REHABILITATIONSPLANUNG UNTER EINBEZIEHUNG HYDRAULISCHER MODELLIERUNGEN AM BEISPIEL DER STADT VILLACH

Diplomarbeit zum Erwerb des
akademischen Titels Diplomingenieur der
Studienrichtung Bauingenieurwesen

HERWIG ERNST STEINER

Verfasst am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und
Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz

Betreuer der Diplomarbeit:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Peter Kauch

Mitbetreuende Assistentin:

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

Graz, Jänner 2009

ERKLÄRUNG

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

Ich versichere, dass dieses Diplomarbeitsthema von mir bisher weder im In- noch im Ausland einer Beurteilerin oder einem Beurteiler in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt wurde.

Graz, Jänner 2009 .....

(Herwig Steiner)

DANKSAGUNG

Allen voran gilt mein besonderer Dank meinem Vater Ernst und seiner lieben Ilse, die mir ein sorgenfreies Studieren in jeglicher Hinsicht ermöglicht haben und immer für mich da waren, wenn ich sie gebraucht habe.

Ein weiterer Dank geht an Frau Dipl.-Ing. Dr. techn. Daniela Fuchs-Hanusch, die als Betreuerin dieser Diplomarbeit stets bemüht war auf meine vielen Fragen Antworten zu finden und mich mit ihrer Erfahrung auf dem Gebiet der Rehabilitationsplanung unterstützt hat.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Peter Kauch für die Begutachtung der Diplomarbeit bedanken.

Für die Aufnahme als Praktikant in den Dienst des Magistrates Villach möchte ich mich beim Bürgermeister der Stadt Villach Herrn Helmut Manzenreiter und dem zuständigen Referenten für die städtischen Unternehmen und Betriebe/Wasserwerk Herrn Stadtrat Harald Sobe aufrichtig bedanken.

Bei Herrn Mag. Walter Egger, Geschäftsgruppenleiter der städtischen Unternehmen und Betriebe, darf ich mich für die Möglichkeit der Weiterbildung im Rahmen meiner Tätigkeit im Wasserwerk Villach bedanken.

Ein herzlicher Dank ergeht auch an Herrn Ing. Peter Weiß (Leiter des Wasserwerkes Villach), der mir erst die Möglichkeit für eine Diplomarbeit mit Praxisbezug eröffnete, sowie Herrn Ing. Erwin Hassler (Rohrnetz/Erhaltung im WW Villach), der mir während meiner Zeit im Wasserwerk Villach immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist. Einen aufrichtigen Dank will ich auch an meine Kollegen im Wasserwerk Villach richten, die mir immer ein tolles Arbeitsklima geboten haben.

Herrn Ing. Gerald Reiter (Abteilung Vermessung und Geoinformation im Magistrat Villach) gilt ein besonderer Dank, da er mir bei Fragestellungen bezüglich GIS sehr geholfen hat.

Abschließend möchte ich mich noch, um niemanden zu vergessen, bei all jenen bedanken, die direkt oder auch indirekt zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben und mir durch ihre Unterstützung eine Hilfe waren.

Mit einem Zitat von Johann Wolfgang von Goethe schließe ich meine Danksagung und will damit die Relevanz einer nachhaltig geplanten Rohrnetzrehabilitation nochmals verdeutlichen:

„Nichts ist so erschreckend,
wie nicht wissen und doch handeln.“

KURZFASSUNG

Um Wasserversorgungsnetze in einem ordnungsgemäßen, dem Stand der Technik entsprechenden Zustand zu erhalten, ist Rehabilitationsplanung zu betreiben. Dabei sind gezielt primär zu erneuernde Leitungsabschnitte im Rohrnetz festzulegen. Ziel der Diplomarbeit ist es darzustellen, welche hydraulisch bedingten Erfordernisse neben technischen und wirtschaftlichen Kriterien bei der Definition von mittelfristigen Rehabilitationsprioritäten Einfluss nehmen können.

Die Untersuchungen werden beispielhaft für das Wasserrohrnetz der Stadt Villach durchgeführt. In repräsentativen Untersuchungsgebieten wird mit einer Rehabilitationssoftware eine Prioritätendefinition vorgenommen und mit Ergebnissen aus der hydraulischen Simulation überlagert. Die untersuchten hydraulischen Kriterien sind: Rohrrauigkeit, Fließgeschwindigkeit, Druckverhältnisse und Rohrbruchsimulation.

Den Abschluss der Untersuchungen bildet die beispielhafte Umsetzung einer Rehabilitationsmaßnahme, bei der die hydraulische Modellierung der Kontrolle der hydraulischen und hygienischen Anforderungen bei variabler Nennweite dient. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei der Definition von Rehabilitationsprioritäten im Villacher Wasserrohrnetz die Betrachtung der Fließgeschwindigkeiten sowie die Simulation der Auswirkungen von Rohrbrüchen in den Entscheidungsfindungsprozess einbezogen werden sollte.

ABSTRACT

Water supply systems have to fulfill high standards. So rehabilitation planning has to be operated to hold the networks at state-of-the-art. This process defines specific repairing or replacement of drinking water pipelines. The aspiration of this diploma thesis is to find out, how hydraulic simulations might influence the mid-term rehabilitation planning.

Investigations were carried out exemplary for the network in the city of Villach. Two representative areas provide information for the calculations. On the one hand a decision support system sets up a list of priorities and on the other hand results of a hydraulic simulation are considered. For the decision making process the following hydraulic influences were investigated: Roughness coefficient of the pipes, flow velocity, pressure conditions, simulation of burst pipe

Finally, an exemplary replacement of a pipe section is presented, based on hydraulic modeling, for recording the success of changes in the network. In summary it can be stated that flow velocity and burst pipe are best suitable and have to be taken in consideration for defining mid-term rehabilitation sections in the city of Villach.

INHALTSVERZEICHNIS

1 VERANLASSUNG UND ZIEL DER DIPLOMARBEIT ... 1
1.1 Persönlicher Bezug zum Thema ... 1
1.2 Zielsetzung ... 2
2 GRUNDLAGEN - STAND DER TECHNIK ... 3
2.1 Ziele der Rehabilitation ... 3
2.2 Begriffsdefinitionen ... 5
2.2.1 Begriffsdefinitionen nach DVGW W 401 (1997) ... 5
2.2.2 Begriffsdefinitionen nach ÖVGW W 100 (2007) ... 7
2.3 Rechtliche Vorgaben ... 9
2.4 Instandhaltungsstrategien ... 10
2.4.1 Allgemeines ... 10
2.4.2 Vorbeugende, zustandsorientierte Rehabilitation ... 11
2.5 Langfristige Rehabilitationsplanung ... 13
2.6 Mittelfristige Rehabilitationsplanung ... 18
2.6.1 Vorbemerkungen ... 18
2.6.2 Beurteilungskriterien ... 19
2.6.3 Beurteilungskriterien in PiReM ... 21
2.7 Zustandsbeurteilung von Rohrleitungen ... 24
2.7.1 Baulicher Zustand ... 24
2.7.2 Hydraulischer und hygienischer Zustand ... 27
3 HYDRAULISCHE MODELLIERUNG ZUR ZUSTANDSBEURTEILUNG VON WASSERROHRLEITUNGEN ... 31
3.1 Allgemeines - Modellbildung ... 31
3.2 Hydraulische Grundgleichungen ... 33
3.3 Anwendungen der hydraulischen Simulation ... 36
3.3.1 Vorbemerkungen ... 36
3.3.2 Rohrrauigkeiten aus der Kalibrierung des Modells ... 36
3.3.3 Bestimmung der Druck- und Durchflussverteilung ... 40
3.3.4 Konzentrationsverteilung von Qualitätsparametern ... 41
3.3.5 Optimierung von Rohrnetzspülungen ... 42
3.4 Vulnerabilitäts- und Risikobetrachtungen ... 43
3.4.1 Die Begriffe Risiko und Zuverlässigkeit ... 43
3.4.2 Vulnerabilität von Wasserversorgungssystemen ... 45
4 UNTERSUCHUNGEN: ROHRNETZ VILLACH ... 49
4.1 Allgemeines ... 49
4.2 Auswahl der Untersuchungsgebiete ... 49
4.3 Auswertungen mit PiReM ... 50
4.3.1 Untersuchungsgebiet 1 - Völkendorf ... 53
4.3.2 Untersuchungsgebiet 2 - Lind ... 56

4.4 Berechnungen mit Mike Urban ... 58
4.4.1 Allgemeines ... 58
4.4.2 Maßgebende Lastfälle für die Untersuchungen ... 59
4.4.3 Rohrrauigkeiten ... 62
4.4.4 Fließgeschwindigkeiten ... 66
4.4.5 Druckverhältnisse ... 70
4.4.6 Rohrbruchsimulation ... 73
4.4.7 Maßnahmendefinition ... 77
5 INTERPRETATION DER UNTERSUCHUNGEN ... 82
5.1 Langfristige Rehabilitationsplanung ... 82
5.2 Mittelfristige Rehabilitationsplanung ... 83
5.2.1 Rohrrauigkeiten aus der Kalibrierung ... 83
5.2.2 Fließgeschwindigkeit ... 84
5.2.3 Druckverhältnisse ... 85
5.2.4 Rohrbruchsimulation ... 86
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ... 87
7 VERZEICHNISSE ... 89
7.1 Literaturverzeichnis ... 89
7.2 Abbildungsverzeichnis ... 92
7.3 Tabellenverzeichnis ... 94
8 ANHANG ... 95
8.1 Für die Untersuchungen verwendete Software ... 95
8.2 Auswertungen mit PiReM ... 95
8.3 Berechnungen mit Mike Urban ... 100

1 Veranlassung und Ziel der Diplomarbeit

Im Zeitraum zwischen 1998 und 2001 entstand am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz die Dissertationsschrift von Frau Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch, welche sich mit der vorbeugenden Strategieverfolgung bei der Rehabilitationsplanung beschäftigt. Das Ergebnis der Forschungstätigkeit ist eine Software namens PiReP (Pipe Rehabilitation Planning System), die ein Entscheidungshilfesystem für die Planung von Erneuerungsmaßnahmen an Wasserrohrnetzen darstellt.

Eine Weiterverwendung der im Rahmen der Dissertation gewonnenen Erkenntnisse erfolgt im Forschungsprojekt PiReM (Pipe Rehabilitation Management). Die im Zuge des Knet NK 5 WP 5.1.1 entwickelte Software PiReM 2.3 BETA ist Grundlage für die vorliegende Arbeit. Vertiefende Untersuchungen anhand eines ausgewählten Rohrnetzes, in diesem Fall das des Wasserwerkes Villach, sollen eine Verifizierung der Softwareergebnisse zulassen, eine Unterstützung im Phasing-Out von PiReM darstellen und eine Weiterentwicklung ermöglichen.

1.1 Persönlicher Bezug zum Thema

Im Zuge meiner Ferialbeschäftigung im Wasserwerk Villach konnte ich in der Vergangenheit bei der Erstellung von Unterlagen für die technische Überwachung der Anlagen (nach ÖVGW W 60) mitwirken. Aus diesem Zusammenhang heraus wurde mir erst bewusst, dass die Instandhaltung der Betriebsanlagen, dazu gehört wohl auch das Rohrnetz, von großer Bedeutung ist.

Mein persönliches Interesse für die Siedlungswasserwirtschaft, insbesondere für die Wasserversorgung konnte damit geweckt werden, sodass es mir eine besondere Freude bereitet, in diesem Fachgebiet eine Diplomarbeit zu verfassen. Ein weiterer Aspekt, der mich äußerst positiv auf dieses Thema einstimmt, ist der Praxisbezug der nachfolgenden Ausführungen.

Mit der Möglichkeit die Abschlussarbeit für mein Studium im Wasserwerk der Stadt Villach zu erstellen, praxisrelevante Ergebnisse zu liefern und somit im weitesten Sinne bei der positiven Entwicklung meiner Heimatstadt mitzuwirken, geht für mich ein großer Wunsch in Erfüllung.

1.2 Zielsetzung

Teil einer zustandsorientierten Rehabilitationsplanung ist die Definition von jährlichen Erneuerungsprioritäten auf Grund wirtschaftlicher und technischer Kriterien. Unter Anwendung der Rehabilitationssoftware PiReM soll für des Wasserrohrnetz der Stadt Villach mit innovativer Methodik eine Aufstellung der Rehabilitationsprioritäten erfolgen.

In weiterer Folge ist es das Ziel, Vorschläge auszuarbeiten, wie hydraulische Schwachstellen im Netz, oder auch die Auswirkungen eines Rohrbruches an Haupt- und Versorgungsleitungen in den Entscheidungsfindungsprozess eingebunden werden können. Durch hydraulische Modellierungen von maßgebenden Lastfällen mit der Software Mike Urban (DHI Software) wird das zusätzliche Kriterium aufgezeigt, das bei der computerunterstützten Rehabilitationsplanung Eingang finden kann.

Das Ergebnis dieser Diplomarbeit soll beispielhaft darstellen, wie hydraulisch bedingte Erfordernisse bei der mittelfristigen Prioritätendefinition zu berücksichtigen sind und eine Grundlage für eine mögliche Weiterentwicklung von PiReM schaffen.

2 Grundlagen - Stand der Technik

2.1 Ziele der Rehabilitation

Auf den Ausbau der Wasserverteilungssysteme im vorangegangenen Jahrhundert folgt für die Wasserversorgungsunternehmen nun eine Phase, in der sie sich primär mit der Instandhaltung respektive mit der Rehabilitation der Rohrnetze beschäftigen müssen. Dabei ist zu bedenken, dass die Wasserversorger den größten Teil des Anlagevermögens ihrer Betriebe in den Netzen stecken haben. Somit sollte es Ziel eines jeden Versorgers sein, seine Verteilnetze über einen langen Zeitraum in einem möglichst guten Zustand zu erhalten.

Unter dem Aspekt die finanziellen Mittel und personellen Ressourcen effizient einzusetzen, darf es jedoch zu keiner Beeinträchtigung der optimalen Versorgung der Abnehmer mit Trinkwasser kommen. Eine Erhaltung des derzeitigen hohen Standards in der Wasserversorgung ist dabei oberstes Gebot. Um diese Vorgaben im vollen Umfang zu erreichen, wird es unumgänglich sein, vorbeugende Instandhaltung und Erneuerung der Versorgungsnetze zu betreiben.

In den folgenden Ausführungen sind in aller Kürze die Ziele nach ÖVGW W 100 (2007) angeführt, die durch Instandhaltung, insbesondere durch eine vorbeugende Rehabilitation des Netzes erreicht werden sollen:

- Bereitstellung von Trinkwasser entsprechend geltender Rechtsvorschriften in möglichst naturbelassener Qualität, sowie in erforderlicher Menge und mit ausreichendem Druck.
- Vermeidung von Beeinträchtigungen der Wasserqualität
- Störungsfreie Wasserlieferung, d.h. der Kunde hat einen Anspruch auf eine einwandfreie Versorgung.
- Erhaltung und Verbesserung der Kundenzufriedenheit
- Hygiene und Versorgungssicherheit der Wasserverteilleitungen sind am Stand der Technik zu halten.
- Niedrighalten von Versorgungsunterbrechungen und Folgeschäden infolge von Rohrschäden (Anzahl und Dauer je Jahr und Anschluss)
- Aus wirtschaftlichen Gründen soll eine möglichst lange Nutzungsdauer der Rohrleitungen angestrebt werden.
- Sicherstellung der langfristigen Wirtschaftlichkeit, insbesondere Wahrung des Anlagevermögens mit dem Anstreben eines einwandfreien Zustandes des Rohrnetzes (siehe ÖNORM B 2539 - ÖVGW W 59, 2005).
- Niedrighalten der Wasserverluste (ÖVGW W 63, 1993)
- Rasche Beseitigung von festgestellten Mängeln

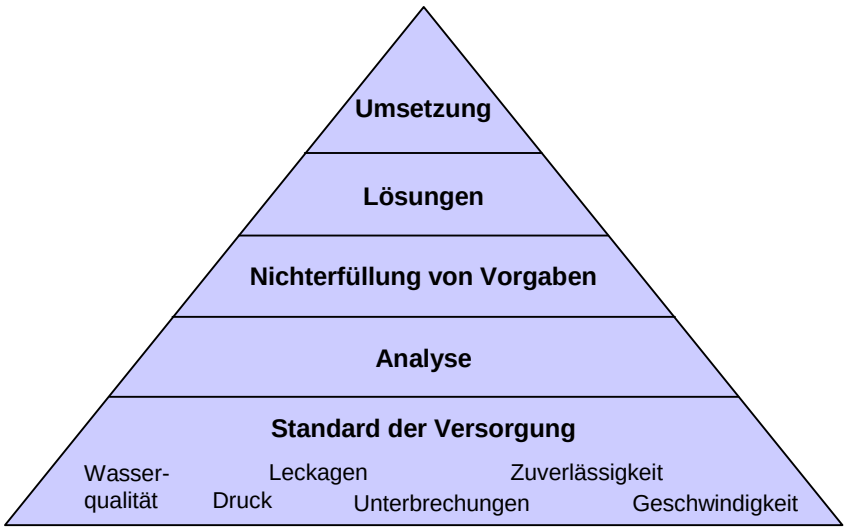


Abbildung 1: „Delta Approach" für Rehabilitationen nach ROGERS et al. (**2007**)

Als Zusammenfassung der Anforderungen und Ziele bei der Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen und gleichzeitig grafische Darstellung kann der „Delta Approach"(*Abbildung 1*) nach ROGERS et al. (2007) verwendet werden. In Form eines mit der Spitze nach oben zeigenden Dreiecks lässt sich der Ablauf bzw. die Vorgehensweise verdeutlichen. Der optimale Zugang zur Definition eines akzeptablen Standards der Versorgung geht über die Überprüfung des Rohrnetzes auf seine Konformität hinsichtlich des definierten Standards, die Identifikation von Netzteilen in denen keine Erfüllung der Vorgaben erfolgt, bis hin zum Entwurf von Lösungen, die eine Verbesserung der Situation erreichen sollen.

Die Auswirkungen einer geänderten Rehabilitationsstrategie lassen sich bei visuell nicht inspizierbaren Rohrnetzen (z.B. städtische Wasserrohrnetze) nicht sofort, sondern erst mit großer Verzögerung erkennen. Die Folgen sind dann aber umso schwerwiegender. Daher ist ein besonderes Augenmerk auf eine nachhaltige Rehabilitation der Wasserverteilungsanlagen zu legen.

Mit einer kontinuierlichen Anwendung und Befolgung der Vorgehensweise des „Delta Approach", wie ihn ROGERS et al. (2007) vorschlägt, ist es möglich, die Qualität der Versorgung auf dem derzeitigen Standard zu erhalten und in Zukunft sogar noch eine Verbesserung zu erreichen.

2.2 Begriffsdefinitionen

2.2.1 Begriffsdefinitionen nach DVGW W 401 (1997)

- *Betriebswirtschaftliche Nutzungsdauer*

  Begrenzung der Nutzungsdauer im Zuge der kalkulatorischen Bewertung der Gesamtkosten (Kapital-, Betriebs- und Instandsetzungskosten unter Berücksichtigung der Kosten für Wasserverluste) einer neuen Leitung im Vergleich zu einer vorhandenen Leitung.

- *Erneuerung*

  Ersatz einer vorhandenen Leitung mit Schwachstellen durch Verlegung einer neuen Leitung.

- *Funktionsfähigkeit*

  Gesicherte Verteilung von Trinkwasser in ausreichender Menge, mit erforderlichem Druck und in einwandfreier Qualität.

- *Inspektion*

  Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes der Verteilungsanlagen.

- *Instandhaltung*

  Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit, sowie zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes der Verteilungsanlagen.
  Anm.: Die Maßnahmen schließen die Abstimmung der Instandhaltungsziele mit den Unternehmenszielen und die Festlegung entsprechender Instandhaltungsstrategien ein.

- *Instandsetzung*

  Maßnahmen zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Verteilungsanlagen. Diese Maßnahmen schließen Reparatur und Rehabilitation von Verteilungsanlagen ein.

- *Leitungsalter*

  Alter eines Leitungsabschnittes zu einem bestimmten Zeitpunkt.

- *Leitungsgruppen*

  Gruppenweise Zusammenfassung einzelner Leitungsabschnitte hinsichtlich gleichartiger Merkmale und Verhaltensweisen (z.B. Rohrwerkstoff, Verbindungsart, Verlegebedingung, Korrosionsverhalten, Bruchanfälligkeit, ...).

- *Leitungsumlegung*

  Ersatz einer vorhandenen, funktionsfähigen Leitung durch Verlegung einer neuen Leitung auf neuer Trasse; in der Regel infolge einer Fremdbaumaßnahme.

- *Leitungsverstärkung*

  Ersatz einer vorhandenen Leitung durch Verlegung einer neuen Leitung mit größerem Durchmesser; in der Regel als Folge einer quantitativen Netzanalyse.

- *Mittleres Leitungsalter*

  Gewichtetes, arithmetisches Mittel des Alters einer Leitungsgruppe oder des gesamten Netzes zu einem bestimmten Zeitpunkt.

- *Mittlere Nutzungsdauer*

  Statistischer Erwartungswert der Nutzungsdauer für einzelne Leitungsgruppen, gestützt auf Erfahrungen und Prognosen.

- *Netzanalyse*

  Untersuchung der Verteilungsanlagen nach quantitativen, qualitativen und zustandsbedingten Gesichtspunkten zur frühzeitigen Erkennung und Lokalisierung von Schwachstellen im Netz.

- *Qualitative Netzanalyse*

  Untersuchung der Verteilungsanlagen hinsichtlich der Beeinträchtigung der Wasserqualität (Veränderung des Wassers auf dem Transportweg).

- *Quantitative Netzanalyse*

  Untersuchung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Verteilungsanlagen mit Hilfe der Rohrnetzberechnung und Vergleichsmessungen im Netz.

- *Rehabilitation*

  Maßnahmen zur Erhaltung oder Verbesserung der Funktionsfähigkeit bestehender Wasserverteilungsanlagen. Sie schließt alle Reinigungs-, Sanierungs- und Erneuerungsmethoden ein.

- *Rehabilitationsrate*

  Anteil der jährlichen Rehabilitationslänge bezogen auf eine Leitungsgruppe oder das gesamte Wasserrohrnetz.

- *Reparatur*

  Schadensbehebung durch Einzelmaßnahme

- *Sanierung*

  Ertüchtigung einer vorhandenen Rohrleitung mit einer nicht selbsttragenden Auskleidung (z.B. Zementmörtelauskleidung, Schlauchrelining).

- *Schaden*

  Eine lokale unzulässige Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit - in aller Regel mit einem Wasseraustritt verbunden.
  Anm.: Führt meist zur unmittelbaren Instandsetzung durch Reparatur.

- *Schadensrate*

  Jährliche Anzahl der Schäden je km Rohrleitung. Bei Hausanschlüssen wird die Schadensrate auf die Anzahl der Hausanschlüsse bezogen.

- *Schwachstelle*

  Schadensauffälliges Anlagenteil im Netz, das die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen kann.

- *Technische Nutzungsdauer*

  Begrenzung der Nutzungsdauer einer Leitung aus versorgungstechnischen Gründen. Sie liegt meist über der betriebswirtschaftlichen Nutzungsdauer.

- *Wartung*

  Maßnahmen zur Bewahrung der Funktionsfähigkeit der Verteilungsanlagen.

- *Wasserverteilungsanlagen*

  System bestehend aus Rohren, Formstücken, Verbindungen, Armaturen und Feuerlöscheinrichtungen für Versorgungs- und Anschlussleitungen.

- *Zustandsbedingte Netzanalyse*

  Untersuchung des Netzzustandes nach Schwachstellen, Schadensraten und Wasserverlusten (In Deutschland existieren dafür das DVGW ARBEITSBLATT W 391 (1986)„Wasserverluste in Wasserverteilleitungen“ und das DVGW MERKBLATT W 395 (1998) „Schadensstatistik“. In Österreich gelangt die ÖVGW RICHTLINIE W 63 (1993) „Wasserverluste in Versorgungsnetze, Anschlussleitungen und Verbrauchsleitungen“ zur Anwendung).

2.2.2 Begriffsdefinitionen nach ÖVGW W 100 (2007)

Als Erweiterung der Grundlagen hinsichtlich Begriffsbestimmungen sind im folgenden Kapitel noch einige weitere Definitionen angeführt:

- *Anschlussleitung*

  Die Anschlussleitung verbindet die Versorgungsleitung mit der Kundenanlage. Die Anschlussleitung beginnt an der Abzweigstelle der Versorgungsleitung und endet mit der Übergabestelle.

- *Armatur*

  Rohrleitungsteil zur Absperrung, Entnahme, Regelung sowie Messung von Durchfluss und Druck; z.B. Absperrarmatur, Regelarmatur, Druckminderventil, Be- und Entlüftungsventil, Rückflussverhinderer, Hydrant

- *Betrieb*

  Betreiben der Anlagen zum zweckbestimmten Gebrauch (bedienen, beobachten, überwachen, kontrollieren, dokumentieren, ändern, steuern und regeln)

- *Hauptleitung*

  Wasserleitung mit Hauptverteilerfunktion innerhalb eines Versorgungsgebietes, üblicherweise ohne direkt Verbindung zum Verbraucher.

- *Ortsnetz*

  Ortsnetze bestehen aus Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen.

- *Technisches Risikomanagement*

  In einem allgemeinen technischen Risikomanagement werden alle möglicherweise auftretenden Gefährdungen der Wasserqualität und der Versorgungssicherheit innerhalb der einzelnen Prozesse und Aufgaben in der Wasserverteilung systematisch analysiert und bewertet.

- *Versorgungsleitung*

  Wasserleitung, die Zubringer- bzw. Hauptleitung mit der Anschlussleitung verbindet.

- *Wasserverteilleitungen*

  Rohrnetz einschließlich der Einbauten (z.B. Armaturen, Messeinrichtungen). In der Regel unterirdisches System aus Zubringer-, Haupt-, Versorgungs- und Anschlussleitungen.

- *Wasserversorgungssystem*

  Ein Wasserversorgungssystem umfasst alle Anlagen, die für die Bereitstellung von Wasser in gewünschter Menge und Beschaffenheit für die verschiedenen Verbraucher notwendig ist.

- *Zubringerleitung*

  Wasserleitung, welche Wassergewinnung(en), Wasseraufbereitungsanlage(n), Trinkwasserbehälter und/oder Versorgungsgebiete verbindet, üblicherweise ohne direkte Verbindung zum Verbraucher.

2.3 Rechtliche Vorgaben

In Österreich existiert eine Reihe von Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien, die eine geplante Erneuerung zur Erhaltung der Wasserversorgungsanlagen am Stand der Technik erforderlich machen.

Als bedeutende Grundlage ist an dieser Stelle das WASSERRECHTSGESETZ 1959 idF BGBL 123, 2006), das die Bewilligung und Errichtung von Anlagen für die Trinkwasserversorgung regelt, mit den §§ 50 und 134 zu nennen.

§ 50 des WRG 1959 besagt, dass Versorgungsunternehmen ihre Anlagen und sonstigen Vorrichtungen in dem der Bewilligung entsprechenden Zustand und, wenn dieser nicht erweislich ist, derart zu erhalten und bedienen haben, dass keine Verletzung öffentlicher Interessen oder fremder Rechte stattfindet. D.h. es gilt aus diesem Zusammenhang heraus für jeden Betreiber eine Instandhaltungspflicht.

Im § 134 werden besondere Aufsichtsbestimmungen vorgeschrieben, die unbedingt einzuhalten sind. Darunter fallen die technische und hygienische Überprüfung der Wasserversorgungsanlage. Der Wasserberechtigte hat in Zeitabständen von höchstens fünf Jahren, sofern die Wasserrechtsbehörde nicht unter Bedachtnahme auf besondere Umstände kürzere Abstände vorschreibt, Überprüfungen durchführen zu lassen.

Auch aus der Verordnung der Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TRINKWASSERVERORDNUNG - TWV BGBL. Nr. 21/2001) und ihren Novellen lässt sich die Forderung der Instandhaltung ableiten. Nach § 5 der TWV hat der Betreiber einer Wasserversorgungsanlage seine Anlagen in einem ordnungsgemäßen Zustand zu halten und vorzusorgen, dass eine negative Beeinflussung des Wassers hintangehalten wird. Zu diesem Zweck ist die Anlage fachgerecht von geschulten Personen zu warten und instand zu halten.

Ebenso stellen Normen, die den derzeitigen Stand der Technik beschreiben, Grundlagen für die Erneuerungsplanung dar. So wird etwa die Forderung nach der Minimierung der Unterbrechungen bei Trinkwassernetzen aufgestellt, um eventuellen negativen Folgen für Umwelt und öffentliche Gesundheit entgegenzuwirken (ÖNORM EN 805, 2005). Dahingehend müssen Wasserverteilungssysteme überwacht und auf Störungen und Undichtheiten der Rohre und sonstigen Rohrleitungsteile geprüft werden.

Im Rahmen der Eigenüberwachung sind die Anlagenteile auf sichere Funktion und ordnungsgemäßen Zustand zu überprüfen (ÖNORM B 2539, 2005). Dazu gehört wohl auch die regelmäßige und systematische Überwachung von Zubringer-, Transport-, Versorgungs- und Anschlussleitungen und Armaturen auf ihre Dichtheit. Mit der zumindest monatlichen Kontrolle der Einspeisemenge ins Rohrnetz

und der Erfassung der Wasserverluste im Sinne der ÖVGW W 63 (1993) sollte eine Beurteilung zu bewerkstelligen sein.

In Ergänzung zu den rechtlichen Vorgaben in Form von Gesetzen und Normen, werden von der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW), sowie vom Deutschen Verein für das Gas- und Wasserfach (DVGW) Richtlinien und technische Mitteilungen herausgegeben, die spezielle technische und rechtliche Erfordernisse aufzeigen und erläutern.

Im diesem Zusammenhang ist auf die Regelwerke ÖVGW W 100 (2007), DVGW W 400-3 (2006) und W 401 (1997) zu verweisen, welche sich eingehend mit dem Themengebiet Rehabilitationsplanung auseinandersetzen.

2.4 Instandhaltungsstrategien

2.4.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Strategien behandelt, die bei der Planung von Rehabilitationsmaßnahmen angewendet werden können. Dabei wird auf die verschiedenen Ansätze der Strategien näher eingegangen und erforderliche Teilschritte werden erläutert. Die Strategieentwicklung hat eine langfristige Betrachtungsweise der Problemstellung Rehabilitationsplanung als Grundlage. Um aber mittelfristige Rehabilitationserfordernisse richtig verstehen und auf langfristige Nachhaltigkeit überprüfen zu können, ist es unerlässlich, einige Punkte zu den Rehabilitationsstrategien darzulegen.

Die der Strategieverfolgung zu Grunde liegenden Netzinformationen stellen den zentralen Teil im Planungsprozess von Erneuerungen dar. Meist kommt eine Mischform vor, da die zu bevorzugende Strategie sehr stark von der Verfügbarkeit der Informationen über das Rohrnetz und dessen Zustand abhängt. Im Wesentlichen lässt sich die Instandhaltung jedoch in drei Arten einteilen (ÖVGW W 100, 2007):

- *Ereignisorientierte Instandhaltung oder Ausfallstrategie*
- *Vorbeugende, intervallorientierte Instandhaltung oder Präventivstrategie*
- *Vorbeugende, zustandsorientierte Instandhaltung oder Inspektionsstrategie*

Die Rehabilitation von Leitungsabschnitten wird von zahlreichen Kriterien beeinflusst, sodass es ein Muss ist, tiefergehende Untersuchungen am Rohrnetz durchzuführen. Für manche Einflussgrößen auf die Erneuerungsentscheidung können Gemeinsamkeiten zu anderen Versorgungsunternehmen gefunden werden. Üblicherweise sind Kriterien und Maßnahmen für die Rehabilitation aber erst im speziellen Fall festzulegen.

Betrieb und Instandhaltung gemeinsam decken die Aufgaben zur Einhaltung der Ziele der Erhaltung der unterirdischen Infrastruktur eines Wasserversorgungsunternehmens ab. Die Aufgaben Inspektion und Wartung, die ebenfalls dem allgemeinen Netzbetrieb zugeordnet werden können, zählen auch hier dazu.

Wie sich die Rehabilitation von Wasserrohrnetzen in den Themenkomplex der Instandhaltung eingliedert und welche Beziehungen sich daraus ergeben zeigt nachfolgende Grafik *(Abbildung 2)*.

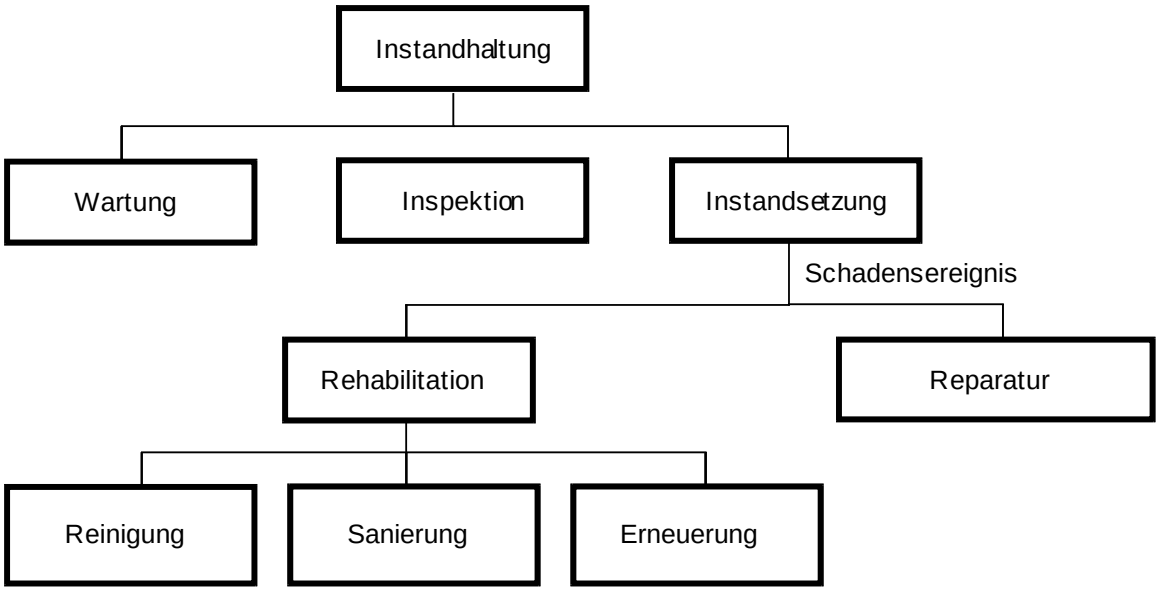


Abbildung 2: Bestandteile der Instandhaltung (ÖVGW W 100, 2007)

Die zustandsorientierte Rehabilitationsstrategie, als ein wesentlicher Teil der zustandsorientierten Instandhaltung von Wasserversorgungsanlagen, stellt nach ÖVGW W 100 (2007) den aktuellen Stand der Technik bei der Planung von Rehabilitationsmaßnahmen dar. Diese gliedert sich in die Teilschritte: Langfristige Rehabilitationsplanung, mittelfristige Rehabilitationsplanung und Umsetzung der Rehabilitationsmaßnahmen.

2.4.2 Vorbeugende, zustandsorientierte Rehabilitation

Grundlage jeder Rohrnetzrehabilitation sollte eine zustandsorientierte Strategie sein. Dabei wird ein Soll/Ist-Vergleich von unternehmensspezifisch definierten technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen durchgeführt. Eine Rehabilitationsmaßnahme wird dann gesetzt, wenn unternehmensintern festgelegte Kennzahlen bestimmte Richtwerte überschreiten. Voraussetzung für die Verfolgung dieser Strategie ist jedoch eine detaillierte und zonal unterteilte Kenntnis über das Netz, sowie ein Netzüberwachungssystem.

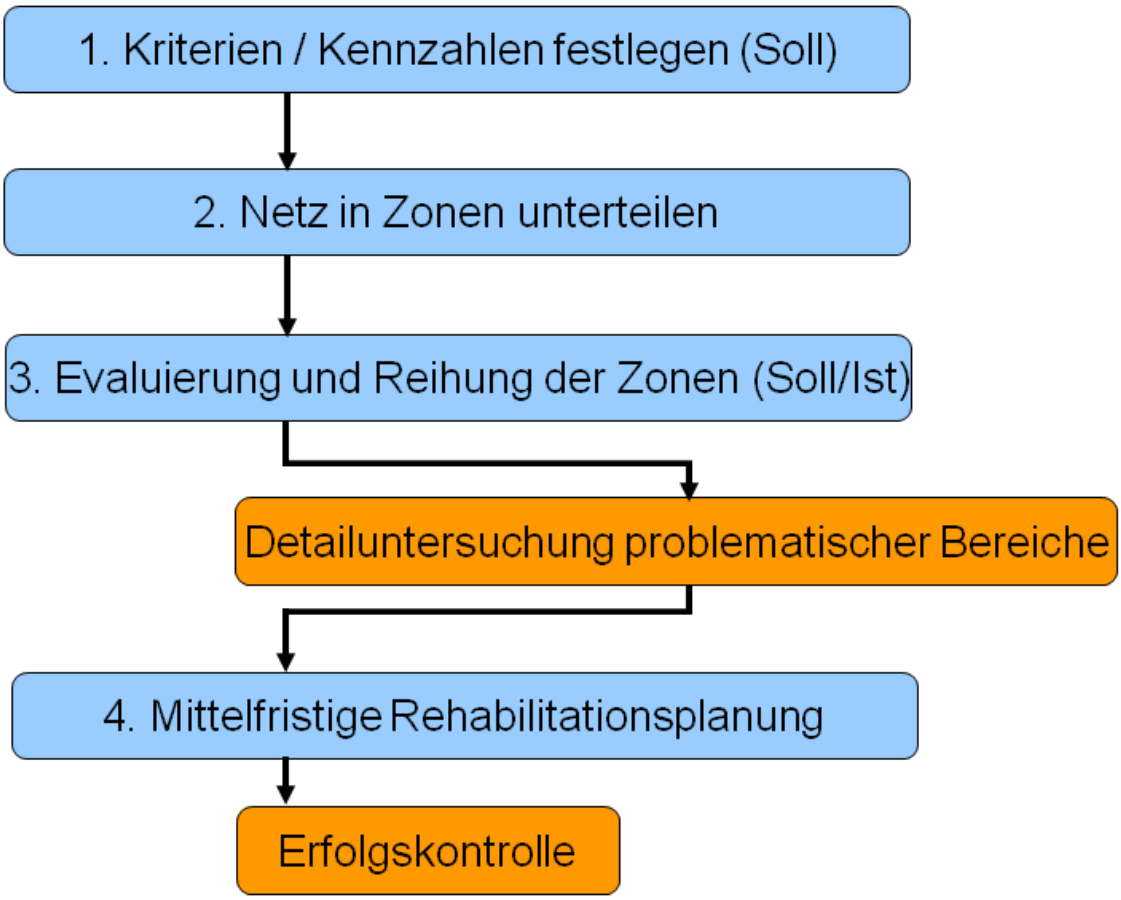


Abbildung 3: ***Planungsschritte bei der zustandsorientierten Strategie (FUCHS, 2001 nach EVINS et al., 1989)***

Im Wesentlichen lässt sich die Verfolgung dieser Strategie in 4 Schritte gemäß *Abbildung 3* unterteilen. In den folgenden Ausführungen wird die Vorgangsweise kurz erläutert und der Bezug zum mittelfristigen Rehabilitationsbedarf hergestellt:

Schritt 1: Festlegung von Kriterien und Kennzahlen

Die Methode, Analysen anhand von Kennzahlen zu führen, stammt ursprünglich aus dem kaufmännischen Bereich. Sie eignet sich jedoch auch um bestimmte Ziele von Wasserversorgungsunternehmen zahlenmäßig auszudrücken, um so Vergleiche anzustellen und Schwachstellen aufzudecken.

Schritt 2: Netz in Zonen unterteilen

Besonders für die Untersuchung von Schwachstellen im Netz ist die Unterteilung in überschaubare Einheiten unbedingt erforderlich. Dabei sollte jede Zone selbstständig und homogen sein. Es sollten sich daraus hydraulisch abgegrenzte Gebiete ergeben, die so weinige Hauptzuflüsse und -abflüsse als irgend möglich haben und idealerweise nur von einer Wassergewinnungsstelle gespeist werden. Damit erleichtern sich Untersuchungen hinsichtlich der Wasserqualität ungemein.

Als optimale Zonengröße kann eine maximale Länge von etwa 50 km angegeben werden. Bei der Bildung von Netzzonen ist auf bereits bestehende Zonen, die unter anderen Aspekten gebildet wurden, Rücksicht zu nehmen.

Schritt 3: Reihung der Netzzonen

Eine Reihung erfolgt aufgrund der einzelnen Parameter, wie Hydraulik, Wasserqualität und strukturelle Mängel. Dabei wird eine Bewertung vorgenommen, die als Grundlage Grenzwerte der untersuchten Kriterien hat. Durch Auswertung der Bewertungspunkte und Vergleich mit festgelegten Kennzahlen können die verschiedenen Probleme herausgearbeitet und ein Ranking der einzelnen Gebiete vorgenommen werden.

Schritt 4: Mittelfristige Rehabilitation

Nach allenfalls durchgeführten Detailuntersuchungen gewisser Zonen erfolgt die eigentliche Planung der Rehabilitationsmaßnahmen. Es kommt zu einer genauen Beschreibung der einzelnen Zonen bzw. des Rohrnetzes. Neben der Erläuterung der Rehabilitationsziele und Zusammenstellung der Lösungsvorschläge für die Rehabilitation in den jeweiligen Zonen müssen der Aufwand und die Kosten abgeschätzt werden.

Einen weiteren Punkt bildet eine Auflistung der Ziele und der dazugehörigen Maßnahmen. Die Betrachtung sollte unter realistischen Randbedingungen und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen stattfinden. Die Erfolgskontrolle ist der Abschluss und gleichzeitig auch wieder der Beginn der zustandsorientierten Rehabilitationsplanung.

2.5 Langfristige Rehabilitationsplanung

Für die langfristige Rehabilitationsplanung werden zur Prognose der zu erwartenden Ausfälle im Rohrnetz Alterungsmodelle (Kohortenüberlebensmodell, Cox Model, ...) herangezogen. Aus der vorhergesagten Ausfallrate wird für vorab definierte Betrachtungseinheiten (Zonen, Leitungsgruppen, ...) ein Prozentsatz für die Rehabilitation bestimmt.

Die Alterung von Rohrnetzen kann z.B. nach HERZ (1993) in Anlehnung an die natürliche Bevölkerungsentwicklung bestimmt werden. Bei diesem Kohorten-Überlebensmodell (Anm.: Kohorten waren Truppeneinheiten bei den Römern) geht man davon aus, dass die Kohorte eines Bevölkerungsjahrganges altert und sich von Jahr zu Jahr um die Sterbefälle reduziert. In Anlehnung an diese Entwicklung werden Rohre aus dem Leitungsnetz in Abhängigkeit des Jahres ihrer Verlegung zu sogenannten „Jahreskohorten“ zusammengefasst. Durch die Alterung mit der altersspezifischen Ausfallrate (= Rehabilitationsrate) nimmt die Leitungslänge

einer Jahreskohorte sukzessive ab. Bei Neubau oder Rehabilitation entstehen neue Kohorten im Leitungsnetz. Der Rehabilitationsbedarf kann somit als Funktion von Alter und Leitungslänge dargestellt werden.

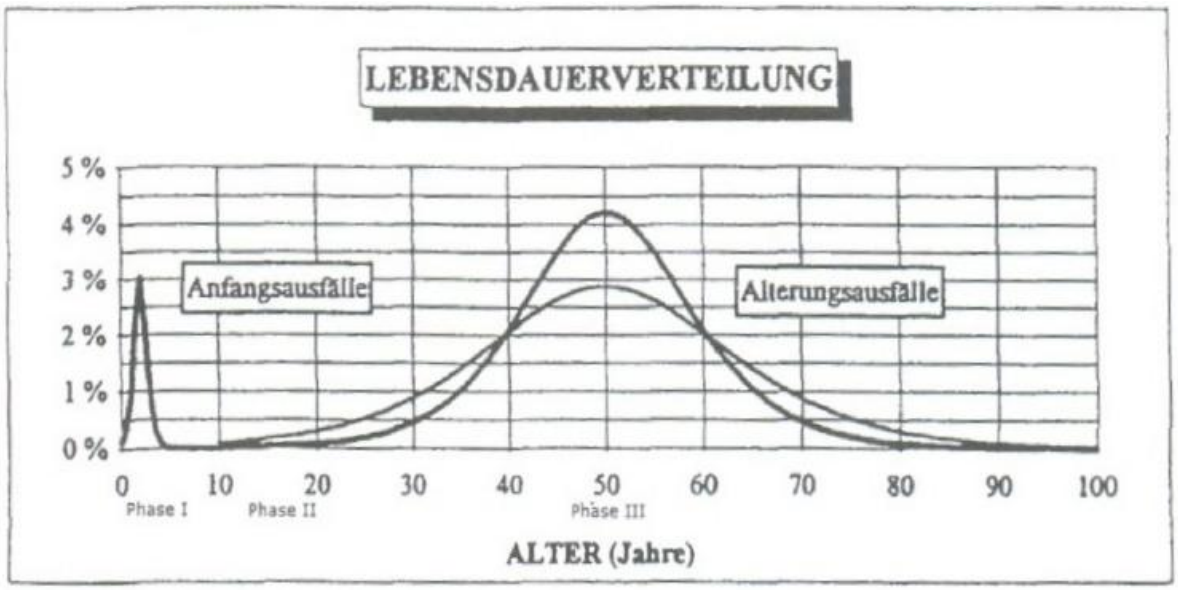


Abbildung 4: ***Lebensdauerverteilung mit Garantieausfällen (Phase I), Resistenzzeit (Phase II) und Verschleißausfällen (Phase III) nach HERZ (1996)***

Alterungsfunktionen:

Infrastrukturanlagen haben bestimmte Ausfallwahrscheinlichkeiten und Überlebensfunktionen. Die Ausfallrate je Kohorte errechnet sich zum Beispiel aus dem Quotienten der Ausfälle zum jeweils vorhandenen Bestand. Die Ausfälle entsprechen der Lebensdauerverteilung, wobei Anfangsausfälle von Alterungsausfällen zu unterscheiden sind. Anfangsausfälle resultieren meist aus unsachgemäßer Herstellung und werden in der Regel im Rahmen der Gewährleistung ersetzt. Alterungsausfälle verteilen sich um den Erwartungswert der Lebens- bzw. Nutzungsdauer *(Abbildung 4)*. Die Nutzungsdauer bewegt sich in der Größenordnung von etwa 40 bis 80 Jahren. Die tatsächliche Lebensdauer streut jedoch um den Erwartungswert in Form einer Glockenkurve (vgl. HERZ, 1996; FUCHS, 2001).

Betreibt man eine vorbeugende Instandhaltung zur Erhöhung der Zuverlässigkeit seiner Anlagen, so kann Phase III als Beginn für die Tätigkeiten angegeben werden. Denn erst ab der Verschleißphase ergibt die Durchführung einer Rehabilitation einen Sinn, da sich die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen verringert.

Um Alterungsfunktionen mathematisch zu beschreiben, gibt es verschiedene Ansätze. Dazu zählen unter anderem die Logistik-, die Weibull- und die Lognormal-

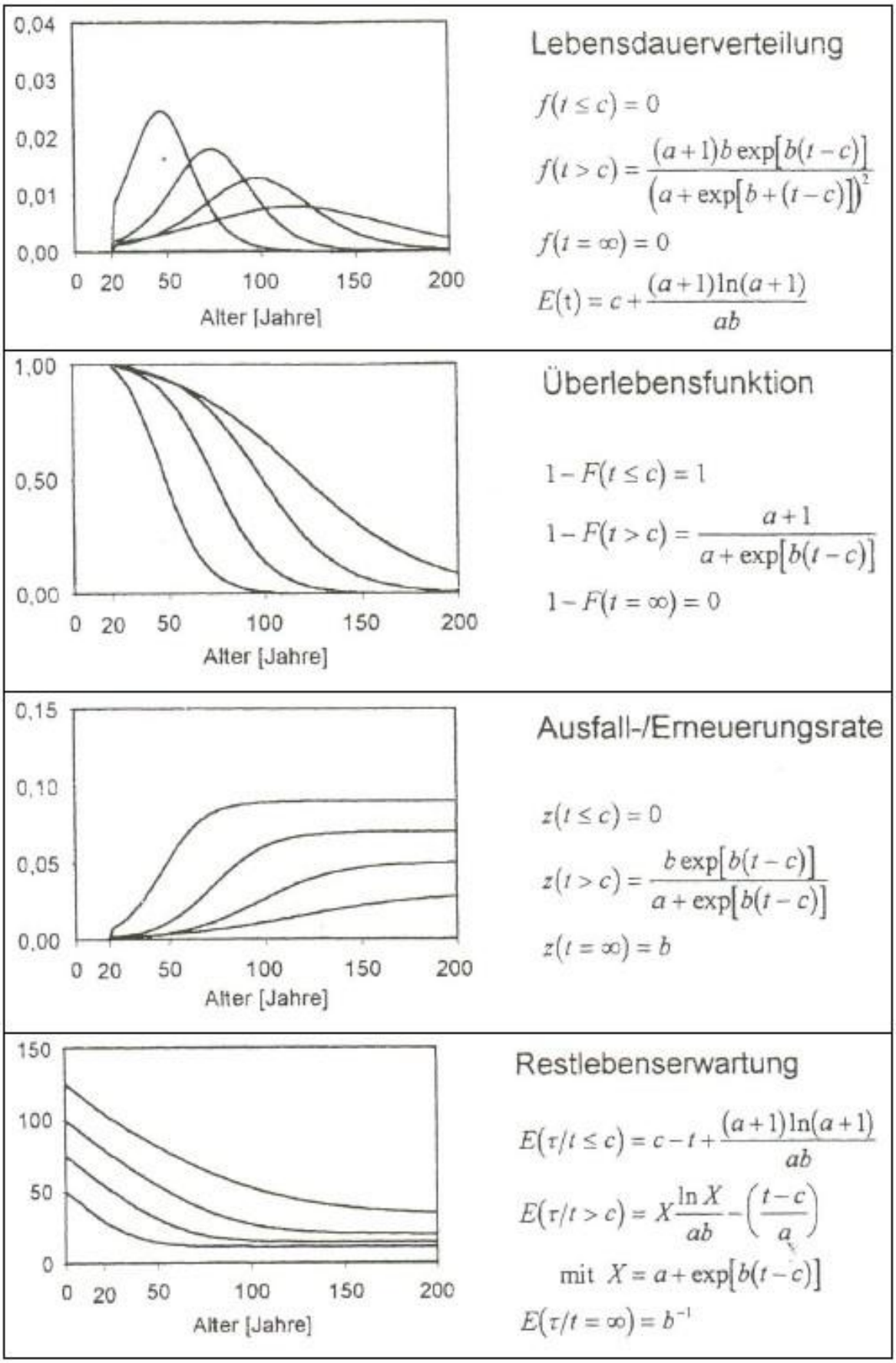


Abbildung 5: Alterungsfunktionen nach HERZ (1996)

Verteilung. In der Wasserversorgung kommt auch die Herz - Verteilung (HERZ, 1993) zur Anwendung. Bei ihr nähert sich die Ausfallrate mit steigendem Alter asymptotisch einem konstanten Wert (siehe *Abbildung 5)*. Dadurch kann man abbilden, dass sich die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls einer Leitung nicht mehr erhöht, wenn diese bereits ein bestimmtes Alter erreicht hat. D. h. mit der Herz - Verteilung lässt sich im Unterschied zu den anderen vorhin genannten Funktionen, bei denen das Ausfallverhalten mit zunehmendem Alter weiter steigt, die Alterung von Wasserrohrnetzen sehr gut abbilden. Weiters besteht die Möglichkeit anhand von schadensstatistischen Aufzeichnungen die Alterungsfunktionen der einzelnen Leitungsgruppen zu kalibrieren.

Leitungsgruppen:

Ein wesentlicher Schritt bei der Rehabilitationsplanung ist die Unterteilung des Netzes und Bildung voneinander unterschiedliche Einheiten.

Das Leitungsalter ist kein primäres Kriterium für eine Erneuerung. Ausgehend von den zu bestimmten Zeiten verlegten Materialien und ausgeführten Konstruktionen können jedoch vielfach Leitungsgruppen definiert werden, die oft einen gleichen oder ähnlichen Zustand im Netz aufweisen und ein statistisch gleichartiges Nutzungsdauerverhalten erwarten lassen. Insofern kann das Leitungsalter ein indirektes Kriterium zur Beurteilung von Rehabilitationsmaßnahmen sein.

Werkstoff- und konstruktionsbezogene Beurteilungen können nach DVGW W 401 (1997) zur Bildung von Gruppeneinteilungen, getrennt nach Anschlussleitungen und Rohrnetz führen:

- *Graugussleitungen GG*
- *Leitungen aus duktilem Gusseisen GGG*
- *Stahlrohrleitungen St*
- *Kunststoffleitungen aus PE und PVC*
- *Leitungen aus Asbestzement*
- *Bleileitungen Pb*
- *neuere Rohrleitungsmaterialien, sanierte Leitungen*

Zustand und Verhalten dieser Leitungsgruppen können gebietsweise in Abhängigkeit von Boden- und Verlegebedingungen sowie anderen Einflüssen wie Streuströmen, Bodenbewegungen, usw. unterschiedlich sein. Die angegebenen Zeiträume variieren von Unternehmen zu Unternehmen zum Teil erheblich.

Entsprechende Gruppen können auch für Armaturen und andere Einbauteile gebildet werden (z.B. Armaturen mit unterschiedlichen Merkmalen wie Konstruktion, Funktionsfähigkeit und Wartungsaufwand).

Der Anteil solcher Leitungen und Anlagen im Rohrnetz ergibt in Verbindung mit den Erfahrungswerten über den Zustand dieser Leitungsgruppen und deren mittlerer Nutzungsdauer einen Hinweis auf den möglichen langfristigen Rehabilitationsbedarf.

Alterungsparameter:

Wenn es die Datenlage nicht erlaubt die Alterungsparameter zu bestimmen, kommen statistische Schätzverfahren zur Anwendung. Mit der Unterstützung von Statistiken, insbesondere von Schadensstatistiken, sollten von Fachleuten unter Berücksichtigung der mittleren Nutzungsdauer die Alterungsparameter geschätzt werden. Die mittlere Nutzungsdauer ist dabei eine statistische Annahme für einen bestimmten Rohrtypus. Die mittlere technische Nutzungsdauer kann entweder aus betriebsintern aufgezeichneten, schadensbedingten Instandsetzungen in der Vergangenheit und nachher durchgeführten statistischen Auswertungen ermittelt oder aus den DVGW-HINWEIS W 401 (1997) entnommen werden (*Abbildung 6*).

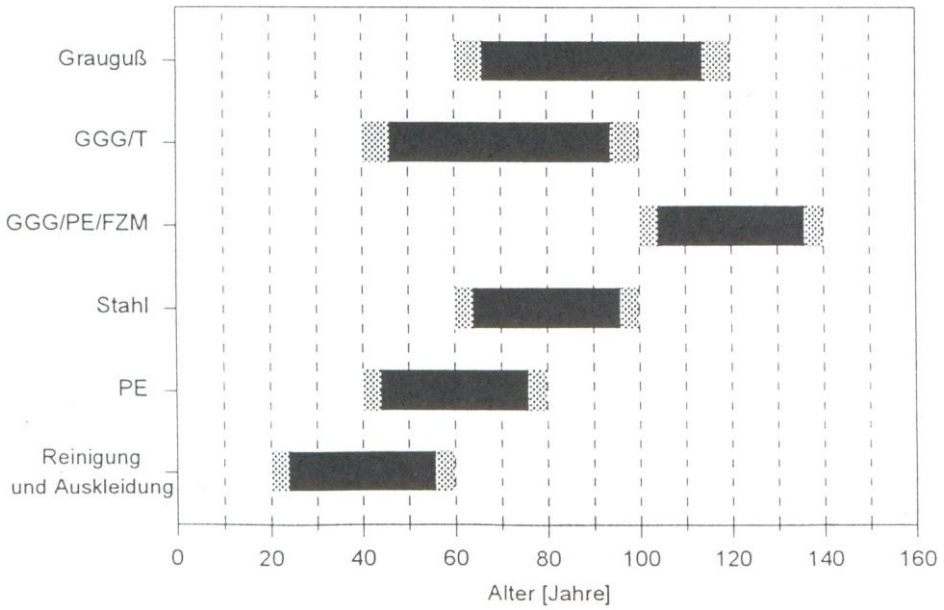


Abbildung 6: Technische Nutzungsdauer nach Leitungsgruppen, DVGW W 401 (1997)

Rehabilitationsbedarf:

Unter Zuhilfenahme der leitungsgruppenspezifischen Ausfallrate ist es möglich, den Rehabilitationsbedarf von den sich noch im Netz befindlichen Leitungen der zugehörigen Kohorte zu ermitteln. Für das gesamte Rohrnetz kann man die erforderliche Rehabilitationsrate über die Summe der notwendigen Rehabilitationslängen aller Leitungsgruppen bezogen auf die Gesamtnetzlänge berechnen.

Der somit ermittelte jährliche Rehabilitationsbedarf gibt durch seinen Wert und seine zeitliche Entwicklung eine erste längerfristige Orientierung über die durchzu-

führenden Maßnahmen. Auf Grund dieser Erkenntnisse können zukünftige Strategien abgeleitet und der effiziente Einsatz finanzieller Mittel besser geplant werden.

2.6 Mittelfristige Rehabilitationsplanung

2.6.1 Vorbemerkungen

Als Einleitung zur Thematik der mittelfristigen Rehabilitation von Wasserrohrnetzen soll die folgende Fragestellung, wie sie bei den Wasserversorgern immer wieder auftaucht, dienen:

Wann sollen wo welche Leitungen und in welchem Ausmaß erneuert werden?

Die wesentliche Aufgabe der mittelfristigen Rehabilitationsplanung besteht in der Modellierung von Erneuerungsprioritäten auf Betrachtungsebene der Einzelleitung. Es erfolgt die Umsetzung der Erkenntnisse aus der strategischen Langzeitplanung in Jahrespläne, z.B. in 5-Jahres-Zeiträumen. Die mittelfristige Rehabilitation ist somit bestimmendes Element des Wirtschaftsplanes (ECKHARDT, 2005).

Sie beinhaltet:

- Differenzierung der strategischen Rehabilitationsrate

  Es ergeben sich unterschiedliche spezifische Rehabilitationsraten in Bezug auf den Modellierungszeitraum, die räumliche Verteilung der Schadensraten und die Rohrleitungsgruppen.
- Anlagenbezogene Festlegung von versorgungstechnisch zulässigen Schadensraten zur Erreichung der Zielgröße
- Erstellung einer Prioritätenliste
- Generelle Vorauswahl von Rehabilitationstechnologie und Materialien
- Koordinierung mit Baumaßnahmen Dritter
- Soll/Ist-Vergleich von Anlagenzustand, Schadensraten, Wasserverlusten und Restnutzungsdauern
- Ermittlung des Bedarfs an finanziellen Mitteln für die Rehabilitationsprojekte

Das Ergebnis der mittelfristigen Rehabilitationsplanung ist ein Rehabilitationsprogramm. Es stellt einen nach Prioritäten geordneten differenzierten Maßnahmenplan von einzelnen Rehabilitationsmaßnahmen dar (ÖVGW W 100, 2007).

2.6.2 Beurteilungskriterien

Nach DVGW W 401 (1997) können technische, wirtschaftliche und unternehmensspezifische Kriterien, sowie externe Einflüsse unterschieden werden:

Technische Kriterien

Quantifizierbare technische Kriterien orientieren sich an Vorgaben aus gesetzlichen Vorschriften, Normen und Richtlinien:

- *Mindestversorgungsdruck*

  In Österreich hat ÖNORM B 2538 (2002) Gültigkeit und die angeführten Mindestbetriebsdrücke sind einzuhalten.

- *Wasserqualität*

  Die Grenzwerte der TRINKWASSERVERORDNUNG - TWV (2001) sind einzuhalten. Beeinträchtigungen können aus der Reaktion des Wassers mit dem Rohrwerkstoff oder von Inkrustierungen herrühren.

  Parameter der Wasserqualität sind bakterielle Werte, sensorische Kenngrößen (Geruch, Geschmack), chemische Werte (Metallkonzentration) und physikalische Werte (Trübung, Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redox-Potential).

- *Netzzustand*

  Schwachstellen und Schäden sind Indikatoren für den Netzzustand. Eine Zustandsbeurteilung ist unter besonderer Berücksichtigung von konstruktionsbedingten Schwachstellen (z.B. Stemmmuffen, fehlende Schutzbeschichtungen) und unzureichender Festigkeit des Rohrmaterials unter innerer und äußerer Beanspruchung vorzunehmen. Ein unzureichender Versorgungsdruck ist ebenfalls unter diesem Punkt einzuordnen.

- *Schadensrate*

  Die Schadensrate kann aus einer Schadensstatistik nach dem DVGW-MERKBLATT W 395 (1987) abgeleitet werden und sollte angemessene werkstoff- und unternehmensspezifische Richtwerte nicht überschreiten. Aus *Tabelle 1* sind Richtwerte für durchschnittliche Schadensraten in Rohrnetzen (ÖVGW W 100, 2007) zu entnehmen.

- *Wasserverluste*

  Für Wasserverluste in Versorgungsnetzen, Anschlussleitungen und Verbrauchsleitungen gilt in Österreich das ÖVGW REGELBLATT W 63 (1993).

- *Rohrwerkstoffe*

  Heute nicht mehr gängige Rohrwerkstoffe (Asbestzement und Blei) erfordern eine gesonderte Betrachtung und erhöhte Aufmerksamkeit.

Tabelle 1: Richtwerte für Schadensraten in Rohrnetzen (ÖVGW W 100, 2007)

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

Wirtschaftliche und unternehmensspezifische Kriterien:

- *Wirtschaftlichkeit*

  Hohe und steigende Wartungs- und Reparaturkosten können Anlass zu Rehabilitationsmaßnahmen von Wasserverteilungsanlagen sein. In diesem Zusammenhang sind Aufwendungen für Spülungen, Lecksuche, Armaturenwartung und besondere Vorhaltungskosten für Ersatzteile ungebräuchlicher Nennweiten und Rohrwerkstoffen zu nennen.

  Kosten für Wasserverluste können in diesem Zusammenhang schlagend werden, wenn sich daraus erhöhte Pumpkosten ableiten lassen.

- *Versorgungsimage*

  Beurteilungskriterien für das Versorgungsimage betreffen Auswertungen über Anzahl und Tendenz von Kundenreklamationen hinsichtlich Beeinträchtigung der Wasserqualität und die Häufigkeit und Dauer von Versorgungsunterbrechungen (ROSCHER et al, 2004). Öffentlichkeitswirksame Rohrschäden mit Folgekosten oder auch die Koordinierung von Aufgrabungen für verschiedene Ver- und Entsorgungsleitungen können bei der Bewertung herangezogen werden.

Externe Einflüsse:

Als Folgemaßnahme von Tiefbauarbeiten sind oft Leitungsumlegungen notwendig. Baumaßnahmen anderer Ver- und Entsorgungsunternehmen können Anlass für

vorgezogene Rehabilitationsmaßnahmen sein. Dafür können betriebswirtschaftliche und übergeordnete Gründe gegeben ausschlaggebend sein. Eine Koordinierung der Netzrehabilitation mit Straßensanierungen ist in jedem Fall anzustreben.

Ein weiteres Kriterium kann die Zugänglichkeit und Lage der Leitung sein. Haupt- und Versorgungsleitungen sind zum größten Teil in öffentlichen Flächen verlegt. Ein geringer Prozentsatz der Leitungen liegt aber auch auf privaten Grundstücken und der Zutritt ist über Dienstbarkeitsverträge geregelt. Wenn es möglich ist, sollten bei Erneuerungen die Lage der Leitungen so verändert werden, dass sie im öffentlichen Gut zu liegen kommen und so die Zugänglichkeit erleichtert wird.

2.6.3 Beurteilungskriterien in PiReM

Die folgenden Kriterien können im Allgemeinen in PiReM bei der Bewertung der Leitungsstränge berücksichtigt werden. Es müssen jedoch die entsprechenden Informationen strangbezogen vorliegen.

Technische Kriterien:

- *Bruchgefährdete Leitungen*

  Bei diesem Bewertungskriterium finden jene Leitungen Berücksichtigung, die aufgrund ihrer Materialbeschaffenheit und den Durchmessereigenschaften zu einem Leitungsbruch neigen. Die Bewertungspunkte sind nach eignem Ermessen und in Abhängigkeit des Materials und des Durchmessers zu vergeben.

- *Rohralter*

  Ab einem gewissen Alter der Rohrleitung muss mit altersbedingten Verschleißerscheinungen immer gerechnet werden. Das Rohralter allein ist kein primäres Erneuerungskriterium, hat jedoch einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

- *Inkrustierung*

  Es können Leitungsabschnitte definiert werden, die aufgrund erhöhter Rohrrauigkeiten auf starke Inkrustierungen und daher auf erhöhten Erneuerungsbedarf schließen lassen. Aus Untersuchungen und Rohrnetzberechnungen (Kalibrierung) müssen Informationen vorliegen, die den entsprechenden Leitungsabschnitten zugewiesen werden können.

- *Außenkorrosion*

  Zu den durch Außenkorrosion gefährdeten Abschnitten können in aggressiven Böden verlegte Rohrmaterialien gezählt werden. Es müssen jedoch Informationen hinsichtlich des Korrosionsschutzes der Leitung und der jeweils vorliegenden Bodenart vorhanden sein.

- *Wasserverluste*

  Es besteht die Möglichkeit, Undichtigkeiten des Rohrnetzes repräsentiert durch die Wasserverluste in bestimmten Messzonen, in die Beurteilung der Leitungsstränge aufzunehmen.

- *Streustromgefährdung*

  Zu den durch Streustrom gefährdeten Leitungen zählen metallische Leitungen, die im Umkreis von Straßenbahnlinien verlegt wurden und über keinerlei Korrosionsschutzmaßnahmen verfügen.

- *Verbindungsart*

  Dieses Kriterium berücksichtigt Rohrleitungen die aufgrund undichter Verbindungen erhöhte Wasserverluste hervorrufen.

Wirtschaftliche Kriterien:

- *Nennweite*

  Es erfolgt die Bewertung von Schwachstellen durch ungebräuchliche Nennweiten. Die Nachteile durch ungebräuchliche Nennweiten begründen sich in der Unwirtschaftlichkeit infolge der auch für seltene Nennweiten notwendigen Lagerbestände für Ersatzteile.

- *Rohrmaterial*

  Es werden Leitungen in die Klassifikation aufgenommen, die aufgrund ihres ungebräuchlichen Materials und ihrer negativen Materialeigenschaften, wie der Neigung zur Ermüdung, eine frühzeitige Erneuerung erfahren sollten.

  Als Vertreter für ungebräuchliches Material sind Asbestzementleitungen zu nennen, da im Falle einer Reparatur aufwendige Maßnahmen hinsichtlich Arbeitnehmerschutz (Herstellung asbesthaltiger Rohre ist seit 1.1.1995 verboten) getroffen werden müssen. Leitungen aus Polyvinylchlorid können ebenfalls in diese Bewertung aufgenommen werden, da es bei PVC Leitungen, speziell bei Nennweiten über 150 mm, aufgrund der häufig auftretenden Schadensart „Längsriss“ zu erhöhten Reparaturkosten kommt.

- *Stagnationszonen*

  Die Berücksichtigung von Problemen mit stagnierendem Wasser in den Leitungsabschnitten lassen sich über die Anzahl der ausgeführten Spülungen abbilden. Somit kann dieses Kriterium in die Bewertung aufgenommen werden, wenn strangbezogene Informationen hinsichtlich Spülungen vorliegen.

- *Öffentlicher Verkehr*

  Es erfolgt eine Berücksichtigung der ungünstigen Auswirkungen durch Reparaturmaßnahmen bei Rohrbrüchen auf den öffentlichen Verkehr.

Die zwei folgenden Parameter sind bei der Auswertung als Entweder/Oder-Kriterien zu sehen, d.h. es kann nach der Schadensrate oder dem ökonomischen Erneuerungszeitpunkt ausgewertet werden:

- *Schadensrate*

  Die Schadensrate bezeichnet die durchschnittlich bereits aufgetretenen Schäden/km*Jahr eines Leitungsabschnittes. Übersteigt die Strangschadensrate einen definierten unternehmensspezifischen Richtwert, so ist an eine Erneuerung der Leitung zu denken. Über eine Abfrage der vorliegenden Schadensrate für jeden Leitungsstrang können entsprechende Bewertungspunkte zugewiesen werden.

- *Ökonomischer Rehabilitationszeitpunkt*

  Eine weitere Möglichkeit zur Präzisierung der Ergebnisse besteht in der Prognose von Schäden an Einzelleitungen. Eine Vorhersage des Erstschadens ist nur schwer möglich, eine Prognose über die Entwicklung von Folgeschäden lässt sich jedoch mathematisch beschreiben (GANGL, 2008). Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist, unter Berücksichtigung einer Eintrittswahrscheinlichkeit eine Zeitperiode zu definieren, in der an einer Rohrleitung ein Folgeschaden auftritt.

  Durch Kombination von Folgeschadenmodell und der Kalkulation des wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunktes können sämtliche Kostenfaktoren in einem Vergleich von weiterem Betrieb der alten Leitung in Relation zum Neubau berücksichtigt werden. Die Umsetzung kann mittels der Kostenbarwertmethode erfolgen, die zukünftige Betriebs- und Reparaturkosten der betrachteten Leitung den Rehabilitationskosten für einen definierten Untersuchungszeitraum (z. B. 25 Jahre Aschreibungsdauer) gegenüberstellt. Für alle Rohrleitungen an denen bereits ein Schaden verzeichnet wurde, ist über diese Kostenvergleichsrechnung zu überprüfen, ob der wirtschaftlich optimale Zeitpunkt für die Rehabilitation in naher Zukunft erreicht wird.

  Es erfolgt die Berücksichtigung des kalkulierten ökonomischen Rehabilitationszeitpunktes aus dem Menüpunkt „Rehabilitation wirtschaftlich“. In einem ersten Schritt wird jeder Leitungsgruppe ein Folgeschadensmodel zugewiesen, woraus sich in weiterer Folge für jede Einzelleitung, die in der Vergangenheit bereits einen Schaden aufgewiesen hat, die zukünftige Schadensentwicklung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit voraus-

sagen lässt. Wichtig ist dabei eine Unterteilung in Erneuerungsabschnitte mit Längen zwischen 100 m und 200 m, da Folgeschäden meist in einem geringeren Abstand als 150 m auftreten (GANGL, 2008).

Mit finanzmathematischen Betrachtungen (Kostenbarwertmethode, Baukostenindex, Abschreibungsdauer, etc.) errechnet sich somit für jeden Leitungsabschnitt, in Abwägung der zu erwartenden Reparaturkosten (Schadenskosten) je Strang und der Rehabilitationskosten, ein optimaler Zeitpunkt der Erneuerung. Die Zuordnung der Schadenskosten zu den einzelnen Strängen erfolgt über die Leitungsgruppen.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Punktebewertung der errechneten optimalen Rehabilitationszeitpunkte.

2.7 Zustandsbeurteilung von Rohrleitungen

Nach ROSCHER et al. (2000) ist für eine kostenoptimale Rohrnetzbetreibung eine planmäßige, qualifizierte, d.h. wissenschaftlich begründete Rohrleitungsrehabilitation auf der Basis von Zustandsuntersuchungen, Schadensaufklärungen und aller anderen verfügbaren Informationen aus dem Rohrnetzbetrieb notwendig.

Es hat sich gezeigt, dass für die Zustandsbeurteilung einer konkreten Rohrleitung neben den Daten, die vom Schreibtisch aus zu bestimmen sind (Abmessungen, Alter, Lage usw.), es wichtig ist, Ist-Zustandsdaten zu erfassen. Damit kann eine Rehabilitationsplanung wissenschaftlich begründet und wirtschaftlich sinnvoll durchgeführt werden.

2.7.1 Baulicher Zustand

Die heute liegenden Wasserversorgungsnetze sind von Seiten der in der Vergangenheit eingesetzten Rohrmaterialien sehr inhomogen zusammengesetzt; sie bestehen in jedem Versorgungsunternehmen aus unterschiedlichen Rohrmaterialien und selbst bei einer Materialgruppe ist insbesondere nach Zeitepoche der Herstellung zu unterscheiden (ROSCHER et al., 2004).

Grundsätzlich lassen sich aber zwei wesentliche Werkstoffgruppen von Rohrmaterialien bilden, die ähnliche Schadensursachen haben:

Metallische Leitungen, mit ihren Vertretern

- Grauguss GG
- duktiles Gusseisen GGG
- Stahl St

Nichtmetallische Leitungen, gliedern sich in

- Asbestzement AZ
- Stahlbeton StB und Spannbeton SpB
- Kunststoffe (PVC, PE, UP-GF)

Die Zustandsbeurteilung ist in der Regel nur bei Aufgrabungen infolge von Schäden oder Arbeiten im unterirdischen Bauraum möglich. Dabei ist es zu empfehlen, eine Quantifizierung der inneren und äußeren Einflüsse auf die Rohrleitungen vorzunehmen, die auf Dauer ihren Zustand verschlechtern.

Für die Ermittlung des baulichen Zustandes einer Rohrleitung sind folgende Ist-Zustandsparameter zu erfassen und wenn möglich fotografisch zu dokumentieren (ROSCHER et al., 2000):

- Schäden bei Schadensaufklärungen und Zustandsuntersuchungen
- der Zustand und die Schädigungen am Rohrschaft und im Rohrverbindungsbereich
- der Korrosionsschutz und sein Zustand
- die Korrosionsschädigung, differenziert nach innen und außen
  - die maximalen und die mittleren Korrosionstiefen
  - der Flächenanteil der korrodierten Oberfläche
  - die Korrosionsform und die Verteilung
  - die Festigkeit der Korrosionsprodukte bei laminaren Grauguss-, Asbestzement- und Betonrohren
- der Verkrustungs-/Inkrustationszustand
  - die maximalen und mittleren Verkrustungsdicken
  - der Flächenanteil der verkrusteten Oberfläche
  - die Verkrustungsfestigkeit, die Form und Verteilung der Verkrustung
- Besonderheiten beim Rohrleitungsmaterial, der Rohrbettung und den Betriebsbedingungen.

Die Begutachtungen können entweder auf speziellen Arbeitsblättern in sehr komprimierter Form, oder mit integrierter Berechnungs- und Auswertesoftware durchgeführt werden.

Im Folgenden soll in Kürze ein Überblick gegeben werden, worauf bei Untersuchungen und nachfolgender Beurteilung von Rohrleitungen besonderes Augenmerk zu legen ist, bzw. welche Schwachpunkte die verschiedenen Rohrmaterialien haben.

Bei metallischen Leitungen sind in erster Linie Korrosionserscheinungen, einschließlich Graphitierung als besondere Form der Korrosion sowie Brüche (Längs- und Querrisse, Schalenbrüche) als typische Schadensursache zu nennen. Ein unzureichender Außen- und Innenschutz in der Vergangenheit ist für die Korrosionsprobleme verantwortlich. Außenkorrosion ist fast immer in Verbindung mit der umgebenden Bodenart zu sehen. Die Bodenaggressivität nimmt im Allgemeinen von nicht bindigen Böden zu bindigen Böden zu, sodass in solchen verstärkt Korrosionsprobleme zu erwarten sind. Bei der Art der Korrosion kann unterschieden werden zwischen:

- Der ebenmäßigen Korrosion, bei der im Idealfall Material parallel zur Oberfläche abgetragen wird und meist eine narbig ausgebildete Oberfläche entsteht.
- Dem Lochfraß, wo örtlicher Korrosionsangriff im Endzustand zu kraterförmigen Vertiefungen und im schlimmsten Fall zu Durchlöcherungen führt. Durch dauernde Fixierung relativ kleiner Anoden auf der Oberfläche geht der Werkstoff an diesen Stellen mit hoher Geschwindigkeit in Lösung, während sich die gesamte übrige umgebende Oberfläche als Kathode wirkt und nur wenig oder überhaupt nicht angegriffen wird (ROSCHER et al., 2000).

In der heutigen Zeit tritt oft auch eine Schädigung durch Fremd- und Streuströme sowie Potentialunterschieden von Stahlbetonfundamenten zu den Rohrleitungen auf. Elektrische Streuströme, von denen sich besonders Gleichströme von elektrischen Bahnen als schädlich erwiesen haben, rühren von Stromanlagen her, die entweder die Erde als Rückleiter benutzen oder bei denen eine mangelhafte Isolierung vorliegt.

Nicht zu unterschätzen sind die Auswirkungen von ungeeigneten Rohrverbindungen (Stemmmuffen). Durch Setzungserscheinungen, Druckstöße und Verrottung des Dichtungsmaterials kommt es zu Muffenausquetschungen, zum Muffenaustreiben und in weiterer Folge zu Leckagen.

Bei den nichtmetallischen Rohren kann bei den Leitungen aus Kunststoffen eine ungenügende Langzeitfestigkeit festgestellt werden. Durch Materialversprödung in Kombination mit Verlegefehlern (Rohrdeformation, Einkerbung durch Steine) sind vermehrt Schäden zu verzeichnen. Bei Asbestzementrohren ist eine Bruchgefährdung zufolge ihrer Biegefestigkeit und der geringen zulässigen Zugspannung festzustellen. Geringe Festigkeiten gehen meist auf zu kurzfasrigen Asbest zurück. Durch betonaggressives Wasser kommt es zusätzlich zu Festigkeitsverlust und einer Gefügezerstörung des Rohrmaterials.

Wasserrohrleitungen aus Beton (Stahl- und Spannbeton) sind in geringem Umfang verlegt worden. Schäden resultieren häufig aus falscher Betonrezeptur im Zu-

sammenspiel mit zu geringer Bewehrungsüberdeckung und unzureichender statischer Bemessung. Eine frühzeitige Korrosion der Bewehrung und damit verbunden der Festigkeitsverlust führen unweigerlich zum Bruch. Leckagen an den Rohrverbindungen zufolge Versprödung des Dichtungsmaterials sind ebenso keine Seltenheit.

2.7.2 Hydraulischer und hygienischer Zustand

Vor allem Grauguss- und Stahlrohrleitungen früher Verlegejahre weisen Inkrustationen und Ablagerungen auf, welche eine Verminderung der hydraulischen Leistungsfähigkeit bedingen. Diese Inkrustationen und Ablagerungen bewirken einerseits eine Verminderung des Durchflussquerschnitts und anderseits eine Erhöhung des der hydraulischen Berechnung zugrunde liegenden k-Wertes (betriebliche Rauigkeit). Durch einen Wechsel der Strömungsrichtung können Inkrustationen, die sich von der Rohrwandung ablösen, zu Trübungserscheinungen führen und so wiederum Kundenreklamationen nach sich ziehen.

Neben qualitativen und quantitativen Parametern (Innenkorrosion, Verkrustungsart, Verringerung des Innendurchmessers von Rohren, etc.), die schon beim baulichen Zustand der Rohrleitungen Berücksichtigung gefunden haben, sind noch folgende Kenngrößen von Bedeutung (ROSCHER et al., 2000):

- Maximale und mittlere Verkrustung und deren Oberflächenanteil im seitlichen und oberen Rohrleitungsbereich in der 8- bis 4-Uhr-Position (Beeinflussung der Rauigkeit)
- Maximale und die mittlere Verkrustung und deren Oberflächenanteil im Bereich der Rohrsohle in der 5- bis 7-Uhr-Position (Rauigkeit der Rohrsohle)

Die Bestimmung der Werte kann mit Objektmessung geborgener Rohrstücke und Fotoauswertung erfolgen. Die gewonnenen geometrischen Werte können zu hydraulisch verwertbaren Daten der Rauigkeit verarbeitet werden, mit denen wiederum die hydraulischen Berechnungen des Rohrnetzes durchgeführt werden können.

Verkrustungsrauigkeiten älterer Rohrleitungen erreichen mittlere Dicken von 3 bis 15 mm, aber auch größere Werte wurden angetroffen. Zu beachten ist dabei, dass nur etwa bis zu einem k-Wert bis zu 3 mm eine brauchbare Übereinstimmung zwischen der geometrischen Unebenheit der Verkrustung und der hydraulischen Rohrrauigkeit erwartet werden kann. Für k-Werte über 7 mm sind keine realistischen Ergebnisse mehr bestimmbar.

Von BRUSSIG (1998) wurde aus jahrelangen Erfahrungen folgender Zusammenhang zur Abschätzung der absoluten hydraulischen Rauigkeit k aus der geometrischen Flächenreduzierung entwickelt:

$$k = \left(\ln\left(k_{geom}\right)\right)^{1,3} + 1$$

Die geometrische Rauigkeit k_{geom} wird als Gesamtverkrustungsdicke aus der Objektmessung und aus der Fotoauswertung ermittelt und wird wie folgt berechnet:

$$d_{red} = 2 \cdot \left(k_{geom} - k\right)$$

Der hydraulische Beiwert der absoluten Rauigkeit berücksichtigt den hydraulischen Einfluss starker Verkrustungen und setzt sich zusammen aus der geometrischen Rauigkeit, der vergrößerten Angriffsfläche der Strömung und der verringerten effektiven Fließfläche.

Der für die hydraulische Bemessung zu verwendende Ist-Durchmesser ergibt sich aus:

$$D_{Ist} = D_{innen} - d_{Besch} - d_{Verkr} - d_{red}$$

mit:

D_{Ist}	hydraulisch wirksamer Innendurchmesser
D_{innen}	von Metall zu Metall gemessener Wert
d_{Besch}	Beschichtung
d_{Verkr}	Verkrustungsdicke
d_{red}	Verkrustungserhebungen

Bei sehr geringen Querschnittsreduzierungen infolge Verkrustung genügt die Berücksichtigung der erhöhten hydraulischen Rauigkeit der Rohrleitungen.

Tabelle 2: k-Werte und Durchmesserreduzierungen nach BRUSSIG (1998)

k_{geom}	k [mm]	d_{Red}
1	1,0	0
2	1,6	1
4	2,5	3
8	3,6	9
14	4,5	19
25	5,6	39
41	6,5	69

In der TRINKWASSERVERORDNUNG (2001) wird verstärkt auf die Überwachung der Wasserqualität im Rohrnetz Wert gelegt. Wurden bisher in der Regel nur die mikrobiologischen Parameter regelmäßig im Verteilsystem untersucht, so sind jetzt auch alle Parameter zu untersuchen, die sich auf dem Weg zum Kunden verändern können. Dazu zählen unter anderem:

- Trübung
- Färbung
- Eisen
- Mangan
- Wasserstoffionenkonzentration (pH-Wert, aus zementmörtelausgekleideten Rohren)
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (aus nicht zementmörtelausgekleideten Guss- oder Stahlrohrleitungen
- Vinylchlorid (aus PVC-Leitungen)

Daten aus regelmäßigen Untersuchungen dieser Parameter sollten nicht nur in den Datenbanken des Labors festgehalten werden, sondern auch mit dem Rohrnetz verknüpft werden - z.B. in einem Netzinformationssystem. In eine solche Qualitätsdatei sollten zusätzlich auch die organoleptischen Feststellungen (Geruch, Farbe, Trübung) aus planmäßigen Spülungen oder anlässlich sonstiger Arbeiten im Rohrnetz aufgenommen werden, wie auch Beschwerden von Kunden, soweit sie im Hinblick auf das Verteilungssystem relevant sind. Eine solche Wasserqualitätsdatei gibt neben Aussagen zur Kundenzufriedenheit hinsichtlich der Wasserqualität im Rohrnetz wichtige Hinweise für die Rehabilitation (SCHLICHT, 2003).

Seit etwa 1980 ist ein kontinuierlicher Rückgang des Wasserbedarfs festzustellen. Der spezifische Wasserbedarf von Haushalten und Kleingewerbe hat zwischen 10 und 20 % abgenommen. In alten Stadtkernen werden durch Umgestaltung von Wohnungen größere Wohneinheiten geschaffen, die von weniger Menschen bewohnt werden. Folglich nimmt der Wasserbedarf je Laufmeter Rohrleitung ab und im Gegenzug die Aufenthaltsdauer des Wassers in der Rohrleitung zu. Auf Grund der geringen resultierenden Fließgeschwindigkeiten in gewissen Netzteilen kann es zu hygienischen Problemen wie Wieder- bzw. Nachverkeimung, aber auch zu störenden Ablagerungen durch Absetz- und Ausfällungserscheinungen kommen (KAINZ, et al. 2005).

Der mit der demografischen Entwicklung verbundene Rückgang des Wasserverbrauchs beeinflusst somit nicht nur die bakteriologischen Vorgänge im Rohrnetz, sondern fördert andererseits auch die Rostwasserbildung. Eine Ursache für Rostwassererscheinungen ist ein hoher Eisengehalt des Wassers infolge der Korrosion in ungeschützten Guss- und Stahlrohrleitungen. Dies tritt häufig in Versorgungslei-

tungen mit langen Verweilzeiten oder in Endsträngen mit regelmäßiger Stagnation auf. In Extremfällen wird der Sauerstoff sogar vollständig aufgezehrt, sodass das Eisen im Wasser nur in zweiwertiger Form (Eisen (II), direkt aus den Korrosionsvorgängen freigesetzt) vorliegt. Die Rostwasserbildung tritt unter diesen Bedingungen dann auf, wenn das Eisen bei der Entnahme des Wassers aus dem Zapfhahn durch den Kontakt mit Sauerstoff oxidiert.

Die zweite und häufigste Ursache der Rostwasserbildung ist die Mobilisierung von Ablagerungen durch veränderte Fließverhältnisse im Leitungsnetz. Ablagerungen gelangen entweder mit dem Reinwasser in das Netz, oder sie werden durch Korrosion in ungeschützten und mit geringer Geschwindigkeit durchflossenen Guss- und Stahlleitungen gebildet. Nach den vorliegenden Kenntnissen gelangt ein Teil des bei der Korrosion entstehenden zweiwertigen Eisens in den Wasserkörper. Als Folge der Oxidation durch den im Wasser vorhandenen Sauerstoff bilden sich hier Eisenverbindungen, die sich entweder auf der Oberfläche ablagern oder mit dem fließenden Wasser abtransportiert und in andere Leitungen verlagert werden. (KORTH; WRICKE, 2007)

Mit Hilfe von Fließzeitberechnungen sollten daher die Leitungsstränge oder Bereiche ermittelt werden, in denen die täglichen Fließzeiten besonders kurz sind, um diese umgehend bei der Rehabilitationsplanung zu berücksichtigen. Als Orientierungshilfe zur Vermeidung von Stagnationszonen kann eine Mindestfließgeschwindigkeit beim mittleren Stundenbedarf von 18 m/h = 432 m/d empfohlen werden (RAUTENBERG, 2003). Ein plakatives Beispiel soll die Problematik der Verweildauer verdeutlichen: Ein Rückgang des Wasserbedarfs von 50% bedeutet eine Verdoppelung der Aufenthaltszeit im Netz!

Hygienische Probleme in Rohrnetzen, die mikrobiologische Ursachen als Auslöser haben, können kurzfristig durch betriebliche Maßnahmen wie zusätzliche Desinfektion und Spülungen gelöst werden. Sind diese Probleme allerdings auch auf Ablagerungen oder Inkrustationen in Rohrleitungen zurückzuführen, kann nur mit Rehabilitationsmaßnahmen Abhilfe geschaffen werden. Dies gilt im Besonderen, wenn größere Organismen wie Wasserasseln oder Kleinkrebse gefunden werden. Bloße Reinigungsmaßnahmen wie Luft-Wasser-Spülungen helfen nur kurzfristig. Da diese Organismen bis 1,50 m/s Fließgeschwindigkeit widerstehen können und auch Toträume wie Muffenspalten und Schieberdome besiedeln, werden sie von der Reinigungsmaßnahme nicht erfasst. Erst eine Sanierungsmaßnahme oder die komplette Erneuerung der inkrustierten Rohre bringt den gewünschten Erfolg SCHLICHT, 2003).

3 Hydraulische Modellierung zur Zustandsbeurteilung von Wasserrohrleitungen

Aufgabe eines Wasserversorgers ist die Lieferung einer ausreichenden Menge an qualitativ einwandfreiem Trinkwasser. Über diese Forderung hinaus müssen Industrie- und Gewerbebetriebe versorgt werden und im Brandfall hat genügend Wasser mit ausreichenden Druck für die Löscharbeiten bereit zu stehen. Die Wasserverteilung erfolgt über das Rohrnetz, das im städtischen Bereich in der Regel als Ringnetz („vermaschtes Netz“) ausgebildet ist. Im Fall von Leitungsgebrechen wie zum Beispiel Rohrbrüchen, gelangt das Wasser über einen alternativen Weg zum Verbraucher. Ringnetze sind daher als betriebssicherer zu beurteilen und die Versorgungssicherheit steigt auf ein höheres Niveau.

Vor allem zur Berechnung solcher Ringnetze und Bearbeitung von verschiedenen Aufgaben bietet sich der Einsatz rechnergestützter Verfahren an.

3.1 Allgemeines - Modellbildung

Die Simulation eines realen Netzes setzt dessen Abbildung durch ein mathematisches Modell voraus. Bestimmende Größen des Modells sind neben den Parametern, welche die Systemeigenschaften repräsentieren, die Systemvariablen. Diese beschreiben den momentanen Zustand des Systems unter definierten Randbedingungen. Während Parameter im Allgemeinen für unterschiedliche Simulationsrechnungen als beschreibende Größen der physikalischen Komponenten angesehen werden können, sind die Zustandsvariablen so zu bestimmen, dass sie die Randbedingungen und gewisse Systemgleichungen erfüllen (DEUERLEIN, 2002).

Zu den oben genannten Parametern des Modells zählen folgende Punkte:

- *Netzwerktopologie*

  Erfassung der wichtigsten Verbindungen und Entnahmestellen, korrekte Übernahme in den Plan des Versorgungsnetzes oder Datenbank.

- *Eigenschaften der Rohre*

  Geometrie, Länge, Durchmesser, Material und Rauigkeit: Da es sich bei Wasserversorgungsnetzen um historisch gewachsene Systeme handelt, sind genaue Angaben der z.B. Rauigkeitsparameter nicht möglich. Die Rauigkeit erhöht sich im Laufe der Zeit durch Ablagerungen im Rohr je nach Wasserqualität in jedem Netz unterschiedlich stark.

- *Eigenschaften der Knoten*

  Dazu zählen die geodätische Höhe, die Bedarfswerte und Behälterfüllhöhen mit ihren tageszeitlichen Schwankungen.

- *Armaturen*

  Schieberstellungen, Solldruck- und Durchflusswerte von Regeleinrichtungen, sowie Pumpen (Drehzahl, Leistung) sind unter diesem Begriff zusammengefasst.

- *Fehlmengen*

  Eine besondere Schwierigkeit stellt die Zuordnung von Fehlmengen dar, die als Ursache Leckagen, Tröpfchenverluste bei Hausanschlüssen, ungenauer Wasserzähler oder Diebstahl haben.

Neben den vorhin erwähnten Elementen ist der Graph die Grundlage für die Darstellung mathematischer Modellierungen von Wasserversorgungsnetzen. Der Aufbau des Graphen hat Stränge und Knoten als Grundlage. Dabei sind jedem Strang ein Anfangsknoten und ein Endknoten zugeordnet.

Die Aussagekraft von Modellrechnungen hängt zu einem großen Teil von einer gründlich durchgeführten Datenerhebung ab, die der Festlegung der Parameter des mathematischen Modells dient. Die Kalibrierung des Simulationsmodells beinhaltet die Bestimmung wichtiger physikalischer Größen, wie Verbrauchswerten und Rohrrauigkeiten und stellt eine der größten Schwierigkeiten dar.

Das hydraulische Modell ermöglicht stationäre und dynamische Simulationsrechnungen. Randbedingungen zur Simulation des stationären Fließverhaltens sind Verbrauchswerte an den Bedarfsknoten und Potentialhöhen an den Einspeisepunkten, die als bekannt vorausgesetzt werden. Ziel ist dann die Bestimmung der Durchflüsse in den Leitungssträngen und der Potentialhöhen an den Bedarfsknoten.

In realen Wasserversorgungsnetzen kommt es jedoch zur Ausbildung von Tagesganglinien bei den Verbrauchswerten und Behälterfüllhöhen. Mittels dynamischer (quasi stationärer) Simulationsrechnungen wird das hydraulische Verhalten eines Wasserversorgungsnetzes, vermascht oder verästelt, in einem vorgegebenen, diskretisierten Zeitraum nachvollzogen. Durch die dynamische Rohrnetzberechnung wird versucht diesen Veränderungen Rechnung zu tragen. In der Regel werden Simulationsrechnungen über Tages- oder Wochenzyklen durchgeführt und die Zeitschritte in Stundenintervalle eingeteilt.

Die Tagesganglinien der Verbrauchswerte werden zu Beginn der dynamischen Berechnung festgelegt .Damit ist für jede Zeitstufe eine bestimmte Größe für den Bedarfswert gegeben. Die Behälterfüllhöhen stehen nicht im Vorhinein fest, sondern erfordern zu ihrer Bestimmung die Simulationsrechnung. Zum Startzeitpunkt

müssen die Füllstände zwar bekannt sein, doch in weiterer Folge liefert die stationäre Rohrnetzberechnung Einspeise- und Füllmengen der verschiedenen Behälter. Unter Berücksichtigung des Mengenausgleichs im System über einen gewissen Zeitraum, sowie der Behältergeometrie ergibt sich der Füllstand der einzelnen Behälter zu einem beliebigen Zeitpunkt (DEUERLEIN, 2002).

Bei der mathematischen Modellierung von Wasserversorgungssystemen werden verschiedene computerunterstützte Modelle wie z.B. EPANET, WaterCAD, STANET oder KANET verwendet. In der vorliegenden Arbeit kommt das auf EPANET 2.0 basierende Programmpaket Mike Urban von DHI zur Anwendung.

3.2 Hydraulische Grundgleichungen

Die hydraulische Rohrnetzberechnung beinhaltet die Bestimmung der Druckverluste in durchströmten Rohrleitungen, welche sich aus Reibungsverlusten entlang eines Rohres sowie örtlichen Verlusten, verursacht durch Einbauten wie Krümmer, Schieber, etc. zusammensetzen. Beide Verluste haben eine Umwandlung von kinetischer Energie der Flüssigkeitssäule in Wärmeenergie zur Folge. Unterschiedliche Formelwerke zur Berechnung der Druckverluste kommen zum Einsatz. Die bekanntesten werden im Folgenden kurz beschrieben.

Druckverlustberechnung nach Darcy-Weisbach

Die Reibungsverluste inkompressibler Fluide in kreisförmigen, geraden Druckrohren mit gleichbleibendem Querschnitt können mit Hilfe verschiedener Parameter physikalisch einwandfrei beschrieben werden (MUTSCHMANN, 2002):

$$\boxed{h_r = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}}$$

mit:	h_r	Druckabfall infolge Rohrreibung	[m]
	l	Rohrleitungslänge	[m]
	λ	Widerstandszahl	[-]
	d	lichter Rohrdurchmesser	[m]
	v	mittlere Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
	g	Erdbeschleunigung	[m/s^2]

Der Widerstandsbeiwert λ hängt für den bei Wasserversorgungsleitungen vorherrschenden turbulenten Strömungsbereich neben der Innenrauigkeit k und dem Durchmesser des Rohres auch von der Reynolds-Zahl Re ab. Die Reynolds-Zahl charakterisiert den Strömungszustand und berechnet sich wie folgt:

$$\boxed{Re = \frac{v \cdot d}{\nu}}$$

mit:	Re	Reynolds-Zahl	[-]
	v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
	ν	kinematische Zähigkeit	[m²/s]

Beim Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung (Re_{krit}=2320) hängt die Reibungszahl außerdem von der relativen Rauigkeit k/d ab. Man spricht vom sogenannten Übergangsbereich. Der Beiwert k bezeichnet dabei die äquivalente Sandrauheit. Bei Überschreitung eines weiteren Grenzbereichs in den hydraulisch rauen Bereich ist der Reibungsbeiwert nur noch von der relativen Rauigkeit k/d abhängig.

Lokale Druckhöhenverluste infolge örtlicher Einbauten (Krümmer, Schieber, etc.) können wie folgt berücksichtigt werden:

$$\boxed{h_e = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}}$$

mit:	h_e	Druckabfall infolge Einbauten	[m]
	v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
	ζ	Widerstandszahl für Einbauten	[-]
	g	Erdbeschleunigung	[m/s^2]

Da die örtlichen Verluste verglichen mit den Rohrreibungsverlusten eher gering sind, können sie bei langen Rohrleitungen vernachlässigt werden, da sie meist schon bei der integralen Rauheit der Rohre berücksichtigt sind.

Universelle Fließformel nach Prandtl-Colebrook

In Wasserversorgungsnetzen liegen die Strömungen üblicherweise im *hydraulischen Übergangsbereich*. Der Zusammenhang von Widerstandszahl λ, der relativen Rauigkeit k/d und der Reynolds-Zahl kann durch die universelle Fließformel von Prandtl-Colebrook in impliziter Form angegeben werden (KAINZ et al, 2005):

$$\boxed{\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{2{,}51}{Re\cdot\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3{,}71\cdot d}\right)}$$

Für sehr kleine relative Rauigkeiten (k << d) kann der zweite Summand in der Klammer der oben angeführten Gleichung vernachlässigt werden. Damit ergibt sich die Fließformel für den *hydraulisch glatten Bereich*:

$$\boxed{\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{2{,}51}{Re\cdot\sqrt{\lambda}}\right)}$$

Der *hydraulisch raue Bereich* kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$\boxed{\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{1}{3{,}71}\cdot\frac{k}{d}\right)}$$

3.3 Anwendungen der hydraulischen Simulation

3.3.1 Vorbemerkungen

Bei hydraulischen Betrachtungen mittels rechnergestützten Simulationsmodellen lassen sich eine Vielzahl von Untersuchungen durchführen und die verschiedenen Belastungsfälle des Netzes darstellen. In diesem Zusammenhang ist an erster Stelle die Verifikation von Entwürfen von Aufschließungen unter verschiedenen Lastfällen und Betriebszuständen zu nennen. Durch Berücksichtigung von Bedingungen, die sich aus der Struktur des Netzes, dem Belastungsfall und dem Betriebszustand der verschiedenen Pumpen und Regeleinrichtungen ergeben, lassen die Bestimmung der Druck- und Durchflussverteilung im Netz zu. Die Ergebnisse dieser mit dem Simulationsmodell durchgeführten Berechnungen liefern die Basis für Entscheidungen bei Neubauten.

Eine hydraulische Simulation kann aber auch beim optimalen Betrieb des Rohrnetzes behilflich sein. Die Rohrnetzanalyse dient dabei als Grundlage bei betrieblichen Entscheidungen wie der Lokalisierung von Schwachstellen und Mängeln. Es besteht die Möglichkeit Netztrennungen und Ausfälle von Netzteilen zu simulieren und in weiterer Folge Optimierungsvorschläge daraus abzuleiten.

Für größere Wasserversorger ist es daher heute unerlässlich auf solche Modelle zurückzugreifen und für die Planung von Netzerweiterungen und Steuerung des täglichen Betriebes, sowie für die Rehabilitationsplanung zu verwenden.

In den weiteren Ausführungen wird besonders auf die für die Rehabilitationsplanung relevanten Kriterien für die Strangauswahl eingegangen und die Anwendungsmöglichkeiten der hydraulischen Simulation aufgezeigt.

3.3.2 Rohrrauigkeiten aus der Kalibrierung des Modells

Die Rauheit k ist ein Maß für die Größe, Art und Verteilung der Rauheitserhebungen auf der inneren Rohrwand. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Rauheit k und geometrischen Größen (Höhen der Rauheitserhebungen) besteht allerdings nur für ein definiert sandraues Rohr (Sandkorndurchmesser). Bei der hydraulischen Berechnung von Leitungen mit zahlreichen Richtungsänderungen und Einbauten und vor allem bei vermaschten Netzen entfernt man sich zunehmend von den Voraussetzungen unter denen die Brauchbarkeit des Formelwerkes (siehe Pkt. 3.2) nachgewiesen wurde. Doch die Erfahrung zeigt, dass die Formel trotz der vielen mathematisch nicht exakt erfassbaren Widerstände genügend genaue Ergebnisse liefert.

Um den Unterschied herauszustreichen, spricht man deshalb bei Rohrnetzen von integraler (betrieblicher) und scheinbarer Rauheit. Sie bezeichnet nicht mehr nur

den Zustand der Rohroberfläche, sondern bildet ein Maß für die hydraulische Leistungsfähigkeit des Gesamtnetzes (KRAUT, 1981).

Um die hydraulischen Rauigkeiten von Rohrleitungen für die Modellierung eines Wasserversorgungsnetzes ermitteln zu können, ist es notwendig, die Druckverteilung während unterschiedlichen aber bekannten Lastzuständen des Netzes zu erheben. Auf Basis eines Messprogramms kann eine Kalibrierung des Rechenmodells hinsichtlich Rohrrauigkeiten mit der Berechnungssoftware durchgeführt werden. Für die Kalibrierung sind folgende zwei Zustände maßgebend:

- *Schwachlastfall (Minimalbelastung)*
- *Belastungsfall*

In verbrauchsschwachen Zeiten (Nachtminimum) sinkt der Wasserverbrauch gegen Null ab. Aus der Annahme heraus, dass niemand Wasser aus dem Netz entnimmt, sind sämtliche Netzeinspeisungen bei gleichbleibendem Druck Wasserverluste. Es stellt sich annähernd der Netzruhedruck ein. Von diesem Niveau aus wird mittels einer kontrollierten Wasserentnahme (Menge bzw. Durchfluss vorgegeben) eine Druckabsenkung herbeigeführt. Durch die Differenz im Druckniveau und der zugehörigen Entnahmemenge lassen sich die Rauigkeiten im Netz bestimmen. Das heißt bei einem definierten Messzustand kann k bzw. λ als einzige Unbekannte immer ermittelt werden:

$$h_r = \frac{1}{\left[2\log\left(\frac{3{,}71\cdot d}{k}\right)\right]^2}\cdot\frac{l}{d}\cdot\frac{Q^2}{\left(\frac{d^2\cdot\pi}{4}\right)^2\cdot 2g}$$

mit:	Q	Entnahmemenge	[m³/s]
	d	Rohrdurchmesser	[m]
	k	Rauigkeit eines Abschnitts	[mm]
	l	Länge der Rohrleitung	[m]
	h_r	Druckverlusthöhe	[m]
	g	Erdbeschleunigung	[m/s²]

Durch Erkenntnisse aus der Praxis der Rohrnetzanalyse ist die Forderung nach einem gleichmäßigen k-Wert (Übereinstimmung von Messung und Berechnung kann immer erreicht werden) über das Rohrnetz differenziert zu betrachten. Es sind dabei einige Punkte zu beachten, die bei der Beurteilung der Rauigkeiten von Rohrleitungen zu bedenken sind:

- Baujahr und Rohrwerkstoff

  Sehr viele Netze wurden in den vergangenen Jahren den Verbrauchssteigerungen durch den Bau einzelner starker Hauptachsen angepasst, oder Teile wurden überhaupt erst neu gebaut. Zumeist wurde dabei ein völlig anderer Rohrwerkstoff (PVC, PE, Sphäroguss mit Zementmörtelauskleidung) verwendet, als im übrigen älteren Netz verbaut ist. Daher ist es selbstverständlich, dass sich solche Leitungsstränge mit einem abweichenden hydraulischen Verhalten niederschlagen.

- Leitungen mit ausgeprägter „Transportaufgabe“

  In den meisten Netzen gibt es Leitungen, die sich durch ihre Funktion von den Leitungssträngen der allgemeinen Vermaschung unterscheiden. Behälterausgangsleitungen oder stark dimensionierte Hauptachsen haben eine Ausprägung hinsichtlich Wassertransport, während das nachgeordnete Netz eher nur die Aufgabe der örtlichen Verteilung zukommt.

  Transportleitungen sind in der Regel mit weniger bis keinen Einbauten (Hausanschlüsse, Verzweigungen, Hydranten) beaufschlagt. Nachdem der ermittelte k-Wert bei Netzen diese Einflüsse auch enthält, ist bei solchen Hauptleitungen eine kleinere Rauheit zu erwarten, obwohl sich die innere Rohroberfläche nicht von den übrigen Abschnitten unterscheidet.

Tabelle 3: k-Werte neuer Leitungen (MUTSCHMANN, 2007)

Rohrmaterial	Zubringer- u. Hauptleitungen	Versorgungsleitungen
PVC, PE	$k = 0{,}01 \cdot 10^{-3}$ m	$k = 0{,}04 \cdot 10^{-3}$ m
AZ	$k = 0{,}05 \cdot 10^{-3}$ m	-
St, GGG, GG mit Bit oder ZM	$k = 0{,}1 \cdot 10^{-3}$ m	$k = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ m
SpB	$k = 0{,}1 \cdot 10^{-3}$ m	-

Durch eine Erhöhung des der hydraulischen Berechnung zu Grunde gelegten k-Wertes kommt es unweigerlich zur Erhöhung der Verluste bzw. zur Verminderung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Rohrleitung. Bei neu verlegten Leitungsabschnitten bewegen sich die Faktoren für die Rauigkeit im Allgemeinen in den Bereichen, wie in *Tabelle 3* angegeben.

Bei gebrauchten Rohrleitungen ist die Rauigkeit nur selten gleich oder geringfügig größer als in neuen Leitungen. Ablagerungen, Inkrustationen und Rosterscheinungen an der inneren Rohroberfläche vergrößern in der Regel die Druckhöhenverluste. Eine Ausnahme bilden Kunststoffleitungen und unter Umständen auch

Rohrleitungen aus Asbestzement. Bei diesen Rohrwerkstoffen ist kein nennenswerter Anstieg der Rauigkeit über die Lebensdauer zu verzeichnen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das hydraulische Verhalten vieler bestehender Wasserversorgungsnetze auf Rauheitswerte zwischen 1 mm und 3 mm schließen lässt. Dabei wird ein deutliches Häufigkeitsmaximum im Bereich von 1 mm und etwas darunter erkennbar sein. Rauigkeiten weit unter 1 mm sind sehr selten, aber auch Werte über 30 mm kommen vor. Für Einzelleitungen und Hauptversorgungsachsen werden häufig Rauigkeitswerte unter 1 mm (0,1 mm bis 1 mm) gemessen. Den Einfluss der Rauheit auf den Durchfluss bei gleichem Druckverlust soll *Abbildung 7* verdeutlichen.

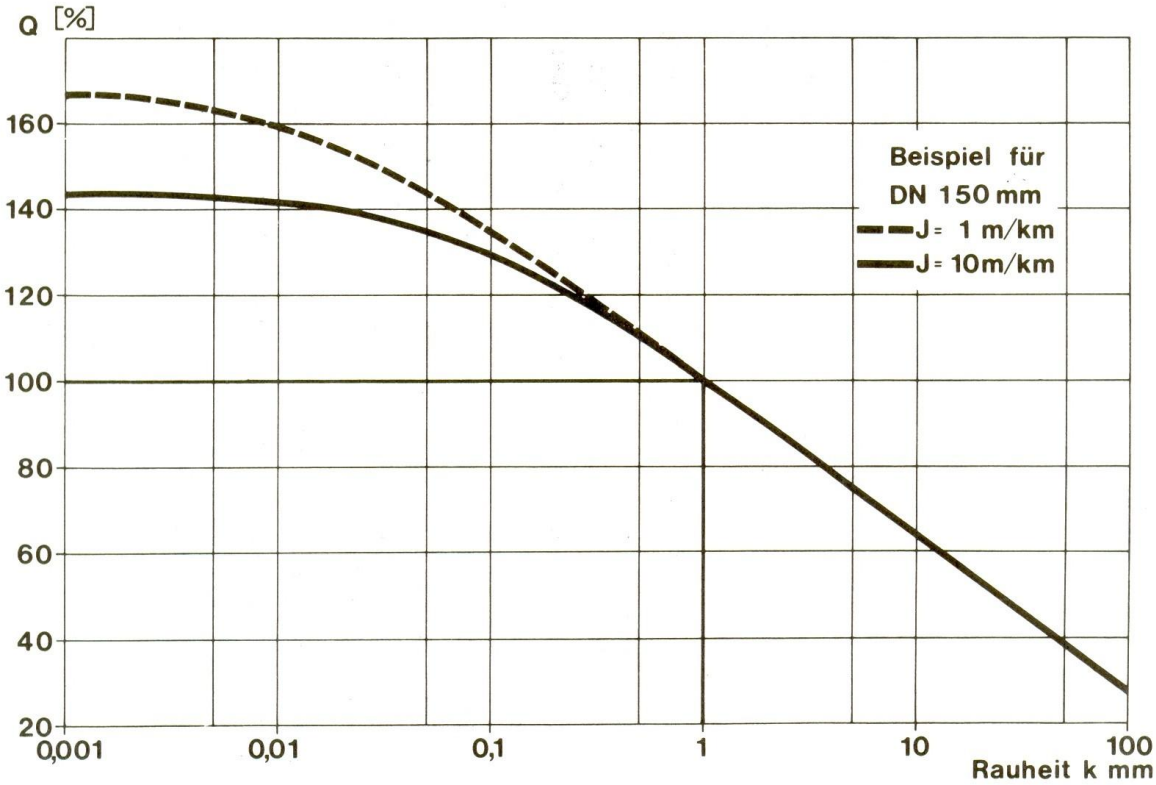


Abbildung 7: ***Einfluss der Rauheit k auf die Leistungsfähigkeit einer Rohrleitung bei gleichbleibendem Druckverlust (KRAUT, 1981)***

Die Begründung für das Heranziehen von Rauigkeiten aus der Kalibrierung des Modells liegt in folgenden Punkten:

- Wenn der Wasserbedarf sehr hoch ist (verbrauchsreichste Stunde des Tages), kann es in Folge von großen Rohrrauigkeiten zu einem drastisches Abfallen der Druckhöhe und teilweise Unterschreiten des geforderten Mindestbetriebsdrucks kommen.
- Bei Netzabschnitten in denen Wasser gepumpt werden muss, haben nachteilige Veränderungen der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Rohrleitungen (höhere Rauigkeit) direkten Einfluss auf den Verbrauch von

elektrischer Energie der Pumpen. Somit steigen auch die Kosten, die je m³ gefördertem Wasser entstehen.

Zur Unterstützung bei der Rehabilitationsentscheidung eines bestimmten Abschnittes ist die Rohrrauigkeit eher nur für Leitungen aus metallischem Werkstoff heranzuziehen. Der Einfluss der Rauigkeit auf die hydraulische Leitungsfähigkeit sollte deshalb nur bei metallischen Leitungen zur Prioritätendefinition Verwendung finden. Bei Kunststoffleitungen kann eine Aussagekräftigkeit, wie sie bei zuvor genannten Leitungen vorliegt, nicht erwartet werden.

3.3.3 Bestimmung der Druck- und Durchflussverteilung

Mittels der hydraulischen Simulation lassen sich in jedem Knoten bzw. Strang des Netzes für verschiedene Lastfälle die Drückhöhe und Fließgeschwindigkeit berechnen. Aus den zahlreichen Möglichkeiten und Lastfallberechnungen, die sich aus der Modellierung ergeben, sollten folgenden Auswertungen bei der Planung von Rehabilitationsmaßnahmen Berücksichtigung finden:

- *Maximaler Druck* im Versorgungsnetz: Er tritt während den Nachstunden eines verbrauchsreichen Tages auf.
- *Minimaler Druck* im Versorgungsnetz: Er tritt in der verbrauchsreichen Stunde eines verbrauchsreichen Tages auf.
- *Stagnationszonen*: Für die Auswertungen sind die Fließgeschwindigkeiten in der verbrauchsreichsten Stunde eines durchschnittlichen Tages von Bedeutung.

Der Hintergrund bei der Ermittlung von maximalen und minimalen Versorgungsdrücken ist es die Höhe des Schadensausmaßes in Abhängigkeit des vorherrschenden Druckes zu definieren. Leitungsabschnitte mit höherem Druck verursachen demnach einen größeren Schaden im Falle eines Leitungsbruchs, als Leitungen mit geringerem Versorgungsdruck.

Als positiver Nebeneffekt bei der Berechnung des Minimaldruckes kann die Möglichkeit der Ermittlung von Druckschwankungen über einen verbrauchsreichen Tag hinweg genannt werden. Es ist der Druckunterschied zwischen dem Nachtminimum (größter Druck im Netz) und der Tagesspitze (minimaler Druck) zu erheben und daraus einen schädigenden Einfluss auf bruchanfällige Leitungen zu erkennen.

Dazu sind im gesamten Netz die Knotendrücke an einem verbrauchsreichen Tag zu berechnen und speziell in den Untersuchungsgebieten die minimalen und maximalen Knotendrücke, sowie die Druckdifferenzen zu ermitteln. Für die Berechnung sind die Werte der Nachtstunden (maximaler Druck) von 00:00 h bis 05:00 h

und der Abendstunden (minimaler Druck) von 18:00 h bis 21:00 h je nach betrachtetem Netz heranzuziehen.

Bei den Auswertungen der Durchflussverteilung und der Lokalisierung von Stagnationszonen werden die Fließgeschwindigkeiten aller Leitungsstränge zu verbrauchsreichsten Stunde eines Tages mit durchschnittlichem Bedarf analysiert. Geringe Fließgeschwindigkeiten bedingen lange Aufenthaltszeiten im Netz und führen neben qualitativen Problemen (z.B. Wiederverkeimung) auch zu Inkrustierungen und Ablagerungen in den Rohrleitungen (GANGL, et al. 2006).

3.3.4 Konzentrationsverteilung von Qualitätsparametern

Eine Ermittlung der Verteilung von Wasserqualitätsparametern ermöglicht die Darstellung des Wasseralters in den verschiedenen Netzteilen, die Simulation der Quelle des Eintrages von Verunreinigungen, die Berechnung des Gehalts einer gelösten Substanz oder auch die Bestimmung des Wachstums und der Verbreitung von mikrobiologischen Substanzen im Rohrnetz. Die wichtigsten Untersuchungen, die sich mit einer Modellrechnung durchführen lassen, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Analyse des Wasseralters
- Analyse der Konzentration und der Ausbreitung von Verunreinigungen
- Analyse der Verteilung der z.B. Chlorkonzentration

Vor allem die Ergebnisse aus den Berechnungen des Wasseralters im Rohrnetz haben Einfluss auf die Rehabilitationsentscheidung. Mit zunehmender Aufenthaltszeit des Wassers steigt die Gefahr von Rostwassererscheinungen drastisch an. Bei metallischen Leitungen ohne Innenschutz kommt es bei hohen Verweilzeiten zu Reaktionen des Trinkwassers mit dem Rohrwerkstoff. Folgen davon können eine Erhöhung des Eisengehalts des Wassers mit einhergehender Veränderung der Farbe und des Geschmacks sein.

Die Analyse von Konzentration und Ausbreitung von Verunreinigungen dient eigentlich der Beurteilung eines Eintrags aus einem Speicher oder einer Quelle. Für die Rehabilitationsplanung lässt sich diese Möglichkeit der Modellierung so nutzen, dass die Stelle, wo die Verunreinigung ins Rohrnetz gelangt, bei jedem Knoten des Rechenmodells angesetzt werden kann. So besteht die Möglichkeit Erscheinungen von Trübungen wie sie durch Korrosionsprodukte entstehen, nachzubilden.

Wenn zur Aufbereitung des Trinkwassers Chlor verwendet wird, ist die Konzentrationsverteilung des Desinfektionsmittels im Rohrnetz von wesentlicher Bedeutung. Durch geringe Konzentrationen steigt die Gefahr der Wiederaufkeimung an und Wasser mit erhöhten Keimzahlen kann zum Abnehmer gelangen. Durch gesonderte Überlegungen bezüglich der Netzgestaltung und der Aufbereitungsmethode ist den Erkenntnissen aus der hydraulischen Modellierung bei der Planung von Erneuerungsmaßnahmen Bedeutung beizumessen.

3.3.5 Optimierung von Rohrnetzspülungen

Ein den Anforderungen entsprechender Rohrnetzbetrieb trägt wesentlich zur Sicherung der Trinkwasserqualität im Verteilungsnetz bei. Rohrnetzspülungen zum Austrag von Ablagerungen spielen hierbei eine wichtige Rolle, da Sedimente eine Ursache von Rostwassererscheinungen, mikrobiologischen Verunreinigungen sowie einer Vermehrung von tierischen Organismen sein können. Nach KORTH et al. (2007) kann die Bildung von Ablagerungen im Rohrnetz von unterschiedlichen Ursachen herrühren:

- Eintrag von Partikeln aufgrund unzureichender Aufbereitung. Es können z. B. Eisen- oder Aluminiumflocken sowie Algen oder Sand in das Netz eingetragen werden. Maßgeblich ist dabei die Fracht, da bereits geringe Eisengehalte Trübungen hervorrufen können und es bei entsprechender Fracht zu nennenswerten Ablagerungen kommt.
- Eintrag gelöster Stoffe über die Aufbereitungsstufe. Gelöste Substanzen wie Eisen, Mangan Calcium oder organische Verbindungen führen neben Flockungsprozessen in weiterer Folge zu Ablagerungen.
- Korrosionsvorgänge in ungeschützten Guss- und Stahlleitungen. Aus Korrosionsvorgängen freigesetztes Eisen(II) wird unter anderem zu schwerlöslichen Eisen(III)-oxyden umgewandelt. Dieses kann sich entweder direkt an der korrodierten Innenoberfläche festsetzen oder über den Wasserkörper in andere Leitungsstränge verlagern und dort unter entsprechenden Umständen sedimentieren.
- Verlagerung von Sedimenten. Bei stabilen Randbedingungen kommt es zu einer Ablagerung von Trübstoffen. Bei plötzlichen Änderungen der hydraulischen Situation werden die Sedimente mobilisiert und in nachgelagerte Leitungen verschoben.

Die Erarbeitung eines optimierten Spülplans erfolgt schrittweise. Es sollen aber nur die Punkte herausgearbeitet werden, die im Rahmen von Rehabilitationsmaßnahmen von Nöten sind. In einem ersten Schritt wird eine Analyse der Netzstruktur und der hydraulischen Verhältnisse durchgeführt. Zur Kalibrierung des hydrau-

lischen Modells kann eine Grundspülung des Rohrleitungssystems herangezogen werden. Mit entsprechender Erfahrung und der Unterstützung des hydraulischen Rechenmodells können dann über die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten im Netz Rückschlüsse über die Akkumulation von Ablagerungen gezogen werden.

Um die Aussagen der Modellrechnungen noch mehr zu bekräftigen, empfiehlt es sich Messungen durchzuführen. Das endgültige Ergebnis kann in einem Modell zur Bildung und zum Verhalten der Ablagerungen unter den ortsspezifischen Einflüssen abgebildet werden. Hierauf aufbauend wird die optimierte Spülstrategie erarbeitet. Zudem lassen sich Erfordernisse von gezielten Netzmaßnahmen ableiten. Es können Auswirkungen von hydraulischen Veränderungen und Rehabilitationsmaßnahmen im Rohrnetz abgeschätzt bzw. konkrete Empfehlungen für die Rehabilitationsplanung gegeben werden. Eine ungewöhnlich hohe Anzahl an Spülungen von gewissen Rohrleitungen kann ein Indikator von nicht optimalen Bedingungen hinsichtlich des hydraulischen Aspekts, aber auch des verwendeten Leitungsmaterials im betrachteten Abschnitt sein. Da Spülungen auch Kosten nach sich ziehen (Personalkosten, Wasserkosten), sind sie in jedem Fall bei der Beurteilung von Leitungssträngen bezüglich der Erneuerungswürdigkeit zu berücksichtigen.

3.4 Vulnerabilitäts- und Risikobetrachtungen

3.4.1 Die Begriffe Risiko und Zuverlässigkeit

Das Risiko *R* stellt statistisch gesehen einen Erwartungswert dar und wird als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit *P* und erwartetem Schadensausmaß *M* definiert. Das Schadensausmaß kann hierbei beispielsweise mit der Höhe der Folgekosten (€) beschrieben werden, aber auch qualitativ definiert sein, wie z. B. als die Anzahl der betroffenen Wasserabnehmer bei einer Versorgungsunterbrechung durch einen Rohrbruch, oder auch die Dauer des Ausfalls der Versorgung (ROSCHER, 2004):

$$\boxed{R = P \cdot M}$$

Als Eintrittswahrscheinlichkeit kann man die zu erwartende Häufigkeit eines Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum definieren. D. h. sie ist der Quotient aus der Anzahl ζ von erwarteten Schadensereignissen und der Gesamtzahl *n* der möglichen Schadensereignisse zu errechnen:

$$\boxed{P = \frac{\zeta}{n}}$$

Die *Abbildung 8* fasst die vorhin an Hand von Formeln dargestellte Definition des Risikos nun in Form einer Schemagrafik zusammen. Sie zeigt, wie sich das Risiko für das Beispiel Versorgungsunterbrechung einer Rohrleitung (Rohrbruch) ergibt:

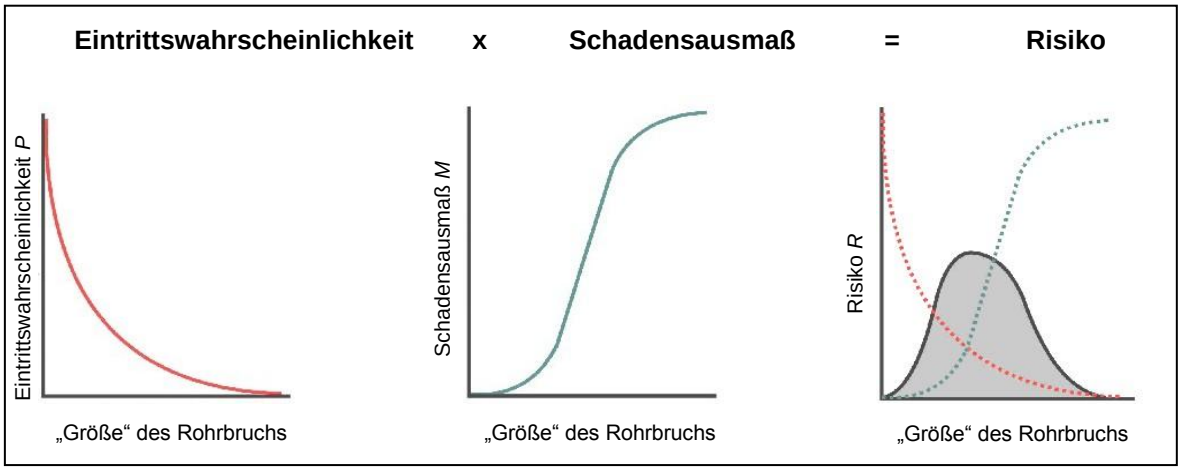


Abbildung 8: Darstellung zur Definition des Begriffs Risiko (KIEFFER, 2008)

Der Graph der Verteilungsfunktion der Eintrittswahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmendem Schweregrad des betrachteten unplanmäßigen Ereignisses ab. In anderen Worten bedeutet das, dass eine kurze Versorgungsunterbrechung um beim Beispiel zu bleiben, sehr viel häufiger auftreten wird als eine lang andauernde. Beim Verlauf des Schadensausmaßes verhält es sich gerade umgekehrt. Mit zunehmendem Schweregrad des Ereignisses wächst auch der verursachte Schaden an. Die Kombination beider Verteilungsfunktionen ergibt das Risiko, das der untersuchte Leitungsabschnitt hinsichtlich einer Versorgungsunterbrechung birgt. Als Ergebnis dieser Betrachtung geht hervor, dass das größte Risiko bei „mittleren Ereignissen“ auftritt.

In einer weiteren Definition des Begriffs Risiko *R*, die den Bezug zur Systemvulnerabilität herstellt, kann die Gefahr *H* mit der Eintrittswahrscheinlichkeit und die Vulnerabilität *V* mit dem Schadensausmaß gleichgesetzt werden. Daraus ergibt folgende Definition:

$$\boxed{R = H \cdot V}$$

Zur Verdeutlichung des Begriffs, sowie zur Definition der Versorgungssicherheit kann man sich des Terminus Zuverlässigkeit bedienen. Die Verbindung zwischen Zuverlässigkeit und der Mathematik wird vorwiegend durch den Begriff Störung (unplanmäßiges Ereignis) hergestellt.

Im klassischen Sinn definiert sich Zuverlässigkeit als die Wahrscheinlichkeit, dass ein System in einem vorher festgelegten Zeitraum nach vorgegebenen Bedingungen präzise funktioniert. Ganz allgemein kann die Zuverlässigkeit als Zeitkomponente der Qualität charakterisiert werden. Dies beiden Begriffe decken sich jedoch nicht völlig, denn die Qualität enthält noch zwei wichtige Komponenten: Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. Die Sicherheit und die Zuverlässigkeit sind durch das unplanmäßige Ereignis miteinander verbunden. Während die Zuverlässigkeit das Eintreten eines unplanmäßigen Ereignisses nicht ausschließt, wird sie von der Sicherheit nur unter der Bedingung zugelassen, dass alle Maßnahmen zum Schutz des Menschen und der Umwelt getroffen sind. Die Wirtschaftlichkeit ist dagegen ein notwendiges Merkmal einer jeder technischen Ausrüstung, um möglichst niedrige Herstellungs- und Betriebskosten zu gewährleisten (RÖTSCH, 1999).

Die Störanfälligkeit von Wasserversorgungssystemen wird entscheidend durch die Netzlänge, die Komplexität, das Alter und den Zustand der Anlagen beeinflusst. Daher bestimmen diese Einflussfaktoren auch im erheblichen Maße die Versorgungszuverlässigkeit des einzelnen Abnehmers. Damit jeder Kunde auch jederzeit, die von ihm verlangte Menge an Wasser mit entsprechendem Druck aus dem Netz entnehmen kann, ist eine gewisse Zuverlässigkeit der Versorgung sicherzustellen.

Dabei kann jedoch wiederum eine Prioritätenreihung vorgenommen werden. Während für Abnehmer sensibler Bereiche, wie Krankenhäuser, dicht bebautes Wohngebiet, Innenstadtbereiche (Schulen, Hotels und Kaufhäuser), sowie bei technologischem Bedarf für Industrieanlagen eine hohe Versorgungszuverlässigkeit garantiert werden muss, spielt diese für Abnehmer kommunaler Bereiche eine eher weniger bedeutende Rolle. Ein vermaschtes Netz ist in der Lage die Zuverlässigkeit des Systems auf ein höheres Niveau zu heben, jedoch bei Extremsituationen sind Versorgungsunterbrechungen und ein Druckabfall gegenüber dem Normalbetrieb schwer zu vermeiden.

Hier setzt die Querverbindung zur Rehabilitationsplanung an. Mittels Analysen in einem hydraulischen Modell der Anlage, können eine Abschätzung der Anzahl der betroffenen Abnehmer im Fall eines Leitungsgebrechens erfolgen und die Auswirkungen einer Unterbrechung auf die Druckverhältnisse dargestellt werden. Mit solchen zusätzlichen Aspekten lassen sich Prioritäten in der Rehabilitation besser erkennen und die Entscheidung für die Erneuerung eines Leitungsabschnitts auf eine breite Basis stellen.

3.4.2 Vulnerabilität von Wasserversorgungssystemen

Die folgenden Ausführungen gehen auf Überlegungen von MÖDERL et al. (2008) zurück und geben in gekürzter Form einen Überblick über das Themengebiet. Sie sollen die natürliche (intrinsische) Vulnerabilität, die bei einem Wasserversor-

gungssystem besteht aufzeigen, Gefährdungen für das System darlegen und eine Einführung in das Risiko-Assessment geben. Die intrinsische Vulnerabilität (Verletzlichkeit) hängt nur von den natürlichen Gegebenheiten und Charakteristika, wie z B. Rohrdurchmesser, Alter der Rohleitung, Anzahl der versorgten Abnehmer, Dauer der Versorgungsunterbrechung, Druckabfall bei einer Versorgungsunterbrechung, usw. des Systems ab. Es besteht keine direkte Abhängigkeit zu Gefährdungen, die von „außen“ auf die gesamte Anlage einwirken.

Das Ziel von Wasserversorgungsunternehmen ist es, stets eine in jeder Hinsicht optimale Versorgung mit Trinkwasser gewährleisten zu können. Die Wasserversorgung gilt als eine der sogenannten kritischen Infrastrukturen und soll auch in betrieblichen Extremsituationen, hervorgerufen durch Materialversagen, Naturkatastrophen, menschliches Fehlverhalten oder terroristische Aktivitäten, eine einwandfreie Funktion garantieren. Diese auf Risikobetrachtungen basierenden generellen Konzepte haben mittlerweile schon in den Stand der Technik repräsentierenden Wassersicherheitsplänen Berücksichtigung gefunden.

Die Vulnerabilitätsmodellierung identifiziert für jede einzelne Komponente einer Versorgungsanlage die Auswirkungen auf das Gesamtsystem bei einem Ausfall eben dieser Komponente. Im Fall, dass Teile der Wasserversorgungsanlage in Gefahrenzonen (z.B. durch Hangrutschungen, Muren, Lawinen oder Überflutungen gefährdete Gebiete) liegen, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass es zu Beeinträchtigungen durch die ausgewiesene Gefahr kommt. Es lässt aber nicht den Schluss zu, dass es durch die potentielle Gefährdung die vom Gelände ausgeht, zwangläufig auch die Anlagen der Wasserversorgung in gleichem Maße betroffen sind. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Informationen kann erst festgestellt werden, ob ein Rohrbruch, der durch eine Hangrutschung ausgelöst wurde, auf das Gesamtsystem gravierende negative Einflüsse hat oder nicht.

Aus dem vorhin Gesagten geht hervor, dass die Vulnerabiltät eng mit der Begrifflichkeit Versorgungszuverlässigkeit zusammenhängt. Im speziellen Fall wird die hydraulische Simulation für die Beurteilung der Auswirkungen des Versagens einzelner Komponenten des Gesamtsystems herangezogen. In der Modellrechnung wird das Versagensverhalten von Elementen des Systems (in der vorliegenden Diplomarbeit das Rohrnetz), zum Beispiel im Fall eines Rohrbruchs, durch Trennung vom übrigen Netz erreicht. Die praktische Umsetzung in der Simulation geschieht über das Setzen und Schließen von Schiebern im Bereich des betrachteten Abschnitts. Bei Rohrbruchsimulationen in verbrauchgesteuerten Rechenmodellen (EPANET) ist die Isolation des betroffenen Elements Voraussetzung zur Erhaltung eines adäquaten Druckniveaus im System. In diesem Fall sind eigentlich zwei Zeitbereiche zu berücksichtigen:

- Der Zeitbereich unmittelbar nach dem Rohrbruch, wenn Wasser aus dem Rohrnetz austritt.
- Der Zeitbereich nachdem die Schieber um den Abschnitt des Rohrbruchs geschlossen wurden.

In der ersten Periode sind verbrauchgesteuerte Simulationsmodelle ungeeignet, im zweiten Zeitbereich jedoch hinreichend genau. Da die Zeitdauer bei der ein Wasseraustritt gegeben ist wesentlich kürzer ist, als jene in der die Schieber geschlossen sind, ist eine Analyse, wie sie der zweite Fall beschreibt eine gute Näherung zur Darstellung des Systemverhaltens.

Über *Kenngrößen (Indikatoren),* die die Ergebnisse beschreiben und klassifizieren, kann eine Verletzlichkeit durch das betroffene Element abgleitet werden. Ein hoher Indikatorwert bedeutet eine niedrige Vulnerabilität des Systems, oder anders ausgedrückt, das System ist redundant.

Der Performance-Verlust eines Wasserverteilungssystems infolge des Versagens eines Elements kann mittels 3 Performance-Indikatoren, die eine Vulnerabilität der einzelnen Komponenten abschätzen, ermittelt werden:

Indikator 1 (in %) beschreibt die hydraulische Qualität des Systems, über einen definierten Bereich in dem sich der Versorgungsdruck bewegen darf. Die Anforderungen an das Druckniveau werden über einen unteren (p_u) und einen oberen (p_o) Grenzwert festgelegt.

$$I_1 = \frac{\sum_{j=1}^{J} Q_{gel,j}(p)}{\sum_{j=1}^{J} Q_{gef,j}} \cdot 100\,(\%)$$

$$Q_{gel(p)} : p \in (p_u , p_o)$$

In Worten ausgedrückt, ergibt sich der Indikatorwert aus Division der Summe der mit adäquaten Druck gelieferten Menge ($Q_{gel(p)}$) durch die Summe der geforderten Menge (Q_{gef})an jedem Abnehmerknoten.

Indikator 2 (in %) betrifft die Wasserqualität. Die Wasserqualität hängt ursächlich mit dem Wasseralter zusammen und ist als akzeptabel einzustufen, solange das Wasseralter in den Leitungssträngen ein gewisses Limit (z.B. t_u=48 Stunden) nicht übersteigt. Es wird die Aufenthaltszeit in der Leitung beurteilt: je kürzer desto besser.

$$I_2 = \frac{\sum_{j=1}^{J} Q_{gel,j}(\text{ Alter})}{\sum_{j=1}^{J} Q_{gef,j}} \cdot 100\ (\%)$$

$Q_{gel(Alter)}$: Alter ϵ $(0, t_u)$

Indikator 3 ist ein Maß für die Kombination aus hydraulischer Qualität des Systems und der vorliegenden Wasserqualität in den Leitungsabschnitten.

$$I_3 = \min\left(I_1, I_2\right)$$

Er gibt keine zusätzliche Information bezüglich der Vulnerabilität des Systems her. Viel mehr eignet sich dieser Indikator zur Visualisierung der errechneten Vulnerabilität, um Schwachpunkte der Wasserversorgungsanlage darzustellen.

Die zuvor geschilderte Betrachtungsweise über die Verletzlichkeit eines Wasserversorgungssystems ist die Grundlage für eine Software namens VulNetWs (Vulnerability of Water Supply Systems), die am Institut für Umwelttechnik an der Universität Innsbruck entwickelt wurde. Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit kommt dieses Programm nicht zu Einsatz, wohl aber die Überlegungen, die dahinter stecken und sich auf diese neuartige Methodik zur qualitativen Abschätzung der Versorgungssicherheit von Wasserversorgungssystemen stützen. Bei der hydraulischen Simulation werden genau jene Gebiete ausgesucht, wo es einerseits ein Rehabilitationserfordernis aus technisch wirtschaftlicher Sicht gibt (PiReM) und andererseits eine Verletzlichkeit des Systems Einfluss auf die Rehabilitationsentscheidung haben kann. Durch die Kombination dieser beiden unterschiedlichen Zugänge zur Erneuerungsplanung lässt sich die Richtigkeit hinsichtlich Prioritätenreihung der einzelnen Rohrstränge nochmals verdeutlichen und absichern.

4 Untersuchungen: Rohrnetz Villach

4.1 Allgemeines

Die Untersuchungen werden einerseits mit PiReM durchgeführt und andererseits kommt Mike Urban zum Einsatz. Die Software PiReM erlaubt es anhand von technischen und wirtschaftlichen Kriterien vorrangig zu erneuernde Leitungsabschnitte festzulegen. Mit dem EDV-Programm Mike Urban können hydraulische Schwachstellen im Rohrnetz lokalisiert werden, um sie in weiterer Folge für die Rehabilitationsplanung zu verwenden. Ziel ist es, hydraulische Einflussgrößen aufzuzeigen, welche bei der Rehabilitationsentscheidung Berücksichtigung finden können.

Die Untersuchungen mit dem PiReM-Tool „Mittelfristige Rehabilitation“ haben das Wasserrohrnetz der Stadt Villach mit dem Aktualisierungsstand September 2008 als Datengrundlage.

Das in Mike Urban verwendete hydraulische Modell des Rohrnetzes von Villach stammt aus dem Jahr 2006 und bildet die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Das Rechennetz wurde vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz erstellt, um eine umfassende hydraulische Rohrnetzberechnung für das Wasserwerk Villach durchzuführen.

4.2 Auswahl der Untersuchungsgebiete

Das Wasserrohrnetz von Villach gliedert sich in 16 Teilnetze, respektive Druckzonen. Die Untersuchungen im Rahmen der Diplomarbeit erfordern jedoch eine weitere Unterteilung der vorhandenen Zonen in kleinere, übersichtlichere Gebiete.

Durch die Teilung ist aber sichergestellt, dass die neuentstandenen Bereiche für das Gesamtnetz repräsentativ sind. Die Kriterien für Repräsentativität sind eine entsprechende Materialverteilung und Altersstruktur der Rohrleitungen in den Untersuchungsgebieten. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse kann aufgrund dieser Vorgaben, sowie der Zugehörigkeit zur gleichen Druckzone (Kernzone) gewährleistet werden.

Daher werden für die weiteren Betrachtungen zwei Bereiche aus der Kernzone (Netze 1 bis 4) der Wasserversorgungsanlage von Villach herausgenommen:

- Untersuchungsgebiet 1: Netz 1 – Völkendorf (gelb hinterlegt)
- Untersuchungsgebiet 2: Netz 2 – Lind (violett hinterlegt)

Zur besseren Orientierung erfolgt eine Darstellung, dieser für weitere Betrachtungen vorgeschlagenen Untersuchungsgebiete, im Stadtplan von Villach.

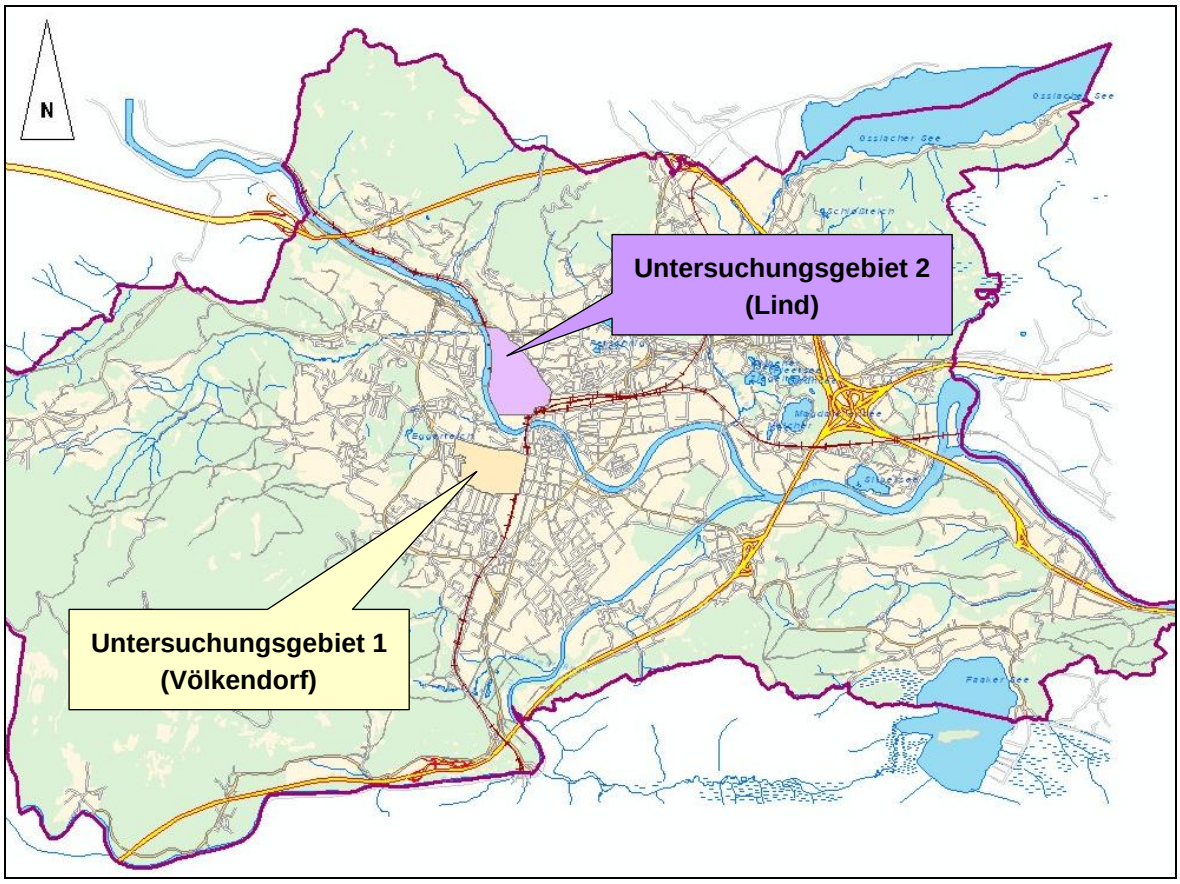


Abbildung 9: Stadtplan Villach - Übersicht der Untersuchungsgebiete

4.3 Auswertungen mit PiReM

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit der Software PiReM in der Version 2.3 BETA Auswertungen durchgeführt. Die Untersuchungen beschränken sich auf das PiReM-Tool „Mittelfristige Rehabilitation“.

Bei der Modellierung des langfristigen Rehabilitationsbedarfs werden die Größenordnungen für die je Leitungsgruppe erforderlichen jährlichen Erneuerungslängen abgeleitet. Das Modul zur mittelfristigen Rehabilitationsplanung ermöglicht es, aus den im Rahmen der langfristigen Betrachtung festgelegten jährlichen Erneuerungslängen, vorrangig zu rehabilitierenden Leitungsabschnitte zu definieren. Die Dringlichkeit einer Erneuerung ergibt sich im Wesentlichen aus der Anzahl von Erneuerungskriterien, die auf einen Abschnitt zutreffen. Den einzelnen Kriterien werden Bewertungspunkte unterschiedlicher Höhe zugeordnet. Je Leitungsstrang wird die Summe der Bewertungspunkte errechnet und eine Unterteilung in Prioritätenklassen durchgeführt.

Die Ausarbeitung spiegelt den derzeitigen Datenbestand des Rohrnetzes von Villach wider. In den folgenden Ausführungen werden nur jene Parameter in die Be-

wertung aufgenommen, die in der Datenbank „Villach“ vorliegen. Die Software PiReM ermöglicht es, wie in Abschnitt 2.6.3 beschrieben, weitere Bewertungskriterien in die Prioritätenfindung aufzunehmen sofern entsprechende Vorauswertungen/Informationen vorhanden sind. Dazu zählen unter anderem Untersuchungen zu Inkrustierungen in bestimmten Netzabschnitten, die wie im Folgenden beschrieben, aus der hydraulischen Modellierung abgeleitet werden können.

Parameter für die Bewertung der Leitungsstränge in Villach

Technische Kriterien:

- Rohralter
- Bruchgefährdung der Leitung
- (Inkrustierung)

Die runden Klammern () um ein Kriterium bedeuten, dass bei der ursprünglichen Auswertung das Kriterium nicht berücksichtigt werden konnte, infolge der aus der gegenständlichen Arbeit abgeleiteten Ergebnisse jedoch ermöglicht wird.

Wirtschaftliche Kriterien:

- Ungebräuchliche Nennweiten
- Rohrmaterial
- Ökonomischer Rehabilitationszeitpunkt

Ergebnisdarstellung

Eine farbliche Abstufung erlaubt eine Visualisierung von Abschnitten mit hoher Erneuerungspriorität und solche mit geringerem oder keinem Bedarf. Die Unterteilung hat die Punktebewertung von PiReM (Tool „mittelfristige Rehabilitation“) als Basis und bildet 4 Klassen:

Klasse 1: sofortiger Handlungsbedarf gegeben

Klasse 2: Erneuerung bei zusätzlichen Entscheidungskriterien vertretbar

Klasse 3: kurzfristig kein Handlungsbedarf, Entwicklung beobachten

Klasse 0: keine Erneuerung erforderlich

Klasse 2 und 3 deuten auf zukünftige Rehabilitationserfordernisse hin und sollen die Entwicklung der zu erwartenden Erneuerungserfordernisse abbilden. Vor allem bei Klasse 2 Leitungsabschnitten kann infolge Fremdbaumaßnahmen oder in Kombination mit genaueren Untersuchungen des betroffenen Abschnittes eine vorgezogene Rehabilitation gerechtfertigt werden.

Die der Klasse 1 zugewiesenen Leitungsabschnitte sind bei Wasserversorgungsunternehmen in die Jahresbaustellenplanung aufzunehmen. Um die mittelfristige Entwicklung des Erneuerungsbedarfs zu beobachten, sollte nach Abarbeitung der als Klasse 1 identifizierten Leitungen erneut eine Bewertung mit PiReM vorgenommen werden. Daraus ist wieder ein Maßnahmenplan abzuleiten, der sich mit der Eliminierung der Klasse-1-Leitungen beschäftigt.

Die für weitere Betrachtungen und tiefergehende Untersuchungen gewählten Netzteile sind im Detail in den folgenden Abbildungen dargestellt. Eine Legende gibt Aufschluss über die Lage von in der Vergangenheit aufgetretenen Rohrschäden sowie über die farbliche Bedeutung der Erneuerungsprioritäten. Es erfolgt eine grafische wie auch tabellarische Aufstellung von Rehabilitationsprioritäten in den ausgewählten Untersuchungsgebieten. Die Auswahl der Zonen richtet sich im Wesentlichen nach der Dringlichkeit der Erneuerung. D.h. eine Bewertung der Leitungsstränge als Klasse 1 ist Voraussetzung für weitere Betrachtungen. Sie dient in der vorliegenden Arbeit als Orientierungshilfe und zum Auffinden von Schwachstellen im Netz. Aus den Erneuerungsprioritäten werden repräsentative Leitungsabschnitte herausgesucht, die vorrangig erneuerungswürdige Rohrmaterialien wie Polyvinylchlorid (PVC), Grauguss (GG) und Stahl (ST) enthalten und für tiefergehende Untersuchungen geeignet sind.

4.3.1 Untersuchungsgebiet 1 - Völkendorf

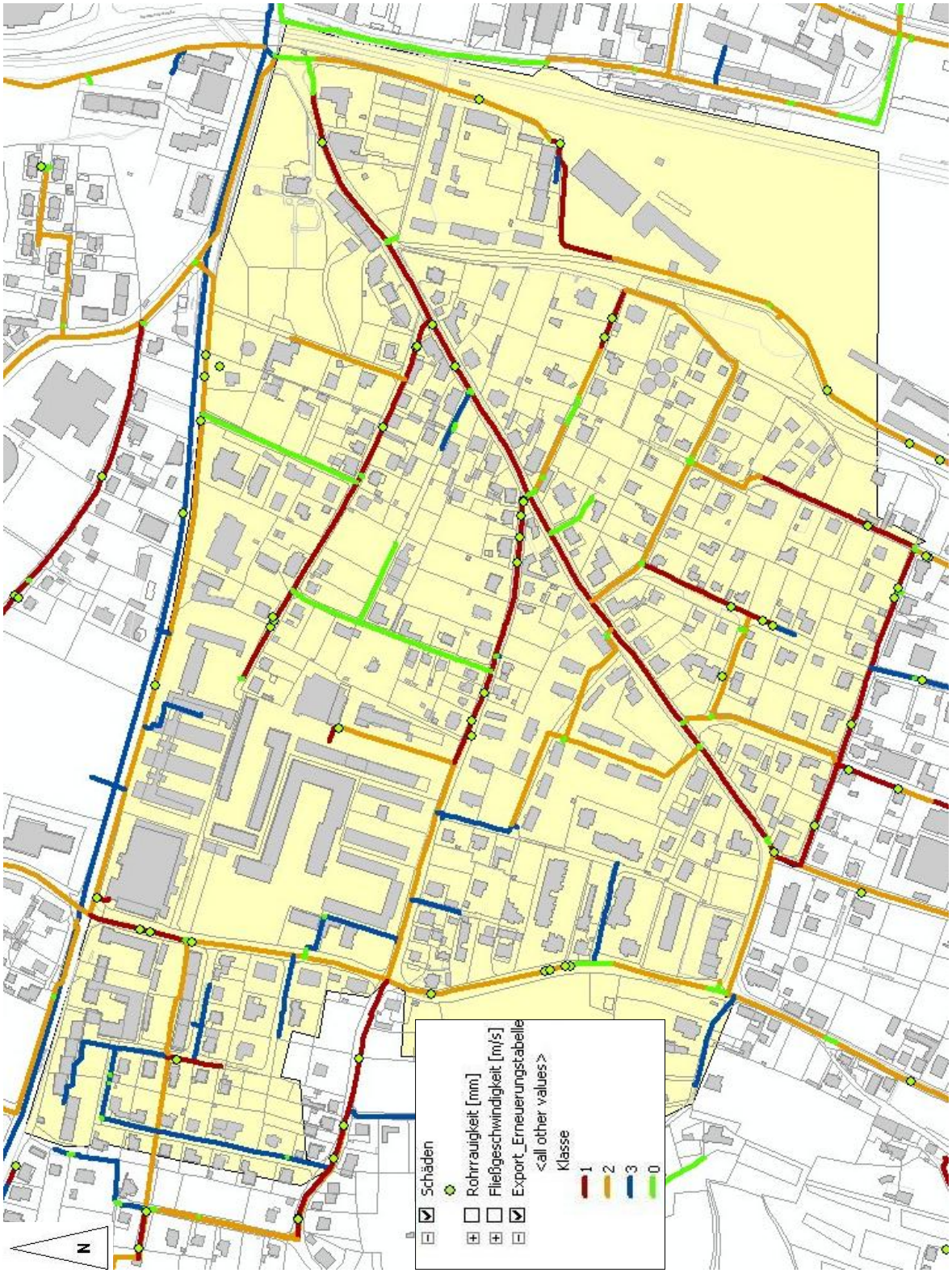


Abbildung 10: Untersuchungsgebiet 1 - Prioritäten und dokumentierte Schäden

Die oben dargestellte Grafik (*Abbildung 10*) weist die Klassen der Erneuerungsdringlichkeit im Untersuchungsgebiet 1 aus. Es kommen alle vier möglichen Prioritätsstufen vor. Schäden, die an den Rohrleitungen in der Vergangenheit aufgetreten sind, werden in Form von kleinen Kreisen sichtbar gemacht.

Die gesamte Rohrleitungslänge im Untersuchungsgebiet beläuft sich auf etwa 7,9 km. Die nachfolgende *Tabelle 4* gibt Aufschluss über die Verteilung des Rehabilitationsbedarfs im Teilbereich von Netz 1. Für jede Klasse der Zone wird in einem ersten Schritt die zugehörige Länge ermittelt.

Tabelle 4: Aufstellung der Prioritäten im Untersuchungsgebiet 1

Gebiet	Klasse	Länge [m]
Teilbereich Zone 1	1	2507
Teilbereich Zone 1	2	3383
Teilbereich Zone 1	3	1198
Teilbereich Zone 1	0	819

Es zeigt sich, dass etwa ein Drittel aller Leitungen der Kategorie 1 zugewiesen werden und somit ein sofortiger Handlungsbedarf besteht. Die Klasse 2 ist mit einer Länge von etwa 3,4 km die größte Gruppe. Sie deutet auf zukünftigen Erneuerungsbedarf hin. Die Klassen 0 und 3, welche geringen bis keinen Erneuerungsbedarf haben, repräsentieren zusammen nur circa ein Viertel des Teilnetzes in Völkendorf.

In einem zweiten Schritt werden die Leitungen mit der höchsten Erneuerungspriorität (Klasse 1) nach Leitungsgruppen sortiert. Das Ergebnis soll Auskunft darüber geben, welche Materialien, Durchmesser und Baujahre vorrangig einer Rehabilitation zu unterziehen sind.

Tabelle 5: Aufteilung der Klasse-1-Leitungen im Untersuchungsgebiet 1

Leitungsgruppe	Klasse	Länge [m]
AZ	1	0
GG < 125 bis 1925	1	450
GG < 125 nach 1925	1	0
GG >= 125	1	854
GGG	1	0
PE bis 1979	1	17
PE nach 1979	1	0
PVC < 150	1	0
PVC >= 150	1	160
ST < 100	1	592
ST >= 100	1	434
	Summe:	**2507**

Vor allem Stahlleitungen werden der Klasse 1 zugeordnet, da sie durchwegs ein hohes Rohralter haben und noch dazu sehr korrosionsanfällig sind.

Bei den Graugussleitungen sind in der erneuerungswürdigsten Kategorie Rohre kleineren Durchmessers früher Baujahre sowie Leitungen großen Durchmessers vorzufinden. Ein geringer Anteil entfällt noch auf die bruchanfälligen PVC-Leitungen in den Dimensionen größer gleich DN 150. Alle anderen Leitungsgruppen können in diesem Untersuchungsgebiet in Klasse 1 nicht angetroffen werden.

Vergleichsuntersuchung

In einer weiteren Untersuchung mit PiReM wurde auch die Information über die jeweilige Rauigkeit der einzelnen Leitungsstränge berücksichtigt. Dies erfolgt über das Kriterium Inkrustierung bei den technischen Parametern der Bewertung.

Tabelle 6: Prioritäten im Untersuchungsgebiet 1 mit Kriterium Inkrustierung

Gebiet	Klasse	Länge [m]
Teilbereich Zone 1	1	2491
Teilbereich Zone 1	2	1136
Teilbereich Zone 1	3	2590
Teilbereich Zone 1	0	1690

Durch die Verwendung eines zusätzlichen Bewertungskriteriums (Inkrustierung) kommt es zu einer Verschiebung Klassengrenzen. D.h. die erforderliche Punkteanzahl für die jeweilige Prioritätsklasse verändert sich dabei.

Es zeigt sich bei der Analyse, dass es bei den erneuerungsbedürftigsten Abschnitten (Klasse 1) zu nahezu keinen Veränderungen kommt. Eine Zunahme erfahren jedoch Klassen mit geringerem bis keinem Erneuerungsbedarf. Das deutet auf generell geringe Inkrustierungen im Untersuchungsgebiet, respektive niedrige Rauigkeiten der Leitungen hin.

4.3.2 Untersuchungsgebiet 2 - Lind

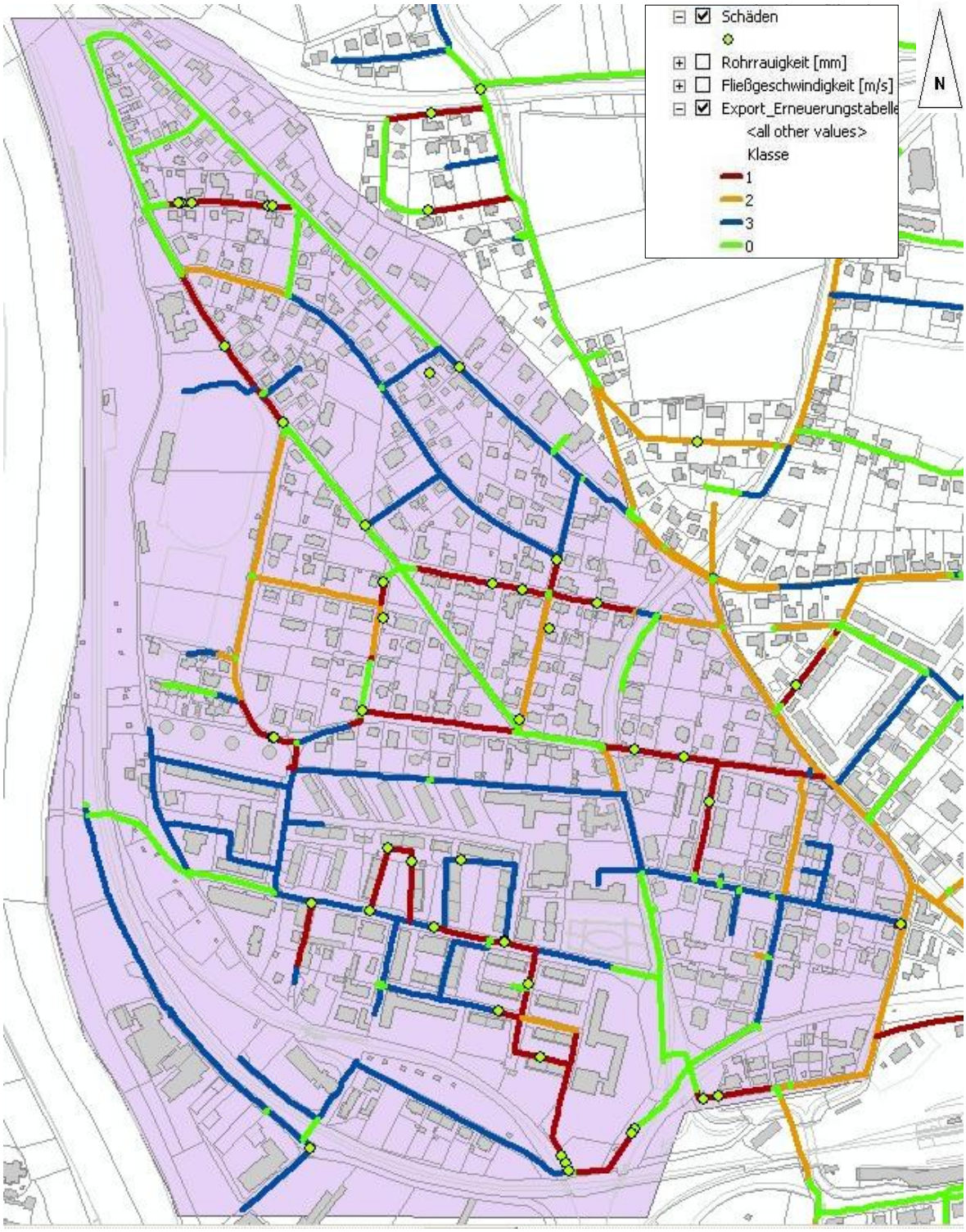


Abbildung 11: Untersuchungsgebiet 2 - Prioritäten und dokumentierte Schäden

Die in *Abbildung 11* dargestellte Grafik weist die Klassen der Erneuerungsdringlichkeit in Villach-Lind (Untersuchungsgebiet 2) aus. Es kommen alle vier möglichen Prioritätsstufen vor. Schäden, die an den Rohrleitungen in der Vergangenheit aufgetreten sind, werden in Form von kleinen Kreisen sichtbar gemacht.

Die gesamte Rohrleitungslänge im Untersuchungsgebiet beläuft sich auf etwa 11,5 km. Die nachfolgende *Tabelle 7* gibt Aufschluss über die Verteilung des Rehabilitationsbedarfs im Teilbereich von Netz 2. Für jede Klasse der Zone wird in einem ersten Schritt die zugehörige Länge ermittelt.

Tabelle 7: Aufstellung der Prioritäten im Untersuchungsgebiet 2

Gebiet	Klasse	Länge [m]
Teilbereich Zone 2	1	2193
Teilbereich Zone 2	2	1899
Teilbereich Zone 2	3	4671
Teilbereich Zone 2	0	2698

Es zeigt sich, dass etwa ein Fünftel aller Leitungen der Kategorie 1 zugewiesen werden und für diese ein sofortiger Handlungsbedarf besteht. Die Klasse 2 ist mit einer Länge von etwa 1,9 km die kleinste Gruppe und zeigt den Erneuerungsbedarf in naher Zukunft auf. Die Klassen 0 und 3, welche geringen bis keinen Erneuerungsbedarf haben, machen zusammen fast zwei Drittel des Teilnetzes in Lind aus und deuten auf einen passablen Zustand des Rohrnetzes in technisch wirtschaftlicher Sicht (PiReM) hin.

In einem zweiten Schritt werden die Leitungen mit der höchsten Erneuerungspriorität (Klasse 1) nach Leitungsgruppen sortiert. Das Ergebnis soll Auskunft darüber geben, welche Materialien, Durchmesser und Baujahre vorrangig einer Rehabilitation zu unterziehen sind.

Tabelle 8: Aufteilung der Klasse-1-Leitungen im Untersuchungsgebiet 2

Leitungsgruppe	Klasse	Länge [m]
AZ	1	0
GG < 125 bis 1925	1	227
GG < 125 nach 1925	1	724
GG >= 125	1	0
GGG	1	1
PE bis 1979	1	0
PE nach 1979	1	0
PVC < 150	1	0
PVC >= 150	1	237
ST < 100	1	648
ST >= 100	1	356
	Summe:	**2193**

Auch im Untersuchungsgebiet 2 machen vor allem Stahlleitungen die Klasse 1 aus. Sie haben durchwegs ein hohes Rohralter und sind noch dazu sehr korrosionsanfällig. Ihr Anteil am Teilnetz beträgt nahezu 50%.

Bei den Graugussleitungen sind in der erneuerungswürdigsten Kategorie Rohre kleineren Durchmessers früher wie auch jüngerer Baujahre vorzufinden. Ein etwas geringer Anteil entfällt noch auf die bruchanfälligen PVC-Leitungen in den Dimensionen größer gleich DN 150. Alle anderen Leitungsgruppen können in diesem Untersuchungsgebiet in Klasse 1 nicht angetroffen werden.

Vergleichsuntersuchung

In einer weiteren Untersuchung mit PiReM wurde auch die Information über die jeweilige Rauigkeit der einzelnen Leitungsstränge berücksichtigt. Dies erfolgt über das Kriterium Inkrustierung bei den technischen Parametern der Bewertung.

Tabelle 9: Prioritäten im Untersuchungsgebiet 2 mit Kriterium Inkrustierung

Gebiet	Klasse	Länge [m]
Teilbereich Zone 2	1	2088
Teilbereich Zone 2	2	278
Teilbereich Zone 2	3	1914
Teilbereich Zone 2	0	7181

Durch die Verwendung eines zusätzlichen Bewertungskriteriums (Inkrustierung) kommt es zu einer Verschiebung Klassengrenzen. D.h. die erforderliche Punkteanzahl für die jeweilige Prioritätsklasse verändert sich dabei.

Es zeigt sich bei der Analyse, dass es auch im Untersuchungsgebiet 2 bei den erneuerungsbedürftigsten Abschnitten (Klasse 1) zu nahezu keinen Veränderungen kommt. Eine Zunahme erfahren jedoch Klassen mit geringerem bis keinem Erneuerungsbedarf. Das deutet auf generell geringe Inkrustierungen im untersuchten Bereich, respektive niedrige Rauheitswerte der Leitungen hin.

4.4 Berechnungen mit Mike Urban

4.4.1 Allgemeines

Im vorangegangenen Kapitel wurden Leitungsabschnitte für die Rehabilitation aufgezeigt, deren Einteilung in Klassen unterschiedlicher Erneuerungsdringlichkeit auf technischen und wirtschaftlichen Kriterien basiert. Um eine noch belastbarere Aussage hinsichtlich Erfordernis der Rehabilitation eines Leitungsabschnittes zu

erhalten und die Ergebnisse aus PiReM abzusichern, sind weitere Untersuchungen anzustellen. Dazu erfolgen Berechnungen und Auswertungen im hydraulischen Modell des Rohrnetzes von Villach mit der Software Mike Urban. Es werden die mit PiReM bereits bewerteten Untersuchungsgebiete auf hydraulisch bedingte Schwachstellen hin analysiert. Ziel dabei ist es, Ergebnisse zu bekommen, die hydraulische Einflussgrößen aufzeigen, welche bei der Rehabilitationsentscheidung Berücksichtigung finden können.

Der Untersuchungsumfang der ausgewählten Netzabschnitte beschränkt sich in der vorliegenden Arbeit auf folgende Bereiche:

- Rohrrauigkeiten aus der Kalibrierung des hydraulischen Modells
- Fließgeschwindigkeiten in den Rohrleitungen - Stagnationszonen
- Druckverteilung im Untersuchungsabschnitt - Druckschwankungen
- Simulation eines Rohrbruchs an einer Leitung
- Feuerlöschanalyse im Untersuchungsgebiet 2

4.4.2 Maßgebende Lastfälle für die Untersuchungen

Tage mit mittlerem Verbrauch

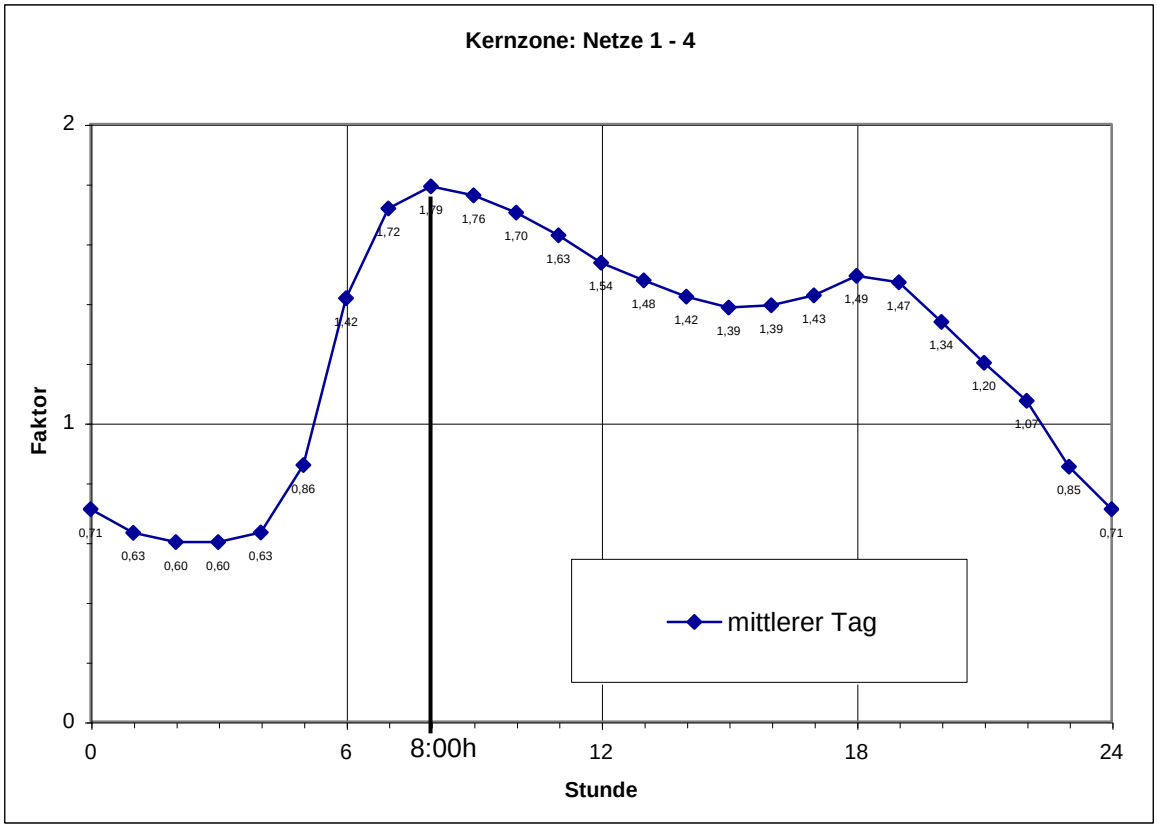


Abbildung 12: Verbrauchsganglinie der Kernzone an Tagen mittleren Verbrauchs

Zur Lokalisierung von Abschnitten mit geringer Fließgeschwindigkeit (Stagnationszonen) ist der hydraulischen Modellierung die verbrauchsreiche Stunde eines mittleren Tages zu Grunde zu legen. Die Grafik (*Abbildung 12*) zeigt die relative Verbrauchsganglinie der Kernzone für Tage mittleren Verbrauchs.

Aus dem Verlauf der Verbrauchsganglinie kann 8:00h als die für die Betrachtungen maßgebende Uhrzeit ermittelt werden. Das heißt für die Berechnung, dass an durchschnittlichen Tagen der größte Verbrauch in den Rohrleitungen um 8:00h auftritt und somit zeitgleich mit der höchsten Fließgeschwindigkeit im Netz zu rechnen ist.

In weiterer Folge wird angenommen, dass im Fall eines Rohrbruchs maximal der Verbrauch eines mittleren Tages auftreten wird. Daher kann bei der Rohrbruchsimulation(es handelt sich um eine Extremsituation im Netzbetrieb) vom Ansatz des verbrauchsreichen Tages abgesehen werden und die Ganglinie an Tagen mittleren Verbrauchs den Berechnungen hinterlegt werden.

Verbrauchsreiche Tage

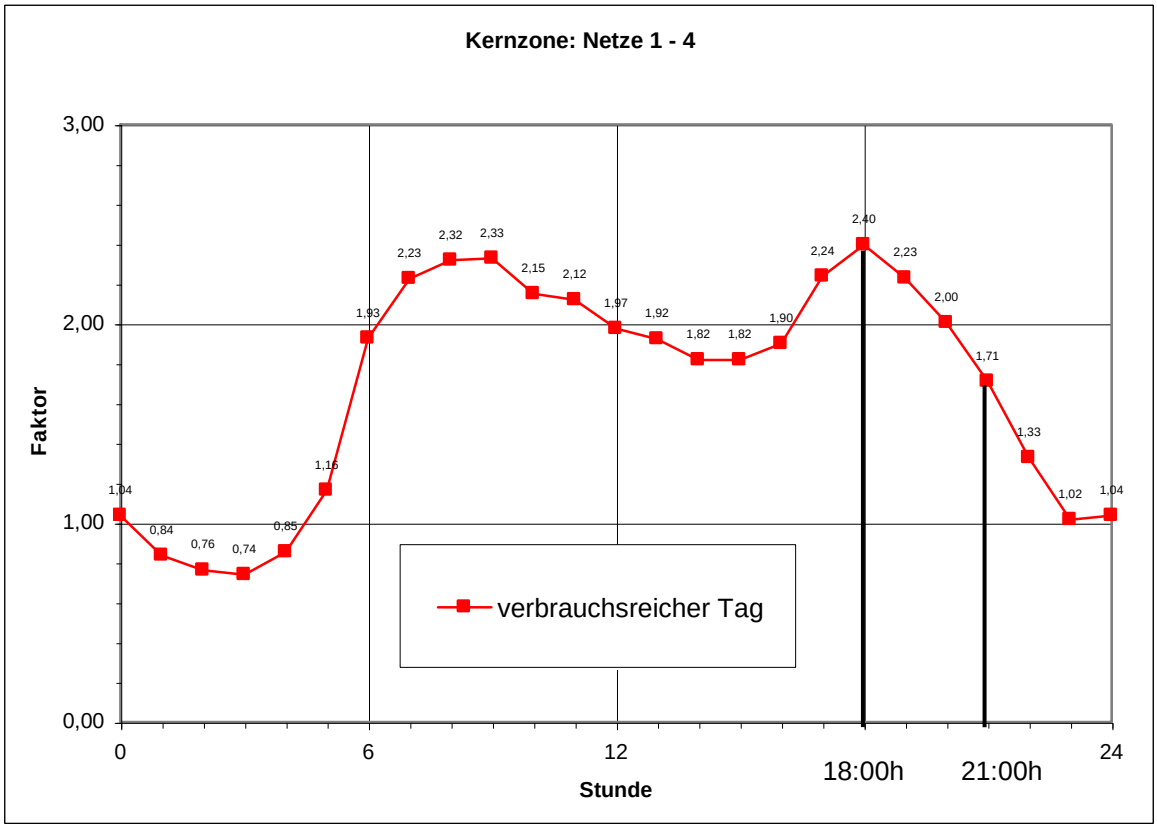


Abbildung 13: Verbrauchsganglinie der Kernzone an verbrauchsreichen Tagen

Zur Ermittlung der maßgebenden Druckverhältnisse in den Untersuchungsgebieten ist der verbrauchsreiche Tag heranzuziehen. Die hydraulische Simulation gibt

einerseits darüber Auskunft, ob die Trinkwasserversorgung der Abnehmer mit ausreichendem Druck (Einhaltung der minimalen Druckhöhe) erfolgt und andererseits welchen Druckschwankungen die Rohrleitung unterliegt.

Die *Abbildung 13* zeigt die relative Verbrauchsganglinie der Kernzone (Netze 1 bis 4) für verbrauchsreiche Tage.

Der minimale Druck im Rohrnetz tritt demzufolge zum Zeitpunkt der Verbrauchsspitze (18:00h) auf. Der Minimaldruck in der verbrauchsreichen Stunde gibt Auskunft über die Versorgungsqualität der Abnehmer. Aus der Höhe der Druckschwankung kann bei weitergehenden Untersuchungen der schädigende Einfluss auf bruchanfällige Rohrleitungen abgeleitet werden.

Für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Hydranten ist die mittlere Stunde an verbrauchsreichen Tagen heranzuziehen. Als Betrachtungszeitpunkt für die Feuerlöschanalyse ist demnach für beide Untersuchungsgebiete 21:00h zu wählen.

4.4.3 Rohrrauigkeiten

Untersuchungsgebiet 1- Völkendorf

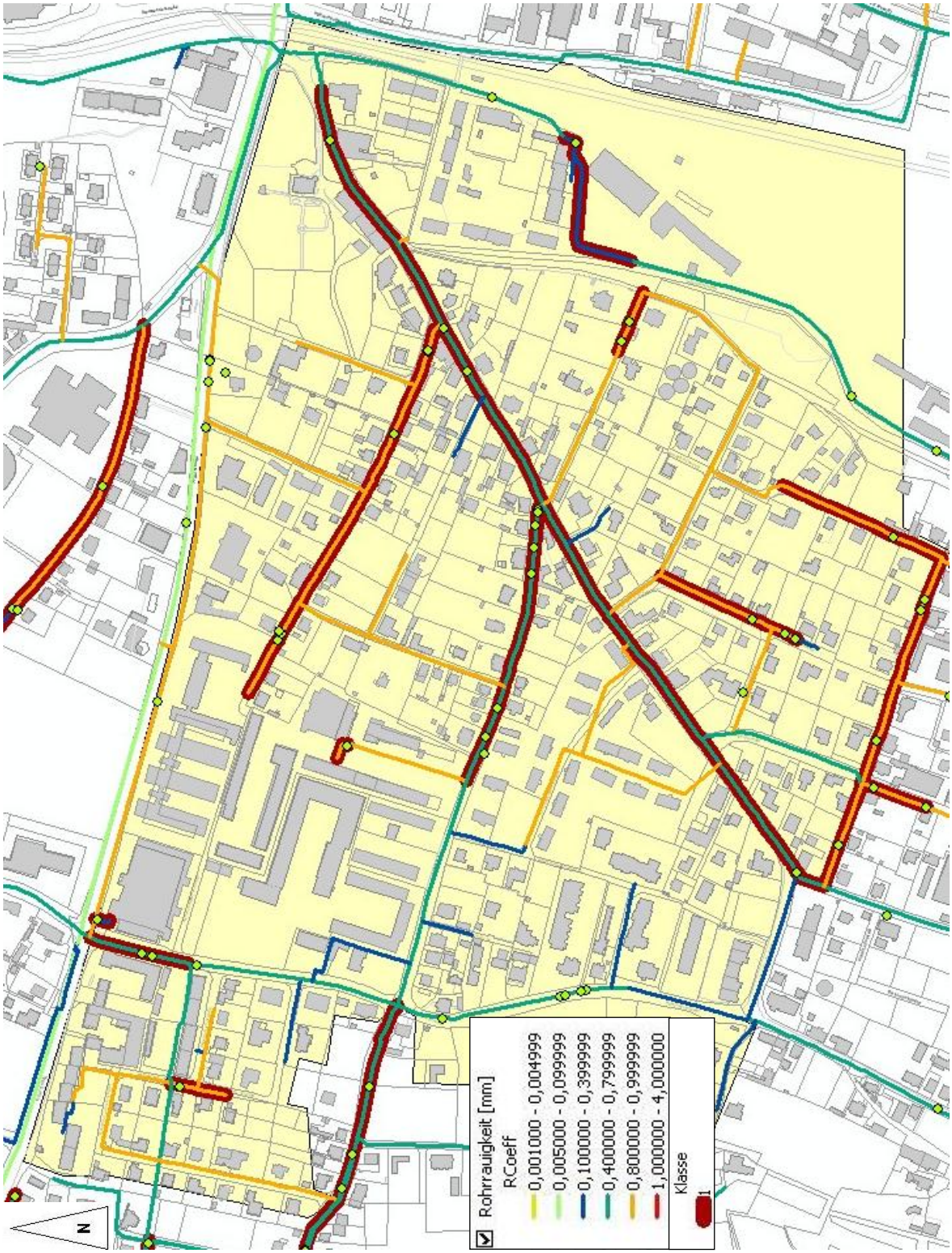


Abbildung 14: Untersuchungsgebiet 1 - Verteilung der Rohrrauigkeiten

In *Abbildung 14* sind für das Untersuchungsgebiet 1 die aus der Kalibrierung des hydraulischen Modells bekannten Rohrrauigkeiten dargestellt. Zusätzlich sind jene Leitungsabschnitte dunkelrot hinterlegt, die aus PiReM eine Klasse-1-Bewertung haben. Eine Legende mit verschiedenfarbig dargestellten Leitungsabschnitten gibt Aufschluss über die Größe der Rohrrauigkeiten im Untersuchungsgebiet.

Im Untersuchungsgebiet Völkendorf kommen Rauigkeiten im Bereich von 0,1 mm bis 0,8 mm vor. Der Hälfte aller Leitungsabschnitte wurde eine Rohrrauigkeit von 0,8 mm zugewiesen. Lediglich neuere Rohrleitungen und Kunststoffleitungen haben geringere Werte der betrieblichen Rauigkeit.

Tabelle 10: Aufteilung der Rohrrauigkeiten im Untersuchungsgebiet 1

Gebiet	Rauigkeit [mm]	Länge [m]
Teilbereich Zone 1	0,1	1145
Teilbereich Zone 1	0,6	2852
Teilbereich Zone 1	0,8	3938

Aufgrund der Tatsache, dass die größte vorkommende Rohrrauigkeit 0,8 mm ist und am ehesten zu einer Veränderung der Prioritäten beitragen kann, wird eine Aufstellung für die Verteilung der Prioritätenklassen nur für diesen Wert durchgeführt. Gemäß ÖNORM EN 805 (2000) kann die Betriebsrauigkeit von Versorgungsleitungen in einem Bereich von 0,4 mm bis 1,0 mm schwanken. Aus diesem Zusammenhang heraus lässt sich demnach keine Forderung nach einer Verschiebung der Priorität ableiten, da alle Rohrleitungen geringere Rauigkeiten aufweisen.

Tabelle 11: Rohrrauigkeit 0,8 mm nach Prioritätsklassen im Untersuchungsgebiet 1

Rauigkeit [mm]	Klasse	Länge [m]
0,8	1	1150
	2	1754
	3	480
	0	554

Die erhöhte Rauigkeit ist vor allem bei den Prioritätsklassen 1 und 2 zu erkennen. Das passt sehr gut mit der Erneuerungsdringlichkeit der Leitungsabschnitte zusammen. Bei den Klassen mit geringem bis keinem Erneuerungsbedarf kommt eine erhöhte Rauigkeit seltener vor.

Untersuchungsgebiet 2- Lind

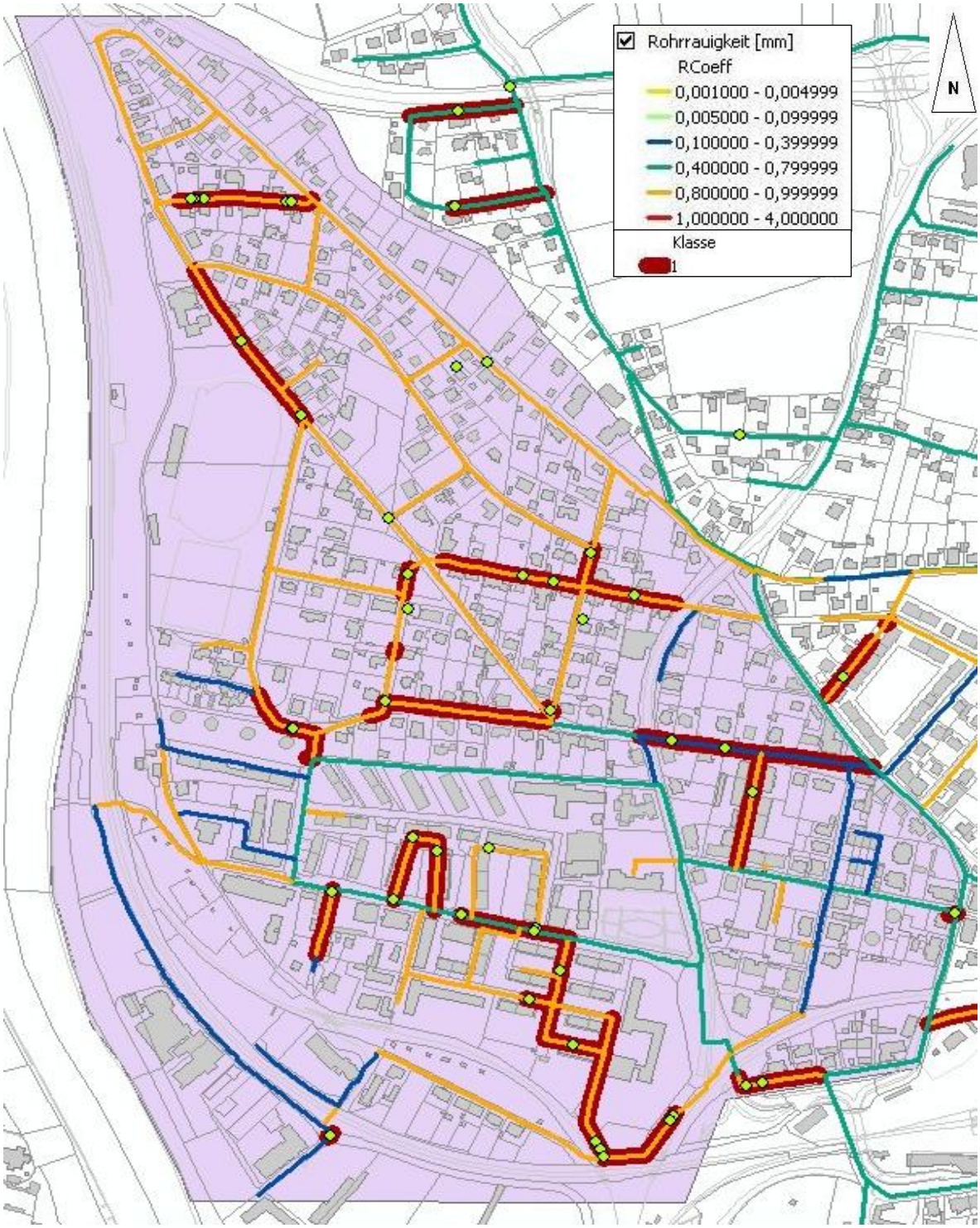


Abbildung 15: Untersuchungsgebiet 2 - Verteilung der Rohrrauigkeiten

In *Abbildung 15* sind für das Untersuchungsgebiet 2 die aus der Kalibrierung des hydraulischen Modells bekannten Rohrrauigkeiten dargestellt. Zusätzlich sind jene Leitungsabschnitte dunkelrot hinterlegt, die aus PiReM eine Klasse-1-Bewertung haben. Eine Legende mit verschiedenfarbig dargestellten Leitungsabschnitten gibt Aufschluss über die Größe der Rohrrauigkeiten im Untersuchungsgebiet. Im Un-

tersuchungsgebiet Lind kommen Rauigkeiten im Bereich von 0,1 mm bis 0,8 mm vor. Nahezu zwei Drittel aller Leitungsabschnitte wurde eine Rohrrauigkeit von 0,8 mm zugewiesen. Lediglich neuere Rohrleitungen und Kunststoffleitungen haben geringere Werte der betrieblichen Rauigkeit.

Tabelle 12: Aufteilung der Rohrrauigkeiten im Untersuchungsgebiet 2

Gebiet	Rauigkeit [mm]	Länge [m]
Teilbereich Zone 2	0,1	1939
Teilbereich Zone 2	0,6	2385
Teilbereich Zone 2	0,8	7089

Aufgrund der Tatsache, dass die größte vorkommende Rohrrauigkeit 0,8 mm ist und am ehesten zu einer Veränderung der Prioritäten beitragen kann, wird eine Aufstellung für die Verteilung der Prioritätenklassen nur für diesen Wert durchgeführt. Gemäß ÖNORM EN 805 (2000) kann die Betriebsrauigkeit von Versorgungsleitungen in einem Bereich von 0,4 mm bis 1,0 mm schwanken. Aus diesem Zusammenhang heraus lässt sich demnach keine Forderung nach einer Verschiebung der Priorität ableiten, da alle Rohrleitungen geringere Rauigkeiten aufweisen.

Tabelle 13: Rohrrauigkeit 0,8 mm nach Prioritätsklassen im Untersuchungsgebiet 2

Rauigkeit [mm]	Klasse	Länge [m]
0,8	1	1699
	2	983
	3	2194
	0	2213

Die erhöhte Rauigkeit zieht sich ziemlich gleichmäßig über fast alle Prioritätsklassen hinweg. Eine Ausnahme bildet Klasse 2. Hier ist ein geringerer Anteil an Leitungen mit einer Rohrrauigkeit von 0,8 mm zu erkennen.

4.4.4 Fließgeschwindigkeiten

Untersuchungsgebiet 1- Völkendorf

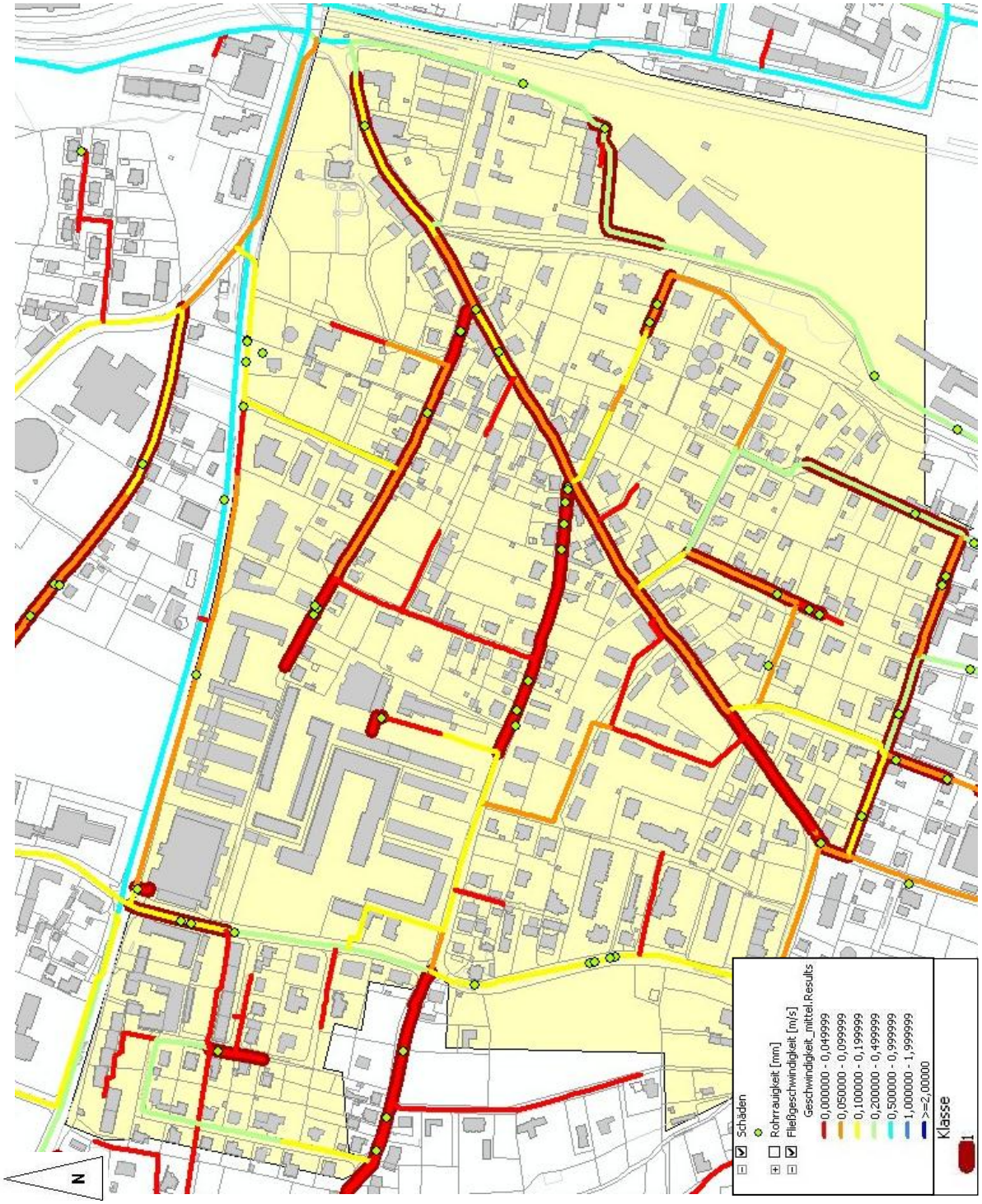


Abbildung 16: Untersuchungsgebiet 1 - Verteilung der Fließgeschwindigkeiten

In *Abbildung 16* sind für das Untersuchungsgebiet 1 die mittels der hydraulischen Simulation berechneten Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Zusätzlich sind jene Leitungsabschnitte dunkelrot hinterlegt, die aus PiReM eine Klasse-1-Bewertung haben. Die in der Abbildung eingefügte Legende, gibt über eine farbliche Abstu-

fung Aufschluss über die Höhe der Fließgeschwindigkeiten in den Leitungsabschnitten.

Tabelle 14: Fließgeschwindigkeit < 0,05 m/s im Untersuchungsgebiet 1

Fließgeschwindigkeit [m/s]	Klasse	Länge [m]
< 0,05	1	667
	2	665
	3	556
	0	402

Niedrige Fließgeschwindigkeiten sind im betrachteten Rohrnetzabschnitt gleichmäßig über alle Prioritätsklassen verteilt. Daraus resultieren Stagnationszonen bzw. stagnierendes Wasser im gesamten Untersuchungsgebiet. Grund dafür sind generell groß dimensionierte Rohrleitungsquerschnitte.

Untersuchungsgebiet 2- Lind

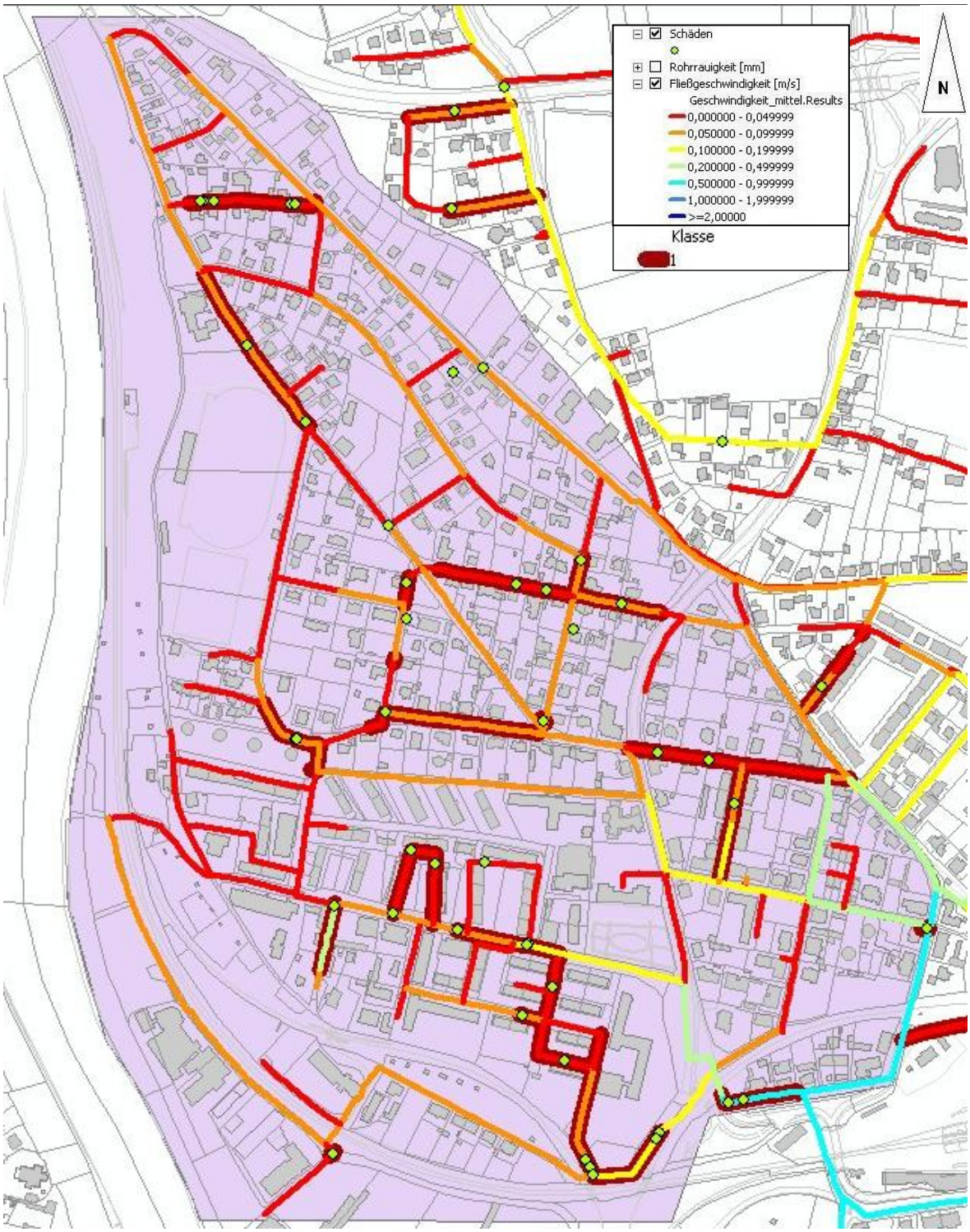


Abbildung 17: Untersuchungsgebiet 2 - Verteilung der Fließgeschwindigkeiten

In *Abbildung 17* sind für das Untersuchungsgebiet 2 die mittels der hydraulischen Simulation berechneten Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Zusätzlich sind jene Leitungsabschnitte dunkelrot hinterlegt, die aus PiReM eine Klasse-1-Bewertung haben.

Die in der Abbildung eingefügte Legende, gibt über eine farbliche Abstufung Aufschluss über die Höhe der Fließgeschwindigkeiten in den Leitungsabschnitten.

Tabelle 15: Fließgeschwindigkeit < 0,05 m/s im Untersuchungsgebiet 2

Fließgeschwindigkeit [m/s]	Klasse	Länge [m]
< 0,05	1	956
	2	708
	3	2043
	0	1183

Niedrige Fließgeschwindigkeiten sind im betrachteten Rohrnetzabschnitt vor allem bei den Prioritätsklassen 0 und 3 anzutreffen. Daraus resultieren Stagnationszonen bzw. stagnierendes Wasser in diesen Leitungen. Generell sind die Leitungsquerschnitte groß dimensioniert, da von geringen Fließgeschwindigkeiten etwa die Hälfte des untersuchten Teilnetzes betroffen ist.

4.4.5 Druckverhältnisse

Untersuchungsgebiet 1- Völkendorf

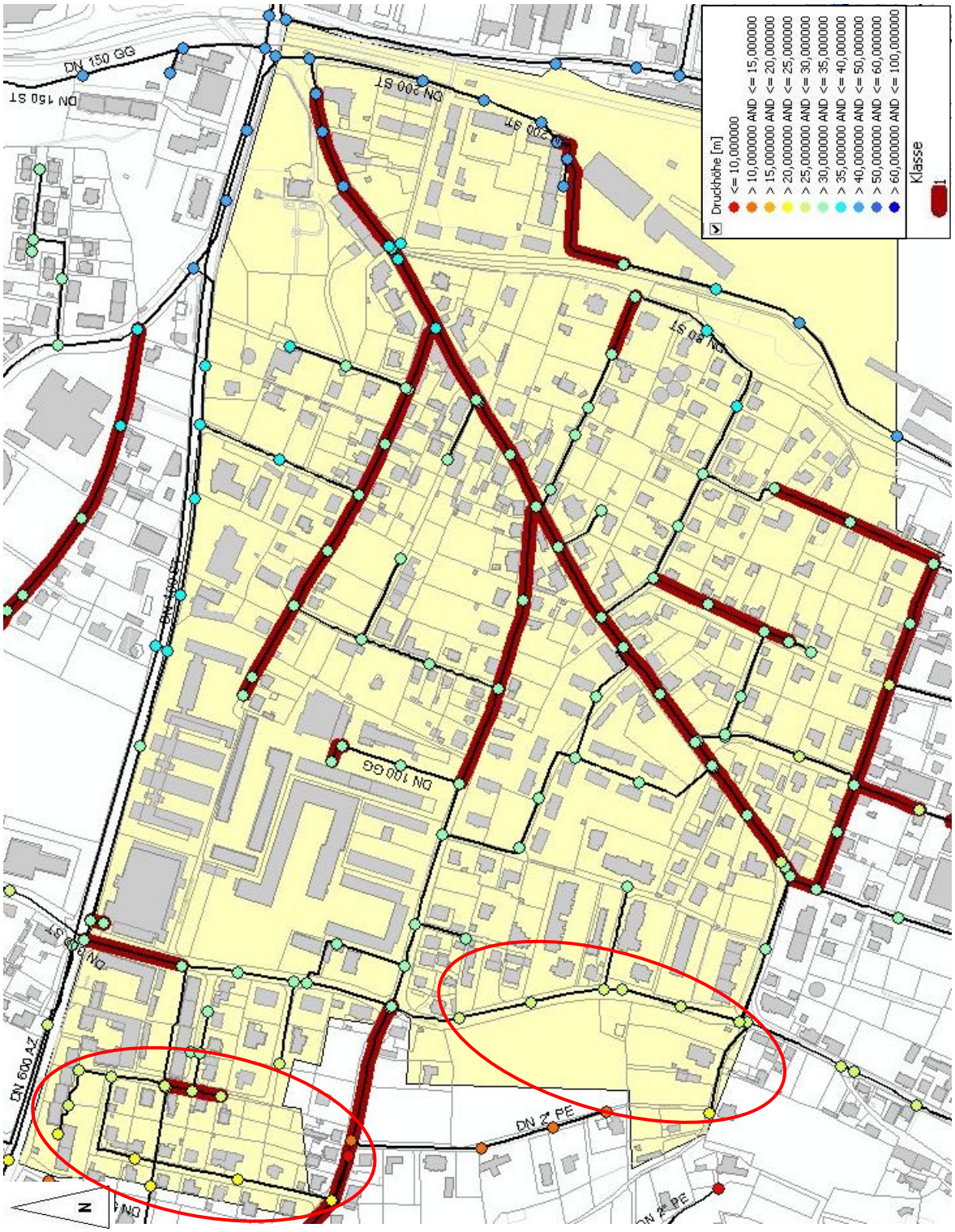


Abbildung 18: Untersuchungsgebiet 1 - Druckverteilung um 18:00h

Abbildung 18 zeigt die Druckverteilung im Untersuchungsgebiet 1 am verbrauchsreichen Tag des Jahres zum Zeitpunkt der Verbrauchsspitze (18:00h). Nur punktuell kommt es zur Unterschreitung der Mindestbetriebsdruckhöhe (30 m) im be-

trachteten Versorgungsbereich. Die zwei roten Ellipsen zeigen jene Bereiche auf, wo keine optimale Versorgung gewährleistet werden kann. Der Verursacher für die Druckprobleme ist nicht wie vermutet eine zu geringe Dimension der Rohrleitungen, sondern begründet sich mit der Höhenlage des versorgten Gebietes.

Weiteres sind jene Leitungsabschnitte dunkelrot hinterlegt, die aus PiReM eine Klasse-1-Bewertung haben. Eine Legende gibt mittels farbiger Darstellung der Knotenpunkte Aufschluss über die Druckhöhe in den jeweiligen Leitungssträngen.

Untersuchungsgebiet 2- Lind

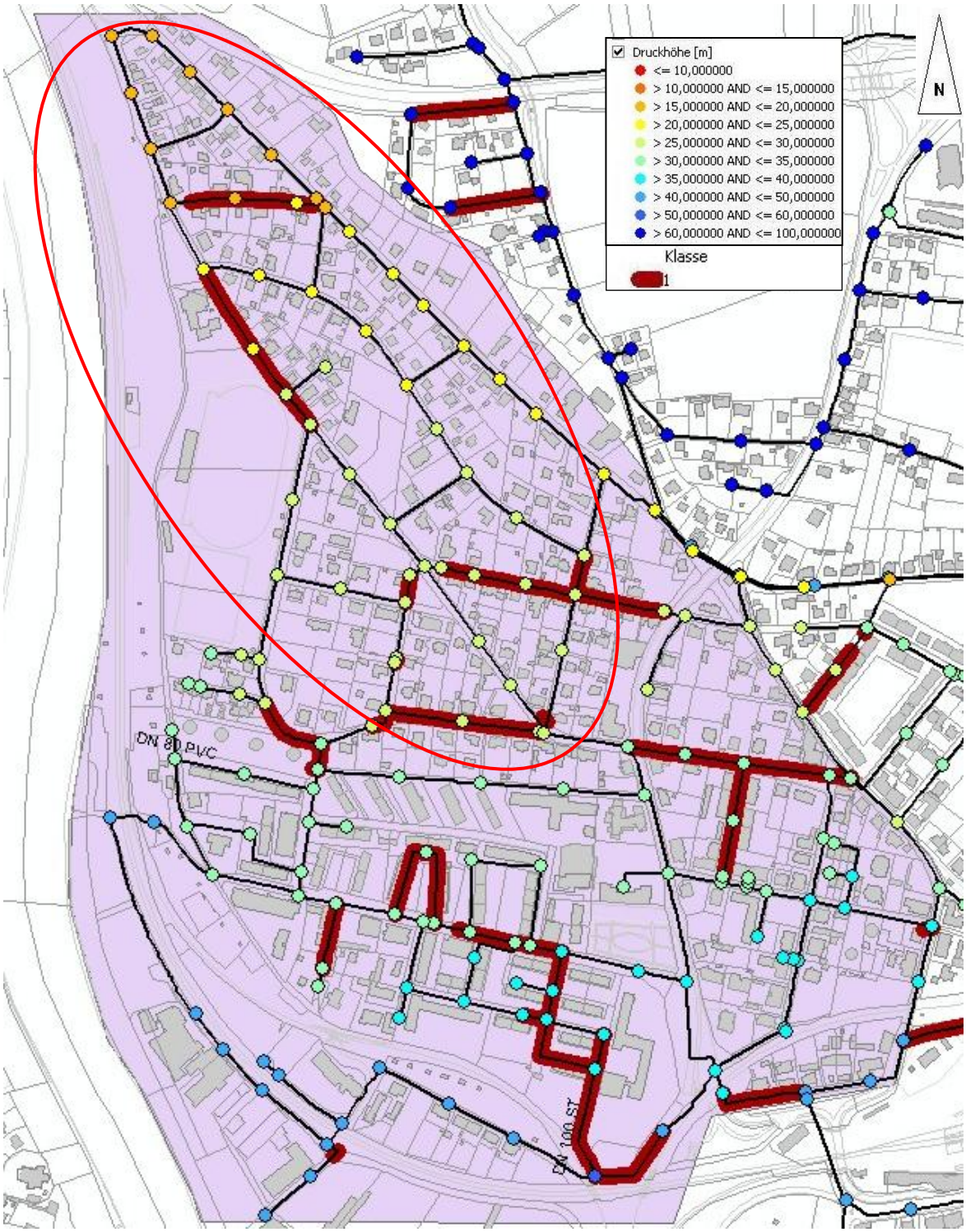


Abbildung 19: Untersuchungsgebiet 2 - Druckverteilung um 18:00h

Die *Abbildung 19* zeigt die Druckverteilung im Untersuchungsgebiet 2 am verbrauchsreichen Tag des Jahres zum Zeitpunkt der Verbrauchsspitze (18:00h). Es kommt großflächig zur Unterschreitung der Mindestbetriebsdruckhöhe (30 m) im betrachteten Versorgungsbereich. Die rote Ellipse zeigt jenen Bereich auf, wo kei-

ne optimale Versorgung mehr gewährleistet werden kann. Die derzeitige hydraulische Situation lässt zwei Verursacher für die Druckprobleme aufscheinen. Einerseits kann die zu geringe Dimension der Zuleitungen in den nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes genannt werden und andererseits bewirkt die geodätische Höhenlage des angesprochen Bereichs eine Unterschreitung des Mindestbetriebsdruckes.

Weiters sind jene Leitungsabschnitte dunkelrot hinterlegt, die aus PiReM eine Klasse-1-Bewertung haben. Eine Legende gibt mittels farbiger Darstellung der Knotenpunkte Aufschluss über die Druckhöhe in den jeweiligen Leitungssträngen.

4.4.6 Rohrbruchsimulation

Allgemeine Annahmen für die Simulation

Die Rohrbruchsimulation soll Aufschluss über die Versorgungssicherheit der Abnehmer geben. Für die beiden Situationen Rohrbruch mit Wasseraustritt sowie Rohrbruch mit geschlossenen Schiebern wird die Anzahl der betroffenen Abnehmer ermittelt. Dabei wird angenommen, dass die betroffenen Abnehmer durch die Wasserzähler aus der hydraulischen Simulation (Mike Urban) repräsentiert werden. Die Anzahl nicht optimal versorgter Kunden stellt bei diesen Betrachtungen das Schadensausmaß dar. Die Versorgungsqualität wird über die Einhaltung der Mindestbetriebsdruckhöhe (30m) definiert.

Situation 1 – Wasseraustritt

Bei den folgenden Simulationen werden Wasseraustrittsmengen angesetzt, die in der Vergangenheit bei realen Rohrbrüchen aufgetreten sind. Die Werte stammen aus dem Prozessleitsystem des Wasserwerkes Villach und sind um die Erfahrungswerte der Wassermeister ergänzt.

Grundsätzlich können dem Verhalten nach Kunststoffleitungen (PVC) und metallische Leitungen (Stahl und Grauguss) unterschieden werden.

Den Berechnungen wird der Tag mittleren Verbrauchs zu Grunde gelegt. Aus dem Zusammenhang heraus, dass alle Untersuchungsgebiete in der Kernzone liegen, wird einheitlich die verbrauchsreichste Stunde des Tages (8:00h) als Untersuchungszeitpunkt festgelegt. Somit ergibt sich die ungünstigste Situation für das Auftreten eines Rohrgebrechens zu eben dieser Uhrzeit.

Bei PVC-Leitungen ist im Allgemeinen eine größere Wasseraustrittsmenge zu erwarten, da es zumeist zu einem Versagen kommt, bei dem das Rohr der Länge nach „aufreißt“. Die nachfolgende *Abbildung 20* zeigt für die Dimension DN 200 PVC eine mögliche Wasseraustrittsmenge an, welche auch im Untersuchungsge-

biet 2 - Lind im Fall eines Bruches auftreten könnte. Die Randbedingungen, wie ähnlicher Durchmesser und Druckverhältnisse im Betrachtungsabschnitt, die eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zulassen, sind gewahrt.

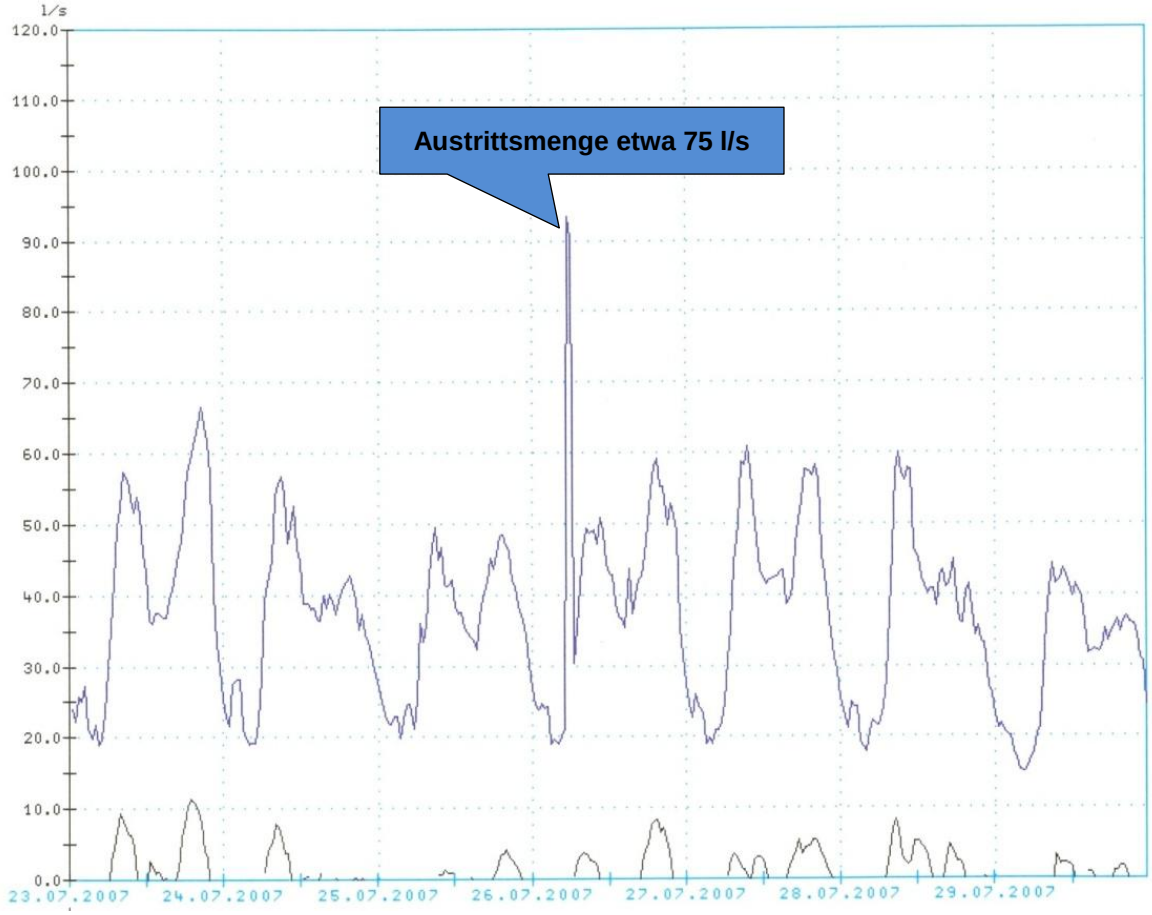


Abbildung 20: Wasseraustritt an einer Leitung DN 200 PVC

Die Detektierbarkeit von Rohrbrüchen an Rohrleitungen aus Stahl und Grauguss kleineren Durchmessers mittels Messungen über das Prozessleitsystem stellt eine gewisse Schwierigkeit dar. Der Grund dafür sind die vergleichsweise geringen Wasseraustrittsmengen in solchen Fällen. Daher ist es notwendig, für die Ermittlung von sinnvollen Ansätzen von Wassermengen, in kleineren, hydraulisch abgrenzbaren Zonen („kleinere Netze“ im Versorgungsgebiet) nach repräsentativen Werten zu suchen.

Die geringen Austrittsmengen von wenigen Litern pro Sekunde begründen sich mit den Versagensursachen der Materialien Grauguss und Stahl. Bei beiden Rohrmaterialien kommt es zu Wasserverlusten infolge Undichtigkeiten bei Muffen. Bei Stahl kann Lochkorrosion Wasseraustritte hervorrufen. Bei GG-Leitungen treten unter anderem Rundbrüche auf, die ebenso nur geringe Austrittsmengen zur Folge haben.

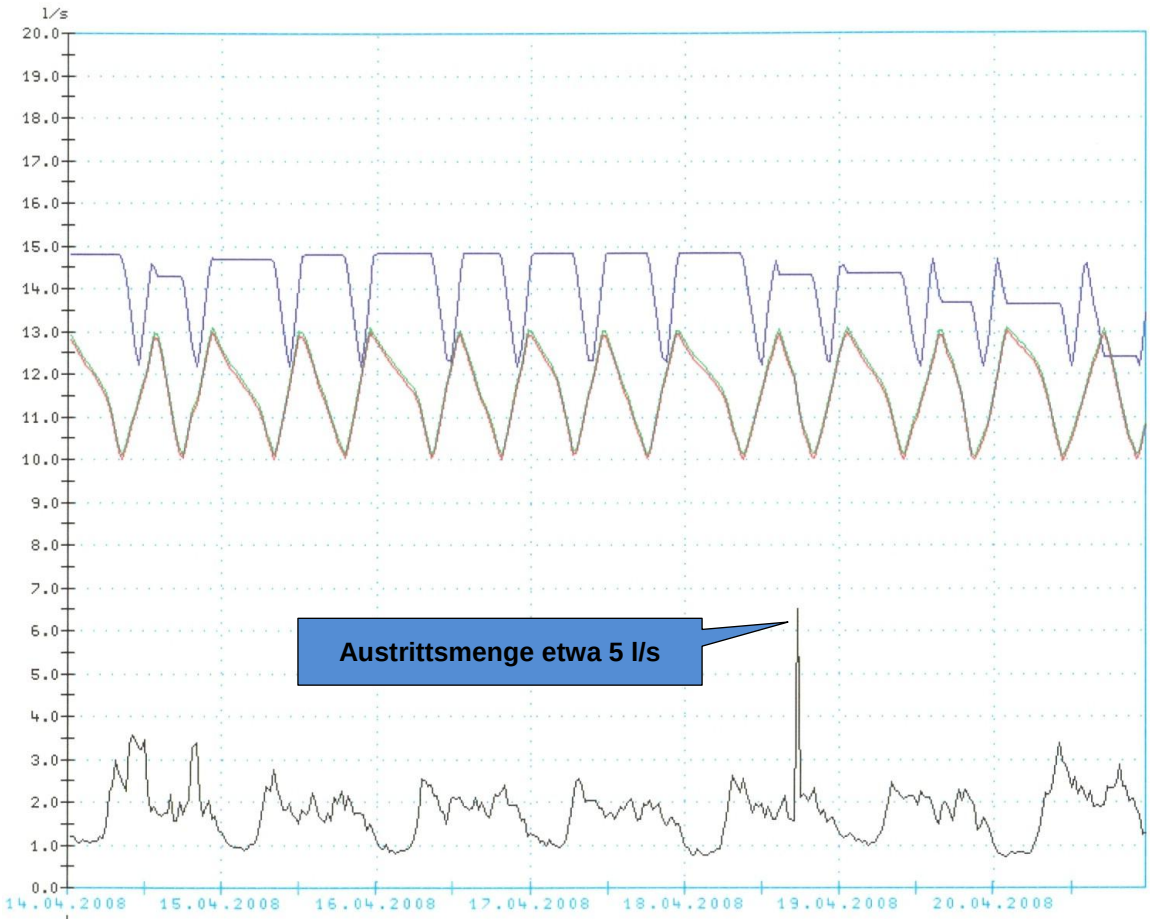


Abbildung 21: Wasseraustritt an einer Leitung DN 100 GG

Die langjährige Erfahrung der Wassermeister des Wasserwerks Villach und Auswertungen des Prozessleitsystems zeigen für Rohrleitungen aus Stahl und Grauguss bei einem mittleren Druckniveau, dass ein Wasseraustritt von etwa 5 l/s ein durchaus plausibler Ansatz ist. Die *Abbildung 21* soll die Erkenntnisse hinsichtlich der Wasseraustrittsmenge bei einer Graugussleitung nochmals verdeutlichen.

Die vorhin genannten Mengen sind auch bei Stahlleitungen anzuwenden, jedoch kann kein Nachweis dafür erbracht werden. Der Grund besteht darin, dass Leitungen aus Stahl vorwiegend in der Kernzone (Netze 1 bis 4) verlegt worden sind und es sich in diesen Fällen um größere hydraulische Einheiten handelt, bei denen ein zusätzlicher Wasserverbrauch von 3 bis 5 l/s nicht mehr explizit feststellbar ist.

Daher ist von den internen Erfahrungswerten auszugehen, wonach für Leitungen bis zu DN 200 ST ein maximaler Wert von 5 l/s als Wasseraustritt angesetzt werden kann.

Situation 2 – Schieber geschlossen

Im Fall von entdeckten Leitungsgebrechen kommt es umgehend zur Reparatur der Schadstelle. Um die Instandsetzungsarbeiten durchführen zu können, ist es erforderlich, den betroffenen Leitungsabschnitt mittels Schließen von Schiebern vorü-

bergehend außer Betrieb zu nehmen. In diesem Fall gelangt das Trinkwasser über „Umwege“ durch das vermaschte Netz zu den Abnehmern, sodass es im Umkreis des Rohrbruches zu keinem totalen Ausfall der Versorgung kommt, sondern meist nur eine Verminderung der Versorgungsqualität (Druckverhältnisse) eintritt.

Ermittlung des Schadensausmaßes

Die grafischen Darstellungen zu den Untersuchungen mit Mike Urban in den Untersuchungsgebieten finden sich im Anhang. Hier sollen nur die Ergebnisse der Rohrbruchsimulation zusammengefasst werden.

In jedem Teilbereich wurden Berechnungen für die Situation 1 und die Situation 2 durchgeführt. Als Leitungsmaterialien sind einmal PVC (Untersuchungsgebiet 2) und im zweiten Fall Stahl (Untersuchungsgebiet 1) herangezogen worden. Aus der Gegenüberstellung der betroffenen Abnehmer zu der Anzahl der gesamten Kunden im Untersuchungsgebiet kann schon das Schadensausmaß abgeleitet werden.

Tabelle 16: Vom Rohrbruch betroffene Abnehmer - Schadensausmaß

Bereich - Ursache	Abnehmer	betroffene Abnehmer	Ausmaß
Untersuchungsgebiet 1 - Wasseraustritt	311	19	6%
Untersuchungsgebiet 1 - Leitungssperre	311	28	9%
Untersuchungsgebiet 2 - Wasseraustritt	386	298	77%
Untersuchungsgebiet 2 - Leitungssperre	386	298	77%

Folgende Annahmen für die Eintrittswahrscheinlichkeit (optimistische Ausfallrate der jeweiligen Leitungsgruppe aus PiReM) eines Gebrechens sollen für die Demonstrationsbeispiele gelten:

Leitung DN 200 ST: Eintrittswahrscheinlichkeit = 0,04

Schadensaumaß = 0,09

Leitung DN 150 PVC: Eintrittswahrscheinlichkeit = 0,03

Schadensaumaß = 0,77

⇨ $Risiko_{Stahl}$= 0,004 $Risiko_{PVC}$= 0,023

Obwohl in beiden Fällen ein stark vermaschtes Netz vorliegt, sind die Auswirkungen eines Rohrbruches bei PVC-Rohrleitungen von größerer Bedeutung als bei metallischen Rohren. Diese Beobachtung hat sowohl für den Fall Rohrbruch mit Wasseraustritt als auch für den Fall, dass der Leitungsabschnitt während den Reparaturarbeiten gesperrt werden muss, Gültigkeit.

4.4.7 Maßnahmendefinition

Die Maßnahmendefinition bildet den letzen Schritt bei der Rehabilitationsplanung gemäß ÖVGW W 100 (2007). Sie setzt die Erkenntnisse aus den durchgeführten Untersuchungen in konkrete Baumaßnahmen im Rohrnetz um. Die Ergebnisse können direkt in den Jahresbaustellenplan aufgenommen werden.

Fließgeschwindigkeiten

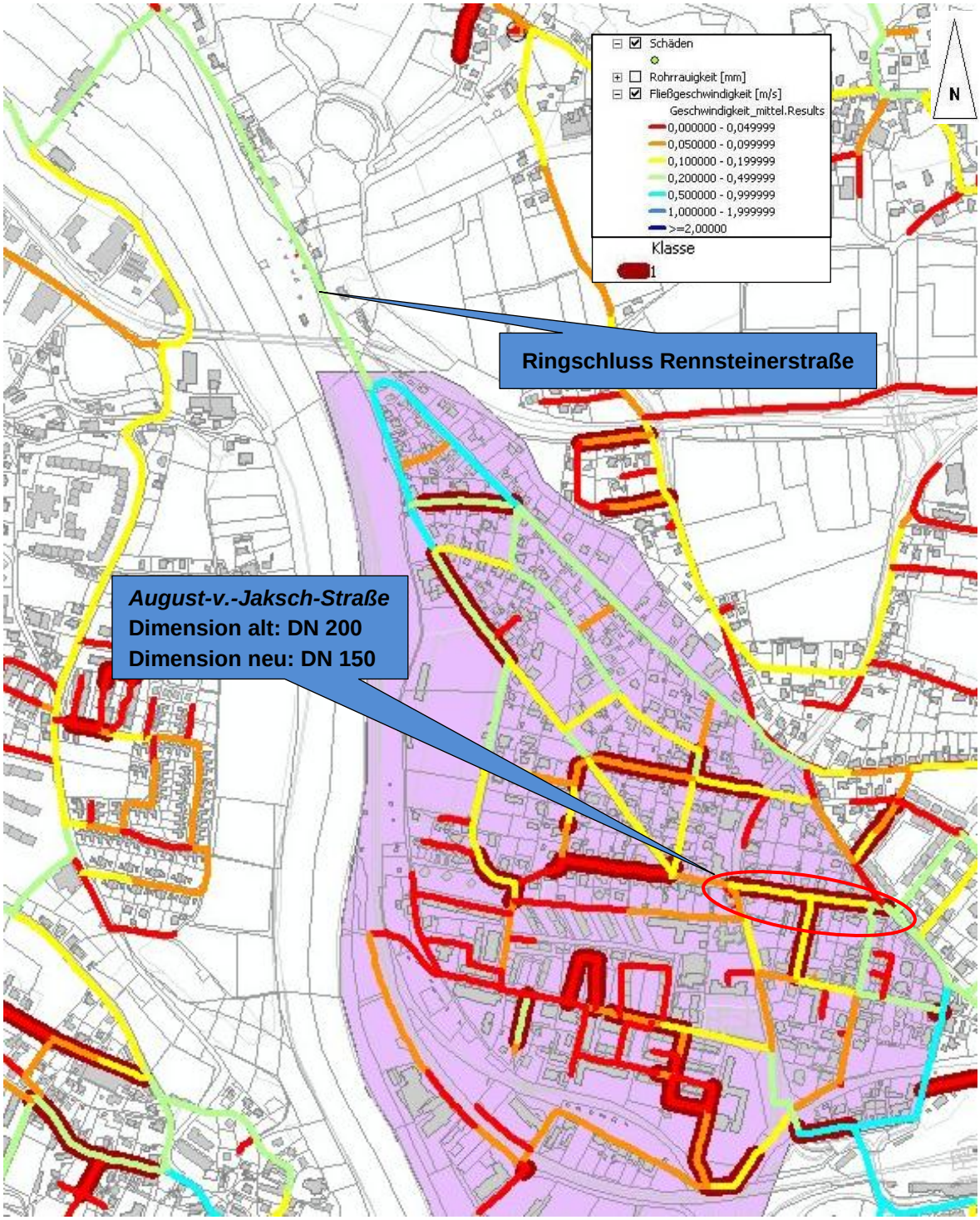


Abbildung 22: Verteilung der Fließgeschwindigkeiten nach Umsetzung der Maßnahmen

Im Folgenden wird im Untersuchungsgebiet 2 beispielhaft die Vorgangsweise für die Planung einer solchen Rehabilitationsmaßnahme unter der Einbeziehung der hydraulischen Modellierung aufgezeigt.

Die Erneuerung der PVC-Leitung in der August-v.-Jaksch-Straße ist das Rehabilitationserfordernis in diesem Beispiel. Es ergibt sich aus PiReM für die Leitung (DN 200 PVC) eine Klasse-1-Priorität mit 13 Bewertungspunkten. Einerseits liegt eine erhöhte Gefährdung für einen Leitungsbruch (PVC in der Dimension 200 mm gehört zu den kritischen Leitungsgruppen im Netz) vor und andererseits ist das Material PVC als Schwachstelle einzustufen. Der ökonomische Rehabilitationszeitpunkt ist ebenfalls schon erreicht. Für das Rohralter gibt es keine Bewertungspunkte, da als Verlegejahr 1968 aufscheint.

Aus der hydraulischen Berechnung und der Visulisierung der Fließgeschwindigkeit (*Abbildung 17*) ist zu erkennen, dass in der betrachteten Leitung eine Stagnationszone vorliegt. Daher kann bei der Erneuerung dieses Abschnitts eine Reduktion des Durchmessers vorgenommen werden. Einher geht eine Reduktion der Kosten für die Rehabilitationsmaßnahme.

Die Durchmesserverringerung alleine reicht jedoch nicht aus, um den gewünschten Erfolg hinsichtlich der Anhebung der Fließgeschwindigkeit im Erneuerungsabschnitt zu erreichen. Deswegen wird zusätzlich der großräumige Ringschluss zur Rennsteinerstraße, wie er schon im Endbericht der hydraulische Rohrnetzberechnung Wasserwerk Villach vorgeschlagen wird, bei der Berechnung berücksichtigt. Der Ringschluss (DN 150, Länge ca. 450m) im Nordwesten des Rohrnetzes von Lind führt zu einer Verbesserung der Strömungsverhältnisse im gesamten Untersuchungsgebiet. Nicht zuletzt wird auch die Fließgeschwindigkeit im untersuchten Abschnitt der August-v.-Jaksch-Straße an Tagen mittleren Verbrauchs auf etwa 0,18 m/s angehoben.

Druckverhältnisse

Die Verringerung des Rohrleitungsquerschnitts in der August-v.-Jaksch-Straße sowie der Ringschluss in der Rennsteinerstraße bedingen eine Veränderung des derzeitigen hydraulischen Systems. Neben dem positiven Effekt, dass die Fließgeschwindigkeit in großen Teilen des Untersuchungsgebietes angehoben wird, kommt es auch zur Stabilisierung der Druckverhältnisse. Vor allem an verbrauchsreichen Tagen gab es im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes (Rennsteinerstraße und Adalbert-Stifterstraße) lokal einen Abfall des Versorgungsdruckes unter 2 bar.

Der Ringschluss bewirkt eine Anhebung der Druckhöhe im angesprochenen Bereich (markiert durch die rote Ellipse in *Abbildung 23*) von etwa 10 m, sodass an

verbrauchsreichen Tagen ein Versorgungsdruck von etwa 2,5 bar gewährleistet werden kann. Eine weitere Erhöhung des Druckniveaus kann aufgrund der im Vergleich ungünstigen Höhe des versorgten Gebietes zur Höhenlage des druckgebenden Hochbehälters nicht erreicht werden.

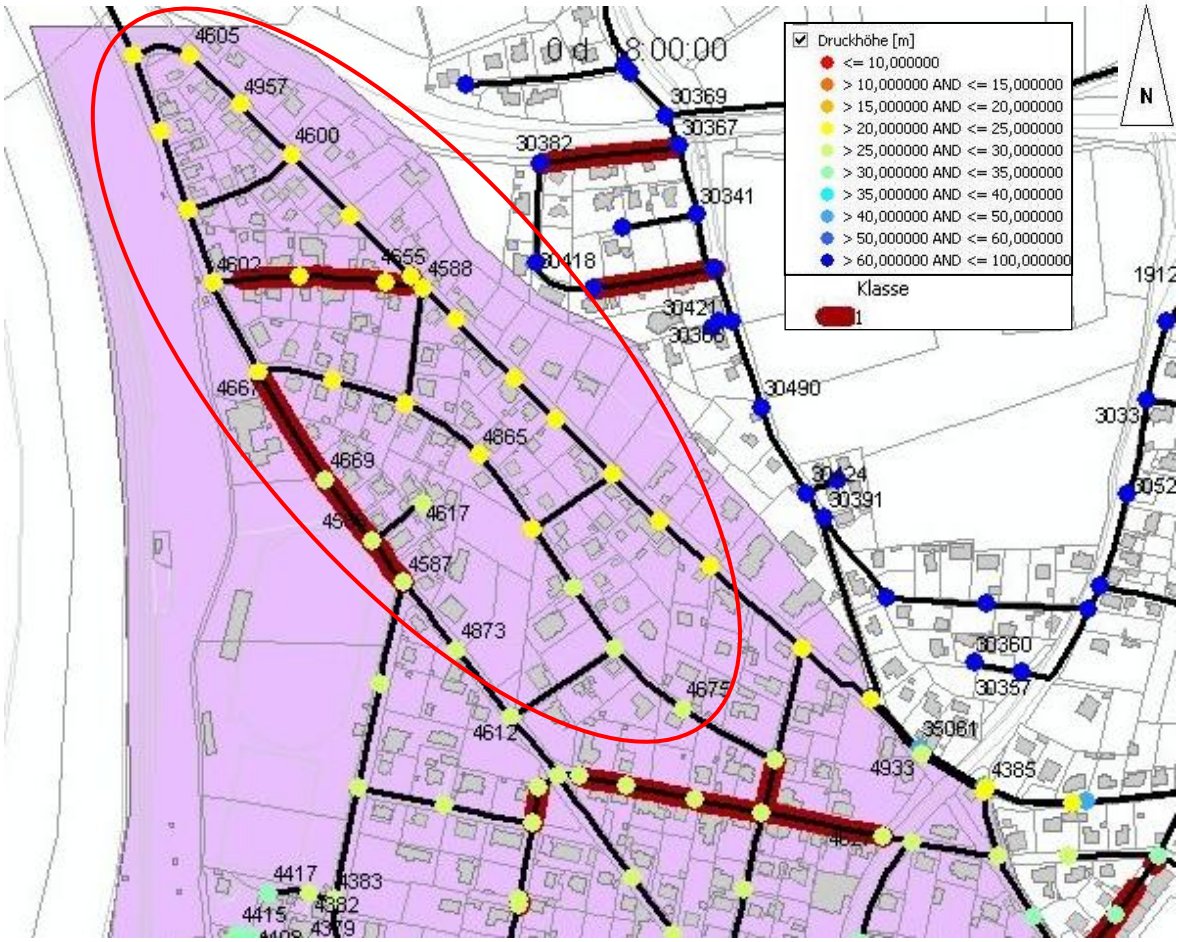


Abbildung 23: Verteilung der Druckhöhe nach Umsetzung der Maßnahmen

In den abgebildeten Bereichen außerhalb des Untersuchungsgebiets, wo Druckhöhen über 60 m aufscheinen, gibt es keinen Zusammenhang mit den gesetzten Rehabilitationsmaßnahmen. Die etwas höheren Drücke hat es schon vorher gegeben und die Abnehmer haben lokal Druckreduzierventile installiert.

Feuerlöschanalyse

Für die Ermittlung der theoretisch möglichen Hydrantenleistungsfähigkeit sind folgende Annahmen getroffen worden:

- Entnahmedruck: 1,5 bar
- Durchschnittliche Länge der Hydrantenleitung: 6 m
- Nennweite der Leitung zum Hydranten: DN 80

- Betriebliche Rauigkeit der Hydrantenleitung: 1 mm
- Lokaler Verlust im Hydranten: Zeta = 6
- Netzbelastung: mittlere Stunde eines verbrauchsreichen Tages (21:00h)

Im Allgemeinen werden die geforderten Entnahmemengen (ÖVGW W 77, 2000) an den Hydranten im Netz 2 (Villach - Lind) erreicht.

Tabelle 17: Geforderte Hydrantenleistung gemäß ÖVGW W 77 (2000)

Bebauungsart	Gesamtmenge		Lieferdauer	Gesamtbedarf	Maximale Entfernung der Entnahmestellen (Hydrant oder sonstige) zum Objekt			
					bis 60 m	bis 100 m	bis 250 m	bis 500 m
	l/min	l/s	Std.	m³	l/min	l/min	l/min	l/min
a	800	13,3	1	50		800		
b	1600	26,7	2	200		800	800	
c	2400	40,0	2	300		800	800	800
d	3200	53,3	3	600	800		1200	1200
e	3200	53,3	3	600	800		1200	1200

Bebauungsart:

a..... **Streusiedlungen** (offene Bauweise), ebenerdige Bebauung (1 Geschoß), Einzelobjekt bis maximal 150 m² bebauter Fläche

b..... **Ortsgebiete** mit offener oder geschlossener Bauweise mit höchstens drei Geschoßen, landwirtschaftliche sowie gewerbliche Objekte ohne besondere Gefährdung

c..... **Ortsgebiete** mit offener Bebauung mit mehr als drei Geschoßen, geschlossene Bebauung im Wohngebiet; gemischt genutzte Gebäude ohne besondere Gefährdung

d..... **Betriebsgebiete** ohne besondere Gefährdung, Handels- und Gewerbebetriebe etc.

e..... **Altstadtgebiete**

Gemäß *Tabelle 17* gilt:

Bei Bebauungsart *a* sind aus dem maximal 100 m entfernten Hydranten 800 l/min (=13,3 l/s) zu entnehmen.

Bei Bebauungsart *b* sind aus dem maximal 100 m entfernten Hydranten ebenfalls 800 l/min und aus einem weiteren Hydranten, der bis zu 250 m weit entfernt sein kann, weitere 800 l/min zu entnehmen.

Bei Bebauungsart *c* ist, um den Gesamtbedarf sicher zu stellen, noch eine dritte Entnahme – ebenfalls 800 l/min – aus einem bis 500 m entfernten Hydranten anzunehmen.

Lediglich im Nordwesten des Untersuchungsgebietes werden die geforderten Werte mit der derzeitigen Netzsituation an vier Hydranten nicht erreicht. Genau diesen Hydranten gilt die Aufmerksamkeit der Untersuchung. In *Abbildung 24* sind die

Leistungsfähigkeiten jener Hydranten dargestellt, die bis dato keine ausreichende Lieferung von Löschwasser gewährleisten konnten.

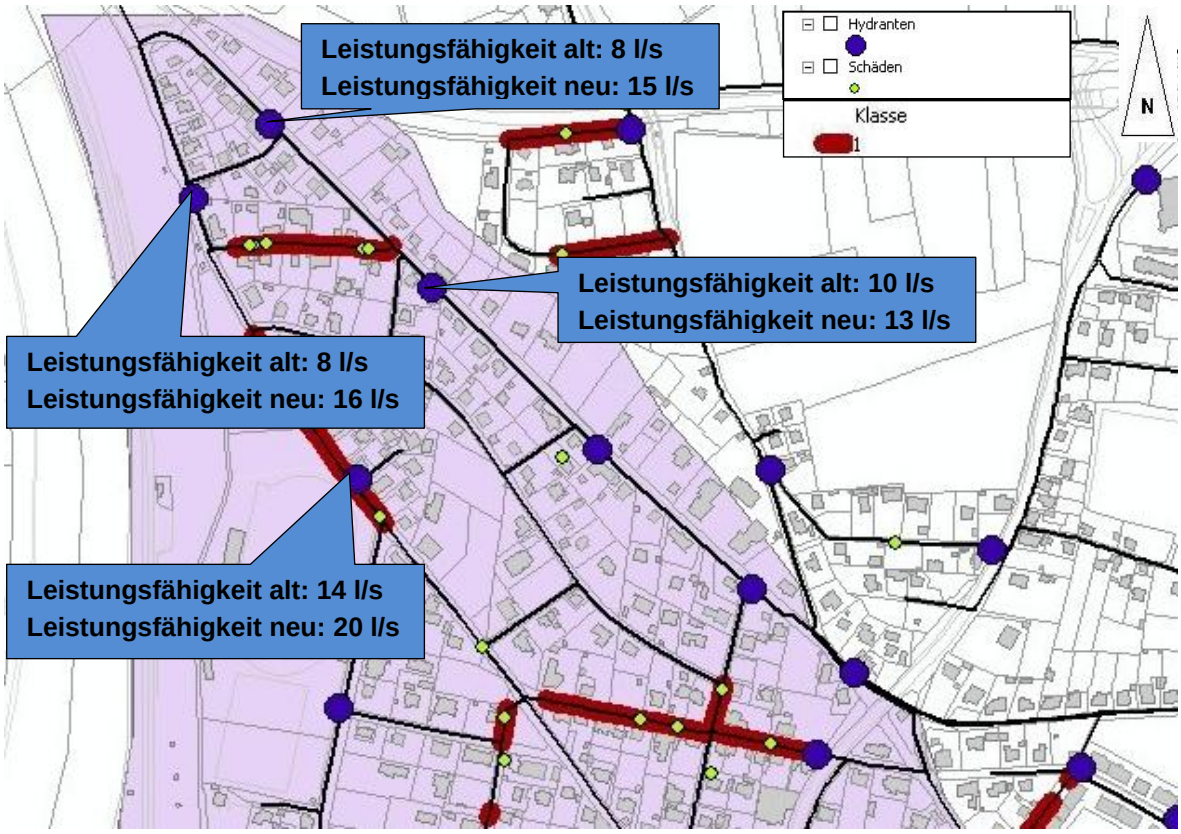


Abbildung 24: Leistungsfähigkeit der Hydranten

Die Leitungsrehabilitation in der August-v.-Jaksch-Straße in Kombination mit dem Ringschluss in der Rennsteinerstraße beeinflusst die Leistungsfähigkeit aller Hydranten im Untersuchungsgebiet positiv. Bei den Hydranten, die bisher die Anforderung hinsichtlich ausreichender Lieferung von Löschwasser nicht erfüllen konnten, ist es zu einer erheblichen Verbesserung, teilweise sogar zur Verdoppelung der möglichen Entnahmemenge gekommen.

5 Interpretation der Untersuchungen

Untersuchungen wurden in zwei voneinander unabhängigen Gebieten im Rohrnetz der Stadt Villach durchgeführt. Eine Repräsentativität der Bereiche ist durch eine entsprechende Materialverteilung und Altersstruktur der Rohrleitungen in den Untersuchungsgebieten sichergestellt. Die Gültigkeit der Ergebnisse und Erkenntnisse sind auf die betrachteten Teilbereiche beschränkt und können nicht uneingeschränkt auf Leitungsnetze anderer Wasserversorger übertragen werden.

5.1 Langfristige Rehabilitationsplanung

Die Bevölkerungsentwicklung und der Wasserbedarf in einem Versorgungsbereich sind eng miteinander verknüpft. Aus dem örtlichen Entwicklungskonzept, das eine geordnete Entwicklung von Kommunen garantieren soll, können verschiedene Szenarien für die Verbrauchsentwicklung abgeleitet werden. Der durchschnittliche Wasserverbrauch beträgt in Villach derzeit 135 Liter pro Person und Tag. In der Vergangenheit wurde der Haushaltsverbrauch mit einer Bandbreite von 150 bis 200 l/E*d angesetzt. Daraus ist schon zu erkennen, dass es beim Wasserbedarf im Allgemeinen einen rückläufigen Trend gibt, der sich durch die Betriebsergebnisse österreichischer Wasserwerke (KAINZ et al., 2005) bestätigt.

Aus diesem Zusammenhang heraus ergibt sich langfristig gesehen das Problem eines zu groß dimensionierten Versorgungsnetzes. Die Auswirkungen von überdimensionierten Rohrleitungen schlagen sich beispielsweise mit der Bildung von Stagnationszonen und vermehrten Ablagerungen im Rohrnetz nieder.

In gewissen Gebieten des Versorgungsbereichs kommen aber auch genau gegenteilige Anforderungen auf das Rohrnetz zu. Durch Betriebsansiedelungen und verstärkte Errichtung von Wohnbauten kann es sein, dass Leitungsstränge mit der zukünftigen Verbrauchsentwicklung überlastet sind und eine einwandfreie Versorgung (Menge, Druck) der Abnehmer nicht mehr gewährleistet werden kann.

Mittels hydraulischer Simulation kann das Rohrnetz diesbezüglich überprüft werden. Dies geschieht über Szenarienanalysen, über welche der zukünftige Verbrauch in verschiedenen Netzzonen berücksichtigt wird. Durch die Simulation der veränderten hydraulischen Verhältnisse können Rohrleitungen ausfindig gemacht werden, die den künftigen Belastungen nicht mehr genügen.

Neben der Ermittlung des langfristigen Rehabilitationsbedarfs mittels PiReM durch Alterungssimulation von Leitungsgruppen werden somit weitere Rohrleitungen über die hydraulische Modellierung ermittelt. Die von der hydraulischen Simulation als erneuerungswürdig identifizierten Abschnitte weisen nicht zwingend eine hohe Schadensrate auf, sondern leiten den Anspruch der Erneuerung aus der Aufrecht-

erhaltung einer optimalen Wasserversorgung ab. Die zukünftigen hydraulischen Erfordernisse verschieben somit die langfristigen jährlichen Erneuerungsraten, die entsprechend der Modellierung mit PiReM rein auf dem Schadens-/Alterungsverhalten basieren.

5.2 Mittelfristige Rehabilitationsplanung

In diesem Kapitel erfolgt die Aufstellung von Schlussfolgerungen für jeden Punkt der Untersuchungen, der mit der hydraulischen Modellierung betrachtet wurde. Es wird der Einfluss der hydraulischen Modellierung auf die mittelfristige Prioritätendefinition dargestellt und Auswirkungen auf die Rehabilitationsentscheidung aufgezeigt.

5.2.1 Rohrrauigkeiten aus der Kalibrierung

Die Werte der Rohrrauigkeiten stammen aus der Kalibrierung des hydraulischen Modells. Sie beeinflussen die hydraulische Leistungsfähigkeit von Rohrleitungen und geben den Hinweis auf eventuell vorhandene Inkrustierungen. Zwischen der vorliegenden Rauigkeit als hydraulisches Kriterium und dem hygienischen Zustand der Leitung besteht daher eine enge Verknüpfung. Eine große Rohrrauigkeit (in der Größenordnung von mehreren Millimetern) bedingt einerseits eine Erhöhung der hydraulischen Verluste und andererseits können die zwangsläufig vorhandenen Inkrustationen bei Veränderung der Strömungsverhältnisse zu einer unerwünschten Trübung des Trinkwassers oder zu einer Nachverkeimung führen.

In den Untersuchungsgebieten konnten nirgendwo Rohrrauigkeiten über 1 mm ausfindig gemacht werden. Der maximale Wert der betrieblichen Rohrrauigkeit liegt bei 0,8 mm und kommt bei Grauguss- und Stahlleitungen vor. Bei Kunststoffrohren bewegt er sich im Bereich von maximal 0,1 mm. Kunststoffrohre verzeichnen über die Lebensdauer keinen nennenswerten Anstieg der Rauigkeit, sodass sie bei der Bewertung der Rehabilitationspriorität hinsichtlich Inkrustationen nicht in Betracht gezogen wurden.

Gemäß ÖNORM EN 805 (2000) schwankt der Normalbereich der Betriebsrauigkeit von Versorgungsleitungen zwischen 0,4 mm und 1,0 mm. In den beiden betrachteten Bereichen des Rohrnetzes von Villach weisen alle Rohrleitungen geringere Rauigkeiten (< 1 mm) auf. Eine Berücksichtigung der Inkrustationen bei der Ermittlung von Rehabilitationsprioritäten lässt daher keine Verschiebung erwarten. Dies bestätigt sich auch in der Vergleichsuntersuchung mit PiReM, wo eine zusätzliche Berücksichtigung der Rohrrauigkeit (Bewertungskriterium Inkrustierung) vorgenommen wurde. Die primär zu erneuernden Abschnitte verändern sich dabei nicht.

Lediglich bei den weniger erneuerungswürdigen Rohrleitungen (Klasse 0 und 3) lässt sich in der Prioritätenliste durch das zusätzliche Erneuerungskriterium Rohr-

rauigkeit ein steigender Trend bei dem Ausmaß der zu erneuernden Längen erkennen. Die Begründung dafür liegt in den generell niedrigen Werten (< 1 mm) der vorliegenden betrieblichen Rauigkeit in den Untersuchungsgebieten, die diese Verschiebung zur Folge hat.

5.2.2 Fließgeschwindigkeit

Die Auswertungen in den Untersuchungsgebieten Villach – Völkendorf und Villach – Lind zeigen über weite Teile hinweg geringe Fließgeschwindigkeiten (< 0,05 m/s) auf. Das deutet auf generell groß dimensionierte Rohrleitungsquerschnitte hin. Diese großzügige Dimensionierung lässt auf folgende zwei Ursachen schließen:

1. In der Vergangenheit wurde von einem Anstieg des Wasserbrauchs ausgegangen, der in diesem Ausmaß nicht eingetreten ist.
2. Zur Sicherstellung der Löschwasserversorgung ist das Feuerlöschen als maßgebender Lastfall für die Bemessung der Rohrleitungen zu berücksichtigen.

Anteil an den Leitungsabschnitten mit geringer Wasserbewegung haben üblicherweise auch Endstränge. Diese erfordern eine gesonderte Betrachtung.

Die Fließgeschwindigkeit ist für die Rehabilitationsplanung von entscheidender Bedeutung. Neben der Lokalisierung von Stagnationszonen im Rohrnetz, eignet sie sich auch zur Reihung oder zur Verschiebung von Prioritäten. Im speziellen Fall lässt sich aus der Verschneidung von PiReM-Ergebnissen mit Abschnitten, die eine geringere Fließgeschwindigkeit als 0,05 m/s aufweisen, erkennen, dass auch Klasse-2-Leitungen umgehend zu primär erneuerungswürdigen Abschnitten aufsteigen können. Die Rehabilitation soll, so weit eine Reduktion der Nennweite möglich ist, eine Verbesserung der Strömungsverhältnisse im Problembereich zur Folge haben.

In einem vermaschten Rohrnetz, besteht weiters die Möglichkeit gezielt Schieber zu schließen, um so die Strömungsverhältnisse zu beeinflussen. Durch strategisches Netzmanagement lassen sich Stagnationszonen verringern und das Geschwindigkeitsniveau anheben. Da es im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen aber keine Überprüfung des Einflusses von geschlossenen Schiebern durchgeführt wurde, ist diese Möglichkeit die Fließgeschwindigkeiten zu verändern, nur vollständigkeitshalber angeführt.

Nicht zuletzt ist die hydraulische Simulation bei der Maßnahmenauswahl zu erwähnen. Die hydraulischen Auswirkungen auf die maßgebenden Lastfälle bei einer Durchmesserreduktion im Zuge der Rehabilitation können überprüft werden. Auswirkungen auf die Fließgeschwindigkeit im erneuerten Abschnitt sowie im nä-

heren Umkreis im Netz werden erkannt. Ist die Durchmesserreduktion möglich, so hat dies auch positive Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Rehabilitationsmaßnahme.

5.2.3 Druckverhältnisse

Bei der Berechnung von Druckverlusten in Rohrleitungen haben neben weiteren Einflussfaktoren die Fließgeschwindigkeit und die Rohrrauigkeit einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Daher sind Betrachtungen hinsichtlich der Druckverhältnisse immer in Kombination mit den vorhin genannten Parametern zu sehen. In beiden Untersuchungsgebieten treten über große Bereiche hinweg niedrige Fließgeschwindigkeiten auf. Ferner kommen betriebliche Rauigkeiten vor, die sich im für Versorgungsleitungen üblichen Rahmen (0,4 mm bis 1,0 mm) bewegen und eigentlich keine unvorhersehbar großen Druckverluste erwarten lassen.

Trotzdem sind gewisse Bereiche in den Untersuchungsgebieten 1 (Völkendorf) und 2 (Lind) von Problemen der Unterschreitung von Mindestdruckhöhen betroffen. Die Ursache für zu geringe Versorgungsdruckhöhen an verbrauchsreichen Tagen ist in Völkendorf nicht die hydraulische Überlastung von Rohrleitungen, sondern die geodätische Höhenlage des versorgten Gebiets. In Lind sind die Druckdefizite auch zum Großteil auf die im Vergleich des Versorgungsgebiets zum druckgebenden Hochbehälter ungünstige Höhenlage zurück zu führen.

Daher eignet sich das hydraulische Kriterium „Druck“ in diesen Bereichen des Rohrnetzes von Villach nicht, um eine Verschiebung von Rehabilitationsprioritäten zu erreichen. Eine zu geringe Nennweite verschiedener Leitungen, die durch eine gut geplante Rehabilitation hätte bereinigt werden können, ist nicht der Auslöser von zu geringen Druckhöhen in den untersuchten Gebieten. Diesbezüglich kann die hydraulische Simulation also keinen Beitrag zur mittelfristigen Prioritätendefinition liefern.

Viel mehr wird die Notwendigkeit einer teilweisen Änderung der Druckzone in Völkendorf aufgezeigt. In Lind ist zwar auch die Höhenlage der Versorgungsbereichs die Wurzel des Problems der geringen Druckhöhen, doch mit der Verbindungsleitung (Ringschluss, DN 150, Länge ca. 450 m) in der Rennsteinerstraße kann die derzeitige Situation weitestgehend entschärft und an verbrauchsreichen Tagen ein Druckniveau von 2,5 bar gewährleistet werden (siehe Beispiel: Maßnahmendefinition Pkt. 4.4.7)

5.2.4 Rohrbruchsimulation

Die Auswirkung eines Leitungsgebrechens lässt sich über die Anzahl der unzureichend versorgten Abnehmer (Schadensausmaß) ausdrücken. Eine unzureichende Versorgung kann durch die Unterschreitung des Mindestversorgungsdruckes ausgedrückt werden. Dabei liefert die hydraulische Simulation für eine Risikobetrachtung (Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit · Schadensausmaß) den Eingangswert des Schadensausmaßes.

Die Vermaschung des Rohrnetzes verringert zwar die Auswirkungen eines Rohrbruchs, dennoch zeigen die Untersuchungen, dass PVC-Leitungen gegenüber metallischen Leitungen ähnlicher Dimension im Schadensfall größere Bereiche des Netzes ungünstig beeinflussen.

Das Risiko eines Gebrechens errechnet sich für die Demonstrationsbeispiele (Untersuchungen unter Pkt. 4.4.6) wie folgt:

$$\Rightarrow \text{Risiko}_{\text{Stahl}} = 0{,}004 \qquad \text{Risiko}_{\text{PVC}} = 0{,}023$$

Das Ergebnis der Berechnung zeigt, dass PVC-Leitungen ein größeres Schadensausmaß und deswegen ein höheres Risiko erwarten lassen, als metallische Rohrleitungen ähnlichen Durchmessers. Die beiden berechneten Rohrbruchsimulationen zeigen beispielhaft eine mögliche Vorgangsweise auf. In Abhängigkeit der Höhe des ermittelten Risikos kann der betrachtete Anschnitt in die höchste Prioritätsklasse hinsichtlich Erneuerungsdringlichkeit zugeteilt werden.

Aufgrund von nur zwei durchgeführten Rohrbruchsimulationen besteht eine Vergleichsmöglichkeit lediglich dieser beiden Fälle. Als Annahme gilt, dass der größere Wert des Risikos eine Verschiebung in die Klasse 1 zur Folge hat und der kleinere Wert ein Gleichbleiben der Priorität bedeutet. Für das Untersuchungsgebiet 1 (Völkendorf) bewirkt die Rohrbruchsimulation also keine Veränderung der Prioritäten. In Untersuchungsgebiet 2 (Lind) kommt es sehr wohl zu einer Verschiebung. Die betrachtete PVC-Leitung (Klasse 2) kann somit der Prioritätsklasse 1 zugeordnet werden.

Die Einbeziehung der Rohrbruchsimulation und Risikobetrachtung in die Definition von mittelfristigen Rehabilitationsprioritäten ist anzustreben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Jedes Wasserversorgungsunternehmen sollte das Ziel verfolgen, sein Verteilnetz in gutem und dem Stand der Technik entsprechenden Zustand zu erhalten. Dazu ist es notwendig, Rehabilitationsplanung zu betreiben.

Im Rahmen der Untersuchungen stand die Definition mittelfristiger Erneuerungsprioritäten im Vordergrund. Unter Anwendung der Rehabilitationsplanungssoftware PiReM wurden für das Wasserrohrnetz der Stadt Villach Rehabilitationsprioritäten auf Basis von Bestands- und Schadensinformationen aus dem GIS der Stadt Villach ermittelt. In einem weiteren Schritt wurde mit dem Rechenprogramm Mike Urban die hydraulische Modellierung verschiedener Lastfälle durchgeführt. Ziel der Diplomarbeit war es darzustellen, inwiefern hydraulisch bedingte Erfordernisse bei der mittelfristigen Rehabilitationsplanung Berücksichtigung finden sollten.

Die Untersuchungen erfolgten in zwei repräsentativen Teilbereichen des Rohrnetzes von Villach. Mit PiReM können an Hand von technischen und wirtschaftlichen Kriterien vorrangig zu erneuernde Leitungsabschnitte festgelegt werden. Die Bewertung lieferte 4 Klassen der Erneuerungsdringlichkeit. Die Bandbreite der Klassifizierung reicht von Rohrleitungen, die keinen Erneuerungsbedarf aufweisen bis zu Leitungsabschnitten mit sofortigem Handlungsbedarf. In einer Vergleichsuntersuchung wurde in PiReM das zusätzliche Kriterium Inkrustierung, das die Information der jeweiligen Rohrrauigkeit aus dem hydraulischen Modell berücksichtigt, in die Bewertung aufgenommen. Es zeigte sich, dass es beim Ausmaß der primär erneuerungswürdigen Abschnitte in Villach aufgrund generell niedriger Rohrrauigkeiten zu keinen nennenswerten Verschiebungen der Prioritäten kommt (Verweis auf *Abschnitt 4.3*).

Mit dem Rechenprogramm Mike Urban wurden beispielhaft hydraulische Schwachstellen im Rohrnetz aufgezeigt und mit den technisch wirtschaftlich bedingten Prioritäten verschnitten. Es erfolgte eine Untersuchung folgender hydraulischer Kriterien: Rohrrauigkeiten aus der Kalibrierung des Modells, Fließgeschwindigkeiten und Druckverhältnisse in den Untersuchungsgebieten, Rohrbruchsimulation mit anschließender Risikobetrachtung, Maßnahmendefinition in einem Untersuchungsgebiet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Rohrrauigkeit der Leitungsstränge und die Druckverhältnisse in den Untersuchungsgebieten des Rohrnetzes von Villach keine Veränderung der Reihung von Rehabilitationsprioritäten bewirken. Im Gegensatz dazu war erkennbar, dass eine detaillierte Betrachtung von Fließgeschwindigkeiten und -verhältnissen sowie die Rohrbruchsimulation intensivere Berücksichtigung bei der Wahl von mittelfristigen Prioritäten, sowie bei der konkreten Maßnahmenplanung finden sollten. In Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen und deren Umsetzung ist die Fließgeschwindig-

keit als maßgebender Faktor zu sehen. Sie gibt im Fall von Veränderungen des Netzes Auskunft über die Wirksamkeit der geplanten Maßnahme zur Beseitigung von Stagnationszonen.

Um eine wirtschaftlich und technisch optimale Erneuerung des Rohrnetzes gewährleisten zu können, ermöglicht die Anwendung der hydraulischen Simulation eine Ergänzung der Ergebnisse aus der Rehabilitationsplanungssoftware PiReM. Die Untersuchungen im Wasserrohrnetz von Villach zeigten, dass die hydraulische Simulation einen wesentlichen Teil einer umfassenden Zustandsbeurteilung des Rohrnetzes darstellt. Die Einbeziehung der Hydraulik in die Rehabilitationsplanung unterstützt die Schwachstellenanalyse sowie die Erfolgskontrolle von Maßnahmen. Für das Wasserwerk Villach lassen sich aus der umfassenden Beurteilung des Versorgungsnetzes technische, wie auch wirtschaftliche Vorteile ableiten. Daher ist es das erklärte Ziel, auch zukünftig das hydraulische Modell für die Rehabilitationsplanung und für den optimalen Betrieb des Wasserversorgungsnetzes zu nutzen.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

BUNDESMINISTERIUM FÜR SOZIALE SICHERHEIT UND GENERATIONEN (2001): 304. Verordnung des Bundesminister für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung -TWV)“, BGBl. II Nr. 21/2001, Wien

BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT, FAMILIE UND JUGEND (2007): 121. Verordnung der Bundesministerin für Gesundheit Familie und Jugend, mit der die Trinkwasserverordnung geändert wird, BGBl. II Nr. 121/2007, Wien

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2006): Wasserrechtsgesetz 1959 idF (WRG 1959), BGBl. I Nr. 123/2006, Wien

BRUSSIG, P., AIGNER, D, (1998): Hydraulische Bewertung älterer Druckwasserleitungen zur Vorbereitung von Rehabilitationsmaßnahmen, 3 R international 37

DEUERLEIN, J. (2002): Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen, Dissertationsschrift, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe , Heft 214, Karlsruhe

DVGW MERKBLATT W 391 (1986): Wasserverluste in Wasserverteilleitungen, Oktober 1986

DVGW MERKBLATT W 395 (1998): Schadensstatistik für Wasserrohrnetze, Juli 1998, Bonn

DVGW ARBEITSBLATT W 400-3 (2006): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen, Teil 3: Betrieb und Instandhaltung, September 2006

DVGW HINWEIS W 401 (1997): Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserohrnetzen, September 1997, Bonn

ECKHARDT, C. (2005): Rahmenbedingungen für die mittelfristige Rehabilitationsplanung von Trinkwassernetzen, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Februar 2005, Graz

FUCHS, D. (2001): Decision Support Systeme für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 35, Technische Universität Graz, Graz

FUCHS-HANUSCH, D.; KORNBERGER, B.; GANGL, G.; et al. (2007): Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 59. Jahrgang, Heft 9/10, Springer Wien New York, Wien, S. 111-116

GANGL, G.;HAAS, G.; KÖLBL, J. (2006): Endbericht - Hydraulische Rohrnetzberechnung Wasserwerk Villach, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz, Graz

GANGL, G. (2008): Rehabilitationsplanung von Trinkwassernetzen, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 53, Technische Universität Graz, Graz

HERZ, R. (1993): Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen - Ein Kohortenüberlebensmodell, Jahrbuch für Regionalwissenschaft 14, S. 7-28

HERZ; R. (1996): Alterungsprozesse in Wasserrohrnetzen und daraus resultierender Erneuerungsbedarf, 10. Oldenburger Rohrleitungsforum

KAINZ, H.; KAUCH, E. P.; RENNER, H. (2005): Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft, 2. Auflage, Manz Verlag, Wien

KIEFFER, D. S. (2008): Vorlesungs-Skriptum Geotechnik GL, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Sommersemester 2008, Technische Universität Graz, Graz

KORTH, A. et al. (2007): Optimierung der Rohrnetzspülung, GWF - Wasser/Abwasser, 148. Jahrgang, Heft 10/2007, Oldenbourg Industrieverlag, München, S. 704-709

KORTH, A, WRICKE, B. (2007): Auswirkungen der demografischen Entwicklungen auf die Wasserversorgung, DVGW-Technologiezentrum Wasser, Außenstelle Dresden, Internetquelle: www.tzw-dresden.de

KRAUT, E. (1981): Rohrnetzanalyse auf der Basis elektronischer Datenverarbeitung, 5. Wassertechnisches Seminar Nr. 31 - Wasserverteilung, Institut für Bauingenieurwesen, Technische Universität München, S. 61-88

MÖDERL, M., et al. (2008): Mapping the intrinsic vulnerability of a water supply system by means of VulNetWS, Publikation am Institut für Umwelttechnik, Universität Innsbruck, 17. Juli 2008, Internetquelle : www.uibk.ac.at/umwelttechnik/download.html

MUTSCHMANN, J.; STIMMELMAYR, F. (2007): Taschenbuch der Wasserversorgung, 14. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden

ÖNORM B 2538 (2002): Transport-, Versorgungs- und Anschlussleitungen von Wasserversorgungsanlagen - Ergänzende Bestimmungen zu ÖNORM EN 805, 1. November 2002, Wien

ÖNORM B 2539 (2005): Technische Überwachung von Trinkwasserversorgungsanlagen - entspricht Richtlinie W 59 der ÖVGW, 1. Dezember 2005, Wien

ÖNORM EN 805 (2000): Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden, 1. August 2000, Wien

ÖVGW W 63 (1993): Wasserverluste in Versorgungsnetzen, Anschlussleitungen und Verbrauchsleitungen, April 1993, Wien

ÖVGW W 77 (2000): Bereitstellung von Löschwasser durch die Wasserversorgungsunternehmen, März 2000, Wien

ÖVGW W 100 (2007): Wasserverteilleitungen - Betrieb und Instandhaltung, November 2007, Wien

RAUTENBERG, J. (2003): Neue Anforderungen bei der Planung von Wassserverteilungsanlagen, GWF - Wasser/Abwasser, 144. Jahrgang, Heft 13/2003, Oldenbourg Industrieverlag, München, S. 77-84

RÖTSCH, D. (1999): Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen - Fernwärme und Wasser, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

ROGERS, D., DUCCINI, D. (2007): Rehabilitation of a water network - the optimum approach, Veröffentlichung, Gt. Britain

ROSCHER, H.; et al. (2000): Sanierung städtischer Wasserversorgungsnetze - Praxishandbuch, 1. Auflage, Verlag Bauwesen, Berlin

ROSCHER, H.; et al. (2004): Rehabilitation von Rohrleitungen, Sanierung und Erneuerung von Rohrleitungen der technischen Versorgung, Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar

SCHLICHT, H. (2003): Technische, hygienische und wirtschaftliche Aspekte bei der Umsetzung von Netzrehabilitationsstrategien, GWF - Wasser/Abwasser, 144. Jahrgang, Heft 13/2003, Oldenbourg Industrieverlag, München, S. 71-76

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: „Delta Approach“ für Rehabilitationen nach ROGERS et al. (2007) .. 4

Abbildung 2: Bestandteile der Instandhaltung (ÖVGW W 100, 2007) 11

Abbildung 3: Planungsschritte bei der zustandsorientierten Strategie (FUCHS, 2001 nach EVINS et al., 1989) 12

Abbildung 4: Lebensdauerverteilung mit Garantieausfällen (Phase I), Resistenzzeit (Phase II) und Verschleißausfällen (Phase III) nach HERZ (1996) 14

Abbildung 5: Alterungsfunktionen nach HERZ (1996) 15

Abbildung 6: Technische Nutzungsdauer nach Leitungsgruppen, DVGW W 401 (1997) 17

Abbildung 7: Einfluss der Rauheit k auf die Leistungsfähigkeit einer Rohrleitung bei gleichbleibendem Druckverlust (KRAUT, 1981) 39

Abbildung 8: Darstellung zur Definition des Begriffs Risiko (KIEFFER, 2008) 44

Abbildung 9: Stadtplan Villach - Übersicht der Untersuchungsgebiete 50

Abbildung 10: Untersuchungsgebiet 1 - Prioritäten und dokumentierte Schäden 53

Abbildung 11: Untersuchungsgebiet 2 - Prioritäten und dokumentierte Schäden 56

Abbildung 12: Verbrauchsganglinie der Kernzone an Tagen mittleren Verbrauchs 59

Abbildung 13: Verbrauchsganglinie der Kernzone an verbrauchsreichen Tagen 60

Abbildung 14: Untersuchungsgebiet 1 - Verteilung der Rohrrauigkeiten 62

Abbildung 15: Untersuchungsgebiet 2 - Verteilung der Rohrrauigkeiten 64

Abbildung 16: Untersuchungsgebiet 1 - Verteilung der Fließgeschwindigkeiten . 66

Abbildung 17: Untersuchungsgebiet 2 - Verteilung der Fließgeschwindigkeiten . 68

Abbildung 18: Untersuchungsgebiet 1 - Druckverteilung um 18:00h 70

Abbildung 19: Untersuchungsgebiet 2 - Druckverteilung um 18:00h 72

Abbildung 20: Wasseraustritt an einer Leitung DN 200 PVC 74

Abbildung 21: Wasseraustritt an einer Leitung DN 100 GG 75

Abbildung 22: Verteilung der Fließgeschwindigkeiten nach Umsetzung der Maßnahmen 77

Abbildung 23: Verteilung der Druckhöhe nach Umsetzung der Maßnahmen 79

Abbildung 24: Leistungsfähigkeit der Hydranten 81

Abbildung 25: Zuordnung der Schadenskosten zu den Leitungsgruppen 95

Abbildung 26: Einstellungen für das Bewertungskriterium Inkrustierung 95

Abbildung 27: Einstellungen für das Bewertungskriterium Rohralter 96

Abbildung 28: Einstellungen für das Bewertungskriterium Bruchgefährdung 96

Abbildung 29: Einstellungen für das Bewertungskriterium Schadensrate 97

Abbildung 30: Schadensfolgemodell für die Leitungsgruppen 97

Abbildung 31: Parameter der finanzmathematischen Berechnungen 97

Abbildung 32: Grundlagen zur Bildung der Kosten 98

Abbildung 33: Einstellungen für das Bewertungskriterium ökonomischer Rehabilitationszeitpunkt 98

Abbildung 34: Einstellungen für das Bewertungskriterium ungebräuchliche Nennweite 98

Abbildung 35: Einstellungen für das Bewertungskriterium Rohrmaterial 99

Abbildung 36: Druckverteilung bei angenommenen Wasseraustritt 100

Abbildung 37: Betroffene Abnehmer 100

Abbildung 38: Druckverteilung bei gesperrter Leitung 101

Abbildung 39: Betroffene Abnehmer 101

Abbildung 40: Druckverteilung bei angenommenen Wasseraustritt 102

Abbildung 41: Druckverteilung bei gesperrter Leitung 103

Abbildung 42: Betroffene Abnehmer 104

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Richtwerte für Schadensraten in Rohrnetzen (ÖVGW W 100, 2007) 20

Tabelle 2: k-Werte und Durchmesserreduzierungen nach BRUSSIG (1998) ... 28

Tabelle 3: k-Werte neuer Leitungen (MUTSCHMANN, 2007) 38

Tabelle 4: Aufstellung der Prioritäten im Untersuchungsgebiet 1 54

Tabelle 5: Aufteilung der Klasse-1-Leitungen im Untersuchungsgebiet 1 54

Tabelle 6: Prioritäten im Untersuchungsgebiet 1 mit Kriterium Inkrustierung 55

Tabelle 7: Aufstellung der Prioritäten im Untersuchungsgebiet 2 57

Tabelle 8: Aufteilung der Klasse-1-Leitungen im Untersuchungsgebiet 2 57

Tabelle 9: Prioritäten im Untersuchungsgebiet 2 mit Kriterium Inkrustierung 58

Tabelle 10: Aufteilung der Rohrrauigkeiten im Untersuchungsgebiet 1 63

Tabelle 11: Rohrrauigkeit 0,8 mm nach Prioritätsklassen im Untersuchungsgebiet 1 63

Tabelle 12: Aufteilung der Rohrrauigkeiten im Untersuchungsgebiet 2 65

Tabelle 13: Rohrrauigkeit 0,8 mm nach Prioritätsklassen im Untersuchungsgebiet 2 65

Tabelle 14: Fließgeschwindigkeit < 0,05 m/s im Untersuchungsgebiet 1 67

Tabelle 15: Fließgeschwindigkeit < 0,05 m/s im Untersuchungsgebiet 2 69

Tabelle 16: Vom Rohrbruch betroffene Abnehmer - Schadensausmaß 76

Tabelle 17: Geforderte Hydrantenleistung gemäß ÖVGW W 77 (2000) 80

8 Anhang

8.1 Für die Untersuchungen verwendete Software

MIKE URBAN© Release 2008, Service Pack 2, DHI Group, Hørsholm - Dänemark 2006 - 2008

ArcGIS 9® - ArcMap - Lizenztyp: ArcEditor, Version 9.2, ESRI Inc., Redlands - Kalifornien, 2006

PiReM Version 2.3 BETA 2.3.015, Waterpool in Kooperation mit GUEP Software, Graz - Österreich, 2006 - 2008

8.2 Auswertungen mit PiReM

Programmeinstellungen für die Auswertungen mit PiReM

Leitungsgruppe	Gruppe Schadensfunktion	Schadenskosten MW	Auto MW
AZ	AZ >= 100	3500	☐
GG < 125 bis 1925	GG < 150	2900	☐
GG < 125 nach 1925	GG < 150	2900	☐
GG => 125	GG => 150	3890	☐
GGG	GGG neu	3500	☐
PE bis 1979	PE	2800	☐
PE nach 1979	PE	2800	☐
PVC < 150	PVC < 150	4400	☐
PVC >= 150	PVC >= 150	6500	☐
ST < 100	ST < 100	2800	☐
ST >= 100	ST >= 100	3150	☐

Abbildung 25: Zuordnung der Schadenskosten zu den Leitungsgruppen

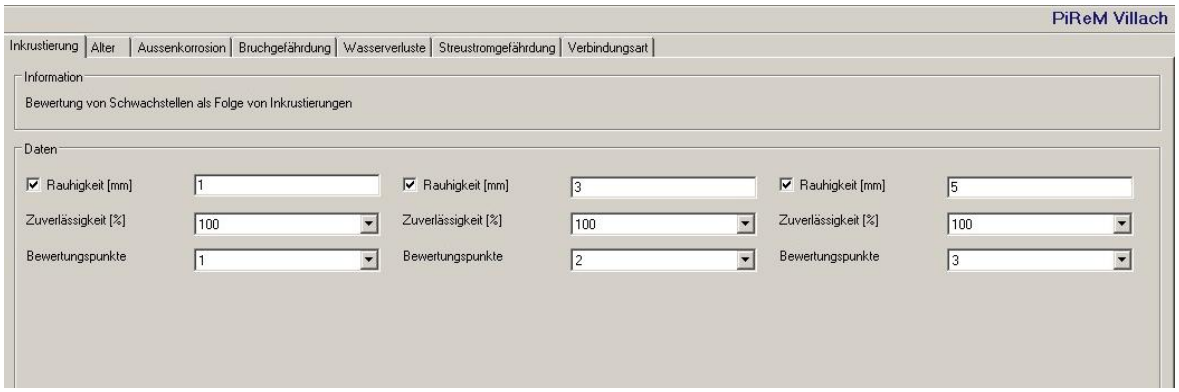


Abbildung 26: Einstellungen für das Bewertungskriterium Inkrustierung

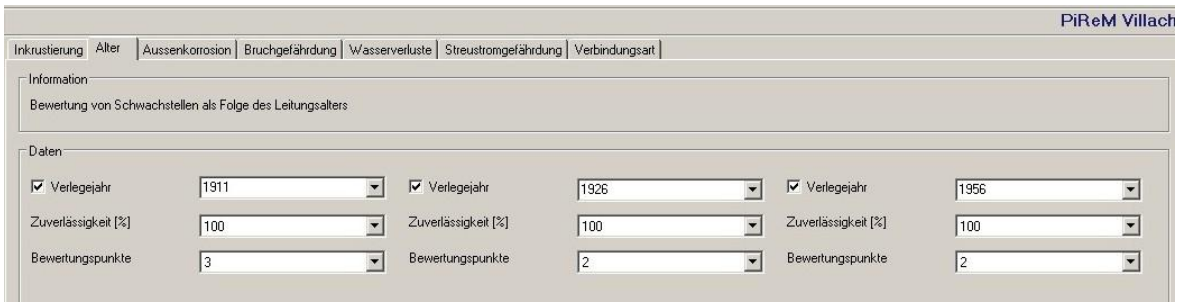


Abbildung 27: Einstellungen für das Bewertungskriterium Rohralter

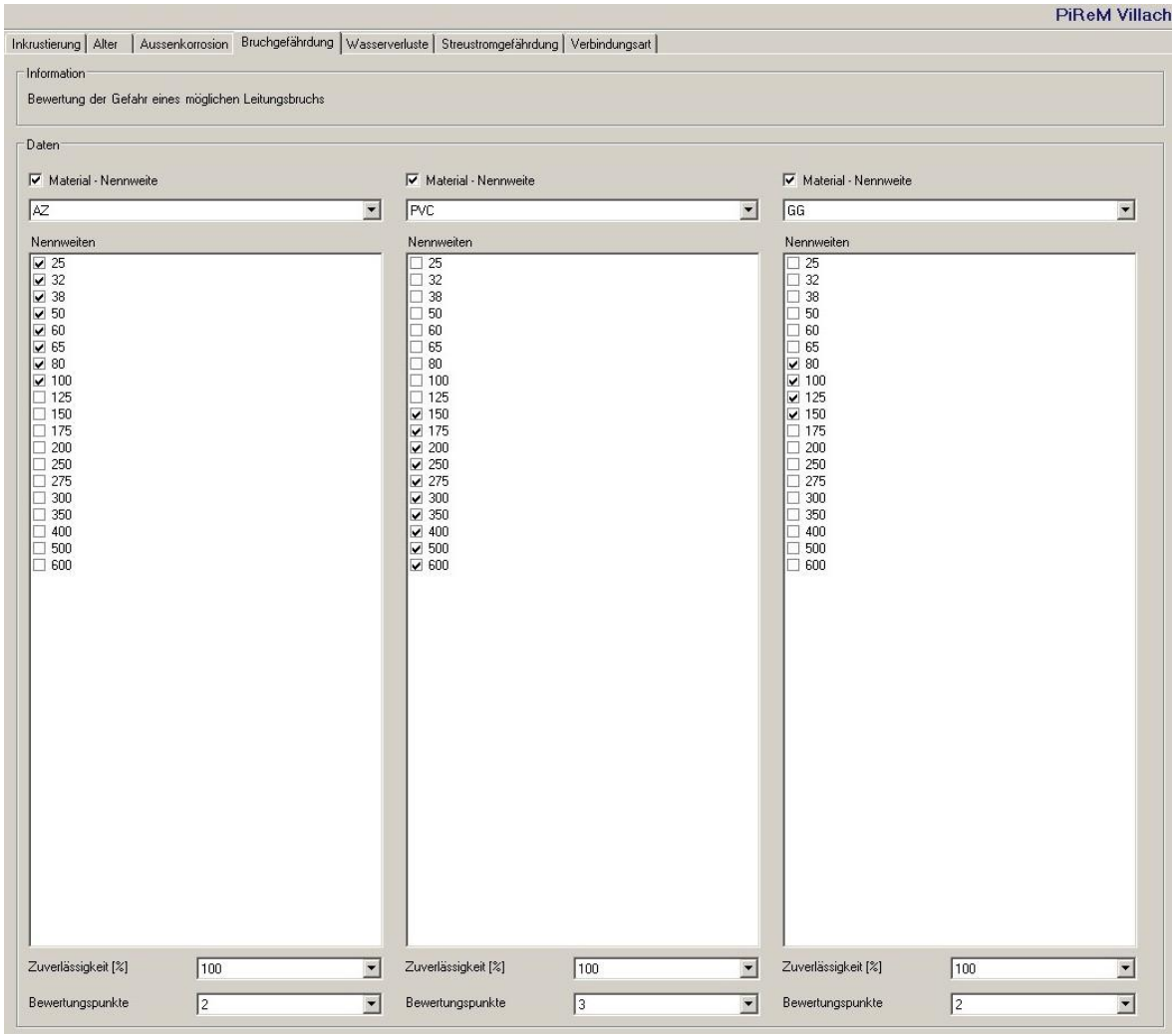


Abbildung 28: Einstellungen für das Bewertungskriterium Bruchgefährdung

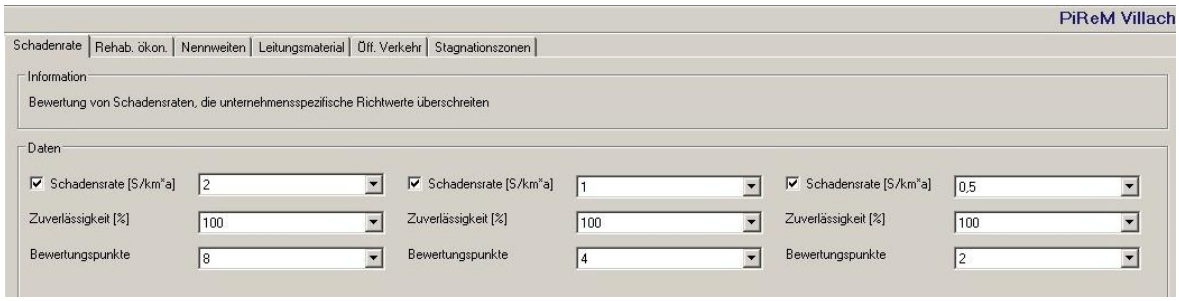
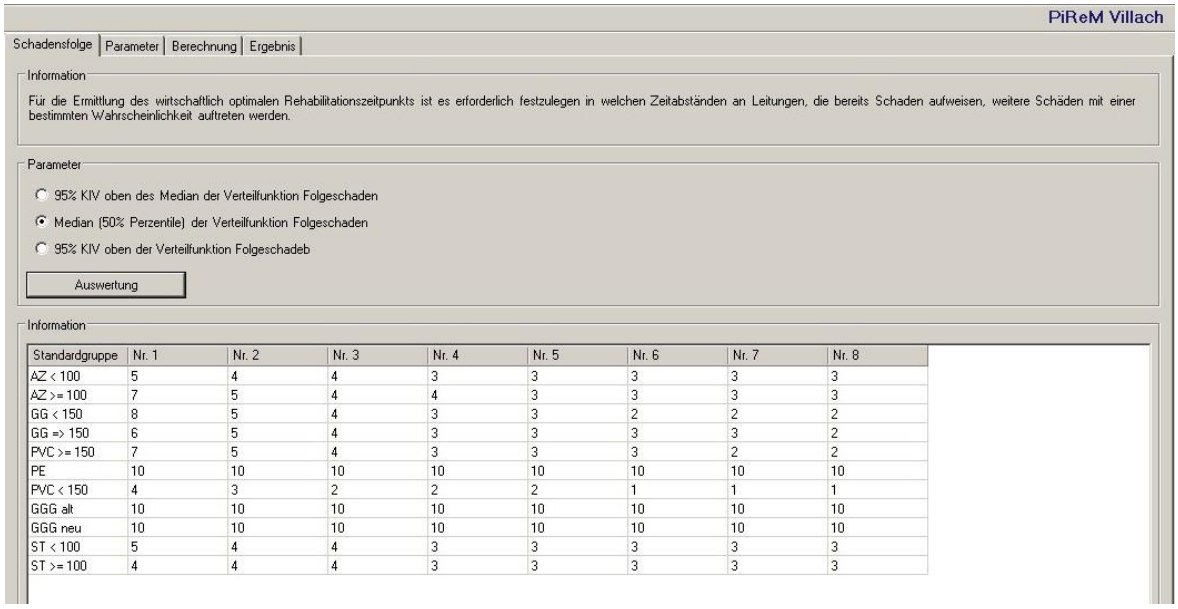


Abbildung 29: Einstellungen für das Bewertungskriterium Schadensrate



Standardgruppe	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8
AZ < 100	5	4	4	3	3	3	3	3
AZ >= 100	7	5	4	4	3	3	3	3
GG < 150	8	5	4	3	3	2	2	2
GG => 150	6	5	4	3	3	3	3	2
PVC >= 150	7	5	4	3	3	3	2	2
PE	10	10	10	10	10	10	10	10
PVC < 150	4	3	2	2	2	1	1	1
GGG alt	10	10	10	10	10	10	10	10
GGG neu	10	10	10	10	10	10	10	10
ST < 100	5	4	4	3	3	3	3	3
ST >= 100	4	4	4	3	3	3	3	3

Abbildung 30: Schadensfolgemodell für die Leitungsgruppen

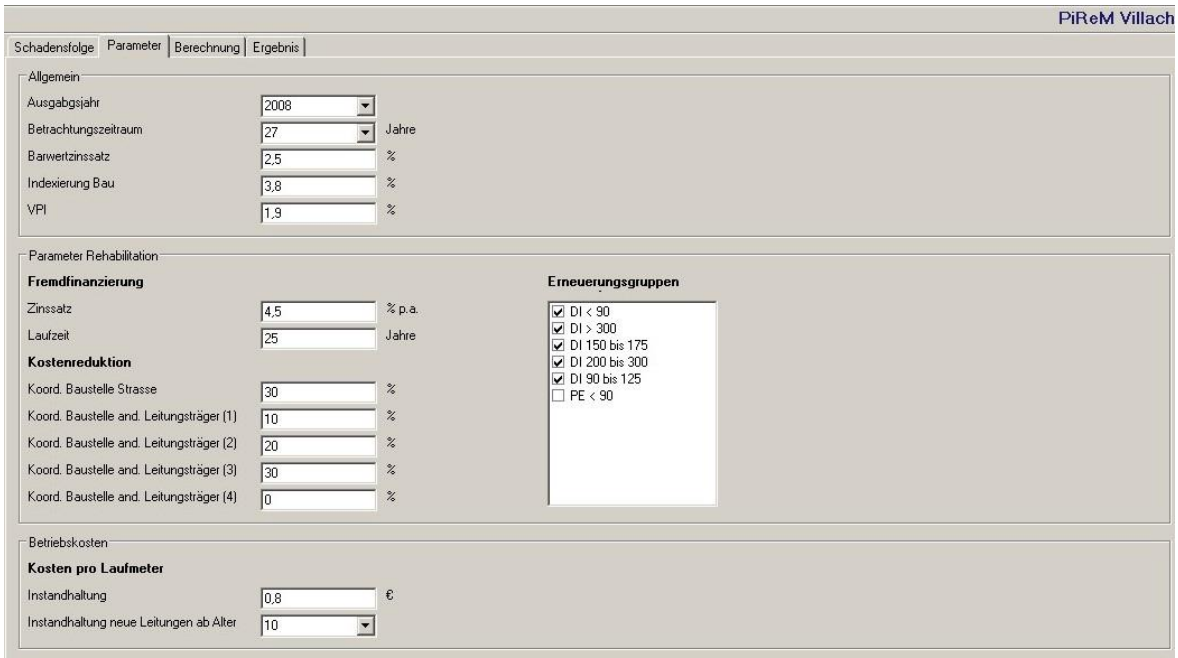


Abbildung 31: Parameter der finanzmathematischen Berechnungen

Abbildung 32: Grundlagen zur Bildung der Kosten

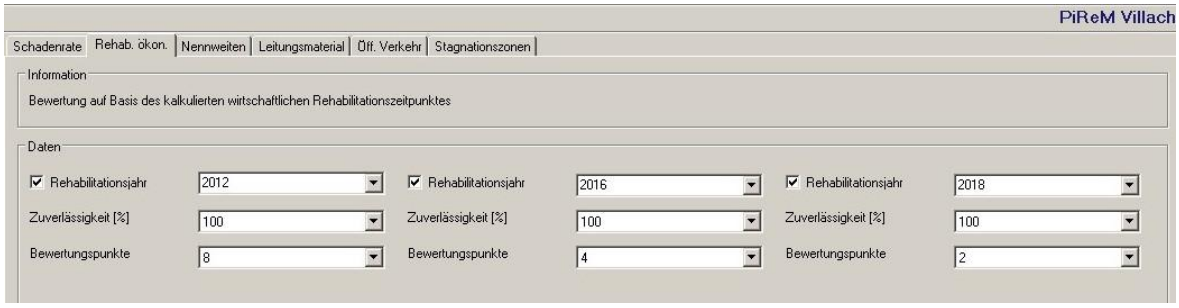


Abbildung 33: Einstellungen für das Bewertungskriterium ökonomischer Rehabilitations-zeitpunkt

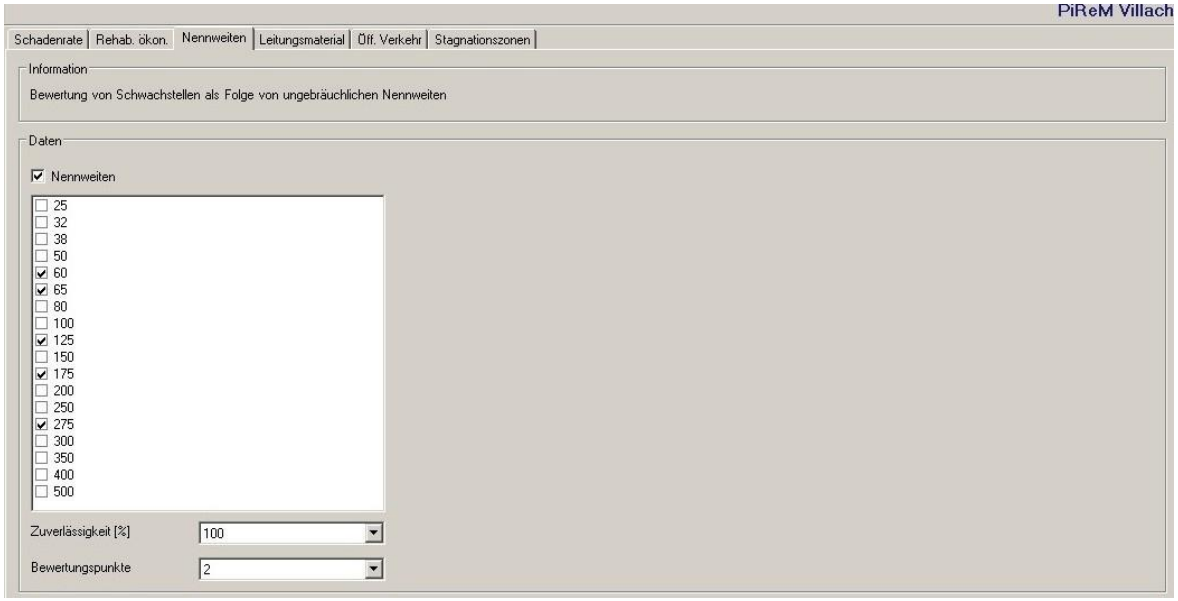


Abbildung 34: Einstellungen für das Bewertungskriterium ungebräuchliche Nennweite

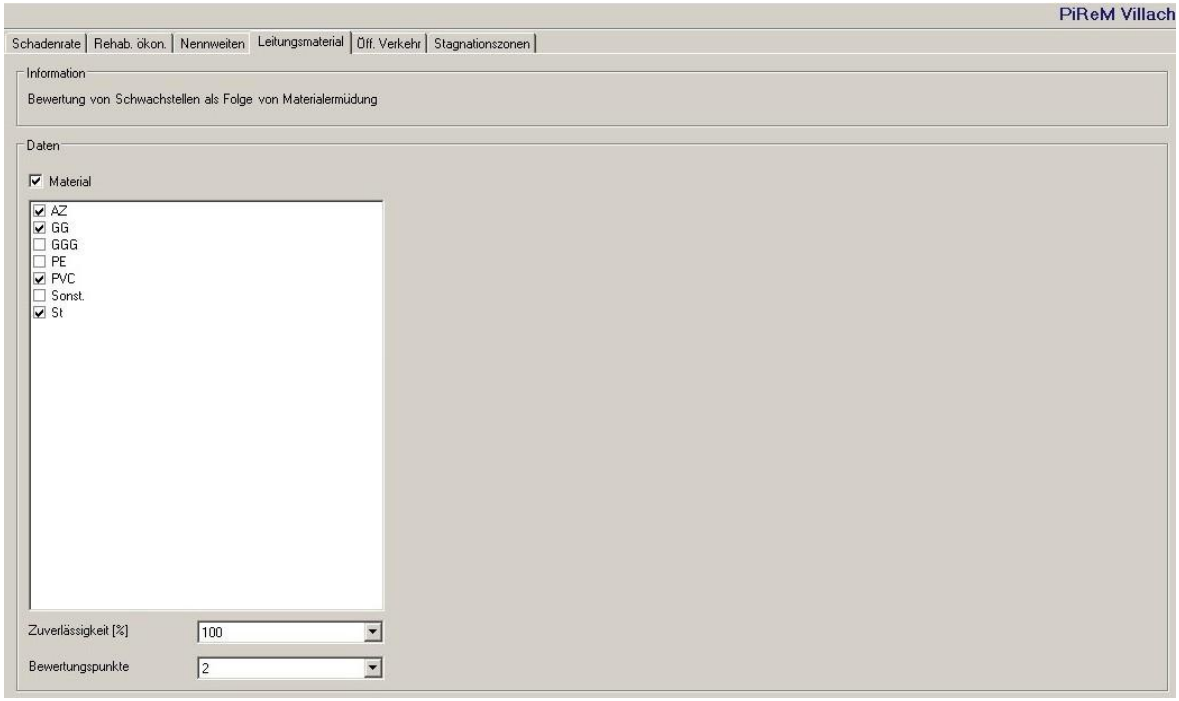


Abbildung 35: Einstellungen für das Bewertungskriterium Rohrmaterial

8.3 Berechnungen mit Mike Urban

Rohrbruchsimulation im Untersuchungsgebiet 1 – Völkendorf

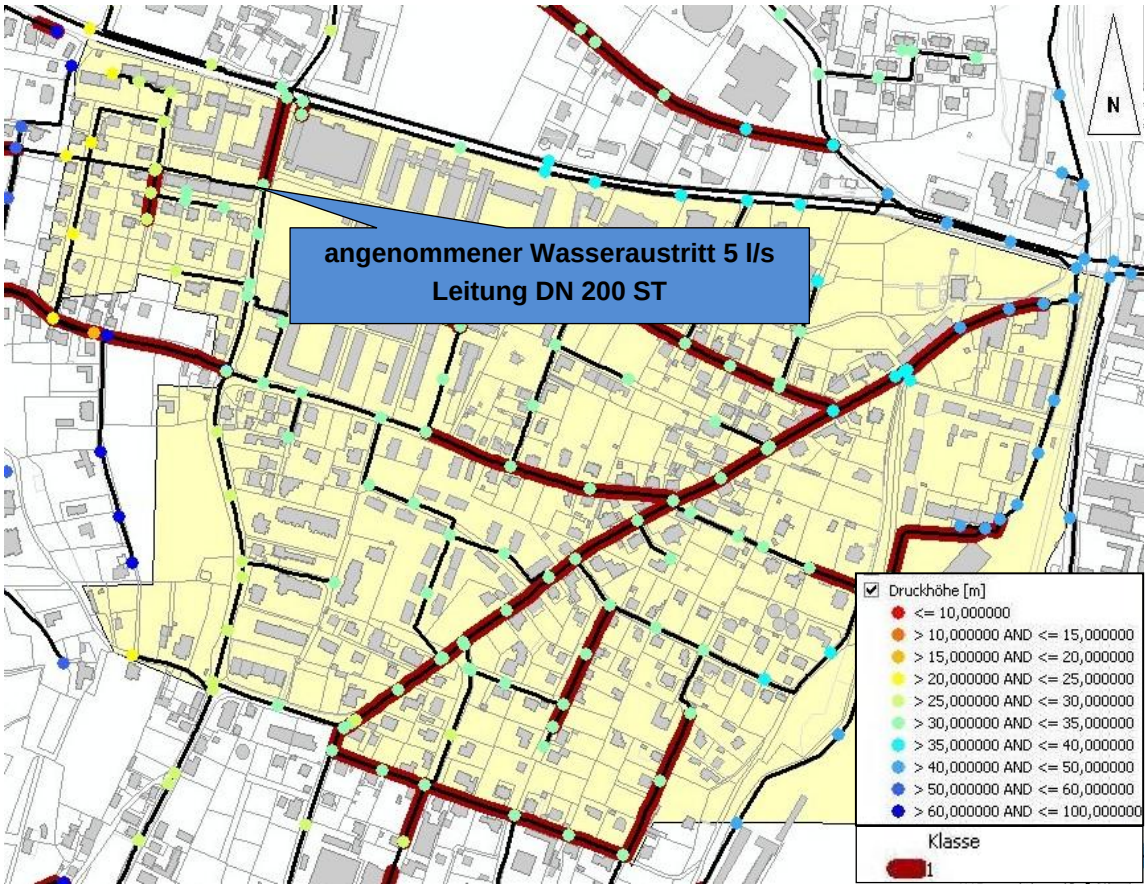


Abbildung 36: Druckverteilung bei angenommenen Wasseraustritt

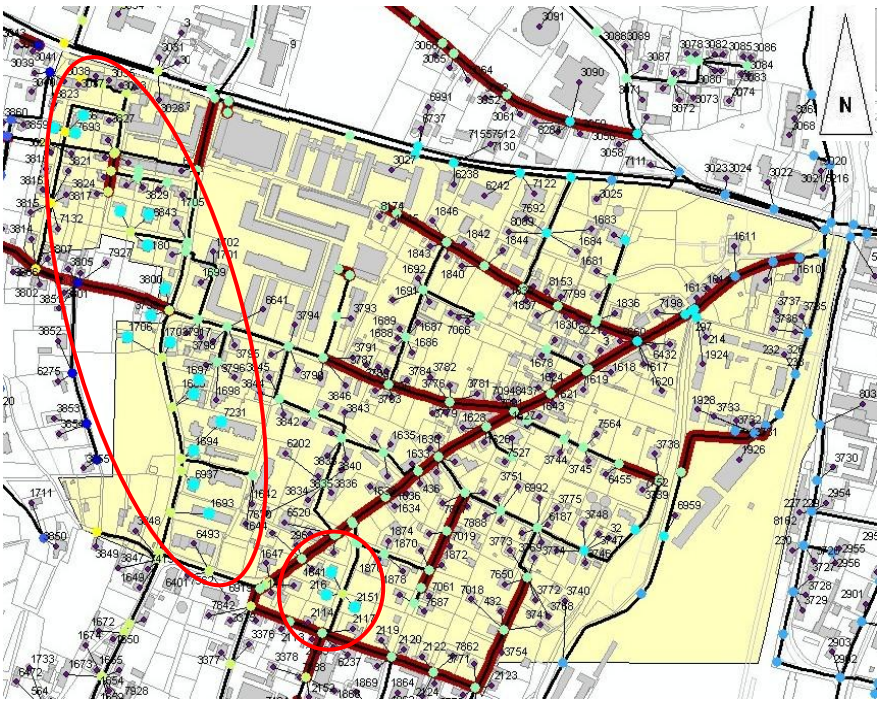


Abbildung 37: Betroffene Abnehmer

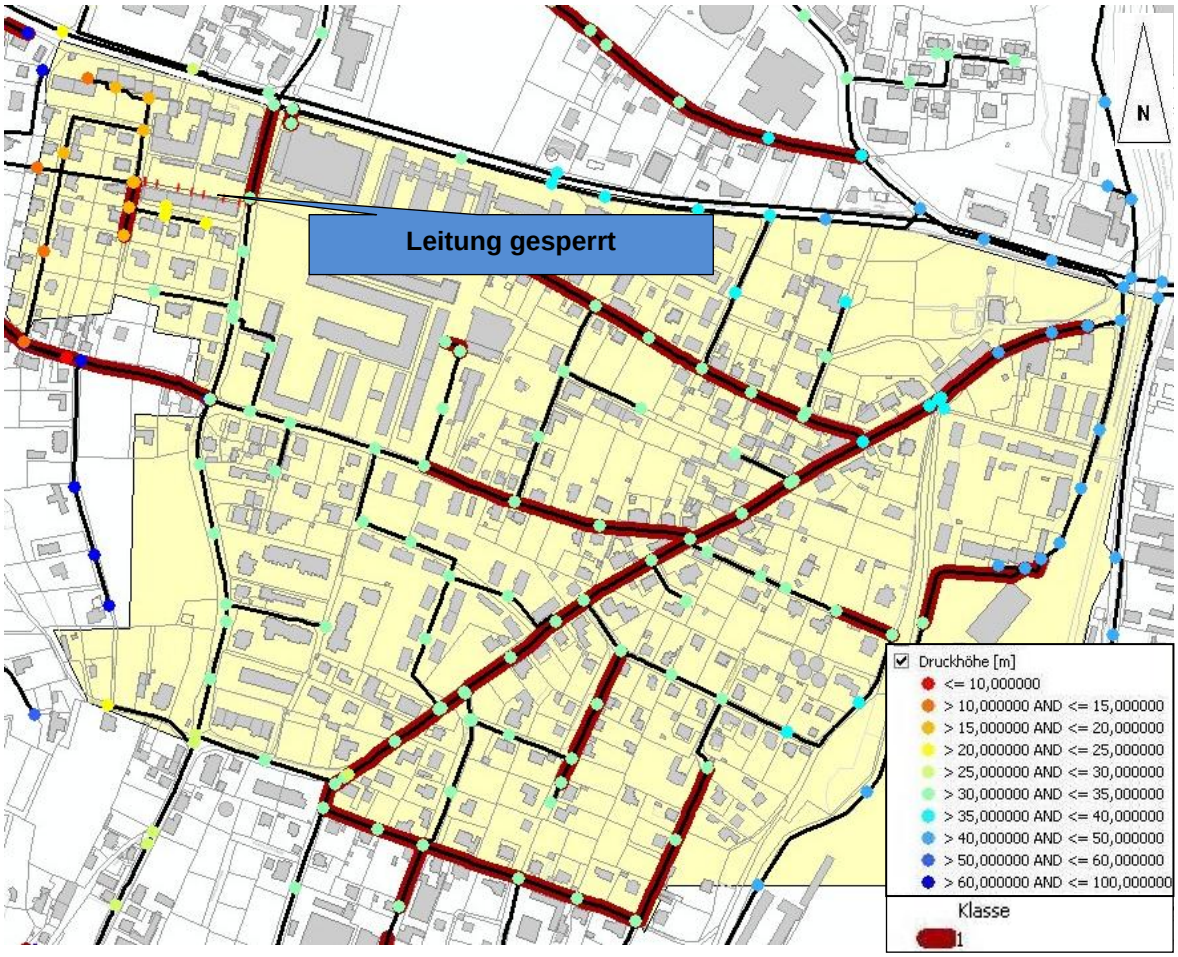


Abbildung 38: Druckverteilung bei gesperrter Leitung

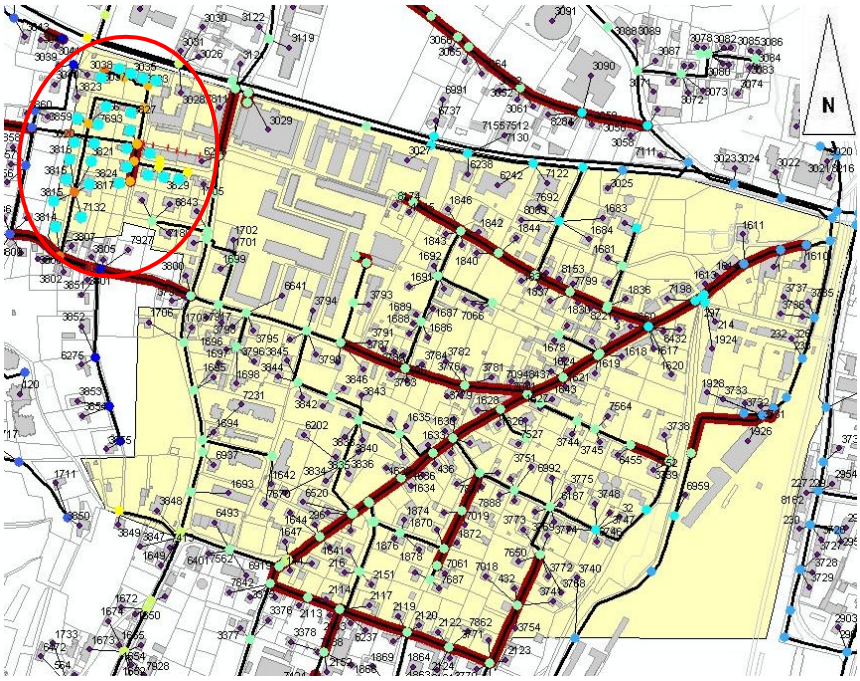


Abbildung 39: Betroffene Abnehmer

Rohrbruchsimulation im Untersuchungsgebiet 2 – Lind

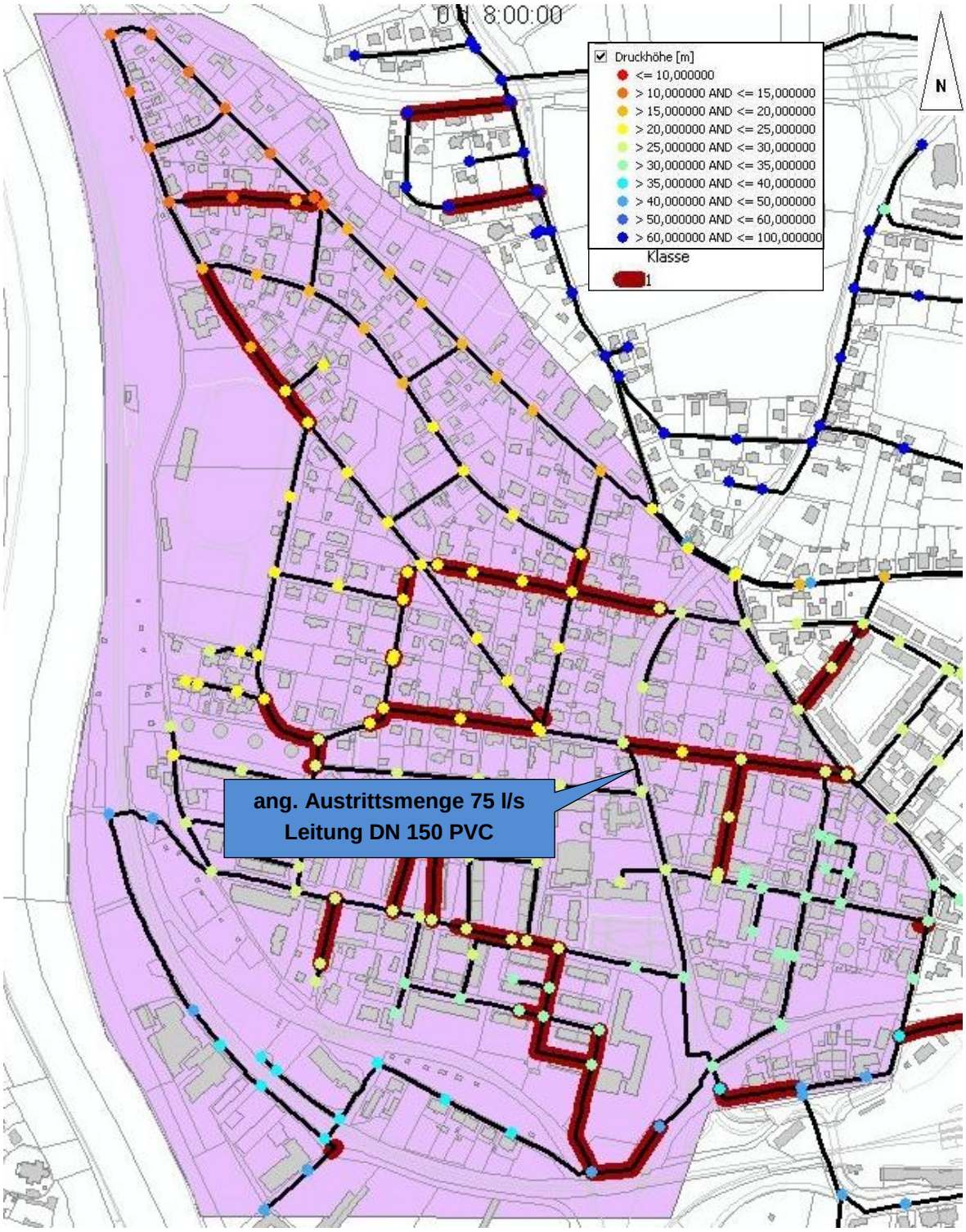


Abbildung 40: Druckverteilung bei angenommenen Wasseraustritt

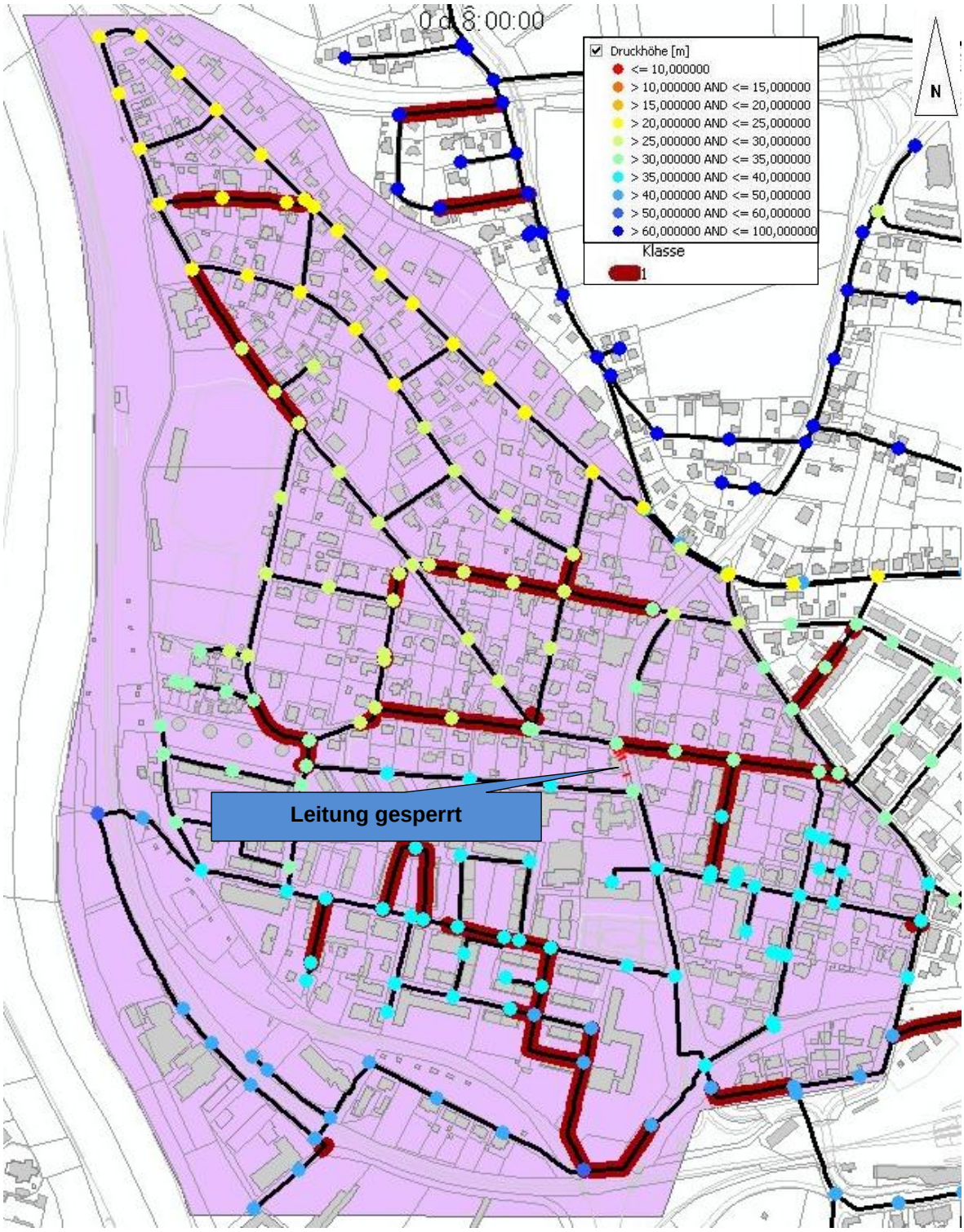


Abbildung 41: Druckverteilung bei gesperrter Leitung

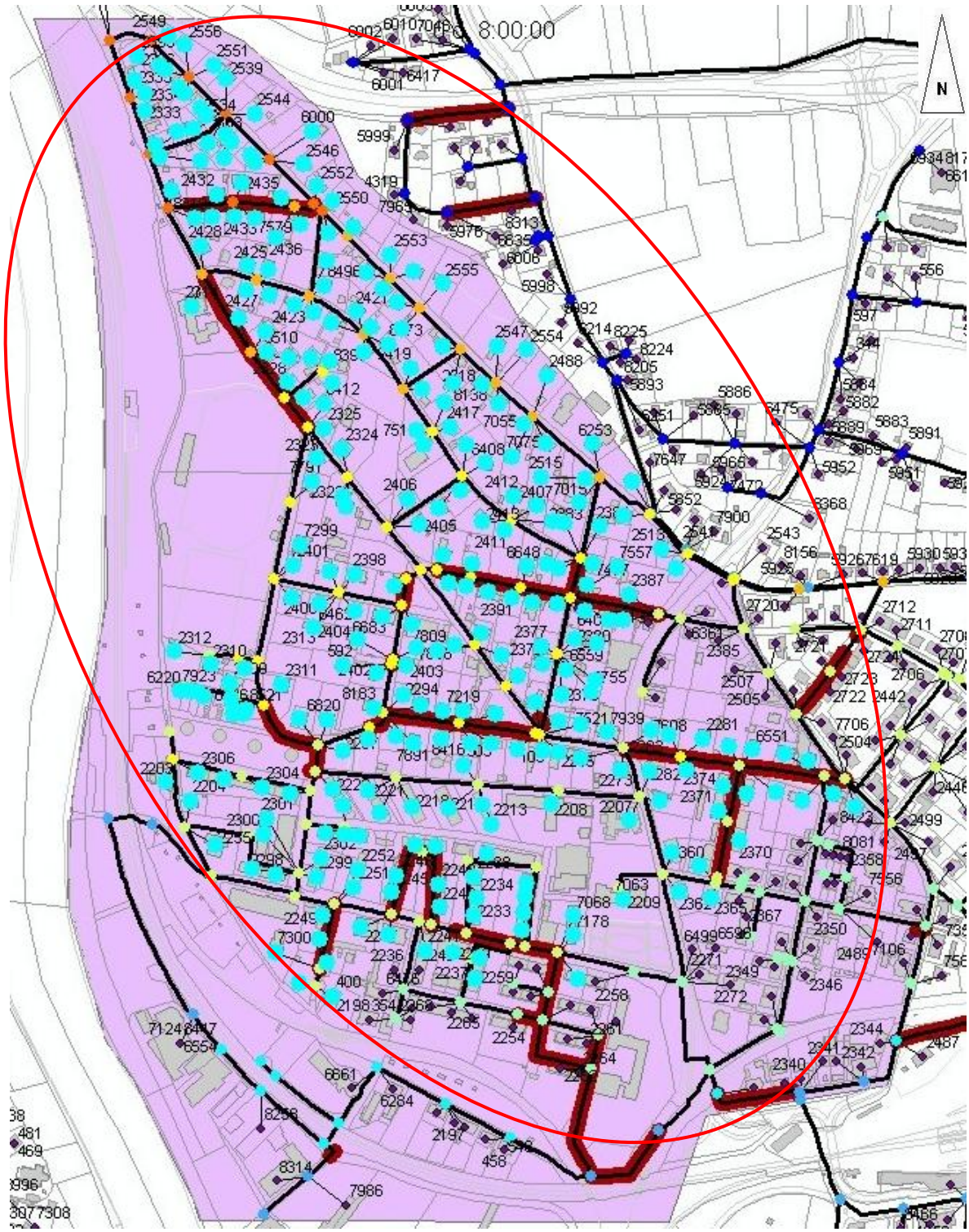


Abbildung 42: Betroffene Abnehmer