

Diplomarbeit

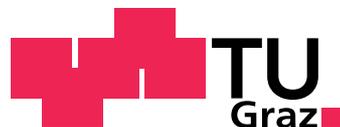
Selektive Kanalinspektionsstrategien und Prognosemodelle für die Sanierung

Johannes Poglitsch

Betreuer:

Univ. Prof. DI. Dr. techn Ernst Stadlober

Diplomarbeit in Technischer Mathematik
Studienzweig Wirtschaftsmathematik, Operations Research, Statistik



Institut für Statistik
Technische Universität Graz
8010 Graz, Steyrergasse 17/IV

Graz, Oktober 2006

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iv
Vorwort	v
Zusammenfassung	vi
Abstract	vii
1 Einleitung	1
1.1 Überblick über die Diplomarbeit	2
2 Problembeschreibung und Definitionen	3
2.1 Problembeschreibung	3
2.1.1 Übersicht über die Problemstellung	3
2.1.2 Überblick über die selektive Kanalinspektion	4
2.2 Begriffserklärungen	5
2.2.1 Das Kanalnetz	5
2.2.2 Kanalinspektion	6
2.2.3 Schicht, Schichtung	7
3 Kanalinspektion und Klassifizierung	8
3.1 Durchführung einer Kanalinspektion	8

3.1.1	Das MERKBLATT ATV-M 143 Optische Inspektion - Inspektion, Instandsetzung, Sanie- rung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen	10
3.2	Bewertung und Klassifikation von Zuständen	18
3.2.1	Das MERKBLATT ATV-M 149 Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Ent- wässerungssystemen außerhalb von Gebäuden	18
3.2.2	Die „Berliner Methode“	22
4	Statistische Grundlagen	27
4.1	Statistische Grundlagen bei Schichtung	27
4.1.1	Notation der Populations- und Schichtparameter	28
4.1.2	Konfidenzintervalle	29
4.1.3	Dichotomiale Anteile	31
4.1.4	Dichotomiale Anteile innerhalb einer Schicht	32
4.1.5	Erwartungswerte und Varianzen über die gesamte Population	33
4.1.6	Einführung zweier Pseudobeobachtungen	34
4.2	Stichprobengröße	35
4.2.1	Methode der proportionalen Aufteilung	35
4.2.2	Methode der minimalen Stichprobengröße für eine bestimmte Genauigkeit innerhalb einer Schicht	36
5	Das Grazer Kanalnetz	37
5.1	Aufbau des Grazer Kanalnetzes	37
5.2	Vorliegende Datenqualität und Schichtenbildung	39
5.2.1	Schichtenbildung	41
5.2.2	Stichprobenplan	44
5.3	Auswertungen bereits erhobener Daten	48
5.3.1	Beton und Steinzeugrohre	50

5.3.2	Duktiler Guss	58
5.3.3	Faserzementrohre	58
5.3.4	Glasfaserverstärkte Kunststoffrohre	59
5.3.5	Mauerwerk	59
5.3.6	Prognose des Zustands des gesamten Kanalnetzes	60
5.4	Simultane Konfidenzintervalle für multinomiale Verteilungen	61
5.4.1	Simultane Konfidenzintervalle für die einzelnen Schichten	62
5.5	Stichprobenplan mit Einbeziehung bereits untersuchter Kanalhaltungen	67
5.6	Probleme	69
6	Prognose mittels Markovketten	71
6.1	Markovketten	71
6.2	Markovketten in der Kanalprognose	73
6.2.1	Lösen des Gleichungssystems (6.11)	75
6.2.2	Übergangsmatrizen für die Materialgruppen <i>Beton</i> und <i>Steinzeugrohre</i>	76
6.3	Prognosen der Zustandswahrscheinlichkeiten	78
6.3.1	Prognosen ohne Sanierung	78
6.3.2	Prognosen mit Sanierung	80
6.4	Anmerkungen zu den Prognosemodellen	82
7	Zusammenfassung und Ausblick	84

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle all jenen danken, die durch ihre Unterstützung zu dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Stadlober für seine Unterstützung und die fachliche Betreuung der Diplomarbeit bedanken.

Weiters möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Werner Sprung für seine Unterstützung danken und dafür, dass er mit dem Datenmaterial diese Diplomarbeit erst möglich gemacht hat.

Dem Präsidialamt unter der Leitung von Frau Dr. Ursula Hammerl und dem Referat Statistik unter der Leitung von Herrn Helmut Nestler gebührt ebenfalls der Dank für ihre Unterstützung.

Schlussendlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir das Studium der technischen Mathematik ermöglicht haben. Ihnen widme ich auch diese Diplomarbeit.

Vorwort

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keine unerlaubten Hilfsmittel bedient zu haben.

Zusammenfassung

Eine gute Abwasserversorgung ist ein wesentlicher Bestandteil jeder Stadt. Daher müssen die Verantwortlichen über den Zustand des Kanalnetzes genau Bescheid wissen. Kanalinspektionen liefern dafür das Datenmaterial. Je umfangreicher ein Kanalnetz ist, desto aufwändiger ist eine Vollinspektion. Es genügt allerdings einzelne Netzteile zu untersuchen und diese Untersuchungsergebnisse mit statistischen Methoden hochzurechnen. Um dabei strukturiert vorgehen zu können, wird die Methodik der geschichteten Stichprobenpläne angewendet.

Auf Basis einer Schichtung des Grazer Kanalnetzes mit 15 Schichten wird ein proportionaler Stichprobenplan erstellt. Bereits getätigte Kanalinspektionen werden ausgewertet, den Schichten zugeordnet und daraus eine erste Abschätzung des Gesamtnetzzustandes erstellt. Aufbauend auf diesem Ansatz wird ein Prognosemodell entwickelt, das auf Markovketten basiert. Die Modellparameter werden auf Basis der bisher untersuchten Kanalhaltungen geschätzt. Zur Veranschaulichung des Alterungsprozesses von 2 Materialien wird eine Entwicklungsprognose ohne begleitende Sanierung durchgeführt. Eine Modellierung mit begleitender Sanierung liefert eine realistische Einschätzung für den Zustand der Materialien in zukünftigen Jahren.

Abstract

A good maintenance of effluent is one of the main ingredients of a city. The responsible have to be exactly informed about the actual state of the sewerage network. Inspections of sewerages provide the database for this information. The larger the sewerage networks are, the more extensive is a full inspection of the network. However, it is sufficient to inspect several parts of the sewerage network and extrapolating the results with statistical methodology. As a structured procedure, the methodology of stratification is available.

A proportional sample design is developed, based on a stratification (15 strata) of the sewerage network in the city of Graz (Austria). Recent inspections of sewerages are analysed and allocated to their stratifications to obtain a first estimation of the condition of the sewerage network. Using this approach, a stochastic model, based on Markov chains is developed. This model is used for forecasting the states of two specific materials. The scenario without sanitation illustrates the aging process of the materials, whereas the model with sanitation provides a realistic prognosis for the condition of the materials within the next years.

Kapitel 1

Einleitung

Arnold Hörler hat 1966 die Aufgabe der Ortsentwässerung wie folgt beschrieben: *„Aufgabe der Ortsentwässerung ist es, sämtliche Abwässer so vollkommen und so schnell als möglich zu sammeln und aus dem Bereich menschlicher Siedlungen zu entfernen, ohne Belästigung der Bewohner, ohne Beeinträchtigung des Verkehrs und ohne Schädigung der ober- oder unterirdischen Gewässer“* [Guj99].

Bereits frühere Kulturen wussten um die Wichtigkeit der Abführung der Abwässer aus besiedelten Gebieten. Was eine Nichtabführung zur Folge haben kann, zeigten uns die großen Krankheitsepidemien des Mittelalters. Heutzutage ist die Ableitung der Abwässer aus den Städten für uns selbstverständlich.

Das Problem, das sich den Städten heutzutage stellt ist das Betreiben und Sanieren einer bestehenden Kanalisation. Dazu müssen allerdings Informationen über den Zustand des Kanalnetzes bzw. der einzelnen Kanäle und Kanalhaltungen vorliegen. Diese Informationen werden mittels Kanalinspektion beschaffet. Wurden diese Kanalinspektionen früher noch mit einfachen Mitteln durchgeführt, so verwendet man heutzutage moderne TV-Kameras auf selbst fahrenden Schlitten, mit denen die Ingenieure jeden Kanal genau begutachten können.

Eine solche TV-Inspektion ist allerdings sowohl zeit- als auch kostenintensiv. Eine Gesamtinspektion des Kanalnetzes würde äußerst lange dauern, sehr hohe Kosten verursachen und im Verhältnis zum Aufwand nicht entsprechende Ergebnisse liefern.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Frage, eine Kanalteilinspektion nach statistischen Gesichtspunkten durchzuführen. Eine solche **„selektive Kanalinspektion“** hat zum einen den Vorteil, dass sie nicht so zeitaufwändig und somit kostengünstiger ist als eine Vollinspektion, zum anderen kann trotzdem ein sehr guter Überblick über den Zustand des Kanalnetzes gewonnen werden.

Weiters können aufgrund der selektiven (Erst-)Inspektion Folgeinspektionen gezielter geplant werden, was somit eine bessere Kalkulation der Inspektions- und Sanierungskosten ermöglicht. Umwelttechnisch betrachtet hat eine selektive Kanalinspektion den Vorteil, dass gefährdete Kanalabschnitte früher erkannt, inspiziert und somit saniert werden können. Dies kommt der Aufgabe des Abführens der Abwässer ohne Schädigung der Umwelt zu Gute.

1.1 Überblick über die Diplomarbeit

In Kapitel 2 wird auf die allgemeine Problematik in der Kanalinspektion eingegangen. Weiters werden die zentralen Begriffe und Baumaterialien im Kanalbau erörtert. Die Begriffe *Kanalinspektion* und *Schicht* werden eingeführt und erklärt.

In Kapitel 3 wird die Durchführung einer Kanalinspektion erklärt. Die Merkblätter ATV-M 143 und ATV-M 149 werden vorgestellt und deren Anwendungen erläutert. Die Vorgangsweise nach der „Berliner Methode“, welche vom Kanalbauamt angewendet wird, wird ebenfalls diskutiert.

In Kapitel 4 werden die statistischen Grundlagen vorgestellt, die für die Auswertung und Prognose der erhobenen Daten verwendet werden. Es wird erklärt was ein Konfidenzintervall ist und wie mit dichotomiale Anteilen gerechnet werden kann.

In Kapitel 5 wird der (historische) Aufbau des Grazer Kanalnetzes kurz beleuchtet. Die vorhandene Datenqualität der Gesamtnetzdaten wird beschrieben. Daraufhin wird auf die Schichtenbildung eingegangen und ein erster Stichprobenplan entworfen. Die bereits erhobenen Daten werden ausgewertet und darauf aufbauend wird ein weiterführender Stichprobenplan vorgestellt. In der Auswertung der bereits erhobenen Daten finden die Formeln und Vorgangsweisen aus Kapitel 4 ihre Anwendung. Weiters wird eine erste Prognose des Zustandes der Schichten und des Gesamtnetzstatus des Grazer Kanalnetzes durchgeführt.

In Kapitel 6 wird ein Prognosemodell vorgestellt, welches auf der Basis von Markovketten aufbaut. Mit diesem Prognosemodell kann dann der weitere Verlauf der Güte einzelner Materialgruppen geschätzt werden.

In Kapitel 7 werden nochmals die wichtigsten Ergebnisse dieser Diplomarbeit zusammengefasst. Ein Ausblick auf weitere mögliche Vorgehensweisen soll verdeutlichen, dass in dieser Thematik noch viele Erweiterungen und Verbesserungen möglich sind.

Kapitel 2

Problembeschreibung und Definitionen

In diesem Kapitel wird die Problematik der Kanalinspektion beschrieben. In Abschnitt 2.1 wird auf die grundsätzliche Problematik der Kanalinspektion im allgemeinen und der selektiven Kanalinspektion im speziellen eingegangen. Damit soll die zentrale Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit geklärt und erläutert werden.

In Abschnitt 2.2 werden die wichtigsten Begriffe erklärt. So wird definiert was unter einem Kanalnetz beziehungsweise einer Kanalhaltung zu verstehen ist, sowie was eine Kanalinspektion ist und wozu sie durchgeführt wird. Die Erklärung einer Schicht dient schlußendlich dem besseren Verständnis dieses Begriffs im statistisch/theoretischen Teil dieser Arbeit.

2.1 Problembeschreibung

2.1.1 Übersicht über die Problemstellung

Aufgrund verschiedener Untersuchungen ist bekannt, dass schadhafte Kanalisationsnetze eine ernst zunehmende Beeinträchtigung des Grundwassers und in weiterer Folge auch des Trinkwassers darstellen. Die Kanäle sind einem ständigen Prozess der Nutzung und damit auch des Verschleißes ausgesetzt. Daher ist es für jeden Betreiber eines Kanalnetzes enorm wichtig, über den Zustand des Gesamtnetzes bescheid zu wissen. Derzeit wird bei der Instandsetzung nach dem Prinzip *Reparieren was defekt ist* vorgegangen. Ein solches Prinzip ist allerdings zum einen gefährlich, da nicht entdeckte Schäden eine Umwelt- und Grundwasserge-

fährdung darstellen, zum anderen sind sie auch teuer. Problemstellen in Kanälen sollen möglichst schon erkannt werden, bevor sie zu wirklichen Schäden werden.

Eine Gesamtuntersuchung eines städtischen Kanalnetzes stellt aber einen erheblichen finanziellen und logistischen Aufwand für den jeweiligen Betreiber dar und ist zudem auch problembehaftet was die Aktualität der Daten betrifft. Um jedoch einen Überblick über den Zustand des gesamten Kanalnetzes zu bekommen ist es nicht zwingend notwendig das gesamte Kanalnetz zu inspizieren.

Wesentlich einfacher und ökonomisch sinnvoller ist es, ausgewählte Netzteile nach statistischen Gesichtspunkten zu untersuchen und die Ergebnisse auf das Gesamtnetz zu übertragen. Dies ist auch der Kernpunkt der selektiven Kanalinspektion welche somit eine wesentliche Vereinfachung und Ökonomisierung der Kanalinspektion gegenüber der Gesamtuntersuchung darstellt.

In Zusammenarbeit mit dem Präsidialamt der Stadt Graz, dem Referat für Statistik und dem Kanalbauamt wird in dieser Arbeit über die Möglichkeiten der selektiven Kanalinspektion im allgemeinen und im Grazer Kanalnetz im speziellen berichtet. Des Weiteren wird ein möglicher Inspektionsplan erstellt und mögliche Prognosemodelle aufgezeigt.

2.1.2 Überblick über die selektive Kanalinspektion

Das Kanalnetz der Stadt Graz umfasst in etwa 24.000 Kanalhaltungen, die zusammen eine Länge von ca. 814 km erreichen. Um dieses Netzwerk instand halten zu können, bedarf es einer genauen Information über den Zustand der einzelnen Kanäle. Das gesamte Kanalnetz wird in verschiedene Schichten aufgeteilt. Kanäle in der selben Schicht haben auch die selben Eigenschaften bezüglich des Materials, des Baujahrs, des Profils, der Nennweite, etc.

Somit werden die 24.000 Kanalhaltungen in diese verschiedenen Schichten aufgeteilt und können nun mit Hilfe eines ersten Inspektionsplans stichprobenweise untersucht werden. Aufgrund dieser Stichproben bekommt man zum einen einen Überblick über den Zustand der jeweiligen Schicht, zum anderen erhält man einen Überblick über den Zustand des gesamten Kanalnetzes. Dadurch wird die Planung der weiteren Inspektionen erleichtert und kann konkretisiert und verfeinert werden. Außerdem kann der finanzielle Aufwand der Sanierungskosten für zukünftige Jahre besser abgeschätzt werden.

2.2 Begriffserklärungen

2.2.1 Das Kanalnetz

Die wesentlichen Bauteile eines Kanalnetzes sind die Straßenkanäle (Sammler), mit Hausanschlüssen, Straßeneinläufen, Schächten sowie Abwasserreinigungsanlagen. [KKR02]

Diese Bauteile müssen die nachstehenden Qualitätskriterien erfüllen [Böl04]:

- dicht gegen inneren und äußeren Wasserdruck,
- standfest gegen innere und äußere Belastung,
- beständig gegen Angriffe aus der Boden-, Grundwasser- und Abwasserzusammensetzung,
- widerstandsfähig gegen mechanische Beanspruchungen (Reinigung), Abrieb,
- wurzelfest.

Die überwiegend eingesetzten Materialien in Kanalnetzen sind [Böl04]:

- **biegesteife Materialien**
 - Steinzeugrohre
 - Betonrohre
 - Stahlbetonrohre
 - Polymerbetonrohre
 - Asbest-/Faserzementrohre
- **biegeweiche Rohrmaterialien**
 - gemauerte Kanäle
 - PVC-Rohre (Polyvinylchlorid)
 - PE-Rohre (Polyethylen)
 - PP-Rohre (Polypropylen)
 - GFK-Rohre (Glasfaserverstärkter Kunststoff)
- **semiweiche Rohrmaterialien**

- Duktile Gussrohre
- **Verbundmaterialien**
 - Beton mit PVC (Polyvinylchlorid)
 - Beton mit PE (Polyethylen)
 - Beton mit GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff)
 - Beton mit Steinzeug

Weiters können die Kanäle nach ihrem Querschnittstyp unterschieden werden.

- Kreisprofile
- Eiprofile
- Maulprofile
- Sonderformen

Die **Kanalhaltung** ist die gängige Untersuchungseinheit bei der Kanalinspektion. Eine Kanalhaltung bezeichnet den Abschnitt der Rohrleitung eines Abwasserkanals, der sich zwischen zwei Kontrollschächten befindet. Jede Kanalhaltung im Grazer Kanalnetz ist mit einer eindeutigen Nummer identifizierbar, ebenso ist jeder Schacht mit einer eindeutigen Nummer gekennzeichnet.

2.2.2 Kanalinspektion

Das Inspizieren von Kanälen dient zum einen der Planung von Sanierungsmaßnahmen und der Abnahme von Bau- und Sanierungsmaßnahmen, zum anderen aber auch der Erfassung des Zustandes eines Kanalnetzes im Gesamten. Die Kanalinspektion wird in der Regel mittels Kanal-TV-Anlagen mit einer selbst fahrenden TV-Kamera durchgeführt.

Die Inspektion dient der Bestandaufnahme des baulichen Zustandes der Kanäle und damit der Erfassung und Dokumentation von Undichtigkeiten, Hindernissen, Lageabweichungen, Oberflächenschäden, Korrosion, Rissen, Scherbenbildungen, Brüchen, Deformationen, Zuläufen sowie Rohrverbindungen. [Böl04]

Diese Inspektionsdaten liefern dann auch in weiterer Folge die Grundlage für eine Analyse der Zustands- und Kostenentwicklung, sowie des insgesamt erforderlichen Sanierungsumfangs des Kanalnetzes bzw. von Teilnetzen. [HK99]

2.2.3 Schicht, Schichtung

Statistisch gesehen ist eine Schichtung eine Zerlegung einer Population in verschiedene Teilpopulationen welche gewisse gemeinsame Eigenschaften besitzen. Diese Teilpopulationen sind somit homogen bezüglich bestimmter Merkmale. Betrachtet man nun ein Kanalnetz, so erscheint es sinnvoll, dieses äußerst heterogene Gesamtnetz ebenfalls in verschiedene in sich homogene Schichten zu unterteilen. Hierbei wird unterstellt, dass sich Kanäle mit ähnlichen Eigenschaften auch ähnlich verhalten. So schlägt Karsten Müller vom Institut für Siedlungswissenschaften der RWTH Aachen folgende 10 Merkmale für eine Schichtung vor [Mül04]:

- Baujahr
- Nennweite
- Abwasserart
- Überdeckung
- Bodenart
- Material
- Verkehrslast
- Profil
- Lage zum Grundwasser
- Stadtgebiet

Klarerweise sollte diese Auflistung als Vorschlag angesehen werden. So besitzt jedes Kanalnetz gewisse Eigenheiten auf die Rücksicht genommen werden muss. Oft lässt auch die Datenqualität eine solch feine Schichtung nicht zu oder es kommt vor, dass in einer Schicht zu wenig Kanäle auftreten. Somit muss eine Schichtung natürlich immer auf das jeweilige Kanalnetz zugeschnitten sein und dessen Eigenheiten berücksichtigen.

Kapitel 3

Kanalinspektion und Klassifizierung

In diesem Kapitel wird auf die Durchführung einer Kanalinspektion und der Zustandsklassifizierung eingegangen. Beide sind von massiver Bedeutung für die Datenbeschaffung, welche für eine selektive Kanalinspektion notwendig ist. In Abschnitt 3.1 wird auf dementsprechende Regelwerke eingegangen, welche sich die Stadt Graz bei der Durchführung von Kanalinspektionen bedient. Kanalinspektionen liefern in weiterer Folge die jeweiligen Kanalzustände, welche dann in Abschnitt 3.2 einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

In Abschnitt 3.2 wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie Zustände bewertet und klassifiziert werden können. Solche Bewertungen liefern die Datenbasis für eine statistische Hochrechnung der Einzeluntersuchungen.

Für ein leichteres Verständnis wird als durchlaufendes Beispiel eine Kanalhaltung mit einer Länge von 50 Metern betrachtet. Diese Kanalhaltung sei im Jahr 1985 verlegt worden und bestehe aus Beton.

3.1 Durchführung einer Kanalinspektion

Für die Durchführung der optischen Inspektion der Abwasserkanäle arbeitet das Kanalbauamt der Stadt Graz mit einem Kürzelsystem wie es im MERKBLATT ATV-M 143, Teil 2 in Anlage 2 und 3 beschrieben ist. [ATV99a]

Des Weiteren verwendet das Kanalbauamt der Stadt Graz zur Klassifizierung der Einzelschäden eine Vorgangsweise wie sie im MERKBLATT ATV-M 149 [ATV99b] beschrieben ist und verwendet diese Klassifizierungsdaten der Einzelschäden um sie mit dem „*Berliner Modell*“, einem Zustandsbewertungsmodell der Berliner Wasserbetriebe, zu bewerten.



Abbildung 3.1: Kanal-TV der Stadt Graz

3.1.1 Das MERKBLATT ATV-M 143 Optische Inspektion - Inspektion, Instandsetzung, Sa- nierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen

Die Anlage 2 dieses ATV-Regelwerks gibt einen Vorschlag zur Verwendung eines Kürzelsystems um den Ist-Zustand der Kanalisation exakt und umfassend zu dokumentieren. Bei diesen Kürzeln unterscheidet man nach der Struktur in „Allgemeine Texte“, „Zustandstexte für Kanäle“ und „Zustandstexte für Schächte und Bauwerke der Ortsentwässerung“.

Für die statistische Auswertung einer selektiven Erstinspektion sind vorderhand lediglich die Kürzel der Werkstoffe relevant um die Kanäle den richtigen Schichten zuordnen zu können, sowie die Zustandskürzel für Kanäle und Leitungen aus denen sich dann die einzelnen Zustandstexte ergeben.

Aufgrund der Zustandstexte können dann mittels dem MERKBLATT ATV-M 149 [ATV99b] die Zustände der einzelnen Kanäle bewertet und in weiterer Folge klassifiziert werden.

Die Kürzel der Werkstoffe der einzelnen Kanalhaltungen wie sie das Kanalbauamt der Stadt Graz sowohl in der Datenbank der bereits untersuchten Kanäle, als auch in der Datenbank des gesamten Kanalnetzes verwendet sind der Abbildung 3.1 zu entnehmen.

Der Beispielkanal hat somit das Kürzel „B“, welches seinen Bauwerkstoff beschreibt.

Kürzel	Werkstoff	Bemerkung
AZ	Asbestzement	
B	Beton	
CNS	Edelstahl	
FZ	Faserzement	
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff	
GG	Grauguss	Gusseisen mit Lamellengraphit
GGG	duktiler Guss	Gusseisen mit Kugelgraphit
ST	Stahl	
MA	Mauerwerk	
OB	Ortbeton	
PC	Polymerbeton	
PCC	Polymermodifizierter Zementbeton	
PEHD	Polyethylen	HD = High Density
PH	Polyesterharz	
PHB	Polyesterharzbeton	
PP	Polypropylen	
PVC	Polyvinylchlorid	
PVCU	Polyvinylchlorid hart	
SPB	Spanbeton	
STB	Stahlbeton	
STZ	Steinzeug	

Tabelle 3.1: Kürzelsystem der Werkstoffe [ATV99a]

Die Kürzel für „Zustandstexte für Kanäle und Leitungen“ bestehen in der Regel aus 4 Kürzelstellen, welche grundsätzlich miteinander kombinierbar sind. In der Praxis treten allerdings nicht alle Kombinationen auf.

Die **1. Kürzelstelle** gibt in der Regel die Zustandsgruppe an. Diese Zustandsgruppe muss nicht notwendigerweise auch eine Schadensgruppe sein. Auch Abzweigungen oder Stutzen werden in der Zustandsgruppe erfasst.

Die **2. Kürzelstelle** gibt die Zustandsausprägung an. Diese Zustandsausprägung beschreibt, je nach Zustandsgruppe an der 1. Stelle, die entsprechende Charakteristik dieser Zustandsgruppe. Sie ist bei Schäden bereits ein Indikator für die Schwere des Schadens. So kann zum Beispiel die Zustandsgruppe „Hindernis“ die Ausprägungen „Sedimentation“, „einragend“, „verfestigt“ oder „Wurzeleinwuchs“ haben.

Die **3. Kürzelstelle** gibt in der Regel eine mögliche Undichtigkeit an. Dies ist insofern wichtig, als dass Undichtheiten mit austretendem Schmutz- bzw. Mischwasser eine erhebliche Gefährdung für die Umwelt und das Grundwasser darstellen.

Die **4. Kürzelstelle** gibt bei Abwasserkanälen die Lage des entsprechenden Zustands an. So wird festgehalten wo sich ein Hindernis befindet, oder von welcher Seite ein Wurzeleinwuchs kommt. Auch wird hier festgelegt woher eine Abzwei-

1. Stelle	Zustandsgruppe	2. Stelle	Zustandsausprägung
A	Abzweig	A	Anschluss an Rohr
B	Rohrbruch	B	Ausbiegung
C	Korrosion	C	Verbindung
D	Deformation	D	Sedimentation
F	Fehlanschluss	F	Verfestigt
H	Hindernis	G	Dichtung
K	Kanalsanierungsmaßnahme	H	Horizontal
L	Lageabweichung	I	Inkrustation
R	Riss	K	Klinker
S	Stützen	L	Längs-, Axial
T	Fehlende Teile	M	Fugenmörtel
U	Undichtheit	N	Nicht fachgerecht ausgeführt
V	Mechanischer Verschleiß	O	Außen, zurück liegend
W	Sonstiger Zustand	P	Wurzeleinwuchs
		Q	Quer-, Radial-
		R	Riss
		S	Scherbe
		T	Einsturz
		U	Verschlossen
		V	Vertikal
		W	Wandung
		X	Risse, von einem Punkt ausgehend
		Z	Kreuzung von sonstigen Leitungen
		-	Wenn keines der angeführten Kürzel zutrifft
3. Stelle	Undichtheitsangaben	4. Stelle	Lage im Profil, Sonstiges
A	Sichtbarer Wasseraustritt	A	Axial
B	Boden sichtbar	F	Fremdwasser
D	Verstopft	G	große, starke Infiltration
E	Eindringendes Wasser sichtbar	H	Horizontal
F	Feuchtigkeit sichtbar	L	Linker Kämpfer
G	Geröll sichtbar	O	Scheitel, oben
M	Eindringendes Wasser sichtbar mit Bodeneintrag	R	Rechter Kämpfer
S	Sand	S	Rückstau (in cm. Wasserstand)
-	Keine Angaben zur Undichtigkeit möglich	U	Sohle, unten
		V	Vertikal
		-	Gesamter Rohrumfang

Tabelle 3.2: Zustandskürzel für Kanäle und Leitungen [ATV99a]

gung kommt (siehe Tabelle 3.2).

Wie aus der Tabelle 3.2 zu erkennen ist, sind diese 4 Kürzelstellen grundsätzlich frei kombinierbar, wobei sich theoretisch auch Kombinationen ergeben können, die in der Praxis nicht vorkommen. Mit Ausnahme der 1. Kürzelstelle muss der Zustandstext nicht an jeder Stelle belegt sein.

Weiters muss oftmals eine 5. Kürzelstelle geführt werden, die einen numerischen Teil für den Zustandstext enthält. Diese Stelle wird dann benötigt, wenn es sich um Zustände wie Risse oder einen Rohrbruch handelt. So ergibt sich der Zustand einer Kanalhaltung mit einem Riss aus der Breite dieses Risses. Solche Informationen sollen an dieser 5. Stelle festgehalten werden.

Unser Beispielkanal wurde während der Befahrung folgendermaßen klassifiziert:

- A-L er besitzt einen Abzweig auf der linken Seite
- RLEO er besitzt oben einen Längsriss an dem eindringendes Wasser sichtbar ist
- A-R er besitzt einen Abzweig auf der rechten Seite
- HPER Wurzeleinwuchs an der rechten Seite, eindringendes Wasser ist sichtbar

Der Beispielkanal scheint also in keinem guten Zustand zu sein.

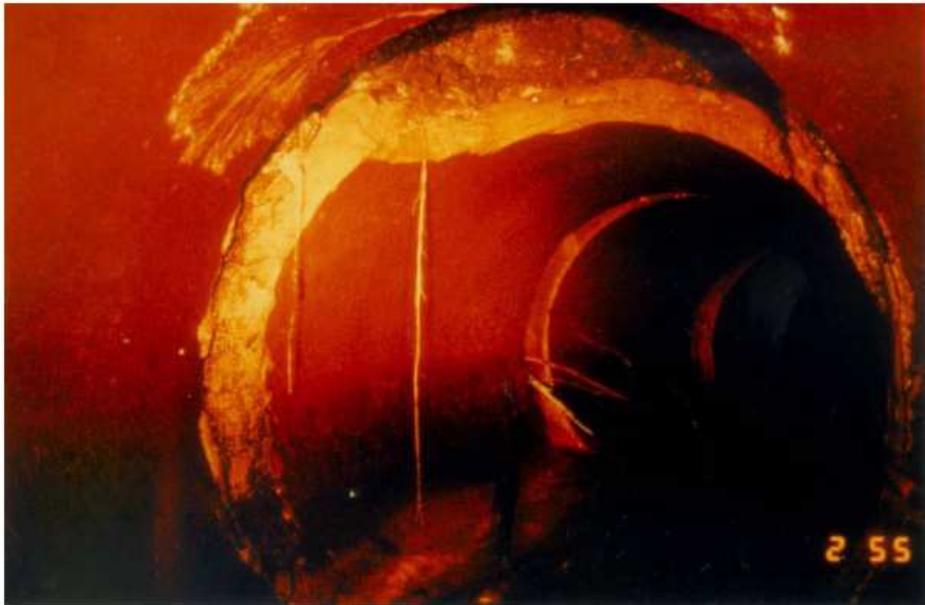


Abbildung 3.2: Rohrbruch

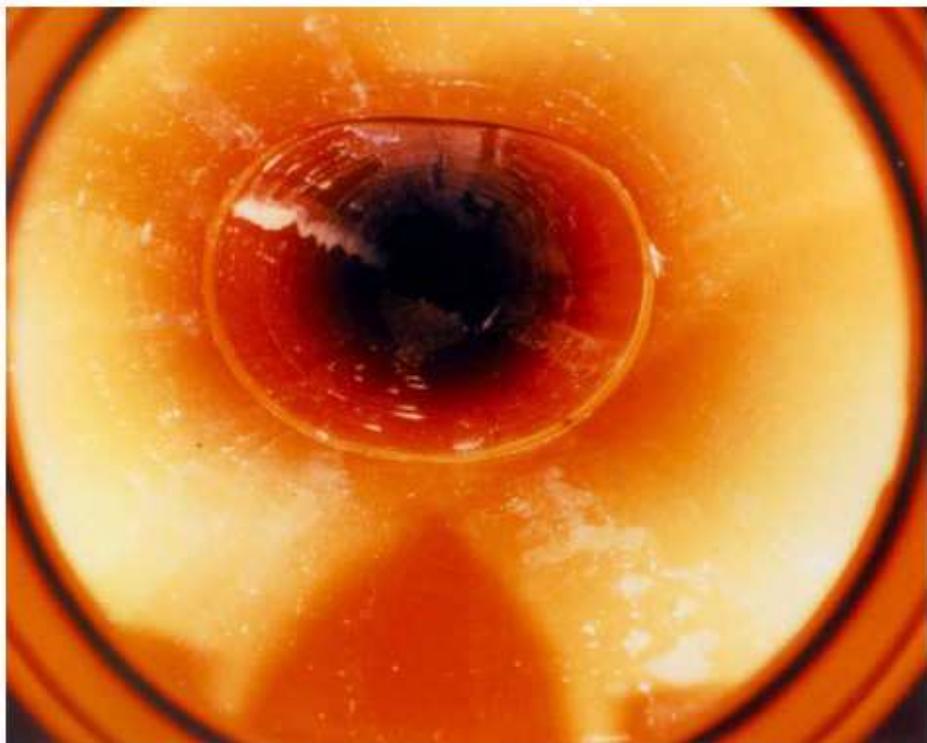


Abbildung 3.3: Deformation

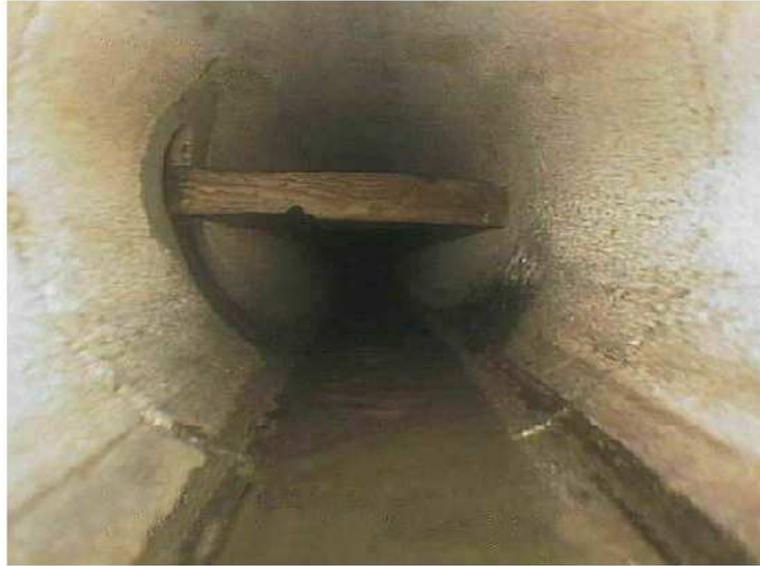


Abbildung 3.4: Beispiel eines Hindernisses



Abbildung 3.5: Lageabweichung

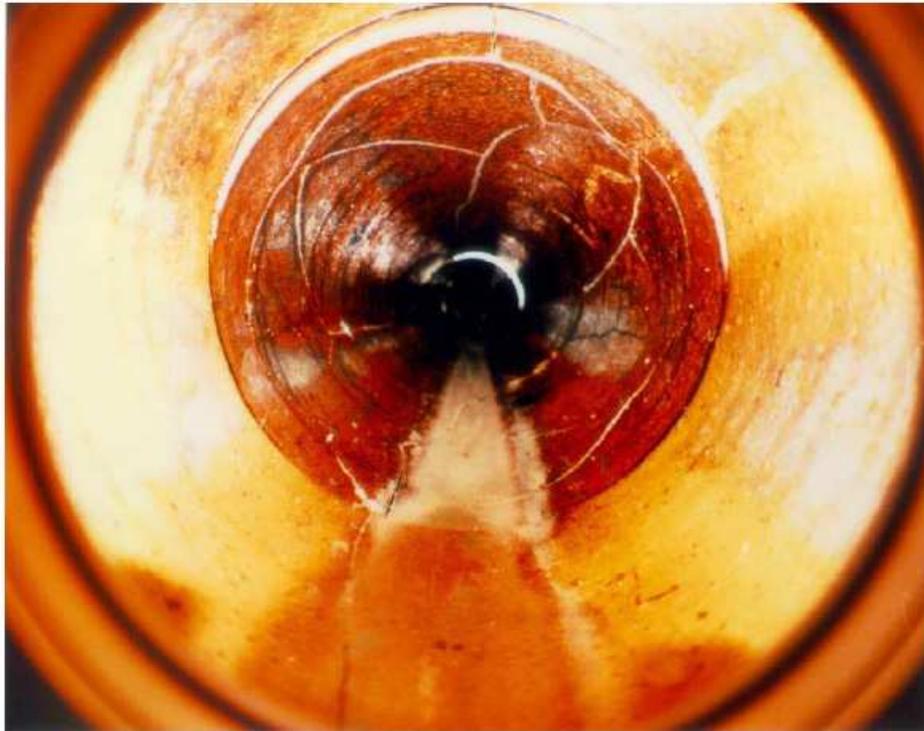


Abbildung 3.6: Risse mit Scherbenbildung



Abbildung 3.7: Fehlende Teile in einem gemauerten Kanal

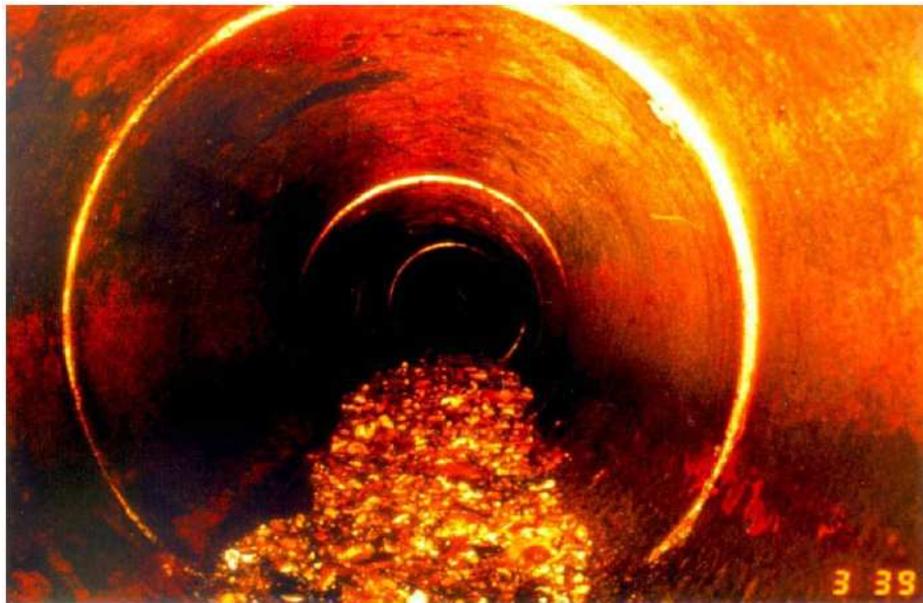


Abbildung 3.8: Sedimentation



Abbildung 3.9: seitlicher Wurzeleinwuchs

3.2 Bewertung und Klassifikation von Zuständen

Eine Zustandsbewertung und Zustandsklassifikation ist immer eine Form von subjektiver Prioritätensetzung. Daher gibt es grundsätzlich kein allgemein gültiges Verfahren zur Zustandsklassifizierung und -bewertung von Abwasserkanälen. Das MERKBLATT ATV-M 149 stellt hierbei eine Möglichkeit der Zustandsklassifizierung und Zustandsbewertung von Kanälen dar. Sie ist allerdings nicht die einzige Erkenntnisquelle für derartige Verfahren.

3.2.1 Das MERKBLATT ATV-M 149 Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden

Das MERKBLATT ATV-M 149 wurde im April 1999 von der deutschen *Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall* mit dem Ziel herausgegeben, eine Klassifizierung und Bewertung von Entwässerungssystemen im Rahmen bestehender Anforderungen zu schaffen und somit Sanierungsprioritäten festlegen zu können. Es beschreibt eine grundsätzliche Vorgangsweise für die Zustandsklassifikation und Zustandsbewertung. Im Anhang wird ein mögliches Verfahren zur Umsetzung dieser Vorgangsweise beschrieben. Bei dieser Vorgangsweise sind die Inspektion und deren Beschreibung mit Hilfe von Zustandskürzeln vorausgesetzt wie sie im MERKBLATT ATV-M 143 beschrieben werden.

Ein wesentlicher Teil davon ist eine Tabelle mit einer entsprechenden Einteilung der Einzelschäden von Rohrleitungen in Zustandsklassen. Diese Tabelle 1, die sich im Anhang des MERKBLATT ATV M-149 befindet, findet sich hier in den Tabellen 3.3, 3.4 und 3.5. Somit ist es möglich, für jedes Zusatzkürzel, welches mit Hilfe des MERKBLATT ATV-M 143 ermittelt wurde, eine Zustandsklasse zu ermitteln.

Zustandsart	Zustands- spezifikation	Sofortmaßnahmen Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 1 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 2 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 3 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 4 Zustands- beschreibung					
1	Einordnung aufgrund des Kürzels an der 3. Stelle, wenn nicht der numerische Zusatz eine höhere Klassifizierung erfordert Abzweig	alle Schäden	M	E, A, B	F						
							A-D	Abzweig verstopft Abzweig nicht fachgerecht eingebaut	-	-	-
							AN	Würzeleinwuchs durch den Abzweig	$10\% \leq x < 20\%$	$x < 10\%$	-
							AP	Riss im Abzweig	$20\% \leq x < 30\%$ $5\text{mm} < x < 10\text{mm}$	$10\% \leq x < 20\%$ $2\text{mm} < x < 5\text{mm}$	$x < 10\%$ $0,5\text{mm} < x < 2\text{mm}$
2	gemessene / geschätzte Breite Rohrbruch	alle Schäden	M	E, A, B	F						
							AR	Fehlendes Rohrstück am Schacht, Bau- werksanschluss	$x \geq 25\text{cm}^2$	-	-
							BA	Fehlendes Rohrstück im Verbindungsbereich	$x \geq 25\text{cm}^2$	-	-
							BC	Fehlende Scherbe	$x \geq 25\text{cm}^2$	-	-
							BS	Einsturz	sofort	-	-
							BT	Loch, fehlendes Rohrwandungsstück	$x \geq 25\text{cm}^2$	-	-
3	Korrosion ¹	alle Schäden	M	E, A, B	F						
							BW	Innenkorrosion	13, 33	12, 22, 32	11, 21
							CC	Korrosion in der Rohrverbindung	13, 33	12, 22, 32	11, 21
							CK	Korrosion der Klinker	alle	-	-
							CM	Korrosion des Fugenmörtels	33	32	-
							CM	Verformung biegeweicher Rohre	-	-	-
4	gemessene / geschätzte Durchmesseränderung Fehlanschluss	alle Schäden	M	E, A, B	F						
							D-	Deformation	$20\% \leq x < 40\%$	$10\% \leq x < 20\%$	$6\% \leq x < 10\%$
5	Fehlanschluss	alle Schäden	M	E, A, B	F						
							F-	Schmutzwasser an Regenwasserkanal - Fäkalien sichtbar	Schmutzwasser an Regenwasserkanal - ständiger Wasserzulauf	-	-

Tabelle 3.3: Abgrenzung der Zustandsklassen für Rohrleitungen (Teil I) [ATV99b]

¹11 = Zuschlag sichtbar | 12 = Zuschlag ragt heraus | 13 = Zuschlag ist herausgefallen | 21 = Bewehrung sichtbar, korrodiert | 22 = Bewehrung fehlt teilweise, oder ragt heraus | 32 = Fugenmörtel fehlt teilweise | 33 = Fugenmörtel fehlt ganz

Zustandsart	Zustands- spezifikation	Sofortmaßnahmen Zustandsklasse 0 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 1 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 2 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 3 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 4 Zustands- beschreibung
Einordnung aufgrund des Kürzels an der 3. Stelle, wenn nicht der numerische Zusatz eine höhere Klassifizierung erfordert	alle Schäden	M	E, A, B	F		
6	Abflusshindernisse					
gemessen / geschätzt beeinträchtigt Querschnittanteil	H- Hindernis allgemein	$x \geq 50\%$	$35\% \leq x < 50\%$	$20\% \leq x < 35\%$	$5\% \leq x < 20\%$	$x < 5\%$
	HDG Sedimentation (Geröll)		muss vor der Durchführung der Inspektion beseitigt werden			
	HDS Sedimentation (Sand)		muss vor der Durchführung der Inspektion beseitigt werden			
	HE Einragendes Hindernis	$x \geq 50\%$	$35\% \leq x < 50\%$	$20\% \leq x < 35\%$	$5\% \leq x < 20\%$	$x < 5\%$
	HF Verfestigte Ablagerungen	$x \geq 50\%$	$35\% \leq x < 50\%$	$20\% \leq x < 35\%$	$5\% \leq x < 20\%$	$x < 5\%$
	HG Einragender Dichttring	-	alle	-	-	-
	HI Inkrustation	$x \geq 30\%$	$20\% \leq x < 30\%$	$10\% \leq x < 20\%$	$5\% \leq x < 10\%$	$x < 5\%$
	HK Einragender Klinker	-	-	alle	-	-
	HM Einragende Dichtmasse	$x \geq 50\%$	$35\% \leq x < 50\%$	$20\% \leq x < 35\%$	$5\% \leq x < 20\%$	$x < 5\%$
	HP Wurzelanwuchs	$x \geq 30\%$	$20\% \leq x < 30\%$	$10\% \leq x < 20\%$	$x < 10\%$	-
	HS Einragende Scherbe	-	alle	-	-	-
	HZ Kreuzende Fremdleitung / Kabel	-	alle	-	-	-
7	Kanalsanierung					
	Kanalsanierung, nicht fachgerecht ausgeführt					
8	Lageabweichung					
d_s : Wandstärke des abgehenden Kanals	KN	Eine Bewertung ist nur in Verbindung mit einer zusätzlichen Beschreibung möglich				
	LB Ausbiegung Unterboden	$x \geq 15\%$ v. ϕ	$x \geq 100\%$ v. d_s	$75\% \leq x < 100\%$ v. d_s	$25\% \leq x < 75\%$ v. d_s	$x < 25\%$ v. d_s
	LH Versatz Horizontalrichtung	$x \geq 15\%$ v. ϕ	$10\text{cm} \leq x < 15\text{cm}$	$5\text{cm} \leq x < 10\text{cm}$	$2\text{cm} \leq x < 5\text{cm}$	$x < 2\text{cm}$
	LL Axialverschiebung	$x \geq 15\%$ v. ϕ	$x \geq 100\%$ v. d_s	$75\% \leq x < 100\%$ v. d_s	$25\% \leq x < 75\%$ v. d_s	$x < 25\%$ v. d_s
9	Risse					
gemessene / geschätzte Breite	RC Riss im Verbindungsbereich	$x > 10\text{mm}$	$5\text{mm} < x < 10\text{mm}$	$2\text{mm} < x < 5\text{mm}$	$0,5\text{mm} < x < 2\text{mm}$	$x < 0,5\text{mm}$
	RL Längsrisse	$x \geq 10\text{mm}$	$5\text{mm} \leq x < 10\text{mm}$	$2\text{mm} \leq x < 5\text{mm}$	$0,5\text{mm} \leq x < 2\text{mm}$	$x < 0,5\text{mm}$
	RQ Querrisse	$x \geq 10\text{mm}$	$5\text{mm} \leq x < 10\text{mm}$	$2\text{mm} \leq x < 5\text{mm}$	$0,5\text{mm} \leq x < 2\text{mm}$	$x < 0,5\text{mm}$
	RS Scherbenbildung		Einzelfallabwägung, zumindest wie übrige Risse			
	RX Risse von einem Punkt ausgehend		Einzelfallabwägung, zumindest wie übrige Risse			

Tabelle 3.4: Abgrenzung der Zustandsklassen für Rohrleitungen (Teil II) [ATV99b]

Zustandsart	Zustands- spezifikation	Sofortmaßnahmen Zustandsklasse 0 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 1 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 2 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 3 Zustands- beschreibung	Zustandsklasse 4 Zustands- beschreibung					
Einordnung aufgrund des Kürzels an der 3. Stelle, wenn nicht der numerische Zusatz eine höhere Klassifizierung erfordert	alle Schäden	M	E, A, B	F							
		Stützen									
		S-D	Stützen verstopft	-	-	-	-				
		SE	Stützen einragend	$35\% \leq x < 50\%$	$20\% \leq x < 35\%$	$5\% \leq x < 20\%$	$x < 20\%$				
		SN	fachgerecht ausgeführt	Eine Bewertung ist nur in Verbindung mit einer zusätzlichen Beschreibung möglich							
		SO	Stützen außen vorsitzend	Einordnung aufgrund der 3. Stelle							
		SP	Wurzeleinwuchs durch den Stützen	$20\% \leq x < 30\%$	$10\% \leq x < 20\%$	$x < 10\%$	-				
		SR	Riss im Stützen	$5\text{mm} \leq x < 10\text{mm}$	$2\text{mm} \leq x < 5\text{mm}$	$0,5\text{mm} \leq x < 2\text{mm}$	$x < 0,5\text{mm}$				
		TK	Fehlender Klinker	Einzelfallabwägung							
		Sichtbare Undichtigkeit		UA	Einordnung aufgrund der 3. Stelle						
UC	Einordnung aufgrund der 3. Stelle										
UW	Einordnung aufgrund der 3. Stelle										
Mechanischer Verschleiß		V-	Mechanischer Verschleiß allgemein	13, 33	12, 22, 32	11, 21					
							VC	Mechanischer Verschleiß an der Rohrverbindung	13, 33	12, 22, 32	11, 21
Sonstiger Schaden		alle	-	-	-	-					

Tabelle 3.5: Abgrenzung der Zustandsklassen für Rohrleitungen (Teil III) [ATV99b]

²11 = Zuschlag sichtbar | 12 = Zuschlag ragt heraus | 13 = Zuschlag ist herausgefallen | 21 = Bewehrung sichtbar, korrodiert | 22 = Bewehrung fehlt teilweise, oder ragt heraus | 32 = Fugenmörtel fehlt teilweise | 33 = Fugenmörtel fehlt ganz

3.2.2 Die „Berliner Methode“

Die „*Berliner Methode*“ ist eine weitere Möglichkeit für eine Schadensklassifikation. Sie unterscheidet sich allerdings nur geringfügig von der Zustandsklassifikation des MERKBLATT ATV-M 149. Ein Nachteil dieser Methode ist allerdings die Notwendigkeit von numerischen Eingaben wie Rissbreiten in Millimeter oder Verwurzelungen in Zentimeter. Da diese Daten aber oft nicht zur Verfügung stehen bietet sich eine Zustandsklassifizierung nach MERKBLATT ATV-M 149 eher an.

Besitzt die Zustandsklassifizierung nach MERKBLATT ATV-M 149 Zustandsklassen von 0 bis 4, so besitzt die Schadensklassifizierung des „*Berliner Modells*“ (siehe Abbildung 3.10 auf Seite 24) die Klassen 1 bis 5. Somit besitzt jede Methode eine fünfstufige Klasseneinteilung.

Der Beispielskanal hatte folgende Zustandskürzel:

- A–L
- RLEO
- A–R
- HPER

Diese werden nun mittels Tabelle 1 von MERKBLATT ATV-M 149 (siehe auch Tabellen 3.3, 3.4 und 3.5 dieser Arbeit) folgenden Zustandsklassen zugeteilt:

- A–L stellt keinen Schaden dar und wird somit auch keiner Zustandsklasse zugeordnet.
- RLEO wird als Riss mit eindringendem Wasser der Zustandsklasse 1 zugeordnet.
- A–R stellt wiederum keinen Schaden dar.
- HPER wird als Wurzeleinwuchs mit eindringendem Wasser ebenfalls der Zustandsklasse 1 zugeordnet.

Mit der Schadensklassifizierung laut „*Berliner Methode*“ ergibt sich folgende Klassifizierung:

- A–L ist kein Schaden.

- RLEO ist aufgrund des eintretenden Wassers eine sichtbare Undichtigkeit und fällt somit in die Schadensklasse 2 oder 1, je nach Stärke des Wassereintritts.
- A–R ist kein Schaden.
- HPER ist ebenfalls aufgrund des eintretenden Wassers in die Schadensklasse 2 oder 1 zu geben.

	Schadensklasse 1 unverzügliche Schadensbehebung	Schadensklasse 2 kurzfristige Schadensbehebung	Schadensklasse 3 mittelfristige Schadensbehebung	Schadensklasse 4 langfristige Schadensbehebung	Schadensklasse 5 Schadensbeseitigung im Rahmen anderer Baumaßnahmen
Rohrbruch Einsturz	Einsturz	fehlende Rohrstücke	-	-	-
Risse (b in mm)	> 5 mm	2-5 mm	0,5-2 mm	0,2-0,5 mm	< 0,2 mm
Sichtbare Undichtigkeiten	fließendes Wasser	feucht, tropfendes Wasser	-	-	-
Versatz der Rohrverbindung im horizontaler Richtung	-	> 2 cm	1 - 2 cm	< 1 cm	-
	-	> 3 cm	2 - 3 cm	1 - 2 cm	< 1 cm
	-	> 4 cm	3 - 4 cm	2 - 3 cm	< 2 cm
	-	> 5 cm	4 - 5 cm	3 - 4 cm	< 3 cm
Verlagerung in % der Profilhöhe	-	> 50 %	25 - 50 %	10 - 25 %	< 10 %
	> 2 cm	1 - 2 cm	0,5 - 1 cm	0,1 - 0,5 cm	< 0,1 cm
Verwurzelung	> 1 cm	0,5 - 1 cm	< 0,5 cm	-	-
	> 50 %	25 - 50 %	10 - 25 %	< 10 %	-
Ablagerungen der Querschnittsfläche	> 50 %	25 - 50 %	10 - 25 %	< 10 %	-
	> 3 cm	1 - 3 cm	< 1 cm	-	-
Verschleiß	Einsturz	fehlende Rohrstücke	allgemeiner Angriff	-	-
Korrosion	-	> 10 %	5 - 10 %	< 5 %	-
Verformung	-	> 10 %	5 - 10 %	< 5 %	-

Abbildung 3.10: Schadensklassen der „Berliner Methode“ [Gru99]

Da die Untersuchungseinheit bei der selektiven Kanalinspektion die Kanalhaltung ist, und in einer Kanalhaltung mehrere Schäden auftreten können, braucht man ein Modell, welches mehrfache Schäden in einer Haltung berücksichtigt. Sawatzki beschreibt 1991 in der Zeitschrift „Korrespondenz Abwasser“ ein solches Bewertungsmodell. [Saw91]

Dieses Modell kann sowohl mit den Schadensklassifizierungen der „Berliner Methode“, als auch mit den Zustandsklassifizierungen lt. MERKBLATT ATV-M 149 verwendet werden. Es sieht eine Gewichtung der Schadensklassen vor, welche in Multiplikation mit einem Bewertungsfaktor des Gefahrenpotentials eine Einteilung des Einzelschadens in verschiedene weitere Zustandsklassen ermöglicht. Die verschiedenen Einzelschäden eines Kanals werden dann miteinander kombiniert und ergeben im Endeffekt eine Zustandsklassifizierung der untersuchten Kanalhaltung.

Zustandsklassen MERKBLATT ATV-M 149	Schadensklassen „Berliner Methode“	Ausmaß des Schadens	Wichtungsfaktoren
Zustandsklasse 0	Schadensklasse 1	Sehr starker Schaden	7,5
Zustandsklasse 1	Schadensklasse 2	Starker Schaden	5
Zustandsklasse 2	Schadensklasse 3	Mittlerer Schaden	3
Zustandsklasse 3	Schadensklasse 4	Leichter Schaden	2
Zustandsklasse 4	Schadensklasse 5	Kaum feststellbarer Schaden	1

Tabelle 3.6: Zustands- und Schadensklassen mit Wichtungsfaktoren [Saw91]

Gefährdungspotential	Bewertungsfaktor
Risse, sichtbarer Boden, Fremdwasserzulauf, herausfallende Scherben und Kanalklinker, fehlendes Mauerwerk, Einsturz	34
Lageabweichungen, Abplatzungen, Korrosion, Fugenauswaschungen, Inkrustierung, Rohrverformung	22
Muffenfehler, Abflusshindernisse	12
Fehler an Abzweigen und Stützen	7

Tabelle 3.7: Bewertungsfaktoren [Saw91]

Die Zustandsbewertung nach Sawatzki erfolgt nun, indem man zu den Zustandspunkten des größten Einzelschadens der Kanalhaltung die Summe der Zustandspunkte der restlichen Schäden dieser Haltung gebrochen durch die Anzahl der Gesamtschäden hinzuzählt.

Sei P_{max} der Wert der Zustandspunkte des größten Einzelschadens der Kanalhaltung. Seien weiters P_1 bis P_n die restlichen Einzelschäden. Wir haben somit $n+1$ verschiedene Einzelschäden. Die Gesamthaltung erhält somit Schadenspunk-

te welche sich nach folgender Formel berechnen:

$$P_{ges} = P_{max} + \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n P_i . \quad (3.1)$$

Im Falle unserer Beispielskanalhaltung würden also die einzelnen Zustandspunkte folgendermaßen aussehen:

- Das Zustandskürzel A–L erhält keinen Wichtungsfaktor und auch keinen Bewertungsfaktor, da es sich hierbei um keinen Schaden handelt.
- Das Zustandskürzel RLEO erhält einen Wichtungsfaktor von 5, da er in die Zustandsklasse 1 fällt (vgl. Tabelle 3.6) und einen Bewertungsfaktor von 34, da es sich um einen Riss handelt (vgl. Tabelle 3.7). Der Schaden erhält somit eine Schadenspunktezahl von $5 \cdot 34 = 170$.
- Das Zustandskürzel A–R verhält sich wie A–L und bekommt keine Schadenspunkte.
- Das Zustandskürzel HPER erhält einen Wichtungsfaktor von 5 (vgl. Tabelle 3.6) und einen Bewertungsfaktor von 34 aufgrund des eintretenden Wassers (vgl. Tabelle 3.7). Somit erhält dieser Schaden eine Schadenspunktezahl von ebenfalls $5 \cdot 34 = 170$.

Die Gesamtpunktezahl für die Beispielskanalhaltung beträgt somit:

$P_{max} = 170$... die maximale Schadenspunktezahl beträgt für diese Kanalhaltung 170.

$n + 1 = 2$... insgesamt gibt es 2 Schäden in dieser Kanalhaltung.

$P_1 = 170$... der andere Schaden hat eine Schadenspunktezahl von 170.

Die Gesamtpunktezahl ergibt dann: $P_{ges} = P_{max} + \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n P_i = 170 + \frac{1}{2} \cdot 170 = 255$.

Somit fällt diese Kanalhaltung in die Zustandsklasse 1 (vgl. Tabelle 3.8) und es bedarf daher einer umgehenden Schadensbeseitigung.

Zustandsklassen	
Zustandsklasse 1: ≥ 255	Umgehende Schadensbeseitigung
Zustandsklasse 2: ≥ 160	Kurzfristige Schadensbeseitigung
Zustandsklasse 3: ≥ 100	Mittelfristige Schadensbeseitigung
Zustandsklasse 4: ≥ 50	Langfristige Schadensbeseitigung
Zustandsklasse 5: > 0	Schadensbeseitigung im Rahmen anderer Baumaßnahmen
Zustandsklasse 6: $= 0$	keine Schäden

Tabelle 3.8: Zustandsklassen nach Sawatzki [Saw91]

Kapitel 4

Statistische Grundlagen

4.1 Statistische Grundlagen bei Schichtung

Das Ziehen einer Stichprobe aus einer Population kann mitunter problembehaftet sein, wenn es in dieser Population heterogene Untergruppen gibt. Genau dies ist beim Problem der Kanalinspektion der Fall. Beispielsweise verhalten sich Kanäle mit verschiedenen Baumaterialien ungleich was auch unterschiedliche Fehlerhäufigkeiten und unterschiedliche Fehlermerkmale impliziert. Kanäle, die in bestimmten Bauperioden gebaut wurden, weisen aufgrund der unterschiedlichen Bauverfahren ebenfalls unterschiedliche Schadensmuster auf. So ist es in diesem Fall sinnvoll, die heterogenen Untergruppierungen des gesamten Kanalnetzes zu identifizieren und zu trennen.

Wird also eine Population in disjunkte Untergruppen zerlegt und in jeder dieser Untergruppen eine Zufallsstichprobe gezogen, so spricht man von einer **geschichteten Stichprobe**.

Definition 1 *Ein **Zufallsexperiment** ist ein Vorgang der wiederholbar ist und dessen Ergebnis nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden kann.*

Definition 2 *Eine **Zufallsvariable (ZV)** ist eine Funktion, die den jeweiligen Ereignissen eines Zufallsexperiments in eindeutiger Weise einen Wert zuordnet.*

Im Falle der Kanalinspektion ist das Zufallsexperiment die Untersuchung einer Kanalhaltung. Die eintretenden Ereignisse sind die jeweiligen Zustände (nicht notwendigerweise Defekte) dieser Kanalhaltung. Die Werte der Zufallsvariablen sind dann die Schadenspunkte (topologische Werte) oder die Einteilungen in verschiedene Zustandsklassen (kardinale Einteilung).

Definition 3 Sei N die Gesamtmenge einer Population und seien N_1, \dots, N_H Teilmengen dieser Population mit $\bigcap_{h=1}^H N_h = \emptyset$ und $\bigcup_{h=1}^H N_h = N$. Die Teilmengen N_h werden als **Schichten** bezeichnet.

4.1.1 Notation der Populations- und Schichtparameter

Definition 4 Seien $|N_h|$ und $|N| = \sum_{h=1}^H |N_h|$ die Anzahl der Elemente (Kanalhaltungen) in der jeweiligen Menge. Folgende Funktionen der Zufallsvariablen sind definiert:

$$X_{hi} \quad \dots \quad \text{der Wert der } i\text{-ten ZV in Schicht } h \quad (4.1)$$

$$X_h = \sum_{i=1}^{|N_h|} X_{hi} \quad \dots \quad \text{Summe der ZV'n in Schicht } h \quad (4.2)$$

$$X = \sum_{h=1}^H X_h = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{|N_h|} X_{hi} \quad \dots \quad \text{Summe der ZV'n der gesamten} \\ \text{Population} \quad (4.3)$$

$$\bar{X}_h = \frac{X_h}{|N_h|} = \frac{1}{|N_h|} \sum_{i=1}^{|N_h|} X_{hi} \quad \dots \quad \text{Mittelwert der ZV'n in Schicht } h \quad (4.4)$$

$$\bar{X} = \frac{X}{|N|} = \frac{1}{|N|} \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{|N_h|} X_{hi} \quad \dots \quad \text{Mittelwert der ZV'n der gesamten} \\ \text{Population} \quad (4.5)$$

$$\sigma_{hx}^2 = \frac{1}{|N_h|} \sum_{i=1}^{|N_h|} (X_{hi} - \bar{X}_h)^2 \quad \dots \quad \text{Varianz der ZV'n in Schicht } h \quad (4.6)$$

$$V_{hx}^2 = \frac{\sigma_{hx}^2}{\bar{X}_h^2} \quad \dots \quad \text{relative Varianz der ZV'n in Schicht } h \\ \text{(Quadrat des Variationskoeffizienten)} \quad (4.7)$$

[LL91]

Die einfachste Form der geschichteten Zufallsstichprobe ist jene, bei der aus jeder Schicht h eine zufällige Stichprobe n_h der Größe $|n_h|$ gezogen wird. Somit ist n_h eine Untermenge von N_h , der Menge der Zufallsvariablen in der Schicht h ($n_h \subseteq N_h$ bzw. $|n_h| \leq |N_h|$).

n_h ist somit eine (zufällige) Stichprobe aus der Menge N_h . Die Schätzer aus einer solchen Stichprobe für die einzelnen Schichten sehen dann wie folgt aus:

Definition 5 Seien $|N_h|$ und $|N|$ wie in Definition 4 und sei weiters n_h eine Stichprobe der Größe $|n_h|$ aus der Menge N_h , dann sind folgende Schätzer definiert:

$$\hat{x}_h = \frac{|N_h|}{|n_h|} \sum_{i=1}^{|n_h|} x_{hi} = |N_h| \bar{x}_h \quad \dots \quad \text{geschätzte Gesamtsumme} \\ \text{in Schicht } h \quad (4.8)$$

$$\hat{x}_{str} = \sum_{h=1}^H \hat{x}_h = \sum_{h=1}^H |N_h| \bar{x}_h \quad \dots \quad \text{geschätzte Gesamtsumme der} \\ \text{Population} \quad (4.9)$$

$$\bar{x}_h = \frac{1}{|n_h|} \sum_{i=1}^{|n_h|} x_{hi} \quad \dots \quad \text{geschätzter Mittelwert in} \\ \text{Schicht } h \quad (4.10)$$

$$\bar{x}_{str} = \frac{\hat{x}_{str}}{|N|} = \frac{1}{|N|} \sum_{h=1}^H |N_h| \bar{x}_h \quad \dots \quad \text{geschätzter Mittelwert der} \\ \text{Population} \quad (4.11)$$

$$s_{hx}^2 = \frac{1}{|n_h| - 1} \sum_{i=1}^{|n_h|} (x_{hj} - \bar{x}_h)^2 \quad \dots \quad \text{geschätzte Varianz der ZV'n} \\ \text{in Schicht } h \quad (4.12)$$

[LL91]

Somit wird \bar{X}_h durch \bar{x}_h geschätzt, X_h durch \hat{x}_h , X durch \hat{x}_{str} und \bar{X} wird durch \bar{x}_{str} geschätzt. Weiters kann gezeigt werden, dass \bar{x}_{str} und \hat{x}_{str} unverzerzte Schätzer sind ($E(\bar{x}_{str}) = \bar{X}$ und $E(\hat{x}_{str}) = X$).

4.1.2 Konfidenzintervalle

Klarerweise gibt es Unterschiede in der Güte der Schätzer in Abhängigkeit von der Stichprobengröße. So ist natürlich ein geschätzter Mittelwert für eine Population mit 1000 Mitgliedern aus einer Stichprobe mit Umfang 10 weniger sicher als ein geschätzter Mittelwert aus einer Stichprobe mit dem Umfang 100. Dies ist klar zu sehen, wenn man die Varianzen der Schätzer betrachtet.

Definition 6 Seien \hat{x}_h und \bar{x}_h sowie \hat{x}_{str} und \bar{x}_{str} wie in Definition 5. Die geschätzten Varianzen dieser Schätzer definieren sich dann wie folgt:

$$\widehat{Var}(\widehat{x}_h) = |N_h|^2 \cdot \frac{|N_h| - |n_h|}{|N_h|} \cdot \frac{s_{hx}^2}{|n_h|} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \widehat{Var}(\bar{x}_h) &= \frac{|N_h| - |n_h|}{|N_h|} \cdot \frac{s_{hx}^2}{|n_h|} = \\ &= \frac{1}{|N_h|^2} \widehat{Var}(\widehat{x}_h) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \widehat{Var}(\widehat{x}_{str}) &= \sum_{h=1}^H \left(|N_h|^2 \cdot \frac{|N_h| - |n_h|}{|N_h|} \cdot \frac{s_{hx}^2}{|n_h|} \right) = \\ &= \sum_{h=1}^H \widehat{Var}(\widehat{x}_h) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \widehat{Var}(\bar{x}_{str}) &= \frac{1}{|N|^2} \sum_{h=1}^H \left(|N_h|^2 \cdot \frac{|N_h| - |n_h|}{|N_h|} \cdot \frac{s_{hx}^2}{|n_h|} \right) = \\ &= \frac{1}{|N|^2} \sum_{h=1}^H \widehat{Var}(\widehat{x}_h) \end{aligned} \quad (4.16)$$

[LL91]

Daraus ist klar zu erkennen, dass die geschätzten Varianzen von \widehat{x}_h , \bar{x}_h , \widehat{x}_{str} und \bar{x}_{str} geringer werden, je größer die jeweiligen $|n_h|$ sind, da diese die einzigen beeinflussbaren Variablen sind. Damit ist es nun möglich Konfidenzintervalle mit Hilfe dieser Schätzer zu berechnen.

Üblicherweise berechnet man ein $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenzintervall mit einem α von 0.05 oder 0.01. Grundsätzlich gilt: je größer α gewählt wird, desto kleiner wird das Konfidenzintervall. Natürlich ist dann auch die Wahrscheinlichkeit, dass der exakte Wert von diesem Konfidenzintervall überdeckt wird ebenfalls geringer.

Bemerkung 1 Seien

$$\begin{aligned} \widehat{SE}(\widehat{x}_h) &= \sqrt{\widehat{Var}(\widehat{x}_h)} \quad , \quad \widehat{SE}(\bar{x}_h) = \sqrt{\widehat{Var}(\bar{x}_h)} \\ \widehat{SE}(\widehat{x}_{str}) &= \sqrt{\widehat{Var}(\widehat{x}_{str})} \quad , \quad \widehat{SE}(\bar{x}_{str}) = \sqrt{\widehat{Var}(\bar{x}_{str})} \end{aligned}$$

dann berechnen sich die jeweiligen $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenzintervalle wie folgt:

$$\widehat{x}_h \pm z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{x}_h) \quad (4.17)$$

$$\bar{x}_h \pm z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\bar{x}_h) = \bar{x}_h \pm z_{1-\alpha/2} \frac{\widehat{SE}(\widehat{x}_h)}{|N_h|} \quad (4.18)$$

$$\widehat{x}_{str} \pm z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{x}_{str}) \quad (4.19)$$

$$\bar{x}_{str} \pm z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\bar{x}_{str}) = \bar{x}_{str} \pm z_{1-\alpha/2} \frac{\widehat{SE}(\widehat{x}_{str})}{|N|} \quad (4.20)$$

wobei $z_{1-\alpha/2}$ das $(1 - \alpha)$ -Quantil der Standardnormalverteilung ist.

($\alpha = 0.05$: $z_{0,975} = 1,96$, $\alpha = 0.01$: $z_{0,995} = 2,576$)

[LL91]

4.1.3 Dichotomiale Anteile

Interessiert man sich nicht für eine topologische Messgröße (in diesem Fall sind das die Schadenspunkte der einzelnen Kanalhaltungen), sondern für eine kardinale Messgröße, zum Beispiel die Zustandsklassen nach Sawatzki (vergleiche Tabelle 3.8), so greifen diese Schätzer nicht mehr. Dem kann insofern Rechnung getragen werden, als dass man von der Idee des Mittelwerts und der Varianz abgeht und proportionale Anteile von Klasseneinteilungen in den jeweiligen Schichten betrachtet. Kann man die Kanalhaltungen in einer Schicht nach ihrem Zustand in 6 verschiedene Klassen einteilen, wobei die Zustandsklasse 6 „keine Schäden“ bedeutet und die Zustandsklasse 1 eine „umgehende Schadensbeseitigung“ erfordert, so ergeben sich für die Schicht und das Gesamtnetz folgende Proportionalitäten: Y_{hi} ist ein Indikator dafür, dass das i -te Element der Schicht h eine gewisse Eigenschaft erfüllt (z.B. in die Schadensklasse 4 fällt). Erfüllt das i -te Element der h -ten Klasse diese Eigenschaft, so wird die Indikatorvariable $Y_{hi} = 1$ gesetzt, ansonsten ist sie 0.

Definition 7 Seien $|N_h|$ und $|N|$ wie in Definition 4. Dann wird der Anteil einer Ausprägung an der Schichtpopulation und der Gesamtpopulation wie folgt definiert:

$$P_{hy} = \frac{1}{|N_h|} \sum_{i=1}^{|N_h|} Y_{hi} \quad \dots \quad \text{prozentualer Anteil der Ausprägung} \\ \text{in Schicht } h \quad (4.21)$$

$$P_y = \frac{1}{|N|} \sum_{h=1}^H |N_h| P_{hy} \quad \dots \quad \text{prozentualer Anteil der Ausprägung} \\ \text{in der gesamten Population} \quad (4.22)$$

Die Formel (4.21) beschreibt den Anteil der Elemente in der Schicht h , die eine vorgegebene Eigenschaft erfüllen. Fielen z.B. in einer Schicht von 1000 Kanalhaltungen 200 in die Zustandsklasse 4, so beträgt der Anteil der Kanäle die sich in der Zustandsklasse 4 befinden $1/5$.

$$P_{hy} = \frac{1}{1000} \sum_1^{1000} Y_{hi} = \frac{1}{1000} \cdot 200 = \frac{1}{5}$$

20% der Schicht h erfüllen also diese vorgegebene Eigenschaft.

Formel (4.22) beschreibt das Äquivalent für die gesamte Population.

Definition 8 Seien $|N|$, $|N_h|$ und $|n_h|$ wie in Definition 4 und in Definition 5. Dann sind die Schätzer der Anteile wie folgt definiert:

$$\hat{p}_{hy} = \frac{1}{|n_h|} \sum_{i=1}^{|n_h|} y_{hi} \quad \dots \quad \text{geschätzter prozentualer Anteil der Ausprägung in Schicht } h \quad (4.23)$$

$$\hat{p}_{y, str} = \frac{1}{|N|} \sum_{h=1}^H |N_h| \hat{p}_{hy} \quad \dots \quad \text{geschätzter prozentualer Anteil der Ausprägung in der gesamten Population} \quad (4.24)$$

Durch (4.23) wird der jeweilige Anteil in der h -ten Schicht geschätzt, durch (4.24) wird der Anteil der Elemente mit einer bestimmten Eigenschaft über die gesamte Population geschätzt.

Da $E(\bar{x}_{str}) = \bar{X}$, $E(\hat{x}_{str}) = X$ und $E(\hat{p}_{y, str}) = P_y$ gilt, folgt, dass die Schätzer aus (4.11), (4.9) und (4.24) unverzerrt sind.

4.1.4 Dichotomiale Anteile innerhalb einer Schicht

Um die weitere Notation ein wenig zu vereinfachen wird in weiterer Folge $|N| \hat{=} N$, $|N_h| \hat{=} N_h$, $|n_h| \hat{=} n_h$ geschrieben.

Wie bereits in (4.23) bemerkt gilt: $\hat{p}_{hy} = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} y_{hi}$. Der Standardfehler dieses Schätzers innerhalb der Schicht ist somit

$$SE(\hat{p}_{hy}) = \sqrt{\frac{P_{hy}(1 - P_{hy})}{n_h} \frac{N_h - n_h}{N_h - 1}}. \quad (4.25)$$

Da jedoch P_{hy} nicht bekannt ist, sondern nur durch \widehat{p}_{hy} geschätzt werden, kann ergibt sich folgender Schätzer für den Standardfehler:

$$\widehat{SE}(\widehat{p}_{hy}) = \sqrt{\frac{\widehat{p}_{hy}(1-\widehat{p}_{hy})}{n_h-1} \frac{N_h-n_h}{N_h}}. \quad (4.26)$$

Als approximatives $(1-\alpha)\%$ -Konfidenzintervall für den tatsächlichen Anteil der Elemente innerhalb der Schicht h , die eine bestimmte Eigenschaft erfüllen, ergibt sich somit:

$$\widehat{p}_{hy} \pm z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{p}_{hy}) \quad (4.27)$$

wobei $z_{1-\alpha/2}$ das entsprechende Quantil der Standardnormalverteilung ist.

Offensichtlich gilt, dass das Konfidenzintervall kleiner wird, je größer die Stichprobe ist. Um eine vorgegebene Spannweite $\epsilon = 2 \cdot z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{p}_{hy})$ eines Konfidenzintervalls einzuhalten kann in diesem Fall die notwendige Stichprobengröße n_h berechnet werden aus der Formel

$$n_h \geq \frac{z_{1-\alpha/2}^2 \cdot N_h \cdot P_{hy} \cdot (1-P_{hy})}{(N_h-1) \cdot \epsilon^2 \cdot P_{hy}^2 + z_{1-\alpha/2}^2 \cdot P_{hy} \cdot (1-P_{hy})}. \quad (4.28)$$

Da vor dem Ziehen der Stichprobe P_{hy} nicht bekannt ist, muss dieses entweder von Experten geschätzt werden, oder man hat bereits Vorerhebungen gemacht aus denen man einen plausiblen Wert ablesen kann.

Diese Abschätzung sichert somit ein $(1-\alpha)\%$ -Konfidenzintervall um \widehat{p}_{hy} mit einer maximalen Spannweite von ϵ .

4.1.5 Erwartungswerte und Varianzen über die gesamte Population

Werden die dichotomalen Anteile innerhalb der einzelnen Schichten per Stichprobe erhoben, so kann man aus den Schichten auf die dichotomalen Anteile der gesamten Population schließen.

$$\begin{aligned} E(\widehat{p}_{y,str}) &= E\left(\frac{1}{N} \sum_{h=1}^H N_h \widehat{p}_{hy}\right) = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H N_h E(\widehat{p}_{hy}) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H N_h P_{hy} = P_y, \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$SE(\widehat{p}_{y,str}) = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H N_h^2 \left[\frac{P_{hy}(1-P_{hy})}{n_h} \right] \left(\frac{N_h-n_h}{N_h-1} \right)}. \quad (4.30)$$

Da jedoch P_{hy} nicht bekannt ist, sondern durch \hat{p}_{hy} geschätzt wird, kann $SE(\hat{p}_{y,str})$ wiederum nur durch $\widehat{SE}(\hat{p}_{y,str})$ geschätzt werden:

$$\widehat{SE}(\hat{p}_{y,str}) = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H N_h^2 \left[\frac{\hat{p}_{hy}(1 - \hat{p}_{hy})}{n_h - 1} \right] \left(\frac{N_h - n_h}{N_h} \right)}. \quad (4.31)$$

Somit kann wiederum ein $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenzintervall angegeben werden, diesmal für $\hat{p}_{y,str}$, nämlich:

$$\hat{p}_{y,str} \pm z_{1-\alpha/2} \cdot \widehat{SE}(\hat{p}_{y,str}) . \quad (4.32)$$

4.1.6 Einführung zweier Pseudobeobachtungen

Ein Problem bei diesen Berechnungen ergibt sich dann, wenn der tatsächliche prozentuale Anteil einer Eigenschaft in der Schicht sehr gering ist. So ist es leicht möglich, dass in der gezogenen Stichprobe kein Vertreter dieser Menge gezogen wird. Den Berechnungen zufolge ist dann der geschätzte prozentuale Anteil in der Schicht gleich 0 und es kann kein $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenzintervall bestimmt werden. Dem wird so begegnet, dass 4 Pseudobeobachtungen vorausgesetzt werden, von denen 2 erfolgreich sind (die gefragte Eigenschaft erfüllen) und 2 nicht erfolgreich sind (die gefragte Eigenschaft nicht erfüllen). Diese Idee stammt von Alan Agresti und Brian Caffo und wurde im Jahr 2000 im Journal „The American Statistician“ publiziert [AC00].

Definition 9 Sei \hat{p}_{hy} definiert wie in Definition 8. Dann wird der Anteilsschätzer nach Agresti und Caffo [AC00] wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{hy} &= \frac{|n_h| \cdot \hat{p}_{hy} + 2}{|n_h| + 4} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{|n_h|} y_i + 2}{|n_h| + 4} . \end{aligned} \quad (4.33)$$

Durch die 4 Pseudobeobachtungen bekommen auch jene Ausprägungen einen Wert > 0 , die in der Stichprobe nicht vorkommen. Dieser Wert wird sich aber, je nach Größe der tatsächlich durchgeführten Stichprobe, in der Nähe von 0 befinden. Der Vorteil dieser Methode besteht nun darin, dass es auch möglich ist, für solche Ausprägungen ein $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenzintervall zu bestimmen.

Bemerkung 2 Sei $\tilde{n}_h = |n_h| + 4$ und sei $\tilde{N}_h = |N_h| + 4$. Dann ist die Varianz von \tilde{p}_{hy} definiert durch:

$$\begin{aligned}\widehat{Var}(\tilde{p}_{hy}) &= \frac{\tilde{p}_{hy}(1 - \tilde{p}_{hy})}{(|n_h| + 4) - 1} \frac{(|N_h| + 4) - (|n_h| + 4)}{|N_h| + 4} \\ &= \frac{\tilde{p}_{hy}(1 - \tilde{p}_{hy})}{\tilde{n}_h - 1} \frac{(\tilde{N}_h) - (\tilde{n}_h)}{\tilde{N}_h} .\end{aligned}\quad (4.34)$$

Sei wiederum $\widehat{SE}(\tilde{p}_{hy}) = \sqrt{\widehat{Var}(\tilde{p}_{hy})}$, so folgt als $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenzintervall für \tilde{p}_{hy} :

$$\tilde{p}_{hy} \pm z_{1-\alpha/2} \cdot \widehat{SE}(\tilde{p}_{hy}) . \quad (4.35)$$

Dies verbessert das Konfidenzintervall (4.32).

4.2 Stichprobengröße

Bei der Festlegung der nötigen Stichprobengröße je Schicht bieten sich zwei verschiedene Vorgehensweisen an. Die eine Methode ist die der **proportionalen Aufteilung**, die andere Methode ist jene der minimalen Stichprobengröße, um innerhalb einer Schicht eine **bestimmte Genauigkeit** zu erreichen.

4.2.1 Methode der proportionalen Aufteilung

Wenn man mit der Stichprobe erreichen will, dass man eine kleinere Abbildung der gesamten Population erhält, so bietet sich die **Methode der proportionalen Aufteilung** der Gesamtstichprobenanzahl an. Wie der Name dieser Methode bereits impliziert, ist die Stichprobengröße aus jeder Schicht proportional zur Gesamtgröße dieser Schicht. Die Wahrscheinlichkeit der Auswahl eines bestimmten Mitglieds der Population einer Schicht ist in jeder Schicht gleich, nämlich $\pi_{hj} = n_h/N_h = n/N$.

Die Abschätzung der notwendigen Stichprobengröße in (4.28) kann ausgeweitet werden auf die notwendige Stichprobengröße für die gesamte Population. Bei einer proportionalen Aufteilung würde sich das resultierende n für die Gesamtstichprobe nach den jeweiligen Schichtgrößen N_h aufteilen.

Wie bei (4.28) wird wiederum vorausgesetzt, dass man ein $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenz-

intervall erreichen will, das eine maximale Spannweite von $\epsilon\%$ nicht übersteigt.

$$n \approx \frac{\left(\frac{z_{1-\alpha/2}^2}{N^2}\right) \left(\sum_{h=1}^H \frac{N^2 P_{hy}(1-P_{hy})}{\pi_h P_y^2}\right)}{\epsilon^2 + \left(\frac{z_{1-\alpha/2}^2}{N^2}\right) \left(\sum_{h=1}^H \frac{N_h P_{hy}(1-P_{hy})}{P_y^2}\right)}. \quad (4.36)$$

In (4.36) gilt:

$$\pi_h = \frac{n_h}{n}.$$

Die Abschätzung in (4.36) ist sehr allgemein gehalten. (4.36) lässt sich unter der Annahme der proportionalen Aufteilung der Gesamtstichprobe auf die Schichten vereinfachen zu

$$n \approx \frac{\left(\frac{z_{1-\alpha/2}^2}{N}\right) \left(\sum_{h=1}^H \frac{N_h P_{hy}(1-P_{hy})}{P_y^2}\right)}{\epsilon^2 + \left(\frac{z_{1-\alpha/2}^2}{N^2}\right) \left(\sum_{h=1}^H \frac{N_h P_{hy}(1-P_{hy})}{P_y^2}\right)}. \quad (4.37)$$

Da jedoch P_{hy} nicht bekannt ist, wird der Ausdruck $P_{hy} \cdot (1 - P_{hy})$ durch sein Maximum $0.5^2 = 0.25$ ersetzt. Daraus ergibt sich dann folgende Formel:

$$n \geq \frac{0.25 \cdot \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{P_y^2}}{\epsilon^2 + 0.25 \cdot \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{N \cdot P_y^2}}. \quad (4.38)$$

P_y wird hier durch grobe Schätzungen oder Erfahrungswerte ersetzt.

4.2.2 Methode der minimalen Stichprobengröße für eine bestimmte Genauigkeit innerhalb einer Schicht

Wie in (4.28) bereits gezeigt, kann eine notwendige Stichprobengröße für ein festgelegtes maximales Konfidenzintervall innerhalb einer Schicht leicht berechnet werden. Daraus ergibt sich für jede Schicht eine minimale Stichprobengröße. Mit (4.24) wird $\hat{p}_{y, str}$ berechnet, ein $(1 - \alpha)\%$ -Konfidenzintervall kann dann mit (4.31) und (4.32) berechnet werden.

Kapitel 5

Das Grazer Kanalnetz

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem historischen Aufbau des Kanalnetzes der Stadt Graz und soll dabei einen Überblick über die Auf- und Ausbaugeschichte geben. Damit sollte in weiterer Folge die Struktur der verfügbaren Daten besser verstanden werden können.

Weiters werden die vorhandenen Daten vorgestellt und einer ersten explorativen Analyse unterzogen. Nachdem eine Schichtenbildung vorgeschlagen wird, werden Auswertungen auf Basis dieser Schichtenbildung durchgeführt und auf Basis der bereits untersuchten Kanalhaltungen wird ein fortführender Inspektionsplan vorgeschlagen.

5.1 Aufbau des Grazer Kanalnetzes

Das Kanalnetz der Stadt Graz geht in seiner Entwicklung auf die Regenwasserkanäle innerhalb der Grazer Befestigungsanlagen zurück. Diese Regenwasserkanäle wurden ab dem Jahr 1926 zu Mischwasserkanälen um- und ausgebaut und zu einem Netz verbunden [Spr06], [Fär01].

In den darauf folgenden Jahren wurde die Vollkanalisierung der Stadt in Angriff genommen. Natürlich wurden in dieser Zeit auch Sanierungen durchgeführt. Jedoch bedeutete damals und auch heute eine Sanierung einer Kanalhaltung immer den vollständigen Neubau derselben. Das Kanalnetz der Stadt Graz umfasst derzeit 814 Kilometer mit 23620 Haltungen. Die Hauptmaterialien, die verwendet wurden, sind vor allem Beton und Steinzeug.

Aufgrund des massiven Aufbaus des Kanalnetzes über verschiedene Bauperioden hinweg ergibt sich heute ein äußerst heterogenes Gemisch an Materialien

und Bauarten der Kanalhaltungen. Daher erscheint hier eine Schichtenbildung besonders sinnvoll.



Abbildung 5.1: Das Grazer Kanalnetz

5.2 Vorliegende Datenqualität und Schichtenbildung

Das vom Kanalbauamt der Stadt Graz zur Verfügung gestellte Microsoft Access Datenfile beinhaltet eine Aufstellung der elektronisch verfügbaren Gesamtnetzdaten des Grazer Kanalnetzes. Diese enthält Informationen bezüglich

- der Haltungsnummer der Kanalhaltung,
- des Materials der Kanalhaltung,
- der Altersgruppe (Bauperiode) welcher die Kanalhaltung angehört,
- der Länge der Kanalhaltung,
- der Höhe und die Breite der Kanalhaltung,
- des kodierten Profiltyps der Kanalhaltung und
- der Seehöhe der Sole und des darüberliegenden Geländes der Kanalhaltung an deren Anfang und Ende.

Haltung	Material	Länge	Hoch	Breit	Profiltyp	Altersgruppe	HSO	HSU	HGO	HGU
1640001	GGG	53,02	0,2	0,2	1	84-04	504,35	500,73	508,54	503,28
1640002	GGG	20,68	0,2	0,2	1	84-04	500,7	496,98	503,28	499,38
1640004	GGG	25,15	0,2	0,2	1	84-04	496,54	495,1	498,5	497,46
1640005	GGG	28,2	0,2	0,2	1	84-04	495,07	494,69	497,46	498,17
1640006	GGG	34,35	0,2	0,2	1	84-04	494,65	492,19	498,17	494,34
1650002	G	34,8	0,2	0,2	01	84-04	455,99		458,62	
1650003	G	30,97	0,2	0,2	01		454,42	452,68	456,76	455,04
1650004	G	29,73	0,2	0,2	01		452,68	451,48	455,04	453,62
1650005	G	29,53	0,2	0,2	01	84-04	451,48	450,31	453,62	452,57
1650006	G	29,32	0,2	0,2	01	84-04	450,31	449,28	452,57	451,52

Abbildung 5.2: Auszug aus den Gesamtnetzdaten

Die Gesamtnetzdaten umfassen 23620 Kanalhaltungen mit einer Gesamtlänge von 805 Kilometern. Daraus ist abzuleiten, dass einige der neuesten Kanäle in dieser Datensammlung noch nicht enthalten sind. Dies ist für unsere Betrachtung allerdings kein sonderliches Problem, da davon ausgegangen werden kann, dass neu gebaute Kanäle noch keine Schäden haben und daher auch nicht relevant für eine Gesamtbeschreibung des Kanalnetzes sind.

Nach Absprache mit Herrn DI Sprung vom Kanalbauamt der Stadt Graz wurde entschieden, dass für eine Schichtung die Merkmale *Material* und *Altersgruppe* relevant sein sollten. Eine feinere Schichtung kam aufgrund einer sehr schwachen Belegung mehrerer Schichten nicht in Frage.

Wie in Abbildung 5.2 bereits erkennbar, ist in der Tabelle der Gesamtnetzdaten nicht jeder Haltungsnummer eine Altersgruppe zugeordnet. Ebenso verhält es sich mit den Materialien. Es wurde festgestellt, dass 2637 Haltungen keine Altersgruppe zugeordnet wurde, und weiteren 1886 Haltungen wurde kein Material zugeordnet. Weiters gibt es 777 Kanalhaltungen, denen weder eine Altersgruppe noch Material zugeordnet wurden. Somit werden lediglich 18320 Kanalhaltungen als Grundgesamtheit für diverse Auswertungen verwendet. Das sind in etwa 78% der Gesamtnetzdaten.

Eine weitere Einschränkung in der Datenqualität sind die relativ langen Zeiträume von Bauperioden. So gibt es nur eine sehr grobe Zuweisung der Kanalhaltungen in folgende **5 Bauperioden**:

- 00-14: 1900 bis 1914 (14 Jahre, vor dem 1. Weltkrieg)
- 14-44: 1914 bis 1944 (30 Jahre, Anfang 1. Weltkrieg bis Ende 2. Weltkrieg)
- 44-64: 1944 bis 1964 (20 Jahre, Nachkriegszeit)
- 64-84: 1964 bis 1984 (20 Jahre)
- 84-04: 1984 bis 2004 (20 Jahre)

Weiters weist die Tabelle der Gesamtnetzdaten folgende **11 Materialtypen** aus:

- Asbestzement
- Beton
- Faserzement
- Guss
- glasfaserverstärkte Kunststoffrohre
- duktiler Guss
- Polypropylen
- PVC

- Stein (gemauert)
- Steinzeug
- Ziegel (gemauert)

Daraus ergibt sich eine Kreuztabelle in der bereits erkennbar wird, welche Art von Schichtenbildung hier sinnvoll sein wird (siehe Tabelle 5.3).

5.2.1 Schichtenbildung

Nachdem es offensichtlich auch Zellen gibt, die nicht besetzt sind, und sich einige Materialien ähnlich verhalten, wurden gemeinsam mit dem Kanalbauamt der Stadt Graz einige Zusammenlegungen von Materialtypen durchgeführt.

Es wurde festgelegt, die Materialien *Asbestzement* und *Faserzement* unter dem Namen *Faserzementrohre* zusammenzufassen, da diese beiden Materialien annähernd gleiche Eigenschaften besitzen.

Weiters ist klar zu erkennen, dass ein Großteil der Grazer Kanalhaltungen aus dem Material *Beton* gefertigt wurde. Dieser Werkstoff wurde auch über alle Bauperioden hindurch eingesetzt. Daher wird diese Materialgruppe in 5 Schichten unterteilt.

Guss wurde als Material hauptsächlich in der jüngsten Bauperiode 84-04 eingesetzt. Nur 3 der Kanäle aus dem Material *Guss* wurden in einer früheren Bauperiode gebaut. Daher ist es hier nicht sinnvoll eine Aufgliederung in die Bauperioden vorzunehmen, sondern lediglich den Materialtyp *Guss* als eine Schicht zu betrachten.

Genauso wie das Material *Guss* wurden auch *glasfaserverstärkte Kunststoffrohre* bis auf 6 Haltungen nur in der jüngsten Bauperiode 84-04 gebaut. Somit werden die *glasfaserverstärkten Kunststoffrohre* als eigene Schicht betrachtet.

Selbiges gilt auch für das Material *duktiler Guss*.

Das Material *Polypropylen* welches mit 87 Haltungen versehen ist, wurde aus der Schichtenbildung ausgeschlossen, da diese 87 Kanalhaltungen bereits untersucht wurden und somit in einem Inspektionsplan keine Aufnahme mehr finden müssen.

Das Material *PVC* enthält lediglich 40 Kanalhaltungen und wird aufgrund der geringen Anzahl einer Gesamtuntersuchung unterzogen.

Material * Altersgruppe Kreuztabelle

			Altersgruppe					Gesamt
			00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	
Material	Asbestzement	Anzahl	5	48	9	204	679	945
		% von Material	0,5%	5,1%	1,0%	21,6%	71,9%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,4%	2,9%	0,8%	3,6%	7,9%	5,2%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,3%	0,0%	1,1%	3,7%	5,2%
	Beton	Anzahl	1.016	947	617	2.567	1.233	6.380
		% von Material	15,9%	14,8%	9,7%	40,2%	19,3%	100,0%
		% von Altersgruppe	74,3%	56,4%	57,2%	45,9%	14,3%	34,8%
		% der Gesamtzahl	5,5%	5,2%	3,4%	14,0%	6,7%	34,8%
	Faserzement	Anzahl	0	0	0	7	368	375
		% von Material	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	98,1%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	4,3%	2,0%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	2,0%
	Guss	Anzahl	0	1	0	2	435	438
		% von Material	0,0%	0,2%	0,0%	0,5%	99,3%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	5,1%	2,4%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,4%	2,4%
	glasfaservertärkte Kunststoffrohre	Anzahl	0	0	0	6	963	969
		% von Material	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%	99,4%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	11,2%	5,3%
% der Gesamtzahl		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	5,3%	
duktiler Guss	Anzahl	0	4	0	7	3.024	3.035	
	% von Material	0,0%	0,1%	0,0%	0,2%	99,6%	100,0%	
	% von Altersgruppe	0,0%	0,2%	0,0%	0,1%	35,1%	16,6%	
	% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	16,5%	16,6%	
Polypropylen	Anzahl	0	0	0	0	87	87	
	% von Material	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	
	% von Altersgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	0,5%	
	% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,5%	
PVC	Anzahl	0	0	1	39	0	40	
	% von Material	0,0%	0,0%	2,5%	97,5%	0,0%	100,0%	
	% von Altersgruppe	0,0%	0,0%	0,1%	0,7%	0,0%	0,2%	
	% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,2%	
Stein (gemauert)	Anzahl	4	3	5	0	0	12	
	% von Material	33,3%	25,0%	41,7%	0,0%	0,0%	100,0%	
	% von Altersgruppe	0,3%	0,2%	0,5%	0,0%	0,0%	0,1%	
	% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	
Steinzeug	Anzahl	308	657	431	2.760	1.815	5.971	
	% von Material	5,2%	11,0%	7,2%	46,2%	30,4%	100,0%	
	% von Altersgruppe	22,5%	39,2%	39,9%	49,4%	21,1%	32,6%	
	% der Gesamtzahl	1,7%	3,6%	2,4%	15,1%	9,9%	32,6%	
Ziegel (gemauert)	Anzahl	34	18	16	0	0	68	
	% von Material	50,0%	26,5%	23,5%	0,0%	0,0%	100,0%	
	% von Altersgruppe	2,5%	1,1%	1,5%	0,0%	0,0%	0,4%	
	% der Gesamtzahl	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,4%	
Gesamt	Anzahl	1.367	1.678	1.079	5.592	8.604	18.320	
	% von Material	7,5%	9,2%	5,9%	30,5%	47,0%	100,0%	
	% von Altersgruppe	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% der Gesamtzahl	7,5%	9,2%	5,9%	30,5%	47,0%	100,0%	

Abbildung 5.3: 11 × 5-Kreuztabelle *Material-Altersgruppe* der 18320 Haltungen aus den Gesamtnetzdaten

Stein (gemauert) und *Ziegel (gemauert)* werden zusammgelegt und erhalten die gemeinsame Materialgruppe *Mauerwerk*. Diese Materialgruppe bildet somit eine eigene Schicht.

Schlussendlich bleibt noch das Material *Steinzeug*, welches offensichtlich nach dem Material *Beton* das zweithäufigste Material ist, und sich über alle Bauperioden erstreckt. Hier bietet sich eine Schichtung in alle 5 Altersgruppen an.

Somit ergibt sich aus den Gesamtnetzdaten, nach Herausnahme der Materialien *Polypropylen* und *PVC* sowie der Zusammenlegung von *Asbestzement* und *Faserzement* zu *Faserzementrohre* und *Stein (gemauert)* und *Ziegel (gemauert)* zu *Mauerwerk* folgende 7×5 -Kreuztabelle (siehe Abbildung 5.4).

Materialgruppe * Altersgruppe Kreuztabelle			Altersgruppe					Gesamt
			00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	
Materialgruppe	Beton	Anzahl	1.016	947	617	2.567	1.233	6.380
		% von Materialgruppe	15,9%	14,8%	9,7%	40,2%	19,3%	100,0%
		% von Altersgruppe	74,3%	56,4%	57,2%	46,2%	14,5%	35,1%
		% der Gesamtzahl	5,6%	5,2%	3,4%	14,1%	6,8%	35,1%
	duktiler Guss	Anzahl	0	4	0	7	3.024	3.035
		% von Materialgruppe	0,0%	0,1%	0,0%	0,2%	99,6%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	0,2%	0,0%	0,1%	35,5%	16,7%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	16,6%	16,7%
	Faserzementrohre	Anzahl	5	48	9	211	1.047	1.320
		% von Materialgruppe	0,4%	3,6%	0,7%	16,0%	79,3%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,4%	2,9%	0,8%	3,8%	12,3%	7,3%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,3%	0,0%	1,2%	5,8%	7,3%
	glasfaserverstärkte Kunststoffrohre	Anzahl	0	0	0	6	963	969
		% von Materialgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%	99,4%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	11,3%	5,3%
% der Gesamtzahl		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,3%	5,3%	
Gussrohre	Anzahl	0	1	0	2	435	438	
	% von Materialgruppe	0,0%	0,2%	0,0%	0,5%	99,3%	100,0%	
	% von Altersgruppe	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	5,1%	2,4%	
	% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,4%	2,4%	
Mauerwerk	Anzahl	38	21	21	0	0	80	
	% von Materialgruppe	47,5%	26,3%	26,3%	0,0%	0,0%	100,0%	
	% von Altersgruppe	2,8%	1,3%	1,9%	0,0%	0,0%	0,4%	
	% der Gesamtzahl	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,4%	
Steinzeugrohre	Anzahl	308	657	431	2.760	1.815	5.971	
	% von Materialgruppe	5,2%	11,0%	7,2%	46,2%	30,4%	100,0%	
	% von Altersgruppe	22,5%	39,2%	40,0%	49,7%	21,3%	32,8%	
	% der Gesamtzahl	1,7%	3,6%	2,4%	15,2%	10,0%	32,8%	
Gesamt	Anzahl	1.367	1.678	1.078	5.553	8.517	18.193	
	% von Materialgruppe	7,5%	9,2%	5,9%	30,5%	46,8%	100,0%	
	% von Altersgruppe	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% der Gesamtzahl	7,5%	9,2%	5,9%	30,5%	46,8%	100,0%	

Abbildung 5.4: 7×5 -Kreuztabelle *Materialgruppe-Altersgruppe* der endgültigen 18193 Haltungen aus den Gesamtnetzdaten, 15 Schichten

In Abbildung 5.4 ist die Schichtung deutlich hervorgehoben. Die 5 Materialgruppen *duktiler Guss*, *Faserzementrohre*, *glasfaserverstärkte Kunststoffrohre*, *Gussrohre* und *Mauerwerk* sind jeweils als eine eigene Schicht zusammengefasst. Die Kanalhaltungen aus den beiden Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre* sind jeweils nach den 5 Altersgruppen geschichtet. Somit ergeben sich aus den $7 \times 5 = 35$ möglichen Schichten, 15 Schichten, auf die ein Stichprobenplan angewendet werden kann.

Schichtung:

1. Beton, 00-14
2. Beton, 14-44
3. Beton, 44-64
4. Beton, 64-84
5. Beton, 84-04
6. duktiler Guss, Gesamt
7. Faserzementrohre, Gesamt
8. glasfaserverstärkte Kunststoffrohre, Gesamt
9. Gussrohre, Gesamt
10. Mauerwerk, Gesamt
11. Steinzeugrohre, 00-14
12. Steinzeugrohre, 14-44
13. Steinzeugrohre, 44-64
14. Steinzeugrohre, 64-84
15. Steinzeugrohre, 84-04

5.2.2 Stichprobenplan

Das Kanalbauamt der Stadt Graz geht von einer Inspektionskapazität von 40 km/Jahr aus. Diese Inspektionskapazität beinhaltet auch die Endinspektion von baulich sanierten und neu gebauten Kanalhaltungen welche mit etwa 8 km/Jahr veranschlagt werden, was eine effektive Inspektionskapazität für eine geschichtete Erstinspektion von 32 km/Jahr bedeutet. Bei einer durchschnittlichen Länge der Kanalhaltungen von etwa 34 m können pro Jahr zwischen 900 und 950 Kanalhaltungen inspiziert werden. Ausgehend von einem Gesamtnetzumfang von 18193 Kanalhaltungen entspricht das einem Inspektionsumfang von etwa 5% des Gesamtnetzes pro Jahr. Aufgrund dieser Eckdaten kann innerhalb von 3 Jahren eine Erstinspektion von 12-15% des Gesamtnetzes erfolgen, was einem Umfang von ca. 2800 Kanalhaltungen entspricht.

Aufgrund obiger Überlegungen wird also der Inspektionsumfang für eine Erstinspektion auf 2800 Kanalhaltungen festgesetzt. Bei einer proportionalen Aufteilung dieser 2800 Kanalhaltungen auf die einzelnen Schichten, ergibt sich ein Inspektionsplan wie er in Tabelle 5.1 zu sehen ist. Die Anzahl der zu untersuchenden Kanalhaltungen je Schicht berechnet sich nach der Formel $n_h = N_h \cdot n/N$, wobei gilt:

- n_h ist die Anzahl der in der Schicht h zu untersuchenden Kanäle
- N_h ist die Anzahl der Kanalhaltungen in Schicht h
- n ist die Größe der gesamten Stichprobe (2800)
- N ist die Größe der Grundmenge (18193)

Aufgrund der in Tabelle 5.1 auf Seite 46 errechneten Stichprobengrößen lassen sich auch sofort Konfidenzintervalle für die dichotomalen Anteile berechnen. Hierbei werden die Formeln (4.23), und (4.26), sowie (4.27) verwendet:

$$\begin{aligned}\widehat{p}_{hy} &= \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} y_{hi} \ , \\ \widehat{SE}(\widehat{p}_{hy}) &= \sqrt{\frac{\widehat{p}_{hy}(1-\widehat{p}_{hy})}{n_h-1} \frac{N_h-n_h}{N_h}} \ , \\ \widehat{p}_{hy} &\pm z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{p}_{hy}) \ .\end{aligned}$$

Daraus ist zu erkennen, dass das Konfidenzintervall eine Spannweite von $SW = 2 \cdot z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{p}_{hy})$ besitzt und für $\widehat{p}_{hy} = 0,5$ maximal ist (siehe auch Tabelle 5.2).

Man erkennt sehr schön die längeren Konfidenzintervalle bei Schichten die weniger Kanalhaltungen beinhalten. Das fällt besonders bei den Schichten (*Gussrohre, Gesamt*), (*Mauerwer, Gesamt*), (*Steinzeugrohre, 00-14*) sowie (*Steinzeugrohre, 44-64*) auf.

Mit der Formel $\widehat{p}_{y, str}$ für den Schätzer aus (4.24) und der Formel für $\widehat{SE}(\widehat{p}_{y, str})$ kann einfach eine maximale Spannweite des Konfidenzintervalls für den dichotomalen Anteil einer Schadensklasse für das gesamte Kanalnetz angegeben werden. Die Formel (4.24) vereinfacht sich bei einer proportionalen Aufteilung der Gesamtstichprobenzahl auf die einzelnen Schichten zu

$$\widehat{p}_{y, str} = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{n_h} y_{h,i} \tag{5.1}$$

	Schicht	Kanalhaltungen in der Schicht	zu untersuchende Kanalhaltungen
1	Beton, 00-14	1016	156
2	Beton, 14-44	947	146
3	Beton, 44-64	617	95
4	Beton, 64-84	2567	395
5	Beton, 84-04	1233	190
6	duktiler Guss-Rohre, Gesamt	3035	467
7	Faserzementrohre, Gesamt	1320	203
8	glasfaserverstärkte Kunststoffrohre, Gesamt	969	149
9	Gussrohre, Gesamt	438	67
10	Mauerwerk, Gesamt	80	13
11	Steinzeugrohre, 00-14	308	48
12	Steinzeugrohre, 14-44	657	101
13	Steinzeugrohre, 44-64	431	66
14	Steinzeugrohre, 64-84	2760	425
15	Steinzeugrohre, 84-04	1815	279
	Gesamt	18139	2800

der Größe nach geordnet:

6	duktiler Guss-Rohre, Gesamt	3035	467
14	Steinzeugrohre, 64-84	2760	425
4	Beton, 64-84	2567	395
15	Steinzeugrohre, 84-04	1815	279
7	Faserzementrohre, Gesamt	1320	203
5	Beton, 84-04	1233	190
1	Beton, 00-14	1016	156
8	glasfaserverstärkte Kunststoffrohre, Gesamt	969	149
2	Beton, 14-44	947	146
12	Steinzeugrohre, 14-44	657	101
3	Beton, 44-64	617	95
9	Gussrohre, Gesamt	438	67
13	Steinzeugrohre, 44-64	431	66
11	Steinzeugrohre, 00-14	308	48
10	Mauerwerk, Gesamt	80	13
	Gesamt	18139	2800

Tabelle 5.1: Erstinspektionsplan auf Basis von 2800 zu inspizierenden Kanalhaltungen

	Schicht	$2 \cdot z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{p}_{hy})$	
		$z_{1-0,90/2} = 1,645$	$z_{1-0,95/2} = 1,960$
1	Beton, 00-14	12,16%	14,48%
2	Beton, 14-44	12,56%	14,97%
3	Beton, 44-64	15,61%	18,59%
4	Beton, 64-84	7,62%	9,08%
5	Beton, 84-04	11,01%	13,11%
6	duktiler Guss-Rohre, Gesamt	7,01%	8,35%
7	Faserzementrohre, Gesamt	10,65%	12,67%
8	glasfaserverstärkte Kunststoffrohre, Gesamt	12,44%	14,82%
9	Gussrohre, Gesamt	18,64%	22,20%
10	Mauerwerk, Gesamt	43,46%	51,78%
11	Steinzeugrohre, 00-14	22,05%	26,27%
12	Steinzeugrohre, 14-44	15,13%	18,03%
13	Steinzeugrohre, 44-64	18,78%	22,37%
14	Steinzeugrohre, 64-84	7,35%	8,76%
15	Steinzeugrohre, 84-04	9,08%	10,81%

der Größe nach geordnet:

6	duktiler Guss-Rohre, Gesamt	7,01%	8,35%
14	Steinzeugrohre, 64-84	7,35%	8,76%
4	Beton, 64-84	7,62%	9,08%
15	Steinzeugrohre, 84-04	9,08%	10,81%
7	Faserzementrohre, Gesamt	10,65%	12,67%
5	Beton, 84-04	11,01%	13,11%
1	Beton, 00-14	12,16%	14,48%
8	glasfaserverstärkte Kunststoffrohre, Gesamt	12,44%	14,82%
2	Beton, 14-44	12,56%	14,97%
12	Steinzeugrohre, 14-44	15,13%	18,03%
3	Beton, 44-64	15,61%	18,59%
9	Gussrohre, Gesamt	18,64%	22,20%
13	Steinzeugrohre, 44-64	18,78%	22,37%
11	Steinzeugrohre, 00-14	22,05%	26,27%
10	Mauerwerk, Gesamt	43,46%	51,78%
	Gesamt	2,86%	3,41%

Tabelle 5.2: Maximale Spannweiten der Konfidenzintervalle innerhalb der Schichten bei einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 90% bzw. 95%

und die Formel (4.31) vereinfacht sich zu

$$\widehat{SE}(\widehat{p}_{y, str}) = \sqrt{\left(\frac{N-n}{N^2}\right) \sum_{h=1}^H N_h \cdot \left(\frac{\widehat{p}_{y, str}(1-\widehat{p}_{y, str})}{n-1}\right)}. \quad (5.2)$$

(5.2) wird wiederum maximal, wenn alle $\hat{p}_{hy} = 0,5$ sind. Daraus folgt, dass bei einer proportionalen Aufteilung der 2800 Stichproben auf die 15 Schichten, eine maximale Spannweite des Konfidenzintervalls über alle Schichten zusammen wie folgt ergibt.

Aus

$$\begin{aligned}\widehat{SE}(\widehat{p}_{y,str}) &= \sqrt{\left(\frac{N-n}{N^2}\right) \sum_{h=1}^H N_h \cdot \left(\frac{\widehat{p}_{y,str}(1-\widehat{p}_{y,str})}{n-1}\right)} = \\ &= \sqrt{\frac{N-n}{N} \cdot \frac{0,5^2}{n-1}} = 0,00869 \quad ,\end{aligned}\tag{5.3}$$

erhält man eine maximale Spannbreite von

$$2 \cdot z_{1-0,90/2} \cdot \widehat{SE}(\widehat{p}_{y,str}) = 2,86\% \quad ,$$

beziehungsweise

$$2 \cdot z_{1-0,95/2} \cdot \widehat{SE}(\widehat{p}_{y,str}) = 3,41\% \quad .$$

5.3 Auswertungen bereits erhobener Daten

Das vom Kanalbauamt der Stadt Graz zur Verfügung gestellte Microsoft Access Datenfile beinhaltet weiters eine Tabelle mit bereits untersuchten Kanalhaltungen. Dieser Tabelle sind im wesentlichen folgende Informationen zu entnehmen:

- die Haltungsnummer der untersuchten Kanalhaltung
- eine Feststellung (codiert lt. MERKBLATT ATV M-143 [ATV99a])
- die Stationierung der festgehaltenen Feststellung

Aufgrund der codierten Feststellung kann mittels der in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren für jede der insgesamt 825 untersuchten Kanalhaltungen die Anzahl der Berliner Punkte und somit auch die entsprechende Schadensklasse berechnet werden. Per Datenabgleich werden dann den Haltungsnummern das Material und die Altersklasse zugewiesen. Dabei stellte sich heraus, dass von 82 untersuchten Haltungen keine Altersgruppe bekannt war und daher aus der Untersuchung herausgenommen werden musste. Eine in die Tabelle eingetragene Kanalhaltung aus PVC wird ebenfalls herausgenommen, da beschlossen wurde, dass die Kanalhaltungen aus dem Material PVC vollständig untersucht werden (siehe Unterabschnitt 5.2.1).

Haltung	Stationierung	Videozeit	Feststellung	Schadensmerkmale
1650097	40,69	00:09:41	EH	
1650097	0	00:10:09	HA	
1650097	0,9	00:10:31	PA	
1650097	12,53	00:13:18	A--L	
1650097	36,99	00:18:34	PE	
1650097	37,29	00:19:06	EH	
1650098	37,29	00:19:06	EH	
1650098	0	00:19:33	HA	
1650098	0,9	00:19:50	PA	
1650098	29,4	00:24:47	A--L	
1650098	40,86	00:28:26	PE	
1650098	41,2	00:29:15	EH	
1660001	41,2	00:29:15	EH	
1660001	0	00:29:25	HA	
1660001	0,9	00:29:52	PA	
1660001	40,72	00:38:42	PE	
1660001	41,23	00:39:30	EH	

Abbildung 5.5: Auszug aus den Untersuchungsdaten

Daraus ergibt sich ein Stichprobenumfang von 742 Kanalhaltungen. Betrachtet man die Schichtenbildung wie in Abbildung 5.4 so ergibt sich eine Aufteilung wie sie in Abbildung 5.6 zu sehen ist. Von der Materialgruppe *Gussrohre* wurden gar keine Kanalhaltungen untersucht. Die Materialgruppen *duktiler Guss* (53), *Faserzementrohre* (23), *glasfaserverstärkte Kunststoffrohre* (8) und *Mauerwerk* (36) wurden nur wenig inspiziert. Die beiden Hauptmaterialgruppen *Beton* (318) und *Steinzeug* (304) weisen hingegen bereits einen fortgeschrittenen Untersuchungsgrad auf.

In weiterer Folge interessiert sich das Kanalbauamt der Stadt Graz besonders für jene Kanalhaltungen, die in die Zustandsklassen 1, 2 oder 3 fallen. Diese 3 Zustandsklassen sind es auch, die vom Kanalbauamt der Stadt Graz als *zu sanierend* eingestuft werden.

Die vorliegenden Daten wurden einer explorativen Analyse unterzogen. So zeigt sich bei der Betrachtung aller untersuchten Kanalhaltungen, unabhängig von der Schichtung bereits ein erstes Bild des Gesamtzustands des Grazer Kanalnetzes (siehe Abbildung 5.7).

Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass das Grazer Kanalnetz nicht makellos ist. Ca. 20% der bisher untersuchten Kanalhaltungen fallen in die zu sanierenden 3 Zustandsklassen. Der Großteil der untersuchten Kanalhaltungen scheint aber in einem guten bis sehr guten Zustand zu sein. Eine Aufgliederung der Abbildung 5.7 in die Materialgruppen zeigt die Abhängigkeit des Zustandes von der

Materialgruppe * Altersgruppe Kreuztabelle			Altersgruppe					Gesamt
			00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	
Materialgruppe	Beton	Anzahl	49	29	35	157	48	318
		% von Materialgruppe	15,4%	9,1%	11,0%	49,4%	15,1%	100,0%
		% von Altersgruppe	48,5%	45,3%	47,9%	48,3%	26,8%	42,9%
		% der Gesamtzahl	6,6%	3,9%	4,7%	21,2%	6,5%	42,9%
	duktiler Guss-Rohre	Anzahl	0	1	0	0	52	53
		% von Materialgruppe	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%	98,1%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	1,6%	0,0%	0,0%	29,1%	7,1%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	7,0%	7,1%
	Faserzementrohre	Anzahl	0	1	0	20	2	23
		% von Materialgruppe	0,0%	4,3%	0,0%	87,0%	8,7%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	1,6%	0,0%	6,2%	1,1%	3,1%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,1%	0,0%	2,7%	0,3%	3,1%
	glasfaserverstärkte Kunststoffrohre	Anzahl	0	0	0	0	8	8
		% von Materialgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,5%	1,1%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	1,1%
	Gussrohre	Anzahl	0	0	0	0	0	0
		% von Materialgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		% von Altersgruppe	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		% der Gesamtzahl	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Mauerwerk	Anzahl	15	10	11	0	0	36
% von Materialgruppe		41,7%	27,8%	30,6%	0,0%	0,0%	100,0%	
% von Altersgruppe		14,9%	15,6%	15,1%	0,0%	0,0%	4,9%	
% der Gesamtzahl		2,0%	1,3%	1,5%	0,0%	0,0%	4,9%	
Steinzeugrohre	Anzahl	37	23	27	148	69	304	
	% von Materialgruppe	12,2%	7,6%	8,9%	48,7%	22,7%	100,0%	
	% von Altersgruppe	36,6%	35,9%	37,0%	45,5%	38,5%	41,0%	
	% der Gesamtzahl	5,0%	3,1%	3,6%	19,9%	9,3%	41,0%	
Gesamt	Anzahl	101	64	73	325	179	742	
	% von Materialgruppe	13,6%	8,6%	9,8%	43,8%	24,1%	100,0%	
	% von Altersgruppe	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% der Gesamtzahl	13,6%	8,6%	9,8%	43,8%	24,1%	100,0%	

Abbildung 5.6: Aufteilung der 742 untersuchten Kanalhaltungen auf die 15 Schichten

Materialklasse (siehe Abbildung 5.8).

5.3.1 Beton und Steinzeugrohre

Aus den Abbildungen 5.7 und 5.8 ist zu erkennen, dass die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre* offensichtlich einen Großteil der beschädigten Kanalhaltungen ausmachen. Dies ist allerdings nicht sonderlich überraschend, da diese beiden Materialien auch am häufigsten verbaut wurden. Die Darstellung in der Abbildung 5.9 lässt hier noch genaueres erkennen.

In der linken Grafik von Abbildung 5.9 sieht man, dass offensichtlich die Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Steinzeugrohre* tendenziell mehr zu den Zustandsklassen 1, 2, und 3 beitragen als die Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Beton*. Dieser Eindruck verstärkt sich, wenn man die rechte Grafik betrachtet. Ein wesentlich höherer Prozentsatz der *Steinzeugrohre* befindet sich in den Zu-

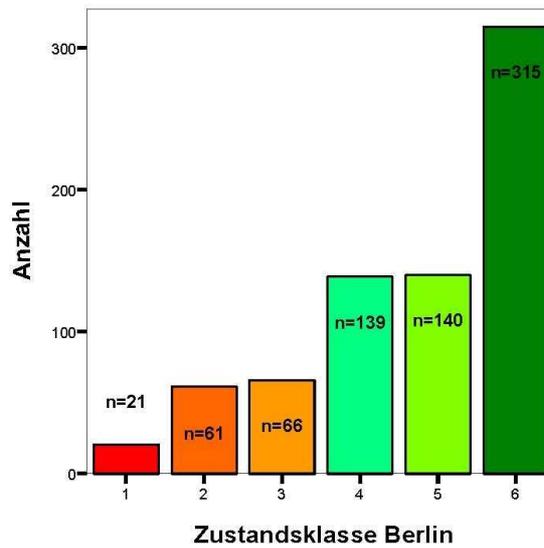


Abbildung 5.7: Verteilung der 742 untersuchten Kanalhaltungen bzgl. der 6 Zustandsklassen

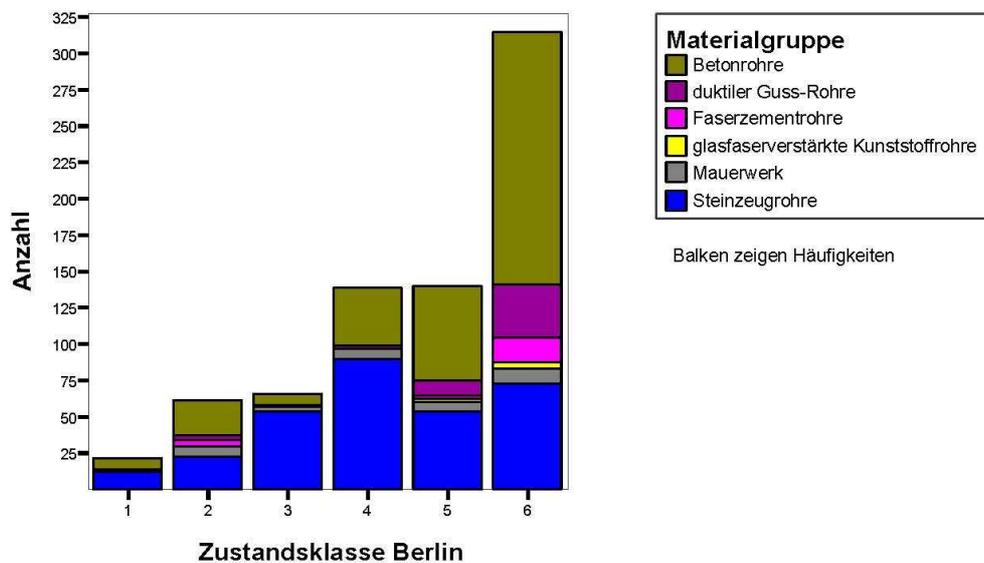


Abbildung 5.8: Unterteilung der 742 untersuchten Kanalhaltungen in deren Zustandsklassen und Materialgruppen

standsklassen 1, 2, und 3 als es bei den Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Beton* der Fall ist. Auffällig ist auch der hohe Prozentsatz an Kanalhaltungen in den Zustandsklassen 1, 2, und 3 aus der Materialgruppe *Mauerwerk*.

Diese Grafiken geben zwar einen ersten Überblick über den Zustand des Kanalnetzes, sind aber wegen der zu geringen Stichprobengröße einiger Materialgruppen

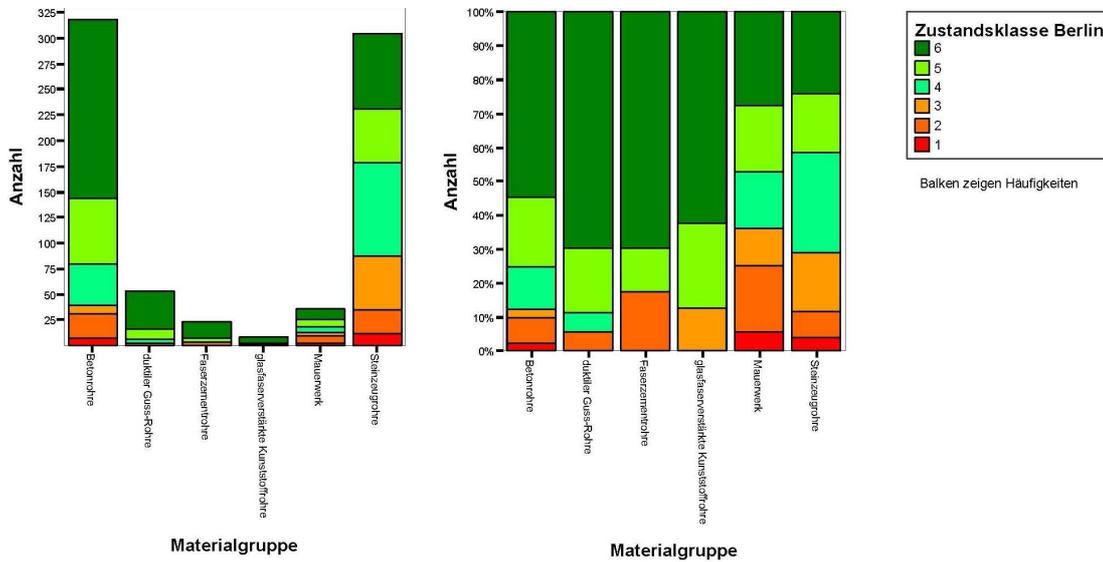


Abbildung 5.9: Unterteilung der 742 untersuchten Kanalhaltungen in deren Zustandsklassen und Materialgruppen

noch zu wenig aussagekräftig.

Aufgrund der erhobenen Stichproben ist es auch möglich nur die 5 Schichten der Materialgruppe *Beton* und die 5 Schichten der Materialgruppe *Steinzeug* zu betrachten. Die Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen die Unterteilungen dieser Materialgruppen in deren Zustandsklassen und Altersgruppen.

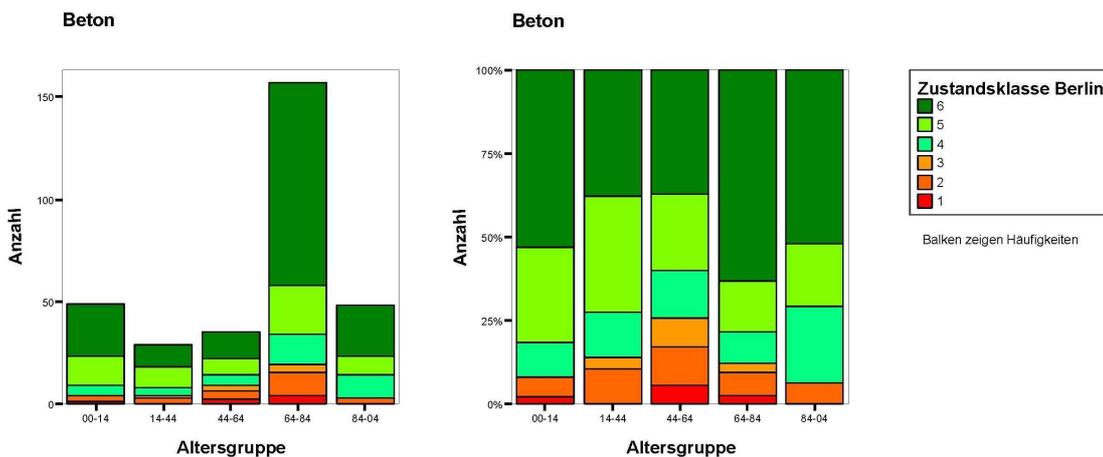


Abbildung 5.10: Unterteilung der inspizierten Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Beton* in deren Zustandsklassen und Altersgruppen

Bei den beiden Grafiken von Abbildung 5.10 für die Materialgruppe *Beton* fällt besonders auf, dass die Altersgruppen *44-64* und *64-84* sowohl anteilmä-

fig, als auch in absoluten Werten mehr Kanalhaltungen der Zustandsklassen 1, 2 und 3 beinhalten als die übrigen Altersgruppen. Als Grund dafür wurde die mangelhafte Bauqualität in den Nachkriegsjahren und in den 60er und 70er Jahren genannt. Dementsprechend sollte auf die Kanalhaltungen dieser Periode erhöhte Aufmerksamkeit gelenkt werden.

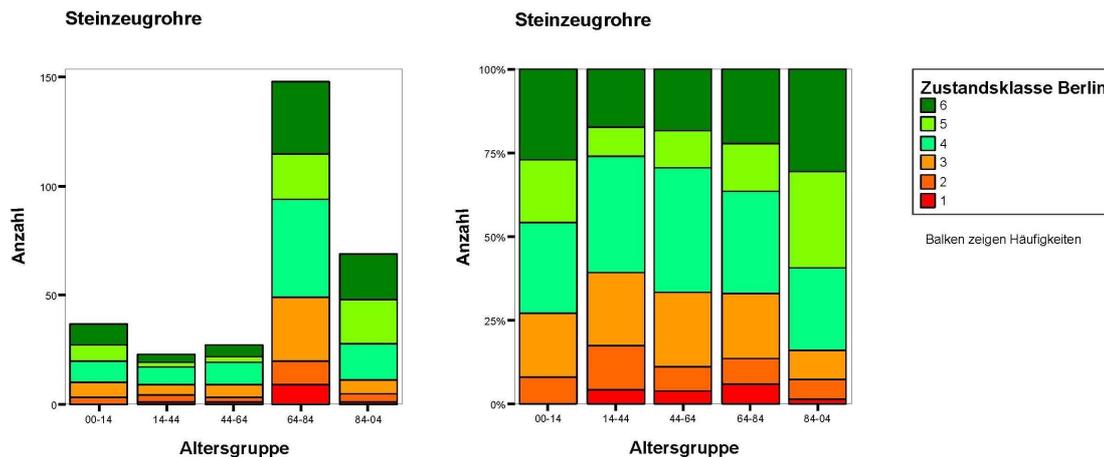


Abbildung 5.11: Unterteilung der inspizierten Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Steinzeugrohre* in deren Zustandsklassen und Altersgruppen

Bei den Grafiken der Abbildung 5.11 zeigt sich, dass von den absoluten Zahlen her die meisten schadhafte Kanalhaltungen in der Bauperiode *64-84* zu finden sind. Betrachtet man aber die prozentuale Aufschlüsselung, so zeigt sich, dass sich die Kanalhaltungen aus der Materialgruppe „Steinzeugrohre“ mit Ausnahme der Altersgruppe *84-04* ähnlich verhalten. Vergleicht man Abbildung 5.11 und 5.10 so zeigt sich, dass die Materialgruppe *Steinzeugrohre* sowohl prozentuell als auch in absoluten Zahlen fehlerbehafteter ist als die Materialgruppe *Beton*.

Dies zeigt sich auch, wenn man die Anteilsberechnungen und deren Konfidenzintervalle betrachtet. Nach Absprache mit dem Kanalbauamt der Stadt Graz wurde das Niveau der Konfidenzintervalle auf 90% gesetzt. Für die Berechnung der Konfidenzintervalle in Abbildung 5.12 und 5.13 wurden die Formeln (4.23) und (4.24), sowie (4.26), (4.31) und (4.32) verwendet.

In Abbildung 5.12 wird statistisch untermauert, dass es offenbar ein Problem mit den Kanalhaltungen der Materialgruppe *Beton* aus der Bauperiode *44-64* gibt. Zwar wurden in dieser Periode am wenigsten Kanalhaltungen der Materialgruppe *Beton* gebaut, diese sind aber besonders schadensanfällig. So ist der Erwartungswert des Anteils an Kanalhaltungen, die in die Zustandsklassen 1, 2, oder 3, fallen bei nahezu 25,7% oder, in absoluten Zahlen, 159 Kanalhaltungen. Betrachtet man alle Kanalhaltungen dieser Materialgruppe, so zeigt sich, dass der erwartete Anteil an Kanalhaltungen, die in die Zustandsklasse 1, 2, oder 3 fallen,

lediglich bei 11,91% liegt. Dies entspricht einem Erwartungswert für die absolute Anzahl an Kanalhaltungen von 760 Einzelhaltungen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die inspizierten Kanalhaltungen der Materialgruppe *Steinzeugrohre* betrachtet (siehe Abbildung 5.13). Hier zeigen sich massive Probleme bei den Kanalhaltungen aus den Bauperioden *14-44*, *44-64* und *64-84*. Hier findet man in etwa ein Drittel der Kanalhaltungen aus den jeweiligen Bauperioden in den Zustandsklassen 1, 2, oder 3. Während bei der Materialgruppe *Beton* mehr als die Hälfte der untersuchten Kanalhaltungen schadensfrei, also in der Zustandsklasse 6 sind (53,11%), sind das in der Materialgruppe *Steinzeug* nur 24,20%, also weniger als 1/4.

Eine Berechnung der Erwartungswerte und der Konfidenzintervalle für den Anteil an Kanälen, die sich in den zu sanierenden Zustandsklassen befindet, zeigen die Abbildungen 5.14 und 5.15 auf Seite 57. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass sich zum einen die Kanalhaltungen der Materialgruppe *Steinzeug* in einem schlechteren Zustand befinden als jene der Materialgruppe *Beton*, zum anderen ist erkennbar, dass Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Beton*, die in der Bauperiode *44-64* gebaut wurden, offenbar fehlerbehafteter sind als jene aus den anderen Bauperioden.

Aufgrund der relativ großen Konfidenzintervalle in den Abbildungen 5.14 und 5.15, sowie 5.12 und 5.13 ist zu erwähnen, dass durch weitere Untersuchungen ein besserer Inspektionsgrad hergestellt werden muss, um die statistischen Aussagen mit fundierteren Daten zu stützen. Näheres dazu im Abschnitt 5.6.

90%-KIV	00-14		14-44		44-64		64-84		84-04		Gesamt	Gesamt Schichtung		
	oben	unten	0,00%	5,32%	0,00%	12,07%	2,55%	4,56%	0,00%	0,00%		2,20%	3,52%	1,90%
ZK 1	2,04%	0,00%	0,00%	0,00%	5,71%	0,00%	0,54%	0,00%	0,00%	0,00%	0,88%	0,76%	0,76%	0,76%
ZK 2	6,12%	11,68%	10,34%	19,67%	11,43%	20,15%	7,01%	10,26%	6,25%	11,94%	9,93%	10,16%	7,64%	10,16%
ZK 3	0,00%	0,57%	1,02%	1,02%	8,57%	2,71%	3,75%	4,56%	0,00%	0,56%	5,17%	5,13%	2,37%	5,13%
ZK 4	10,20%	17,22%	13,79%	24,35%	14,29%	16,24%	2,55%	4,56%	0,00%	0,00%	3,93%	3,74%	2,37%	3,74%
ZK 5	28,57%	39,04%	34,48%	49,03%	22,86%	34,36%	15,29%	19,88%	18,75%	27,93%	24,07%	25,56%	21,65%	25,56%
ZK 6	53,06%	64,62%	37,93%	52,78%	37,14%	50,38%	63,06%	69,22%	52,08%	63,83%	59,20%	57,71%	53,11%	57,71%
		41,50%	23,08%	23,90%			56,90%		40,33%		50,23%		48,51%	

Standardfehler														
ZK	00-14		14-44		44-64		64-84		84-04		Gesamt	Gesamt Schichtung		
	0,04%	0,19%	0,00%	0,00%	5,71%	0,38%	2,55%	0,12%	0,00%	0,00%		2,20%	0,08%	0,06%
ZK 1	6,12%	0,03%	10,34%	0,56%	11,43%	0,53%	7,01%	0,19%	6,25%	0,34%	7,55%	0,14%	0,15%	0,15%
ZK 2	0,00%	0,00%	3,45%	0,34%	8,57%	0,46%	2,55%	0,12%	0,00%	0,00%	2,52%	0,08%	2,37%	0,08%
ZK 3	10,20%	0,42%	13,79%	0,64%	14,29%	0,58%	9,55%	0,22%	22,92%	0,60%	12,58%	0,18%	13,33%	0,19%
ZK 4	28,57%	0,63%	34,48%	0,88%	22,86%	0,69%	15,29%	0,27%	18,75%	0,55%	20,44%	0,22%	21,65%	0,23%
ZK 5	53,06%	0,70%	37,93%	0,90%	37,14%	0,80%	63,06%	0,37%	52,08%	0,71%	54,72%	0,27%	53,11%	0,28%

Stichprobenergebnisse und Grundmenge											
ZK	00-14		14-44		44-64		64-84		84-04		Gesamt
	1	3	0	2	4	4	4	3	0	7	
ZK 1	0	3	1	3	4	4	4	3	0	24	
ZK 2	4	4	4	3	5	15	11	11	11	40	
ZK 3	10	10	11	13	24	99	24	9	9	65	
ZK 4	26	11	29	35	157	174	157	25	48	174	
ZK 5	49	29	947	617	2567	1233	2567	48	318	318	
ZK 6	1016	947	947	617	2567	1233	2567	48	318	318	
Grundmenge	1016	947	947	617	2567	1233	2567	48	318	318	

Abbildung 5.12: 90%-Konfidenzintervalle der prozentuellen Anteile der Zustandsklassen in den Schichten und in der Materialgruppe *Beton* sowie deren Hochrechnung auf die gesamte Schicht

90%-KIV	00-14		14-44		44-64		64-84		84-04		Gesamt		Gesamt Schichtung	
	oben	unten	oben	unten										
ZK 1	0,00%	0,00%	4,35%	11,37%	3,70%	9,60%	6,08%	9,24%	1,45%	3,79%	3,95%	5,74%	4,00%	5,84%
ZK 2	8,11%	15,13%	13,04%	24,65%	7,41%	15,59%	7,43%	10,89%	5,80%	10,37%	7,57%	10,00%	7,59%	10,16%
ZK 3	18,92%	28,99%	21,74%	35,95%	22,22%	35,21%	19,59%	24,83%	8,70%	14,21%	17,43%	20,93%	16,67%	20,17%
ZK 4	27,03%	38,45%	34,78%	51,19%	37,04%	52,12%	30,41%	36,48%	24,64%	33,07%	29,61%	33,81%	29,44%	33,82%
ZK 5	18,92%	28,99%	8,70%	18,40%	11,11%	20,93%	14,19%	18,79%	28,99%	37,86%	17,43%	20,93%	18,10%	21,81%
ZK 6	27,03%	38,45%	17,39%	30,45%	18,52%	30,65%	22,30%	27,79%	30,43%	39,44%	24,01%	27,95%	24,20%	28,34%
		15,61%	4,33%	4,33%	6,39%	6,39%	16,80%	16,80%	21,43%	21,43%	20,08%	20,08%	20,07%	20,07%

	00-14		14-44		44-64		64-84		84-04		Gesamt		Gesamt Schichtung	
	oben	unten	oben	unten										
ZK 1	0,00%	0,000	4,35%	0,0427	3,70%	0,0359	6,08%	0,0192	1,45%	0,0142	3,95%	0,0109	4,00%	0,0112
ZK 2	8,11%	0,0427	13,04%	0,0705	7,41%	0,0497	7,43%	0,0210	5,80%	0,0278	7,57%	0,0148	7,59%	0,0156
ZK 3	18,92%	0,0612	21,74%	0,0864	22,22%	0,0789	19,59%	0,0318	8,70%	0,0335	17,43%	0,0212	16,67%	0,0213
ZK 4	27,03%	0,0694	34,78%	0,0998	37,04%	0,0917	30,41%	0,0369	24,64%	0,0513	29,61%	0,0255	29,44%	0,0267
ZK 5	18,92%	0,0612	8,70%	0,0590	11,11%	0,0597	14,19%	0,0280	28,99%	0,0540	17,43%	0,0212	18,10%	0,0225
ZK 6	27,03%	0,0694	17,39%	0,0794	18,52%	0,0738	22,30%	0,0334	30,43%	0,0547	24,01%	0,0239	24,20%	0,0252

	00-14		14-44		44-64		64-84		84-04		Gesamt	
	oben	unten	oben	unten								
ZK 1	0	1	1	1	1	1	9	9	1	1	12	12
ZK 2	3	3	5	2	6	2	11	11	4	4	23	23
ZK 3	7	5	8	6	10	6	29	29	6	6	53	53
ZK 4	10	8	10	10	10	10	45	45	17	17	90	90
ZK 5	7	2	2	3	3	3	21	21	20	20	53	53
ZK 6	10	4	4	5	5	5	33	33	21	21	73	73
Σ	37	23	23	27	27	27	148	148	69	69	304	304
Grundmenge	308	657	657	431	431	431	2760	2760	1815	1815	5971	5971

Abbildung 5.13: 90%-Konfidenzintervalle der prozentuellen Anteile der Zustandsklassen in den Schichten und in der Materialgruppe *Steinzeugrohre* sowie deren Hochrechnung auf die gesamte Schicht

90%-KIV		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt	Gesamt Schichtung
ZK 1, 2, 3	oben	14,51%	24,35%	37,69%	16,26%	11,94%	15,22%	14,88%
	unten	1,82%	3,24%	13,74%	7,94%	0,56%	9,31%	8,94%
ZK 4, 5, 6	oben	88,18%	96,76%	86,26%	87,90%	99,44%	90,69%	91,06%
	unten	85,49%	75,65%	62,31%	83,74%	88,06%	84,78%	85,12%
Standardfehler								
		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt	Gesamt Schichtung
ZK 1, 2, 3		0,0386	0,0642	0,0728	0,0253	0,0346	0,0180	0,0181
ZK 4, 5, 6		0,0386	0,0642	0,0728	0,0253	0,0346	0,0180	0,0181
Stichprobenergebnisse und Grundmenge								
		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt	
ZK 1, 2, 3		4	4	9	19	3	39	
ZK 4, 5, 6		45	25	26	138	45	279	
Σ		49	29	35	157	48	318	
Grundmenge		1016	947	617	2567	1233	6380	

Abbildung 5.14: 90%-Konfidenzintervalle des prozentuellen Anteils der untersuchten Kanalhaltungen der Materialgruppe *Beton* in 2 Gruppen, bestehend aus den Zustandsklassen 1, 2 und 3 bzw. 4, 5 und 6

90%-KIV		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt	Gesamt Schichtung
ZK 1, 2, 3	oben	38,45%	55,94%	48,06%	39,32%	23,10%	33,12%	32,48%
	unten	15,61%	22,32%	18,61%	26,90%	8,78%	24,77%	24,03%
ZK 4, 5, 6	oben	84,39%	77,66%	81,39%	66,89%	91,22%	75,23%	75,97%
	unten	61,55%	44,06%	51,94%	60,68%	76,90%	66,88%	67,52%
Standardfehler								
		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt	Gesamt Schichtung
ZK 1, 2, 3		0,0694	0,1022	0,0895	0,0378	0,0435	0,0254	0,0257
ZK 4, 5, 6		0,0694	0,1022	0,0895	0,0378	0,0435	0,0254	0,0257
Stichprobenergebnisse und Grundmenge								
		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt	
ZK 1, 2, 3		10	9	9	49	11	88	
ZK 4, 5, 6		27	14	18	99	58	216	
Σ		37	23	27	148	69	304	
Grundmenge		308	657	431	2760	1815	5971	

Abbildung 5.15: 90%-Konfidenzintervalle des prozentuellen Anteils der untersuchten Kanalhaltungen der Materialgruppe *Steinzeugrohre* in 2 Gruppen, bestehend aus den Zustandsklassen 1, 2 und 3 bzw. 4, 5 und 6

5.3.2 Duktiler Guss

In Abbildung 5.4 ist klar zu erkennen, dass die Materialgruppe *duktiler Guss* fast ausschließlich in der Bauperiode 84-04 verbaut wurde. Deshalb bringt eine weitere Schichtung dieser Kanalhaltungen keinen Mehrertrag an Informationen. Wie in Abbildung 5.6 zu erkennen ist, sind von den 3035 Kanalhaltungen aus duktilem Guss bisher nur 53 untersucht worden. Von diesen 53 Kanalhaltungen (1,75%) fallen nur 3 in eine der Zustandsklassen 1, 2, oder 3. Aufgrund der Altersstruktur dieser Kanalhaltungen kann nicht gesagt werden, ob der äußerst gute Zustand dieser Materialgruppe am Material selbst, oder am Alter dieser Kanalhaltungen liegt.

Des Weiteren ist offensichtlich, dass ein Stichprobenumfang von 53 Kanalhaltungen bei einer Grundmenge von 3035 Kanalhaltungen zu gering ist (vgl. Tabelle 5.1) was sich auch in den großen Konfidenzintervallen in Abbildung 5.16 niederschlägt.

duktiler Guss-Rohre								
Stichprobenergebnisse	ZK 1	0	Standardfehler	0,0000	90%-Konfidenzintervall	0,00%	oben	0,00%
	ZK 2	3		0,0318		5,66%	unten	0,00%
	ZK 3	0		0,0000		0,00%	oben	10,89%
	ZK 4	3		0,0318		5,66%	unten	0,44%
	ZK 5	10		0,0538		18,87%	oben	27,71%
	ZK 6	37		0,0631		69,81%	unten	10,02%
	Σ	53						
	Grundmenge	3035						

Abbildung 5.16: 90%-Konfidenzintervalle der Materialgruppe *duktiler Guss*

5.3.3 Faserzementrohre

Bei den Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Faserzementrohre* zeigt sich, abgeleitet aus den bisher inspizierten Kanalhaltungen, dass auch hier die aktuelle Stichprobenmenge zu gering ist, um eine fundierte Aussage treffen zu können. Man kann allerdings erkennen, dass sich der größte Teil der Kanalhaltungen in den Zustandsklassen 4, 5 und 6 befinden wird (siehe Abbildung 5.17).

Faserzementrohre										
Stichprobenergebnisse	ZK 1	0	Standardfehler	0,0000	90%-Konfidenzintervall	0,00%	oben	0,00%	unten	0,00%
	ZK 2	4		0,0801		17,39%	oben	30,57%	unten	4,21%
	ZK 3	0		0,0000		0,00%	oben	0,00%	unten	0,00%
	ZK 4	0		0,0000		0,00%	oben	0,00%	unten	0,00%
	ZK 5	3		0,0712		13,04%	oben	24,75%	unten	1,34%
	ZK 6	16		0,0972		69,57%	oben	85,56%	unten	53,57%
	Σ	23								
	Grundmenge	1320								

Abbildung 5.17: 90%-Konfidenzintervalle der Materialgruppe *Faserzementrohre*

5.3.4 Glasfaserverstärkte Kunststoffrohre

Für die Materialgruppe der *glasfaserverstärkten Kunststoffrohre* gilt ähnliches wie für die Kanalhaltungen der Materialgruppe *duktiler Guss*. Eine Schichtung dieser Kanalhaltungen in Altersgruppen ist hierbei nicht möglich. Auch die bisher erhobene Stichprobenmenge ist noch zu gering, um eine Aussage treffen zu können. Vorgeschlagen wird ein Stichprobenumfang von 149 Kanalhaltungen (siehe Tabelle 5.1). **Bisher wurden aber nur 8 Kanalhaltungen untersucht** (siehe Abbildung 5.18).

5.3.5 Mauerwerk

Die Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Mauerwerk* sind in mehrerer Hinsicht bemerkenswert. Zum einen sind sie tendenziell eher alt, da viele von ihnen auf die Regenwasserkanäle der ehemaligen Grazer Befestigungsanlagen zurückgehen, was eine besonders hohe Fehlerhäufigkeit zur Folge zu haben scheint; zum anderen ist die Datenqualität der Kanalhaltungen aus dieser Materialgruppe äußerst schlecht. So werden lediglich 80 Kanalhaltungen in den Gesamtnetzdaten geführt, denen auch eine Altersgruppe zugeordnet werden kann (siehe Abbildung 5.4). Dies spiegelt aber bei weitem nicht das tatsächliche Netz an Kanalhaltungen dieser Materialgruppe wider. Die 36 bisher inspizierten Kanäle weisen allerdings einen besonders hohen Anteil an qualitativ schlechten Kanalhaltungen, in den Zustandsklassen 1, 2 oder 3 auf. Auf Grund der vorliegenden Datenqualität kann festgestellt werden, dass Kanalhaltungen der Materialgruppe *Mauerwerk* pro-

glasfaserverstärkte Kunststoffrohre										
Stichprobenergebnisse	ZK 1	0	Standardfehler	0,0000	90%-Konfidenzintervall	0,00%	oben	0,00%	unten	0,00%
	ZK 2	0		0,0000		0,00%	oben	0,00%	unten	0,00%
	ZK 3	1		0,1245		12,50%	oben	32,98%	unten	0,00%
	ZK 4	0		0,0000		0,00%	oben	0,00%	unten	0,00%
	ZK 5	2		0,1630		25,00%	oben	51,81%	unten	0,00%
	ZK 6	5		0,1822		62,50%	oben	92,48%	unten	32,52%
	Σ	8								
	Grundmenge	969								

Abbildung 5.18: 90%-Konfidenzintervalle der Materialgruppe *glasfaserverstärkte Kunststoffrohre*

blembehaftet sein können. Daher ist es hier besonders wichtig die Datenqualität zu verbessern und noch mehr Kanalhaltungen zu untersuchen.

Mauerwerk										
Stichprobenergebnisse	ZK 1	2	Standardfehler	0,0287	90%-Konfidenzintervall	5,56%	oben	10,28%	unten	0,83%
	ZK 2	7		0,0496		19,44%	oben	27,61%	unten	11,28%
	ZK 3	4		0,0394		11,11%	oben	17,59%	unten	4,63%
	ZK 4	6		0,0467		16,67%	oben	24,35%	unten	8,98%
	ZK 5	7		0,0496		19,44%	oben	27,61%	unten	11,28%
	ZK 6	10		0,0561		27,78%	oben	37,01%	unten	18,54%
	Σ	36								
	Grundmenge	80								

Abbildung 5.19: 90%-Konfidenzintervalle der Materialgruppe *Mauerwerk*

5.3.6 Prognose des Zustands des gesamten Kanalnetzes

Selbstverständlich ist es prinzipiell möglich, aufgrund der bereits erhobenen Daten eine Prognose des Zustands des gesamten Kanalnetzes abzugeben und in Form

von Konfidenzintervallen anzugeben. Dies geschieht wiederum unter Verwendung der Formeln (4.29) und (4.31).

Auf Basis von 17755 Kanalhaltungen (die Materialgruppe *Gussrohre* wurde nicht berücksichtigt, da keine Stichprobe vorliegt) ergeben sich Erwartungswerte für die Anteile der Kanalhaltungen in den Zustandsklassen 1 bis 6 wie sie in Tabelle 5.3 zu sehen sind. Man kann erkennen, dass man auch bereits mit einer

Zustandsklasse	Erwarteter Anteil in der Schicht	90%-Konfidenz- intervall	
		unten	oben
Zustandsklasse 1	2,05%	1,31%	2,80%
Zustandsklasse 2	7,65%	5,83%	9,47%
Zustandsklasse 3	7,19%	5,49%	8,89%
Zustandsklasse 4	15,73%	13,65%	17,81%
Zustandsklasse 5	19,52%	16,57%	22,47%
Zustandsklasse 6	47,86%	44,41%	51,32%

Tabelle 5.3: Erwartungswerte der Anteile und 90%-Konfidenzintervalle für die Anteile der Kanalhaltungen in den Zustandsklassen 1 bis 6

geringen Stichprobengröße einen möglichen Sanierungsaufwand abschätzen kann. Allerdings ist die Berechnung auf Basis eines derartigen Inspektionsniveaus noch mit großen Fehlern behaftet. Zum Beispiel wurden die Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Gussrohre* noch gar nicht inspiziert. Den Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Mauerwerk* wird ein zu geringes Gewicht zugeordnet, da bisher nur von einer Grundmenge von 80 Kanalhaltungen ausgegangen werden kann, was die tatsächliche Anzahl stark unterschätzt.

Grundsätzlich kann man aber feststellen, dass ca. 17% der Kanalhaltungen einen potentiellen Sanierungsbedarf aufweisen.

5.4 Simultane Konfidenzintervalle für multinomiale Verteilungen

Die Schätzung der dichotomalen Anteile hat den Vorteil, dass man mit den Formeln (4.29), (4.31) und (4.32) aus den Schichten heraus sehr gut die dichotomalen Anteile in der gesamten Population schätzen kann. Als solches bietet sich diese Methode sehr gut dafür an, einen Sanierungsaufwand für das gesamte Kanalnetz abzuschätzen. Allerdings hat die Berechnung der Konfidenzintervalle innerhalb der Schichten auch einige Nachteile. So wird mit der Schätzung des dichotomalen Anteils in der Schicht lediglich die Frage untersucht welcher Anteil der

Kanalhaltungen sich beispielsweise in der Zustandsklasse 1 befindet und welcher Anteil sich nicht in der Zustandsklasse 1 befindet. In dieser Berechnung gibt es nur 2 Zustände: entweder die Kanalhaltung befindet sich in einer bestimmten Zustandsklasse, oder sie tut es nicht.

Ein weiterer Nachteil ist, dass für jene Zustandsklassen in einer Schicht, in die keine untersuchte Kanalhaltung fällt mit Formel (4.26) kein Konfidenzintervall angegeben werden kann.

Wenn man sich für die gemeinsamen Konfidenzintervalle der 6 Zustandsklassen in einer bestimmten Schicht interessiert, so ist es besser die Anzahl der Kanalhaltungen als multinomialverteilt anzusehen. So werden die n_h untersuchten Kanalhaltungen auf die 6 Zustandsklassen aufgeteilt. Dies entspricht einer Multinomialverteilung. Quesenberry und Hurst [QH64] haben 1964 eine Methode vorgestellt mit der man Konfidenzintervalle multinomialverteilter Proportionen berechnen kann.

Es gilt wie in (4.23)

$$\hat{p}_{hy} = \frac{1}{|n_h|} \sum_{i=1}^{|n_h|} y_{hi} .$$

Die Prozentsätze der Anteile bleiben also gleich und verändern sich nicht. Für die Konfidenzintervalle gilt allerdings:

$$\hat{p}_{hy} \in \frac{\chi^2 + 2n_j \pm \sqrt{\chi^2 [\chi^2 + 4n_j (n_h - n_j) / N]}}{2(n_h + \chi^2)} \quad (5.4)$$

Wobei n_h die Stichprobengröße in der h -ten Schicht ist, n_j ist die Anzahl jener Haltungen aus der Stichprobe die in die j -te Zustandsklasse fallen. χ^2 ist das $(1 - \alpha/m)$ -Quantil der Chi-quadrat Verteilung mit einem Freiheitsgrad $(\chi_1^2(1 - \alpha/m))$. m ist die Anzahl der Zustandsklassen. Hier ist also $m = 6$ und $\chi_1^2(1 - \alpha/6)$ ist für ein α von 0.05 gleich 6.9604 und für ein α von 0.1 gleich 5.7311.

5.4.1 Simultane Konfidenzintervalle für die einzelnen Schichten

In den Abbildungen 5.20 und 5.21 zeigt sich sofort ein großer Vorteil dieser Methode der Konfidenzintervallsberechnung. Selbst wenn keine einzige Beobachtung aus der Altersgruppe 00-14 in die Zustandsklasse 3 fällt ist es möglich ein Konfidenzintervall anzugeben. Es zeigt sich allerdings auch, dass diese Methode für geringe Stichprobengrößen große Konfidenzintervalle liefert. Weiters sind die Konfidenzintervalle nicht mehr symmetrisch um den geschätzten Anteil verteilt. Die Schiefe hängt vom geschätzten Anteil \hat{p}_{hy} ab.

Für die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre* ist es aufgrund der Datenstruktur möglich, Konfidenzintervalle für die einzelnen Schichten anzugeben. Hierbei zeigt sich, dass für eine hinreichend große Stichprobe die Materialgruppe *Beton* (siehe Abbildung 5.20) auch hier brauchbare Konfidenzintervalle bietet. Selbstverständlich bleiben die Punktschätzer für die Anteile gleich. Somit ist die Kernaussage die selbe wie bei der Konfidenzintervallsschätzung aus Abschnitt 5.3.

Noch stärker als für die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre* gilt für die restlichen Materialien, dass für eine gute Abschätzung der Konfidenzintervalle, eine hinreichend große Stichprobe gegeben sein muss. Ansatzweise zeigt sich das bereits bei der Materialgruppe *duktiler Guss*. Besonders auffällig ist es dann aber bei den Materialgruppen *Faserzementrohre*, *glasfaserverstärkte Kunststoffrohre* und *Mauerwerk*. Die hierbei gewonnenen Konfidenzintervalle weisen eine derart große Schwankungsbreite auf, so dass sie für eine brauchbare Prognose nicht verwendbar sind.

90%-KIV		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt
ZK 1	oben	2,04%	0,00%	5,71%	2,55%	0,00%	2,20%
	unten	13,86%	16,50%	22,65%	7,62%	10,67%	5,18%
ZK 2	oben	6,12%	10,34%	11,43%	7,01%	6,25%	7,55%
	unten	1,70%	2,89%	3,75%	3,50%	1,74%	4,70%
ZK 3	oben	0,00%	3,45%	8,57%	2,55%	0,00%	2,52%
	unten	0,00%	0,46%	2,39%	0,82%	0,00%	1,11%
ZK 4	oben	10,20%	13,79%	14,29%	9,55%	22,92%	17,70%
	unten	3,73%	4,54%	5,26%	5,28%	11,78%	8,78%
ZK 5	oben	28,57%	34,48%	22,86%	15,29%	18,75%	20,44%
	unten	16,03%	17,57%	10,47%	9,65%	8,91%	15,57%
ZK 6	oben	53,06%	37,93%	37,14%	63,06%	52,08%	54,72%
	unten	36,59%	20,11%	20,74%	53,53%	35,54%	48,01%

Beton

Stichprobenergebnisse und Grundmenge						
	00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt
ZK 1	1	0	2	4	0	7
ZK 2	3	3	4	11	3	24
ZK 3	0	1	3	4	0	8
ZK 4	5	4	5	15	11	40
ZK 5	14	10	8	24	9	65
ZK 6	26	11	13	99	25	174
Σ	49	29	35	157	48	318
Grundmenge	1016	947	617	2567	1233	6380

Abbildung 5.20: Simultane 90%-Konfidenzintervalle der Anteile der Zustandsklassen in den Schichten und in der Materialgruppe *Beton*

90%-KIV		Steinzeugrohre						Gesamt	
		00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt		
ZK 1	oben	0,00%	4,35%	3,70%	6,08%	1,45%	10,15%	3,95%	7,58%
	unten	0,00%	0,57%	0,49%	2,82%	0,19%	0,19%	2,02%	2,02%
ZK 2	oben	8,11%	13,04%	7,41%	7,43%	5,80%	16,49%	7,57%	12,03%
	unten	2,26%	3,66%	1,61%	3,71%	1,88%	1,88%	4,67%	4,67%
ZK 3	oben	18,92%	21,74%	22,22%	19,59%	8,70%	20,28%	17,43%	23,23%
	unten	8,15%	8,11%	9,02%	12,98%	3,44%	3,44%	12,84%	12,84%
ZK 4	oben	27,03%	34,78%	37,04%	30,41%	24,64%	38,67%	29,61%	36,20%
	unten	13,55%	16,33%	18,97%	22,22%	14,49%	14,49%	23,76%	23,76%
ZK 5	oben	18,92%	8,70%	11,11%	14,19%	28,99%	43,26%	17,43%	23,23%
	unten	8,15%	1,89%	3,11%	8,66%	17,93%	17,93%	12,84%	12,84%
ZK 6	oben	27,03%	17,39%	18,52%	22,30%	30,43%	44,77%	24,01%	30,32%
	unten	13,55%	5,76%	6,87%	15,23%	19,10%	19,10%	18,66%	18,66%
Grundmenge		308	657	431	2760	1815	5971		

Stichprobenergebnisse und Grundmenge						
	00-14	14-44	44-64	64-84	84-04	Gesamt
ZK 1	0	1	1	9	1	12
ZK 2	3	3	2	11	4	23
ZK 3	7	5	6	29	6	53
ZK 4	10	8	10	45	17	90
ZK 5	7	2	3	21	20	53
ZK 6	10	4	5	33	21	73
Σ	37	23	27	148	69	304
Grundmenge	308	657	431	2760	1815	5971

Abbildung 5.21: Simultane 90%-Konfidenzintervalle der Anteile der Zustandsklassen in den Schichten und in der Materialgruppe *Steinzeugrohre*

duktiler Guss-Rohre						
Stichprobenergebnisse	ZK 1	0	90%-Konfidenzintervall	0,00%	oben	9,76%
					unten	0,00%
	ZK 2	3		5,66%	oben	18,40%
					unten	1,41%
	ZK 3	0		0,00%	oben	9,76%
					unten	0,00%
ZK 4	3	5,66%	oben	18,40%		
			unten	1,57%		
ZK 5	10	18,87%	oben	34,50%		
			unten	9,31%		
ZK 6	37	69,81%	oben	82,35%		
			unten	53,41%		
	Σ	53				
	Grundmenge	3035				

Abbildung 5.22: Simultane 90%-Konfidenzintervalle der Anteile der Zustandsklassen der Materialgruppe *duktiler Guss*

Faserzementrohre						
Stichprobenergebnisse	ZK 1	0	90%-Konfidenzintervall	0,00%	oben	19,95%
					unten	0,00%
	ZK 2	4		17,39%	oben	42,03%
					unten	5,76%
	ZK 3	0		0,00%	oben	19,95%
					unten	0,00%
ZK 4	0	0,00%	oben	19,95%		
			unten	0,00%		
ZK 5	3	13,04%	oben	37,17%		
			unten	3,66%		
ZK 6	16	69,57%	oben	86,58%		
			unten	44,74%		
	Σ	23				
	Grundmenge	1320				

Abbildung 5.23: Simultane 90%-Konfidenzintervalle der Anteile der Zustandsklassen der Materialgruppe *Faserzementrohre*

glasfaserverstärkte Kunststoffrohre						
Stichprobenergebnisse	ZK 1	0	90%-Konfidenzintervall	0,00%	oben	41,74%
					unten	0,00%
	ZK 2	0		0,00%	oben	41,74%
					unten	0,00%
	ZK 3	1		12,50%	oben	54,64%
					unten	1,67%
	ZK 4	0	0,00%	oben	41,74%	
				unten	0,00%	
	ZK 5	2	25,00%	oben	65,29%	
				unten	5,58%	
	ZK 6	5	62,50%	oben	88,99%	
				unten	25,57%	
	Σ	8				
	Grundmenge	969				

Abbildung 5.24: Simultane 90%-Konfidenzintervalle der Anteile der Zustandsklassen der Materialgruppe *glasfaserverstärkte Kunststoffrohre*

Mauerwerk						
Stichprobenergebnisse	ZK 1	2	90%-Konfidenzintervall	5,56%	oben	22,11%
					unten	1,20%
	ZK 2	7		19,44%	oben	38,90%
					unten	8,39%
	ZK 3	4		11,11%	oben	29,26%
					unten	3,64%
	ZK 4	6	16,67%	oben	35,79%	
				unten	6,69%	
	ZK 5	7	19,44%	oben	38,90%	
				unten	8,39%	
	ZK 6	10	27,78%	oben	47,71%	
				unten	13,95%	
	Σ	36				
	Grundmenge	80				

Abbildung 5.25: Simultane 90%-Konfidenzintervalle der Anteile der Zustandsklassen der Materialgruppe *Mauerwerk*

5.5 Stichprobenplan mit Einbeziehung bereits untersuchter Kanalhaltungen

In Unterabschnitt 5.2.2 wurde festgestellt, dass in Graz innerhalb von 3 Jahren ein Untersuchungsvolumen von 2800 Kanalhaltungen bearbeitet werden kann. Ausgehend von den bereits untersuchten 742 Kanalhaltungen kann der Stichprobenplan

somit entsprechend modifiziert werden. Die Basis ist jetzt ein Stichprobenplan, der 2800 + 742 Kanalhaltungen umfassen soll. Somit werden pro Schicht mehr Haltungen untersucht. Abzüglich der bereits untersuchten Haltungen ergibt sich ein Stichprobenplan mit 2800 neuen Untersuchungen.

Schicht	Kanalhaltungen in der Schicht	bereits untersuchte Kanalhaltungen	zu untersuchende Kanalhaltungen
Beton, 00-14	1016	49	148
Beton, 14-44	947	29	154
Beton, 44-64	617	35	84
Beton, 64-84	2567	157	339
Beton, 84-04	1233	48	191
duktiler Guss-Rohre, Gesamt	3035	53	534
Faserzementrohre, Gesamt	1320	23	232
glasfaserverstärkte Kunststoffrohre, Gesamt	969	8	180
Gussrohre, Gesamt	438	0	86
Mauerwerk, Gesamt	80	36	0
Steinzeugrohre, 00-14	308	37	24
Steinzeugrohre, 14-44	657	23	104
Steinzeugrohre, 44-64	431	27	56
Steinzeugrohre, 64-84	2760	148	386
Steinzeugrohre, 84-04	1815	69	282
Gesamt	18139	742	2800

Tabelle 5.4: Modifizierter Erstinspektionsplan auf Basis von 2800 zu inspizierenden Kanalhaltungen

Aufgrund des in Tabelle 5.4 angegebenen Stichprobenplans, lassen sich wiederum maximale Konfidenzintervalle für die dichotomalen Anteile berechnen (siehe Tabelle 5.5). Es gelten auch hier wieder die Formeln (4.23), (4.26) und (4.27). Man erkennt, dass durch die Einbeziehung der bereits untersuchten Kanalhaltungen die Untersuchungskapazität von 2800 Kanalhaltungen anders aufgeteilt wird (siehe Tabelle 5.4) und sich die Konfidenzintervalle der einzelnen Schichten bei einer proportionalen Aufteilung der Kapazitäten auf die Schichten teilweise massiv verkleinern. Dies hat wiederum eine Verkleinerung der Konfidenzintervalle für die Hochrechnung der Schichten auf das gesamte Kanalnetz zur Folge.

Somit ergibt sich als maximaler Standardfehler

$$\widehat{SE}(\widehat{p}_{h, str}) = 0,007538 \text{ ,}$$

Schicht	$2 \cdot z_{1-\alpha/2} \widehat{SE}(\widehat{p}_{hy})$	
	$z_{1-0,90/2} = 1,645$	$z_{1-0,95/2} = 1,960$
Beton, 00-14	10,55%	12,57%
Beton, 14-44	10,95%	13,05%
Beton, 44-64	13,61%	16,21%
Beton, 64-84	6,64%	7,91%
Beton, 84-04	9,57%	11,41%
duktiler Guss-Rohre, Gesamt	6,10%	7,72%
Faserzementrohre, Gesamt	9,27%	11,05%
glasfaserverstärkte Kunststoffrohre, Gesamt	10,80%	12,87%
Gussrohre, Gesamt	16,00%	19,06%
Mauerwerk, Gesamt	20,62%	24,57%
Steinzeugrohre, 00-14	19,01%	22,66%
Steinzeugrohre, 14-44	13,16%	15,68%
Steinzeugrohre, 44-64	16,32%	19,45%
Steinzeugrohre, 64-84	6,40%	7,62%
Steinzeugrohre, 84-04	7,90%	9,41%

Tabelle 5.5: Konfidenzintervalle mit maximalen Spannweiten innerhalb der Schichten bei einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 90% bzw. 95% auf Basis von 3542 untersuchten Kanalhaltungen

was weiters zu einer maximalen Spannweite der Konfidenzintervalle von

$$2 \cdot z_{1-0,90/2} \cdot \widehat{SE}(\widehat{p}_{h,str}) = 2,48\%$$

beziehungsweise

$$2 \cdot z_{1-0,95/2} \cdot \widehat{SE}(\widehat{p}_{h,str}) = 2,95\%$$

führt.

5.6 Probleme

Einige Probleme sind in den vorherigen Abschnitten bereits kurz angesprochen worden. So ist die Datenqualität, was die Grundgesamtheit aller Kanalhaltungen im Grazer Kanalnetz betrifft nur zum Teil befriedigend dokumentiert. So konnten 5300 Kanalhaltungen (22.44%) nicht verwendet werden, da ihnen entweder keine Altersgruppe oder keine Materialgruppe zugeordnet werden konnte. Des Weiteren erscheint es sinnvoll jede Sanierungstätigkeit auch in elektronischer Form zu

dokumentieren, um die Güte der Daten immer wieder verbessern bzw. auf einem hohen Niveau halten zu können.

Ein weiteres Problem stellt die Zustandsklassifizierung für Rohrleitungen nach MERKBLATT ATV-M 149 dar. Diese verlangt nicht nur eine 4-stellige Klassifizierung des jeweiligen Einzelschadens, sondern benötigt ebenso numerische Informationen wie zum Beispiel Rissbreiten, beeinträchtigter Querschnittsanteil, oder eine numerische Codierung des Verschleißes (vgl. Tabellen 3.3, 3.4 und 3.5). Diese Informationen wurden bisher nicht aufgezeichnet. Daher ist die Zuordnung der Schäden zu den Zustandsklassen nicht zur Gänze nachvollziehbar. Eine lückenlose Dokumentation würde die Überprüfung der Qualität der subjektiv durchgeführten Zuordnungen ermöglichen.

Kapitel 6

Prognose mittels Markovketten

In diesem Kapitel wird eine Möglichkeit vorgestellt wie man die Entwicklung einzelner Schichten prognostizieren kann. Dabei werden Modelle der Markovketten angewandt. Zuerst sollen die Grundlagen von Markovketten vorgestellt werden. In weiterer Folge wird dann diese Methode dazu benutzt, den Alterungsprozess von Kanalhaltungen in Form von Übergangswahrscheinlichkeiten und Zustandswahrscheinlichkeiten anzugeben.

6.1 Markovketten

Definition 10 Ein Stochastischer Prozess $\{X_n | n \in \mathbb{N}_0\}$ mit einem diskreten und endlichen Zustandsraum $\mathcal{S} = \{1, \dots, m\}$ ist eine **Markovkette**, falls für beliebige Zustände i_0, i_1, \dots, i_{n+1} aus \mathcal{S} gilt:

$$P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n) . \quad (6.1)$$

Bemerkung 3 Die künftige Entwicklung einer Markovkette hängt nur vom gegenwärtigen Zustand ab, aber nicht von der Vergangenheit.

Die Bemerkung 3 zeigt auch bereits,

Definition 11

$$p_{ij}(n, n+1) := P(X_{n+1} = j | X_n = i), \forall i, j \in \mathcal{S} \quad (6.2)$$

heißt **einstufige Übergangswahrscheinlichkeit einer Markovkette**.

Ist $p_{ij}(n, n+1)$ unabhängig von n , dann sprechen wir von einer **homogenen Markovkette** mit den Übergangswahrscheinlichkeiten

$$p_{ij} = p_{ij}(n, n+1) \quad \forall i, j \in \mathcal{S}, \quad \forall n \in \mathbb{N}_0, \quad (6.3)$$

die zur $(m \times m)$ -Matrix \mathbf{M} der Übergangswahrscheinlichkeiten zusammengefasst werden:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{pmatrix}.$$

Für die Übergangswahrscheinlichkeiten gilt weiters, dass

$$p_{ij} \geq 0, \quad \sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \quad i \in \mathcal{S} \quad (\text{Zeilensummen}).$$

$p_{ij}^{(n)} = P(X_n = j | X_0 = i)$ heißt **n -stufige Übergangswahrscheinlichkeit**.

Die Wahrscheinlichkeit, dass zum Zeitpunkt n der Zustand i eintritt ist definiert als

$$p_i^{(n)} = P(X_n = i), \quad \forall i \in \mathcal{S}, \quad n \in \mathbb{N}_0.$$

Diese Wahrscheinlichkeiten kann man zu folgendem Vektor zusammenfassen:

$$\mathbf{p}^{(n)} = \left(p_1^{(n)}, p_2^{(n)}, \dots, p_m^{(n)} \right).$$

Die Anfangsverteilung der homogenen Markovkette ist gegeben durch

$$\mathbf{p}^{(0)} = \left(p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, \dots, p_m^{(0)} \right) \quad \text{mit } p_i^{(0)} = P(X_0 = i), \quad i \in \mathcal{S}. \quad (6.4)$$

Für die Prognose der Zustände der Kanalhaltungen bedeutet das, dass für die zukünftige Zustandsentwicklung nur der derzeitige Zustand einer Kanalhaltung ausschlaggebend ist. Der endliche diskrete Zustandsraum ist die Menge der Zustandsklassen die eine Kanalhaltung einnehmen kann. So ist der Zustandsraum der alle Zustandsklassen enthält definiert durch

$$\mathcal{S} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}.$$

Werden die sanierungsbedürftigen Zustandsklassen 1, 2 und 3 zu einer gemeinsamen Zustandsklasse s zusammengefasst, so ist der Zustandsraum definiert durch

$$\mathcal{S}^* = \{s, 4, 5, 6\}.$$

Mit der Bedingung, dass sich eine Kanalhaltung niemals verbessern kann, sondern nur in eine schlechtere Zustandsklasse wechseln kann sieht eine Übergangsmatrix bezüglich des Zustandsraums \mathcal{S} folgendermaßen aus:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & 0 & 0 \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & 0 \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{pmatrix}, \quad (6.5)$$

bzw. wenn man den Zustandsraum \mathcal{S}^* zugrundelegt:

$$M^* = \begin{pmatrix} p_{ss} & 0 & 0 & 0 \\ p_{4s} & p_{44} & 0 & 0 \\ p_{5s} & p_{54} & p_{55} & 0 \\ p_{6s} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{pmatrix}. \quad (6.6)$$

Eine Interpretation der Matrix ist leicht möglich. Befindet sich eine Kanalhaltung beispielsweise in der Zustandsklasse 4, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie innerhalb einer Periode in der Zustandsklasse 4 bleibt gleich p_{44} , und dass sie in eine der zu sanierenden Zustandsklassen fällt gleich p_{4s} .

Man ist jedoch nicht nur an den Übergangswahrscheinlichkeiten in einer Periode interessiert, sondern an den Übergangswahrscheinlichkeiten über mehrere Perioden. Man will beispielsweise wissen, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich eine Kanalhaltung, die sich derzeit in der Zustandsklasse 4 befindet, in einer zu sanierenden Zustandsklasse befindet. Um dies zu berechnen muss man die Übergangsmatrix potenzieren.

Bemerkung 4 Für beliebiges $n \in \mathbb{N}_0$ gilt:

$$M^{(n)} = M^n. \quad (6.7)$$

Für eine beliebigen Anfangsverteilung $p^{(0)}$ und eine Übergangsmatrix M gilt:

$$p^{(0)} \cdot M^n = p^{(n)}. \quad (6.8)$$

6.2 Markovketten in der Kanalprognose

Um die Übergangswahrscheinlichkeiten in der Übergangsmatrix berechnen zu können, bedarf es allerdings noch einiger Einschränkungen und Bedingungen:

1. Es wird angenommen, dass sich die Kanalhaltungen innerhalb einer bestimmten Schicht homogen verhalten. Es wird daher für jede Schicht eine Übergangsmatrix berechnet.
2. Alle Kanalhaltungen aus einer Bauperiode besitzen das gleiche Alter, selbst wenn, wie im vorliegenden Fall, eine Alterperiode 20 Jahre dauert.
3. Zum Zeitpunkt 0 einer jeden Altersperiode haben sich alle Kanalhaltungen in der Zustandsklasse 6 befunden.

Für eine Schicht mit einem Durchschnittsalter von k Jahren, ist folgendes Gleichungssystem zu lösen:

$$p^{(0)} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_{4s} & p_{44} & 0 & 0 \\ p_{5s} & p_{54} & p_{55} & 0 \\ p_{6s} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{pmatrix}^k = \begin{pmatrix} p_s^{(k)} \\ p_4^{(k)} \\ p_5^{(k)} \\ p_6^{(k)} \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

mit $p^{(0)} = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$

Die $p_i^{(k)}$ sind bekannt. Sie sind die derzeitige Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kanalhaltungen einer bestimmten Schicht. Wenn man also davon ausgeht, dass sich zum Zeitpunkt 0 alle Kanalhaltungen in der Zustandsklasse 6 befunden haben und sich in den vergangenen k Jahren die Kanalhaltungen aus dieser Schicht zum Vektor $p^{(k)}$ verändert haben, so muss man die Übergangsmatrix M^k berechnen und aus ihr die Übergangswahrscheinlichkeiten p_{ij} berechnen.

Um diesen Berechnungsvorgang vereinfachen zu können werden noch weitere Annahmen getroffen:

4. In einer Periode kann eine Kanalhaltung entweder in ihrer derzeitigen Zustandsklasse bleiben, oder in die nächst-schlechtere Zustandsklasse wechseln.
5. Eine Periode beträgt ein Kalenderjahr.

Mit dieser Einschränkung vereinfacht sich das Gleichungssystem (6.9) zu

$$p^{(0)} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_{4s} & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & p_{54} & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & p_{65} & p_{66} \end{pmatrix}^k = \begin{pmatrix} p_s^{(k)} \\ p_4^{(k)} \\ p_5^{(k)} \\ p_6^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (6.10)$$

Mit der Bedingung, dass die Zeilensumme der Matrix immer gleich 1 sein muss ($p_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^m p_{ij} = 1$) verändert sich das Gleichungssystem (6.10) zu

$$p^{(0)} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - p_{44} & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - p_{55} & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - p_{66} & p_{66} \end{pmatrix}^k = \begin{pmatrix} p_s^{(k)} \\ p_4^{(k)} \\ p_5^{(k)} \\ p_6^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (6.11)$$

6.2.1 Lösen des Gleichungssystems (6.11)

Es kann

$$p^{(0)} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - p_{44} & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - p_{55} & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - p_{66} & p_{66} \end{pmatrix}^k = \begin{pmatrix} p_s^{(k)} \\ p_4^{(k)} \\ p_5^{(k)} \\ p_6^{(k)} \end{pmatrix}$$

auch geschrieben werden als

$$\begin{pmatrix} h(p_{44}, p_{55}, p_{66}) \\ g(p_{44}, p_{55}, p_{66}) \\ f(p_{55}, p_{66}) \\ p_{66}^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_s^{(k)} \\ p_4^{(k)} \\ p_5^{(k)} \\ p_6^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (6.12)$$

Somit gilt sofort

$$p_{66} = \sqrt[k]{p_6^{(k)}}.$$

Diese Wurzel besitzt nur eine positive reelle Lösung. p_{66} kann also ganz einfach berechnet werden. Sequentiell kann jetzt auch p_{55} berechnet werden, da ja p_{66} bekannt ist. Das Gleichungssystem (6.12) verändert sich dann insofern, als dass die Funktion f nur mehr von der Variable p_{55} abhängt. Somit handelt es sich bei dem Gleichungssystem

$$f(p_{55}) = p_5^{(k)}$$

um eine polynomielle Gleichung mit einer Unbekannten. Diese polynomielle Gleichung kann mit Hilfe einer Mathematik-Software gelöst werden. Für die Berechnungen in dieser Diplomarbeit wurde das Softwarepaket *Mathematica* verwendet. Auch hier gibt es in der Regel mehrere Lösungen, aber nur eine Lösung ist reellwertig und positiv. Diese Vorgangsweise kann induktiv angewendet werden, bis alle Übergangswahrscheinlichkeiten berechnet sind.

6.2.2 Übergangsmatrizen für die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre*

Da nur für die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre* hinreichend große Stichproben existieren, kann nur mit diesen Materialgruppen eine Prognose erstellt werden. Mit den Berechnungen aus Abschnitt 6.2.1 wurden die folgenden Übergangswahrscheinlichkeiten berechnet: Für die einzelnen Altersgruppen wur-

Materialgruppe	Altersgruppe	\hat{p}_{44}	\hat{p}_{55}	\hat{p}_{66}
<i>Beton</i>	<i>00-14</i> ($k = 100$)	0,981869	0,990255	0,993683
	<i>14-44</i> ($k = 80$)	0,973671	0,986175	0,987955
	<i>44-64</i> ($k = 50$)	0,936685	0,959217	0,980385
	<i>64-84</i> ($k = 30$)	0,913221	0,935222	0,984748
	<i>84-04</i> ($k = 10$)	0,926685	0,795674	0,936844
<i>Steinzeugrohre</i>	<i>00-14</i> ($k = 100$)	0,082307	0,972787	0,987003
	<i>14-44</i> ($k = 80$)	0,979582	0,936439	0,978371
	<i>44-64</i> ($k = 50$)	0,971289	0,915085	0,966836
	<i>64-84</i> ($k = 30$)	0,940013	0,882627	0,951211
	<i>84-04</i> ($k = 10$)	0,847538	0,830455	0,887831

Tabelle 6.1: Berechnete Übergangswahrscheinlichkeiten der Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre*

de jeweils ein mittleres Alter festgelegt. Dieses mittlere Alter entspricht nicht immer dem tatsächlichen Mittelwert. So wurde das mittlere Alter bei der Altersgruppe *00-14* auf $k = 100$ Jahre und bei der Altersgruppe *14-44* auf $k = 80$ Jahre festgelegt.

Um den bisherigen Alterungsprozess darstellen zu können, wurden die Übergangsmatrizen in 5-jahres Schritten berechnet. Dabei wurde die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kanalhaltung nach n Jahren sanierungsbedürftig ist, sich also in den Zustandsklassen 1, 2 oder 3 befindet, abgebildet. Die Graphen in den Abbildungen 6.1 und 6.2 spiegeln somit den Verlauf des Anstiegs der sanierungsbedürftigen Kanalhaltungen in der Vergangenheit wider.

Aufgrund der Berechnungsvorschrift treffen die Graphen nach dem Durchlauf ihres Alters auf die derzeitige geschätzte Wahrscheinlichkeit. Es gilt beispielsweise, dass nach 50 Jahren die geschätzte Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Kanalhaltung aus der Materialgruppe *Beton* und aus der Altersgruppe *44-64* 25,71% ist, was dem momentanen Wert entspricht.

Um aus den Übergangswahrscheinlichkeiten der Vergangenheit eine Prognose erstellen zu können, müssen wiederum einige Überlegungen getroffen werden.

Bei der Materialgruppe *Beton* ist zu erkennen, dass die Wahrscheinlichkeiten

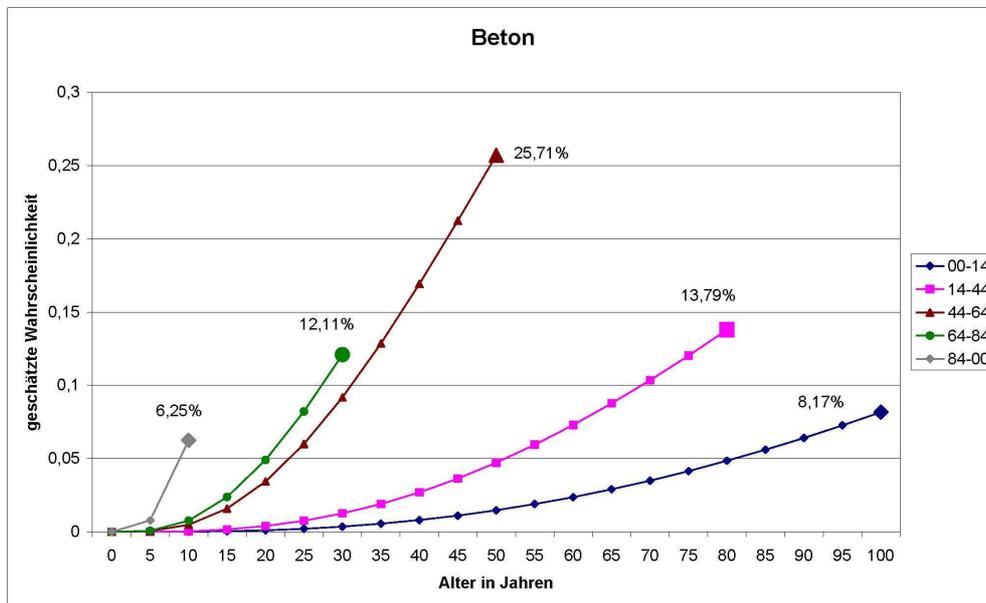


Abbildung 6.1: Graphen der geschätzten Wahrscheinlichkeiten $p_s^{(k)}$ der 5 Schichten der Materialgruppe *Beton*

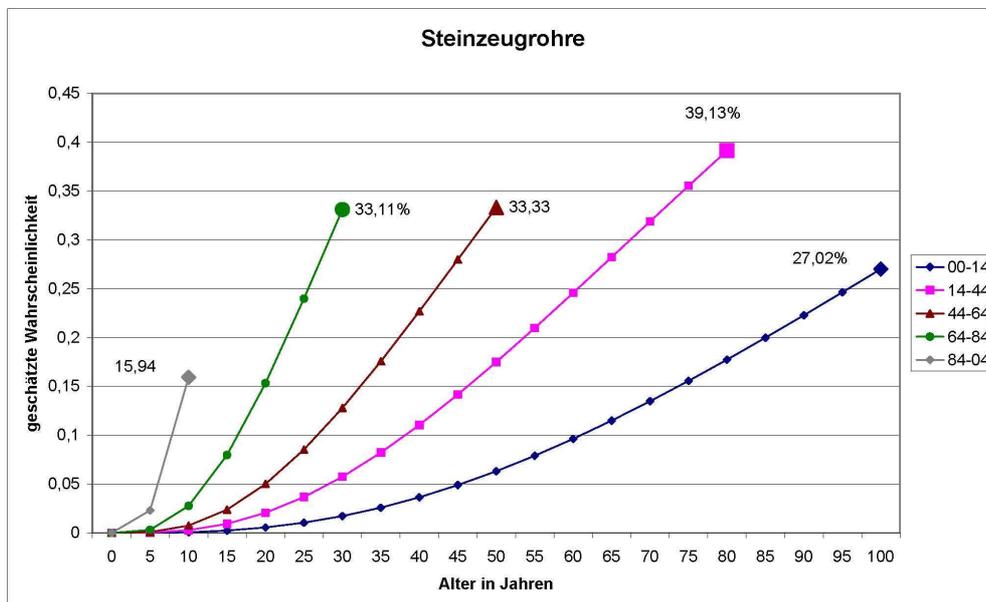


Abbildung 6.2: Graphen der geschätzten Wahrscheinlichkeiten $p_s^{(k)}$ der 5 Schichten der Materialgruppe *Steinzeugrohre*

$p_s^{(k)}$ für die Altersgruppe *00-14* nur sehr langsam zunehmen. Das selbe gilt für die Altersgruppe *14-44*. Hier spielt das hohe Alter eine Rolle, warum die Übergangswahrscheinlichkeiten so gering sind. Bei den Kanalhaltungen aus der Altersgruppe

84-04 wiederum ist es das geringe Alter von 10 Jahren, das die Übergangswahrscheinlichkeiten besonders hoch werden lässt. Die Graphen der Altersgruppen 44-64 und 64-84 liegen sehr knapp zusammen und scheinen brauchbare Übergangswahrscheinlichkeiten für die Prognose aller Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Beton* zu liefern.

Betrachtet man die Graphen der Materialgruppe *Steinzeugrohre*, so zeigt sich ein ähnliches Bild. Die beiden Graphen der Altersgruppen 44-64 und 64-84 liegen hier allerdings nicht mehr so knapp nebeneinander. Aber es scheint, dass auch diese beiden Altersgruppen brauchbare Übergangswahrscheinlichkeiten für eine Prognose aller Kanalhaltungen aus dieser Materialgruppe liefern.

6.3 Prognosen der Zustandswahrscheinlichkeiten

6.3.1 Prognosen ohne Sanierung

Für die Berechnung der Vektoren der Zustandswahrscheinlichkeiten wird die Formel

$$\hat{p}^{(0)} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - \hat{p}_{44} & \hat{p}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \hat{p}_{55} & \hat{p}_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \hat{p}_{66} & \hat{p}_{66} \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} \hat{p}_s^{(t)} \\ \hat{p}_4^{(t)} \\ \hat{p}_5^{(t)} \\ \hat{p}_6^{(t)} \end{pmatrix}$$

mit

$$\hat{p}^{(0)} = \begin{pmatrix} \hat{p}_s^{(0)} & \hat{p}_4^{(0)} & \hat{p}_5^{(0)} & \hat{p}_6^{(0)} \end{pmatrix}$$

verwendet.

Die Anfangsverteilung ist genau der Vektor jener Wahrscheinlichkeiten, mit der eine Kanalhaltung heute in eine bestimmte Zustandsklasse fällt. Für die Materialgruppe *Beton* ist also die Anfangsverteilung gegeben durch

$$\hat{p}_B^{(0)} = (0,1191 \quad 0,1333 \quad 0,2165 \quad 0,5311)$$

und für die Materialgruppe *Steinzeugrohre* gilt die Anfangsverteilung

$$\hat{p}_{STZ}^{(0)} = (0,2826 \quad 0,2944 \quad 0,1810 \quad 0,2420) .$$

Als Übergangswahrscheinlichkeiten wurden jeweils die geschätzten Übergangswahrscheinlichkeiten für die Altersgruppen 44-64 verwendet.

$$\hat{P}_{44-64,B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,063315 & 0,936685 & 0 & 0 \\ 0 & 0,040783 & 0,959217 & 0 \\ 0 & 0 & 0,019615 & 0,980385 \end{pmatrix}$$

ist somit die Übergangsmatrix für die Materialgruppe *Beton* und

$$\hat{P}_{44-64,STZ} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,028711 & 0,971289 & 0 & 0 \\ 0 & 0,084915 & 0,915085 & 0 \\ 0 & 0 & 0,033164 & 0,966836 \end{pmatrix}$$

ist die Übergangsmatrix für die Materialgruppe *Steinzeugrohre*.

Die Zustandswahrscheinlichkeiten nach t Jahren berechnen sich dann aus

$$\hat{p}_B^{(0)} \cdot \hat{P}_{(44-64,B)}^t$$

und

$$\hat{p}_{STZ}^{(0)} \cdot \hat{P}_{(44-64,STZ)}^t$$

Die Veränderung der Zustandswahrscheinlichkeiten lässt sich wiederum als Graph in einem Diagramm darstellen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl bei der

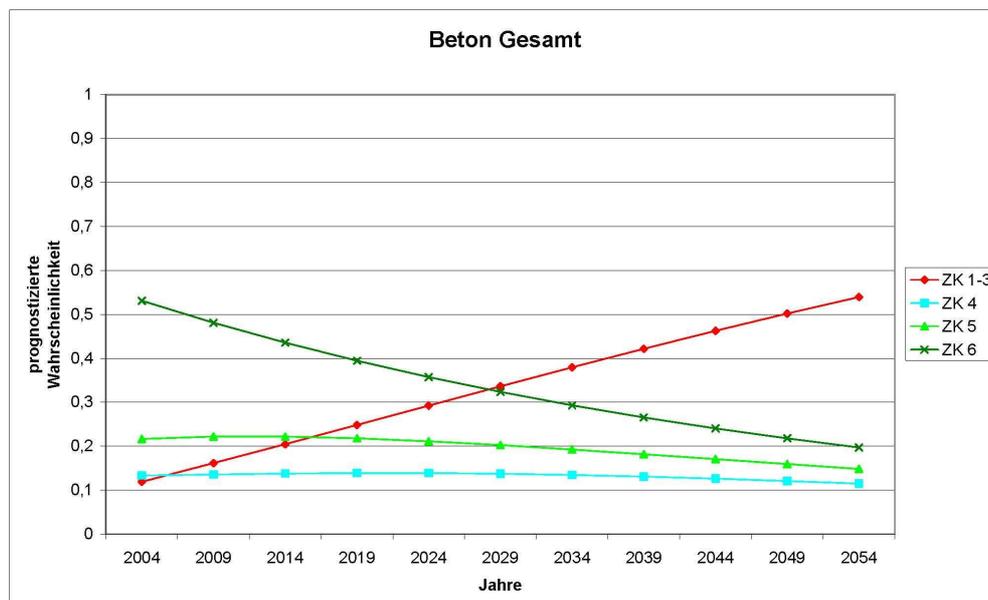


Abbildung 6.3: Prognose der Zustandswahrscheinlichkeiten der Materialgruppe *Beton* ($\hat{p}_B^{(t)}$) wenn keine Sanierung stattfindet

Materialgruppe *Beton*, als auch bei der Materialgruppe *Steinzeug* der Anteil der sanierungsbedürftigen Kanalhaltungen zunimmt. Die Kanalhaltungen, die sich derzeit in der Zustandsklasse 6 befinden werden mit der Zeit immer weniger. Auch die Anteile der Kanalhaltungen in den Zustandsklassen 4 und 5 werden mit der Zeit immer geringer. Bemerkenswert ist die Geschwindigkeit mit der der Anteil an zu sanierenden Kanalhaltungen zunimmt. So kann erwartet werden, dass

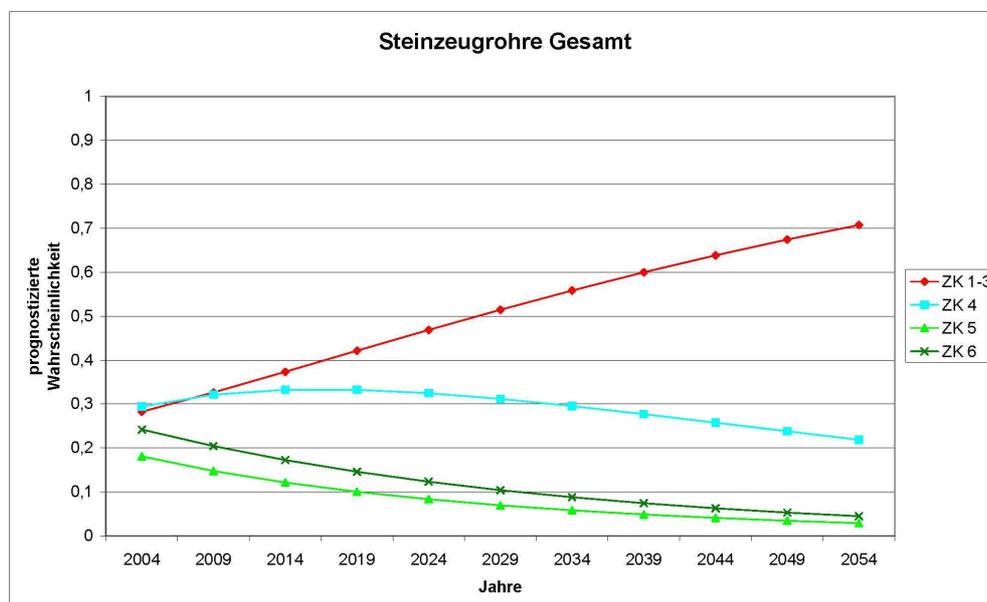


Abbildung 6.4: Prognose der Zustandswahrscheinlichkeiten der Materialgruppe *Steinzeugrohre* ($\hat{p}_{STZ}^{(t)}$) wenn keine Sanierung stattfindet

etwa ab dem Jahr 2050 mehr als 50% der Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Beton* zu sanieren sind. Die Kanalhaltungen aus der Materialgruppe *Steinzeugrohre* überschreiten die 50%-Marke wahrscheinlich bereits im Jahr 2029. Dieses schnellere Alterungsverhalten der Steinzeugrohre ist auf den generell schlechteren Zustand der Kanalhaltungen aus dieser Materialgruppe heute zurückzuführen.

6.3.2 Prognosen mit Sanierung

Um die zukünftigen Sanierungsarbeiten in das Modell aufzunehmen, ist eine weitere Übergangswahrscheinlichkeit in die Übergangsmatrix aufzunehmen. Bisher war die Wahrscheinlichkeit p_{s6} gleich 0. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine sanierungsbedürftige Kanalhaltung saniert wird, war also auf 0 gesetzt. Setzt man diese Wahrscheinlichkeit nun auf einen Wert größer 0, so ändert sich auch die Übergangswahrscheinlichkeit p_{ss} auf einen Wert kleiner als 1. Ein Modell das den zukünftigen Sanierungsgrad mit berücksichtigt, würde also folgendermaßen aussehen:

$$\hat{p}^{(0)} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \hat{p}_{s6} & 0 & 0 & \hat{p}_{s6} \\ 1 - \hat{p}_{44} & \hat{p}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \hat{p}_{55} & \hat{p}_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \hat{p}_{66} & \hat{p}_{66} \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} \hat{p}_s^{(t)} \\ \hat{p}_4^{(t)} \\ \hat{p}_5^{(t)} \\ \hat{p}_6^{(t)} \end{pmatrix}. \quad (6.13)$$

$\hat{p}^{(0)}$ ist hierbei wiederum der Ausgangsvektor wie in Abschnitt 6.3.1. \hat{p}_{s6} ist die geschätzte Wahrscheinlichkeit, dass eine sanierungsbedürftige Kanalhaltung in der nächsten Bauperiode auch saniert wird, also in die Zustandsklasse 6 wechselt. Diese Wahrscheinlichkeit kann allerdings nicht aus den vergangenen Daten geschätzt werden, sondern unterliegt einer subjektiven Schätzung. So ist zwar bekannt, dass die jährliche Sanierungstätigkeit pro Jahr etwa 8 km ausmachen wird, wie diese 8 km allerdings auf die verschiedenen Materialgruppen aufgeteilt werden ist nicht bekannt.

Es erscheint aber plausibel, dass jeweils 10% der sanierungsbedürftigen Kanalhaltungen aus den Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre* pro Jahr saniert werden können. Damit wird in den beiden Prognosemodellen $\hat{p}_{s6} = 0,1$ gesetzt.

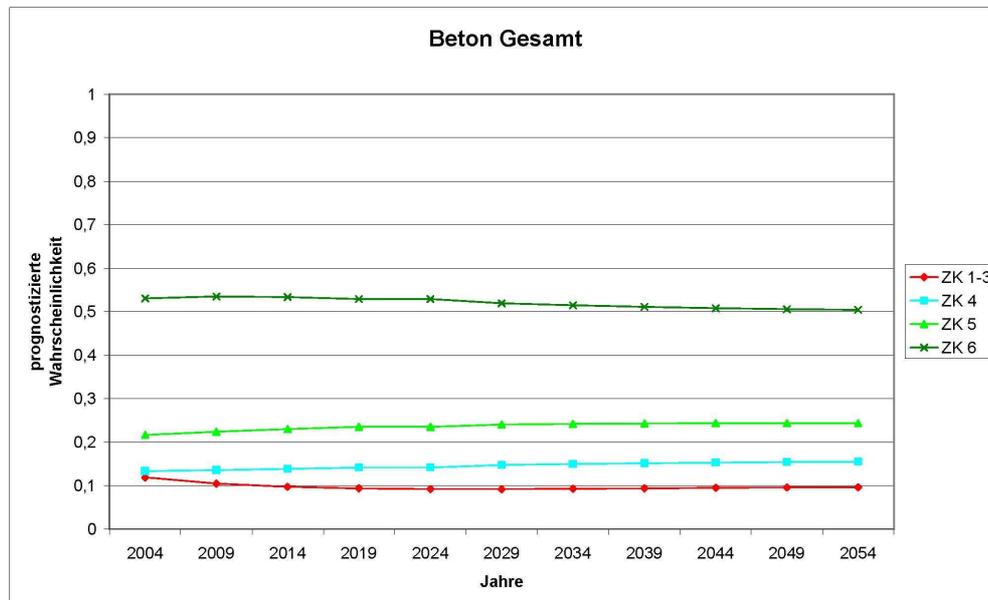


Abbildung 6.5: Prognose der Zustandswahrscheinlichkeiten der Materialgruppe *Beton* ($\hat{p}_{B,san}^{(t)}$) bei einer Sanierungswahrscheinlichkeit von 10% pro Periode

Bei einer jährlichen Sanierung von 10% der sanierungsbedürftigen Kanalhaltungen der Materialgruppe *Beton* erkennt man dass sich die momentane Verteilung nur geringfügig verändert. Der Anteil an zu sanierenden Kanalhaltungen geht im Jahr 2014 knapp unter die 10%-Marke und wird, bei einem gleichbleibenden Sanierungsgrad, die darauffolgenden Jahre knapp unter dieser Marke bleiben. Der Anteil der Kanalhaltungen in der Zustandsklasse 6 wird sich konstant über der 50%-Marke halten. Um also den derzeitigen, relativ guten Status Quo beibehalten zu können, genügt es, wenn pro Jahr 10% der sanierungsbedürftigen Kanalhaltungen saniert werden.

Ein etwas anderes Bild zeigt sich bei den Kanalhaltungen aus der Material-

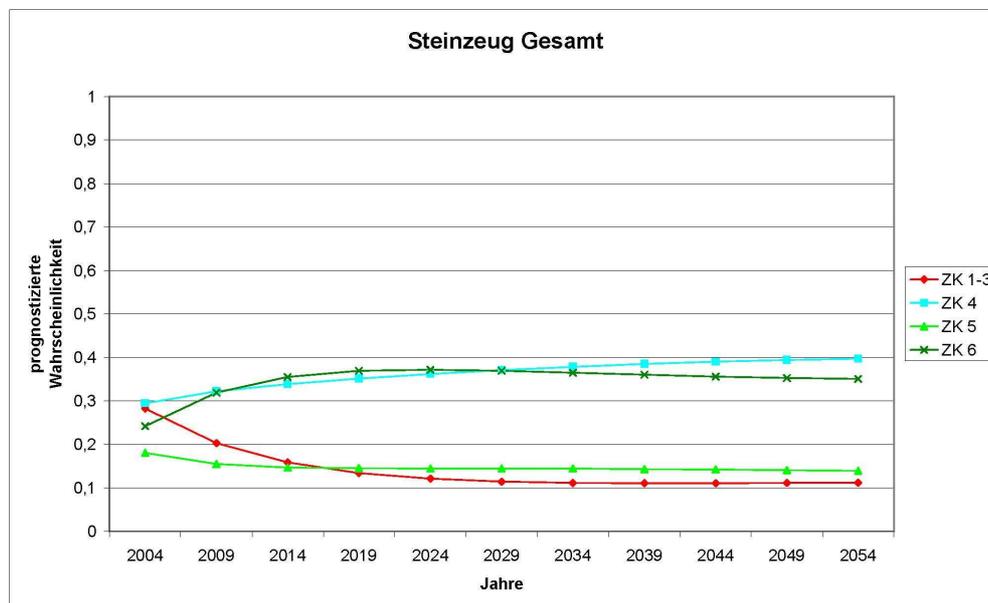


Abbildung 6.6: Prognose der Zustandswahrscheinlichkeiten der Materialgruppe *Steinzeugrohre* ($\hat{p}_{STZ,san}^{(t)}$) bei einer Sanierungswahrscheinlichkeit von 10% pro Periode

gruppe *Steinzeugrohre*. Aufgrund der wesentlich „schlechteren“ Anfangsverteilung, geschätzte 28,26% der Kanalhaltungen sind sanierungsbedürftig, zeigt sich eine Abnahme der sanierungsbedürftigen Kanalhaltungen über die ersten 20 Jahre. Danach wird sich der Anteil an sanierungsbedürftigen Kanalhaltungen aus dieser Materialgruppe bei einem Wert von knapp über 10% einpendeln. Die Anteile an Kanalhaltungen in den Zustandsklassen 4 und 6 werden zunehmen. Beachtenswert ist, dass bei dieser Prognose der Anteil an Kanalhaltungen in der Zustandsklasse 4 höher sein wird, als jener in der Zustandsklasse 6. Dies kann auf die relativ hohe Übergangswahrscheinlichkeit \hat{p}_{54} zurückgeführt werden.

6.4 Anmerkungen zu den Prognosemodellen

Die konkreten Ergebnisse der Prognosen hängen von den vorhandenen Daten ab. Diese sind allerdings noch sehr lückenhaft. Daher sind derzeit Prognosen nur, für die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeugrohre* möglich. Je besser die Datenbasis, desto genauere und zuverlässigere Prognosen lassen sich angeben.

Zukünftig sollten alle Untersuchungs- und Sanierungsergebnisse gesammelt und zentral gespeichert werden. Somit besitzt man in Zukunft auch historische Daten der Kanalentwicklung. Aufgrund dieser Entwicklungen kann man den ak-

tuellen Zustand des Grazer Kanalnetzes besser abschätzen und auch genauere Prognosen über dessen Weiterentwicklung treffen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde aufgezeigt, welche statistischen Möglichkeiten man bei einer großen und äußerst heterogenen Grundmenge hat. Die Grazer Abwasserkanäle fallen genau in diese Kategorie. Da eine Gesamtuntersuchung weder zeitlich noch finanziell möglich und sinnvoll ist, müssen Stichproben gezogen werden. Diese Stichproben sollen grundsätzlich zufällig sein, jedoch kann man über eine Schichtenbildung der Stichprobe eine gewisse Struktur abbilden aus der man dann besser auf den Gesamtnetzzustand schließen kann.

Mit Hilfe des Kanalbauamts der Stadt Graz (Herr DI. Werner Sprung) sowie des Referats für Statistik unter der Leitung von Herrn Nestler war es mir möglich erste Inspektionsdaten zu sichten und zu bewerten.

Mittels der beiden Merkblätter ATV-M 143, Teil 2 [ATV99a] und ATV-M 149 [ATV99b] wurden diese Inspektionsdaten den einzelnen Zustandsklassen zugeordnet und konnten somit in ein statistisches Modell eingearbeitet werden.

Mit Hilfe der mir zugänglichen Gesamtdaten des Grazer Kanalnetzes und der zusammen mit Herrn DI Sprung ausgearbeiteten Schichtung war es dann weiter möglich einen ersten Stichprobenplan zu erstellen, der auch vorhandene Inspektionskapazitäten der Stadt Graz berücksichtigte.

Aufgrund der bereits untersuchten Kanalhaltungen konnte sogar eine erste Hochrechnung für einzelne Netzteile bestimmt werden. Diese Hochrechnungen und deren Konfidenzintervalle für die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeug* zeigen bereits erste Unterschiede zwischen den beiden Materialgruppen. Man kann aber auch schon Unterschiede in der Netzgüte der verschiedenen Altersgruppen erkennen.

Aufgrund dieser bereits untersuchten Kanalhaltungen wurde ein weiterer Inspektionsplan erstellt, der die bereits untersuchten Kanalhaltungen miteinbezieht

und somit einen wesentlich größeren Inspektionsumfang hat. Dieser Inspektionsplan würde bereits sehr gute Datenqualitäten liefern und eine weitere Planung der Inspektionen ermöglichen.

Ein mögliches Prognosemodell wurde mit Hilfe von Markovketten gefunden. Hierbei war allerdings wiederum nur das Erstellen eines Prognosemodells für bestimmte Netzteile möglich. Diese Prognosemodelle konnten aufgrund der vorhandenen Daten nur für die Materialgruppen *Beton* und *Steinzeug* berechnet werden. Damit konnte simuliert werden wie sich der Zustand der Kanalhaltungen dieser Materialgruppen in Zukunft entwickeln wird, wenn keine Sanierung stattfindet oder wenn pro Jahr 10% der zu sanierenden Kanalhaltungen saniert werden. Es zeigt sich, dass das System bereits bei einem relativ geringen jährlichen Sanierungsgrad stabil bleibt (*Beton*) bzw. die zu sanierenden Kanalhaltungen abnehmen (*Steinzeugrohre*).

Einige ungelöste Probleme wurden auch aufgezeigt. So spiegeln die Gesamtnetzdaten nicht die tatsächlichen Verhältnisse im Grazer Kanalnetz wider. Die Datenqualität innerhalb dieser Gesamtnetzdaten ist zum Teil nicht gut. So gibt es häufig keine Zuordnung von einzelnen Kanalhaltungen zu deren Materialgruppe und zu deren Altersgruppe. Daher können diese Kanalhaltungen auch keiner Schicht zugeordnet werden und blieben daher unberücksichtigt.

Weiters sollen die Inspektionsbeschreibungen und -aufzeichnungen standardisiert werden, damit sie auch elektronisch weiterverarbeitet werden können. Nur dann kann auch eine gute statistische Auswertung der Inspektionsdaten gewährleistet werden und in weiterer Folge auch eine gute Prognose über die weitere Entwicklung des Zustandes des Kanalnetzes erzielt werden. Schlussendlich kann man mit guten Inspektionsdaten auch die Prognosemodelle weiter verbessern und so den Sanierungsaufwand für die kommenden Jahre genau planen und besser budgetieren.

Literaturverzeichnis

- [AC00] A. Agresti and B. Caffo. Simple and Effective Confidence Intervals for Proportions and Differences of Proportions Result from Adding Two Successes and Two Failures. *The American Statistician*, 54(4):280–288, 2000.
- [ATV99a] *MERKBLATT ATV-M 143, Teil 2*, April 1999. Optische Inspektion - Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen.
- [ATV99b] *MERKBLATT ATV-M 149*, April 1999. Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden.
- [Böl04] K.-P. Bölke. *Kanalinspektion, Zustände erkennen und dokumentieren*. Springer, Berlin, 2004.
- [Fär01] E. Färber. *Ober und unter der Erde...* Eigenverlag, A-8042 Graz, 2001.
- [Gru99] C. Gruschwitz. Sanierungsplanung von Abwassernetzen - „ganzheitliche Betrachtung“ der Vorgehensweise, September 1999.
- [Guj99] W. Gujer. *Siedlungswasserwirtschaft*. Springer, Berlin, 1999.
- [HK99] E. Hartwig and R. Krug. Selektive Inspektionsstrategie und statistisch / prognostische Sanierungsmodelle. *Korrespondenz Abwasser*, 46(11):1703–1708, 1999.
- [KKR02] H. Kainz, E. P. Kauch, and H. Renner. *Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft*. MANZ Verlag Schulbuch GmbH, Wien, 2002.
- [LL91] P. S. Levy and S. Lameshow. *Sampling of Population, Methods and Applications*. A Wiley-Interscience Publication, New York, 1991.
- [Mül04] K. Müller. Selektive Inspektion von Kanalisationen. *KA-Abwasser, Abfall*, 51(8):831–836, 2004.

- [QH64] C. P. Quesenberry and D. C. Hurst. Large-Sample Simultaneous Confidence Intervals for Multinomial Proportions. *Technometrics*, 6:191–195, 1964.
- [Saw91] J. Sawatzki. Verfahrensmodell zur Klassifizierung an Entwässerungskanälen. *KA-Abwasser, Abfall*, (12), 1991.
- [Spr06] W. Sprung. Kanalsanierungskonzept 2006+, 2006.