sanierungsaufwand zu machen.

Außer Acht gelassen wurden die Vorschläge von Schmidt im Zusammenhang mit der Kalibrierung des Datenmodells. Vielmehr wurden die Daten sozusagen unbehandelt in die Berechnung übernommen und im besten Fall mittels einer Tabellenkalkulation vorselektiert.

Es hat sich herausgestellt, dass auch sehr junge Kanäle bereits ein erhebliches Schadensbild aufweisen. Es kann als nachgewiesen betrachtet werden, dass in diesem Zusammenhang ausschließlich die mangelhafte Herstellung dafür verantwortlich ist. Zumindest in Österreich wird man sich vom derzeit üblichen Billigstbieterprinzip verabschieden müssen und sollte den Ausführenden die Chance geben, zu fairen Preisen einwandfreie Arbeit zu liefern. Dies verbunden mit einer etwas längeren Gewährleistungsfrist sollte ausreichen um den baulichen Zustand unserer Infrastruktur langfristig zu verbessern.

Teil III.  
Anhang

# .1. Ausgangsdatensätze - Haltungen

Beispielhaft werden Auszüge aus der verwendeten Datenbank dargestellt.

| Bezeichnung | SK | Baujahr | Entwässerungsa | Material  | Sch.Punkt   | ISV96       | EN13508     | Profilbreite | Profilhöhe | Länge | Profilart   | Straßenname         | H_Ein   | H_Aus   | Neigung [Prom. | Inspektion  |
|-------------|----|---------|----------------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------|-------------|---------------------|---------|---------|----------------|-------------|
| 50023       | 2  |         | KM             | Beton     | 110         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 400          | 400        | 15,70 |             | Prinz Eugenstraße   |         |         |                | 15.10.2009  |
| 50706       | 4  | 1970    | KM             | Beton     | 340         | Keine Insp. | 1 Insp.     | 600          | 600        | 40,91 | Kreisprofil | Richard Wagnergasse | 318,262 | 318,262 |                | 19.11.2011  |
| 50139       | 0  | 300     | KM             | Beton     | 0           | Keine Insp. | 1 Insp.     | 300          | 300        | 33,53 | Kreisprofil | Molkerstraße        | 347,320 | 347,320 | 6,26           | 11.11.2011  |
| 50024       | 3  | 200     | KM             | Beton     | 200         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 300        | 26,28 |             | Schubertgasse       | 344,528 | 342,918 |                | 01.10.2009  |
| 50033       | 3  | 500     | KM             | Beton     | 240         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 40,35 |             | Prinz Eugenstraße   | 318,838 | 318,838 |                | 01.10.2009  |
| 50034       |    |         | KM             | Beton     |             | Keine Insp. | Keine Insp. |              | 8,39       |       |             |                     |         |         |                | Keine Insp. |
| 50035       | 2  | 1970    | KM             | Steinzeug | 110         | 2 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 300        | 13,80 |             |                     | 315,862 | 315,862 |                | 07.10.2009  |
| 50036       | 2  | 300     | KM             | Beton     | 110         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 300        | 27,40 |             | Steinamangerstraße  | 314,944 | 314,944 |                | 07.10.2009  |
| 50037       | 1  | 1970    | KM             | Steinzeug | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 300        | 26,33 |             | Steinamangerstraße  | 313,276 | 313,276 |                | 07.10.2009  |
| 50038       | 1  | 1970    | KM             | Steinzeug | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 300        | 27,28 |             |                     | 314,288 | 314,288 |                | 07.10.2009  |
| 50039       | 4  | 1970    | KM             | Steinzeug | 330         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 400          | 400        | 38,15 |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50040       | 3  | 1970    | KM             | Steinzeug | 330         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 400          | 400        | 35,76 |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50041       | 1  | 1970    | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 35,43 |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50042       | 1  | 1970    | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 35,62 |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50043       | 1  | 1970    | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 35,68 |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50044       | 1  | 1970    | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 27,33 |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50045       | 1  | 1970    | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 9,57  |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50046       | 1  | 1973    | KM             | Beton     | 0           | Keine Insp. | Keine Insp. | 500          | 750        | 93,35 | EI 3/2      |                     |         |         |                | Keine Insp. |
| 50047       | 2  | 1973    | KM             | Beton     | 100         | 2 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 34,30 |             | Semmelweisgasse     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50048       | 1  |         | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 33,94 |             |                     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50049       | 2  |         | KM             | Beton     | 130         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 41,46 |             |                     |         |         |                | 15.10.2009  |
| 50051       | 2  |         | KM             | Beton     | 130         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 400          | 400        | 52,76 |             |                     |         |         |                | 14.10.2009  |
| 50014       | 5  |         | KM             | Steinzeug | 420         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 400        | 40,35 |             | Molkerstraße        | 315,874 | 315,874 | 26,91          | 16.09.2009  |
| 50015       | 2  | 250     | KM             | Beton     | 130         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 250          | 250        | 15,55 |             | Bahnhofstraße       |         |         |                | 16.09.2009  |
| 50016       | 2  | 250     | KM             | Beton     | 130         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 250          | 250        | 31,88 |             | Bahnhofstraße       | 315,490 | 315,490 |                | 16.09.2009  |
| 50018       | 2  | 120     | KM             | Beton     | 120         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 200          | 150        | 21,21 |             | Bahnhofplatz        | 319,959 | 319,959 |                | 16.09.2009  |
| 50019       | 2  | 150     | KM             | Beton     | 120         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 150          | 150        | 21,08 |             | Bahnhofplatz        | 319,683 | 319,683 |                | 16.09.2009  |
| 12131       | 1  | 1970    | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 300        | 23,94 | Kreisprofil |                     | 314,065 | 314,065 | 6,43           | 07.10.2009  |
| 12132       | 1  | 1970    | KM             | Steinzeug | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 300          | 300        | 11,15 | Kreisprofil |                     | 314,219 | 314,219 | 6,01           | 07.10.2009  |
| 12228       | 1  |         | KM             | Beton     | 0           | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 3,14  | Kreisprofil |                     | 310,827 | 310,827 | 424,52         | 30.09.2009  |
| 12229       | 1  | 1989    | KM             | Beton     | Keine Insp. | Keine Insp. | Keine Insp. | 500          | 5,25       |       |             |                     | 310,827 | 310,827 | 10,86          | Keine Insp. |
| 12236       | 3  |         | KM             | Beton     | 230         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 52,84 |             |                     | 312,160 | 312,160 | 9,61           | 30.09.2009  |
| 12243       | 3  |         | KM             | Beton     | 230         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 52,01 |             |                     | 312,668 | 312,668 | 7,96           | 30.09.2009  |
| 12245       | 3  |         | KM             | Beton     | 240         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 40,72 |             |                     | 313,082 | 313,082 |                | 30.09.2009  |
| 12246       | 2  |         | KM             | Beton     | 130         | 1 Insp.     | Keine Insp. | 500          | 500        | 16,22 |             |                     |         |         |                | 30.09.2009  |

Abbildung .83.: Datensätze der Haltungen

## .2. Ausgangsdatensätze - Zustände nach Isybau96

| Haltung: | Inspektion am: | Untersuchungsrichtung:     | Haltungs klasse(auto): | Haltungs zahl: | Stationierung [m]: | Schadens klasse |
|----------|----------------|----------------------------|------------------------|----------------|--------------------|-----------------|
| 50023    | 15.10.2009     | von oben, in Fließrichtung | 2                      | 110            | -0,50              |                 |
| 50023    | 15.10.2009     | von oben, in Fließrichtung | 2                      | 110            | 0,01               |                 |
| 50023    | 15.10.2009     | von oben, in Fließrichtung | 2                      | 110            | 12,80              | 2               |
| 50023    | 15.10.2009     | von oben, in Fließrichtung | 2                      | 110            | 17,04              |                 |
| 50023    | 15.10.2009     | von oben, in Fließrichtung | 2                      | 110            | 17,54              |                 |
| 50023    | 15.10.2009     | von oben, in Fließrichtung | 2                      | 110            | 17,54              |                 |

| Haltung: | Zustandsgruppe: | Zustandsausprägung:              | Lage im Profil:    | 1. Numerischer Zusatz: | 2. Numerischer Zusatz: |
|----------|-----------------|----------------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 50023    |                 |                                  |                    |                        |                        |
| 50023    |                 |                                  |                    |                        |                        |
| 50023    | S - Strutzen    | N - Nicht fachgerecht ausgeführt | L - Linker Kämpfer |                        |                        |
| 50023    |                 |                                  |                    | 18,04                  | 0,0                    |
| 50023    |                 |                                  |                    |                        |                        |

| Steuerkürzel:                                |
|--|
| HA - Haltungs-/Leitungsanfang                |
| PA - Rohranfang                              |
| PE - Rohrende                                |
| EH - Haltungs-/Leitungsende                  |
| HL - Haltungs-/Leitungslänge gem. Inspektion |

Abbildung .84.: Datensätze der Zustandserfassung nach Isybau96

### 3. Ausgangsdatensätze - Zustände nach EN 13508-2

| NAME  | Inspektionsdatum: | Erfassung: | - Stationierung [m]: | -Inspektionskode:            |
|-------|-------------------|------------|----------------------|------------------------------|
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 0,00                 | BCD - Anfangsknoten          |
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 10,00                | BDD - Wasserspiegel          |
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 14,76                | BAJ - Verschobene Verbindung |
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 14,76                | BDA - Allgemeines Foto       |
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 14,79                | BDD - Wasserspiegel          |
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 19,22                | BDD - Wasserspiegel          |
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 40,26                | BDD - Wasserspiegel          |
| 50706 | 19.11.2011 00:00  | 10.12.2011 | 40,26                | BCE - Endknoten              |

| Lfd-Nr.: | Charakterisierung 1: | Quantifizierung 1 (num.): | Text 1: | Position Von: | Bis: |
|----------|----------------------|---------------------------|---------|---------------|------|
|          | XP                   |                           |         |               |      |
| 1        | B                    | 5,00                      |         |               |      |
| 2        | B                    | 20,00                     |         | 12            | 6    |
|          |                      |                           |         | 12            |      |
| 1        | B                    | 5,00                      |         |               |      |
| 2        | B                    | 5,00                      |         |               |      |
|          | XP                   |                           |         |               |      |

Abbildung .85.: Datensätze der Zustandserfassung nach EN 13508-2



## .4. Datenfile zur Berechnung der Übergangsfunktionen

| STRATUM | NAME  | BAUJAHR | Inspektion | SK | Wichtung | Length        | _NUTZUNG    | _PROFIL     | _Gebiet |
|---------|-------|---------|------------|----|----------|---------------|-------------|-------------|---------|
| Beton   | 12382 |         | 2009       | 5  | 1        | 84,7860106 KR | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12385 | 1970    | 2009       | 2  | 1        | 33,3164834 KM | Eiprofil    | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12392 | 1970    | 2009       | 5  | 1        | 32,6732725 KM | Eiprofil    | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12397 | 1970    | 2009       | 5  | 1        | 36,724639 KM  | Eiprofil    | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12404 | 1970    | 2009       | 4  | 1        | 20,44 KM      | Eiprofil    | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12408 | 1989    | 2009       | 2  | 1        | 40,0392325 KM | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12413 | 1989    | 2009       | 2  | 1        | 37,6284488 KM | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12419 | 1989    | 2009       | 5  | 1        | 25,8006612 KM | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12424 | 1989    | 2009       | 4  | 1        | 24,9979299 KM | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 12425 | 1989    | 2009       | 1  | 1        | 15,3760361 KM | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50000 | 1970    | 2009       | 2  | 1        | 59,5798831 KM | Eiprofil    | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50004 | 1970    | 2009       | 4  | 1        | 101,48017 KM  | Eiprofil    | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50007 | 1970    | 2009       | 2  | 1        | 58,21 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50008 |         | 2009       | 4  | 1        | 18,11 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50033 |         | 2009       | 3  | 1        | 40,35 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50036 |         | 2009       | 2  | 1        | 27,4 KM       | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50041 | 1970    | 2009       | 1  | 1        | 35,43 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50042 | 1970    | 2009       | 1  | 1        | 35,62 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50043 | 1970    | 2009       | 1  | 1        | 35,68 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50044 | 1970    | 2009       | 1  | 1        | 27,33 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50045 | 1970    | 2009       | 1  | 1        | 9,57 KM       | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50047 | 1973    | 2009       | 2  | 1        | 34,3 KM       | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50047 | 1973    | 2009       | 2  | 1        | 34,3 KM       | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50048 |         | 2009       | 1  | 1        | 33,94 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |
| Beton   | 50049 |         | 2009       | 2  | 1        | 41,46 KM      | Kreisprofil | AW_OBERWART |         |

Abbildung .86.: Datensätze zur Berechnung der Übergangsfunktionen

## .5. Befahrungsprotokoll nach EN 13508-2

| Verband (1)      |                             |          |  |  |  | Bewertung ISYBAU 2006                       |                    |  |     |  |
|------------------|-----------------------------|----------|--|--|--|---|--------------------|--|-----|--|
| Ort/Strasse      | STV-3, Richard Wagner Gasse |          |  |  |  |   |                    |  |     |  |
| Firma            | OP 2                        |          |  |  |  |   |                    |  |     |  |
| Haltung          | 50706                       | Baujahr: |  |  |  | Profiltyp/Material                          |                    |  |     |  |
| Zulauf           | 50706                       |          |  |  |  | Profilhöhe/breite                           | 600 mm             |  |     |  |
| Ablauf           | 10533                       |          |  |  |  | Haltungslänge                               | 40,91 m            |  |     |  |
| Unters.-datum    | 19.11.2011                  |          |  |  |  |   |                    |  |     |  |
| Unters.-länge    | 40,26 m                     |          |  |  |  |   |                    |  |     |  |
| Unters.-richtung | von oben                    |          |  |  |  | Haltungsklasse/-zahl<br>maßgebender Schaden | 4<br>BAJ B (20,00) |  | 340 |  |

| Station | Video    | Kürzel | Lage<br>am<br>Umfang | Langtext  | Quant.<br>1 | Quant.<br>2 | Schadensklasse |   |   |     |  |  |  |  |
|---------|----------|--------|----------------------|---|-------------|-------------|----------------|---|---|-----|--|--|--|--|
|         |          |        |                      |   |             |             | D              | S | B | Max |  |  |  |  |
| 0,00    | 00:00:00 | BCD    |                      | Anfangsknoten - Rohranfang  |             |             |                |   |   |     |  |  |  |  |
| 10,00   | 00:02:11 | BDD A1 |                      | Wasserspiegel - trüb oder verfärbt  |             | 5,00 %      |                |   |   |     |  |  |  |  |
| 14,76   | 00:02:46 | BAJ    | 12-06                | Verschobene Verbindung - radial - die Röhre sind rechtwinklig zur<br>Rohrleitungsachse verschoben       | 20,00 mm    |             | 4              | 1 | 2 | 4   |  |  |  |  |
| 14,76   | 00:02:46 | BDA    | 12-00                | Allgemeines Foto - Lage am Umfang - Richtung der Kamera, sofern<br>diese nicht nach vorne gerichtet ist |             |             |                |   |   |     |  |  |  |  |
| 14,79   | 00:03:13 | BDD B1 |                      | Wasserspiegel - trüb oder verfärbt  |             | 5,00 %      |                |   |   |     |  |  |  |  |
| 19,22   | 00:03:48 | BDD A2 |                      | Wasserspiegel - trüb oder verfärbt  |             | 5,00 %      |                |   |   |     |  |  |  |  |
| 40,26   | 00:06:33 | BDD B2 |                      | Wasserspiegel - trüb oder verfärbt  |             | 5,00 %      |                |   |   |     |  |  |  |  |
| 40,26   | 00:06:34 | BCE    |                      | Endknoten - Rohrende  |             |             |                |   |   |     |  |  |  |  |

Abbildung .87.: Befahrungsprotokoll - grafisch

## .6. Klassifizierung nach Isybau2012

| SAGis ISY          |                                   | Zust. Haftung (2006)             |                      |                               |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Inspektionsdaten   |                                   | Dichtheit                        |                      |                               |                          | Standisicherheit           |                          |                            |                          | Betriebsicherheit          |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |
| I10<br>Lfd.<br>Nr. | F6.2<br>Stationen-<br>rung<br>[m] | A10<br>Inspek-<br>tions-<br>code | Fotodatei<br>(lang)  | Max<br>Zahl<br>Klasse<br>Auto | I3<br>Zahl<br>De<br>Auto | I1<br>Klasse<br>De<br>Auto | I3<br>Zahl<br>Di<br>Auto | I1<br>Klasse<br>Di<br>Auto | I3<br>Zahl<br>Dr<br>Auto | I1<br>Klasse<br>Dr<br>Man. | I3<br>Zahl<br>Dy<br>Auto | I1<br>Klasse<br>Dy<br>Man. | I3<br>Zahl<br>Be<br>Auto | I1<br>Klasse<br>Be<br>Auto | I3<br>Zahl<br>Bv<br>Auto | I1<br>Klasse<br>Bv<br>Auto | I3<br>Zahl<br>Bm<br>Man. | I1<br>Klasse<br>Bm<br>Man. |
| 1                  | 0,00                              | BCE                              | dsdaten\Fotos\Halton | 280                           | 3                        | 280                        | 3                        | 200                        | 3                        | 3                          | 30                       | 1                          | 10                       | 1                          | 1                        |                            |                          |                            |
| 2                  | 2,70                              | BAJ                              | dsdaten\Fotos\Halton | 180                           | 2                        | 180                        | 2                        | 100                        | 2                        | 2                          | 30                       | 1                          | 10                       | 1                          |                          |                            |                          |                            |
| 2                  | 7,70                              | BAJ                              | dsdaten\Fotos\Halton | 480                           | 3                        | 480                        | 5                        | 400                        | 5                        | 5                          | 30                       | 1                          | 10                       | 1                          |                          |                            |                          |                            |
| 2                  | 17,70                             | BDA                              | dsdaten\Fotos\Halton | 280                           | 3                        | 280                        | 3                        | 200                        | 3                        | 3                          |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |
| 1                  | 27,80                             | BAJ                              | dsdaten\Fotos\Halton | 480                           | 5                        | 480                        | 5                        | 400                        | 5                        | 5                          | 30                       | 1                          | 10                       | 1                          |                          |                            |                          |                            |
| 2                  | 27,80                             | BAJ                              | dsdaten\Fotos\Halton | 280                           | 3                        | 280                        | 3                        | 200                        | 3                        | 3                          |                          |                            |                          |                            | 70                       | 1                          | 10                       | 1                          |
| 3                  | 27,80                             | BDA                              | dsdaten\Fotos\Halton | 480                           | 5                        | 480                        | 5                        | 400                        | 5                        | 5                          | 30                       | 1                          | 10                       | 1                          |                          |                            |                          |                            |
| 1                  | 28,10                             | BDA                              | dsdaten\Fotos\Halton | 280                           | 3                        | 280                        | 3                        | 200                        | 3                        | 3                          |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |
| 2                  | 28,10                             | BDA                              | dsdaten\Fotos\Halton | 480                           | 5                        | 480                        | 5                        | 400                        | 5                        | 5                          | 30                       | 1                          | 10                       | 1                          |                          |                            |                          |                            |
| 1                  | 28,40                             | BAJ                              | dsdaten\Fotos\Halton | 280                           | 3                        | 280                        | 3                        | 200                        | 3                        | 3                          |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |
| 2                  | 28,40                             | BDA                              | dsdaten\Fotos\Halton | 180                           | 2                        | 180                        | 2                        | 100                        | 2                        | 2                          | 30                       | 1                          | 10                       | 1                          |                          |                            |                          |                            |
| 3                  | 28,40                             | BAJ                              | dsdaten\Fotos\Halton |                               |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            | 70                       | 1                          | 10                       | 1                          |
| 4                  | 28,40                             | BDA                              | dsdaten\Fotos\Halton |                               |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |
|                    | 32,70                             | BAJ                              | dsdaten\Fotos\Halton |                               |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |
|                    | 35,10                             | BCE                              | dsdaten\Fotos\Halton |                               |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |                          |                            |

Abbildung .88.: Automatische Klassifizierung nach Isybau2012

## .7. verwendete Software - Screenshots

### .7.1. Startseite - Datenimport

The screenshot displays the main interface of the Gompertz-Neu (2014) software. The title bar reads "Gompertz-Neu (2014)". The main window contains several sections:

- Navigation:** Buttons for "Dateneingabe", "Ergebnis", "Graph/Control", "Prognose", and "Datenextraktion".
- Project Name:** "Gompertz - Neu (2014)".
- Buttons:** "Startwerte" (with a "Reset" button), "Start", "Einlesefortschritt" (with a checkmark for "Lösung einlesen"), and "Berechne lff.". A "Log\_Like" button is also present.
- Iteration:** A table showing iteration counts for different conditions.
 

| Cond | nbObs |
|------|-------|
| 0    | 633   |
| 1    | 2852  |
| 2    | 825   |
| 3    | 487   |
| 4    | 383   |
| 5    | 187   |
- Parameters:**
  - Klassen:** A row of buttons labeled 0, 1, 2, 3, 4, 5, with button 0 selected.
  - Covariaten Status:** A table with columns "Kategorie", "Status", and "NbObs".
 

| Kategorie   | Status | NbObs |
|-------------|--------|-------|
| LENGTH      | 3      | 5367  |
| KM          | 2      | 4710  |
| KR          | 2      | 607   |
| KS          | 0      | 50    |
| Eiprofil    | 3      | 376   |
| Kreisprofil | 0      | 4991  |
| AW_OBERY    | 3      | 394   |
| AW_PINKAL   | 3      | 497   |
  - NbZ\_0:** Input field with value 4.
  - NbZ\_1:** Input field with value 7.
  - Max. Iterationen:** Input field with value 300.
- Grunddaten:**
  - Arzahl Klassen:** Input field with value 6.
  - Covariablen:** A table with columns "Variable" and "NbObs".
 

| Variable | NbObs |
|----------|-------|
| LENGTH   | 5367  |
| _NUTZUNG | 4710  |
| _Profil  | 607   |
| _Gebiet  | 50    |

Abbildung .89.: Startseite des Programms GOMPertz-NEU

## .7.2. Ergebnisseite numerisch

Schicht: **Beton**  
 Anzahl Parameter: 17  
 Anzahl Iterationen: 39 Konvergiert: 1  
 Loglike: -6952,100

Anzahl Zustände: 6 (muss >=2 sein)  
 Anzahl Install. Jahre: 62 (muss >= nbCond sein)  
 Daten gültig: JA

| CoVariable   | Lösung       | Stand. Fehler | Chi2        | Pr>chi2     |
|--------------|--------------|---------------|-------------|-------------|
| Alpha 0 vs 0 | 4,809110E-1  | 4,992318E-2   | 9,279504E+1 | 0,000000E+0 |
| Alpha 1 vs 0 | -1,798510E+0 | 7,106687E-2   | 1,968006E+3 | 0,000000E+0 |
| Alpha 2 vs 1 | -2,869951E+0 | 9,596810E-2   | 5,493664E+2 | 0,000000E+0 |
| Alpha 3 vs 2 | -3,957220E+0 | 1,326872E-1   | 3,100539E+2 | 0,000000E+0 |

Gradient:
 

|              |
|--------------|
| -3,070727E-7 |
| 2,274947E-7  |
| 1,410087E-7  |
| -4,036311E-7 |
| 2,481738E-7  |
| 5,433408E-7  |

Theta:
 

|              |
|--------------|
| 4,809110E-1  |
| -1,798510E+0 |
| -2,869951E+0 |
| -3,957220E+0 |
| -5,963029E+0 |
| 6,484765E-3  |

Hessian:
 

|              |
|--------------|
| -2,129844E+3 |
| 2,933338E+2  |
| 2,933338E+2  |
| -1,597068E+3 |
| -4,760877E-3 |
| 6,780276E+2  |
| -2,477781E-3 |
| -1,966782E-3 |
| -1,764018E-3 |
| -4,667401E-4 |

V:
 

|             |
|-------------|
| 2,492324E-3 |
| 2,451355E-3 |
| 2,451355E-3 |
| 5,050500E-3 |
| 2,599963E-3 |
| 6,085361E-3 |
| 2,699790E-3 |
| 7,400841E-3 |
| 2,822235E-3 |
| 1,062401E-2 |

Ergebnis speichern

Abbildung .90.: Numerische Auswertung



## 7.4. Datenbankanbindung

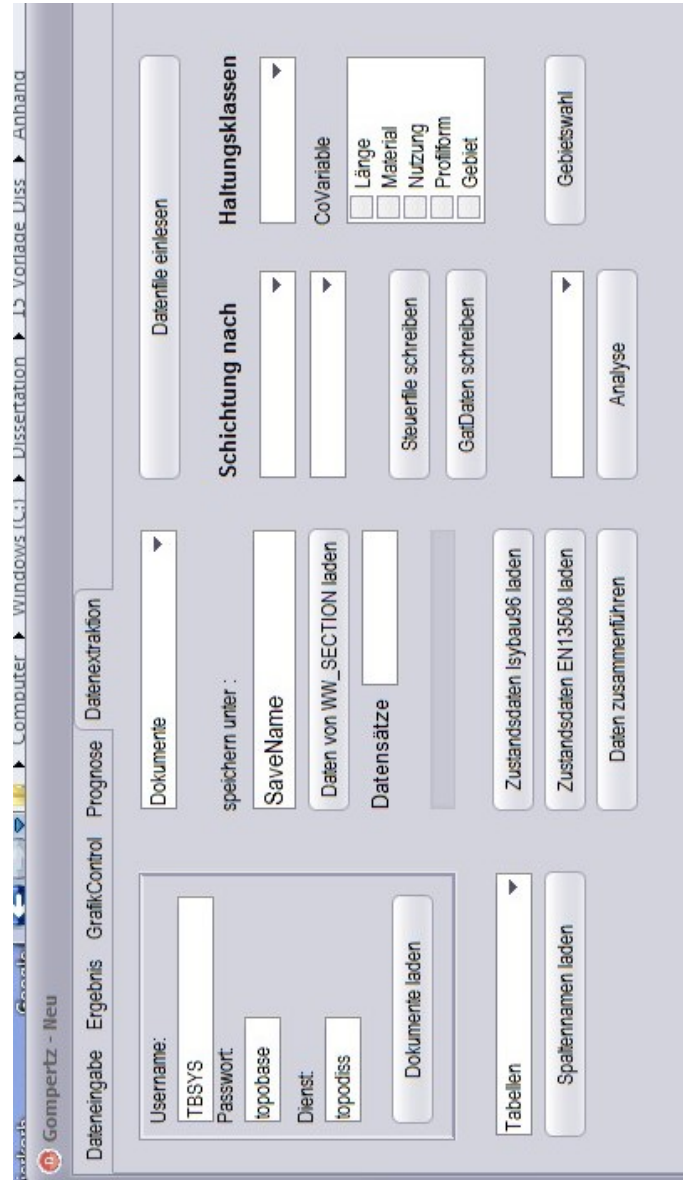


Abbildung .92.: Steuerung des Imports aus der Datenbank

# Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Südburgenland-Geografische Übersicht [Luftbild : Amt der bgld. Landesregierung 2013] . . . . .   | 13 |
| 1.2. Kläranlagen - Übersicht und Kapazitäten . . . . .  | 14 |
| 1.3. Abwasserverbände-Übersicht . . . . .   | 15 |
| 2.1. Beispieldatensatz ISYBAU96 . . . . .   | 24 |
| 2.2. Beispieldatensatz XML-ISYBAU2010 . . . . .   | 25 |
| 2.3. Inspektionskamera [de.academic.ru 2012] . . . . .  | 26 |
| 2.4. Wurzeleinwuchs Höhenberger Engineering - Befahrung 2009 . . . . .  | 27 |
| 2.5. Kugelbildscanner [IBAK Katalog 2012] . . . . .   | 27 |
| 2.6. 3D-Abwicklung einer Haltung [IBAK Katalog 2012] . . . . .  | 28 |
| 2.7. Zustandsklassen Rissbildung [ <i>Merkblatt DWA M 149-3 Zustandserfassung und - beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden</i> , 2010] . . . . .                    | 30 |
| 2.8. Zustandsklassen Rissbildung [ <i>Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes</i> , 2012] . . . . .                  | 31 |
| 2.9. vorläufige Schadensklassen [ <i>Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes</i> , 2012] . . . . .                   | 32 |
| 2.10. Randbedingungen [ <i>Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes</i> , 2012] . . . . .                             | 32 |
| 2.11. endgültige Schadensklassen [ <i>Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes</i> , 2012] . . . . .                  | 32 |
| 2.12. Ermittlung der Zusatzpunkte [ <i>Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes</i> , 2012] . . . . .                 | 33 |
| 2.13. Gleichungen zur Ermittlung der Zusatzpunkte [ <i>Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes</i> , 2012] . . . . . | 34 |
| 2.14. Einteilung der Schadensklassen [T. Ertl , 2007] . . . . .   | 35 |



## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| 2.15. Vergleich der Einzelschadensklassen - DWA(weiß) / ISYBAU (grau)[T. Ertl , 2007] . . . . .     | 35 |
| 2.16. Wichtungssystem in Norwegen [T.Schmidt ,2009] . . . . .                                       | 37 |
| 2.17. Zustandsklassen in Norwegen [T.Schmidt ,2009] . . . . .                                       | 37 |
| 2.18. Zustandsklassen in Großbritannien [T.Schmidt ,2009] . . . . .                                 | 38 |
| 2.19. Übergangswahrscheinlichkeiten [D.M.Abraham und Wirahadikusumah ,1999] . . . . .               | 42 |
| 2.20. Alterungsfunktion unter idealen Bedingungen [D.M.Abraham und Wirahadikusumah ,1999] . . . . . | 43 |
|   |    |
| 3.1. Zustandsbewertung - Beispiel . . . . .   | 53 |
| 3.2. Untersuchtes Datenmaterial in lfm . . . . .  | 55 |
| 3.3. Abwasserart im Laufmetern . . . . .  | 59 |
| 3.4. Abwasserart gruppiert nach Errichtungsjahren . . . . .   | 60 |
| 3.5. Materialverwendung in den untersuchten Einzugsgebieten in Laufmetern . . . . .                 | 62 |
| 3.6. Materialverwendung gruppiert nach Betreibern . . . . .   | 62 |
| 3.7. Materialverwendung gruppiert nach Baujahren für die untersuchten Abwasserverbände . . . . .    | 63 |
| 3.8. Rohrprofile in Prozent der Gesamtlänge . . . . .   | 64 |
| 3.9. Gesamtlänge der Nenndurchmesser in den untersuchten Einzugsgebieten . . . . .                  | 65 |
| 3.10. Verteilung der Schadensklassen im Datenpool . . . . .   | 67 |
| 3.11. Schadensklassen in Abhängigkeit des Alters . . . . .  | 68 |
| 3.12. Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung . . . . .   | 71 |
| 3.13. Verteilungsfunktion der Lebensdauer . . . . .   | 71 |
| 3.14. Überlebensfunktion . . . . .  | 72 |
| 3.15. Übergangsfunktionen . . . . .   | 73 |
| 3.16. Wahrscheinliche Lebensdauer einer Haltung . . . . .   | 75 |
| 3.17. Restlebensdauer abhängig von der Ausfallwahrscheinlichkeit . . . . .                          | 75 |
| 3.18. Bandbreite des maximal erreichbaren Alters . . . . .  | 76 |
| 3.19. Unterteilung der Schadensklassen . . . . .  | 78 |
| 3.20. Codes für Schäden ohne Weiterentwicklung . . . . .  | 80 |
| 3.21. Codes für Schäden mit Weiterentwicklung . . . . .   | 80 |
| 3.22. Gegenüberstellung EN13508/2 und Isybau96 . . . . .  | 81 |
| 3.23. Ergebnisse für das Gesamtsystem . . . . .   | 86 |
| 3.24. Ergebnisse Waldtest . . . . .   | 89 |
| 3.25. Versagenswahrscheinlichkeiten . . . . .   | 90 |
| 3.26. Ergebnisse PVC undifferenziert . . . . .  | 91 |
| 3.27. Ergebnisvektor und Signifikanz der Covariablen . . . . .                                      | 92 |
| 3.28. Verteilung der Schadensklassen PVC . . . . .  | 93 |
| 3.29. Schadensklassen / relativ . . . . .   | 94 |
| 3.30. Schadensklassen / Ergebnis in lfm . . . . .   | 95 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| 3.31. Schadensklassen / Nutzung / relativ . . . . .                    | 96  |
| 3.32. Schadensklassen / Nutzung / Nennweite . . . . .                  | 97  |
| 3.33. Schadensklassen / Schadensart . . . . .                          | 98  |
| 3.34. Schadenscodes altersabhängig - ISYBAU . . . . .                  | 99  |
| 3.35. Schadenscodes altersabhängig - EN13508 . . . . .                 | 100 |
| 3.36. Ergebnis für Steinzeug . . . . .                                 | 101 |
| 3.37. Ergebnisvektor und Signifikanz der Covariablen . . . . .         | 102 |
| 3.38. Verteilung der Schadensklassen - Steinzeug . . . . .             | 102 |
| 3.39. Schadensklassen relativ . . . . .                                | 103 |
| 3.40. Schadensklassen Ergebnis in lfm . . . . .                        | 104 |
| 3.41. Schadensklassen Nutzung relativ . . . . .                        | 105 |
| 3.42. Schadensklassen / Nutzung / Nennweite . . . . .                  | 105 |
| 3.43. Anzahl der Einzelschäden / Schadensklasse . . . . .              | 106 |
| 3.44. Lageabweichung / Rohralter / Verhältniswerte . . . . .           | 107 |
| 3.45. Lageabweichung / Rohralter / Absolut . . . . .                   | 108 |
| 3.46. Lageabweichung / Rohralter / Haltungslängen . . . . .            | 109 |
| 3.47. Rissbildungen / Rohralter / Verhältniswerte . . . . .            | 110 |
| 3.48. Rissbildungen / Rohralter / Absolut . . . . .                    | 111 |
| 3.49. Rissbildungen / Rohralter / Haltungslängen . . . . .             | 112 |
| 3.50. Rohrbrüche / Rohralter / Verhältniswerte . . . . .               | 113 |
| 3.51. Rohrbrüche / Rohralter / Absolut . . . . .                       | 114 |
| 3.52. Rohrbruch / Rohralter / Haltungslängen . . . . .                 | 115 |
| 3.53. Alterung / Einzelschäden . . . . .                               | 116 |
| 3.54. Ergebnis für Beton . . . . .                                     | 117 |
| 3.55. Ergebnisvektor und Signifikanz der Covariablen . . . . .         | 117 |
| 3.56. Verteilung der Schadensklassen - Beton . . . . .                 | 118 |
| 3.57. Schadensklassen relativ . . . . .                                | 119 |
| 3.58. Schadensklassen Ergebnis in lfm . . . . .                        | 120 |
| 3.59. Schadensklassen Nutzung relativ . . . . .                        | 121 |
| 3.60. Schadensklassen / Nutzung / Nennweite beim Kreisprofil . . . . . | 121 |
| 3.61. Schadensklassen / Nutzung / Nennweite beim Eiprofil . . . . .    | 122 |
| 3.62. Einzelschäden / Schadensklasse . . . . .                         | 123 |
| 3.63. Verformungen / Rohralter / Verhältniswerte . . . . .             | 125 |
| 3.64. Verformungen / Rohralter / Absolutwerte . . . . .                | 126 |
| 3.65. Verformungen abhängig von den Haltungslängen . . . . .           | 127 |
| 3.66. Rissbildung / Rohralter / Verhältniswerte . . . . .              | 128 |
| 3.67. Rissbildung / Rohralter / Absolutwerte . . . . .                 | 129 |
| 3.68. Rissbildung abhängig von den Haltungslängen . . . . .            | 130 |
| 3.69. Rohrbruch / Rohralter / Verhältniswerte . . . . .                | 131 |
| 3.70. Rohrbruch / Rohralter / Absolutwerte . . . . .                   | 132 |
| 3.71. Wurzeleinwuchs / Rohralter . . . . .                             | 133 |
| 3.72. Ablagerungen in Abhängigkeit der Nutzung . . . . .               | 133 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| 3.73. Oberflächenschaden / Rohralter . . . . .                   | 134 |
| 3.74. Anzahl Codes Oberflächenschaden . . . . .                  | 135 |
| 3.75. Alterung / Einzelschäden . . . . .                         | 136 |
| 3.76. Ergebnisvektor und Signifikanz mit Kovariablen . . . . .   | 139 |
| 3.77. Ergebnisvektor und Signifikanz ohne Kovariable . . . . .   | 139 |
| 3.78. Mittelwert und Vertrauensbereich mit Kovariablen . . . . . | 142 |
| 3.79. Mittelwert und Vertrauensbereich ohne Kovariable . . . . . | 143 |
| 3.80. Vergleich Haltungsalter - Systemalter für SK3 . . . . .    | 144 |
| 3.81. Vergleich Haltungsalter - Systemalter für SK3 . . . . .    | 145 |
| 3.82. Vergleich Haltungsalter - Systemalter für SK4 . . . . .    | 146 |
| .83. Datensätze der Haltungen . . . . .                          | 150 |
| .84. Datensätze der Zustandserfassung nach Isybau96 . . . . .    | 151 |
| .85. Datensätze der Zustandserfassung nach EN 13508-2 . . . . .  | 152 |
| .86. Datensätze zur Berechnung der Übergangsfunktionen . . . . . | 153 |
| .87. Befahrungsprotokoll - grafisch . . . . .                    | 154 |
| .88. Automatische Klassifizierung nach Isybau2012 . . . . .      | 155 |
| .89. Startseite des Programms GOMPERTZ-NEU . . . . .             | 156 |
| .90. Numerische Auswertung . . . . .                             | 157 |
| .91. Analyse und Berechnung der Restlebensdauer . . . . .        | 158 |
| .92. Steuerung des Imports aus der Datenbank . . . . .           | 159 |

# Literatur

- A.Markov (,2006). »An Example of Statistical Investigation of the Text Eugene Onegin Concerning the Connection of Samples in Chains, trans.« In: *Classical Text in Translation. David Link Science in Context 19.4*, 591600.
- Arbeitshilfen Abwasser Planung, Bau und Betrieb von abwassertechnischen Anlagen in Liegenschaften des Bundes* (,2012). Techn. Ber. Deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Deutsches Bundesministerium für Verteidigung. URL: [www.arbeitshilfen-abwasser.de](http://www.arbeitshilfen-abwasser.de).
- Black, M.Brint und J. R. Brailsford (,2005). »A semi-Markov approach for modelling asset deterioration«. In: *Journal of the Operational Research Society* 56, S. 1241–1249.
- Boonen E.Ana, W.Bauwens M.Pessemier C.Thoeye S.Smolders L. und G. D. Gueldre (,2009). »An investigation of the factors influencing sewer structural deterioration«. In: *Urban Water Journal* 4, S. 303–312.
- Corp., Autodesk (2012). *Autocad Map 3D*.
- D. Schwarz F. Kretschmer, H. Plihal T.Ertl (,2013). »Kanalinspektion nach ÖNORM EN 13508-2/A1 - Vereinfachte Klassifizierung von Zuständen«. In: *Österreichische Wasser - und Abfallwirtschaft* 3-4, S. 94–103.
- D.M.Abraham und R. Wirahadikusumah (,1999). »Development of prediction models for sewer deterioration«. In: *Durability of Building Materials and Components 8 (Volume Two)*, S. 1257–1266.
- E.J.Plate (,1993). *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. ID: AC00396771. Berlin: Ernst, Verl. f. Architektur u. techn. Wiss., XVIII, 685 S. ISBN: 3-433-01073-0.
- EV Ana Jr & W Bauwens C Thoeye, M Pessemier S.Smolders I. G. D. Gueldre (,2009). »Determining factors influencing sewer deterioration Leuven (Belgium) case study«. In: *Water and Urban Development Paradigms - Feyen, Shannon & Neville (eds)*.

## Literatur

- E.V.Ana und W. Bauwens (,2010). »Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods«. In: *Urban Water Journal* 7, S. 47–59.
- Förderrichtlinien* (,2007).
- K.Bölke (,2004). *Kanalinspektion*. Springer.
- Kenneth Levenberg, Donald Marquardt (,1977). *Levenberg-Marquardt Algorithmus*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Levenberg-Marquardt-Algorithmus>.
- M.Dayton (,1992). »Logistic regression analysis«. In: *Articles and Links*, Stat 474–574. URL: <http://bus.utk.edu/stat/datamining/articles.htm>.
- Merkblatt DWA M 149-3 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden* (,2010). DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- ÖNORM EN 13508-2* (,2011). ID: M200021983; ET: 2011-08-15.
- R.Herz (1995). »Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen - ein Kohortenüberlebensmodell«. In: *Jahrbuch für Regionalwissenschaften* 14/15, S. 6–29.
- R.Younis, Mark A. Knight (,2010). »A probability model for investigating the trend of structural deterioration of wastewater pipelines«. In: *Tunneling and Underground Space Technology* 25, S. 670–680.
- Sagis Kanal*.
- Steiermärkischen Landesregierung, FA 19A in Zusammenarbeit mit LBD/Stabsstelle GI Amt der (,2010). *Richtlinie zur Übergabe von Daten des Kanalkatasters*. URL: <http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/ziel/4581173/DE/>.
- T. Ertl, K. Bölke (, 2007). *Kanalmanagement 2007; unterirdische Kanalsanierung; ÖWAV-Informationsveranstaltung, Wien, 17. April*. ID: AC05940600; Adresse des Verl.: 1190 Wien, Muthgasse 18. Wien: Univ. für Bodenkultur Wien, Inst. für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz, S. 130. ISBN: 978-3-85234-095-1. URL: <http://media.obvsg.at/AC05940600-1001>; <http://permalink.obvsg.at/AC05940600>.

## Literatur

- T.Schmidt (,2009). *Modellierung von Kanalalterungsprozessen auf der Basis von Zustandsdaten*. M1: 264 S.; Diss., Techn. Univ. Dresden, 2009 ER -. Dresden.
- V.Bewick, L.Cheek und J.Ball (,2005). »Logistic regression.Critical care 9(1)«. In: *Statistics review* 14, S. 112–118.
- Wald, Abraham (,1943). *Wald Test*. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wald-Test>.
- ÖWAV RB 21 (,1989).
- WRc (,2001). *Sewerage Rehabilitation Manual*. 4th. Water Research Centre.
- Y.Kleiner (,2001). »Scheduling inspection and renewal of large infrastructure assets«. In: *Journal of infrastructure Systems* 7, S. 136–143.
- Y.LeGat (,2006). »Modelling the deterioration process of drainage pipelines«. In: *Urban Water Journal* 5.2. PT: J; TC: 2; UT: WOS:000262437200002, S. 97–106.