

Schadensbildorientierte Risikobewertung von Kanalisationen

Daniela Fuchs-Hanusch¹, Franz Friedl¹, Peter Pixner¹, Michael Möderl², Florian Kretschmer³, Hanns Plihal³, Thomas Ertl³

¹TU Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Graz

²UNI Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Innsbruck

³BOKU Wien, Institut für Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz, Wien

Kurzfassung: Die globale Finanzkrise der letzten Jahrzehnte führte auch in Österreich zu großen finanziellen Problemen in den Gemeinden. Je mehr die Kommunen mit solchen Schwierigkeiten konfrontiert sind, umso wichtiger wird es, sich bei Wartung, Betrieb und Instandhaltung der Infrastrukturen auf Risiken für Bevölkerung und Umwelt zu konzentrieren. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Risikobewertung vorgestellt, die sich auf „unerwünschte Ereignisse“ infolge baulicher und betrieblicher Mängel konzentriert. Es werden Ereignisse betrachtet, die zu einer Einschränkung von Funktionalanforderungen gemäß EN 752 (2008) führen können. Dazu wird die Einsatzmöglichkeit eines binären logistischen Regressionsmodells zur Ableitung der wichtigsten Einflussfaktoren auf das Auftreten „unerwünschter Ereignisse“ dargestellt. Ferner wird dargestellt, wie mittels Vulnerabilitätsanalyse hydraulische Konsequenzen von „unerwünschten Ereignissen“ quantifiziert werden können. Die Methoden wurden bisher auf ein österreichisches Kanalisationsnetz und für zwei Funktionalanforderungen gemäß EN 752 (2008) angewendet. Die Ergebnisse werden in Bezug auf die Gefahr „Einsturz“ vorgestellt.

Keywords: Risikobewertung, Schadensbilder, Logistische Regressionsanalyse, hydraulische Vulnerabilität

1 Einleitung

In den letzten 40 Jahren wurden rund 35 Mrd. € in die Entwicklung der Wasserversorgungs- und Abwasserinfrastruktur in Österreich investiert (Kainz, et al., 2006). Daher sollte eine nachhaltig geplante Instandhaltung dieser Systeme ein zentrales Ziel der Gemeinden sein. Dennoch wird dieses Ziel bei der unterirdischen Infrastruktur oft vernachlässigt. Mögliche Ursachen dafür sind, dass sich Investitionen in die Infrastruktur oftmals auf „öffentlichkeitswirksamere“ Bau-

ten konzentrieren, vielfach sind jedoch schwerwiegende Finanzierungsprobleme dafür verantwortlich. Je mehr die Kommunen finanziellen Schwierigkeiten ausgesetzt sind, umso wichtiger ist es, in die Instandhaltungsplanung Risiken für die Öffentlichkeit, die langfristige Wirtschaftlichkeit oder die Umwelt einzubeziehen.

Derzeit beschäftigt sich das Forschungsprojekt INFOSAN, gefördert vom Lebensministerium und dem am Projekt beteiligten Kanalisationsunternehmen, intensiv mit der Ableitung und den Einsatzmöglichkeiten solcher Planungsmethoden. Die Methoden orientieren sich dabei an der EN 752 (2008), die 13 Funktionalanforderungen definiert, die vom Kanalisationssystem erfüllt werden sollten. Diesen Grundsätzen folgend sollten jene Teile des Systems identifiziert werden, die die Systemleistung reduzieren könnten. Deshalb ist es von weiterem Interesse, jene Einflüsse zu kennen, die eine Leistungsminderung verursachen. In diesem Zusammenhang befasst sich dieser Beitrag mit sogenannten „unerwünschten Ereignissen“ die aufgrund von baulichen bzw. betrieblichen Schäden oder Mängeln auftreten können.

Zur Identifizierung der wichtigsten Einflüsse auf das Auftreten von Schäden wurden bereits verschiedenste statistische Modelle abgeleitet und verifiziert. Davies et al. (2001), Ariaratnam et al. (2001), Ana et al. (2009) oder Fuchshanusch et al. (2011) beschreiben z. B. die Verwendung von Regressionsmodellen. Um festzulegen, welche Kanalabschnitte eher zu risikorelevanten Schäden neigen als andere, wurde z. B. von Davies et al. (2001) das Verhalten von Kanälen aus Beton und Steinzeug statistisch untersucht. Die signifikanten Einflussfaktoren auf Schäden wurden mittels logistischer Regressionsanalyse aus ursprünglich 33 Parametern, die von Kanalbetreibern als relevant angegeben wurden, abgeleitet. Ariaratnam et al. (2001) stellten eine Methode vor, um Kanäle für die Inspektion zu priorisieren. Die Methode basiert ebenfalls auf Ergebnissen einer logistischen Regressionsanalyse.

Ziel der hier beschriebenen Analysen ist es, ein Planungskonzept abzuleiten, welches auf einem Risikoansatz basiert. Es sollen Leitungsabschnitte identifiziert werden, die in Hinblick auf die Einhaltung von Funktionalanforderungen gemäß EN 752 (2008) ein Risiko darstellen. Grundsätzlich lässt sich der Begriff Risiko als das Produkt aus Wahrscheinlichkeit und Konsequenz eines „Ereignisses bzw. Fehlers“ beschreiben. Im Folgenden wird weiters der Begriff „unerwünschtes Ereignis“ verwendet. Es werden Methoden vorgestellt, die es erlauben, Wahrscheinlichkeiten sowie Konsequenzen, die aus „unerwünschten Ereignissen“ resultieren, zu quantifizieren. In den hier beschriebenen Untersuchungen wurden vor allem die Zustandsbeschreibungen auf Basis der Kürzel aus der TV-Inspektion nach ihrer Relevanz für definierte „unerwünschte Ereignisse“ einge-

stufte. Dieser Artikel gliedert sich wie folgt: Eingangs wird die für die Risikobewertung in Bezug auf Funktionalanforderungen angewandte Methode vorgestellt. Weiters wird die binäre logistische Regressionsanalyse zur Ableitung der wichtigsten Einflussfaktoren auf das Auftreten relevanter Zustände beschrieben. Ferner wird die zur Quantifizierung von Konsequenzen herangezogene Vulnerabilitätsanalyse (VulNetUD; Möderl et al, 2009) beschrieben. Bisher wurden die Methoden auf ein Teilnetz eines Projektpartners im INFOSAN Projekt angewendet und das von einzelnen Haltungen ausgehende Risiko für zwei Funktionalanforderungen berechnet. Die Ergebnisse der Analysen beziehen sich dabei auf das unerwünschte Ereignis „Einsturz“.

2 Grundlagen und Methoden

2.1 Funktionalanforderungen und „unerwünschte Ereignisse“

Nach EN 752 (2008) sind 4 Ziele von Entwässerungssystemen definiert. Diese sind die öffentliche Gesundheit und Sicherheit, der Arbeits- und Gesundheitsschutz, der Umweltschutz und die nachhaltige Entwicklung. Zur Erfüllung dieser Ziele schlägt die EN 752 (2008) vor, 13 Funktionalanforderungen im Auge zu behalten. In Workshops zwischen Universitäten und Kanalnetzbetreibern im Zuge des Forschungsprojektes INFOSAN wurden daraus 6 Funktionalanforderungen ausgewählt, die im Kontext zur Kanalstandhaltungs- bzw. Rehabilitationsplanung am relevantesten erscheinen. Diese sind:

- Schutz vor Überflutung
- Angrenzende Bauten sowie Ver- und Entsorgungsinfrastruktur nicht gefährden
- Baulicher Zustand und Nutzungsdauer
- Aufrechterhaltung des Abflusses
- Schutz des Grundwassers
- Schutz der Oberflächenvorfluter

Weiters wurden unerwünschte Ereignisse definiert, die eine Leistungsreduzierung in Bezug auf Funktionalanforderungen zur Folge haben. Mittels Mind-Mapping wurden die 6 definierten Funktionalanforderungen diesbezüglich analysiert. Dabei ergaben sich 13 unerwünschte Ereignisse von denen folgende von den Betreibern als „hochrelevant“ eingestuft wurden:

- Verminderter Querschnitt
- Einsturz
- Beschleunigter Materialangriff

- Exfiltration
- Infiltration

Diese wurden den Funktionalanforderungen, die sie betreffen, zugeordnet. Es können einzelne Ereignisse mehrere Funktionalanforderungen beeinflussen, weiters können durch Ereignisse Kaskadeneffekte, also ein Eintreten weitere unerwünschter Ereignisse, ausgelöst werden. Diese Zusammenhänge wurden ebenfalls mittels Mind-Map abgebildet. Datenanforderungen, um Wahrscheinlichkeit und Konsequenzen dieser Ereignisse für eine Risikobewertung quantifizieren zu können, wurden beschrieben.

2.2 Risikobewertung mittels Failure Risk Index (FRI)

Um Risiken für Funktionalanforderungen infolge von Zustandsverschlechterungen zu quantifizieren, werden im Projekt INFOSAN TV-Inspektionsdaten und Betriebsaufzeichnungen von österreichischen Betreibern analysiert. In den bisher analysierten Kanalisationsnetzen waren TV-Inspektionsdaten verfügbar die gemäß ATV M 143-2 (1999) Kürzelsystem beschrieben wurden. Daher wurde auf Basis dieses Kürzelsystems eine Einstufung von Zuständen dem österreichischen Schulnotensystem folgend vorgenommen. Das heißt, die aufgezeichneten Zustände wurden in Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit, dass durch den beschriebenen Zustand ein unerwünschtes Ereignis ausgelöst wird, bewertet. Dies wurde einerseits völlig abgekoppelt von bereits existierenden Zustandsklassifizierungsmethoden durchgeführt. Andererseits kann das Klassifizierungsschema gemäß DWA M 149-3 (2007) herangezogen werden. Die darin getroffene Einteilung von Schadenskürzeln auf Relevanz für „Standicherheit“, „Betriebsicherheit“ und „Dichtheit“ kann für einen Teil der definierten unerwünschten Ereignisse verwendet werden.

Ziel dieser Klassifizierung ist es, im Sinne der Risikobewertung, einerseits schadensbildorientierte Wahrscheinlichkeiten für definierte „Ereignisse“ bei bereits befahrenen Kanalisationen abzuleiten, andererseits sind weiters die wichtigsten Einflussgrößen auf das Auftreten dieser risikoreichen Zustände von Interesse. Mittels statistischer Verfahren sollen daher in weitere Folge signifikante Einflussgrößen identifiziert werden. Sowohl intrinsische Faktoren als auch äußere Rahmenbedingungen werden in diese Analyse einbezogen. Die statistische Analyse hat unter anderem den Zweck, Wahrscheinlichkeiten für nicht bzw. selten inspizierte Kanäle mit ähnlichen Rahmenbedingungen abzuleiten und diese generierte Information für die Planung von Inspektionen bzw. die Festlegung von Inspektionshäufigkeiten zu nutzen.

Um dem Risikokonzept zu folgen, ist darüber hinaus die Konsequenz der „unerwünschten Ereignisse“ von Interesse. Dazu wird unter anderem die hydraulische

sche Vulnerabilität der Haltungen in Hinblick auf „unerwünschte Ereignisse“ bewertet. Hier sind vor allem die Ereignisse „Einsturz“ und „reduzierter Querschnitt“ von Relevanz. Die Vulnerabilitätsanalyse erfolgt dabei mit Vul-NetUD (Möderl et al., 2009), da diese Software frei im Internet erhältlich ist. Die bei Ereigniseintritt auftretende Überstaumenge je Haltung wird ebenfalls in 5 Klassen gemäß Schulnotensystem abgestuft. Um zu berücksichtigen, dass unerwünschte Ereignisse Auswirkungen auf verschiedene Funktionalanforderungen haben, sind konsequenzenseitig neben der hydraulisch orientierten Bewertung zusätzliche Bewertungen erforderlich. Ein „Einsturz“ betrifft z. B. nicht nur die Funktionalanforderung „Schutz vor Überflutung“ und die „Aufrechterhaltung des Abflusses“ sondern auch die „Gefährdung der angrenzenden Infrastruktur“. Im Kapitel „Ergebnisse“ ist dazu ein Beispiel angeführt. Mittels räumlicher Überlagerung der bewerteten Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen werden dabei mehrere Funktionalanforderungen betrachtet.

2.3 Binäre logistische Regressionsanalyse (LRA) von Kanalzuständen

Untersuchungen von Ariaratnam et al. (2001), Davies et al. (2001) und Ana et al. (2009) zeigen, dass Regressionsmodelle eine fundierte Möglichkeit darstellen, um die Beziehung zwischen einer unabhängigen Zielvariablen (Zustand bzw. Schadensbild) und einer oder mehrerer abhängiger Einflussvariablen zu beschreiben. Die logistische Regression beschreibt die Beziehung zwischen einer binären Zielgröße ($y = 0/1$) und einer Anzahl von k Einflussvariablen (x_1, \dots, x_k). Im Fall der hier angewandten Analyse steht $y=0$ für „kein relevantes Schadensbild“ und $y=1$ für „relevantes Schadensbild“. Im Folgenden wird der mathematische Hintergrund der binären Regressionsanalyse beschreiben. Die Beschreibung leitet sich aus den Ausführungen in Ana et al. (2009), Fromm (2005) und Dayton (1992) ab, diese geben für näher Interessierte einen detaillierteren Überblick über logistische Regressionsanalysen. Das Hauptmerkmal der logistischen Regression ist es, dass nicht die Gruppenzugehörigkeit ($y=1$) direkt modelliert wird, sondern die Wahrscheinlichkeit der Gruppenzugehörigkeit $p(y=1)$. Da die y -Werte also entweder 1 oder 0 sind, ist der Anteil der Fälle einer Stichprobe, für den $y = 1$ wird definiert ist als $\pi = P(y = 1)$ und der Anteil der Fälle, für den $y = 0$ wird $1 - \pi = P(y = 0)$. Da Wahrscheinlichkeiten nur im Intervall $[0;1]$ variieren, die abhängige Variable aber Werte von $-\infty$ bis $+\infty$ annehmen können, werden zwei Transformationen vorgenommen:

(1) Als abhängige Variable wird anstelle der Wahrscheinlichkeit der Gruppenzugehörigkeit, das sog. Chancenverhältnis, die „Odds“ (Ψ) betrachtet:

$$\psi = \pi / (1 - \pi)$$

Die Wahrscheinlichkeit der Gruppe 1 anzugehören wird also dividiert durch die Wahrscheinlichkeit, ihr nicht anzugehören. Mit der Verwendung der Odds kann die abhängige Variable nun Werte im Intervall $[0; +\infty]$ annehmen.

(2) Im nächsten Schritt wird das Chancenverhältnis logarithmiert; damit kann die abhängige Variable alle Werte zwischen $[-\infty; +\infty]$ annehmen:

$$\log\left[\frac{\pi}{1-\pi}\right] = \log\left[\frac{P(y=1)|x_1, \dots, x_k}{1-P(y=1)|x_1, \dots, x_k}\right] = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k = \alpha + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j$$

Wobei α eine Konstante ist, die den Schnittpunkt der Funktion mit der y-Achse beschreibt. β_j sind die Regressionskoeffizienten für die Einflussvariablen x_j . π für $y=1$ lässt sich nach Umformung von (1) wie folgt berechnen:

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

Weiters kann es von Interesse sein, die Stärke des Einflusses einer Variablen x zu beurteilen. Dazu verwendet man den sog. „Effekt-Koeffizienten“ $\exp(\beta_j)$ der auch als „Odds-Ratio“ bezeichnet wird:

$$\exp(\beta_j) = \frac{\psi_a}{\psi_b} = \frac{\pi_a / (1 - \pi_a)}{\pi_b / (1 - \pi_b)}$$

Dieser gibt die Vervielfachung der Odds an, wenn sich die Variable x_j um eine Einheit verändert. Der Effekt-Koeffizient kann Werte zwischen größer „0“ und „ $+\infty$ “ annehmen. Werte größer „1“ vergrößern die Odds, Werte kleiner „1“ verringern sie. Bei kategorialen Regressoren (z. B. Material) hängt die Interpretation von $\exp(\beta)$ von der gewählten Kontrast-Kodierung ab. Das bedeutet, es muss bekannt sein, welche kategoriale Variable als Referenzkategorie gewählt wurde.

Um das Modell zu bilden, sind die signifikanten Einflussfaktoren zu bestimmen. Dafür stehen verschiedene statistische Methoden zur Auswahl. Im Fallbeispiel wurde die schrittweise vorwärts Methode verwendet. Die Einflussfaktoren bzw. jene, mit denen begonnen wird, das Modell zu bilden, wurden zuvor in eine Korrelationsanalyse bestimmt. Die Bedeutung der Einflussfaktoren wurde in den gegenständlichen Untersuchungen mittels Wald-Test abgeleitet.

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

β_j ist der Regressionskoeffizient der j-ten Einflussvariable und $S.E._j$ ist die Standardabweichung der Maximum-Likelihood-Schätzung der Regressionskoeffizienten. Je größer der WALD-Wert umso signifikanter die Einflussgröße.

Die Modellgüte wurde über den qui-squared Wert abgeleitet. Je höher der Wert, desto besser kann das gewählte Modell das Verhalten der Daten erklären.

2.4 Vulnerabilität von Haltungen hinsichtlich „Schutz vor Überflutung“ und „Schutz des Oberflächenvorfluters“ (VulNetUD)

Nicht nur anthropogene Gefahren (z. B. Betriebsstörungen, Sabotage, Landnutzungsänderungen, Verkehrslast) oder Naturkatastrophen (z. B. Muren, Fluss Hochwasser, Rutschungen) können einen negativen Einfluss auf die Funktionalanforderung von Entwässerungssystemen haben. Auch Zustandsverschlechterungen können durch Ausfälle von Systemkomponenten diese negativen Einflüsse hervorrufen. Solche Ausfälle können z. B. durch reduzierte Kanalquerschnitte, verunreinigtes Wasser, durch Infiltration und verstopfte Mischwasserüberläufe entstehen. VulNetUD simuliert die Auswirkungen solcher Ereignisse auf die Systemleistungsfähigkeit durch eine lokale Sensitivitätsanalyse (Campolongo et al., 2007) , genannt One At a Time Method, der Systemkomponenten. Zu diesem Zweck erfolgt eine Parametervariation nach dem örtlichen Auftreten eines unerwünschten Ereignisses. Zum Beispiel wird die Verstopfung von Mischwasserüberläufen simuliert, indem nacheinander die Geometrie der einzelnen Wehr-Öffnungen auf null gesetzt wird. VulNetUD bewertet die Vulnerabilität jeder modifizierten Systemkomponente durch die Berechnung von hydraulischen und Wasserqualitäts- Leistungsindikatoren für das gesamte System (Abbildung 1- Schritte 1 und 2). Die Sensitivitätsanalyse, welche einer Vulnerabilitätsanalyse entspricht, zeigt inwiefern sich die Parametervariation infolge bestimmter Gefahren auf die Systemperformance auswirkt. Abschließend wird eine Vulnerabilitätskarte auf Basis der berechneten Indikatorwerte, die sich bei einem unerwünschten Ereignis an der entsprechenden Systemkomponente ergeben, erstellt (Abbildung 1 - Schritte 3 und 4).

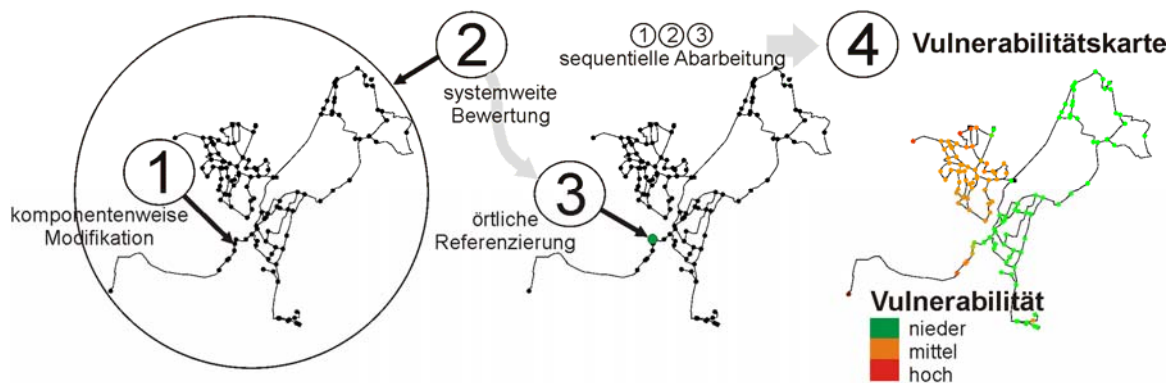


Abbildung 1: Vulnerabilitätsberechnung VulNetUD

Die Ergebnisse der Software (VulNetUD - Achilles Modul) sind Vulnerabilitätskarten in Abhängigkeit der gewählten Einstellungen. Zum Beispiel weist die Schwachstellenkarte für „Einstürze“ auf Haltungen hin, wo ein Totalverlust der Kapazität besonders große Konsequenzen hat.

3 Fallstudie, Ergebnisse und Diskussion

3.1 Charakteristika Fallbeispiel

Das untersuchte Teilsystem hat eine Länge von 85 km und umfasst 2.833 Haltungen. Es wurde vor kurzem (2008 - 2010) mittels TV-Befahrung inspiziert. Die Vorklassifizierung weist 7 km (8%) Abwasserleitungen eine bauliche Zustandsklasse 4-5 zu. Im betrachteten System kann eine jährliche Sanierungsrate von 1% realisiert werden. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die selektive Inspektionskampagne mit jenen Zonen begonnen wurde, die den höchsten Anteil an schlechten Zuständen erwarten ließen. Nichtsdestotrotz ist eine weitere Priorisierung unumgänglich und sei es nur, um die selektive Inspektion zu präzisieren. Die Anwendung einer Risikobewertung und die Ableitung signifikanter Einflussfaktoren auf das Auftreten risikoreicher Zustände bietet die Möglichkeit einer solchen Präzisierung.

Für das Beispielnetz wurden die Funktionalanforderungen „Schutz vor Überflutung“ und „Gefährdung angrenzender Bauten“ infolge des unerwünschten Ereignisses „Einsturz“ untersucht. Diese wurden vom Betreiber als höchstrelevant eingestuft. Dem INFOSAN – Konzept entsprechend kann sich die Auswahl relevanter Funktionalanforderungen an den aus der Kennzahlenbewertung abgeleiteten Defiziten orientieren (siehe Kretschmer et al., 2012).

Allen Schadensbildern im Bebielnetz wurde gemäß eines zuvor definierten Klassifizierungsschemas die Wahrscheinlichkeit hinsichtlich Einsturz von $p=1$ bis $p=5$ zugeordnet. Tabelle 1 zeigt einen Auszug dieses Klassifizierungsschemas hinsichtlich hoch relevanter Schadensbilder. Für das unerwünschte Ereignis „Einsturz“ sind z. B. Zustände wie Risse, offene Fugen, Versatz oder Scherben mit schwerem Ausmaß mit $p=5$ eingestuft (Tabelle 2).

Tabelle 1: Zustände $p = 5$ betreffend „Einsturz“ (Kürzel nach ATV - M 143-2, 1999)

1. Stelle	2. Stelle	3. Stelle	4. Stelle	5. Stelle	Einsturz
Riss	Längs-, Axial-	Boden sichtbar	Scheitel, oben	>5mm	5
Riss	Längs-, Axial-	Boden sichtbar	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5
Riss	Längs-, Axial-	Eindringendes Wasser sichtbar mit Bodeneintrag	Scheitel, oben	>5mm	5
Riss	Längs-, Axial-	Eindringendes Wasser sichtbar mit Bodeneintrag	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5
Riss	Scherbe	Boden sichtbar	Scheitel, oben	>5mm	5
Riss	Scherbe	Boden sichtbar	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5
Riss	Scherbe	Eindringendes Wasser sichtbar mit Bodeneintrag	Scheitel, oben	>5mm	5
Riss	Scherbe	Eindringendes Wasser sichtbar mit Bodeneintrag	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Sichtbarer Wasseraustritt	Scheitel, oben	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Sichtbarer Wasseraustritt	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Boden sichtbar	Scheitel, oben	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Boden sichtbar	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Eindringendes Wasser sichtbar	Scheitel, oben	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Eindringendes Wasser sichtbar	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Eindringendes Wasser sichtbar mit Bodeneintrag	Scheitel, oben	>5mm	5
Fehlende Teile	Klinker	Eindringendes Wasser sichtbar mit Bodeneintrag	Gesamter Rohrfumfang	>5mm	5

Betreffend „Einsturz“ kann in weiterer Folge, sofern die Zustände nach EN 13508 (2006) beschrieben werden, die Klassifizierung nach DWA M 149-3 (2007) angewendet werden. Diese sieht u. a. eine Klassifizierung von Zuständen im Hinblick auf Standsicherheit vor.

Die Klassifizierung gemäß Tabelle 1 hat gezeigt, dass 252 Haltungen (5,3 km), einsturzgefährdende Zustände aufweisen. Diese 252 Kanäle wurden mit dem Wert $y = 1$ für die binäre Regressionsanalyse herangezogen. Weiters wurde ein vorhandenes hydraulisches Modell für den Einsatz in VulNetUD aufbereitet. Zur Analyse des FRI für die funktionale Anforderung „Gefährdung angrenzender Infrastruktur“ wurden GIS-Daten über die Lage der Wasserversorgung, der Straßenbahn sowie von stark frequentierten Straßen in die Analysen einbezogen.

3.2 LRA Wahrscheinlichkeit „Einsturz“

Wie erwähnt wurde zur Ableitung der signifikantesten Einflussvariablen auf das unerwünschte Ereignis „Kanaleinsturz“ das schrittweise vorwärts Regressionsverfahren angewendet. Tabelle 2 zeigt die in die LRA einbezogenen Einflussfaktoren und die zugehörigen Variablen. Zur Voranalyse wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. In Abhängigkeit der Höhe der Korrelation der Einfluss-

faktoren mit dem Ereignis $y = 1$ erfolgte die Reihung der schrittweise ins Modell einbezogenen Faktoren.

Tabelle 2: Einflussfaktoren und Variablen für LRA

Einflussfaktoren	Variablentyp	Variablen (kurz)	Variablen(Namen)	Datenquelle	Häufigkeit
Länge	metrisch			Kataster	
Abwasserart	nominal	SW	Schmutzwasser	Kataster	1818
		RW	Regenwasser		792
		MW	Mischwasser		222
Material	nominal	FZ	Faserzement	Kataster	96
		MA	Mauerwerk		28
		GG	Grauguss		14
		BS	Beton		1006
		GGG	Duktilguss		516
		GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff		58
		K	Kunststoff		103
STZ	Steinzeug	1011			
Profiltyp	nominal	A	Ei	Kataster	175
		B	Maul		400
		C	Kreis		2257
Breite	metrisch				
Überdeckung	metrisch			TV Befahrung	
Verlegejahr	metrisch				
Bodenart	metrisch	T	Ton	Bodenkarte	1240
		L	Lehm		98
		S	Sand		1300
		U	unbekannt		194
Verkehrsbelastung	metrisch			Verkehrsdaten	

Es hat sich gezeigt, dass die wichtigsten Einflussfaktoren auf die risikoreichen Versagensarten hinsichtlich „Einsturz“ das Rohrmaterial, das Verlegjahr, der Durchmesser (Breite), die Profilart, die Haltungslänge, Abwasserart sowie die Überdeckung sind. Die geringste Signifikanz wiesen dabei Abwasserart und Überdeckung auf (Sig. > 0,05) (Tabelle 3). Dennoch wurden diese in das Modell integriert da die Chi-Quadrat-Werte, als ein Maß für die Modellqualität bei Einbeziehung dieser Faktoren weiter erhöht werden konnten. Bodenart und Verkehrsbelastung, mit Signifikanzniveaus über 0,2 erwiesen sich als nicht signifikant.

Durch die Analyse der Odds Ratios ($\exp(\beta)$) von Variablen verschiedener Einflussfaktoren im untersuchten System, kann abgeleitet werden, welche Haltungstypen am ehesten zu problematischen Schadensbildern neigen. Z. B. ist die Wahrscheinlichkeit, dass Mischwasserkanäle die definierten Schadensbilder

aufweisen, dreimal höher als die von Regenwasserkanälen. Im Vergleich zum Referenzmaterial Steinzeug haben Betonrohre die 3,5- fache Neigung, hochrelevante Schadensbilder aufzuweisen. Alle anderen Materialien haben geringe oder ähnliche „Odds“ wie Steingut. In Abhängigkeit des Verlegejahres steigt die Wahrscheinlichkeit nur geringfügig.

Tabelle 3: Signifikante Einflussfaktoren für die Modellbildung

		β	σ	Wald	df	Sig.	$\exp(\beta)$
Abwasserart				5.444	2	.066	
Abwasserart (1)	MW	1.068	.474	5.080	1	.024	2.910
Abwasserart (2)	SW	.831	.504	2.724	1	.099	2.297
Referenzkategorie	RW						1.000
Material				58.460	7	.000	
Material(1)	AZ	.102	.540	.036	1	.850	1.107
Material(2)	MA	-.730	.800	.832	1	.362	.482
Material(3)	GG	-18.371	10584.489	.000	1	.999	.000
Material(4)	B	1.214	.213	32.577	1	.000	3.367
Material(5)	GGG	-2.129	.605	12.380	1	.000	.119
Material(6)	GFK	-.889	1.033	.740	1	.390	.411
Material(7)	K	-.050	.829	.004	1	.952	.951
Referenzkategorie	STZ						1.000
Verlegejahr	VJ	-.017	.003	28.225	1	.000	.983
Überdeckung	Ü	-.135	.080	2.874	1	.090	.874
Breite	b	-.007	.002	19.236	1	.000	.993
Länge	l	.020	.005	19.095	1	.000	1.020
Profiltyp				6.271	2	.043	
Profiltyp(1)	A (Ei)	-.952	.577	2.723	1	.099	.386
Profiltyp(2)	B (Maul)	-.009	.510	.000	1	.985	.991
Referenzkategorie	C (Kreis)						
Konstante		31.099	6.429	23.400	1	.000	

Zur Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von einsturzfährenden Schadensbildern kann das Regressionsmodell wie folgt beschrieben werden:

$$\pi = \frac{e^z}{1 + e^z} \quad \text{wobei}$$

$$z = 31,099 + 1,068 * x_{MW} + 0,831 * x_{SW} + 0,102 * x_{FZ} - 0,730 * x_{MA} - 18,371 * x_{GG} + 1,214x_B - 2,129 * x_{GGG} - 0,889 * x_{GFK} - 0,5 * x_K - 0,17 * x_{VJ} - 1,35 * x_{Ü} - 0,007 * x_b + 0,02 * x_l - 0,952x_A - 0,009 * x_B$$

Für nicht inspizierte Haltungen mit ähnlichen Rahmenbedingungen erlaubt das Modell, die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten, dass ähnlich schwere Schäden wie im beobachteten Netz auftreten. Auf Basis dieser rechnerischen Ausfallwahrscheinlichkeiten können Risikobewertungen auch in nicht inspizierten Gebieten durchgeführt werden, sofern Aussagen über die Konsequenzen getroffen werden können.

3.3 FRI Funktionalanforderung „Schutz vor Überflutung“ (FRI-Ü)

Zur Berechnung eines FRI für eine bestimmte Funktionalanforderung sind die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und die Konsequenz dieses Ereignisses zu quantifizieren. Wie oben beschrieben, wurden die Schadensarten der TV-Inspektion hinsichtlich ihrer Relevanz für das unerwünschte Ereignis „Einsturz“ gemäß Tabelle 2 klassifiziert. Weiters wurde eine Schwachstellenkarte hinsichtlich Überflutung mit VulNetUD für den Komponentenausfall infolge Einsturz und einem Regen mit einer Jährlichkeit $n=5$ erstellt. 4 km Haltungen wurden dabei als anfällig hinsichtlich Überflutung bei Komponentenausfall identifiziert. Die Haltungen betreffen Großteils den Hauptsammler des Teilsystems. Obwohl es insgesamt 9 Mischwasserüberläufe im System gibt, die den Hauptsammler vor Überlastung schützen sollen, erfolgt ein relativ hoher Anstieg des Überstauvolumens bei einem Einsturz dieses Hauptsammlers.

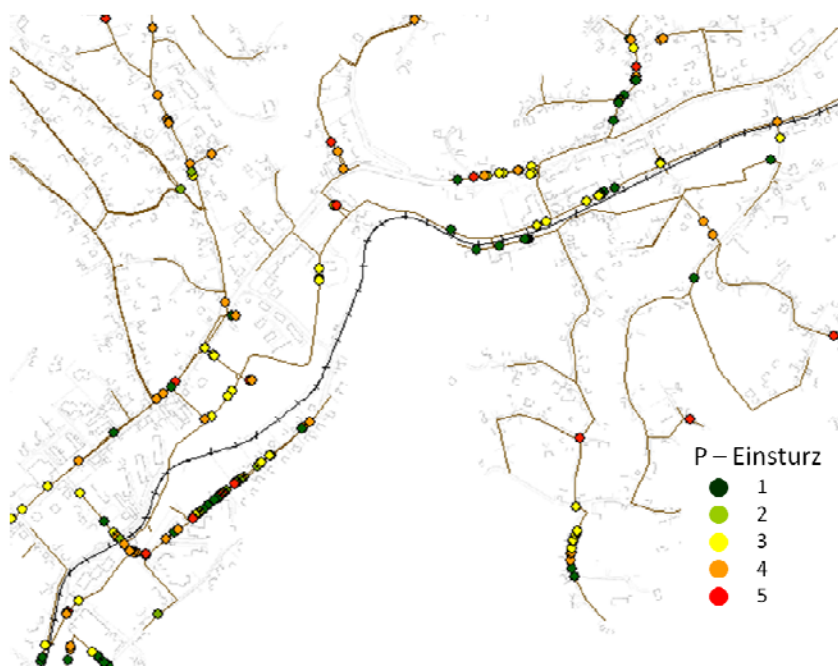


Abbildung 2: Klassifizierung von Zuständen bezüglich Einsturzgefährdung

Hinsichtlich einer hohen Einsturzwahrscheinlichkeit wurden 5,3 km Kanalisation, das sind 6 % des Teilnetzes, auf Basis der letzten TV-Inspektionsergebnisse identifiziert (Abbildung 2).

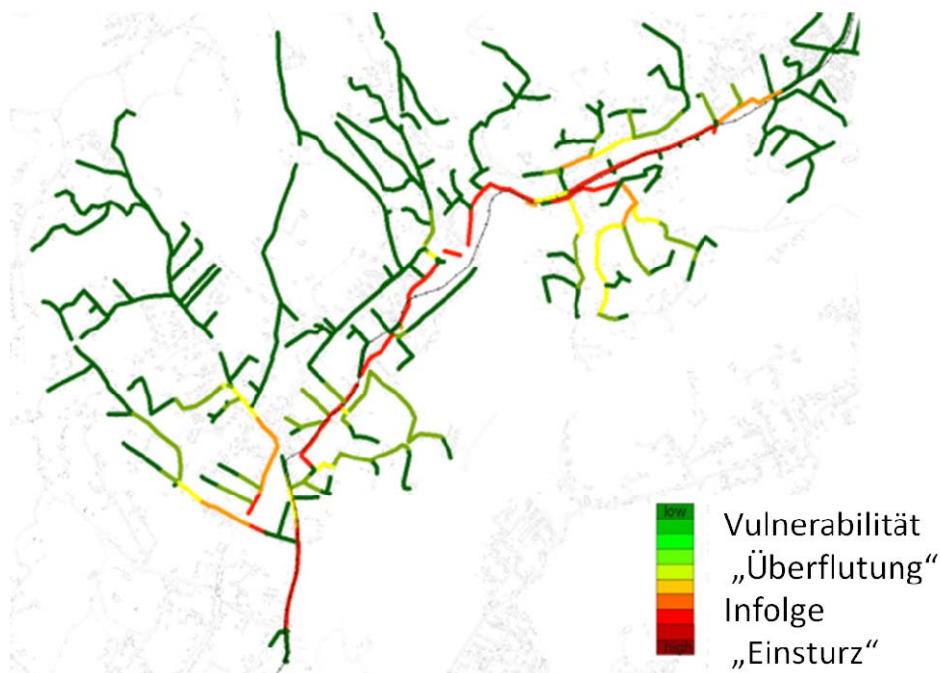


Abbildung 3: Vulnerabilitätskarte „Überflutung“ infolge „Einsturz“

Die Berechnungen des FRI-Ü haben gezeigt, dass 0,5 km der vulnerablen Haltungen (Abbildung 3) eine hohe Einsturzwahrscheinlichkeit aufweisen (Abbildung 4). Diese Kanäle sollten mit höchster Priorität behandelt werden. Zusätzlich wurde mittels LRA-Modell für alle 2.833 Haltungen die rechnerische Wahrscheinlichkeit eines Einsturzes ermittelt. Werden Haltungen gefiltert, die aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften hohe „Odds-Ratios“ aufweisen, ergeben sich 3 km, die eine hohe Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen. Vergleicht man diese mit den TV-Befahrungsergebnissen, wurden bei 50 % dieser Haltungen bereits schwere Versagensarten dokumentiert. Die restlichen 50 % gelten als erhöht gefährdet und sollten bei zukünftigen TV-Inspektionen bevorzugt behandelt werden. Insbesondere wenn es sich dabei um vulnerable Haltungen handelt.

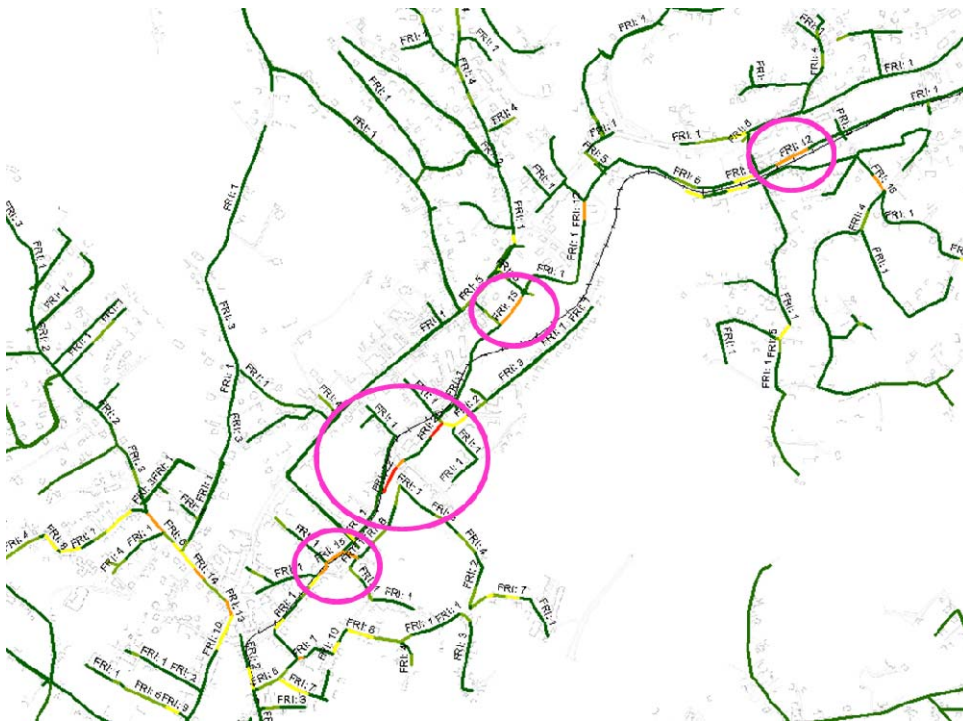


Abbildung 4: FRI-Ü im untersuchten Teilnetz

3.4 FRI Funktionalanforderung „Gefährdung benachbarter Infrastruktur“ (FRI - I)

Abbildung 5 zeigt die Parameter für die Konsequenzbewertung der Funktionalanforderung „Gefährdung angrenzender Infrastruktur“ infolge eines Haltungseinsturzes. Die Bedeutung der einzelnen Infrastrukturen wurde gleichberechtigt gewichtet. Gewichtungen können jedoch bei verfügbaren Kosteninformationen für die Reparatur und Wiederherstellung der Infrastruktur bzw. einer monetärer Bewertung der sozialen Kosten infolge eines Ausfalls der entsprechenden Infrastrukturen abgeleitet werden.

Die Ergebnisse des FRI-I haben gezeigt, dass 0,5 km des Teilnetzes einen $FRI-I \geq 4$ in Bezug auf die Gefährdung von Straßenbahn, verkehrsreicher Straße und Wasserversorgung aufweisen. Wird nur eine bestimmte Infrastruktur in Betracht gezogen, z. B. das Versorgungsnetz, dann steigt diese Länge bis zu 4,9 km. Eine klare Definition und Gewichtung der Konsequenzen von Haltungsschäden für unterschiedliche Infrastrukturen erscheint daher als besonders wichtig.

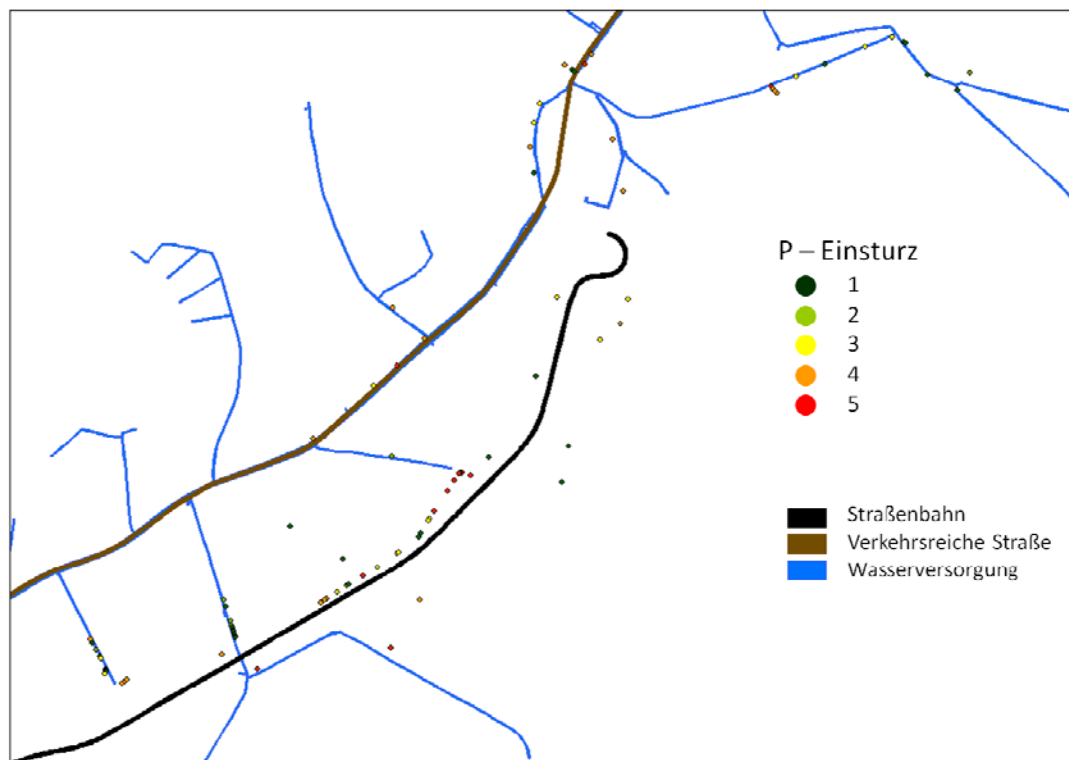


Abbildung 5: „Gefährdung angrenzende Infrastruktur“ infolge „Einsturz“

3.5 Haltungen mit interagierenden FRI (FRI-Ü x FRI-I)

Da sowohl Haltungen mit hohem FRI-Ü als auch Haltungen mit hohem FRI-I für eine Reduktion von Funktionalanforderungen verantwortlich sein können, sind beide Ergebnisse bei weiteren Planungen gesondert voneinander in Betracht zu ziehen. Dennoch war in den gegenständlichen Untersuchungen eine kombinierte Betrachtung der FRI von Interesse. Durch die Kombination von FRI-Ü und FRI-I im Beispielnetz wurde jedoch nur ein Kanalabschnitt als gefährdend für beide Leistungsziele identifiziert. Bei Kombination der FRI-I hinsichtlich Gefährdung der Trinkwasserinfrastruktur mit dem FRI-Ü konnten jedoch 0,5 km risikoreiche Haltungen identifiziert werden.

4 Schlussfolgerungen

Eine Erweiterung von statistischen Schadensprognosemodellen (Davies et al., 2001, Ariaratnam et al., 2001, Ana et al., 2009, Fuchs-Hanusch et al., 2011) auf schadensbildorientierte Risikobewertungen ermöglicht die Identifizierung von

Haltungen, die nicht nur eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit aufweisen, sondern auch eine Reduzierung von Leistungsanforderungen zur Folge haben können. Speziell für die vertiefende Priorisierung von Haltungen für Sanierungen aber auch für eine gezielte selektive Inspektionsplanung bietet dieser Ansatz eine Alternative bzw. eine Erweiterung zu bisherigen Verfahren.

Die Methode wurde im Zuge des INFOSAN Projektes auf ein Teilnetz eines österreichischen Kanalbetreibers angewendet. In einer Vorbewertung durch den Kanalbetreiber wurden im betrachteten Teilnetz auf Basis einer TV-Befahrung 7 km von 85 km der baulichen Zustandsklasse 5 zugeordnet. Bei Anwendung einer Risikobewertung der Haltungen dieses Teilnetzes mit Fokus auf die mittelfristige Einhaltung von zuvor festgelegten relevanten Funktionalanforderungen gemäß EN 752 (2008) wurde eine Länge von 1 km risikoreiche Haltungen identifiziert. Diese weisen insbesondere ein Risiko auf Überflutung und eine Gefährdung der angrenzenden Infrastrukturen infolge „Einsturz“ auf. Diese beiden im Detail untersuchten Funktionalanforderungen wurden vom Betreiber als höchstrelevant eingestuft.

Die Anwendung eines Regressionsmodells auf das Beispielnetz hat gezeigt, dass 50 % der Haltungen mit einsturzsrelevanten Schadensarten mit einem statistischen Modell identifiziert werden können. Es wurden 7 maßgebliche Einflussfaktoren identifiziert, die eine Berechnung der Auftrittswahrscheinlichkeit von einsturzsrelevanten Schadensbildern ermöglichen.

Neben der Gefährdung der Funktionalanforderung „Schutz vor Überflutung“ bei totaler Querschnittsreduktion infolge eines Einsturzes ist in weiterer Folge jedoch noch die Vulnerabilität bei Teilreduktion des Querschnittes zu quantifizieren. Auf Seite der Schadensbildanalyse sind hier andere Zustände in Betracht zu ziehen, dazu zählen Ablagerungen, Verwurzelungen oder Verformungen. Eine Klassifizierung der Zustände in Hinblick auf eine Querschnittsreduktion ist derzeit noch aus keinem Klassifizierungsschema ableitbar. Im Projekt INFOSAN wird jedoch an einer Klassifizierung gearbeitet. Für das unerwünschte Ereignis „Einsturz“ kann, wie erwähnt, die Klassifizierung nach DWA M 149-3 (2007) „Standicherheit“ angewendet werden.

In einem nächsten Schritt des laufenden Forschungsprojekts soll das statistische Modell weiter verifiziert werden, indem es auf einen Teilnetz mit ähnlichen Rahmenbedingungen angewendet wird. Dieses Teilnetz wurde ebenfalls bereits

TV befahren. Durch die Einbeziehung neuer TV-Befahrungsdaten in die Analyse wird darüber hinaus eine Reduzierung von Unsicherheiten der LRA Ergebnisse erwartet.

5 Danksagung

Die beschriebenen Arbeiten werden im Rahmen des Projektes „INFOSAN-Strategische Informationsbeschaffung als Basis für die mittel- und langfristige ganzheitliche Sanierungsplanung von Kanalisationsanlagen in Österreich“ durchgeführt. Das Projekt wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie der am Projekt teilnehmenden Kanalisationsunternehmen gefördert.

Literatur- und Quellenangaben:

- Ana, E., Bauwens, W., Pessemier, M., Thoeye, S. Smolders, S., Boonen I. and De Gueldre G. (2009): “An investigation of factors influencing sewer structural degradation”, *Urban Water Journal*, 6:4, 303-312
- Ariaratnam, S.T., El-Assaly, A. and Yang, Y. (2001). “Assessment of Infrastructure Inspection Needs Using Logistic Regression Models.”, *Journal of Infrastructure Systems*, 12; 160-165
- Campolongo, F., Cariboni, J. and Saltelli, A. (2007). „An effective screening design for sensitivity analysis of large models.“ *Environmental Modelling & Software*, 22(10), 1509-1518.
- Dayton, C.M. (1992). “Logistic Regression Analysis”. Stat 474-574,
<http://bus.utk.edu/stat/datamining/articles.htm>, besucht 11 June 2011
- Davies, J.P., Clarke, B.A., Whiter, J.T., Cunningham, R.J. and Leidi, A. (2001). “The structural condition of rigid sewer pipes: a statistical investigation.”; *Urban Water*; 3; 277-286
- Fromm S. (2005). Binäre logistische Regressionsanalyse; *Bamberger Beiträge zur empirischen Sozialforschung*, 11, ISSN 1611-5831/ISSN bzw. http://www.uni-bamberg.de/fileadmin/uni/fakultaeten/sowi_lehrstuehle/empirische_sozialforschung/pdf/bambergerbeitraege/Log-Reg-BBES.pdf; besucht am 18.1.2012
- Fuchs-Hanusch, D., Friedl, F. and Kogseder, B. (2011). “Effect of Seasonal Climatic Variance on Water Main Failures in Moderate Climate Regions.”; *Conference Proceedings of LESAM 11, Leading Edge in Strategic Asset Management 27.-29. Sep. 2011, Germany*
- Kretschmer F., Möderl M., Fuchs-Hanusch D., Friedl F., Plihal H. and Ertl T. (2012). „Der Einsatz von Kennzahlen bei der standardisierten Sanierungsplanung von Kanalisationen“. Wiener Mitteilungen Band 225.

- Kainz, H., Gangl, G. and Ertl, T. (2006): “Funktionsfähigkeit von Kanalisationsanlagen in Österreich (Reliability of Sewer Systems in Austria)“. *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft*, Technische Universität Graz: 47, S. A1-A10, ISBN 3-902465-52-2
- Möderl, M., Kleidorfer, M., Sitzenfrei, R. and Rauch, W. (2009). „Identifying weak points of urban drainage systems by means of VulNetUD.“, *Water Science and Technology*, 60(10), 2507-2513.
- ATV-M 143-2 (1999). „Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden“; Teil 2: Optische Inspektion
- DWA-M 149-3 (2007). Zustandserfassung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Teil 3: Zustandsklassifizierung und -bewertung
- EN 752 (2008). “Drain and Sewer Systems outside buildings.“, European Committee for Standardization

Bezugsautorin:

Ass.-Prof. DI Dr. Daniela Fuchs-Hanusch,
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz
Stremayrgasse 10, 8010 Graz

Tel: 0664 60 873 8378

E-Mail: fuchs@sww.tugraz.at