

# **Vergleichende Bewertung von zwei Modellen zur Rohrschadensprognose am Beispiel ländlicher Trinkwasserversorgungsnetze**

Masterarbeit zum Erwerb des  
akademischen Titels Diplomingenieur der  
Studienrichtung Bauingenieurwesen

**Markus Günther**

Verfasst am Institut für  
Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau  
der Technischen Universität Graz

Betreuende der Masterarbeit:  
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch  
DDipl.-Ing. Franz Friedl  
Dipl.-Ing. Lisa Scholten

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

Graz, Januar 2013

Kontakt:  
Markus Günther  
mar.guenther84@gmail.com

## **Eidesstattliche Erklärung**

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

## **Statutory Declaration**

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

Graz, am .....

.....

(Markus Günther)

## Danksagung

An dieser Stelle der Arbeit ist es Zeit „Danke“ zu sagen. Es ist mir ein außerordentliches Bedürfnis all jenen besonderen Menschen zu danken, die nicht nur maßgeblich an der Entstehung dieser Arbeit beteiligt waren sondern mich während meines Studiums immer vollendsunterstützt haben.

Mein erster ganz großer Dank gilt meiner Familie, meinen Großeltern, Eltern und meiner Schwester. Meinem Vater Helmut sowie meiner Mutter Ingrid, möchte ich im Speziellen für die Ermöglichung eines Studiums und die tatkräftige Unterstützung auf allen Ebenen, danken. Meiner Schwester Ingrid danke ich für ihr Verständnis und ihr immer offenes Ohr, während eines nicht immer einfachen Studentenlebens. Meiner Freundin Anna ein großes, aufrichtiges Dankeschön für die viele Kraft, Energie und Toleranz welche Sie mir in den letzten Jahren entgegengebracht hat. Weiters möchte ich mich hiermit bei all meinen Freunden bedanken, besonders bei Kevin, der mir in dieser Zeit aktiv zur Seite stand.

Seitens der TU Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau möchte ich mich in besonderer Weise bei meiner Betreuerin Frau Daniela Fuchs-Hanusch für die tolle Zusammenarbeit, und die Bereitschaft auch in der persönlichen Freizeit auf Fragen und Unklarheiten einzugehen, bedanken. Meinem Betreuer Herrn Franz Friedl der mich bereits im Zuge eines Masterprojektes betreut hat, gilt ebenfalls ein herzlicher Dank.

Ein besonderes Dankeschön ergeht auch an meine BetreuerInnen aus der Schweiz, Frau Lisa Scholten, Andreas Scheidegger und Max Mauerer, die mich während- und auch nach meinem Aufenthalt an der EAWAG Dübendorf engagiert unterstützt haben.

Beiden Forschungseinrichtungen gebührt ein herzliches Dankeschön für die reibungslose Abwicklung meines Aufenthalts in der Schweiz, welcher einen wesentlichen Beitrag zur Verfassung dieser Arbeit leistete, und mir die Möglichkeit gab neue Freunde kennenzulernen sowie meinen Horizont zu erweitern.

## Kurzfassung

Die Kenntnis über den Zustand der Trinkwasserleitungen spielt in der modernen Instand- und Erneuerungsplanung eine immer wichtigere Rolle. Vor allem kleine Kommunen stellen aufgrund geringen Datenumfanges eine große Herausforderung für Modelle zur Schadensprognose dar. Ziel dieser Arbeit ist es, basierend auf Datensätzen zweier Wasserversorger aus der Schweiz und aus Österreich, die entwickelten statistischen Modelle der EAWAG Dübendorf und der TU Graz anzuwenden und eine vergleichende Bewertung anzustellen.

Die zu Verfügung gestellten Datengrundlagen wurden mittels PiReM-PHM und einem an der EAWAG entwickelten R-Script auf Plausibilität geprüft und für die Modellanwendung aufbereitet. Für die Modellberechnungen wurden nur in Betrieb stehende Versorgungsleitungen verwendet. Im Zuge der Berechnungen wurden die differierenden Modellansätze beurteilt. Im Gegensatz zum Schweizer Modell (SWIP-PFM) werden im Grazer Modell dem ein Proportional Hazards Ansatz zu Grunde liegt (PiReM-PHM), keine Annahmen bezüglich einer statistischen Verteilung für das Auftreten von Schäden getroffen. SWIP-PFM berücksichtigt datenbedingte Herausforderungen wie Links-Trunkierung und Rechts-Zensur, des Weiteren wurde ein Erneuerungsmodell in das Prognosemodell implementiert. Das Schweizer Modell trifft starke Annahmen hinsichtlich der Verteilung der Zeit bis zum Eintritt des ersten Schadens (Weibull-verteilt) sowie für die Zeit zwischen den Schäden (exponentialverteilt).

Die Modellrechnungen wurden an beiden Datensätzen durchgeführt und haben gezeigt, dass beide Modelle in der Lage sind mit den verfügbaren Daten umzugehen und Prognosen zu rechnen. Beide Modelle überschätzten (zum Teil auch unterschätzten) die in der Realität beobachteten Schadensraten ( $\#/(km \cdot a)$ ). Die Abweichung und Gegenüberstellung der Modelle erfolgte anhand einer eingeführten Kennzahl die durch den Quotienten aus prognostizierter Schadensrate und beobachteter Schadensrate gebildet wird.

*Schlagwörter: Schadensprognose, Trinkwasserversorgungsleitungen, Proportional Hazards Model, Weibull- Exponential- Modell*

## Abstract

For modern rehabilitation planning on water distribution systems it's necessary to be aware of the condition of this buried infrastructure. In case of this thesis, small distribution networks from Switzerland and Austria provide their data. Especially for small water distribution networks it's difficult to predict the expected number of future failures because of a lack of documented failure records. The aim of this thesis is to compare statistical Models for pipe failure prediction developed at EAWAG Dübendorf and TU Graz.

After checking the data in consideration of plausibility with the aid of PiReM-PHM and an R-code developed on EAWAG, the data sets were prepared particularly to fulfill the specific requirements of those statistical models. The model developed in Austria assumes no statistical distribution for the time between pipe failures. The SWIP-Pipe Failure Model assumes that the time from construction until the first failure is Weibull distributed, and all following pipe breaks are exponential distributed with the same rate parameter.

SWIP-PFM handles censored data availability like left truncation and right censored data. Furthermore a so called replacement model was implemented in SWIP-PFM.

The results after operating both statistical models were: Both Methods were able to handle the data, in case of both models the predicted pipe failure rate was higher than the observed failure rate. The deviation from the observed conditions were derived by the ratio of predicted failure rate and observed failure rate.

*Keywords: statistical Models, pipe failure prediction, water supply pipes, proportional hazards model, weibull- exponential model*

## **Gleichheitsgrundsatz**

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Ziel .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Regelwerke, Richtlinien- und Normen .....	3
2.1.1	Österreich .....	3
2.1.2	Schweiz.....	7
2.1.3	Ausgangssituation Richtlinien Schweiz – Österreich .....	10
2.2	Stand der Wissenschaft in der Schadensprognose an Trinkwasserleitungen 11	
2.2.1	Statistische Modelle .....	12
2.2.2	Zensierte und Trunkierte Daten .....	13
2.3	Prognosemodelle TU Graz und EAWAG Dübendorf .....	14
2.3.1	PiReM-PHM TU Graz .....	14
2.3.2	SWIP-PFM Modell, EAWAG- Dübendorf .....	17
2.3.3	Wesentliche Unterschiede am Modellansatz PHM TU Graz- und SWIP- PFM Eawag Dübendorf .....	19
<b>3</b>	<b>Datenbasis und Vergleich der Datengrundlagen.....</b>	<b>20</b>
3.1	Wasserversorgungsunternehmen Österreich (WV-AUT).....	21
3.1.1	Netzstruktur WV-AUT .....	21
3.1.2	Anmerkungen zur Datenaufbereitung WV-AUT .....	26
3.2	Wasserversorgungsunternehmen Schweiz (WV-CH).....	26
3.2.1	Anmerkungen zur Datenaufbereitung WV-CH .....	32
3.3	Vergleichbarkeit der Netze- Resümee.....	32
<b>4</b>	<b>Modellvergleich .....</b>	<b>37</b>
4.1	Datenaufbereitung für Modellanwendung.....	38
4.2	Berechnung Szenario 1 bis 4 .....	39
4.2.1	Modellrechnung SWIP-PFM.....	40
4.2.2	Parameterschätzung SWIP-PFM .....	42
4.2.3	Modellrechnung PiReM- PHM.....	44
4.3	Zielgröße und Verifizierung .....	48
<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>49</b>

5.1	Ergebnisse SWIP-PFM.....	49
5.1.1	SWIP-PFM mit Daten WV-CH.....	49
5.1.2	SWIP-PFM mit Daten WV-AUT.....	51
5.2	Ergebnisse PiReM-PHM.....	53
5.2.1	PiReM-PHM mit Daten WV-CH (Gruppiert) .....	53
5.2.2	PiReM-PHM mit Daten WV-CH (ohne Gruppenbildung).....	58
5.2.3	PiReM-PHM mit Daten WV-AUT.....	61
<b>6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>	<b>71</b>

## Abkürzungsverzeichnis

PiReM – PHM.....	PiReM - Proportional Hazards Model
SWIP – PFM.....	SWIP – Pipe Failure Model
AVS.....	Anzahl der Vorschäden
WV-AUT.....	Österreichischer Wasserversorger (Datengrundlage)
WV-CH.....	Schweizer Wasserversorger (Datengrundlage)
WVU.....	Wasserversorgungsunternehmen
VL.....	Versorgungsleitung
AL.....	Anschlussleitung
ÖVGW.....	Österr. Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
SVGW.....	Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches
EW.....	Einwohner
MLE.....	Maximum Likelihood Estimation
SR.....	Schadensrate

# 1 Veranlassung und Ziel

Eine immer wesentlichere Rolle in der modernen Instand- und Erneuerungsplanung von unterirdischer Infrastruktur spielt die Kenntnis über den Zustand der Trinkwasserleitungen, auf die in der vorliegenden Arbeit im Speziellen eingegangen wird. Vor allem für kleine Kommunen ist der Zustand von großem Interesse da sich deren Versorgungsnetze im Gegensatz zu denen von Städten vergleichsweise klein darstellen. Speziell Aufzeichnungen sind in kleinen Kommunen oft weniger detailliert als in Städten.

Die unterirdische Infrastruktur im Trinkwassersektor ist historisch gewachsen und erstreckt sich über mehrere Generationen. Wie sich die Aufgaben rund um das Lebensmittel Nummer Eins in Zukunft entwickeln werden, konnte beim Einbau der ersten Trinkwasserleitungen nur erahnt werden. Heutzutage rückt dieses Thema immer mehr in den Vordergrund, zumal man für eben diese Infrastruktur den Zustand nur sehr eingeschränkt überprüfen kann. Hingegen gestaltet sich eine Beurteilung oberirdischer Bauwerke vergleichsweise einfach. Risse, Beschädigungen, zu große Verformungen und dergleichen können meist bereits mit freiem Auge erkannt werden. Kommt es an einer im Untergrund gelegenen Trinkwasserleitung zu einem Schaden bzw. Bruch, so äußert sich dieser durch Verluste im Netz oder auch durch den an der Oberfläche ersichtlich werdenden Wasseraustritt. Dieser Wasseraustritt hat unter Umständen negativen Einfluss auf die angrenzenden Infrastrukturen wie Straßen oder benachbarte Gebäude und verursacht damit direkte und indirekte Kosten für den Leitungsträger. Das Schadensereignis muss nicht immer eine entsprechende Größe aufweisen und an der Oberfläche sofort sichtbar werden, auch kleine Leckagen mit einer langen unbemerkten Laufzeit können Stabilitätsprobleme im Untergrund durch Auswaschen von Sandfraktionen verursachen. Kleinere Leitungsschäden mit langen Laufzeiten sind zudem sehr schwer detektierbar, da das Austrittsgeräusch durch das bereits anstehende ausgetretene Wasser sehr stark gedämpft wird.

Der aus diesen Leckagen entstehende Wasserverlust wirkt sich nicht nur monetär sondern auch im Hinblick auf eine angemessene Ressourcenschonung nachteilig aus. Aus diesem Grund ist es von bedeutendem Interesse, die Wasserverluste und somit auch die Schäden im Hinblick auf Wasserqualität und Einhaltung des Mindestversorgungsdruckes an den Trinkwasserleitungen möglichst gering zu halten. Ein völlig „dichtes“ System wird nicht erreichbar sein, jedoch gibt es bereits zahlreiche Ansätze welche sich mit der Thematik der Schadensprognose an Trinkwasserleitungen auseinandersetzen und auch eine nachhaltige Rehabilitationsplanung im Zuge dessen anstreben (Kleiner, Adams et al. 2001; Fuchs-Hanusch, Kornberger et al. 2011; Scholten, Scheidegger et al. 2012 unter vielen).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich anfangs zum einen mit dem aktuellen Stand der Wissenschaft hinsichtlich Schadensprognosemodelle, zum anderen werden einschlägige Normen und Richtlinien aus Österreich und der Schweiz, welche speziell

diesen Themenbereich (Netzdokumentation und Instandhaltungsmanagement) behandeln, angeführt. Eine Beschreibung der anzuwendenden Prognosemodelle TU Graz und EAWAG Dübendorf hinsichtlich deren statistischer Ansätze ist vor der Erklärung der Datengrundlage eingegliedert.

Grundlage für Schadensprognosen an Trinkwasserleitungen bilden im Allgemeinen Daten, die Informationen über alle bekannten Leitungsabschnitte beinhalten. Neben den leitungsspezifischen Eigenschaften wie Verlegejahr, Material und Durchmesser haben vor allem die möglichst detaillierten Schadensaufzeichnungen eine signifikante Bedeutung. Nur anhand solcher Informationen ist es mit statistischen Herangehensweisen möglich, Modelle zu generieren und in Zukunft auftretende Schäden zu prognostizieren.

Die Anwendung solcher Modelle setzt eine fundierte Kenntnis der verwendeten Daten voraus.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf Trinkwasserversorgungsleitungen ländlicher Kommunen aus der Schweiz und aus Österreich mit einer Größe von rund 5 00 bis 5 000 Einwohnern. Im Gegensatz zu Städten sind hier die verwendeten Leitungsdurchmesser je nach Randbedingungen wesentlich kleiner als in städtischen Netzen. Alleine schon aus diesem Grund ist es hinsichtlich Versorgungsstruktur von großem Interesse wie sich die Verteilung der verlegten Durchmesser darstellt, um zwischen Hausanschlüssen, Transport- und Versorgungsleitungen differenzieren zu können. Es sei erwähnt, dass im Allgemeinen keine Differenzierung der Leitungsart (Transportleitung, Haupt- und Zubringerleitungen, Versorgungsleitung) nur aufgrund der Durchmesserinformation getroffen werden kann. Leitungen mit einem Durchmesser von beispielsweise 200 mm können in ländlichen Netzen bereits Transportleitungen sein, wogegen diese im städtischen Bereich aufgrund deren Funktion vielleicht noch als Versorgungsleitung zu deklarieren sind.

Auf den Umgang mit den zur Verfügung gestellten Netzdaten wird im Kapitel Grundlagen vertieft eingegangen. Es sei jedoch an dieser Stelle bereits angemerkt, dass eine gründliche Datenaufbereitung unumgänglich ist um Widersprüche in den Daten hinsichtlich Modellrechnungsergebnisse auszuschließen, beispielsweise Plausibilitätsprüfung der Beziehung Verlegejahr – Schadensjahr oder auch Identifizierung von Leitungsabschnitten mit fehlenden Attributen.

Ziel der gegenständlichen Arbeit ist es, anhand von Datengrundlagen aus der Schweiz und aus Österreich die entwickelten Schadensprognosemodelle der beiden Forschungsgruppen gegenüberzustellen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufzuzeigen und anhand der Ergebnisse auf die Vergleichbarkeit sowie auf etwaige Unsicherheiten einzugehen.

## 2 Grundlagen

Das ständig steigende Interesse am Themenkreis Trinkwassernetze und deren optimaler Bewirtschaftung hinsichtlich Netzdokumentation und Instandhaltungsmanagement ist der Grund für vielerlei Tätigkeiten im Trinkwassersektor.

Basis für die folgenden spezifischen Betrachtungen bis hin zum Modellvergleich bilden neben den, von zwei Wasserversorgern zur Verfügung gestellten Datensätzen auch die von den Interessensgemeinschaften für das Gas- und Wasserfach aus der Schweiz und aus Österreich stammenden technischen Regelwerke. Zudem werden einschlägige wissenschaftliche Literatur bzw. Veröffentlichungen betreffend Schadensprognose an Trinkwasserleitungen verwendet.

### 2.1 Regelwerke, Richtlinien- und Normen

Auch die Regelwerke, Normen und Richtlinien mitteleuropäischer Länder, im Fall dieser Arbeit jene der Schweiz und Österreich, werden laufend angepasst um diese Werke am neuesten Stand der Wissenschaft und Technik auszurichten. Die Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW) sowie der Schweizerische Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) bieten betreffend Netzdokumentation und Instandhaltungsmanagement mehrere Regelwerke und Empfehlungen mit verschiedenen Schwerpunkten. Der Inhalt und vergleichbare Werke aus Österreich und der Schweiz werden in den folgenden Unterkapiteln (2.1.1) und (2.1.2) näher erläutert.

#### 2.1.1 Österreich

- *ÖVGW W 85 (2008) – Wartungs- und Betriebshandbuch*

Das Wartungs- und Betriebshandbuch umfasst für Betreiber von Trinkwasserversorgungsanlagen die wesentlichen Punkte hinsichtlich Organisation eines solchen Unternehmens. Diese Richtlinie enthält unter anderem Formularvorlagen wie beispielsweise zur Erstellung einer Schadensstatistik.

Da der Gesetzgeber vorschreibt, die technische und hygienische Funktionsfähigkeit einer Versorgungsanlage in regelmäßigen Abständen von 5 Jahren durch geeignete Anstalten (Sachverständige etc.) überprüfen zu lassen, muss der Betreiber im Hinblick auf Effizienz und Kosten der Fremdüberwachung, über ein Konzept der Eigenüberwachung verfügen. In dieser Richtlinie wird die Erstellung eines Betriebs- und Wartungshandbuches beschrieben.

Ein ordentlich geführtes Betriebs- und Wartungshandbuch gilt als Nachweis der Erfüllung der Sorgfaltspflicht (ÖVGW-Richtlinie-W-85 2008).

- *ÖVGW W 100 (2007) - Betrieb und Instandhaltung*

Gilt für den technischen Betrieb und Instandhaltung von Haupt- und Zubringerleitungen sowie Versorgungs- und Anschlussleitungen bis hin zur Wasserübergabestelle. Diese Richtlinie befasst sich neben den allgemeinen Grundsätzen und Zielen für Betrieb und Instandhaltung auch mit Baumaßnahmen im Bereich von Wasserleitungen, Wasserdurchfluss- und Mengenummessungen sowie der Schadensstatistik (Erfassung und Auswertung von Schäden, führen einer Schadensdatei). Da für eine effiziente Instandhaltungsstrategie eine aussagekräftige Schadensstatistik unverzichtbar ist, wird das Erheben wesentlicher, in der Richtlinie angeführter Punkte, empfohlen.

Jeder Wasserversorger muss in Abhängigkeit der definierten Instandhaltungsziele eine geeignete Instandhaltungsstrategie entwickeln. Diese Strategien werden genauer erläutert und Vor- und Nachteile werden aufgezeigt. Es wird keine Instandhaltungsstrategie vorgeschrieben doch wird dem WVU nahegelegt, eine vorbeugende und zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie zu verfolgen. In diesem Werk werden außerdem Richtwerte für Schadensraten von Trinkwassernetzen zum Zwecke einer Beurteilung angeführt. Jedes WVU hat aufgrund versorgungstechnischen, kundenorientierten- und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine für das Gesamtnetz zulässige Schadensrate festzulegen. Die Schadensrate bezieht sich jeweils auf 100 km und Jahr (#/100 km\*a) (ÖEVBG-Richtlinie-W-100 2007).

**Tabelle 1:** Richtwerte für durchschnittliche Schadensraten am Gesamtnetz (ohne Zubringerleitungen), Datenbasis ÖVGW-Benchmarking Stufe B 2006

Bereiche für Schadensraten	Rohrschadensraten		Empfehlung
	Haupt- und Versorgungsleitungen	Anschlussleitungen	
	Schäden je 100 km und Jahr	Schäden je 1000 AL und Jahr	
Niedrige Schadensrate	< 7	< 3	Standard halten
Mittlere Schadensrate	7 bis 20	3 bis 10	Standard verbessern
Hohe Schadensrate	> 20	> 10	Dringender Handlungsbedarf

Quelle:(ÖEVBG-Richtlinie-W-100 2007)

Zudem wird in dieser Richtlinie auf den Einfluss der Rehabilitationsplanung auf den Verlauf der Schadensrate eingegangen (mit- und ohne Rehabilitation).

Im Hinblick auf die Anwendung von Schadensprognosemodellen ist eine vollständige Erfassung der aufgetretenen Schadensereignisse von vordergründiger Wichtigkeit, weshalb die Erhebung dieser Daten von Sachkundigen durchzuführen ist. Mit dieser Richtlinie ist eine Basis geschaffen, eine möglichst hochwertige und vor allem komplette Schadensdokumentation zu erhalten.

- *ÖVGW W 104 (2010) - Leitungsinformationssystem Wasser und Abwasser-ÖWAV Regelblatt 40*

Umfasst im Wesentlichen Empfehlungen hinsichtlich Umgang und Haltung von Leitungs- und Einbauteninformation. Vordergründig dient diese Empfehlung allen Leitungsverantwortlichen bzw. jenen auf deren Grund und Boden diese verlegt sind und nicht zuletzt dem Kunden der auf diese unterirdische Infrastruktur angewiesen ist und einen einwandfreien und störungsfreien Betrieb dieser Anlagen voraussetzt. Allgemein formuliert dient ein solches Leitungsinformationssystem allen Betreibern von Leitungssystemen hinsichtlich Bau- Planung, Instandhaltung sowie wirtschaftliche und organisatorische Belange.

Die Richtlinie QVGW W 104 dient als Hilfestellung für fachkundiges Personal bei der Erstellung von Leitungsinformationssystemen in Österreich. Zudem beschreibt diese Richtlinie ausführlich wie Daten erhoben, eingearbeitet und gepflegt werden sollten. Des Weiteren wird erläutert wie die Daten verarbeitet, und wie Leitungsdokumentationen dargestellt werden sollten (OEVGW-Richtlinie-W-104 2010).

- *ÖVGW W 105 (2011)- Schadensstatistik, Erfassung und Verarbeitung von Schadensereignissen*

In dieser Richtlinie wird die Erfassung und Auswertung von Schäden standardisiert. Die im vorhergehenden Unterpunkt erläuterte Richtlinie ÖVGW W 100 definiert die Schadensstatistik als Erfassung und Auswertung von Schäden und Schwachstellen von Wasserverteilleitungen. Des Weiteren wird angemerkt dass es hinsichtlich einer objektiven Schadensdokumentation zweckmäßig ist, standardisierte Schadenserhebungsformulare zu verwenden. Dieses Werk legt einheitliche Begriffe und Definitionen für eine Schadens- und Umgebungsbeschreibung fest. Eine Möglichkeit der Schadenserfassung wird mit einem im Anhang ersichtlichen Erfassungsblatt dargelegt Auf diesem Blatt werden Grunddaten, Daten zum undichten Bauteil, die Schadensursache und weitere Zustands- und Umgebungsbeschreibung inkl. Lageskizze von fachkundigem Personal eingetragen (OEVGW-Mitteilung-W-105 2011).

Grunddaten		Schadensnummer:	Bearbeiter:
Datum Schadensaufnahme:		Schadensort:	
Dimension DN (ID / OD)	Überdeckungshöhe:	Leitungsart: <input type="checkbox"/> Leitung <input type="checkbox"/> Zubringerart: <b>3.1</b>	<input type="checkbox"/> Hauptleitung <input type="checkbox"/> Versorgungsleitung <input type="checkbox"/> Anschlussleitung
Druckstufe:	Verlegejahr:	Betriebsdruck:	Planwerk vom Bestand abweichend: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Schadensfeststellung: <input type="checkbox"/> von extern <input type="checkbox"/> Betriebsüberwachung		Schadensart: <input type="checkbox"/> sichtbarer Wasseraustritt <input type="checkbox"/> akustisches Verfahren <input type="checkbox"/> Spülgas	
<b>Undichter Bauteil</b>	Rohr	Formstück	Armatur
genaue Spezifikation des undichten Bauteils	<input type="checkbox"/> AZ <input type="checkbox"/> GFK <input type="checkbox"/> GS <input type="checkbox"/> PVC <input type="checkbox"/> GGG <input type="checkbox"/> PE <input type="checkbox"/> Stahl	<input type="checkbox"/> T-Stück <input type="checkbox"/> Kreuzstück <input type="checkbox"/> Krümmer <input type="checkbox"/> Blindflansch <input type="checkbox"/> Reduktion <input type="checkbox"/> Reparaturschelle	<input type="checkbox"/> Anschlussventil <input type="checkbox"/> Klappe <input type="checkbox"/> Hydrant <input type="checkbox"/> Be- / Entlüftung <input type="checkbox"/> Schieber
			Verbindung: <input type="checkbox"/> Stemmuffe <input type="checkbox"/> Schweißung <input type="checkbox"/> Steckmuffe <input type="checkbox"/> Flansch <input type="checkbox"/> Schraubmuffe <input type="checkbox"/> Gewinde <input type="checkbox"/> Kupplung <input type="checkbox"/> Klemmverbinder <input type="checkbox"/> Sonstiges: <input type="checkbox"/> Anbohrschelle
Schadensart: <input type="checkbox"/> Längsris <input type="checkbox"/> Rundris <input type="checkbox"/> Scherbenbruch <input type="checkbox"/> Loch			
Aussenbeschichtung: <input type="checkbox"/> PP <input type="checkbox"/> PE <input type="checkbox"/> PUR <input type="checkbox"/> Zement <input type="checkbox"/> Zink		<b>3.2</b> <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nicht eindeutig <input type="checkbox"/> keine	
Innenbeschichtung: <input type="checkbox"/> nicht feststellbar <input type="checkbox"/> Zementmörtel <input type="checkbox"/> Bitumen <input type="checkbox"/> Sik		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> keine	
Anmerkung:			
Rohrzustand:		Bettung: <input type="checkbox"/> Lehm <input type="checkbox"/> Sand <input type="checkbox"/> Kies <input type="checkbox"/> Fels	
Reparaturart:		Erd- und Baumeisterarbeiten: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Installationsarbeiten: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Zusatzbemerkung:			
Schadensursache: <input type="checkbox"/> Bodenbewegung <input type="checkbox"/> Korrosion <input type="checkbox"/> Verlegefehler <input type="checkbox"/> Fremdbeschädigung <input type="checkbox"/> Materialfehler <input type="checkbox"/> Materialalterung <input type="checkbox"/> Einfließen			
<b>3.3</b>			
Erweiterte Zustands- und Umgebungsbeschreibung:			
Verkehrsbelastung: <input type="checkbox"/> Verkehr gering / ohne <input type="checkbox"/> Verkehr mittel / hoch			
Oberfläche: <input type="checkbox"/> befestigt <input type="checkbox"/> unbefestigt <input type="checkbox"/> Gehsteig <input type="checkbox"/> Fahrbahn		Aussenbeschichtung: <input type="checkbox"/> vorhanden <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht ersichtlich <input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> schlecht	
		Innenbeschichtung: <input type="checkbox"/> vorhanden <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> nicht ersichtlich <input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> schlecht	
		Rohr im Grundwasser: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Umgebungsmaterial (außerhalb Bettungsmaterial):			
<b>3.4</b>			
Skizze:			
		N	
<b>3.5</b>			
Unterschrift Bearbeiter:		Unterschrift Reparatur-Verantwortlicher:	

Abbildung 2-1: Beispiel für ein Schadenerfassungsblatt

Quelle: (OEVGW-Mitteilung-W-105 2011)

Weitere Informationen den Schaden betreffend, sollen auf der Rückseite des Erhebungsformulars individuell erfasst werden. In dieser Richtlinie werden bezüglich Schadensstatistik Beispiele angeführt, wie zu den Schäden erhobene Informationen zu erfassen sind. Weiters werden Schadensauswertungen und mögliche Darstellungsvarianten im Anhang der Richtlinie angeführt. Dem Umgang mit historischen Daten wird ebenfalls Sorge getragen, so wird dezidiert darauf hingewiesen, dass stillgelegte Leitungsabschnitte sowie die zugehörigen Leitungsinformationen keinesfalls zu verwerfen sind, sondern in der Datenbank verbleiben sollen. Diese verbleibenden Leitungen außer Betrieb sind jedoch in den Bestands- bzw. GIS- Plänen als historische Daten zu kennzeichnen (OEVGW-Mitteilung-W-105 2011).

### 2.1.2 Schweiz

- *SVGW W 4d - Richtlinien für Planung, Projektierung sowie Bau, Betrieb und Unterhalt von Trinkwasserversorgungssystemen außerhalb von Gebäuden (in Überarbeitung)*

Die angeführte Richtlinie SVGW W 4d, befindet sich zum Zeitpunkt dieser Masterarbeit noch in Überarbeitung. Sie legt die Anforderungen an Trinkwasserversorgungssysteme außerhalb von Gebäuden fest. Des Weiteren werden allgemeine Anforderungen an Rohrleitungsteile, an den Bau, der Prüfung und Inbetriebnahme solcher definiert. In der Ausgabe vom Dezember 2004, wird auf keinerlei Schadensaufzeichnung eingegangen. Es wird lediglich erwähnt, dass neu verlegte Leitungen einschließlich detaillierter Angaben über Rohrleitungsteile aufgezeichnet und regelmäßig aktualisiert werden müssen. Die in Überarbeitung befindliche neue Richtlinie SVGW-W-4d (Stand Dezember 2012) besteht aus 4 Teilen.

- Teil 1: Allgemeines
- Teil 2: Planung- und Projektierung
- Teil 3: Bau und Prüfung
- Teil 4: Betrieb und Instandhaltung

Dieser angeführte Teil 4 beinhaltet die für die vorliegende Arbeit relevanten Aspekte Rehabilitationsplanung, Dokumentation von Schäden und Schadensstatistik. Als Grundlage für eine angemessene Rehabilitationsplanung werden technische und wirtschaftliche Kennzahlen wie beispielsweise die Entwicklung der Schadensrate am Gesamtnetz ( $\#/(km \cdot a)$ ) herangezogen (SVGW-Richtlinie-W-4d-Teil 4, in Überarbeitung, Version Dezember 2012). Nachstehender Tabelle 2 sind Richtwerte für Schadensraten (Datenbasis Benchmarking SVGW) zu entnehmen.

**Tabelle 2: Richtwerte für durchschnittliche Schadensraten in Rohrnetzen ohne Zubringerleitungen**

Bereiche für Schadensraten	Rohrschadensraten				Empfehlung
	Haupt- und Versorgungsleitungen		Anschlussleitungen (AL)		
	Schäden je km und Jahr		Schäden je 100 AL und Jahr		
Versorgungsstruktur	ländlich	städtisch	ländlich	städtisch	
Niedrige Schadensrate	< 0.1	< 0.15	< 0.3	< 0.5	Standard halten
Mittlere Schadensrate	0.1 bis 0.2	0.15 bis 0.3	0.3 bis 1	0.5 bis 1.5	Standard verbessern
Hohe Schadensrate	> 0.2	> 0.3	> 1	> 1.5	dringender Handlungsbedarf empfohlen

(Quelle: SVGW-Richtlinie-W-4d-Teil 4, in Überarbeitung, Stand Dezember 2012)

In Punkto Schadensstatistik wird darauf hingewiesen, dass das Erheben von Schadensdaten von sachkundigen Personen durchzuführen ist. Schäden welche aus Fremdeinwirkung resultieren, sind getrennt auszuwerten. Die in der Schadensdatei zu dokumentierenden Punkte werden im Teil 4 angeführt. Um eine Schadensprognose ableiten zu können, ist eine Schadensstatistik auf Grundlage realer Schadensereignisse unabdingbar. Es wird erwähnt, dass die Datenerfassung für die Schadensdokumentation standardisiert und eindeutig sein muss. Beispiele für eine standardisierte Erhebung bzw. ein mögliches Schadenserhebungsblatt werden nicht gegeben.

Es wird empfohlen, nach Außerbetriebnahme einer Leitung, die Grunddaten der stillgelegten Leitung und Armaturen aufzubewahren. Im Fall eines Leitungsersatzes sind die zugehörigen Schadensdaten für eine eventuelle statistische Auswertung in geeigneter Form aufzubewahren (Historie) (SVGW-Richtlinie-W-4d-Teil 4, in Überarbeitung, Stand Dezember 2012)

- *SVGW GW 1002/1d (2001) - Geographische Informationssysteme (GIS) für Werkdaten (Anforderungen , Evaluation , Einführung)*

Der erste Teil dieser Empfehlung soll mittelfristig die Betreiber von Wasserversorgungseinrichtungen dabei unterstützen bzw. als Ratschlag dienen, geographische Informationssysteme einzuführen. Langfristig ist die Festlegung der Daten für den Datenaustausch konzeptioniert. Die Motivation, grundsätzlich Leitungsinformationen zu erfassen und zu unterhalten soll mit dieser Empfehlung gehoben werden.

Diese Empfehlung enthält kein spezielles Datenmodell, das für lauffähige Systeme anwendbar oder gar optimiert wurde. Es wird ein Datenaustauschmodell beschrieben, welches die Daten konvertieren kann um diese in gängigen Systemen zu verwenden. Es handelt sich um ein standardisiertes Austauschmodell, das einem gewissen Aufbau entspricht. Für den Mechanismus der Beschreibung und Datenübertragung wird die bei der amtlichen Vermessung vorgeschriebene Datenbeschreibungssprache INTERLIS verwendet. INTERLIS bildet die Daten in einer formal umfassenden und vor allem Hersteller-unabhängigen Form ab. (SVGW-Empfehlung-GW-1002/1d 2001).

- *SVGW GW 1002/2d (2001) - Geographische Informationssysteme (GIS) für Werkdaten (Datenmodell und Datenkatalog für den Datenaustausch)*

Teil 2 der Empfehlung SVGW GW 1002 behandelt explizit den Umgang mit erhobenen Leitungsinformationen und deren Datenaustausch. Es werden die für die jeweilige Infrastruktur (Gas, Wasser) erforderlichen Eingaben ausführlich erklärt und in Datenkatalogen beispielhaft angeführt (SVGW-Empfehlung-GW-1002/1d 2001).

### 2.1.3 Ausgangssituation Richtlinien Schweiz – Österreich

Beide Vereine für das Gas- und Wasserfach bieten Richtlinien hinsichtlich Betrieb- und Instandhaltung welche sich mit dem Thema Schadensstatistik und Rehabilitationsplanung auseinandersetzen. Die bis dato geltende Schweizer Richtlinie SVGW W 4d (Fassung Dezember 2004) beinhaltet jedoch keine Empfehlungen für den Umgang mit Leitungsschäden und deren Dokumentation. In der in Überarbeitung befindlichen Fassung (Stand Dezember 2012) sind alle Aspekte hinsichtlich Dokumentation und Schadensstatistik enthalten und decken sich im Wesentlichen mit den Empfehlungen der österreichischen Richtlinien ÖVGW W 105 und ÖVGW W 100.

Beide Richtlinien bieten Möglichkeiten hinsichtlich Schadensdokumentation und Umgang mit diesen erhobenen Daten, jedoch sind diese nicht bindend, aber für die Anwendung in Prognosemodellen und statistischen Auswertungen sinnvoll und wünschenswert. Zusätzlich zu den verbalen Formulierungen bezüglich Schadenserhebung, werden in ÖVGW W 105 auch beispielhaft ein Schadenserfassungsblatt und hinsichtlich Rehabilitationsplanung wichtige Auswertungen exemplarisch angeführt.

Ein herauszustreichender Unterschied besteht in der Dauer der Anwendung der genannten Werke. Seit 1.3.2011 ist die Richtlinie ÖVGW W 105 – Schadensstatistik gültig. Bezugnehmend auf die zur Orientierung angegebenen Schadenraten für Rohrnetze ist anzumerken, dass diese in unterschiedlichen Einheiten angegeben werden ( $\# / (100\text{km} \cdot \text{a})$ ) in AUT; sowie ( $\# / (\text{km} \cdot \text{a})$ ) in CH) und sich auch geringfügig in anderen Größenordnungen bewegen. Die Grenzen für die Richtwerte von Schadenraten für ländliche Netze sind für geringe und mittlere Schadenraten in Österreich geringfügig niedriger (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

Die Tatsache, dass beide Regelwerke sehr jung sind, unterstreicht die Wichtigkeit dieses Themas das immer mehr an Bedeutung gewinnt. Für die zukünftige Schadensdokumentation haben beide Länder eine hochwertige Basis geschaffen, und somit den Grundstein einer nachhaltigen, sinnvollen Rehabilitationsplanung. Wie diese Empfehlungen von den WVU angenommen werden, kann an dieser Stelle noch nicht beurteilt werden jedoch sei erwähnt, dass eine sorgfältige Aufzeichnung von Schadensereignissen mit allen relevanten Informationen auch für kleinere Versorgungsunternehmen die Rehabilitationsplanung erleichtern wird.

Nicht zuletzt profitieren die bereits entwickelten Modelle zur Schadensprognose von der stetig steigenden Qualität der Eingangsdaten.

## 2.2 Stand der Wissenschaft in der Schadensprognose an Trinkwasserleitungen

Der Zustand eines Trinkwasserversorgungsnetzes ist auf den ersten Blick nicht festzustellen, jedoch werden zum Teil schon seit langer Zeit Aufzeichnungen über Reparaturen, Schäden an Leitungen und deren Randbedingungen, oft als Leitungsattribute bezeichnet, aufgezeichnet und verwaltet. Wie nun diese Form der Datenhaltung ausgeführt ist, beispielsweise handschriftlich oder bereits in einem Tabellenkalkulationsprogramm hängt meist vom jeweiligen Wasserversorgungsunternehmen und dessen Fortschritt hinsichtlich Wartung, Betrieb sowie Rehabilitationsplanung ab. Dieser Umstand geht unmittelbar mit dem Wissen um den Zustand der vorliegenden unterirdischen Infrastruktur einher.

Die bisher entwickelten Methoden zur Schadensprognose haben alle eine Gemeinsamkeit. Sie basieren auf den bislang erhobenen Informationen des Leitungsnetzes und umfassen neben den spezifischen Leitungsattributen auch die aufgezeichneten Schäden und, soweit bekannt, deren Schadensursache wie beispielsweise einer aufgetretenen lokal begrenzten Setzung. Generell werden nach (Liu, Kleiner et al. 2012) bei der Schadensprognose zwei Modellansätze unterschieden. Zum einen spricht man von physikalischen bzw. mechanischen Modellen und zum anderen von empirischen oder auch statistischen Modellansätzen. Beide Herangehensweisen stellen unterschiedliche Anforderungen an die Datengrundlage, wobei jene Daten für mechanische Modelle mit einem vergleichsweise hohen Aufwand zu eruiieren sind und unter Umständen für das Erlangen der nötigen Daten ein nicht unwesentlicher monetärer Aufwand entstehen kann.

Die Schadensentstehung kann oftmals nur erahnt werden da komplexe Mechanismen zu eben einem Schadensbild führen können. Abhängig vom verlegten Leitungsmaterial führen unterschiedliche Vorgänge zum Schwächen eben dieser. Bei den Grauguss Leitungen spricht man bei diesen Prozessen von der sogenannten Graphitierung was als ein Produkt der Korrosion bezeichnet werden kann. An Materialien wie Asbestzement- oder Beton entstehen Schäden meist durch chemische Vorgänge, welche sich negativ auf die vorhandene Zementmatrix auswirken (Liu, Kleiner et al. 2012).

Die physikalischen Modelle wurden an dieser Stelle zwar erwähnt, jedoch wird in der gegenständlichen Arbeit nicht darauf eingegangen, zumal der Schwerpunkt in der Anwendung und Gegenüberstellung von statistischen Modellen zur Schadensprognose liegt. Der Stand der Wissenschaft und Technik betreffend statistischer Modelle wird in (2.2.1) näher beschrieben.

### 2.2.1 Statistische Modelle

Statistische Modelle werden herangezogen um den Zusammenhang zwischen mindestens 2 Variablen mathematisch zu beschreiben und in Modellen darzustellen. Diese Vorgangsweise hilft die vorhandenen Zusammenhänge besser zu verstehen und ermöglicht in weiterer Folge Vorhersagen, oder bildet auch einfach nur die Grundlage für weitere Entscheidungsprozesse (Hedderich und Sachs 2012).

Bezüglich der Modelle ist anzumerken, dass es sich dabei um keine vollständig reproduzierbaren Zusammenhänge handelt. Vielmehr handelt es sich um „stochastische“ Zusammenhänge für die eine gewisse Zufälligkeit zu berücksichtigen ist (Hedderich und Sachs, 2012). Um Modelle erstellen zu können muss im Vorhinein eine Zielgröße definiert werden. Diese Zielgröße wird durch Einflussgrößen beeinflusst. Mittels des gewählten Modellansatzes, werden die Eigenschaften der Zielgröße durch eine Funktion der beeinflussenden Variablen mathematisch beschrieben (Hedderich und Sachs, 2012).

Im Kontext dieser Arbeit stellt die Zielgröße der Zustand eines Leitungsabschnittes, beschrieben durch die Anzahl von Schäden, dar. Dieser wird durch leitungsbeschreibende Variablen (Einflussgrößen) geprägt.

Basis für statistische Prognosemodelle bilden historische Daten von Trinkwassernetzen. Aufgrund dieser Informationen ist es möglich, mit Hilfe eines für die vorliegende Datenstruktur geeigneten Modells, vom Zustand einzelner bereits schadhaften Leitungen und deren Eigenschaften auf die Grundgesamtheit zu schließen. Die aufgezeichneten Schadensereignisse stellen die Grundlage für eine mögliche Schadensprognose, sofern in einem ausreichendem Umfang vorhanden, dar.

Durch die Analyse der Datengrundlage, welche im Vorfeld der eigentlichen Modellrechnung durchgeführt wird, können die für die Berechnung signifikanten Variablen identifiziert werden. Diese Untersuchungen mittels explorativer Datenanalyse und Korrelationsberechnungen zwischen einzelnen Variablen liefern erste mögliche Einflussgrößen. Idealerweise wird der Test auf Signifikanz von covariables bereits mit dem Modell, welches für die Datengrundlage geeignet ist, durchgeführt. Eine umfassende Zusammenstellung von statistischen Modellansätzen gibt Liu et.al. , (2012) ab S 99, worin ersichtlich ist, welche Art von Modell vorliegt (deterministisch oder probabilistisch), und was im Detail betrachtet wird (Schadensabfolge). Ausgehend von einer vorliegenden Datenstruktur, wird demnach ein geeigneter Modellansatz herangezogen. Ein Modell, welches die Schadensgeschichte einer Leitung in das Modell miteinbezieht, stellt Le Gat, (2008a) vor. Als Kovariablen werden neben den leitungsspezifischen Parametern wie Material, Durchmesser etc. auch die Schadensgeschichte (Breaking History) bzw. Anzahl der Vorschäden miteinbezogen.

Die Modelle der TU Graz und der EAWAG, dem Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs, werden im Abschnitt (2.3) erläutert.

### 2.2.2 Zensierte und Trunkierte Daten

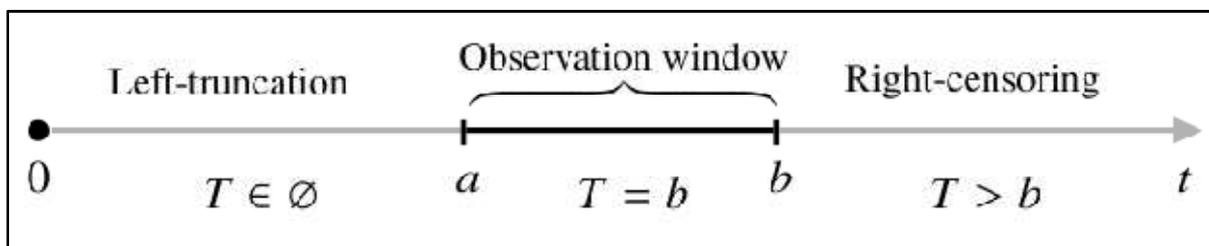
Zur Kalibration sind als Daten Zeitpunkte der Schäden notwendig.

Von zensierten Daten wird gesprochen, wenn kein Schaden beobachtet wurde, aber bekannt ist *wie lange* schon kein Schaden auftrat.

Viele Trinkwasserleitungen wurden verlegt bevor die Wasserwerke mit einer Dokumentation des Netzes begonnen haben, somit ist unbekannt, wie viele Schäden vor der Beobachtungsperiode aufgetreten sind. Nachstehend werden die in dieser Arbeit berücksichtigten Formen der Datenzensur beschrieben.

- **Links Trunkierung:** Von Links- Trunkierung wird gesprochen wenn die Vorgeschichte, beispielsweise einer Leitung und deren aufgetretener Schäden, vor dem Beobachtungszeitraum unbekannt ist.
- **Rechts Zensur:** Diese Form von Daten liegt vor sobald ein Ereignis z.B. Schaden an einer Leitung, bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes nicht aufgetreten ist.

Bei der Kalibration berücksichtigt Le Gat, Kropp et.al. (2011) datenbedingte Herausforderungen wie die sogenannte Linkstrunkierung und Rechtszensierung von Leitungsinformationen. Nachstehender Abbildung 2-2 ist das Konzept der Datenzensierung zu entnehmen.



**Abbildung 2-2:** Konzeptionelle Darstellung von Datenzensur (Links- und Rechtszensierter Daten; Quelle: Le Gat, Kropp et.al. (2011))

## 2.3 Prognosemodelle TU Graz und EAWAG Dübendorf

In den vergangenen Jahren gab es an beiden Institutionen Forschungsprojekte zum Themenschwerpunkt Infrastrukturerneuerung und im Zuge dessen wurden unterschiedliche Ansätze von Schadensprognosemodellen entwickelt.

Die an der TU Graz und der Eawag Dübendorf entwickelten Modellansätze „Pipe Rehabilitation Management“ (PIReM-PHM) sowie „Sustainable Water Infrastructure Planning- Pipe Failure Model“ (SWIP-PFM) orientieren sich sehr stark an den in Österreich und der Schweiz verfügbaren Schadens- und Netzinformationen. Das Ziel beider Modelle ist es, die zu erwartenden Schäden in einem Versorgungsnetz zu prognostizieren und somit den Verantwortlichen eine Grundlage für deren Rehabilitationsplanung zu geben.

### 2.3.1 PiReM-PHM TU Graz

Das Proportional Hazard Modell der TU Graz wurde im Projekt IRM „Infrastructure Rehabilitation Management“ entwickelt und speziell an die Fragestellung der Schadensprognose an Trinkwasserleitungen angepasst. Diese PHM bieten die Möglichkeit eine willkürliche Anzahl an Einflussparametern auf Signifikanz zu testen und in der Modellrechnung zu berücksichtigen (Fuchs-Hanusch, Kornberger et al. 2012). Neben den allgemeinen rohrspezifischen Parametern wie Material, Durchmesser und Verlegejahr etc. wird für diesen Ansatz auch die Zeitspanne zwischen den auftretenden Schadenereignissen in die Untersuchung einbezogen. Die Anzahl an Vorschäden (AVS) wird im Grazer Modellansatz nicht als Einflussfaktor aufgenommen, vielmehr dient diese Zusatzinformation zur Modellbildung für jede einzelne Anzahl an Vorschäden (Einbau bis zum Ersten Schaden, Erster zum Zweiten etc.). Diese Vorgangsweise, Überlebensfunktionen von einem Schaden zum nächsten für einzelne Leitungen zu berechnen, ist eine Weiterentwicklung der in PiReM-PHM implementierten, auf Kohortenbasis funktionierenden Berechnungen der Überlebensdauer von Rohrleitungen mittels parametrischem Ansatz.

Mit dem erweiterten Ansatz können rechts zensierte Daten, d.h. Leitungen, welche noch auf den Eintritt des nächsten Events (hier: Schaden) warten einbezogen werden.

Vernachlässigt man rechts zensierten Daten bei der Schätzung der Parameter, so tendiert das Modell dazu, die Schadenseintrittswahrscheinlichkeit zu überschätzen, respektive den Leitungen eine zu geringe Lebensdauer vorherzusagen.

Im PiReM PHM wird keine Annahme bezüglich einer statistischen Verteilung für das Auftreten von Schäden getroffen.

Ereignisse, welche möglicherweise vor der Beobachtungszeit stattgefunden haben (Vorkommen und Zeitpunkt des Schadens auf einer Leitung ist unbekannt bzw. nicht dokumentiert), werden im Modell der TU Graz nicht berücksichtigt. (siehe Kapitel 2.2.2 Zensierte und Trunkierte Daten)

Das ursprüngliche von Cox (1972) (Projekt Neue Statistik 2003 2003) entwickelte PHM war dafür vorgesehen, sogenannte „Hazard-Rates“ für bestimmte Einheiten zu berechnen. Diese Hazard- Rate beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Leitung  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  in der nächsten Zeitperiode  $(t+1)$  einen Schaden erfährt, und ist auf keinen Fall mit dem gebräuchlichen Begriff „Schadensrate“ zu verwechseln, diese bezieht sich auf eine Länge (zB: Schäden pro km und Jahr).

Die Grundidee des Grazer PHM liegt darin, dass Leitungen mit einem hohen Alter nicht unbedingt auch in einem schlechten Zustand sein müssen, darum wird der Fokus auf die Anzahl an Vorschäden einer Leitung gelegt. Es ist also von großem Interesse und Wichtigkeit, dass eben diese Schadenshistorie aller Leitungen möglichst flächendeckend vorhanden ist. Der Zustand einer Leitung verschlechtert sich demnach mit der steigenden AVS und nicht zwingend mit steigendem Alter der Leitung.

Somit werden basierend auf der Hazard Funktion (2-1) die Überlebensfunktionen für Leitungsgruppen bzw. Leitungsabschnitte generiert.

$$h(t_i) = h_0(t_i) * e^{(x_1\beta_1 + \dots + x_i\beta_i)} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

Gleichung (2-1) zeigt, wie covariables einbezogen werden (in Anlehnung an Hedderich und Sachs, 2012). Diese wird beschrieben durch das im Exponenten stehende Produkt aus dem eigentlichen Wert der Einflussvariablen  $x$  (zB: Nennweite) und dem zu schätzenden Regressionsparameter  $\beta$ . Dieser Ausdruck kann mit beliebig vielen Kovariablen durch Addition erweitert werden. Die Regressionskoeffizienten  $\beta$  geben die Stärke des Einflusses der jeweiligen Variablen an. Der Multiplikator  $h_0(t_i)$  repräsentiert das Basisrisiko für das Eintreten des Ereignisses zum Zeitpunkt  $t$ . Der Vorteil am Cox-Modell ist der, dass  $\beta$  geschätzt werden kann, ohne  $h_0(t_i)$  zu kennen.  $h_0(t_i)$ , resp.  $S_0(t)$  wird als nicht parametrische Verteilungsfunktion direkt aus den Daten bestimmt. Für die Prognose sind diese beiden Faktoren von Interesse.

Abgeleitet von Gleichung (2-1) ergibt sich die zugehörige Überlebensfunktion des Leitungsabschnittes, der gruppierten Leitungen  $S(t,i)$ .

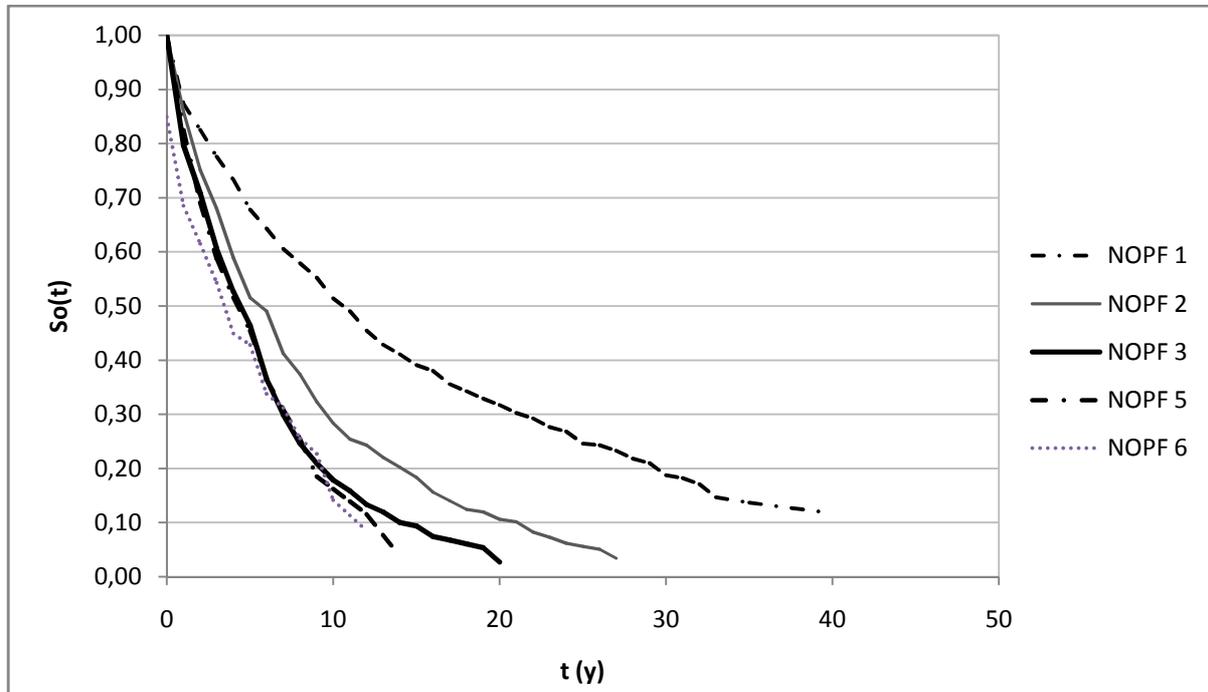
$$S(t_i) = [S_0(t)]^{exp(x_1\beta_1 + \dots + x_i\beta_i)} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

(vgl. Fuchs-Hanusch et.al.,2012)

Die angesprochene nötige Schätzung der Regressionsparameter  $\beta$  und der Basis Hazard Funktion wird mit SPSS / PiReM-PHM und dessen implementierten Wald – Tests und der Log-Likelihood Quotienten-Schätzung durchgeführt.

Ergebnis der Berechnung von  $S(t,i)$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Leitungsabschnitt bis zu einem gewissen Zeitpunkt kein Schaden auftritt (Fuchs-Hanusch,

Kornberger et al. 2012). Dargestellt werden die Überlebensfunktionen beispielweise für eine bekannter weise anfällige Leitungsgruppe in einem Diagramm. Die x- Achse repräsentiert die Zeit bis zum Schadenseintritt bei einer auf der Ordinate zugehörigen Überlebenswahrscheinlichkeit  $S_0(t)$ . Trägt man die errechneten Werte für jede Anzahl an Vorschäden auf, so zeigt sich lt.(Fuchs-Hanusch, Kornberger et al. 2012), dass die Steigung der Datenlinien mit zunehmender AVS zunimmt.



**Abbildung 2-3:** Beispiel einer Survivalfunktion (Fuchs-Hanusch, Kornberger et.al. 2012)

Die Validierung der mit dem Modell errechneten zu erwartenden Schäden erfolgt anhand eines Vergleiches. Die tatsächlich aufgezeichneten Schäden in einem Prognosezeitraum werden den vom Modell berechneten Schäden gegenübergestellt. Um eine doppelte Berücksichtigung der Daten zu vermeiden, ist besonders Wert darauf zu legen, dass diese bereits in den Daten vorhandenen aufgezeichneten Schäden nicht für die Modellkalibrierung herangezogen werden. Soll das Modell am selben Datensatz validiert werden, muss der sogenannte Validierungsdatensatz (z.B. 2009-2011) für die Modellkalibrierung ausgespart werden.

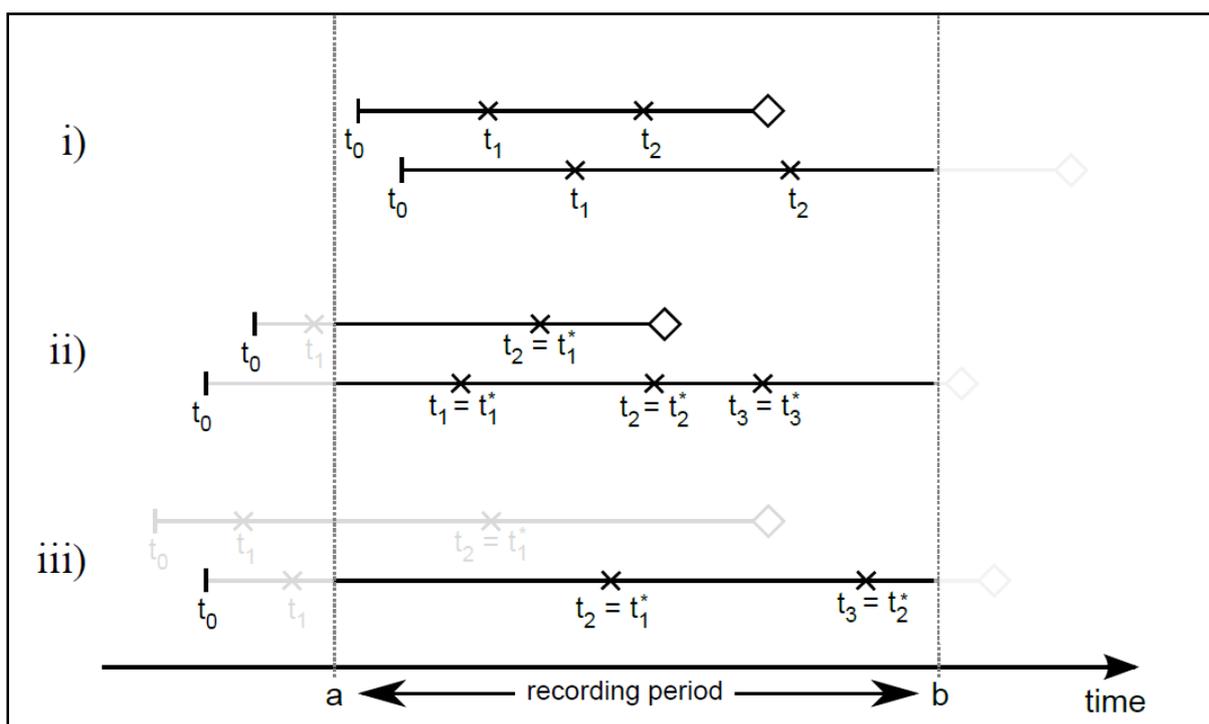
### 2.3.2 SWIP-PFM Modell, EAWAG- Dübendorf

Das Ziel, eine möglichst genaue Vorhersage der erwarteten Schäden zu treffen, wird auch im SWIP-PFM- Modell verfolgt. Die Ansätze unterscheiden sich jedoch im Gegensatz zu in Kapitel (2.3.1) näher erläuterten PHM Modell.

Datenaufzeichnungen von Schäden an Trinkwasserleitungen sind oft unvollständig (siehe Kapitel 2.2.2 Zensierte und Trunkierte Daten).

Die Tatsache, dass womöglich Schäden auf Leitungen nicht aufgezeichnet wurden (lefttruncation), führt zur Unterschätzung der Schadenswahrscheinlichkeit wenn dies bei der Kalibration nicht berücksichtigt wird. Da Angaben betreffend der Schäden vor dem Betrachtungszeitraum fehlen, kann dem Leitungsabschnitt faktisch ein besserer Zustand als tatsächlich vorhanden, zugeordnet werden

Zudem fehlen oft Schadensdaten von ersetzten Leitungen. Wird dies nicht berücksichtigt, erscheinen ältere Leitungen „langlebiger“. Scheidegger, Scholten et.al.(2012) bezeichnen diese Situation als „selective survival bias“. Dies kommt daher, dass Leitungen mit vielen Schäden häufiger ersetzt wurden als gleich alte Leitungen mit wenigen Schäden.



**Abbildung 2-4:** Szenarien unterschiedlicher Datenverfügbarkeit (Scheidegger, Scholten et al. 2012)

Verfügbare Daten werden schwarz, und Daten welche nicht verfügbar sind grau ausgewiesen. Kreuze symbolisieren einen Schaden, die Rauten repräsentieren einen Leitungsersatz.  $t_i$  kennzeichnet den Zeitpunkt des  $i$ -ten Schadens,  $t_i^*$  jenen des  $i$ -ten aufgezeichneten Schadens.

Abbildung 2-4 illustriert wie andersartig sich eine Datengrundlage darstellen kann. Der Bereich zwischen a- und b entspricht der Aufzeichnungsperiode oder auch dem Beobachtungszeitraum (Scheidegger, Scholten et al. 2012).

Um trotz dieser Schwierigkeiten in der Datenstruktur korrekte (unbiased) Parameter schätzen zu können, wird die zu Grunde liegende Schadenswahrscheinlichkeitsfunktion (likelihoodfunction) mit einem „Leitungsersatz- Modell“ (replacement model) erweitert (Scheidegger, Scholten et al. 2012).

Dieses replacement model beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer Leitung bei einem Schadensereignis nicht getauscht resp. erneuert worden zu sein.

Scheidegger und Scholten et.al. (2012) verweisen auf Le Gat (2009) der ein LEYP (linear extension of the Yule process) Modell entwickelte welches nach heutigem Wissensstand am besten mit der Herausforderung des „*selective survival bias*“ umgeht. Le Gat (2009) definiert die Wahrscheinlichkeit, dass eine Leitung bei einem Schaden nicht ausgetauscht wird, als eine Funktion des Leitungsalters. Diese Thematik stellt sich schwierig dar, denn die Entscheidung, ob eine Leitung bei einem Bruch getauscht wird, hängt auch von der Anzahl an Vorschäden ab (Scheidegger, Scholten et al. 2012).

Im zweiten Abschnitt von Scheidegger und Scholten et.al. (2012) wird eine allgemeine Notation von Schadensprognosemodellen und das Erweitern eines allgemeinen Schadensmodells mit dem replacement model erläutert. Im Rahmen dieser Arbeit wird das als Beispiel implementierte Weibull- exponential Modell (SWIP-PFM) vorgestellt.

Im SWIP-PFM wird angenommen, dass die Zeit vom Einbau der Leitung bis zum Eintritt des ersten Schadens Weibull verteilt ist, und die Zeiten zwischen allen weiteren Schäden exponential verteilt mit demselben Mittelwert sind. Die exponentielle Überlebenszeitverteilung impliziert eine konstante Schadenswahrscheinlichkeit.

Aufgrund dieser Verteilungsannahmen werden die Schadenswahrscheinlichkeitsberechnungen für die folgenden Fälle:

- - Leitungen seit deren Verlegung vollständig beobachtet
- - Leitungen nur teilweise beobachtet

hergeleitet.

Das SWIP-PFM Modell ist auch in der Lage verschiedene Kovariablen einzubeziehen um leitungsspezifische Überlebensfunktionen zu schätzen.

Die Wahrscheinlichkeit für Folgeschäden, nachdem alle Einflussparameter für mehr als einen Schaden gleich sind, hängt von der Zeitspanne bis zum Ersten und von der Anzahl der Schäden eines Leitungsabschnittes ab (Scheidegger, Scholten et al. 2012).

Diese Schadenverteilungsfunktionen werden für die jeweils berücksichtigten Datenszenarien mit dem „replacement model“ kombiniert, und in R implementiert. R ist eine open- source Statistik Software (Scheidegger, Scholten et al. 2012).

Alle Parameter werden mittels Maximum Likelihood Methode geschätzt. Für die Weibull-Verteilung sind das der Skalenparameter (scale) und der Formparameter shape (gibt die Ausfallsteilheit der Funktion an) sowie der Parameter für die Exponentialfunktion der Mittelwert der Exponentialfunktion.

Die Kalibrierung des Modells erfolgt wiederum anhand der aufgezeichneten Schäden eines definierten Kalibrierungsdatensatzes. Die Validierung des Modells wird mittels eines Vergleiches von prognostizierten Schäden und tatsächlich im Validierungszeitraum aufgetretenen Schäden durchgeführt. Der Kalibrierungs- und Validierungsdatensatz ist im Vorfeld zu definieren um verfälschte Modellergebnisse zu vermeiden.

### **2.3.3 Wesentliche Unterschiede am Modellansatz PHM TU Graz- und SWIP-PFM Eawag Dübendorf**

Die Modelle der beiden Forschungsgruppen unterscheiden sich zum Einen hinsichtlich der statistischen Verteilungsannahmen, zum Anderen, wie mit den Herausforderungen bedingt durch die Daten (Datenzensur) umgegangen wird. Das Grazer Modell nimmt an, dass in vorhandenen Daten auch tatsächlich alle Schäden aufgezeichnet wurden (Schäden und Leitungsattribute). Mögliche nicht erfasste Vorschäden an Trinkwasserleitungen sowie ein eventueller nichtdokumentierter Leitungsersatz werden nicht betrachtet. Die Anzahl der auf einem Leitungsabschnitt aufgetretenen Schäden wird in die Modellrechnung integriert. Mit Hilfe dieser Information wird auf die in Zukunft erwartenden Schäden am Gesamtnetz geschlossen. Auch wenn die Aussage am Gesamtnetz getroffen wird, erfolgt davor die Berechnung der erwarteten Schäden für die im Datensatz vorhandenen Einzelleitungsabschnitte. Die Besonderheit am Grazer Modell ist jene, dass die Überlebensfunktionen anhand der verfügbaren Daten individuell für jede Schadensfolge (Zeit bis zum ersten Schaden, dritter bis vierter Schaden etc.) berechnet werden. Es wird keine Annahme bezüglich einer statistischen Verteilung getroffen.

Im SWIP- Pipe Failure Model werden Grundsätzlich bezüglich der Verteilung der Zeit bis zum ersten Schaden starke Annahmen getroffen. Das entwickelte SWIP-PFM geht davon aus, dass die Zeit bis zum Eintritt des ersten Schadens auf einer Leitung Weibull-verteilt ist, und alle Folgeschäden einer Exponentialfunktion mit immer demselben Parameter folgen. Hingegen sind die Anforderungen an die Daten geringer, da lefttruncation berücksichtigt werden kann. Zudem wird das Schadensprognosemodell mit einem Leitungsersatzmodell erweitert, um das systematische Fehlen von alten Leitungen mit vielen Schäden zu berücksichtigen.

### 3 Datenbasis und Vergleich der Datengrundlagen

Die Datengrundlage für den Modellvergleich liefern zwei Wasserversorger aus der Schweiz und aus Österreich. Beide Wasserversorgungsunternehmen nehmen die Aufgaben hinsichtlich Netzplanung, Rehabilitation und die damit verbundenen Strategieüberlegungen sehr ernst. Generell gestalten sich die Rahmenbedingungen sehr ähnlich, beispielsweise hat der WV-AUT als auch der WV-CH in etwa zum gleichen Zeitpunkt mit einer Schadens- und Netzdokumentation begonnen. Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung von Modellen, sind Daten welche eine gewisse Schadensdynamik aufweisen. Im Idealfall sind die Schadensaufzeichnungen vollständig, plausibel und über den gesamten Beobachtungszeitraum vorhanden. Ohne Schadensinformationen und Aufzeichnung von Folgeschäden bzw. etwaigen Leitungserneuerungen sowie den umfassenden leitungsspezifischen Informationen wird ein Modell keine plausiblen Aussagen über zu erwartende Schäden treffen können.

Ziel dieses Kapitels ist es, die beiden WVU anhand von Kennzahlen wie Schadensraten, Netzlänge, aufgezeichnete Schäden, Materialverteilungen, versorgte Einwohner (EW) etc. gegenüberzustellen und Gemeinsamkeiten und Unterschiede in deren Struktur aufzuzeigen. Um diese angesprochene Analyse durchführen zu können, werden beide Datensätze auf Plausibilität geprüft und Leitungen ohne Informationen bezüglich Material, Verlegejahr, Dimension und Leitungsabschnitte mit einer Schadensaufzeichnung vor dem Verlegejahr aus dem Datensatz entfernt. Die Datenaufbereitung geschieht für die Daten des WV-AUT mit Hilfe des an der Software PiReM-PHM, ebenfalls durchgeführt wird eine Längenhomogenisierung der gesamten Leitungsabschnitte da lt. Gangl, (2008) die Länge für diese Art von Berechnungen eine nicht zu vernachlässigende Rolle einnimmt. Hintergrund dafür ist, dass bei sehr kurzen Leitungsabschnitten oft Probleme bei der Zuordnung der Schäden resp. Folgeschäden auftreten. Durch eine Homogenisierung der Leitungen mit den selben Attributen fällt diese Zuordnung leichter. Für die Daten des WV-CH erfolgt die gesamte Aufbereitung und Plausibilitätsprüfung mittels einem an der EAWAG Dübendorf entwickelten R-Skripts (Scheidegger, Scholten, 2012). Für die gesamten Analysen liegt der Fokus vorwiegend auf Versorgungsleitungen, darum wurden Hausanschlüsse und Transportleitungen in dieser Betrachtung ausgespart.

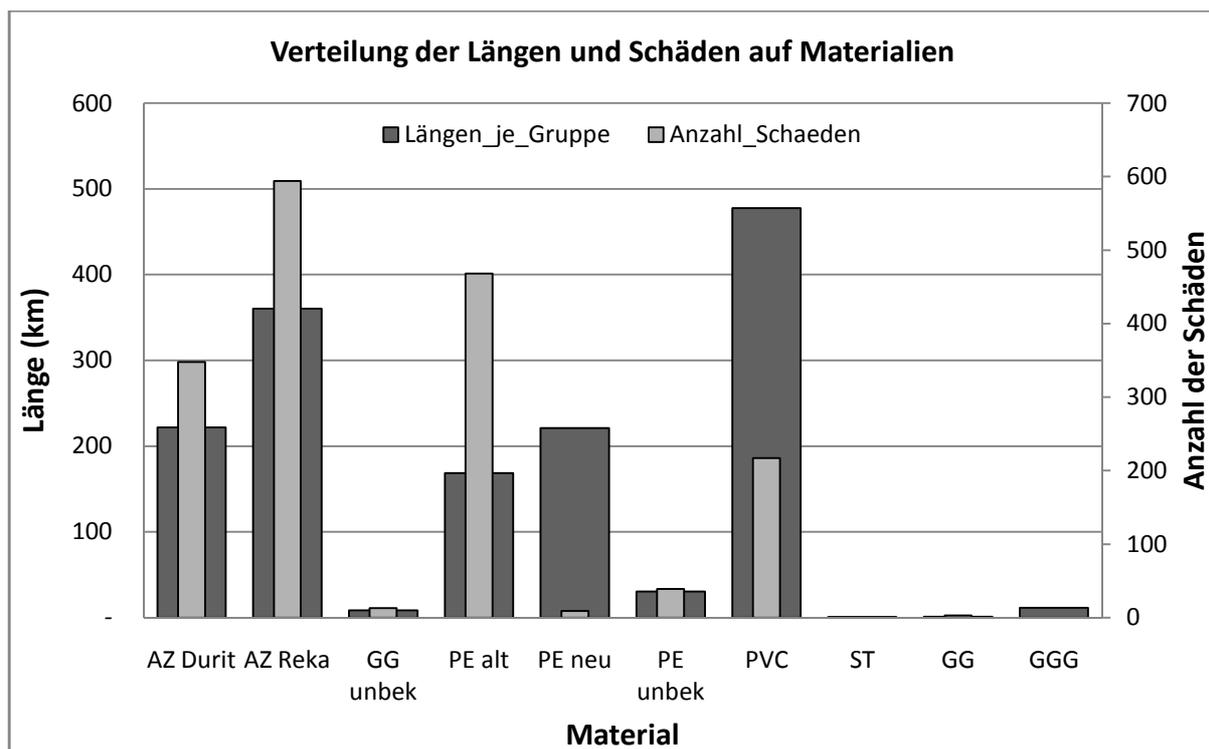
Es wird darauf hingewiesen, dass diese Gegenüberstellung keinen Vergleich der beiden darstellen soll, vordergründig steht das Thema der prinzipiellen Anwendbarkeit der Daten in Anbetracht der Modellanwendung im Vordergrund. In den Kapiteln (3.1) und (3.2) wird die Struktur der beiden WVU näher erläutert und abschließend bezüglich Strukturen und Analogie resümiert.

### 3.1 Wasserversorgungsunternehmen Österreich (WV-AUT)

Das WV-AUT ist ein aus über 50 Gemeinden bestehender Verband. Nach Kriegsende 1945 waren nur rund 6 % der Verbandsgemeinden an ein öffentliches Wassernetz angeschlossen, und ein Großteil der Versorgung erfolgte über Hausbrunnen. In diesem Zusammenhang traten in den folgenden Jahren zahlreiche Seuchen bedingt durch hygienische Probleme das Trinkwasser betreffend auf. Das Netz an sich kann also als recht jung bezeichnet werden. Mittlerweile umfasst das Versorgungsgebiet des WV-AUT eine Ortsnetzlänge von über 1 000 km (Ohne Transportleitungen und Hausanschlüsse). In den Sommermonaten, diese stellen die verbrauchsreichsten Monate dar, werden ca. 200 000 EW mit Trinkwasser versorgt.

#### 3.1.1 Netzstruktur WV-AUT

Anhand einiger Untersuchungen wird die Struktur des WV-AUT dargelegt. Um einen ersten Eindruck hinsichtlich verwendeter Materialien und Durchmesser zu gewinnen, wird analysiert wie sich die insgesamt rund 1 500 km zusammensetzen. Des Weiteren wird illustriert seit wann die Schadensaufzeichnung stattfindet.



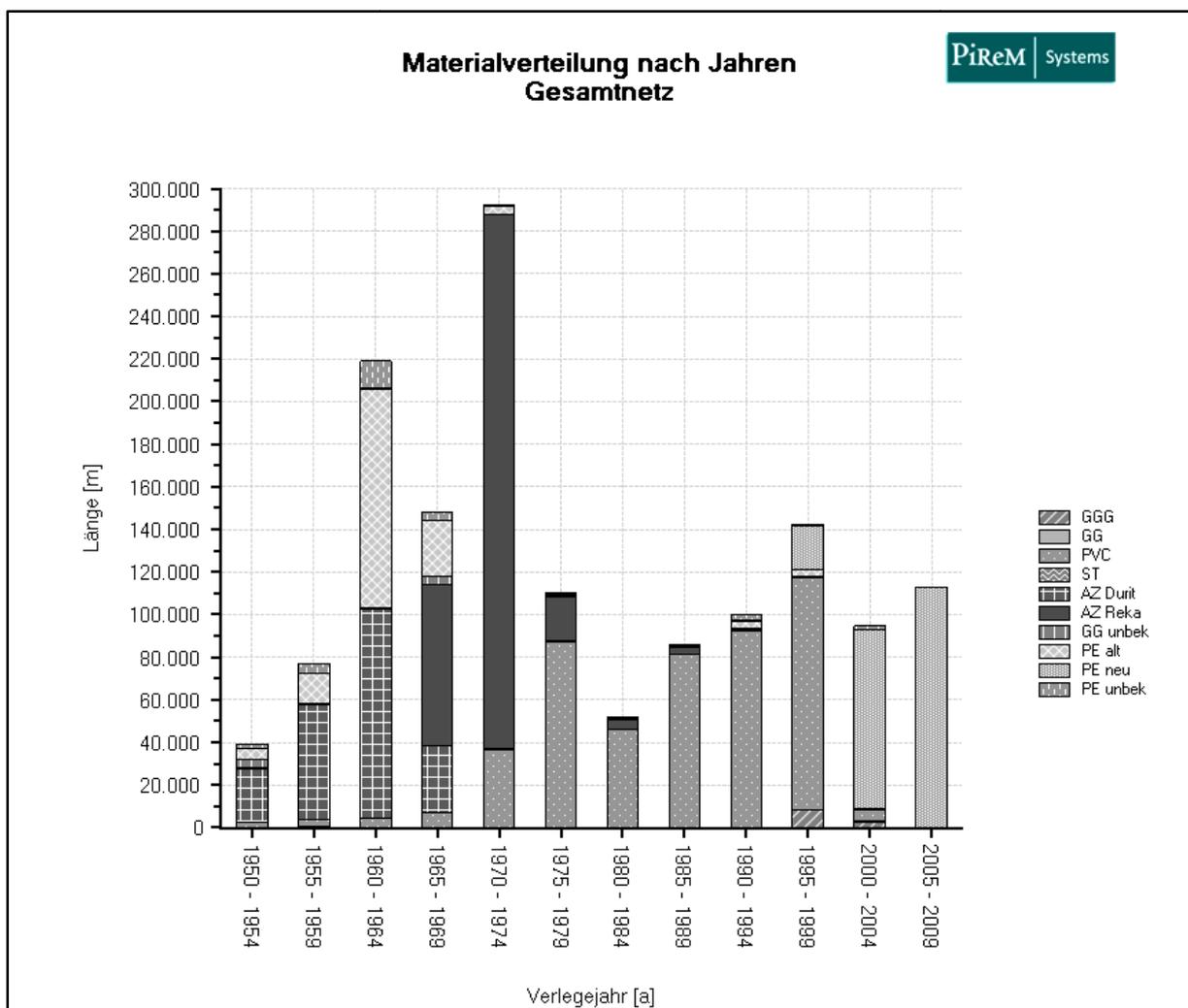
**Abbildung 3-1:** Verteilung der Längen und Schäden auf Materialien

In Abbildung 3-1 werden die verwendeten Materialien sowie die zugehörigen, an der jeweiligen Materialgruppe aufgezeichneten Schäden dargestellt. Die am meisten verlegte Materialgruppe ist PVC gefolgt von den beiden Asbestzementgruppen AZ Reka und AZ Durit. Die unterschiedlichen Bezeichnungen „Durit“ und „Reka“ kennzeichnen zwei Hersteller. Neben dem Hersteller unterscheiden diese sich auch in der Art der Leitungsverbindung und dem Verlegezeitraum. Ein wesentlicher Unterschied liegt in

der Qualität der Verbindung bzw. Dichtungen. Aus diesem Grund werden diese Gruppen nicht in eine Gruppe „AZ“ zusammengefasst sondern separat betrachtet.

Eine vorherrschende Schadensdynamik kann ebenfalls festgestellt werden. Vor allem am Material „PE alt“ kann eine verhältnismäßig hohe Anzahl an aufgezeichneten Schäden festgestellt werden. Grauguss (GG) bzw. Sphärogussleitungen (GGG) haben wie in Abbildung 3-1 deutlich zu erkennen, nur einen geringen Anteil an der Gesamtnetzlänge. Auch die Gruppe Stahl (ST) ist mit einer verlegten Länge von rund 900 m kaum vorhanden, zudem ist auch kein einziges Schadensereignis dokumentiert.

In welchen Perioden die unterschiedlichen Materialgruppen verlegt wurden ist Abbildung 3-2 zu entnehmen.

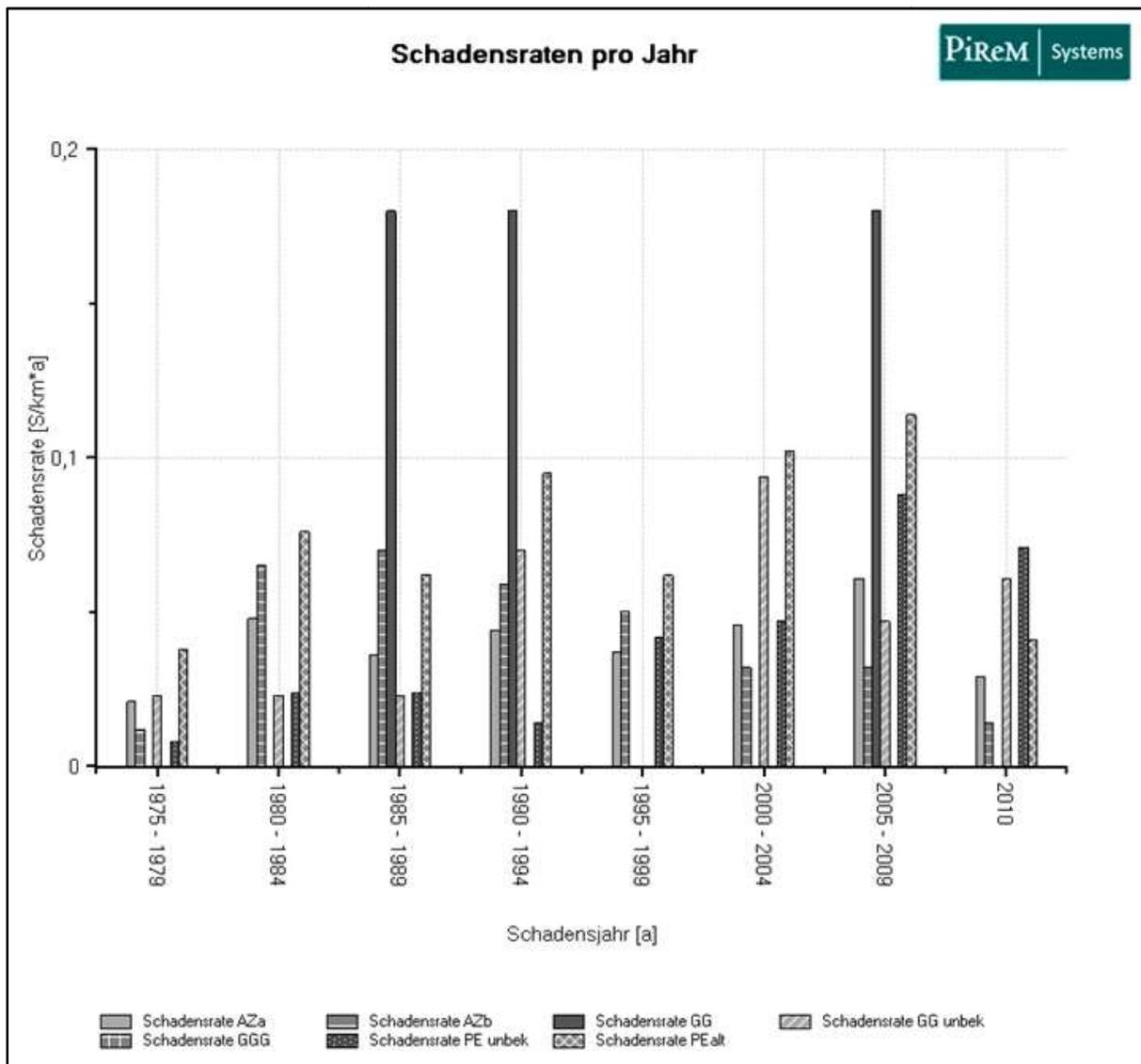


**Abbildung 3-2:** Materialverteilung nach Jahren (Verlegeperioden)

Im Trinkwassernetz des WV-AUT kommen 8 unterschiedliche Materialien zum Einsatz. Die dominierenden Gruppen sind AZ- Reka und Durit, PE alt und neu, sowie PVC. Graugussleitungen als auch Sphärogussrohre (Duktilguss) bilden die Minderheit. Seit dem Jahr 2000 wird vorwiegend die Materialgruppe „PE-neu“ verwendet. In den Anfängen der Netzgestaltung setzte man vorwiegend auf die Werkstoffe Asbest-

zement und PE-alt. Seit ungefähr dem Jahr 1970 (teilweise auch schon früher) wurde mit dem Einbau der am meistverlegtesten Materialgruppe PVC begonnen. Bei Betrachtung von Abbildung 3-1 liegt die Vermutung aufgrund der großen Anzahl an aufgezeichneten Schäden nahe, dass die problematischeren Materialien AZ Reka- und Durit sowie die alte Charge von PE Rohren sind. Eine aussagekräftigere Darstellung ist die Analyse mittels Schadensrate und deren Entwicklung über die Jahre.

Problematische Materialgruppen werden mittels Schadenratenanalysen identifiziert. Hierfür werden die dokumentierten Schäden in der Betrachtungsperiode auf die zu diesem Zeitpunkt verlegte Länge der Gruppe bezogen. Das Ergebnis und den Verlauf der Schadensraten im Bezug auf die Materialgruppe illustriert

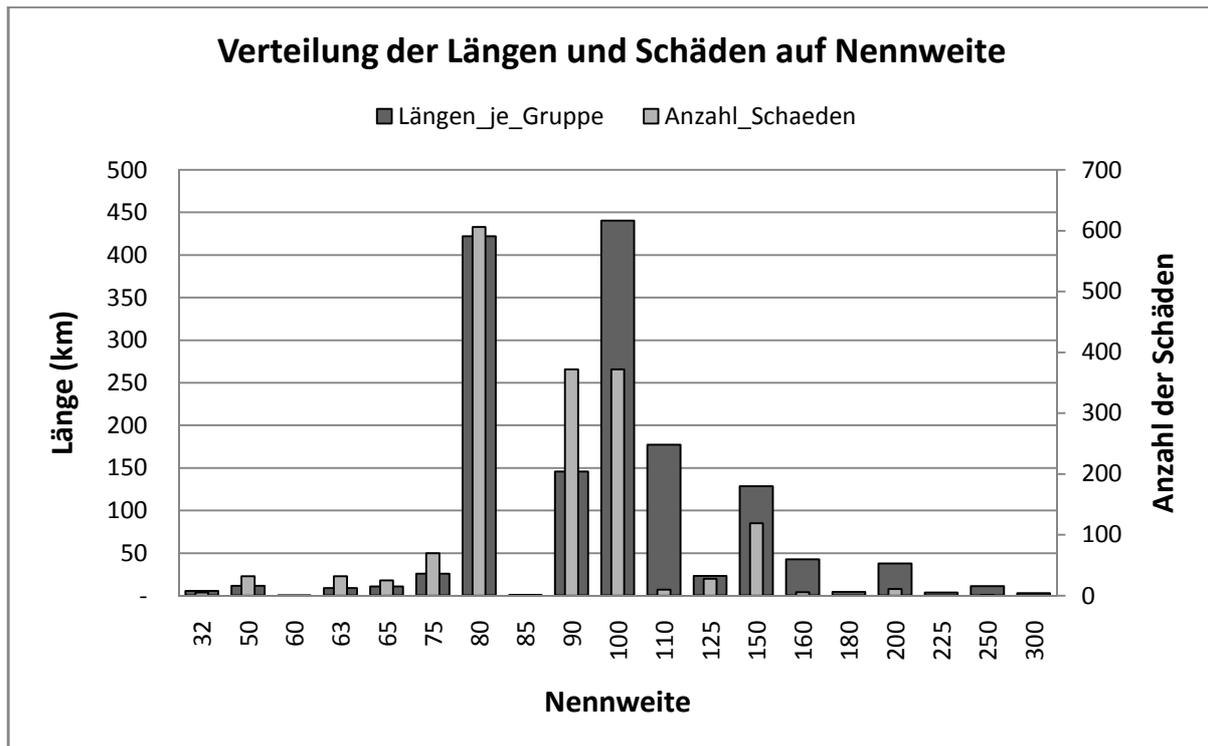


**Abbildung 3-3:** Verlauf der Schadensraten je Materialgruppe

Über den gesamten Zeitraum ist ein ansteigender Trend der Gesamtnetzschadensrate zu verzeichnen. Der Einbruch in der Periode 1995 bis 1999 ist schwierig zu erklären. Es ist ungewöhnlich, dass die Gruppe GG in den Perioden davor eine hohe Schadenrate hat, und im Bereich 1995 bis 1999 nicht vorhanden ist.

Am problematischsten stellen sich wie schon vermutet die Materialien PE, GG und AZ dar. Ebenfalls auffallend ist der durchwegs präsente Anteil der Schadenrate auf Graugussleitungen. Auf Rund 10 km Graugussleitungen wurden 16 Schäden dokumentiert. Aus der relativ kurzen GG –Länge und der verhältnismäßig vielen Schäden resultiert dieser Anteil an der Gesamtschadenrate.

Selbige Vorgehensweise bietet sich auch für das Identifizieren schadensanfälliger Durchmessergruppen an. Nennweitenbezogene Schadensraten werden hier nicht angeführt

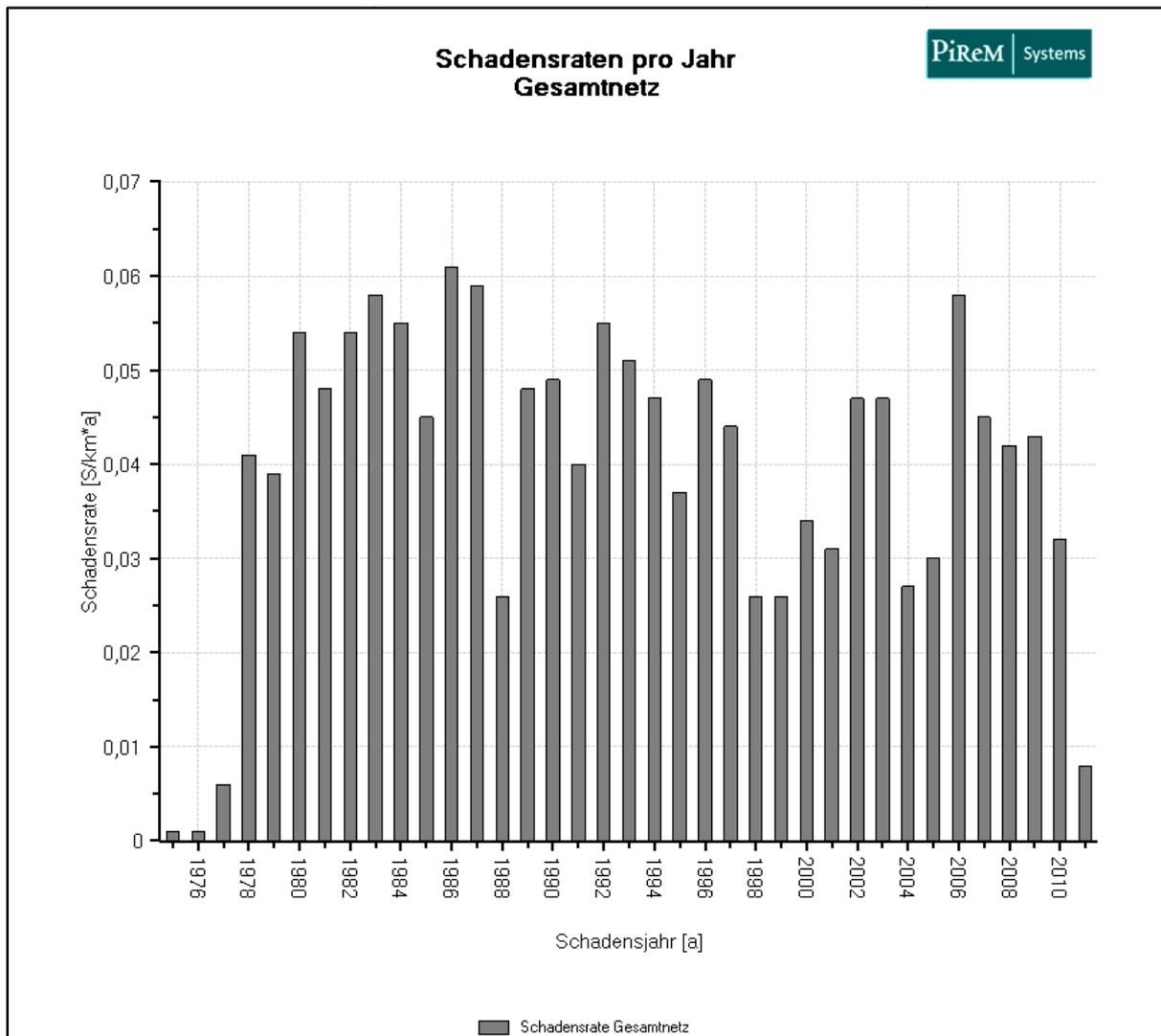


**Abbildung 3-4:** Aufteilung der Längen und Schäden auf die Nennweite

Die meist verlegten Durchmesser im Leitungsnetz des WV-AUT sind Nennweiten mit 80 mm und 100 mm. Diese bilden den Großteil der vorhandenen Versorgungsleitungen. Neben diesen beiden Durchmessern sind noch Leitungen mit Durchmessern von 90, 110 und 150 mm zu erwähnen. Besonders auf DN 90 wurde eine sehr große Anzahl von rund 350 Schäden verzeichnet.

In wieweit sich die verwendeten Nennweiten der beiden Netze unterscheiden wird im Kapitel 3.3 näher erläutert.

Durch die Ermittlung der Schadensraten pro Jahr seit Beginn der Schadensdokumentation am Gesamtnetz, wird ein Eindruck gewonnen in welcher Größenordnung sich die SR bewegen. Zudem kann ein möglicher Trend in der Entwicklung abgeleitet werden. Richtlinie ÖVGW- W-100 gibt Richtwerte von Schadensraten an Haupt- und Versorgungsleitungen an. Als niedrige Schadensrate gelten weniger als 7 Schäden je 100 km und Jahr. Bezogen auf einen Kilometer entspricht das 0,07 Schäden.



**Abbildung 3-5:** Schadensratenentwicklung pro Jahr

Die Schäden pro Kilometer und Jahr bleiben im Versorgungsnetz-AUT durchwegs unter dem in ÖVGW-W-100 angegebenen Richtwert von 0,07 #/km\*a. Anhand des Verlaufes kann davon ausgegangen werden, dass die Qualität der Aufzeichnungen ab dem Jahr 1978 in Ordnung ist. Jene drei Jahre zu Beginn der Dokumentation sollten als „Einarbeitungsphase“ bezeichnet werden. Generell kann man keinen eindeutigen Trend ablesen. Einbrüche und Spitzen in den Schadensraten könnten durch verstärkte Leckkontrolle oder klimatische Einflüsse wie beispielweise strenge Winter erklärt werden. Die Schadensrate im Jahr 2011 sollte bei der Interpretation ausgespart werden.

Der vorliegende Datensatz WV-AUT verfügt über keine vollständige Aufzeichnung in diesem Jahr. Trotzdem kann ab dem Jahr 2006 ein Rückgang verzeichnet werden.

### **3.1.2 Anmerkungen zur Datenaufbereitung WV-AUT**

Vom WV-AUT wurden die Netzdaten durch einen Export aus einem geografischen Informationssystem zur Verfügung gestellt. Die Daten beinhalteten ein Leitungsfile in dem alle in- und außer Betrieb stehenden Leitungen enthalten sind, sowie einem Schadensfile indem alle aufgezeichneten Schäden mit zugehörigen Attributen enthalten waren. Vor der Plausibilitätsprüfung wurde eine Längenhomogenisierung mittels ArcGis durchgeführt um plausible Leitungsabschnitte zu erhalten. Im anschließenden Schritt erfolgte eine Plausibilitätsprüfung der Daten mit dem Softwarepaket PiReM.

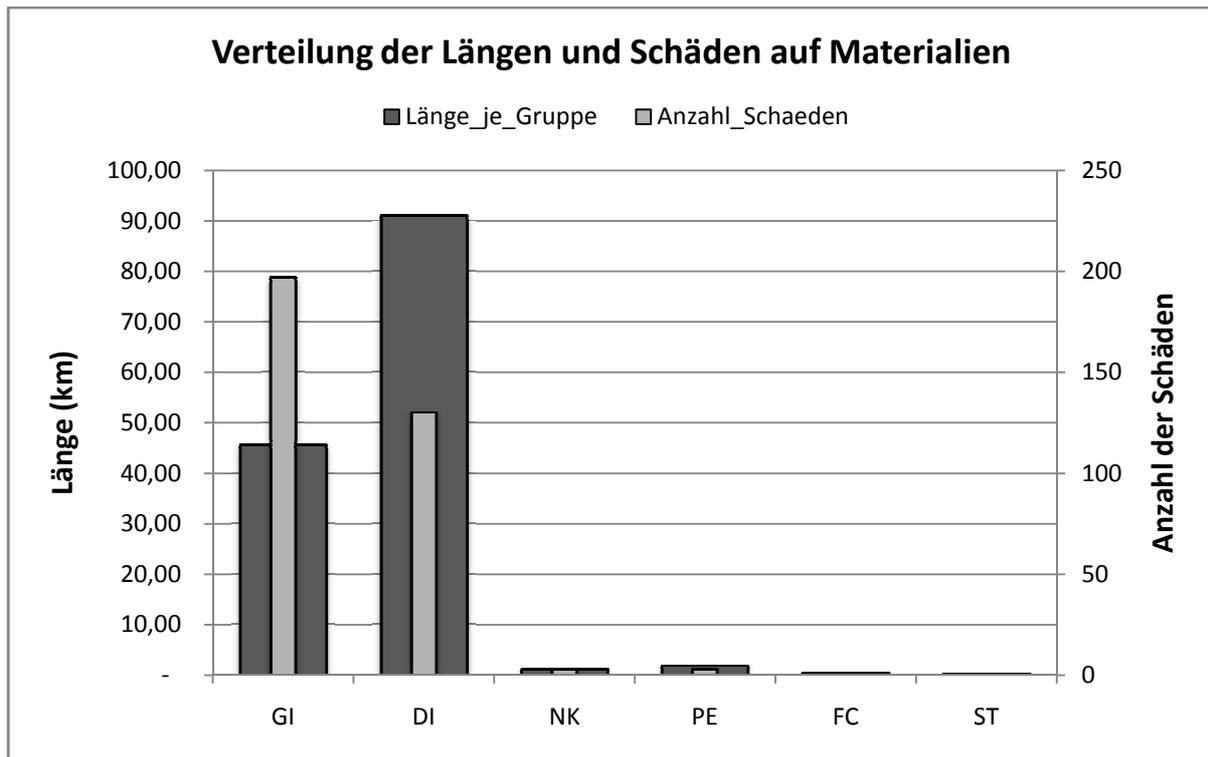
### **3.2 Wasserversorgungsunternehmen Schweiz (WV-CH)**

Das Schweizer Wasserversorgungsunternehmen besteht etwa seit dem Jahr 1905. Seit der Gründung durch damals 8 Gemeinden, zählt dieser heute 20 Verbandsgemeinden, welche zur Gänze mit Trinkwasser versorgt werden. Zusätzlich beziehen sechs Vertragspartner einen Teil ihres Trinkwassers vom WV-CH.

Die totale Länge des Versorgungsnetzes beträgt rund 340 km. Ohne Hausanschlüsse beträgt das öffentliche Netz rund 225 km. Der Großteil des Trinkwassers stammt aus Grundwasser, lediglich ein geringer Teil stammt aus Quellwasser. Mit diesen natürlichen Ressourcen werden rund 60 000 Einwohner versorgt.

Eine systematische Schadensaufzeichnung gibt es im Verbandsgebiet seit ca. dem Jahre 1972. Vorerst wurden diese Aufzeichnungen auf Papierplänen festgehalten und lt. Gespräch mit dem Technischer Leiter des WV-CH, wird davon ausgegangen, dass die Schadensaufzeichnungen seit dem Jahr 1978 als vollständig angesehen werden können. Die elektronische Erfassung wurde im Zeitraum 1996 bis 2009 durchgeführt (durch externe Unternehmen). Seit 2009 erfolgt die gesamte Erfassung selbstständig durch den WV-CH. Seit 1972 hat gemäß Expertengespräch die Datenqualität ständig zugenommen.

Das Hauptaugenmerk liegt auf den als Versorgungsleitungen deklarierten Leitungsabschnitten. Die Netzlänge der Versorgungsleitungen beträgt rund 160 km und verteilt sich auf die in Abbildung 3-6 ersichtlichen Materialien.

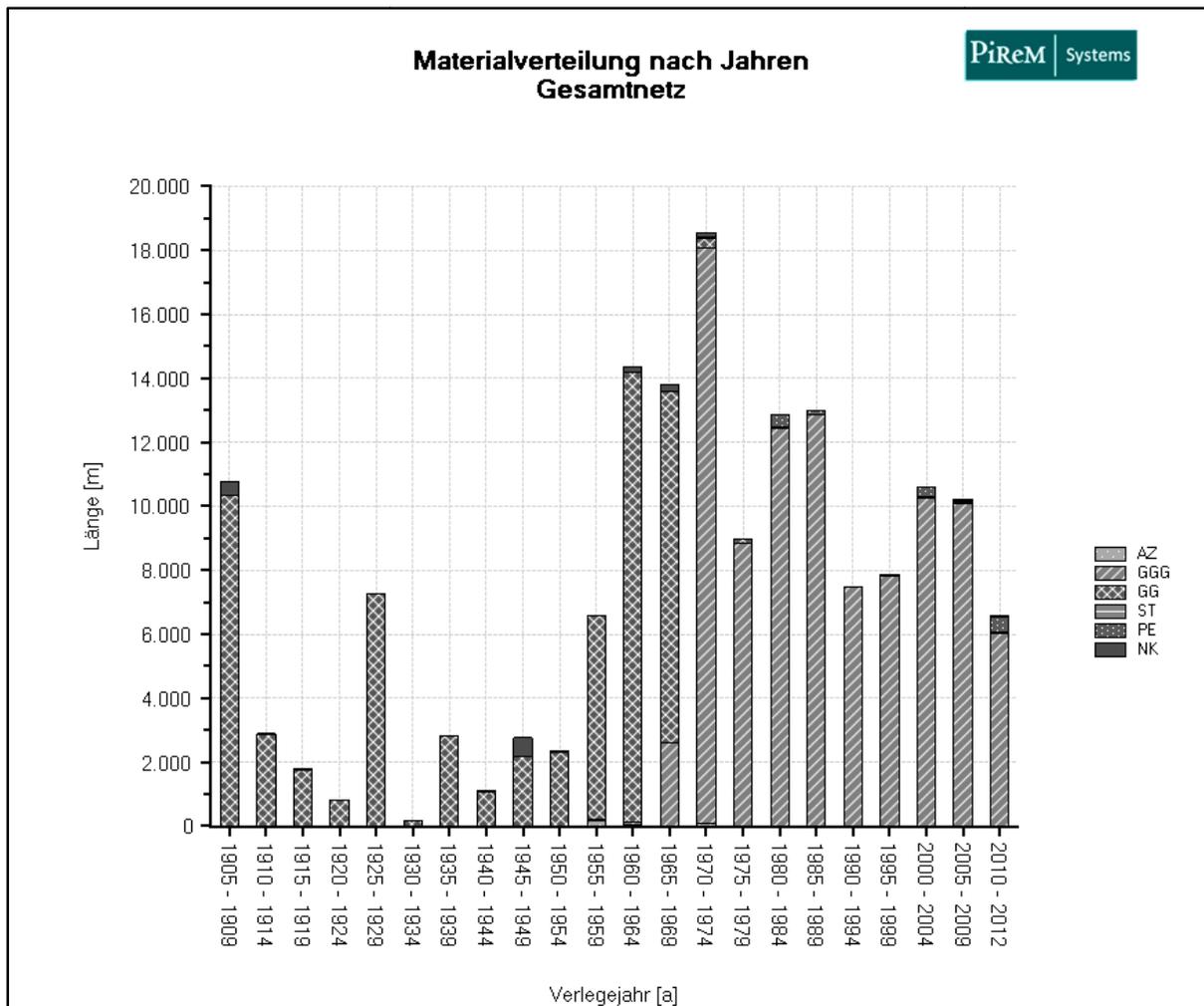


**Abbildung 3-6:** Verlegte Längen und Schäden je Materialgruppe

Den Hauptanteil des Netzes prägen die Materialien Grauguss (GI) und Sphäroguss (DI). Alle anderen Gruppen weisen eine nur sehr geringe Mächtigkeit auf. Stahl (ST) und Faserzementrohre (FC/AZ) werden an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber angeführt. Tatsächlich beträgt die verlegte Länge dieser Materialien zusammen nur rund 470 m. Bereits aus dieser Abbildung ist feststellbar welche Materialgruppen auch für das Wasserversorgungsunternehmen von großem Interesse sind.

Für die Berechnungen in den beiden Modellen wird keine Gruppierung vorgenommen, da eine generelle Schadensentwicklung am Gesamtnetz prognostiziert werden soll. Eine Adaption beider Modelle kann jedoch ohne großen Aufwand vorgenommen werden, sodass Leitungseigenschaften als Kovariablen in die Berechnung mit aufgenommen werden.

Eine Gruppierung von Leitungen kann beispielsweise durch Identifizierung von Materialspezifischen Verlegeperioden (Abbildung 3-7) und Nennweiten durchgeführt werden. Der Hintergrund einer Gruppierung besteht darin, Leitungen aufgrund ähnlicher Verhaltensmuster hinsichtlich Schäden zusammenzufassen und detailliertere Aussagen über diese Leitungskohorten zu treffen.

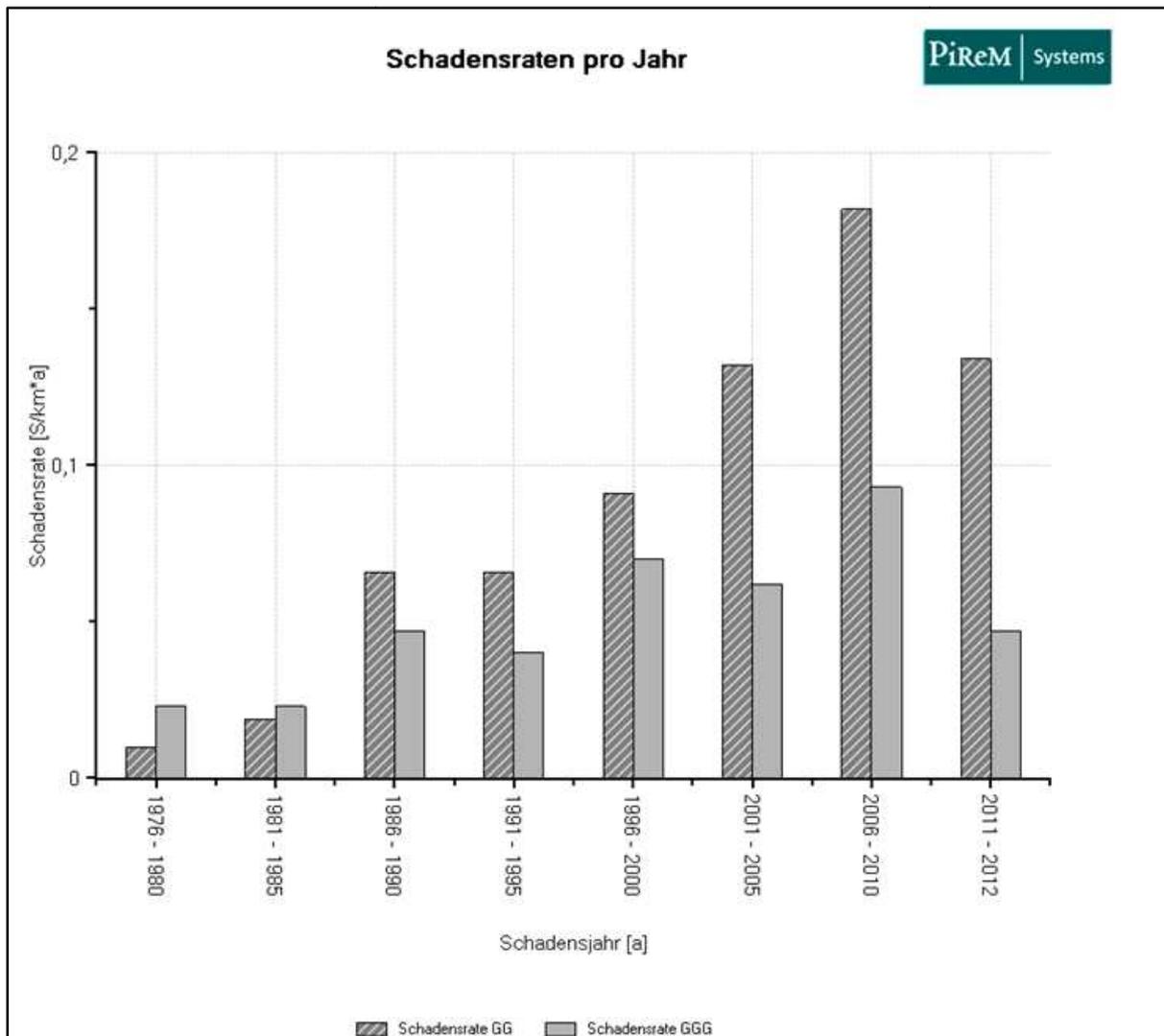


**Abbildung 3-7:** Materialverteilung nach Jahren (verlegte Längen)

In welchem Zeitraum gewisse Materialien verlegt wurden ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Das Material GG wurde bis Ende 1960 verlegt und in weiterer Folge vom hochwertigeren GGG abgelöst. Auch hier wird ersichtlich, dass die Materialien AZ, ST, PE und die Gruppe unbekannter Materialien eine untergeordnete Rolle spielen.

Bei Betrachtung von Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 scheint es plausibel, dass die älteren GG Leitungen auch mehr aufgezeichnete Schäden aufweisen als die jüngere Gruppe GGG. In der Regel tendieren ältere Leitungen zu mehr Schäden jedoch muss angemerkt werden, nicht jede alte Leitung ist zwingend in einem schlechten Zustand.

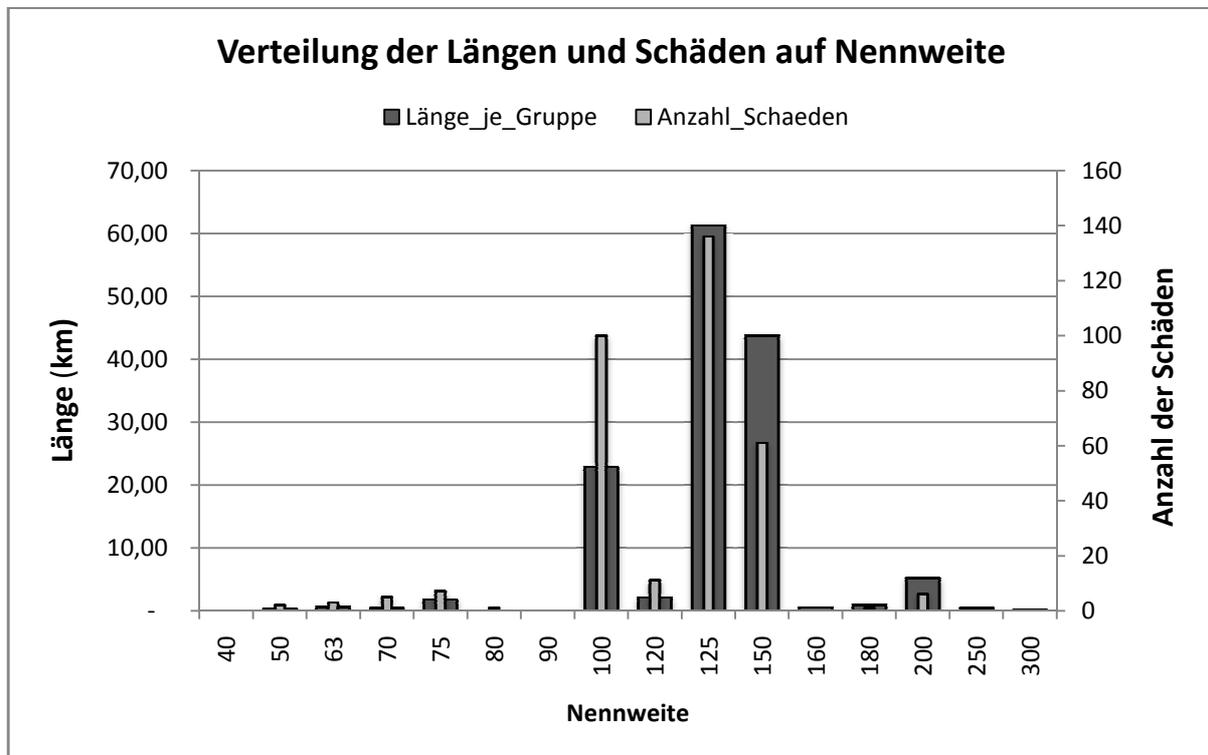
Eine Option, Trends in der Schadensentwicklung zu erkennen, ist das Auswerten einer Schadensrate ( $\#/(km \cdot a)$ ) für die verwendeten Materialgruppen für einen bestimmten Zeitraum. Hierfür werden die Schadenjahre in 5 Jahres- Schritte zusammengefasst.



**Abbildung 3-8:** Schadenratenentwicklung je Materialgruppe

Die Schadensrate für die Materialgruppe Grauguss steigt, wie Abbildung 3-8 ersichtlich, bis zum Jahr 2010 kontinuierlich an ebenso wie der Gesamtverlauf der Schadensrate. Untersucht wurden hinsichtlich Schadensraten die im Schweizer Netz dominanten Materialien GG und GGG. Bei Betrachtung der Gruppe GGG fällt ein Trend nicht so sehr auf, auch wenn im Zeitraum 2006 bis 2010 die höchste SR des Materials auftritt. An sich erscheint dieser Verlauf nachvollziehbar zumal die Verlegung von GGG Rohren erst ca. 1965 begonnen hat. Nachdem die Dokumentation von Schäden erst seit dem Jahr 1976 durchgeführt wird, sind die Schadensraten für diesen Zeitraum auch eher klein. Durch das Älter werden der Versorgungsstruktur sind auch im Laufe der Jahre mehr Schäden zu erkennen. Bei der Interpretation solcher Tafeln sollte auch darauf geachtet werden, auf welche Länge sich die Schäden beziehen. Am Balken 2001 bis 2005 ist dies am deutlichsten zu erkennen. Ab 2010 ist ein Rückgang der Schadensraten auf den Materialien GG und GGG herauszulesen. Ob sich dieser Trend fortsetzen wird, und ob dieser auf eine effektive Rehabilitationsstrategie zurückzuführen ist, kann in den nächsten Jahren überprüft werden.

Welche Nennweiten im Versorgungsleitungsnetz des WV-CH Anwendung finden, wird mittels einer Auswertung der verlegten Längen je Durchmesser ermittelt und ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

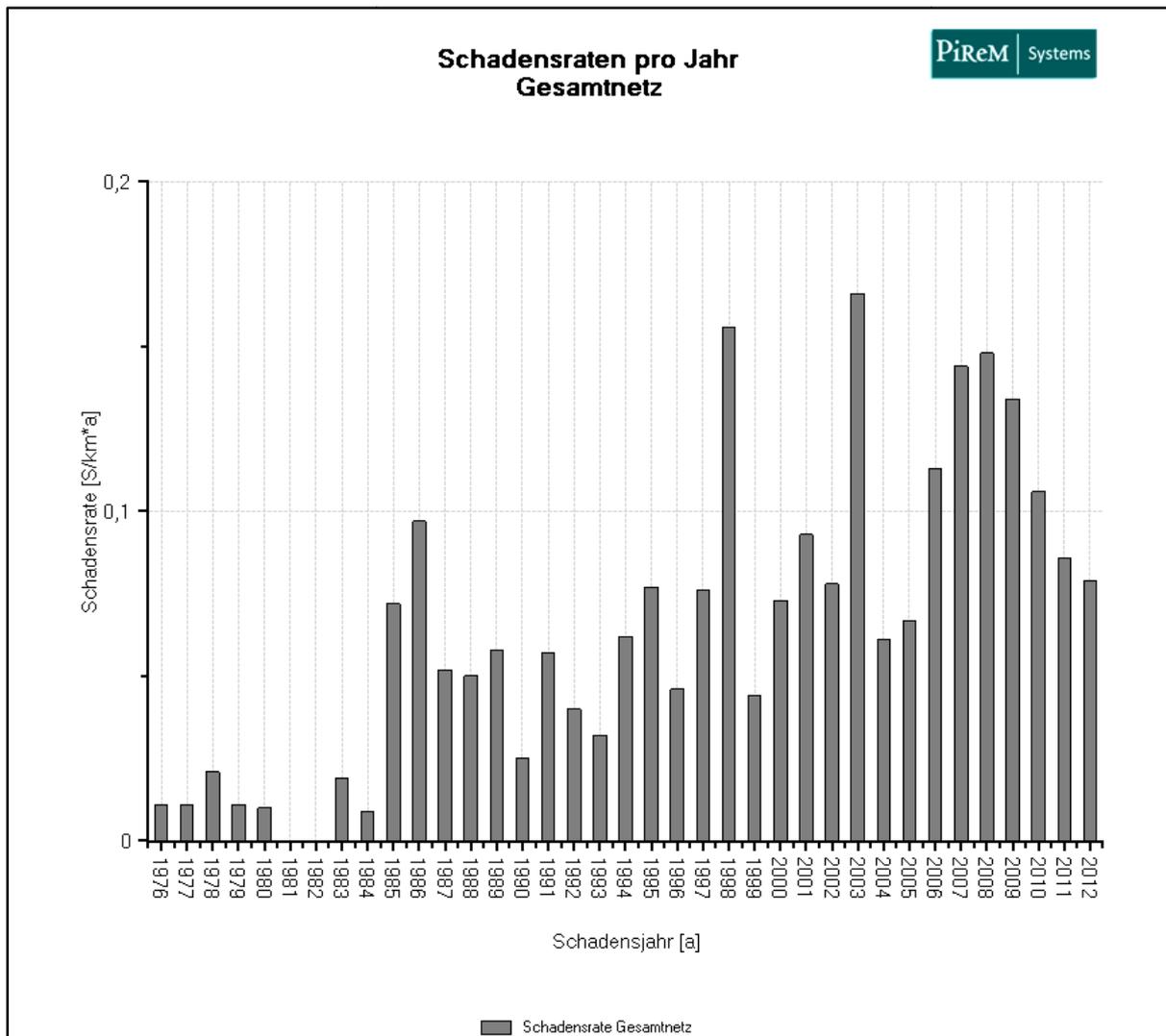


**Abbildung 3-9:** Verlegte Längen und aufgezeichnete Schäden je Nennweite

Im Versorgungsnetz – CH sind vorwiegend DN 100, DN 125 und DN 150 verlegt. Überproportional viele aufgezeichnete Schäden liegen auf DN 100. Aus welchem Grund auf dieser Durchmessergruppe so viele Schäden auftreten, kann an dieser Stelle nicht festgestellt werden, jedoch zeigt Abbildung 3-9 deutlich, dass auf diese DN 100 ebenso wie auf DN 125 und DN 150 Leitungen geachtet werden sollte.

Generell ist erstaunlich, dass im Schweizer Netz vor allem Durchmesser größer gleich 100 mm Anwendung finden. Die große Anzahl an DN 125 geht mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die im betreffenden Kanton herrschende Anforderung bezüglich Mindestdurchmesser und Löschwasserbereitstellung zurück. Auf diesen Punkt wird im Kapitel 3.3 beim Vergleich der Datengrundlagen genauer eingegangen.

Um einen Eindruck zu bekommen in welchem Bereich sich die Schadensraten am gegenständlichen Versorgungsnetz bewegen, wird eine Auswertung durchgeführt und für den Zeitraum seit Beginn der Schadensdokumentation dargestellt. Die Schadensrate wird in Schäden pro km und Jahr angegeben ( $\# / (\text{km} \cdot \text{a})$ ). Die Darstellung erfolgt in Anlehnung an Richtlinie ÖVGW W 100, in der empfohlen wird, im Hinblick auf die Bewertung des Anlagenzustandes die Schadensdaten diesbezüglich auszuwerten.



**Abbildung 3-10:** Schadensraten pro Jahr- Gesamtnetz

Die Schadensrate am Gesamtnetz wird in Jahresschritten aufgelöst abgebildet. Im Vergleich zu Abbildung 3-8 wird hier deutlich, dass vor allem seit Beginn der Schadensdokumentation bis ins Jahr 1984 nur sehr geringe SR auftreten. Gesamt gesehen deckt sich der Verlauf mit den in 5 Jahresschritten unterteilten materialbezogenen Schadensraten. Etwaige Ausreißer wie in den Jahren 1998 und 2003 können mehrerer Gründe haben. Zum einen besteht die Möglichkeit, dass durch gezielte Leckortungskampagnen mehr Schäden detektiert werden konnten, zum Anderen könnte es sein, dass durch einen sehr starken Winter, sprich durch Klimaeinflüsse das Rohrbruchverhalten beeinflusst wurde. Ob ein Grund dafür bekannt ist, könnte durch ein Expertengespräch vor Ort geklärt werden da Ausreißer in diesem Ausmaß eher untypisch wirken. Ab 2008 nimmt die SR am Gesamtnetz des Schweizer Wasserversorgers wiederum ab, ein Indiz dafür, dass sich der Zustand infolge der Erneuerungsstrategie verbessert.

### 3.2.1 Anmerkungen zur Datenaufbereitung WV-CH

Aufgrund einiger Komplikationen mit dem Export der Netzdaten, bedurfte es einiger Vorarbeit um diese in eine für das Modell notwendige Form zu bringen. Die exportierten Daten des WVU mussten rekonstruiert werden. Da es mit der momentan in Verwendung stehenden Software nicht möglich war einen grafischen Export mit allen notwendigen Attributen zu erstellen, mussten einzelne Bestandteile wieder zusammengefügt werden. Die Leitungsgeometrie und deren Lageinformation wurden gemeinsam mit der zugehörigen Leitungs- Identifikationsnummer in einer Datenbankdatei (\*.sql) übergeben. Zusätzlich war ein Datensatz mit allen aufgezeichneten Schäden vorhanden, aber ohne Leitungsattribute. Diese Attribute befanden sich im separat zur Verfügung gestellten Leitungsdatsatz. Das Zusammenfügen dieser Informationen erfolgte unter anderem mit einem GIS-System indem alle Informationen verschnitten wurden. Anhand eines mitgelieferten Planes der Leitungsgeometrie konnte das rekonstruierte mit dem vorhandenen Netz verglichen werden. Die Plausibilitätskontrolle und eine Homogenisierung der Leitungslängen erfolgen mittels eines R- Skripts, entwickelt von Scheidegger und Scholten (2012).

### 3.3 Vergleichbarkeit der Netze- Resümee

Die in (3.1) und (3.2) behandelten Netzdaten, weisen erwähnenswerte Unterschiede auf. Alleine die Betrachtung der Netzlängen lässt erkennen, dass die Leitungslänge des WV-AUT- Datensatzes mehr als das Vierfache des WV-CH Datensatzes ausmacht.

Auch in den verwendeten Materialien sind deutliche Unterschiede erkennbar. Der Großteil der verlegten Trinkwasserleitungen des WV-CH besteht aus Grauguss (GG) und Sphäroguss (GGG). Im Gegensatz dazu ist das eindeutig am meisten verlegte Leitungsmaterial im WV-AUT- Netz AZ und PVC. Wobei sich AZ Rohre weiter in Asbestzementrohre mit Verbindungen der Hersteller Reka und Durit unterscheiden lassen. Zusätzlich sind neuere und ältere PE Leitungen vorhanden.

Stellt man die Nennweiten der Wasserversorgungsunternehmen gegenüber, ist zu erkennen, dass im österreichischen Netz DN 80 und DN 100 vermehrt verlegt wird. Im Versorgungsnetz – CH sind die Durchmesser DN 125 und DN 150 sehr stark vertreten. Die Tatsache, dass für relativ kleine Gemeinden verhältnismäßig große Nennweiten verwendet werden ist damit zu begründen, dass kantonale Unterschiede hinsichtlich Löschwasserbereitstellung herrschen. Im Kanton Bern beispielsweise wird nur eine Förderung beim Neubau von Leitungen gewährt, wenn mindestens ein DN 125 eingebaut wird. Diese Subvention bezieht sich lt. Expertengespräch auf Hydranten, die wenn nicht der geforderte Mindestdurchmesser eingebaut wird, von dem Wasserversorgungsunternehmen finanziert werden müssen.

Diese Vorgehensweise ist nicht hochgradig wirtschaftlich, jedoch gibt es bezüglich des Versorgungsdruckes keine Probleme. Fließrichtungsänderungen treten auf und für Leitungen- bzw. Leitungsabschnitte mit zu geringen Fließgeschwindigkeiten wurden Spülpläne erarbeitet, um einen hygienisch einwandfreien Zustand zu gewährleisten.

Diese angesprochenen Vorgaben bezüglich Minstdurchmesser sind in Österreich nicht vorgesehen. Dimensioniert wird auf die maßgeblichen Belastungsfälle, für die Mindestanforderungen verlangt werden. In Österreich ist bezüglich der Bereitstellung von Löschwasser durch die Wasserversorgungsunternehmen auf die Richtlinie ÖVGW-W-77 zu verweisen. Diese Richtlinie zeigt Maßnahmen und Voraussetzungen auf, die von den Wasserversorgern bei der Bereitstellung des Löschwasserbedarfes zu berücksichtigen sind. Zudem werden Richtwerte für den Löschwasserverbrauch angegeben. Die Möglichkeit der dezentralen Löschwasserversorgung aus Löschteichen bzw. nahen Fließgewässern wird in dieser Richtlinie explizit angeführt und in Österreich im ländlichen Raum auch praktiziert um Überdimensionierungen mit Stagnationsproblematik zu vermeiden

Beide Netze weisen, wenn auch an unterschiedlichen Materialien, eine für die Anwendung in Modellen notwendige Schadensdynamik auf. Alleine beim Vergleich des Verlaufes an aufgezeichneten Schäden können Parallelen erkannt werden. Bezüglich der Erneuerungsrate der Wasserversorger ist anzumerken, dass das Ziel einer jährlichen Erneuerungsrate sowohl im Netz CH als auch im Netz AUT mit 1% angestrebt wird. Dies ist ein rein fiktiver Wert, welcher von einer Lebensdauer der Leitungen von durchschnittlich 100 Jahren ausgeht. Tatsächlich belief sich die Erneuerungsquote lt. Geschäftsbericht WV-AUT aus dem Jahr 2011 bei 1,31%. Im Versorgungsnetz AUT war diese Information nicht exakt vorhanden doch der Bereich liegt lt. Expertengespräch zwischen 0,8- und 1,2% je nach Verfügbarkeit an Mitteln und momentanen Prioritäten hinsichtlich Rehabilitation und Neubau.

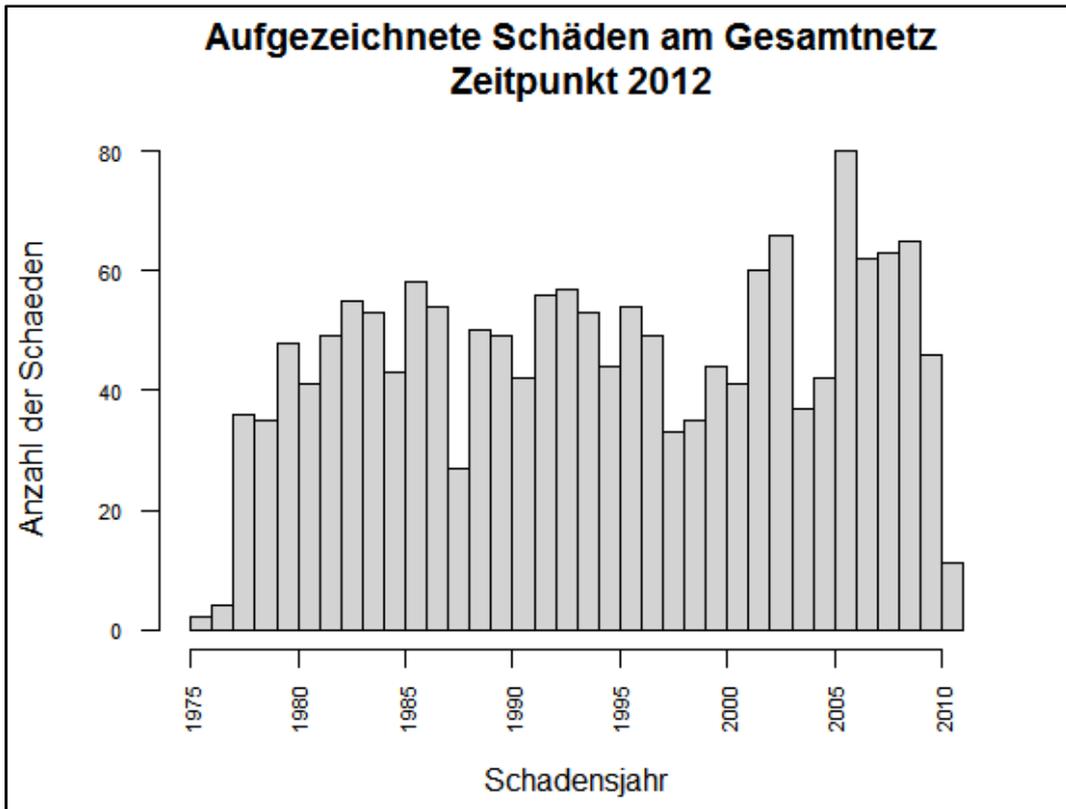


Abbildung 3-11: Verlauf Schadensaufzeichnung WV-AUT

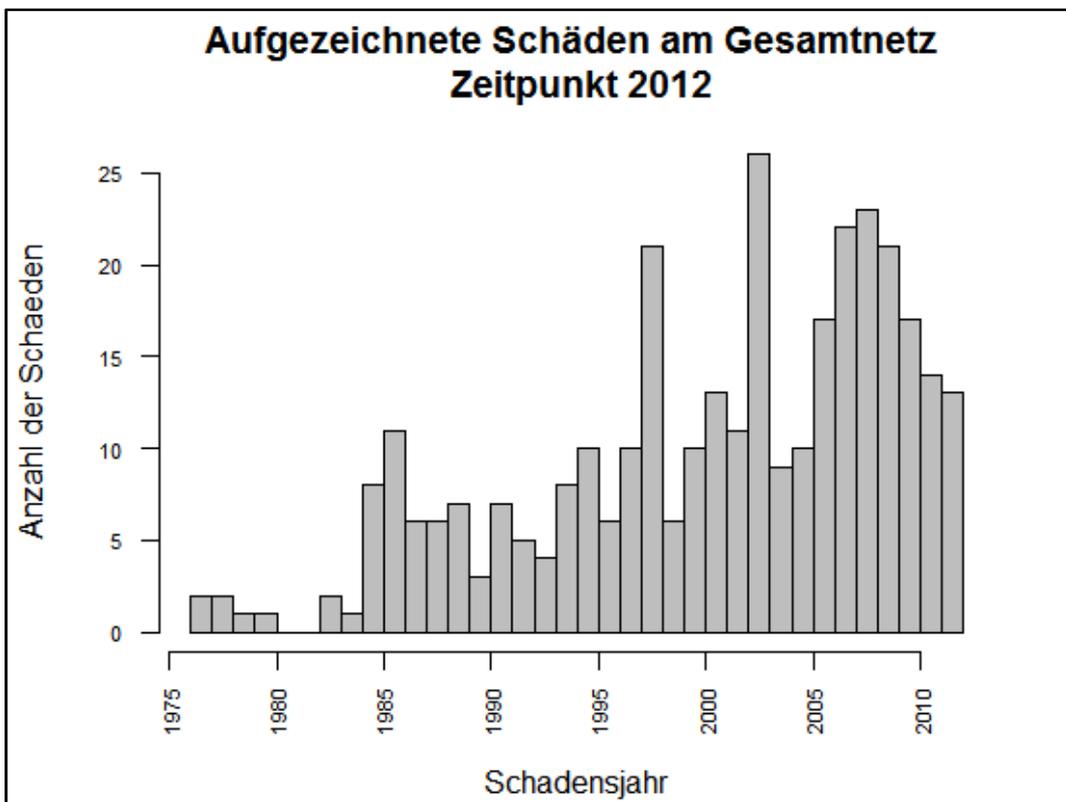


Abbildung 3-12: Verlauf Schadensaufzeichnung WV-CH

Anhand der in Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 illustrierten Schadensaufzeichnungen kann annähernd festgestellt werden, seit welchem Zeitraum diese als „vertrauenswürdig“ eingeschätzt werden können. In beiden Wasserversorgungsverbänden gibt es in den Anfangsjahren fragwürdige Verläufe die auf keine qualitativ hochwertige Dokumentation hinweisen. Generell kann in beiden Netzen davon ausgegangen werden, dass die Qualität der Datenerfassung seit dem Beginn ständig zugenommen hat. Zudem wird ersichtlich, inwieweit die Schadensaufzeichnungen vollständig sind. Im Schweizer Netz kann davon ausgegangen werden, dass das Jahr 2011 noch vollständig in den übermittelten Daten vorhanden ist. Am Datensatz WV-AUT ist das letzte vollständig erfasste Jahr offensichtlich das Jahr 2010.

Mit diesen Informationen wird festgelegt welcher Zeitraum der Daten der Modellrechnung zugeführt wird.

Grundsätzlich sind die Netze WV-CH und WV-AUT bezüglich Materialzusammensetzung sehr unterschiedlich. Es werden in einem Ausmaß unterschiedliche Materialien verwendet, dass ein materialspezifischer Vergleich nicht möglich ist. Trotzdem sind in beiden Netzen schadensauffällige Materialien erkennbar.

Jeder Datensatz weist spezielle Eigenheiten wie Materialzusammensetzung, Durchmesserzusammensetzung oder auch Altersstruktur auf. Betreffend Modellanwendung haben aber beide Netze ähnliche Verhaltensweisen im Bezug auf Schadensdynamik im Gesamtnetz.

**Tabelle 3:** Übersicht Materialien, Längen und Schäden WV-AUT

Material	Gesamt in Datenbank			In Betrieb			AusserBetrieb		
	Name	Anzahl	Länge [m]	Schäden	Anzahl	Länge [m]	Schäden	Anzahl	Länge [m]
GG unbek	72	8.520,60	13	70	8.293,01	11	2	227,60	2
ST	45	831,98	0	42	779,97	0	3	52,01	0
PE unbek	293	30.656,00	39	275	28.232,73	38	18	2.423,27	1
PE alt	1.509	168.682,89	463	1.427	159.076,47	459	82	9.606,42	4
AZ Reka	2.799	360.131,08	584	2.759	356.298,66	584	40	3.832,42	0
AZ Durit	1.738	221.728,77	337	1.618	207.436,21	336	120	14.292,56	1
PE neu	2.040	217.922,77	9	2.029	217.253,20	9	11	669,57	0
GGG	90	11.587,28	0	90	11.587,28	0	0	0,00	0
GG	11	1.112,60	3	11	1.112,60	3	0	0,00	0
PVC	4.722	477.549,06	215	4.675	474.524,77	214	47	3.024,28	1
<b>Gesamt</b>	<b>13.319</b>	<b>1.498.723,03</b>	<b>1.663</b>	<b>12.996</b>	<b>1.464.594,90</b>	<b>1.654</b>	<b>323</b>	<b>34.128,13</b>	<b>9</b>

**Tabelle 4:** Übersicht Materialien, Längen und Schäden WV-CH

Material	Gesamt in Datenbank			In Betrieb			AusserBetrieb		
	Name	Anzahl	Länge [m]	Schäden	Anzahl	Länge [m]	Schäden	Anzahl	Länge [m]
AZ	4	339,65	0	4	339,65	0	0	0,00	0
GG	588	63.734,92	197	588	63.734,92	197	0	0,00	0
GGG	900	96.586,24	130	900	96.586,24	130	0	0,00	0
PE	24	1.377,10	1	24	1.377,10	1	0	0,00	0
ST	4	133,15	0	4	133,15	0	0	0,00	0
NK	24	1.548,76	3	24	1.548,76	3	0	0,00	0
<b>Gesamt</b>	<b>1.544</b>	<b>163.719,82</b>	<b>331</b>	<b>1.544</b>	<b>163.719,82</b>	<b>331</b>	<b>0</b>	<b>0,00</b>	<b>0</b>

Die angeführten Tabellen beziehen sich auf den Gesamten Umfang der Daten sowohl auf Leitungen in- wie auch außer Betrieb. Die Modellrechnung erfolgt nur mit in Betrieb stehenden Leitungsabschnitten.

## 4 Modellvergleich

In diesem Kapitel werden die beiden Modelle SWIP-PFM und PiReM-PHM gegenübergestellt. Die Daten wurden schon im Abschnitt Datenbasis und Vergleich der Datengrundlagen näher beschrieben und eine für die Modellrechnung notwendige Schadensdynamik ist gegeben. Wie sich der Datenumfang und die Anzahl der aufgezeichneten Schadensereignisse auf die Berechnungen auswirken, wird in den Ergebnissen beschrieben. Die Modellberechnung erfolgt anhand gekürzter Datensätze an beiden Netzen. Begründet ist dieser Ansatz dadurch, dass lt. Auskunft von fachkundigem Personal, die Datenqualität ab dem Jahre 1996 konstant ist. Der Umfang der beiden Datensätze ist sehr unterschiedlich, beispielsweise beträgt die betrachtete Leitungslänge WV-AUT mehr als viermal so viel wie jene des WV-CH. Bei den aufgezeichneten Schäden verhält es sich ähnlich. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf kleinen Kommunen aus Österreich und der Schweiz sowie den damit verbundenen Herausforderungen hinsichtlich Datenverfügbarkeit und Qualität.

An den beiden Datensätzen wurden jeweils die drei letzten, vollständig dokumentierten Jahre ausgespart um eine Möglichkeit offen zu halten eine Modellverifizierung durchzuführen. Wie die Modelle verifiziert werden und was die Zielgröße darstellt, an welcher die Modelle gemessen werden, wird im Kapitel (4.3) beschrieben.

Ein wesentlicher Punkt der vor jeder Modellberechnung zu hinterfragen ist, ist die Frage, wie der jeweilige Netzbetreiber Schadensereignisse erhebt und wie viel Wert das Unternehmen auf eine Rehabilitationsstrategie legt. Weiters ist von Interesse ob vorhandenen Wasserverlusten nachgegangen wird, respektive ob grundsätzlich versucht wird mittels strukturierter Leckortung vorhandene Schäden zu lokalisieren und zu reparieren. Zudem ist die Datenaufbereitung für eine Modellrechnung ein beträchtlicher Aufwand und damit mit Kosten verbunden.

Es interessiert schlussendlich wie die beiden Modelle mit den zur Verfügung gestellten Daten umgehen und in wieweit die entwickelten Ansätze in der Lage sind, die Schadensentwicklung im österreichischen und schweizerischen Gesamtnetz zu prognostizieren.

## 4.1 Datenaufbereitung für Modellanwendung

Am Beginn jeder Modellrechnung steht die Datenaufbereitung. Beide Modelltypen haben ähnliche Anforderungen an die Datengrundlage. Neben der bereits erwähnten „Schadensaktivität“ im Versorgungsnetz spielt auch die zu Grunde liegende Datenmenge eine wesentliche Rolle um Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Schäden und etwa Material Durchmesser und Alter der gegebenen Leitungsabschnitte zu ermitteln.

Die bereits auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüften Datensätze werden auf das vom jeweiligen Modell verlangte Eingangsformat gebracht. Dieser Schritt erfolgt für beide Datensätze mittels R-Skript (EAWAG) und mit dem Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel.

Für das SWIP-PFM werden vom Datensatz folgende Inputs benötigt:

- **a** Alter der Leitung zu Beginn des Beobachtungszeitraumes
- **b** Alter der Leitung am Ende der Beobachtungsperiode
- **n** Anzahl der Schäden im Beobachtungszeitraum
- **t1** Alter der Leitung bei Eintritt des Schadensereignisses
- **x** ferner können beliebige Leitungseigenschaften wie Material und Durchmesser in die Berechnung aufgenommen werden (Gruppenbildung).

Anhand dieser aus den Datensätzen generierten Informationen ist das Modell in der Lage Prognosen für zukünftige Schäden zu berechnen. Hinsichtlich der Berechnung mit SWIP-PFM werden beide Datensätze mit Hilfe eines in R geschriebenen Skripts aufbereitet. Durch Eingabe der Randbedingung Observationszeitraum werden die erforderlichen Inputs generiert.

Nach dem Einlesen des Datensatzes wird sichergestellt, dass keine Leitungen mit einem negativen Alter zum Ende des Beobachtungszeitraumes vorhanden sind. Dies kann durchaus auftreten, weil auch Leitungen im Datensatz vorhanden sind, die nach Ende des Beobachtungszeitraumes verlegt wurden. Negative Leitungsalter sind auszuschließen da das Modell ansonsten nicht richtig rechnet.

Die Anforderung die PiReM-PHM an die importierten Daten stellt, ist eine zusätzliche Spalte in der \*.csv – Datei (comma separated values) mit der Information über die Anzahl an Schäden, die eine Leitung bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes erfahren hat. Für die Berechnung in PiReM-PHM werden alle Informationen mit einer Schadens- und Leitungsdatei übergeben und in eine Datenbank eingepflegt. Anhand dieser Datenbank werden die Berechnungen durchgeführt. Für die Berechnung mit PiReM-PHM ist die Information der Schadensanzahl von großem Interesse. Haben Datensätze nur sehr wenige Leitungsabschnitte mit Folgeschäden, kann möglicherweise das Modell nicht kalibriert werden. Der eigentliche Hintergrund von PiReM-PHM ist es, Leitungsrehabilitation zu simulieren, und Szenarien von verschiedenen Strategien durchzuspielen und in weiterer Folge eine Hilfestellung für WVU betreffend zukünftige Maßnahmen zu geben. So kann beispielsweise in Abhängigkeit der

Möglichkeiten des WVU Leitungen zu erneuern etc. in die zukünftige Schadensprognose mit aufgenommen werden. Grundsätzlich ist PiReM-PHM darauf ausgelegt, alle Prognosen und Auswertungen auf Leitungsgruppen zu beziehen. Für die Berechnungen wird zum Ersten versucht, alle Leitungen in einer Gruppe zusammenzufassen und eine Prognose zu rechnen. Danach ist es erforderlich, Leitungen zu gruppieren.

Dies geschieht über Materialien, Durchmesser, und Verlegeperioden durch Experteneinschätzungen. Die Gruppierung erfolgt um eine Fokussierung der Modellkalibrierung auf schadensanfällige Leitungen zu erreichen. Leitungsgruppen mit nur wenigen Schäden werden in der Schadensprognose vernachlässigt. Darüberhinaus ermöglicht die Gruppierung, das Modell auf unterschiedliche Verhaltensweisen der vorhandenen Materialien anzupassen. z.B. nimmt die Schadensanfälligkeit von PVC Rohren mit steigendem Durchmesser zu, hingegen bei den meisten anderen Werkstoffen ab. Dies kann im PiReM – PHM ansonsten nicht ohne vorherige Gruppierung abgebildet werden.

Anhand der differierenden Datenanforderungen kann erkannt werden, dass der Schwerpunkt für eine Prognose im PiReM-PHM auf der Anzahl der aufgetretenen Schäden liegt.

## **4.2 Berechnung Szenario 1 bis 4**

Für den Modellvergleich wurden 4 Berechnungsszenarien definiert mit denen ein Vergleich gezogen werden soll. Im ersten Schritt wird die Modellrechnung mit SWIP-PFM durchgeführt. Beide Datensätze werden mittels R-Skript für den Import vorbereitet. Am Datensatz WV-CH wird der Beobachtungszeitraum 1996 bis 2009 gewählt, da Daten bis 2012 (wenn auch nicht zur Gänze) verfügbar sind. Im WV-AUT Netz sind vollständige Aufzeichnungen bis einschließlich 2010 verfügbar, aus diesem Grund wird der Observationszeitraum für dieses Netz auf 1996 bis 2007 begrenzt.

Im zweiten Schritt wird die Berechnung mit PiReM- PHM für beide Netze durchgeführt. Die Netzdaten (Schadens- und Leitungsinformationen) werden im Vorfeld in eine Datenbank, auf welche PiReM-PHM zugreift, eingebettet. Die eigentliche Schadensprognose erfolgt anhand eines in PiReM implementierten R-Skripts das ein Proportional Hazards Modell beinhaltet (Fuchs-Hanusch, Kornberger et al. 2008). Beobachtungs- und Prognosezeitraum werden über die grafische Eingabemaske im Programm definiert.

Folgende 4 Szenarien werden durchgerechnet:

- SWIP-PFM mit Datensatz WV-CH 1996-2009
- SWIP-PFM mit Datensatz WV-AUT 1996-2007
- PiReM-PHM mit Datensatz WV-CH
- PiReM-PHM mit Datensatz WV-AUT

#### 4.2.1 Modellrechnung SWIP-PFM

Die Berechnung wird mittels R-Skript (Scheidegger und Scholten, 2012) durchgeführt. Dieses Skript greift auf das im Hintergrund liegende „break-model“ zu, welches die für die Parameterschätzung nötigen Likelihood Funktionen beinhaltet. Um dieses Modell zu bedienen, sind Kenntnisse im Umgang mit R von Vorteil. Ebenso sind in den Berechnungsschritten wichtige Eingaben nötig um sicherzustellen, dass das Modell richtig läuft. Diese Eingaben müssen möglicherweise von Netz variiert werden. Je nach Datenumfang ist die Berechnung, vor allem das Finden der Startwerte, sehr zeitaufwendig und kann zwischen 3 und 6 Stunden in Anspruch nehmen (je nach Rechnerleistung auch länger). Folglich ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die erforderlichen Eingaben mit großer Sorgfalt durchgeführt und entsprechend dokumentiert werden.

Alle Berechnungen werden am Gesamtdatensatz ohne Gruppierungen durchgeführt. Um gute Startwerte für die eigentliche Parameterschätzung zu erhalten wird im Vorfeld durch einen evolutionären Optimierungsalgorithmus der in der Lage ist einen großen Bereich des Parameterraumes abzutasten, durchgeführt. Für diesen Berechnungsschritt ist es notwendig für die vier zu schätzenden Parameter Ober- und Untergrenzen für deren möglichen Wertebereich anzugeben. Diese Parameter sind der *shape*, *scale1*, *scale 2* und der Wert für „*p.not.rep*“ (Wahrscheinlichkeit für eine Leitung bei einem Schadensereignis nicht ersetzt zu werden). Für das Finden der Startwerte werden zwischen 300 und 500 Iterationen empfohlen. Nach dem Finden der Startwerte wird die Maximum Likelihood Schätzung mit drei unterschiedlichen Optimierungsmethoden ausgeführt. Jene geschätzten Parameter, welche die Likelihood Funktion maximieren werden für die Prognose herangezogen.

In den ersten Berechnungsdurchläufen hat sich herausgestellt, dass kein plausibler Wert für *p.not.rep.* gefunden werden konnte.

Die vier zu schätzenden Parameter für das österreichische Verbandsnetz konvergierten bereits nach 100 Iterationen zu den in Tabelle 5 ersichtlichen Werten. Für diese Parameterschätzung wurde kein fester Wert für p.not.rep. vorgegeben.

**Tabelle 5:** Parameter nach MLE – WV-AUT

par	fvalues	method
c(0.246027109800941, 0.596633710424224, -0.207024095507637, -4.96988004586336)	7937.31827009698	CG
c(0.117007274005916, -0.614001377902709, -1.13298903437598, -5.88018972666206)	7926.68692378392	BFGS
c(0.0467480679613071, -1.85345164696864, -2.11497358705103, -6.86021029808271)	7922.75853691609	Nelder-Mead

Wird mit den im roten Rechteck gekennzeichneten logarithmierten Parameterwerten die Prognose gerechnet, ergibt sich für den Prognosezeitraum von 3 Jahren für das Netz des WV-AUT eine Schadenrate von 68,15 (#/(km\*a)). Dieses Ausmaß einer Schadenrate ist völlig unplausibel, und muss auf jeden Fall hinterfragt werden. Ein Grund hierfür könnte die Datenstruktur sein. Zwei verschiedene Szenarien können zum annähernd selben Ergebnis führen. Dies sind zum einen Daten mit wenig Schäden und einem großen Zeitabstand zwischen den Schäden, oder aber dass Leitungen bei einem Schadensereignis fast immer ersetzt werden. Es ist alleine aus den Daten nicht möglich, die Ersatzstrategie in der Vergangenheit zu ermitteln bzw. kann das Modell nicht entscheiden, welche der beiden Varianten richtig ist.

Aus diesem Grund wurde nach Absprache mit den ModellentwicklerInnen festgelegt, p.not.rep. einen festen Wert zuzuweisen. Um den Einfluss dieses Parameters zu verdeutlichen, werden drei unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten festgesetzt.

Diese Werte für die Wahrscheinlichkeit einer Leitung bei Bruch nicht ersetzt zu werden, sind in weiterer Folge mit 0,6; 0,8 und 1,0 angegeben. Eine Wahrscheinlichkeit von 1 bedeutet, dass keine Leitung bei Bruch ersetzt wird, folglich wird der Ersatz von Leitungen nicht berücksichtigt. Für p.not.rep. = 0,8 würde das heißen, dass 20% der Leitungen bei Eintritt einen Schadens auch ersetzt werden bzw. dass eine Leitung erst beim fünften Schaden ersetzt wird.

Diese Annahmen sind rein fiktiv und sollten durch Rücksprache mit lokalen Experten abgestimmt werden.

In der Schadensprognose wird p.not.rep. nicht berücksichtigt, da keine künftige Ersatzstrategie prognostiziert werden soll.

Die Prognose für den gewünschten Zeitraum wird durch Eingabe der gefundenen Parameter durchgeführt und die Ergebnisse werden als \*.csv Datei im zuvor festgelegten Zielordner ausgegeben. In dieser generierten Ergebnis- Datei wird dem für die Berechnung importierten Datensatz eine neue Spalte mit den Einzelleitungsbezogenen erwarteten Schäden angefügt. Ausgewertet wird der Ergebnisdatensatz im Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel.

Die Berechnungsergebnisse der beiden Modellrechnungen werden im Kapitel 5 präsentiert und besprochen.

## 4.2.2 Parameterschätzung SWIP-PFM

Die Parameterschätzung erfolgt im Schweizer Modell mittels Maximum Likelihood Schätzung (Maximum Likelihood Estimation MLE). Die geschätzten Parameter werden in logarithmierter Form ausgegeben. Um die tatsächliche Größenordnung zu erhalten müssen diese Parameter wieder exponiert werden.

Bei den zu Beginn durchgeführten Berechnungen wurde noch kein p.not.rep. festgelegt, und es stellte sich heraus, dass der Algorithmus zum Finden guter Startwerte bereits nach wenigen Iterationsschritten (rund 50) zu gewissen Werten konvergierte. Anzumerken ist, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Leitung bei Bruch nicht ersetzt zu werden für das wesentlich kleinere Netz des WV-CH immer gegen die untere Schranke für p.not.rep konvergierte. Im Gegensatz dazu verhielt es sich für den Datensatz WV-AUT völlig anders. In diesem Fall konvergierten die Werte zur Obergrenze der gewählten Schranken. Ohne Festlegung des Wertes für p.not.rep. wurde die Untergrenze mit 0,001 und die Obergrenze mit 1 definiert. Das Optimum schien am Rand der Wertebereiche zu liegen, was aber unplausibel ist (siehe Kapitel 4.2.1).

Aufgrund der nicht Identifizierbarkeit von p.not.rep. musste ein fixer Wert angegeben werden. Die Wahl von p.not.rep ermöglicht, die Parameterschätzung für verschiedene starke vergangene Ersetzungstätigkeit zu korrigieren. Ist p.not.rep gegeben, können optimale Werte für die verbleibenden Parameter, welche dann auch für die unterschiedlichen Methoden konvergierten, gefunden werden.

SWIP-PFM gibt nach der MLE die Ergebnisse der Parameter in folgender Art und Weise aus. Die Berechnung erfolgte am WV-CH Datensatz mit vordefiniertem p.not.rep = 1,0

**Tabelle 6** : Ergebnisse SWIP-PFM nach MLE

par	fvalues	method	fns	grs	itns	conv	KKT1	KKT2
c(1.11044778573552, 3.8691978298764, 4.2800935135163)	1438.25707589155	Nelder-Mead	70	NA	NULL	0	TRUE	TRUE
c(1.11044778573552, 3.8691978298764, 4.2800935135163)	1438.25707589155	BFGS	18	1	NULL	0	TRUE	TRUE
c(1.11044778573552, 3.8691978298764, 4.2800935135163)	1438.25707589155	CG	35	3	NULL	0	TRUE	TRUE

Die Spalte „par“ beinhaltet die Werte nach der MLE für die Definition der Weibull- und Exponentialfunktion. Die ersten zwei Parameter definieren den Funktionsverlauf der Weibull- Funktion und somit die Zeit bis zum Eintritt des ersten Schadens. Der dritte Wert definiert den Parameter der Exponentialfunktion welche die Zeit zum Eintritt von Folgeschäden festlegt. Zudem werden die Funktionswerte (Spalte „fvalues“) angegeben. Der kleinste Wert maximiert die Likelihoodfunktion da die Ergebnisse mit  $-1^{\dots}$  errechnet werden. (Parameter folgen einer Lognormalverteilung, lt. Anmerkungen im R-Skript, Scheidegger und Scholten, 2012)

Die Spalten KKT1 und KKT2 geben an ob die entsprechende Methode konvergiert hat, bzw. ob ein globales Optimum im Parameterraum gefunden werden konnte. Nur wenn diese Spalten den Wert „TRUE“ aufweisen, können auch Gradienten zur Ermittlung der Unsicherheiten berechnet werden.

Dieser Punkt der Unsicherheiten wurde in den Modellrechnungen nicht berücksichtigt, demnach wird die Prognose nur mit den durch die MLE gefundenen Parametern berechnet.

### 4.2.3 Modellrechnung PiReM- PHM

Der Modellvergleich wird seitens des Grazer Modells aus Zeitgründen vereinfacht mit der Software PiReM-PHM durchgeführt. Eine Erweiterung des in PiReM-PHM implementierten Proportional Hazards Model besteht bereits, muss allerdings mit der Statistik- Software SPSS durchgeführt werden und wurde im Kapitel (2.3.1) beschrieben.

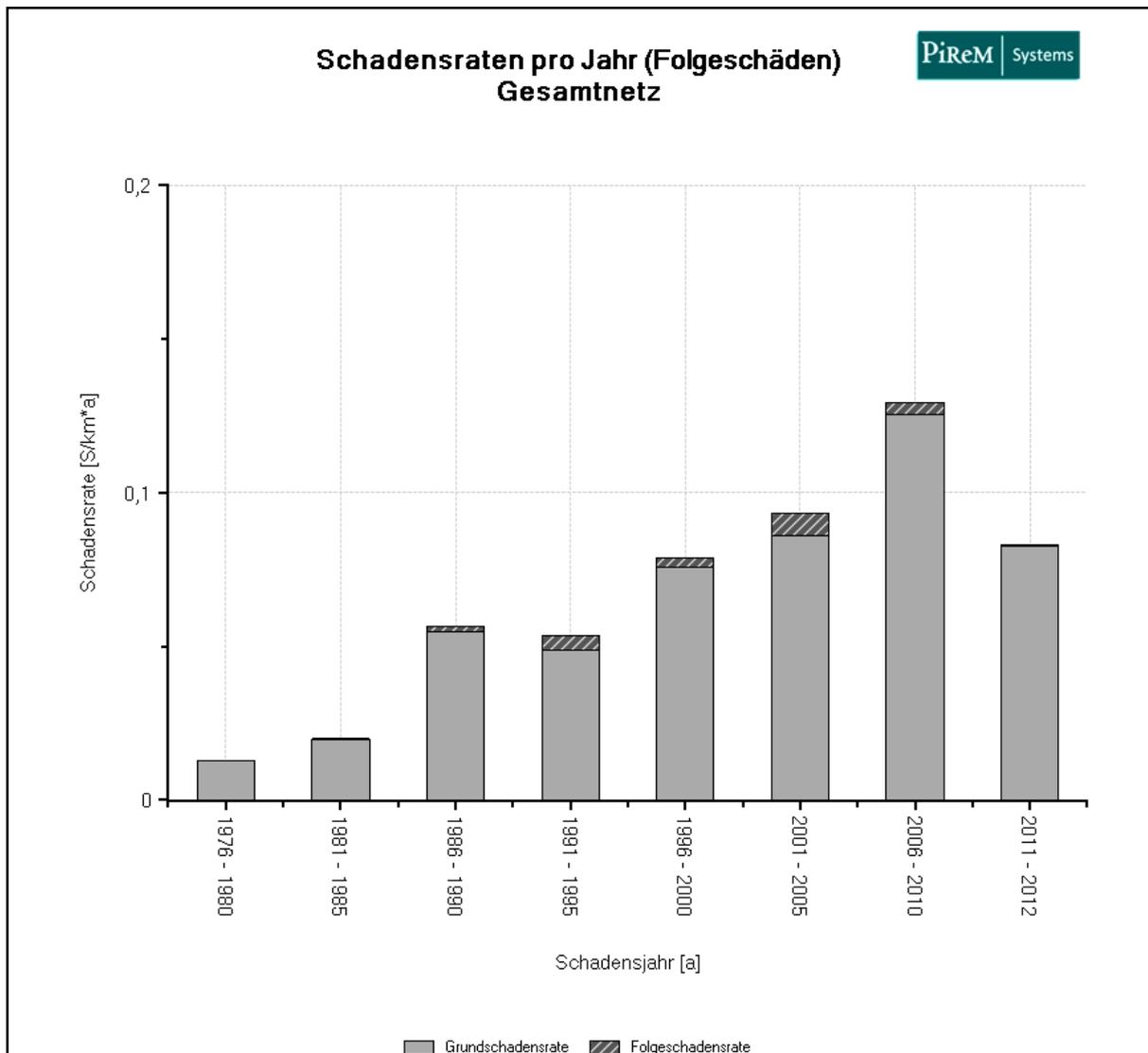
Bei der Durchsicht der Datensätze und der im ersten Schritt erforderlichen Plausibilitätsprüfung der Daten wurde ersichtlich, dass vor allem hinsichtlich Folgeschäden im WV-CH Netz sehr wenig Information vorhanden ist.

Objekt_Id	Material	Lt. Art	Bau	KS I.	KS A.	Durchm.	Verb.	Boden	Verlegejah	Länge [m]	Strassenn	Schäd
102	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1947	158,61	9999	6
105	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1949	150,68	9999	3
272	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1967	108,83	9999	3
292	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	150	Sonst.	unbek.	1967	117,99	9999	3
754	GGG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1998	83,12	9999	3
58	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	120	Sonst.	unbek.	1912	130,78	9999	2
94	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	150	Sonst.	unbek.	1940	192,55	9999	2
115	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1953	67,96	9999	2
190	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1963	194,86	9999	2
245	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	200	Sonst.	unbek.	1965	65,01	9999	2
608	GGG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1986	134,19	9999	2
777	GGG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	2000	122,94	9999	2
6	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	75	Sonst.	unbek.	1908	112,11	9999	1
7	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	75	Sonst.	unbek.	1908	112,11	9999	1
10	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1908	102,86	9999	1
11	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1908	102,86	9999	1
12	GG	Sonst.	Sonst.	Sonst.	Sonst.	100	Sonst.	unbek.	1908	102,86	9999	1

**Abbildung 4-1:** Leitungen mit Folgeschäden WV-CH

Auf lediglich 12 Leitungen, davon 9 GG und 3 GGG Abschnitte kommen bis zu 6 Schäden vor. Zudem sind keine Schäden im Bereich zwischen 3 und 6 vorhanden und Aufgrund dieser geringen Datendichte wird die Modellkalibrierung für PiReM-PHM erschwert.

Für die Berechnung sind eine gewisse Schadensdynamik und auch eine entsprechende Anzahl an dokumentierten Folgeschäden notwendig. Beide Datensätze weisen in diesem Punkt wesentliche Unterschiede auf.

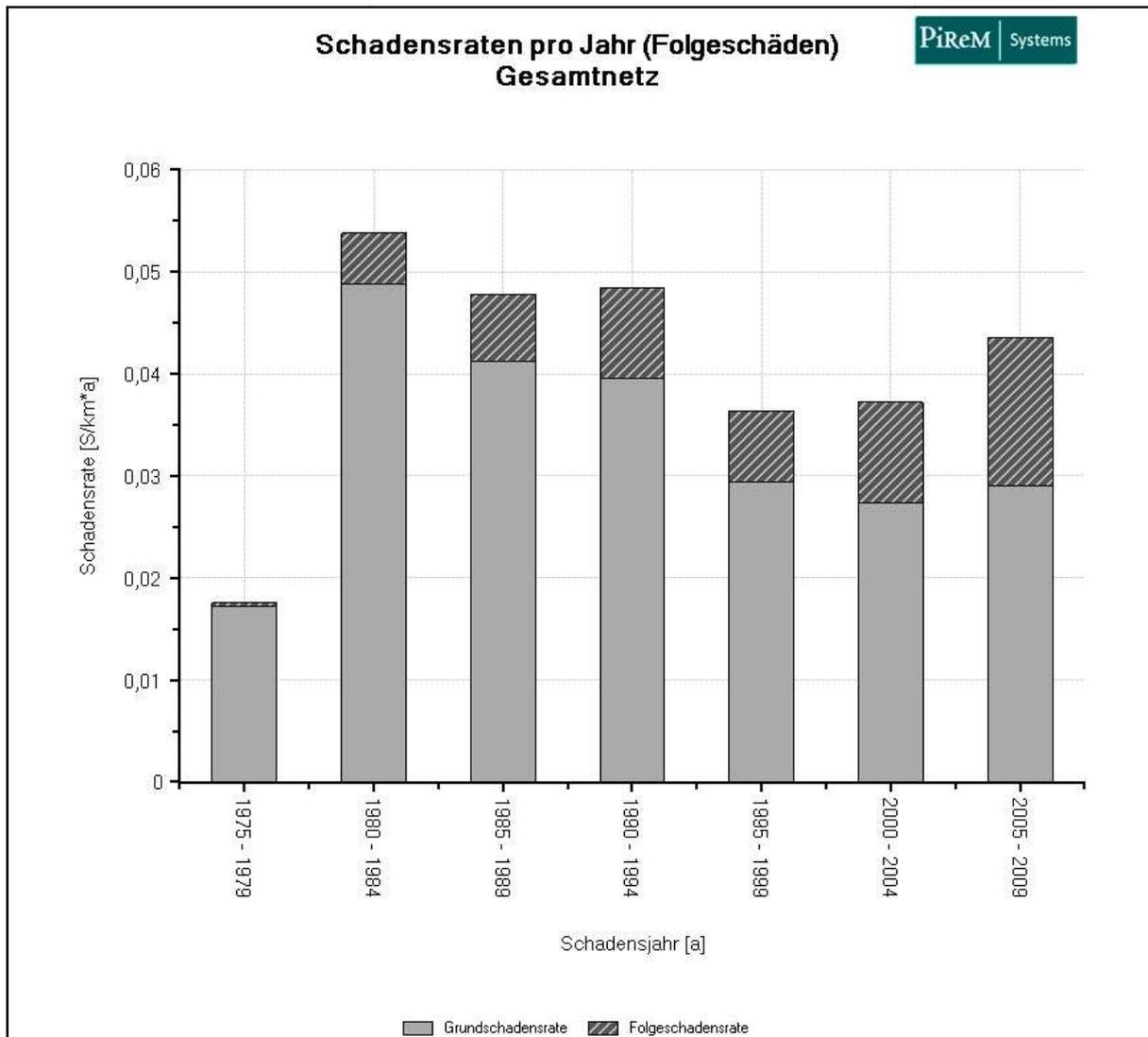


**Abbildung 4-2:** Schadensrate mit Folgeschäden WV-CH

Auch wenn viele Schäden dokumentiert wurden, sind im Schweizer Datensatz nur bis zu sechs Folgeschäden vorhanden. Diese sechs Brüche kommen auf nur genau einer Leitung vor. Zählt man alle anderen Leitungen mit mehr als einen Schaden dazu, sind insgesamt nur 12 Leitungsabschnitte von Folgeschäden betroffen. Die Modellkalibrierung des PiReM-PHM wird dadurch erschwert. Plausible Ergebnisse sind letztendlich lediglich für den Erstscha-den (Grundschatensrate) zu erwarten. Für die geringe Folgeschadensrate der Schweizer Daten kommen verschiedene Ursachen in Frage. Grundsätzlich neigen die verwendeten Materialien Grauguss und Sphäroguss insbesondere Sphäroguss der ersten Generation zu Korrosionsprozessen und infolgedessen ab beginnendem Erstscha-denseintritt zu Folgeschäden. Da dies im aufbereiteten Datensatz nicht erkennbar wird ist davon auszugehen, dass ein Großteil der Leitungen zeitnah nach dem ersten Schaden ersetzt wird oder alle Lei-

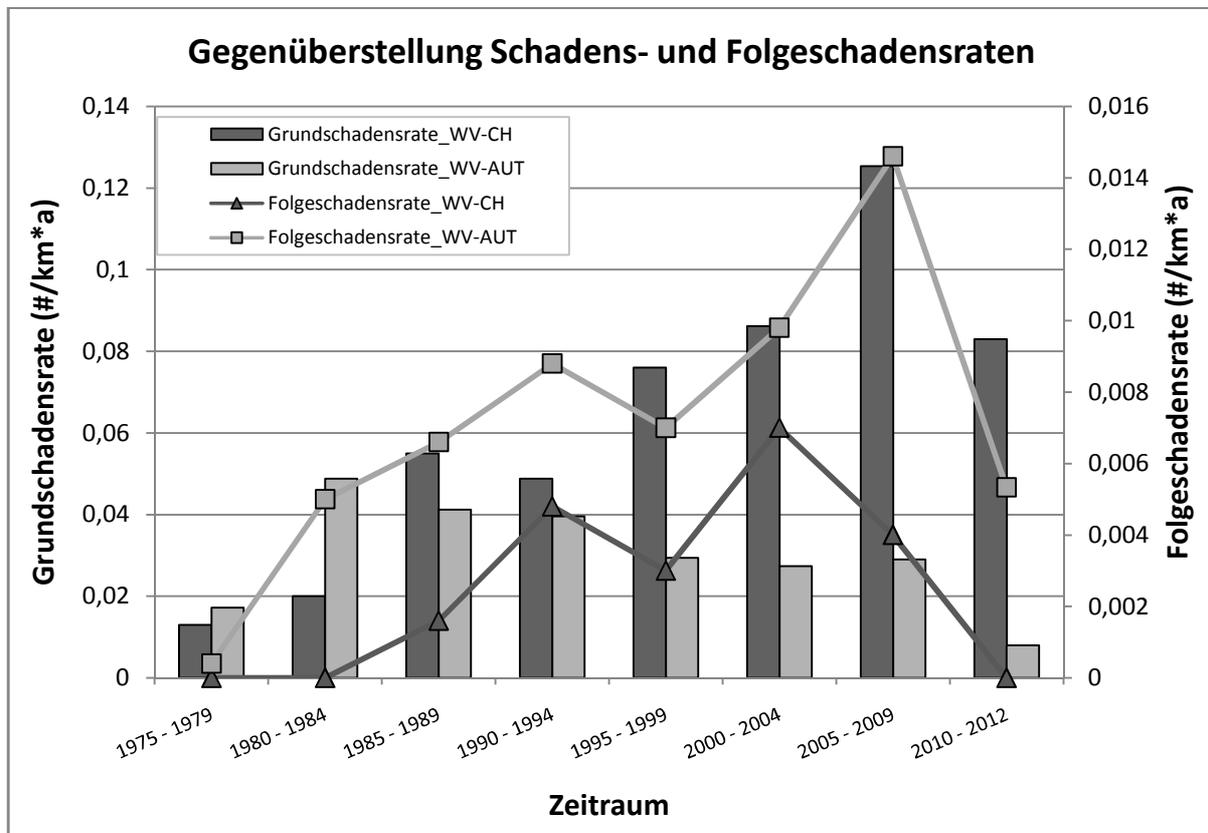
tungen mit starker Folgeschadensentwicklung bereits ersetzt wurden. Eine weitere Ursache könnte in der Aufbereitung bei schwieriger Datengrundlage liegen, wodurch sich die Zuordnung von Schäden auf die zugehörigen Leitungsabschnitte schwierig gestaltete.

Die Folgeschadensrate im Netz WV-AUT ist deutlicher erkennbar. Folglich kann durch die Anzahl an Vorschäden resp. Folgeschäden auf die unterschiedlichen Verhaltensweisen hinsichtlich Zustandsverschlechterung geschlossen werden.



**Abbildung 4-3: Schadensrate und Folgeschäden WV-AUT**

Um den Unterschied noch deutlicher zu zeigen, werden in Abbildung 4-4 die Gesamt- und Folgeschadensraten der beiden WVU auf einer einheitlichen Skalierung abgebildet.



**Abbildung 4-4:** Gesamt- und Folgeschadensraten WV-CH und WV-AUT

Nicht nur die Folgeschadenrate des WV-AUT ist gegenüber dem Schweizer Netz deutlich höher, sondern auch der Umfang an betroffenen Leitungen. Im Vergleich zum WV-CH Netz mit 9 Leitungen, sind im Österreichischen Verband 47 Leitungsabschnitte mit Folgeschäden erfasst.

Da PiReM-PHM grundsätzlich dafür entwickelt wurde, eine Hilfestellung bezüglich Rehabilitationsplanung auf Basis von definierten Leitungsgruppen mit ähnlichem Verhalten hinsichtlich Zustandsverschlechterung zu geben, ist eine Schadensprognose am Gesamtnetz ohne Gruppierung kaum machbar.

Dazu müsste die Bearbeitung mittels SPSS-PHM erfolgen wovon aufgrund des hohen Umfangs dieser Masterarbeit wie bereits beschrieben letztendlich Abstand genommen wurde. Mit vorhergehender Leitungsgruppenbildung sind deutlich bessere Ergebnisse erzielbar.

### 4.3 Zielgröße und Verifizierung

Um die entwickelten Modelle gegenüberstellen zu können, wird eine Zielgröße definiert. Die Zielgröße entspricht den von den Modellen prognostizierten Schäden im Prognosezeitraum (jeweils 3 Jahre). Die Prognose erfolgt für alle Einzelleitungsabschnitte und wird danach auf das gesamte Netz umgelegt. Zielgröße stellt demzufolge die prognostizierte Schadensrate dar ( $\#/(km \cdot a)$ ). Die Summe der errechneten zukünftigen Schäden wird auf die Leitungslänge bezogen und als Ergebnis in Schäden pro km und Jahr ausgegeben.

Die Verifizierung der Modelle erfolgt durch den Vergleich von prognostizierten Schäden und tatsächlich dokumentierten Schäden. Diese werden auf die Netzlänge bezogen und liefern die erwartete bzw. dokumentierte Schadenrate pro km und Jahr.

Die Abweichung der Prognose von der dokumentierten Schadensrate stellt jene Vergleichsgröße dar, an der die Modelle gemessen werden können. Nachdem die Schärfe der Berechnung mit der Aufnahme von Kovariablen in die Berechnung steigt, muss eine gewisse Abweichung von der beobachteten SR erwartet werden.

Um die Abweichung der Prognose vom Ziel erfassen zu können wird eine Kennzahl eingeführt. Diese Kennzahl ergibt sich aus dem Quotienten aus berechneter- und beobachteter jährlicher Schadensrate.

$$\Delta SR = \frac{berSRa}{beobSRa} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

$$berSRa = \frac{\#Schäden * 1000}{Anzahl\ Prognosejahre * Netzlänge} \left( \frac{\#}{km} \right) \quad \text{Gleichung 4-2}$$

#Schäden steht für die Anzahl der erwarteten Schäden im Prognosezeitraum. Der Faktor 1000 bezieht die Netzlänge, die im Ergebnis in m vorhanden ist, auf die gewünschte Einheit km. Die Prognosejahre sind zu berücksichtigen, da die Schäden für den gesamten Prognosezeitraum berechnet werden.

Resultat ist ein dimensionsloser Faktor, der angibt ob die Schadensrate überschätzt oder unterschätzt wurde. Für Werte größer 1 liegt eine Überschätzung vor, für Quotienten kleiner 1 eine Unterschätzung der erwarteten Schadensrate.

## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die berechneten Ergebnisse der Modelle präsentiert. Zuerst wird auf die Berechnungen mit SWIP-PFM und im zweiten Unterkapitel auf die Resultate aus der Berechnung mit PiReM-PHM eingegangen.

Nachdem beide Modellergebnisse vorgestellt wurden, werden die getroffenen Prognosen anhand der in Kapitel 4.3 eingeführten Kennzahl  $\Delta SR$  gegenübergestellt.

### 5.1 Ergebnisse SWIP-PFM

Die Berechnung erfolgt wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Mit den geschätzten Parametern der Maximum Likelihood Schätzung wird die Schadensprognose, im ersten Schritt für die nächsten 3 Jahre berechnet. Durch die unterschiedliche Festlegung der Wahrscheinlichkeit für p.not.rep. (0,6; 0,8; 1,0) ergeben sich differierende Parameterschätzungen, die wiederum zu unterschiedlichen Prognosen führen. Die Summe der erwarteten Schäden an den Einzelleitungen wird auf die Gesamtlänge und den Betrachtungszeitraum von 3 Jahren bezogen und liefert die prognostizierte Schadensrate am Gesamtnetz.

#### 5.1.1 SWIP-PFM mit Daten WV-CH

Nach der Schadensprognose am Schweizer Datensatz ergeben sich für die unterschiedlichen Festlegungen von p.not.rep. folgende Schadensraten.

**Tabelle 7:** Prognostizierte Schadensrate für 3 Jahre (2010 – 2012), WV-CH

Prognosezeitraum 2010 - 2012	p.not.rep		
	0,6	0,8	1
Schadensrate (#/(km*a))	<b>0,65</b>	<b>0,41</b>	<b>0,30</b>

Die niedrigste prognostizierte Schadensrate ergibt sich aus den Parametern, welche durch den fixen Wert p.not.rep = 1 gefunden wurden. In diesem Fall wird kein Ersatz in der Vergangenheit berücksichtigt. Das Modell weist aufgrund p.not.rep = 1, dass in der Vergangenheit viel ersetzt wurde, und somit auch dass es viel mehr Brüche als in den Daten ersichtlich gegeben hat. Folglich schätzt das Modell kürzere Zeiten zwischen den Schäden woraus die höhere Schadensrate resultiert. Wenn p.not.rep kleiner wird, beispielweise 0,6, dann wird die Wahrscheinlichkeit einer Leitung bei Schaden ersetzt zu werden höher. Eine weitere Überlegung wäre jene, dass aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit des Leitungersatzes infolge eines Schadensereignisses, vom Modell darauf geschlossen wird, im Zeitraum vor der Beobachtung mehr Schäden vorzufinden. Dies würde dazu führen, auch in der Zukunft eine höhere Schadensrate zu erwarten.

Für den WV-CH Datensatz wurden zusätzlich Prognosen für unterschiedliche Zeiträume berechnet, um herauszufinden wie sich die Prognose mit dem zu prognostizie-

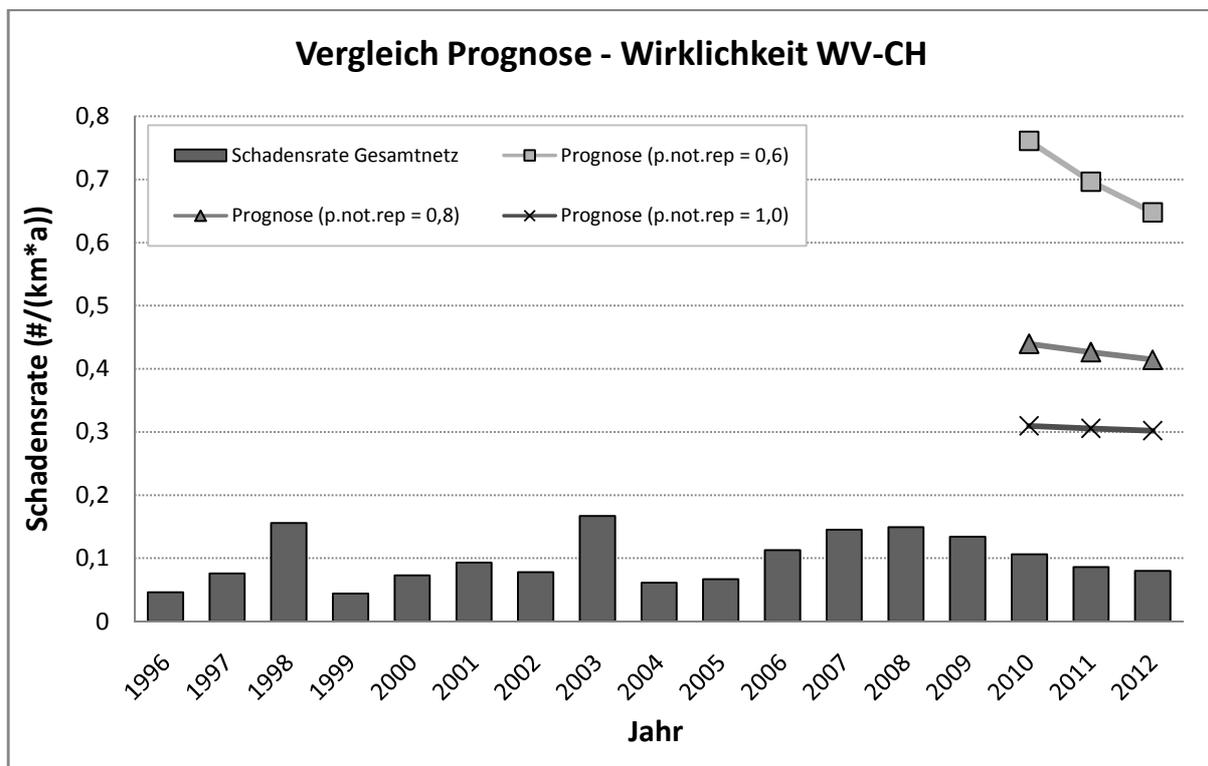
renden Zeitraum verändert. Berechnet wurde die Prognose für 1, 2, 3 und 10 Jahre in die Zukunft.

**Tabelle 8:** Prognostizierte Schadensrate für 1,2,3 und 10 Jahre, WV-CH

Prognosezeitraum	p.not.rep			
	0,6	0,8	1	
2010	<b>0,7609</b>	<b>0,4398</b>	<b>0,3098</b>	(#/(km*a))
2011	<b>0,6964</b>	<b>0,4266</b>	<b>0,3057</b>	
2012	<b>0,6480</b>	<b>0,4146</b>	<b>0,3022</b>	
2019	<b>0,4860</b>	<b>0,3604</b>	<b>0,2837</b>	

Im Hinblick auf die Schadensratenentwicklung ist zu erkennen, dass diese sich nahezu linear verhält. Im Falle des WV-CH Netzes wird mit größerem Prognosezeitraum eine geringere Schadensrate erwartet. Anzumerken ist, dass die Schadensraten für p.not.rep für jedes Prognosejahr separat berechnet wurden. Der Einfluss von p.not.rep ist deutlich zu erkennen.

Um nun die prognostizierte SR mit der Beobachteten SR zu vergleichen und damit das Modell zu verifizieren wird grafisch illustriert wie sich Prognose und Beobachtung verhalten, sowie die eingeführte Kennzahl  $\Delta$ SR berechnet.



**Abbildung 5-1:** Vergleich Prognose und Beobachtung WV-CH

Im Prognosejahr 2010 entspricht vor allem die errechnete Schadensrate für p.not.rep = 1 noch am ehesten dem realen Verlauf. Trotzdem muss angemerkt werden, dass die tatsächliche Schadensrate um das nahezu 3-Fache überschätzt wird. Es liegt eine deutliche Überbewertung der erwarteten Schäden vor. In welchem

Ausmaß diese Über- bzw. Unterschätzung vorliegt, soll durch die Bildung der Kennzahl  $\Delta SR$  verdeutlicht werden.

**Tabelle 9:** Ermittelte Kennzahl  $\Delta SR$  für 3 Prognosejahre, WV-CH

Prognosezeitraum	p.not.rep			$\Delta SR (-)$
	0,6	0,8	1	
2010	<b>7,18</b>	<b>4,15</b>	<b>2,92</b>	
2011	<b>8,10</b>	<b>4,96</b>	<b>3,55</b>	
2012	<b>8,10</b>	<b>5,18</b>	<b>3,78</b>	

Je nach gewählten Ausgangsparametern, wird die beobachtete Schadensrate durch SWIP-PFM in der Prognose 3- bis 8-Fach überschätzt. Diese Tatsache, dass SWIP-PFM in diesem Maß überschätzt, könnte vermutlich auf einen Bug in der Prognoseberechnung der verwendeten Version zurückzuführen sein.

### 5.1.2 SWIP-PFM mit Daten WV-AUT

Die Darstellung der Ergebnisse folgt demselben Ablauf wie für den Datensatz WV-CH. Nach Berechnung mit dem Schweizer Modell wurden folgende Prognosen hinsichtlich Schadensrate für die drei Jahre 2008-2010 ermittelt.

**Tabelle 10:** Prognostizierte Schadensrate für 3 Jahre (2008-2010), WV-AUT

Prognosezeitraum 2008-2010	p.not.rep		
	0,6	0,8	1
Schadensrate ( $\#/(km*a)$ )	<b>0,24</b>	<b>0,20</b>	<b>0,17</b>

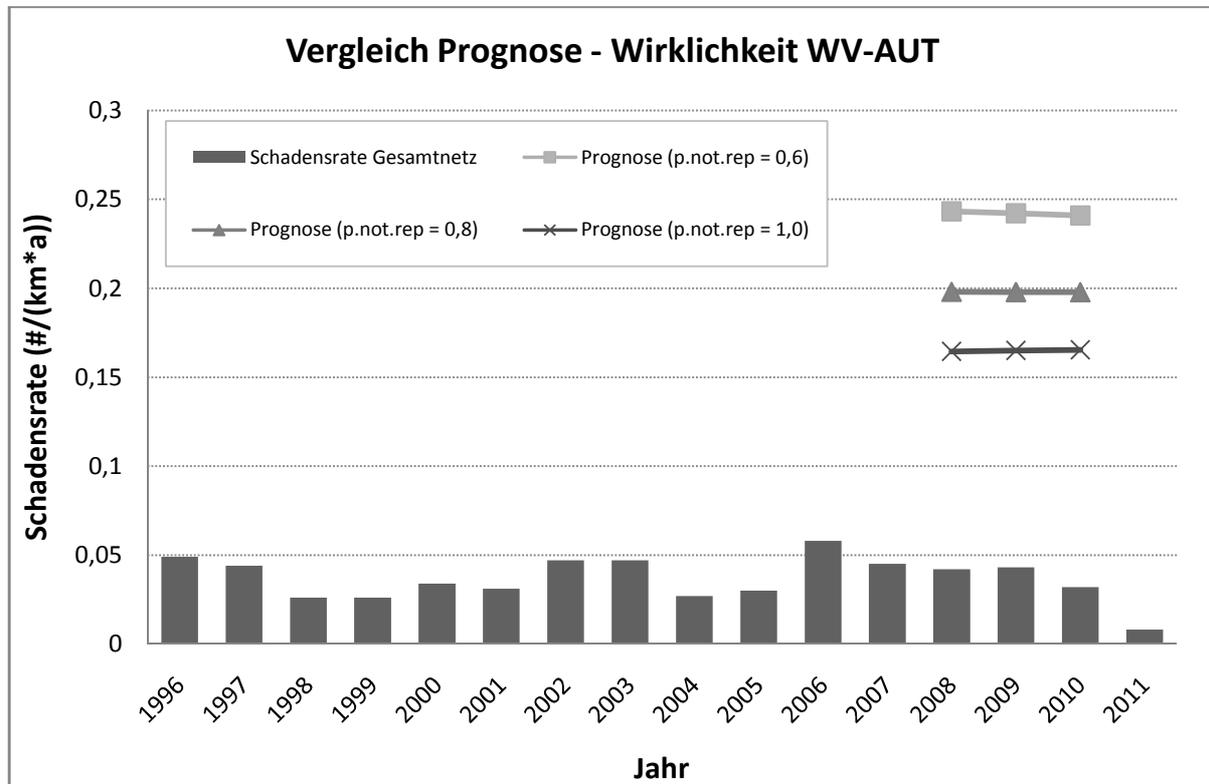
Die niedrigste prognostizierte Schadensrate tritt wiederum für die nicht Berücksichtigung des Ersatzes auf. In welcher Form sich die Schadensprognose mit dem Zeitraum der Prognose verändert, wird in Tabelle 11 dargestellt. Sinn und Zweck dieser Illustration ist es, etwaige Trends in Abhängigkeit der unterschiedlichen Eingangsparameter p.not.rep. zu erkennen.

**Tabelle 11:** Prognostizierte Schadensrate für 1,2,3 und 10 Jahre, WV-AUT

Prognosezeitraum	p.not.rep			$\#/(km*a)$
	0,6	0,8	1	
2008	<b>0,2432</b>	<b>0,1979</b>	<b>0,1644</b>	
2009	<b>0,2422</b>	<b>0,1978</b>	<b>0,1650</b>	
2010	<b>0,2409</b>	<b>0,1977</b>	<b>0,1654</b>	
2017	<b>0,2307</b>	<b>0,1949</b>	<b>0,1664</b>	

In Tabelle Tabelle 11 ist gut abzulesen, dass die vom Modell errechneten Schadensraten (ausgenommen p.not.rep = 1) abnehmen. Im Ausgenommen Fall in dem Leitungersatz nicht berücksichtigt wird, steigen die SR mit dem Prognosehorizont.

Der Vergleich von Modellrechnung und Beobachtung wird grafisch in einem Diagramm wie auch tabellarisch in Form der errechneten Kennzahl  $\Delta SR$  gezogen.



**Abbildung 5-2:** Vergleich Prognose und Beobachtung WV-AUT

Die Modellrechnung prognostiziert wie in Abbildung 5-2 gut zu erkennen eine deutlich höhere Schadensrate als am Netz WV-AUT in der Realität beobachtet wurde. Wird der Leitungsersatz berücksichtigt (p.not.rep = 0,6), sinkt die prognostizierte Schadensrate mit dem Prognosezeitraum. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch den Leitungsersatz regelmäßig neue Leitungen in das Netz gelangen denen eine längere Nutzungsdauer zugewiesen wird. Im Gegensatz dazu steigt die Schadensrate mit dem Prognosezeitraum für die nicht Berücksichtigung des Leitungsersatzes.

**Tabelle 12:** Ermittelte Kennzahl  $\Delta SR$  für 3 Prognosejahre, WV-AUT

Prognosezeitraum	p.not.rep			$\Delta SR (-)$
	0,6	0,8	1	
2008	<b>5,79</b>	<b>4,71</b>	<b>3,91</b>	
2009	<b>5,63</b>	<b>4,60</b>	<b>3,84</b>	
2010	<b>7,53</b>	<b>6,18</b>	<b>5,17</b>	

Die Kennzahl  $\Delta SR$  bewegt sich am eindeutig größeren Datensatz WV-AUT zwischen den Werten 3,9 bis maximal 7,5. Diese einheitenlose Zahl liegt weit über 1, was einer exakten Prognose entsprechen würde. Es liegt eine 3- bis maximal 7-fache Überschätzung der in Realität herrschenden Schadensrate vor. Hier ist wiederum anzumerken, dass in der aktuellen Version von SWIP-PFM im Prognoseskript vermutlich

noch ein Bug enthalten ist, der dazu führt die beobachteten Schadensraten in diesem Ausmaß zu überschätzen.

## 5.2 Ergebnisse PiReM-PHM

Zur Berechnung der beiden Datensätze mittels der Software PiReM-PHM war eine Gruppierung der Leitungen erforderlich, um Ergebnisse zu erzielen. Wurden alle Leitungsabschnitte einer Gruppe zugeordnet, konnte das Modell WV-AUT-PHM nicht kalibriert werden, da das Verhältnis zwischen nicht schadhafte zu schadhafte Leitungen zu hoch war. Für die WV-CH Daten konnte sowohl bei einer Gruppierung, als auch bei einer Gesamtnetz Betrachtung Folgeschadensabstände berechnet werden.

PiReM-PHM prognostiziert für gewöhnlich Grundschaftensraten und Folgeschadensraten, diese beiden zusammen ergeben die eigentlich erwartete Schadenrate im Prognosejahr. Die Verwendung des Medianwertes der Überlebensfunktionen zwischen den einzelnen Schadensereignissen hat zur Folge, dass zu Prognosebeginn eine gewisse Anzahl an Leitungen existieren können die gemäß Modell (Median – Überlebenszeit) den ersten/nächsten Schaden bereits hatten, dieser in der Realität aber noch nicht aufgetreten ist. Diese Leitungen („überfällige Leitungen“) können in PiReM-PHM aktuell wie folgt behandelt werden.

- a) sie werden im ersten Jahr der Prognose angesetzt und davon ausgehend werden auch weitere Schäden an diesen Leitungen gemäß Modell prognostiziert .
- b) sie werden vernachlässigt und auch weiter nicht in die Prognose einbezogen – Leitung gilt als „stabilisiert“ in ihrer Schadensdynamik (siehe Kapitel 5.2.1).

Durch Eingabe des Prognosezeitraumes 2008-2010 im Fall WV-AUT und 2010-2012 für den Datensatz WV-CH wurden folgende Ergebnisse erzielt.

### 5.2.1 PiReM-PHM mit Daten WV-CH (Gruppiert)

Die Schadensprognosen werden mit den davor angesprochenen Szenarien a) und b), demnach mit- und ohne Einbeziehung der überfälligen Leitungen berechnet.

Für die Berechnung mit Leitungsgruppierung wurde folgende Einteilung in 5 Gruppen getroffen:

- GG 1: Graugussleitungen 1908 – 1945
- GG 2: Graugussleitungen 1946 – 2009
- GGG alt: Duktigussleitungen 1908 – 1985
- GGG neu: Duktigussleitungen 1986 – 2009
- Sonstige: AZ, ST, PE, NK Leitungen

Für die Gruppen GG 2 und GGG neu konnten Schadensfolgefunktionen kalibriert werden. Den weiteren Gruppen konnte keine Schadensfolgefunktion zugeordnet

werden, da zu wenig Information von Schäden bzw. Folgeschäden verfügbar ist. Die erforderliche Datendichte dieser Leitungsgruppen ist nicht gegeben.

Leitungsgruppe	Gruppe Schadensfunktion	Konfidenzint. Schaden
GG_1	Nicht definiert (Vordefiniert)	Median
GG_2	GG_2 (Kalibriert)	Median
GGGalt	Nicht definiert (Vordefiniert)	Median
GGGneu	GGG (Kalibriert)	Median
sonstige	Nicht definiert (Vordefiniert)	Median

**Abbildung 5-3:** Kalibrierte Leitungsgruppen WV-CH

Für diejenigen Leitungsgruppen die nicht kalibriert wurden, erfolgte keine Zuordnung einer Schadensfunktion. Dieser Schritt definiert, dass diese Gruppen in der Prognose vernachlässigt werden. Die Kalibrierung für die Gruppe GGG-alt konnte vermutlich aus diesem Grund nicht kalibriert werden, weil am Material GGG-alt nur Schadensereignisse aufgezeichnet wurden (keine # Schäden > 1).

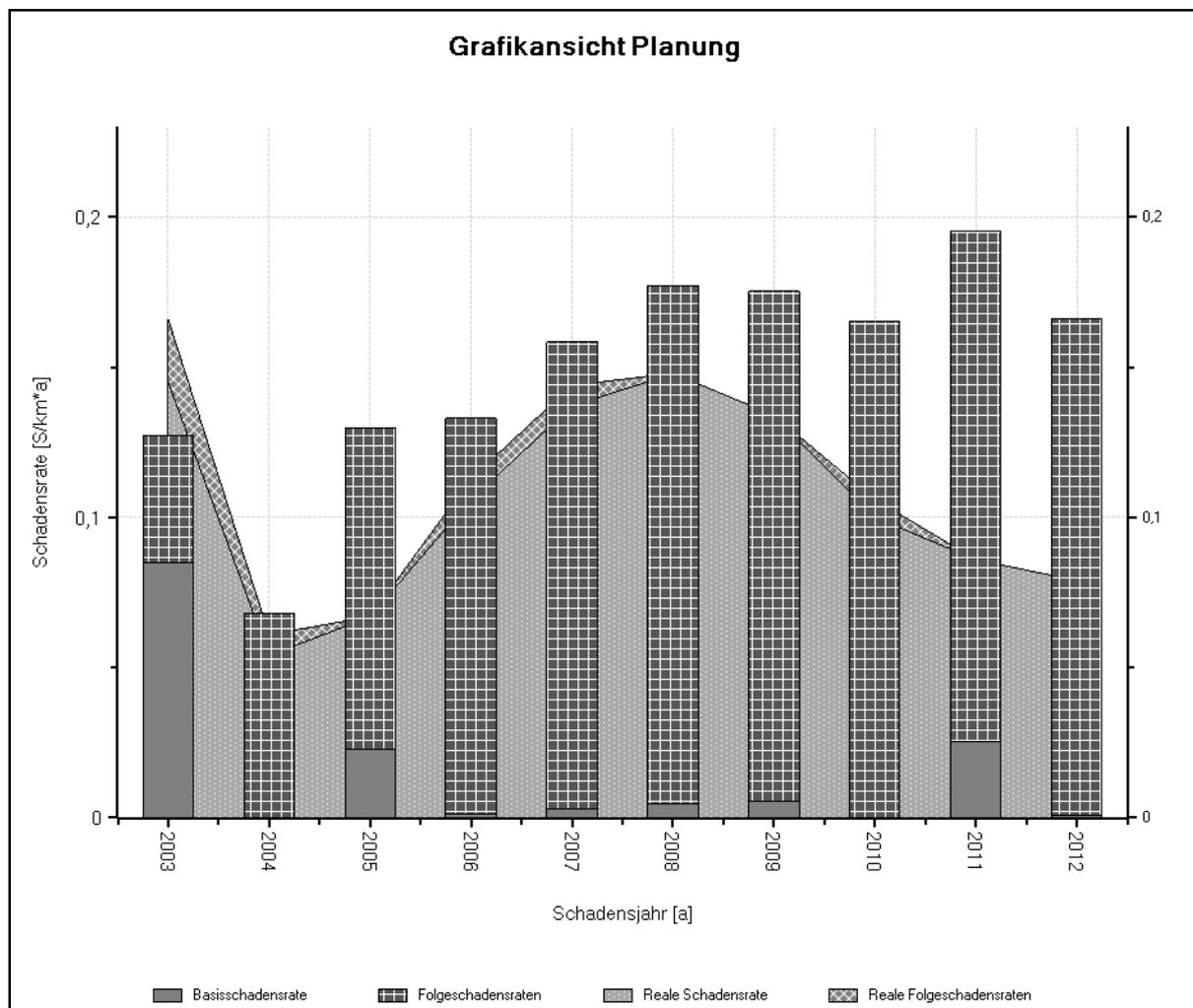
Im Zuge der Kalibrierung wurden aus den Daten Schadensfolgen für die Leitungsgruppen berechnet.

Name	Nr. 0	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8
AZ (Vordefiniert)	56	36	17	9	8	5	4	1	1
GG > 150 (Vordefiniert)	100	59	14	10	7	4	3	1	0,5
GG 1. Gen <= 150 (Vordefiniert)	109	75	22	9	7	4	3	1	0,5
GG 2. Gen <= 150 (Vordefiniert)	115	69	22	9	7	4	3	1	0,5
GG 3. Gen <= 150 (Vordefiniert)	56	35	10	6	4	4	2	1	0,5
GG_2 (Kalibriert)	59	25	2	0	0	0	0	0	0
GGG (Kalibriert)	96	0,33	0	0	0	0	0	0	0
GGG alt (Vordefiniert)	90	38	15	6	4	2	1	0,5	0,3
Nicht definiert (Vordefiniert)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PE bis 1980 (Vordefiniert)	80	54	17	10	5	2	1	1	0,5
PVC (Vordefiniert)	50	23	8	7	4	4	3	1	0,5

**Abbildung 5-4:** Kalibrierte Schadensfolgen WV-CH

Die für die Gruppen GG-2 und GGG-neu kalibrierten Schadensfolgen zeigen deutlich die kurzen Abstände bis zum Eintritt der Folgeschäden, vor allem für die Gruppe GGG-neu werden für den Zeitabstand zwischen ersten und zweiten Schaden nur 4 Monate bis Schadenseintritt erwartet. Mit den entsprechend geringen Medianwerten für Folgeschäden, wird erwartet dass auch dementsprechend viele Folgeschäden prognostiziert werden.

Für den Fall a) die überfälligen Leitungen werden im ersten Jahr der Prognose angesetzt und davon ausgehend werden weitere Schäden gemäß Modell prognostiziert, ergeben sich die berechneten Schadensraten wie folgt.



**Abbildung 5-5:** Prognose am Netz WV-CH, Fall a)

Die überfälligen Leitungen bekommen wie bereits erwähnt im ersten Prognosejahr ihren erwarteten Schaden und für die weiteren Prognosejahre werden Folgeschäden gemäß Modell prognostiziert. Die beobachtete Schadensrate wird vor allem in den Jahren 2010 bis 2012 von der Prognoseschadensrate deutlich überschritten.

Der Modellansatz in PiReM-PHM ist faktisch nicht dafür geeignet mit - in diesem Fall nur 12 Leitungen mit Folgeschäden – eine schlüssige Prognose zu rechnen. Die prognostizierten Schadensraten müssen sehr kritisch betrachtet werden, da es sich mehr oder weniger auch um zufällige Ergebnisse handeln könnte.

---

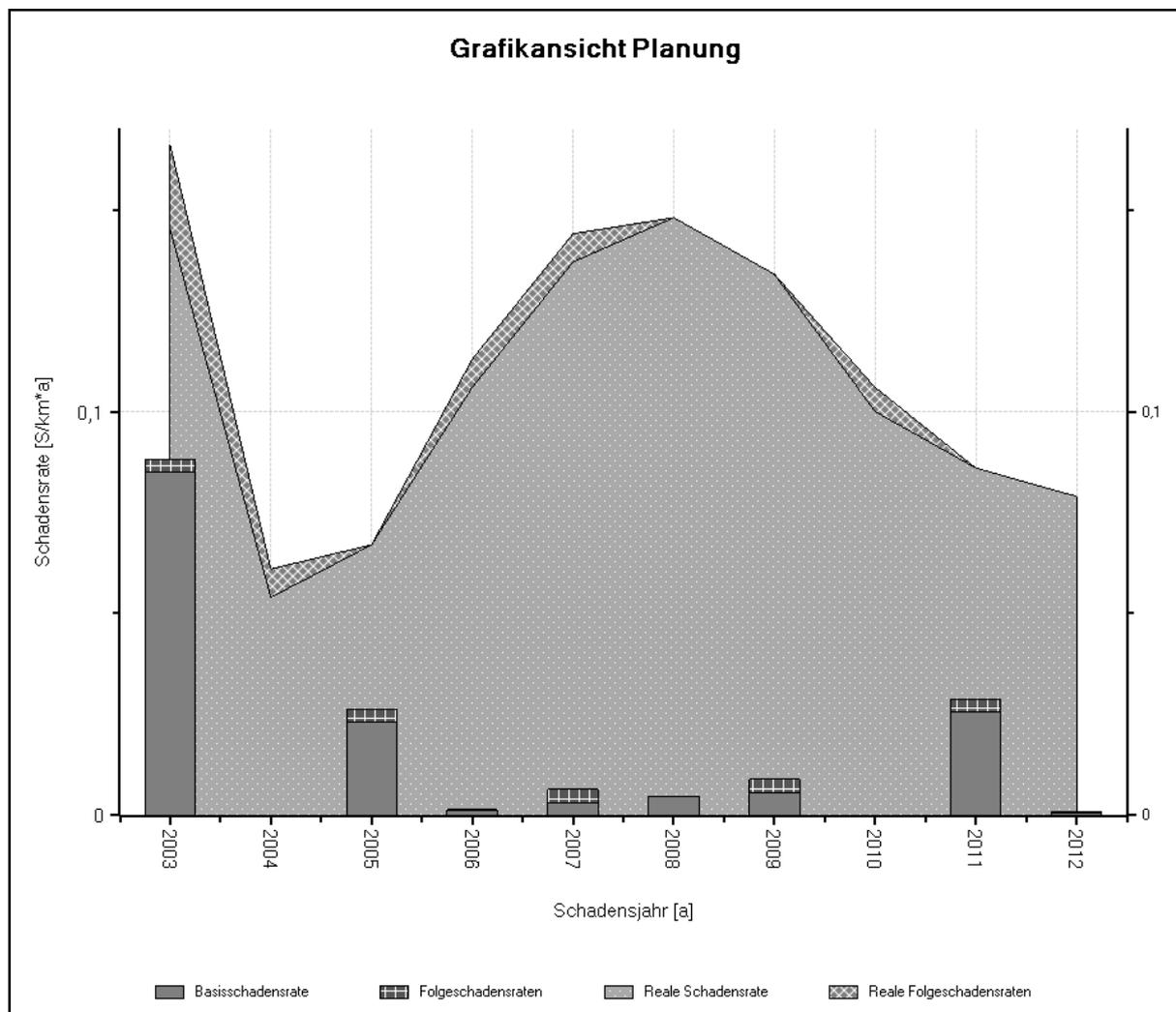
Um die Prognoseschadensrate mit der beobachteten auch in Zahlen zu fassen, wird die Kennzahl  $\Delta$ SR gebildet.

**Tabelle 13:** Ermittelte Kennzahl  $\Delta$ SR für 3 Prognosejahre, WV-CH, Fall a)

Prognosezeitraum	$\Delta$ SR (-)
2010	<b>1,558</b>
2011	<b>2,270</b>
2012	<b>2,102</b>

Die berechneten Kennzahlen für die Berücksichtigung von überfälligen Leitungen sind durchwegs größer 1. Eine Überschätzung der beobachteten Schadensrate um das bis zu 2,3- Fache liegt vor.

Im Prognosefall b) indem überfällige Leitungsabschnitte ausgelassen werden und somit in ihrer Schadensdynamik als stabil angesehen werden, ergibt sich die in Abbildung 5-6 dargestellte Prognose.



**Abbildung 5-6:** Prognose am Netz WV-CH, Fall b)

Da die überfälligen Leitungen in ihrer Schadensdynamik als konstant angenommen wurden, ist das Resultat der Prognose eine offensichtliche Unterbewertung der in Realität dokumentierten Schäden.

Das Ausmaß der Unterschätzung für die Prognosejahre 2010 bis 2012 ist in Tabelle 14 ersichtlich.

**Tabelle 14:** Ermittelte Kennzahl  $\Delta SR$  für 3 Prognosejahre, WV-CH, Fall b)

Prognosezeitraum	$\Delta SR$ (-)
2010	<b>0,000</b>
2011	<b>0,336</b>
2012	<b>0,010</b>

Im Prognosejahr 2010 wird mit nicht berücksichtigen überfälligen Leitungen kein erwarteter Schaden prognostiziert. Für beide anderen Prognosejahre liegt die Kennzahl  $\Delta SR$  deutlich unter dem Optimum von 1. Wie schon erwähnt beruhen diese Prognosen mehr oder weniger auf Zufallsbasis, da PiReM-PHM mit einer dermaßen geringen Datendichte außer für den Erstschaaden nicht in der Lage ist, Schadensfolgefunktionen in einem realistischen Bereich zu generieren.

Da es dennoch am WV-CH Datensatz möglich war, die Gruppe in welcher alle Leitungen zusammengefügt wurden, zu kalibrieren, werden diese Ergebnisse im folgenden Unterkapitel 5.2.2 ergänzend angeführt.

### 5.2.2 PiReM-PHM mit Daten WV-CH (ohne Gruppenbildung)

Für die Berechnung am Gesamtdatensatz wurden alle Materialien resp. Leitungen in einer Gruppe „ALLE\_WV-CH“ zusammengefasst. PiReM war in der Lage für die Gruppe eine Schadensfolgefunktion zu kalibrieren.

Leitungsgruppe	Gruppe Schadensfunktion	Konfidenzint. Schaden
Alle_WV-CH	Alle_WV-CH (Kalibriert) ▼	Median

**Abbildung 5-7:** Kalibrierte Leitungsgruppe „Alle\_WV-CH“

Die Kalibrierte Schadensfunktion für Alle\_WV-CH wurde über Dropdown Liste bereits zugeordnet.

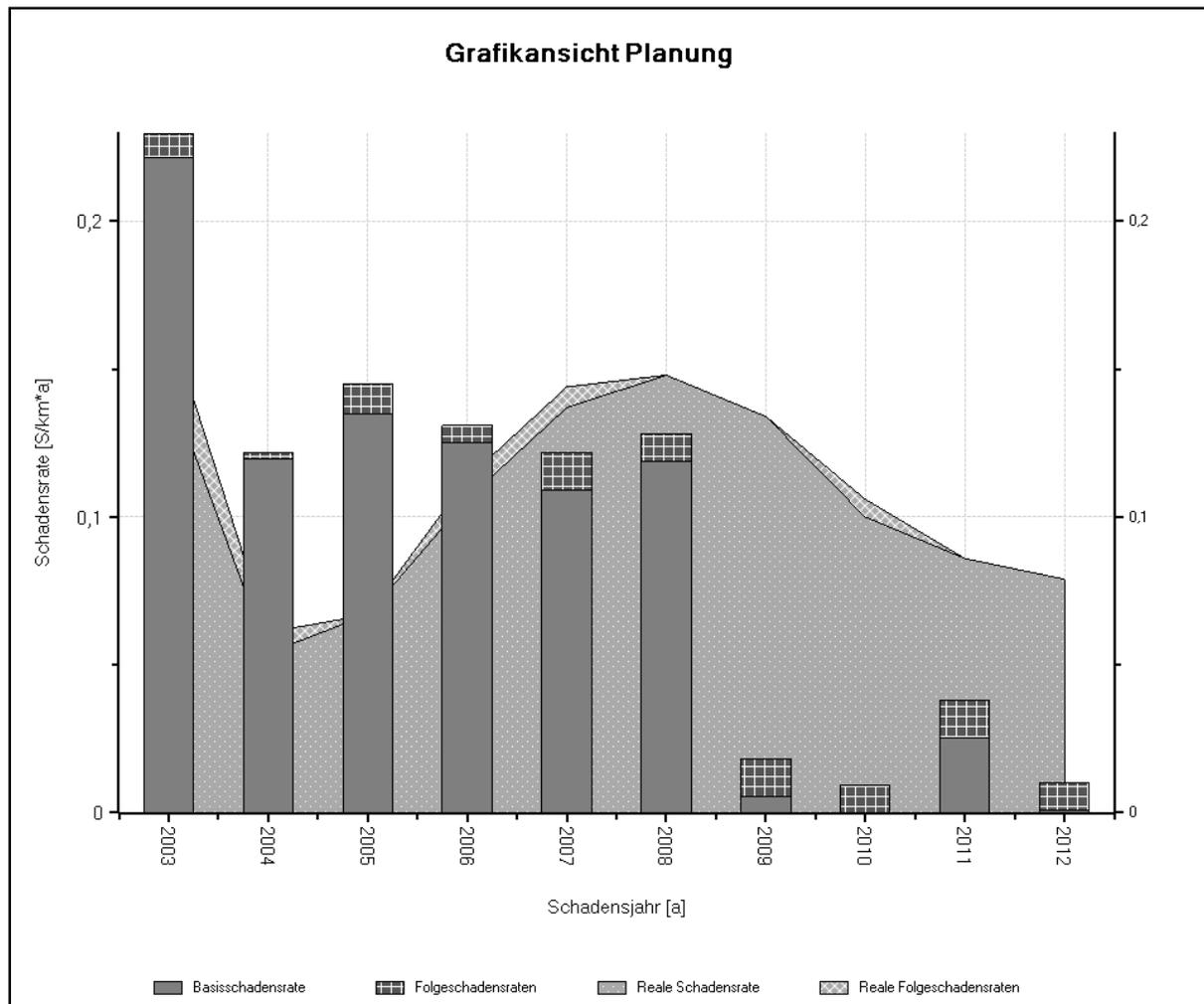
Name	$\Delta$	Nr. 0	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Alle_WV-CH (Kalibriert)		108	35	0,5	0

**Abbildung 5-8:** Kalibrierte Schadensfolge „Alle\_WV-CH“

Durch die Zusammenfassung aller Leitungen in eine Gruppe wird nicht mehr zwischen schadensanfälligen und schadensunauffälligen Leitungsgruppen unterschieden. Das hat zur Folge, dass diese kalibrierte Schadensfunktion auf alle Leitungen angewendet wird. Auch schadensunauffällige Materialien werden mit derselben Funktion belegt wie auch problematischere Materialien. In der vorangegangenen Prognoserechnung mit einer vorgenommenen Gruppierung wurden Leitungsgruppen, für die aufgrund zu geringer Datendichte keine Kalibrierung durchgeführt werden konnte, mit der Funktion „nicht definiert“ belegt und damit in der Prognose vernachlässigt.

Die Prognosen werden analog zur vorangegangenen Berechnung mit und ohne der Vernachlässigung der überfälligen Schäden durchgeführt (Fall a)- und Fall b)).

Beurteilt werden die Prognoseergebnisse ohne vorherige Gruppierung anhand der Kennzahl  $\Delta SR$ .



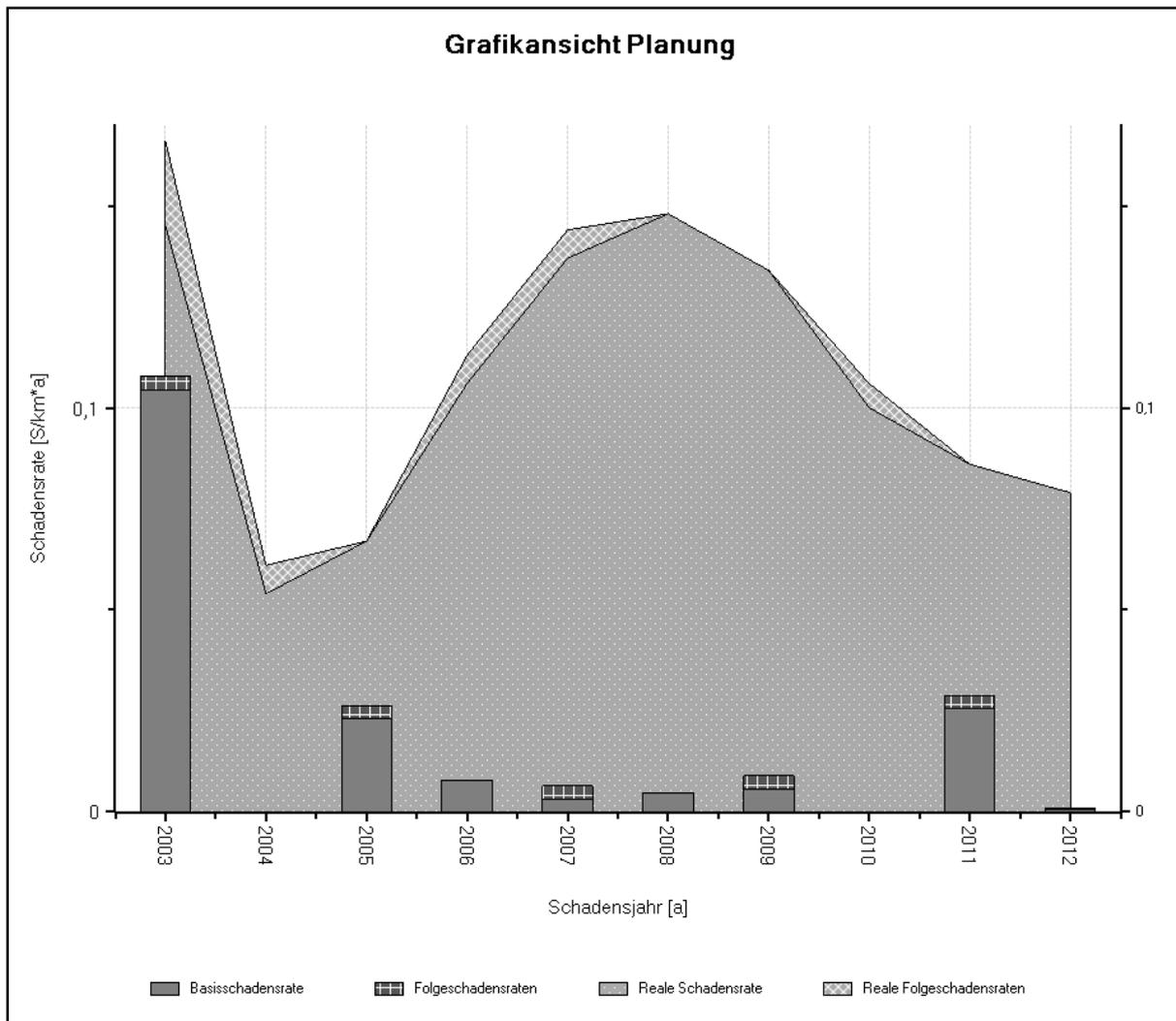
**Abbildung 5-9:** Prognose ohne Gruppierung WV-CH Fall a)

Die generell niedrige Informationsdichte an dokumentierten Folgeschäden, und der Umstand dass alle Leitungen einer Gruppe zugeordnet wurden, führt zu einem Ergebnis welches nicht annähernd mit der Prognose mit Gruppierung verglichen werden kann. Wurde mit Gruppierung eine Überschätzung der Prognosejahre ausgegeben, ist in Abbildung 5-9 eine starke Unterschätzung präsent.

**Tabelle 15:** Kennzahl  $\Delta SR$  für Netz WV-CH, ohne Gruppen, Fall a)

Prognosezeitraum	$\Delta SR (-)$
2010	<b>0,089</b>
2011	<b>0,445</b>
2012	<b>0,130</b>

Für den Fall a) in dem überfällige Leitungen in die Prognose miteinbezogen werden, ergibt sich im Gegensatz zur Berechnung mit Gruppierung (Fall a) eine eindeutige Unterschätzung der realen Schadensraten in den Prognosejahren 2010 - 2012.



**Abbildung 5-10:** Prognose WV-CH , ohne Gruppierung, Fall b)

Mit Vernachlässigung der überfälligen Leitungen werden für den Verifizierungszeitraum 2010 bis 2012 nur im Jahr 2011 Schäden prognostiziert. In Tabelle 16 sind die zugehörigen Kennzahlen angeführt.

**Tabelle 16:** Kennzahl  $\Delta SR$  für Netz WV-CH, ohne Gruppen, Fall b)

Prognosezeitraum	$\Delta SR (-)$
2010	<b>0,000</b>
2011	<b>0,336</b>
2012	<b>0,010</b>

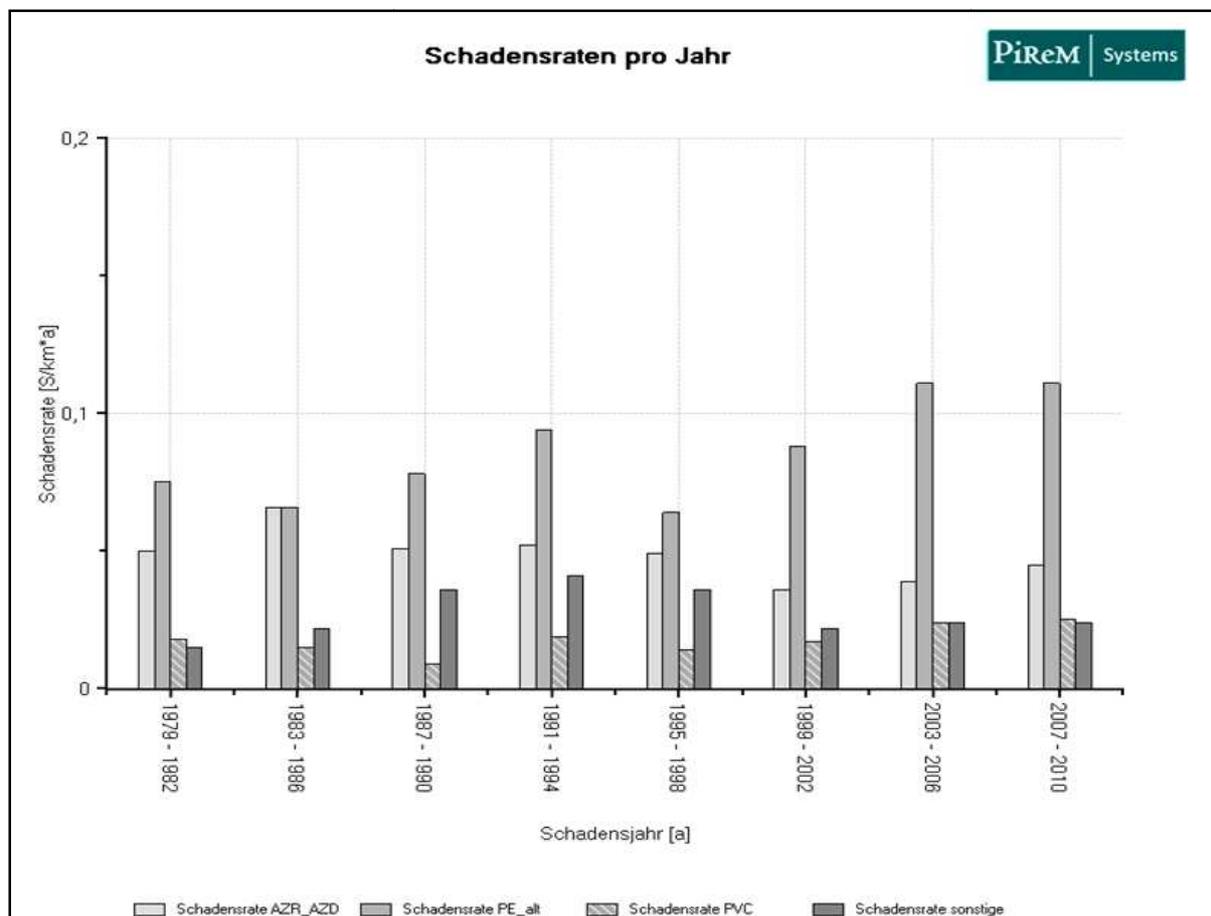
Das Ergebnis für den Fall b) ist ident zu jener Berechnung mit Gruppenbildung. Für das Jahr 2010 werden keine Schäden erwartet, und die Kennzahlen der Jahre 2011 und 2012 sind ebenfalls unplausibel.

Diese Ergebnisse aus der Berechnung ohne Gruppierung wurden zwar angeführt, der eigentliche Modellvergleich basiert jedoch auf den Berechnungsergebnissen aus der Prognose mit den maßgeblichen Leitungsgruppen (am ehesten plausibel).

### 5.2.3 PiReM-PHM mit Daten WV-AUT

Der Datensatz des WV-AUT umfasst mehr wie 3-Mal so viele Schäden als jener des WV-CH. Zudem finden 8 verschiedenen Materialien Anwendung. Beim Versuch diesen Datensatz als Ganzes in einer Gruppe zu erfassen, konnte das Prognosemodell PiReM-PHM nicht kalibriert werden. Das Verhältnis von nicht schadhafte zu schadhafte Leitungen war zu groß (siehe Beginn Kapitel 5.2). Aus diesem Grund wurde eine Leitungsgruppierung durchgeführt.

Die ursprüngliche Einteilung erfolgte in 4 Gruppen, wobei eine Gruppe aus den beiden AZ Materialien gebildet wurde, eine bestand aus Pe-alt Leitungen, eine weitere bildete PVC und die vierte Gruppe bildeten die restlichen Materialien die sich eher schadensunauffällig verhalten. Ob diese Einteilung berechtigt ist wurde anhand der Schadensraten dieser überprüft.



**Abbildung 5-11:** Schadensraten ursprünglicher Gruppeneinteilung WV-AUT

Da sich wie in Abbildung 5-11 ersichtlich die Gruppen PVC und Sonstige über den gesamten Zeitraum ähnlich verhalten, und bei Zusammenlegung in etwa die gleichen Größenordnungen der anderen Gruppen erreichen, wurde PVC noch in die Gruppe der Sonstigen Leitungen integriert. Mit diesem Schritt wurden drei Leitungsgruppen festgelegt mit denen es möglich war das Modell zu kalibrieren.

Leitungsgruppe	Gruppe Schadensfunktion	Konfidenzint. Schaden
AZR_AZD	AZR_AZD (Kalibriert)	Median
PE_alt	PE_alt (Kalibriert)	Median
sonstige	sonstige (Kalibriert)	Median

**Abbildung 5-12:** Kalibrierte Leitungsgruppen WV-AUT

Die Kalibrierten Schadensfunktionen wurden den Leitungsgruppen bereits zugewiesen.

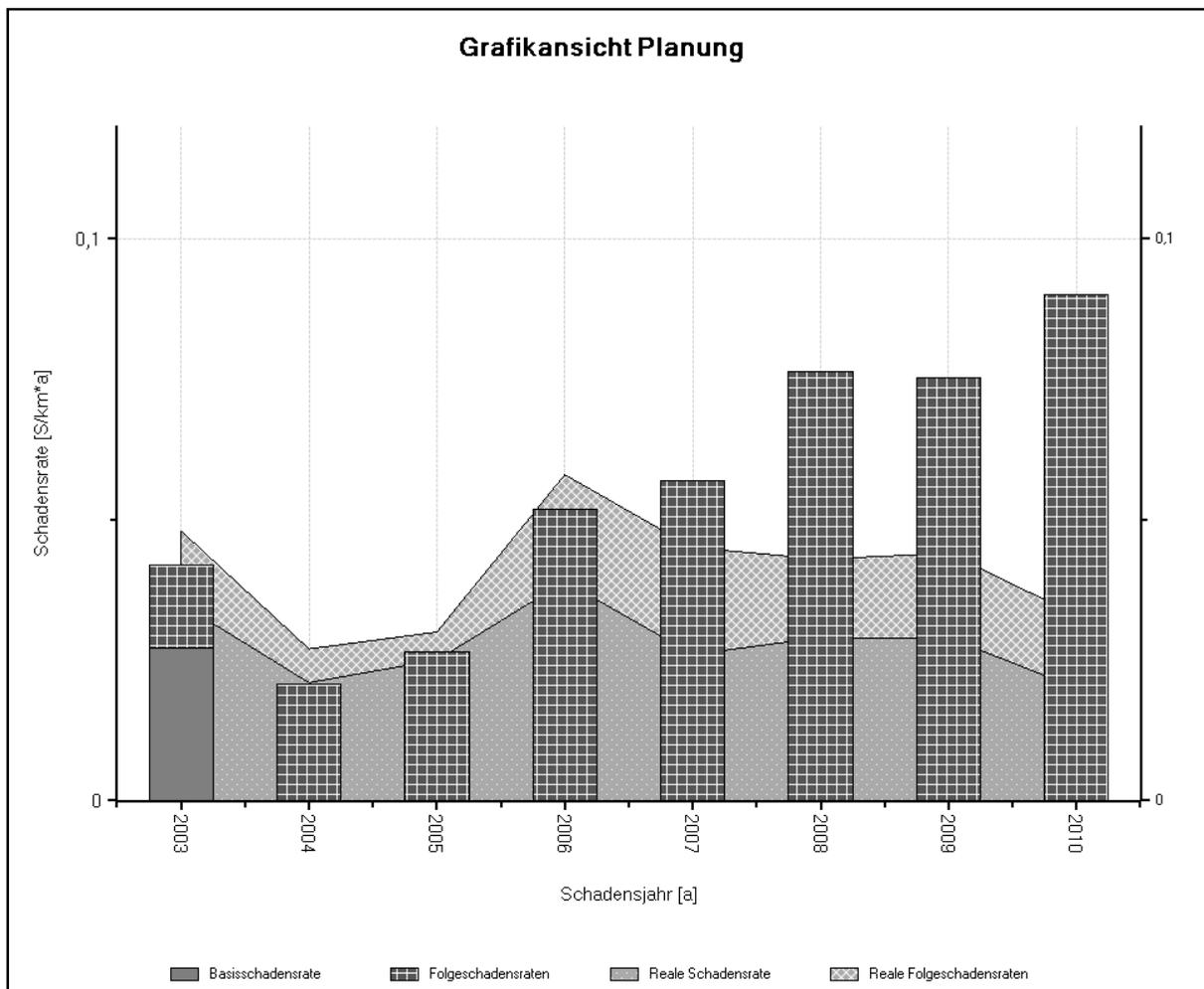
Name	Δ	Nr. 0	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8
AZ (Vordefiniert)		56	36	17	9	8	5	4	1	1
AZR_AZD (Kalibriert)		109	44	12	2	0,33	0	0	0	0
GG > 150 (Vordefiniert)		100	59	14	10	7	4	3	1	0,5
GG 1. Gen <= 150 (Vordefiniert)		109	75	22	9	7	4	3	1	0,5
GG 2. Gen <= 150 (Vordefiniert)		115	69	22	9	7	4	3	1	0,5
GG 3. Gen <= 150 (Vordefiniert)		56	35	10	6	4	4	2	1	0,5
GGG alt (Vordefiniert)		90	38	15	6	4	2	1	0,5	0,3
Nicht definiert (Vordefiniert)		-	-	-	-	-	-	-	-	-
PE bis 1980 (Vordefiniert)		80	54	17	10	5	2	1	1	0,5
PE_alt (Kalibriert)		78	53	28	15	5	2	1	0,5	0,5
PVC (Vordefiniert)		50	23	8	7	4	4	3	1	0,5
sonstige (Kalibriert)		151	36	6	0,5	0	0	0	0	0

**Abbildung 5-13:** Kalibrierte Schadensfolgen WV-AUT

Im Falle des Datensatzes WV-AUT war es für PiReM-PHM durchführbar, aufgrund ausreichender Information und getroffener Gruppeneinteilung, Schadensfolgefunktionen für das Prognosemodell zu kalibrieren. Die ermittelten Medianwerte sind deutlich höher, und entsprechen vor allem für die Folgeschäden besser der Realität.

Mit den kalibrierten Schadensfolgen der drei Gruppen werden Prognosen für die Fälle a) und b), mit- und ohne Berücksichtigung der überfälligen Leitungen, berechnet.

Im Fall der Berücksichtigung überfälliger Leitungen (Fall-a) wurden am Netz WV-AUT mit einer Leitungsgruppierung folgende Prognosen berechnet.



**Abbildung 5-14:** Prognose WV-AUT- mit Gruppierung, Fall a)

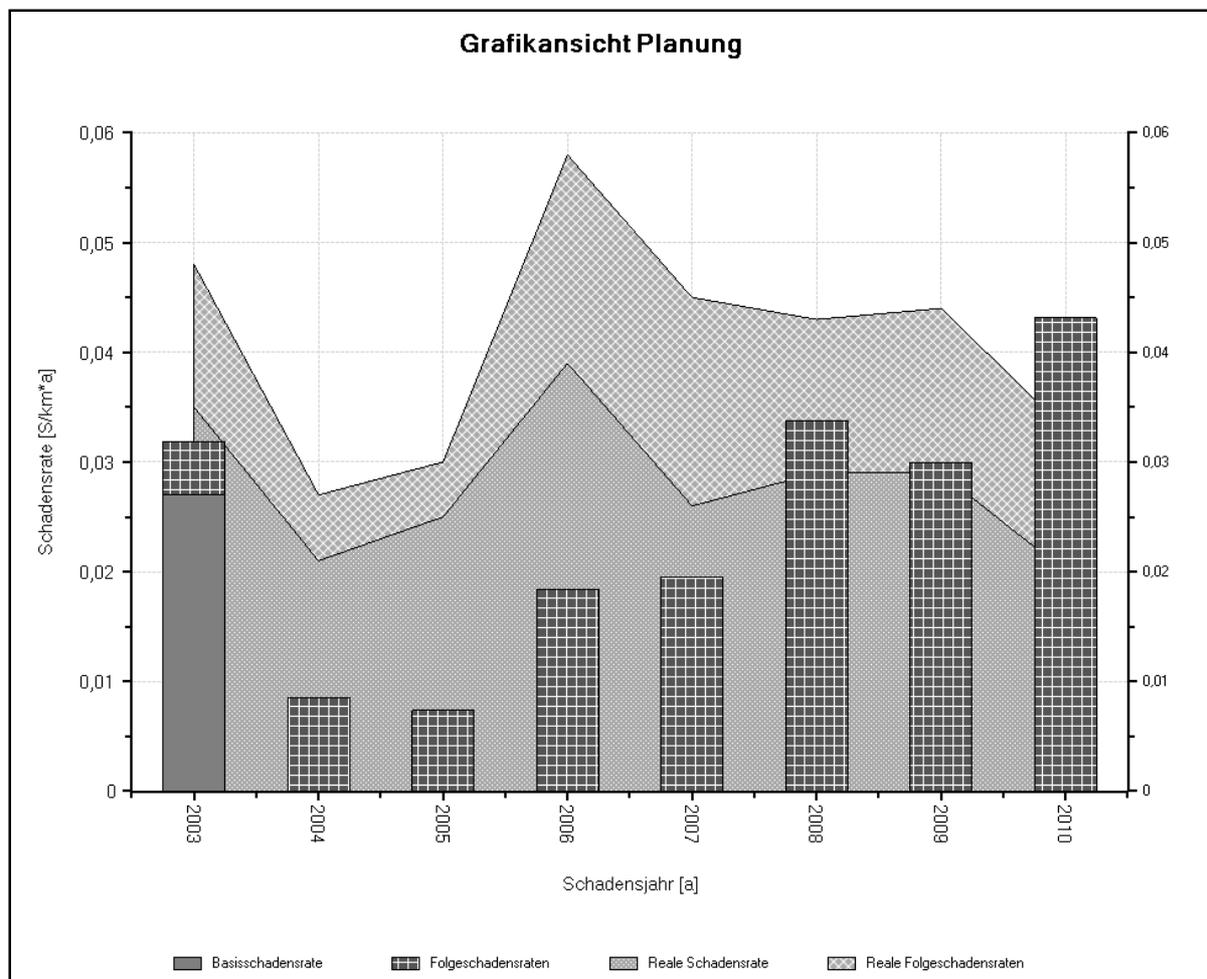
Die überfälligen Leitungen erfahren zu Beginn der Prognose den überfälligen Schaden und die Folgeschäden werden wie im Modell kalibriert für die Prognosejahre ermittelt. Ohne Berücksichtigung einer Rehabilitation werden mit Zunahme der Prognosejahre auch die vom Modell erwarteten Folgeschadensraten höher. Die Abweichung vom Ziel, sprich die Abweichung der prognostizierten Schadensrate von der beobachteten wird mit der Kennzahl  $\Delta SR$  beschrieben.

**Tabelle 17:** Kennzahl  $\Delta SR$  für Netz WV-AUT, mit Gruppen, Fall a)

Prognosezeitraum	$\Delta SR$ (-)
2008	<b>1,776</b>
2009	<b>1,711</b>
2010	<b>2,729</b>

Mit der Berücksichtigung überfälliger Leitungen kommt es für den WV-AUT gewählten Prognosezeitraum zu einer Überschätzung der beobachteten Schadenshäufigkeit um das bis zu 2,7-Fache.

Bei Vernachlässigung der Leitungen die auf ein Schadensereignis „warten“, und somit als stabil in ihrer Schadensdynamik angenommen werden, wurde in Abbildung 5-15 illustrierte Prognose berechnet.



**Abbildung 5-15:** Prognose WV-AUT, mit Gruppierung, Fall b)

Man könnte vermuten, dass sich das Auslassen der überfälligen Leitungen wie auch schon bei den Berechnungen davor in dieser Weise auswirkt, dass die Prognose den tatsächlichen Lauf klar unterschätzt. Die ersten beiden Prognosejahre 2008 und 2009 werden auch wie zu erwarten war, unterbewertet. Im letzten Jahr 2010 wurde überschätzt. Zugehörige Kennzahlen der Prognose sind in Tabelle 18 ersichtlich.

**Tabelle 18:** Kennzahl  $\Delta SR$  für Netz WV-AUT, mit Gruppen, Fall b)

Prognosezeitraum	$\Delta SR$ (-)
2008	<b>0,786</b>
2009	<b>0,681</b>
2010	<b>1,307</b>

Wie bereits Abbildung 5-15 visuell vor Augen führt, bestätigen auch die Kennzahlen der Prognosejahre einerseits die Unterbewertung und andererseits die Überbewertung der tatsächlich aufgezeichneten Schadensraten für den Fall-b).

## 6 Diskussion der Ergebnisse

Die von den beiden Forschungsgruppen entwickelten Modelle wurden in den vorhergehenden Kapiteln angewandt und auch die Ergebnisse wurden separat angeführt. Beide Modelle konnten mit den zur Verfügung gestellten Datensätzen aus Österreich und der Schweiz umgehen resp. Prognosen zu rechnen ist möglich.

Wie sich die ungleichen Modellansätze auf die Berechnung auswirken soll in diesem Kapitel diskutiert werden. Die essentiellen Unterschiede sollen noch einmal kurz erwähnt werden. SWIP-PFM berücksichtigt datenbedingte Zensuren wie Links- Trunkierung und Rechts-Zensur. Zudem ist ein „replacement model“ in das Schadensprognosemodell eingebettet. Hinsichtlich der Zeit bis zum Ersten Schaden wird die Annahme getroffen, dass die Zeit bis zum ersten Schadensereignis Weibull verteilt ist, und der Zeitabstand zwischen Folgeschäden einer Exponentialfunktion folgt (Weibull-exponential Modell).

Das Softwarepaket PiReM-PHM hingegen trifft keine Verteilungsannahmen für die Zeiten zwischen den Brüchen. Diese Funktionen werden aus dem Datensatz ermittelt. Für diese Ermittlung der Schadensfolgefunktionen ist eine entsprechende Dichtendichte erforderlich. Darum wurden die PiReM-PHM Prognosen für die Fälle a- und b (mit und ohne Berücksichtigung überfälliger Leitungen), sowie SWIP-PFM Prognosen für unterschiedliche p.not.rep herangezogen.

Für die Gegenüberstellung der Ergebnisse, werden die jeweiligen Modellszenarien herangezogen, ausgenommen des Berechnungsszenarios PiReM-PHM mit Gesamtdatensatz WV-CH- ohne Gruppierung. Dieser wurde nur aus demonstrativen angeführt, und kann auch mit keinem Ergebnis aus der SWIP-PFM Prognose sinnvoll verglichen werden.

Die Berechnungen mit SWIP-PFM haben ergeben, dass durchwegs- unabhängig von den für die Parameterschätzung angegebenen Werten für p.not.rep- die prognostizierten Schadensraten überschätzt wurden. In den Berechnungen der beiden Datensätze mit PiReM-PHM wird sowohl über- als auch unterschätzt.

Bei der Gegenüberstellung der Kennzahlenergebnisse werden die Unterschiede deutlich erkennbar.

**Datensatz WV-CH- PiReM-PHM**

Prognosezeitraum	$\Delta$ SR (-)	$\Delta$ SR (-)
	Fall(a)	Fall(b)
2010	<b>1,56</b>	<b>0,00</b>
2011	<b>2,27</b>	<b>0,34</b>
2012	<b>2,10</b>	<b>0,01</b>

**Datensatz WV-CH- SWIP-PFM**

Prognosezeitraum	p.not.rep			$\Delta$ SR (-)
	0,6	0,8	1	
2010	<b>7,18</b>	<b>4,15</b>	<b>2,92</b>	
2011	<b>8,10</b>	<b>4,96</b>	<b>3,55</b>	
2012	<b>8,10</b>	<b>5,18</b>	<b>3,78</b>	

**Abbildung 6-1:** Kennzahlen  $\Delta$ SR – PiReM-PHM und SWIP-PFM (WV-CH)

Um einen Vergleich zu ziehen, sollte von den SWIP-PFM Berechnungen die Spalte mit  $p.\text{not.rep} = 1$  herangezogen werden. PiReM-PHM berücksichtigt den Ersatz in der Vergangenheit nicht darum macht es keinen Sinn die Ergebnisse mit Werten aus den Spalten 0,6 und 0,8 zu vergleichen. Um die Größenordnung dieser Werte zu sehen ist auf Kapitel 5.1 zu verweisen.

Die Berechnungen der Kennzahlen liefern das Ergebnis, dass das Schweizer Modell beinahe doppelt so hohe Schadensraten als PiReM-PHM prognostiziert. Einen möglichen Einfluss könnte die Berücksichtigung der Links-Trunkierung im SWIP-PFM haben. Und ein weiterer nicht außer Acht zu lassender Punkt ist die Variabilität des Faktors  $p.\text{not.rep}$ . Außerdem wurde die Berechnung mit 300-Iterationen durchgeführt um Startwerte für die Likelihood Schätzung zu finden. Eventuell ändern sich diese Startparameter für die Likelihood Schätzung, wenn die Iterationszahl auf beispielsweise 500 oder gar 1000 erhöht wird.

#### **Datensatz WV-AUT – PiReM-PHM**

Prognosezeitraum	$\Delta\text{SR}(-)$	$\Delta\text{SR}(-)$
	Fall (a)	Fall (b)
2008	<b>1,78</b>	<b>0,79</b>
2009	<b>1,71</b>	<b>0,68</b>
2010	<b>2,73</b>	<b>1,31</b>

#### **Datensatz WV-AUT - SWIP-PFM**

Prognosezeitraum	$p.\text{not.rep}$			$\Delta\text{SR}(-)$
	0,6	0,8	1	
2008	<b>5,79</b>	<b>4,71</b>	<b>3,91</b>	
2009	<b>5,63</b>	<b>4,60</b>	<b>3,84</b>	
2010	<b>7,53</b>	<b>6,18</b>	<b>5,17</b>	

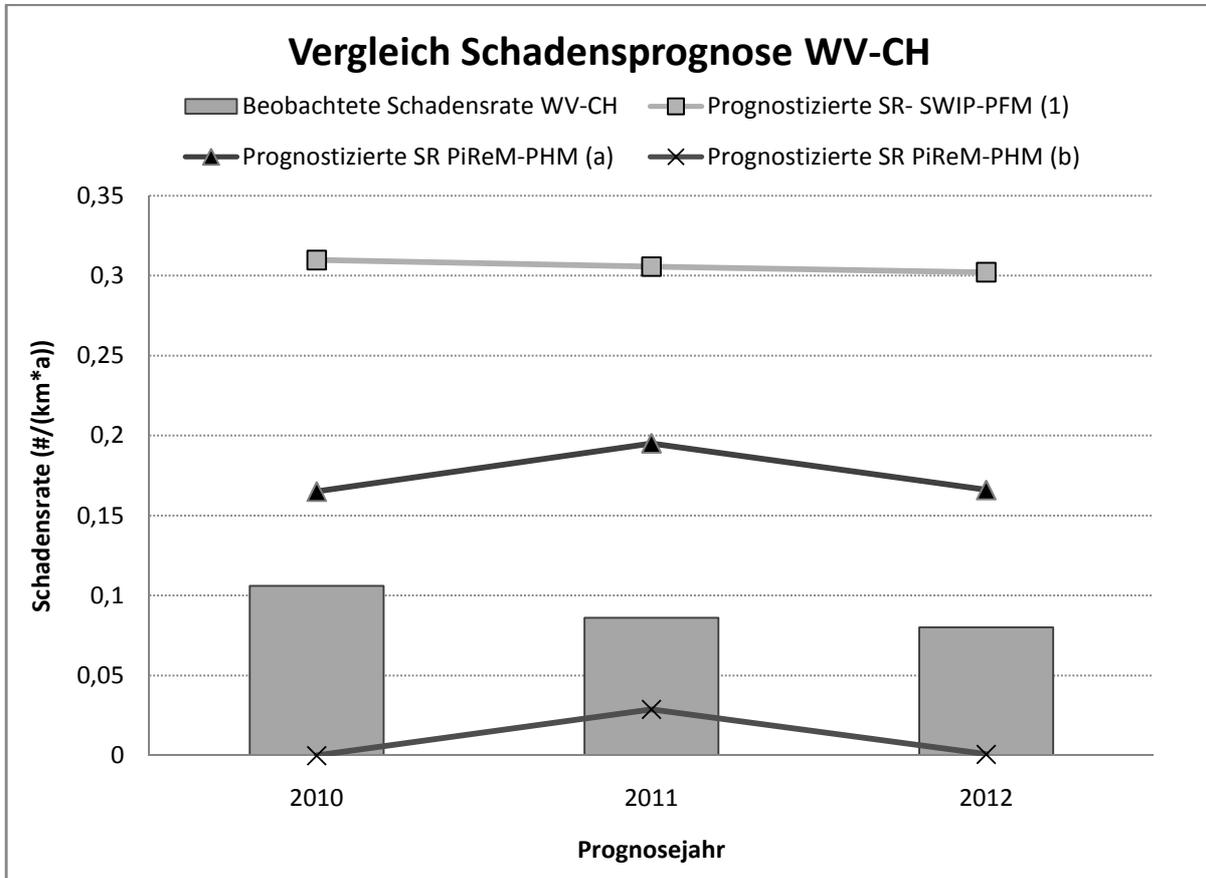
**Abbildung 6-2:** Vergleich der Kennzahlen  $\Delta\text{SR}$  – PiReM-PHM und SWIP-PFM (WV-AUT)

Es wurde angenommen, dass die Modelle mit einem umfangreichen Datensatz besser in der Lage sind zukünftige Schäden zu prognostizieren als mit Daten geringeren Umfangs.

Abbildung 6-2 zeigt deutlich wie verschieden sich die beiden Modelle verhalten. SWIP-PFM überschätzt die Schadensrate für das Jahr 2008 um das 4-Fache. PiReM-PHM überschätzt für den Fall a um mehr als das Doppelte. Für den Fall indem überfällige Leitungen nicht berücksichtigt werden, unterschätzt PiReM-PHM bis auf das Prognosejahr 2010 des tatsächlich aufgetretenen SR. Grundsätzlich liegen die ermittelten Kennzahlen der PiReM-PHM Berechnung in wesentlich kleineren Bereichen als etwa im SWIP-PFM Modell. In der SWIP-PFM Berechnung wird die Schere der Überbewertung etwas geringer. Zudem entspricht die Prognose nicht dem über die Jahre erkennbaren Schadensratenverlauf der Realität. Hierzu sei angemerkt, dass nach Absprache und Diskussion der Ergebnisse mit den ModellentwicklerInnen darauf hingewiesen wurde, dass die in dieser Arbeit verwendete Version von SWIP-PFM vermutlich einen Bug in der sehr komplexen Prognoseberechnung hat. Betreffend PiReM-PHM sei darauf hingewiesen, dass die hier berechneten Schadensprognosen ohne Berücksichtigung von Rehabilitationsstrategien erfolgen. Dies bedeutet, dass im Modell verglichen mit der Realität der betrachteten Versorgungssysteme schadhafte Leitungen nicht aus dem Rohrnetz entfernt werden und diese Abschnitte

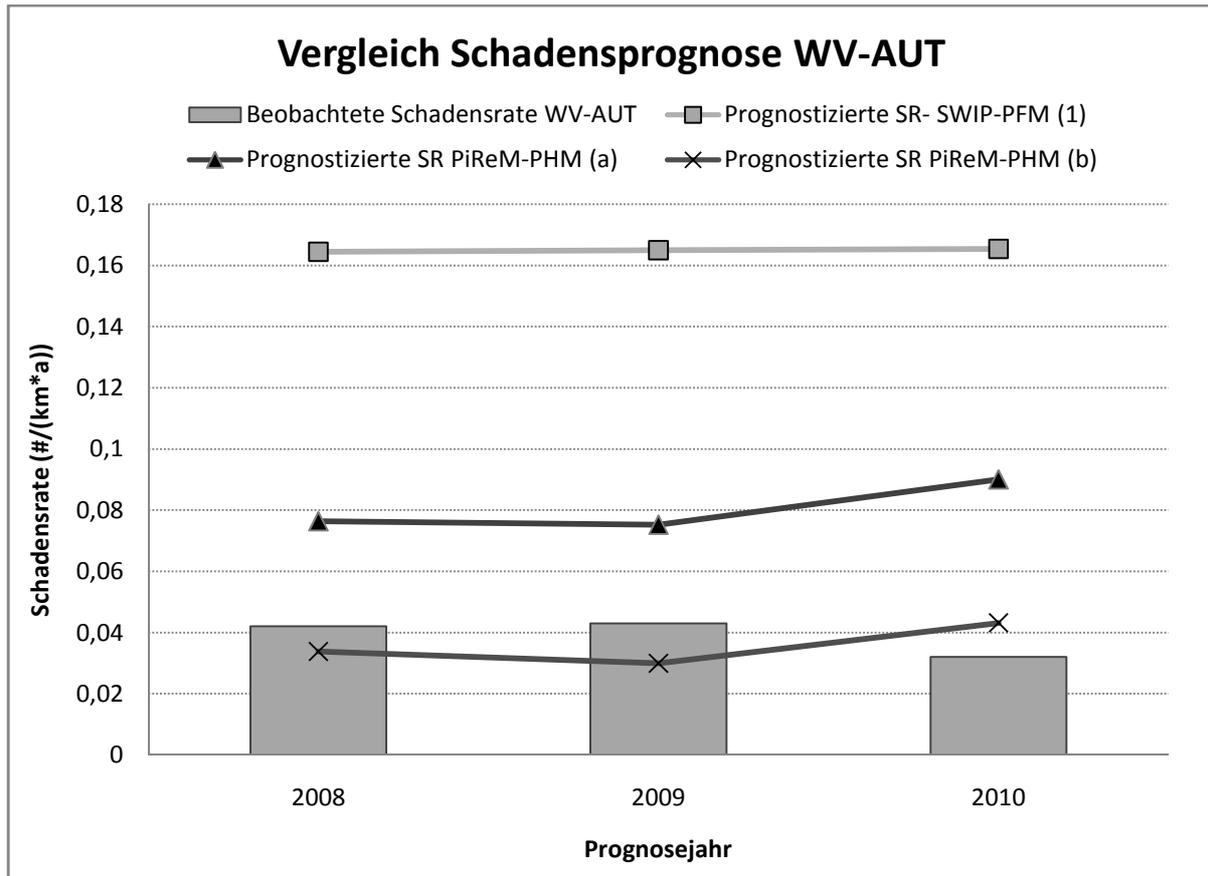
weiter in die Prognose einbezogen werden. Dies ist ein Grund dafür, dass die Schadensraten gegen Ende der Berechnungsperiode ansteigen. Eine Einbeziehung von Erneuerungen prioritärer Leitungen ist mit PiReM-PHM möglich wurde hier jedoch nicht durchgeführt.

Um einen optischen Eindruck der Berechnungsergebnisse zu erhalten, werden die Berechnungsszenarien in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 veranschaulicht. Die Balken entsprechen jeweils der im Netz beobachteten Schadensrate, die Linien mit Datenpunkten kennzeichnen die jeweiligen Modellprognosen.



**Abbildung 6-3:** Vergleich der Schadensprognose am Netz WV-CH

Werden die überfälligen Leitungen bei der Berechnung mit PiReM-PHM außer Acht, werden die werden die Schadensraten deutlich unterschätzt. Durch Einbeziehung dieser „wartenden“ wurde kein ideales, aber deutlich besseres Ergebnis erzielt. SWIP-PFM schätzt die auftretenden Schäden noch höher. Aus welchem Grund dieses Modell überproportional hohe SR schätzt, ist schwierig zu beurteilen. Leitungen Beide Modellansätze haben die Möglichkeit, Kovariablen in die Berechnung einzubeziehen. Diese machen eine schärfere Prognose möglich.



**Abbildung 6-4:** Vergleich der Schadensprognosen am Netz WV-AUT

SWIP-PFM prognostiziert eine überproportional hohe Schadensrate, was in Anbetracht des großen Datenumfanges verwunderlich ist. Vielleicht liegt es an der Tatsache, dass dieses umfangreiche Netz mit 8 unterschiedlichen Materialien und ein bereits angesprochenes schwieriges Verhältnis bezüglich Anzahl der Schäden und Anzahl der nicht Schäden bei keiner Leitungsgruppenbildung, aufweist.

Beide Modelle haben gewisse Tücken in der Anwendung, vor allem einen gewissen Spielraum in der Eingabe von Parametern, Grenzwerten etc.. Warum die Ergebnisse teilweise so stark von den beobachteten Schadensraten abweichen, hat unter Umständen mehrere Gründe.

Zum einen wurde die Datengrundlage als „Ganzes“ der Modellrechnung zugeführt, ohne eventuelle problembehaftete Leitungen (bestimmtes Material, Durchmesser) im speziellen zu betrachten und im Zuge dessen dem Modell mehr Möglichkeit zu geben, sich auf die Daten einzustellen (SWIP-PFM). Zum anderen besteht die Option, dass die Datengrundlagen eine genauere Prognose nicht zulässt (Verhältnis von Schäden zu nicht Schäden, unterschiedliche Verhaltensweisen der Materialien etc.). Es ist gut möglich, dass die Modelle für die Berechnung am Gesamtdatensatz sprichwörtlich gesprochen- kaum zwischen Äpfeln und Birnen unterscheiden können.

## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

Basis für die Berechnung von Schadensprognosen mit Hilfe von Modellen bilden Umfassende Daten eines Wasserversorgers. In der vorliegenden Arbeit wurden die Daten in ausreichenden Umfang von einem Österreichischen und Schweizer Wasserversorgungsverband zur Verfügung gestellt. Die Aufarbeitung dieser Datengrundlagen und die schlussendliche Aufbereitung für das eigentliche Ziel, mit Hilfe eines Modells eine Schadensprognose zu berechnen, stellt die erste große Herausforderung dar. Auch wenn die Modellrechnung in den meisten Fällen nur mit einem vergleichsweise geringen Aufwand verbunden ist, müssen zuvor viele Dinge, die Datengrundlage betreffend beachtet werden.

Bevor eine Modellrechnung durchgeführt wird, ist es von Vorteil, sich wenn möglich mit den lokalen Gegebenheiten des Wasserverbandes vertraut zu machen und mit Fachkräften über Eigenheiten von Materialien etc. im Bestand zu sprechen. Mit diesen Informationen im Hintergrund kann auch dem Modell ein höherwertiger Datensatz zugeführt werden. Warum dieser Ansatz gewählt wurde, ohne Unterscheidungen zu treffen und alle Leitungen sprichwörtlich in einen Topf zu werfen hat den Grund, dass beide Forschungsgruppen daran interessiert sind, ob Modelle mit nur spärlicher Information der Daten umgehen können. So wurden in den vorliegenden Berechnungen keine Kovariablen einbezogen. Für das Modell war nur die Information von Schäden und deren Alter verfügbar.

Hinsichtlich der Ergebnisse muss angemerkt werden, dass für beide Modelle noch viel Potential vorhanden ist. Werden Kovariablen in die Berechnung miteinbezogen, und trifft man zusätzlich eine Einteilung hinsichtlich Schadensanfälliger Materialien, Durchmesser oder anderen Einflüssen wie Verkehrslast (wenn ausreichend vorhanden), gibt dies den Modellen mehr Raum sich auf die jeweilige Datenstruktur einzustellen.

Die Ergebnisse sind nicht sehr zufriedenstellend, da beide Modelle zum Teil viel zu hohe Prognosen errechneten. Mit Sicherheit bessern sich die Prognosen beider Modelle wenn man diese noch mit zusätzlichen Kovariablen bedient bzw. mit Hilfe von Experten problematische Leitungsgruppen identifiziert, und dies bei einer Gruppenbildung berücksichtigt. Es besteht generell sehr viel Spielraum in beiden Ansätzen, wo teilweise Expertenwissen gefragt ist. Sei es bei der Festlegung einer Wahrscheinlichkeit für den Ersatz in der Vergangenheit, oder andererseits die Kenntnis betreffend der Qualität der Datenerhebung. Wurden typische Anfangsschäden aufgenommen oder im Datensatz ausgespart? Auch die vermehrte Anzahl solcher Schäden im Netz könnte das Modell quasi irritieren. Kleiner und Rajani (2001) beschreiben die sogenannte Badewannenkurve in der es für Leitungen eine „Burn-in Phase“ gibt. Diese Schäden der Burn-in Phase sollten für eine Schadensprognose außer acht gelassen werden (Kleiner and Rajani 2001).

Ob diese Schäden in den verwendeten Datensätzen präsent sind, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden. Es wurden die Daten im Zuge der Arbeit nicht auf Anfangsschäden untersucht. Dies wäre neben den davor erwähnten Möglichkeiten noch eine weitere Option um den Modellen zu einer noch besseren Prognose zu verhelfen.

Betreffend dem Schweizer Modell ist zu hinterfragen ob es möglich ist, mit zusätzlichen Informationen von außer Betrieb genommenen Leitungen auf die Ersatzstrategie der Vergangenheit zu schließen. In der vorliegenden Arbeit wurde nur mit Leitungen in Betrieb gerechnet, darum wäre es ein interessanter Punkt dem vielleicht in nächster Zeit nachgegangen werden könnte. Die Kenntnis von den außer Betrieb genommenen Leitungen stellt natürlich eine riesen Anforderung an die Daten und die WVU diese übersichtlich zu erheben, bzw. wird es schwierig sein eine geeignete Datengrundlage mit ausreichend Information bezüglich Leitungstausch zu finden.

Die genaue Kenntnis der Modellmöglichkeiten ist zur Interpretation der Ergebnisse unumgänglich. SWIP-PFM ist ein sehr komplexes Konstrukt mit sehr vielen Optionen. Für eine fachgerechte Anwendung ist sehr viel Hintergrundwissen erforderlich. Selbiges gilt für die Anwendung von PiReM-PHM obwohl eine grafische Benutzeroberfläche die Eingaben und Berechnungen wesentlich erleichtern.

Für die Zukunft wäre noch interessant die Schadensprognosen mit dem weiterentwickelten PHM Ansatz der TU Graz zu berechnen und mit den Ergebnissen dieser Arbeit zu vergleichen. Eine quasi „Mixtur“ beider Modelle, in welchem dann neben der Linkstrunkierung, auch das replacement model, die Anzahl der Vorschäden und deren Zeit zwischen den Schäden sowie das Ausblenden der Anfangsschäden berücksichtigt wird, würde einem sehr weit entwickelten Modell mit sehr viel Potential entsprechen.

## Anhang

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Richtwerte für durchschnittliche Schadensraten am Gesamtnetz (ohne Zubringerleitungen), Datenbasis ÖVGW-Benchmarking Stufe B 2006.....	4
Tabelle 2: Richtwerte für durchschnittliche Schadensraten in Rohrnetzen ohne Zubringerleitungen.....	8
Tabelle 3: Übersicht Materialien, Längen und Schäden WV-AUT .....	36
Tabelle 4: Übersicht Materialien, Längen und Schäden WV-CH .....	36
Tabelle 5: Parameter nach MLE – WV-AUT .....	41
Tabelle 6 : Ergebnisse SWIP-PFM nach MLE .....	42
Tabelle 7: Prognostizierte Schadensrate für 3 Jahre (2010 – 2012), WV-CH.....	49
Tabelle 8: Prognostizierte Schadensrate für 1,2,3 und 10 Jahre, WV-CH.....	50
Tabelle 9: Ermittelte Kennzahl $\Delta$ SR für 3 Prognosejahre, WV-CH .....	51
Tabelle 10: Prognostizierte Schadensrate für 3 Jahre (2008-2010), WV-AUT .....	51
Tabelle 11: Prognostizierte Schadensrate für 1,2,3 und 10 Jahre, WV-AUT .....	51
Tabelle 12: Ermittelte Kennzahl $\Delta$ SR für 3 Prognosejahre, WV-AUT .....	52
Tabelle 13: Ermittelte Kennzahl $\Delta$ SR für 3 Prognosejahre, WV-CH, Fall a) .....	56
Tabelle 14: Ermittelte Kennzahl $\Delta$ SR für 3 Prognosejahre, WV-CH, Fall b) .....	57
Tabelle 15: Kennzahl $\Delta$ SR für Netz WV-CH, ohne Gruppen, Fall a) .....	59
Tabelle 16: Kennzahl $\Delta$ SR für Netz WV-CH, ohne Gruppen, Fall b) .....	60
Tabelle 17: Kennzahl $\Delta$ SR für Netz WV-AUT, mit Gruppen, Fall a).....	63
Tabelle 18: Kennzahl $\Delta$ SR für Netz WV-AUT, mit Gruppen, Fall b).....	64

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Beispiel für ein Schadenserfassungsblatt.....	6
Abbildung 2-2: Konzeptionelle Darstellung von Datenzensur (Links- und Rechts zensierter Daten; Quelle: Le Gat, Kropp et.al. (2011)) .....	13
Abbildung 2-3: Beispiel einer Survivalfunction (Fuchs-Hanusch, Kornberger et.al. 2012) .....	16
Abbildung 2-4: Szenarien unterschiedlicher Datenverfügbarkeit (Scheidegger, Scholten et al. 2012).....	17
Abbildung 3-1: Verteilung der Längen und Schäden auf Materialien.....	21
Abbildung 3-2: Materialverteilung nach Jahren (Verlegeperioden).....	22
Abbildung 3-3: Verlauf der Schadensraten je Materialgruppe .....	23
Abbildung 3-4: Aufteilung der Längen und Schäden auf die Nennweite .....	24
Abbildung 3-5: Schadensratenentwicklung pro Jahr.....	25
Abbildung 3-6: Verlegte Längen und Schäden je Materialgruppe.....	27
Abbildung 3-7: Materialverteilung nach Jahren (verlegte Längen).....	28
Abbildung 3-8: Schadenratenentwicklung je Materialgruppe .....	29
Abbildung 3-9: Verlegte Längen und aufgezeichnete Schäden je Nennweite .....	30
Abbildung 3-10: Schadensraten pro Jahr- Gesamtnetz.....	31
Abbildung 3-11: Verlauf Schadensaufzeichnung WV-AUT .....	34
Abbildung 3-12: Verlauf Schadensaufzeichnung WV-CH.....	34
Abbildung 4-1: Leitungen mit Folgeschäden WV-CH .....	44
Abbildung 4-2: Schadensrate mit Folgeschäden WV-CH .....	45
Abbildung 4-3: Schadensrate und Folgeschäden WV-AUT .....	46
Abbildung 4-4: Gesamt- und Folgeschadensraten WV-CH und WV-AUT .....	47
Abbildung 5-1: Vergleich Prognose und Beobachtung WV-CH .....	50
Abbildung 5-2: Vergleich Prognose und Beobachtung WV-AUT .....	52
Abbildung 5-3: Kalibrierte Leitungsgruppen WV-CH.....	54
Abbildung 5-4: Kalibrierte Schadensfolgen WV-CH.....	54
Abbildung 5-5: Prognose am Netz WV-CH, Fall a).....	55
Abbildung 5-6: Prognose am Netz WV-CH, Fall b).....	57
Abbildung 5-7: Kalibrierte Leitungsgruppe „Alle_WV-CH“ .....	58
Abbildung 5-8: Kalibrierte Schadensfolge „Alle_WV-CH“ .....	58
Abbildung 5-9: Prognose ohne Gruppierung WV-CH Fall a) .....	59
Abbildung 5-10: Prognose WV-CH , ohne Gruppierung, Fall b) .....	60
Abbildung 5-11: Schadensraten ursprünglicher Gruppeneinteilung WV-AUT.....	61
Abbildung 5-12: Kalibrierte Leitungsgruppen WV-AUT .....	62
Abbildung 5-13: Kalibrierte Schadensfolgen WV-AUT .....	62
Abbildung 5-14: Prognose WV-AUT- mit Gruppierung, Fall a) .....	63
Abbildung 5-15: Prognose WV-AUT, mit Gruppierung, Fall b).....	64

Abbildung 6-1: Vergleich der Kennzahlen $\Delta$ SR – PiReM-PHM und SWIP-PFM (WV-CH) .....	66
Abbildung 6-2: Vergleich der Kennzahlen $\Delta$ SR – PiReM-PHM und SWIP-PFM (WV-AUT) .....	67
Abbildung 6-3: Vergleich der Schadensprognose am Netz WV-CH .....	69
Abbildung 6-4: Vergleich der Schadensprognosen am Netz WV-AUT .....	70

---

## Literaturverzeichnis

- Fuchs-Hanusch, D., B. Kornberger, et al. (2012). "Whole of Life Cost Calculations for Water Supply Pipes." *Water asset management international* **8**(2): 19-24.
- Fuchs-Hanusch, D., B. Kornberger, et al. (2008). "PiReM - Pipe Rehabilitation Management Developing a Decision Support System for Rehabilitation Planning of Water Mains." *Water practice & technology* **3**(1).
- Gangl, G., 2008, Rehabilitationsplanung von Trinkwassernetzen, Verlag der Technischen Universität Graz.
- Hedderich, J. & Sachs, L. (2012) *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*, 14. Auflage, Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-24400-1.
- Kleiner, Y., B. J. Adams, et al. (2001). "Water distribution network renewal planning." *Journal of Computing in Civil Engineering* **15**(1): 15-26.
- Kleiner, Y. and B. Rajani (2001). "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models." *Urban Water* **3**(3): 131-150.
- LeGat, Y. (2008a). "Extending the Yule Process to Model Recurrent Failures of Pressure Pipes."
- Yves Le Gat, Ingo Kropp, Matthew Poulton: Is the service life of water distribution pipelines linked to their failure rate? In proceedings of LESAM 2011, Strategic Asset Management of Water and Wastewater Infrastructure, Mülheim an der Ruhr, September 27-30, 2011.
- Liu, Z., Y. Kleiner, et al. (2012). Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems. N. R. M. R. Laboratory, O. o. R. a. Development and U. S. E. P. Agency. Cincinnati, OH 45268, U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- OEVGW-Richtlinie-W-77 (2000). Bereitstellung von Löschwasser durch die Wasserversorgungsunternehmen. Wien, ÖVGW Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
- OEVGW-Richtlinie-W-85 (2008). Betriebs- und Wartungshandbuch für Trinkwasserversorgungsunternehmen. Wien, ÖVGW Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.
- OEVGW-Richtlinie-W-104 (2010). Leitungsinformationssystem Wasser und Abwasser- ÖWAV Regelblatt 40. Wien, ÖVGW Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach

OEVGW-Mitteilung-W-105 (2011). Schadensstatistik Erfassung und Verarbeitung von Schadensereignissen. Wien, ÖVGW Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.

OEVGW-Richtlinie-W-100 (2007). Wasserverteilleitungen. Betrieb und Instandhaltung. Wien, ÖVGW Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.

Projekt Neue Statistik 2003, F. U. B., Center für Digitale Systeme (2003). COX-Regression.

R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Scheidegger, A., L. Scholten, et al. (2012). Extension of pipe failure models to consider replacement.

Scholten, L., A. Scheidegger, et al. (2012). "Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supplynetworks." Environmental Modelling & Software: submitted.

SVGW-Richtlinie-W-4d (2004). Richtlinien für Planung, Projektierung sowie Bau, Betrieb und Unterhalt von Trinkwasserversorgungssystemen ausserhalb von Gebäuden. Zürich, SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches.

SVGW-Richtlinie-W-4d (in Überarbeitung, Version vom Dezember 2012). Richtlinien für Planung, Projektierung sowie Bau, Betrieb und Unterhalt von Trinkwasserversorgungssystemen ausserhalb von Gebäuden, Teil 4, Betrieb und Instandhaltung. Zürich, SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches.

SVGW-Empfehlung-GW-1002/1d (2001). Geographisches Informationssystem (GIS) für Werkdaten, Teil 1, Anforderungen, Evaluation, Einführung. Zürich, SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches.

SVGW-Empfehlung-GW-1002/2d (2001). Geographisches Informationssystem (GIS) für Werkdaten, Teil 2, Datenmodell und Datenkatalog für den Datenaustausch. Zürich, SVGW Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches.

[www.ovgw.at](http://www.ovgw.at): Regelwerk

[https://portal.ovgw.at/pls/apex/f?p=101:202:2719827015791463::NO:RP,202:P202\\_SEARCH\\_DBSAFB,P202\\_SEARCH\\_DBMFG:3](https://portal.ovgw.at/pls/apex/f?p=101:202:2719827015791463::NO:RP,202:P202_SEARCH_DBSAFB,P202_SEARCH_DBMFG:3), [03.01.2013]

[www.svgw.ch](http://www.svgw.ch): Regelwerk

<http://www.svgw.ch/index.php?id=145> [05.01.2013]