



Jakim Paul Lippacher, BSc

**Methoden der Kalibrierung von Trinkwasserverteilnetzen
und deren Einfluss auf die modellbasierte Leckage
Lokalisierung**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Umwelt und Verkehr

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuerin:

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

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. David Bernhard Steffelbauer, BSc

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, März 2018

Kontakt:
Jakim Lippacher
jakim.lippacher@gmx.at

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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

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

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Nachdem mit dieser Arbeit meine Zeit als Studierender und somit auch ein Lebensabschnitt endet, gilt es Danke an meine Familie, meine Freunde, meine Kollegen und meinen Betreuern zu sagen.

Danke an meine Familie, allen voran meinen Eltern Ursula und Peter, für die Möglichkeit ein Studium absolvieren zu dürfen und für die Unterstützung in allen Lebenslagen.

Danke an alle meine Freunde und Studienkollegen, die die Zeit des Studiums definitiv bereicherten. Ein besonderes Dankeschön gilt meiner Freundin Jana, die mich auch in der anstrengenden Zeit, des Verfassens dieser Arbeit bestens unterstützte.

Viel Dank gilt meiner Betreuerin Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch, die es mir ermöglichte, mich vertiefend mit dem Feldversuch in Hart bei Graz und mit der Kalibrierung von Trinkwasserversorgungsnetzen zu beschäftigen.

Besonderer Dank geht auch an meinen mitbetreuenden Assistenten Dipl.-Ing. David B. Steffelbauer, BSc., der mir für viele Gespräche über meine Arbeit zur Verfügung stand und mich allgemein mit der Materie vertrauter machte.

Außerdem möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz, allen voran bei Dipl.-Ing. Markus Günther, BSc., Dipl.-Ing. Michael Pointl, BSc., David Camhy, Georg Arbesser-Rastburg, BSc. und Dipl.-Ing. Roman Maier, BSc. für die Unterstützung bei dieser Arbeit und allgemein für die freundliche Zusammenarbeit am Institut bedanken.

Kurzfassung

Wasser ist ein wertvolles, schützenswertes Gut. Deshalb ist neben der Einhaltung der erforderlichen Wasserqualität die Minimierung von Wasserverlusten eine der großen Anforderungen an Trinkwasserversorgungssysteme. Schäden an unterirdischen Trinkwasserversorgungsleitungen können durch verschiedene Einflüsse entstehen und sind oberirdisch oft nicht direkt erkennbar. Die Detektion und Lokalisation von Leckagen sind somit eine große Aufgabe für Wasserversorgungsunternehmen, um eine Minimierung von Wasserverlusten zu erreichen.

Mit dem, unabhängig von dieser Arbeit, durchgeführten Feldversuch in Hart bei Graz, war die Grundlage für diese Arbeit gelegt. Die Motivation, die Kalibrierung des Rechnetzmodells genauer und mit verschiedenen Methoden durchzuführen und deren Auswirkungen auf die modellbasierte Leckage Lokalisierung zu erarbeiten, führte zu nachfolgenden Zielen: Die Erarbeitung der Schritte, die für eine präzise Kalibrierung eines hydraulischen Modells nötig sind und die Überprüfung, wie sich die Qualität der Ergebnisse der Leckage Lokalisierung verändert, wenn verschiedene Kalibrierungsmethoden angewendet wurden. Zusätzlich stellte sich die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen der Größe der Leckage bzw. der Situierung im Netz und der Qualität des Ergebnisses gibt.

Methodisch wird die Kalibrierung unterteilt in die Vorkalibrierung, die in der Datenaufbereitung grobe Fehler und statistische Ausreißer beseitigt und zusätzlich die geodätischen Höhen der Messpunkte im Netz anpasst, die Szenarienerstellung und die Evaluierung der kalibrierten Modelle. Die Evaluierung unterteilt sich dabei in die Überprüfung der Modellgüte und der Modellqualität.

Das, aus der Vorkalibrierung stammende Modell wurde als Basis für die weiteren Kalibrierungsschritte verwendet. Verschiedene Methoden der Kalibrierung und verschiedene Gruppierungen der Netzparameter wurden durchgeführt. Als beste Methode wurde die automatische Kalibrierung, die die Parameter Rauheit und einen Minor Loss Koeffizienten kalibriert, identifiziert. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Gruppierungen der Netzparameter, ergeben die bauingenieurmäßig sinnvollen Gruppierungen, wie z.B. Einbautendichte oder Zonen, nicht aber die Gruppierung nach Materialien, gering bessere Ergebnisse. Den größten Einfluss auf ein positives Ergebnis nehmen allerdings die Schritte der Vorkalibrierung ein.

Aus den Ergebnissen lässt sich eine Leckagegröße von größer 0,30 l/s für eine erfolgreiche Lokalisation ableiten. Zudem liefert die Leckage Lokalisierung vermutlich genau dann gute Ergebnisse, wenn die hydraulischen Verhältnisse in dem Zeitraum, für den die Leckage Lokalisierung durchgeführt wird, jenen durchschnittlichen Werten ähneln, die für das vergleichende Rechnetzmodell herangezogen wurden.

Ein Ansatz mit kontinuierlicher Kalibrierung für die Detektion und Lokalisation von Leckagen könnte die Qualität der Ergebnisse verbessern.

Abstract

Water is a valuable resource that deserves protection. Therefore, one of the biggest requirements of water distribution systems is the compliance with the required water quality and the minimisation of water loss. There are several possibilities how damages on water distribution pipes, which are not visible from above the ground because they are buried, could occur. The detection and localisation of leakages are a big challenge for the water distribution companies in order to reach the goal of minimising water losses.

The fundament of this thesis is a field study carried out in Hart near Graz, which was done independently of this thesis. The motivation to do the calibration of the hydraulic network model more precisely and with different methods, and to identify the effects on the model-based leakage localisation lead to the following goals: The development of the steps, which are necessary for a precise calibration of a hydraulic model and the review, how the quality of the results is changed by using different calibration methods. In addition, there is the question, if there is a relation between the quality of the results and the size of the leakage and / or the position in the network respectively.

The calibration is classified methodically in the pre-calibration, which eliminates rude errors and outliers and which adjusts geodetically heights of the measurement points in the network, the creation of scenarios and the evaluation of the calibrated models. The evaluation is classified into reviews of model performance and model quality.

The model, which was edited in the pre-calibration, was used for the other steps of calibration. Different methods of calibration and different groupings of the network parameters were executed. The method of an automatic calibration, which calibrates the parameters roughness and minor loss coefficient, proved to be the best method. The comparison of different network parameter showed, that groupings with civil engineer thoughts, like density of valves or areas, but not the grouping which is calibrated by materials, have slightly better results. However, the biggest effect on a positive result turned out to be the steps of the pre-calibration.

From the results, you can deduce that the leak-size has to be greater than 0.30 l/s for a successful localisation. In addition, good results from the leakage localisation were calculated supposedly just at this time, when the hydraulic conditions in the period, when the leakage localisation is executed, were similar to the average values, which were used for the comparative network model.

An approach with a continuous calibration for the detection and localisation of leakages could improve the quality of results.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Motivation	1
1.2	Grundlagen	2
1.2.1	Grundlagen zur Kalibrierung von Wasserversorgungsnetzen	4
1.2.2	Grundlagen zur Leckagedetektion und -lokalisierung	11
1.2.3	Modellbasierte Leckage Lokalisierung	14
1.2.4	Beschreibung der verwendeten Software	16
1.2.5	Beschreibung der verwendeten Simulatoren	18
1.2.6	Beschreibung der verwendeten Verfahren	24
1.2.7	Beschreibung der verwendeten Messgeräte	24
2	Methodik	27
2.1	Vorkalibrierung	27
2.1.1	Datenbereinigung	27
2.1.2	Statistische Betrachtung	27
2.1.3	Auswahl der Daten	28
2.1.4	Anpassung der geodätischen Sensorhöhen	28
2.2	Szenarienerstellung	28
2.3	Evaluierung	28
2.3.1	Grundlagen der Evaluierung	29
2.3.2	Evaluierung der Modellgüte	30
2.3.3	Evaluierung der Modellqualität	32
3	Feldversuch in Hart bei Graz	35
3.1	Geografische und geodätische Lage	36
3.2	Eigenschaften des Trinkwasserverteilnetzes Hart bei Graz	37
3.3	Ablauf des Feldversuchs	39
3.3.1	Platzierung der Sensoren	39
3.3.2	Die Kalibrierungsnacht	40
3.3.3	Künstliche Leckagen und ungestörtes System	42
3.4	Verwendete Modelle	43

3.4.1	Skeletonisierung	45
4	Ergebnisse	47
4.1	Ergebnisse der Vorkalibrierung	47
4.1.1	Ergebnisse der Datenbereinigung.....	47
4.1.2	Ergebnisse der statistischen Betrachtung	47
4.1.3	Ergebnis der Auswahl der Daten	49
4.1.4	Ergebnis der Anpassung der geodätischen Sensorhöhen	50
4.2	Ergebnisse der Szenarienerstellung.....	51
4.2.1	Einführung des Korrekturfaktors für die Zufluss-Messung	54
4.2.2	Einteilung in Kalibrierungs- und Validierungsszenarien	56
4.3	Status Quo der hydraulischen Modelle	59
4.3.1	Modell „Trial-&-Error“	60
4.3.2	Modell „OENORM“.....	61
4.3.3	Modell „vorkalibriert“	61
4.3.4	Status Quo der hydraulischen Modelle – Vergleich	62
4.4	Ergebnisse der Vergleiche	65
4.4.1	Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Kalibrierungsmethoden	66
4.4.2	Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Skeletonisierungsgrade	73
4.4.3	Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung	82
5	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	103
5.1	Vorkalibrierung	103
5.2	Szenarienerstellung.....	107
5.3	Hydraulische Ausgangsmodelle	107
5.4	Verschiedene Kalibrierungsmethoden.....	107
5.5	Verschiedene Skeletonisierungsgrade	108
5.6	Verschiedene Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung	109
5.7	Vergleich der Ergebnisse der Leckage Lokalisierung an verschiedenen Tagen	111
5.8	Herausforderungen dieser Arbeit.....	114

6	Schlussfolgerungen und Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	119
	Anhang.....	i
Anhang A	Beispiele zur Datenbereinigung (Grafana).....	iii
Anhang B	Korrelationsgrafiken mit Validierungsszenarien, verschiedene Modelle	v
Anhang C	Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien, verschiedene Modelle	xiii
Anhang D	Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle	xv
Anhang E	Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle	xxiii
Anhang F	Gantt-Diagramm des Feldversuchs in Hart bei Graz (April bis August 2016)	xxxi

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Grundlegende Methoden des Wasserverlustmanagements (ÖVGW - Regelblatt W 63, 2009)	3
Abbildung 1-2: IWA Wasserbilanz (ÖVGW - Regelblatt W 63, 2009)	3
Abbildung 1-3: Vorgang der impliziten Kalibrierung (Savic u. a., 2009, mod.)	6
Abbildung 1-4: Jenkins Plattform, Übersicht automatische Kalibrierung	18
Abbildung 1-5: Übergabe-Datei für die automatische Kalibrierung	20
Abbildung 1-6: Übergabe-Datei für die Leckage Lokalisierung	22
Abbildung 3-1: Wasserversorgungsnetz Hart bei Graz (SWW, mod.)	35
Abbildung 3-2: Lage des Untersuchungsgebiets (Google Maps, mod.)	36
Abbildung 3-3: Histogramm der Rohrlängen, WVTL Hart bei Graz	37
Abbildung 3-4: Histogramm der Rohrdurchmesser im WVTL Hart bei Graz	38
Abbildung 3-5: Histogramm der Rohrmaterialien im WVTL Hart bei Graz	38
Abbildung 3-6: Histogramm der Verlegejahre der Rohre im WVTL Hart bei Graz	39
Abbildung 3-7: WVN Hart bei Graz: Hydrantenöffnungen am 12. April 2016 (SWW, mod.)	41
Abbildung 3-8: Hydraulisches Modell aus GIS-Daten	44
Abbildung 3-9: Hydraulisches Modell „Jakim“, händisch skeletonisiert	45
Abbildung 3-10: Hydraulisches Modell „Georg“, automatisch skeletonisiert	46
Abbildung 4-1: Durchschnittlicher Tagesgang Zufluss Q, ohne Ausreißer	49
Abbildung 4-2: WVN Hart bei Graz, geschlossener Schieber & geschlossene Leitung (SWW, mod.)	59
Abbildung 4-3: Trial & Error Netz mit Rauheitswerten	61
Abbildung 4-4: Korrelationen: Modell: "Trial-&-Error", Kalibrierungsszenarien	63
Abbildung 4-5: Korrelationen: Modell: "OENORM", Kalibrierungsszenarien	63
Abbildung 4-6: Korrelationen: Modell: "vorkalibriert", Kalibrierungsszenarien	64
Abbildung 4-7: Korrelationen: Modell: automatische Kalibrierung (Rauheit und Minor Loss Koeffizient), Kalibrierungsszenarien	68
Abbildung 4-8: Korrelationen: Modell: automatische Kalibrierung (Rauheit), Kalibrierungsszenarien	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-9: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: Trial-&-Error	70
Abbildung 4-10: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: AC (Rauheit und Minor Loss Koeffizient)	71
Abbildung 4-11: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: AC (Rauheit).....	71
Abbildung 4-12: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Trial-&-Error-Modell (18. April 2016) (SWW)	72
Abbildung 4-13: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: AC (Rauheit und Minor Loss Koeffizient) (18. April 2016) (SWW).....	72
Abbildung 4-14: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: AC (Rauheit) (18. April 2016) (SWW).....	73
Abbildung 4-15: Streuung der Ergebnisse der AC, Modell: „complicated“, ML = 535	74
Abbildung 4-16: Streuung der Ergebnisse der AC, Modell „Jakim“, ML = 1349.....	75
Abbildung 4-17: Streuung der Ergebnisse der AC, Modell: „Georg“, ML = 1570.....	75
Abbildung 4-18: Korrelationen: Modell: „complicated“, Kalibrierungsszenarien	76
Abbildung 4-19: Korrelationen: Modell „Jakim“, Kalibrierungsszenarien	76
Abbildung 4-20: Korrelationen: Modell: „Georg“, Kalibrierungsszenarien	77
Abbildung 4-21: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: „complicated“	79
Abbildung 4-22: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: „Jakim“	80
Abbildung 4-23: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell „Georg“	80
Abbildung 4-24: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: „complicated“ (18. April 2016) (SWW).....	81
Abbildung 4-25: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: „Jakim“ (18. April 2016) (SWW)	81
Abbildung 4-26: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: „Georg“ (18. April 2016) (SWW).....	82
Abbildung 4-27: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Material.....	84
Abbildung 4-28: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Durchmesser	84
Abbildung 4-29: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Verlegejahr	85

Abbildung 4-30: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Zonen	85
Abbildung 4-31: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Einbautendichte.....	86
Abbildung 4-32: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Einbautendichte & Verlegejahr	86
Abbildung 4-33: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Material, Durchmesser & Verlegejahr.....	87
Abbildung 4-34: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Durchmesser & Verlegejahr	87
Abbildung 4-35: Korrelationen: Modell: Durchmesser (02), Kalibrierungsszenarien	88
Abbildung 4-36: Korrelationen: Modell: Verlegejahr (03), Kalibrierungsszenarien	88
Abbildung 4-37: Korrelationen: Modell: Einbautendicht (05), Kalibrierungsszenarien	89
Abbildung 4-38: Korrelationen: Modell: Einbautendichte & Verlegejahr (06), Kalibrierungsszenarien.....	89
Abbildung 4-39: Korrelationen: Modell: Material, Durchmesser & Verlegejahr (07), Kalibrierungsszenarien	90
Abbildung 4-40: Korrelationen: Modell: Durchmesser & Verlegejahr (08), Kalibrierungsszenarien.....	90
Abbildung 4-41: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Durchmesser	94
Abbildung 4-42: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Verlegejahr	95
Abbildung 4-43: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Einbautendichte.....	95
Abbildung 4-44: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Einbautendichte & Verlegejahr	96
Abbildung 4-45: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Material, Durchmesser & Verlegejahr	96
Abbildung 4-46: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Durchmesser & Verlegejahr	97
Abbildung 4-47: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Durchmesser (18. April 2016) (SWW)	97
Abbildung 4-48: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Verlegejahr (18. April 2016) (SWW)	98
Abbildung 4-49: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Einbautendichte (18. April 2016) (SWW).....	98

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-50: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Einbautendichte & Verlegejahr (18. April 2016) (SWW).....	99
Abbildung 4-51: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Material, Durchmesser & Verlegejahr (18. April 2016) (SWW).....	99
Abbildung 4-52: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Durchmesser & Verlegejahr (18. April 2016) (SWW)	100
Abbildung 5-1: Mittlere Druckhöhendifferenz über den Tag mit angepassten geodätischen Höhen, Zeitspanne: 31.05.2016 bis 28.06.2016 am Hydranten HG3933 (SWW)	106
Abbildung 5-2: Mittlere Druckhöhendifferenz über den Tag mit GIS-Originalhöhen, Zeitspanne: 31.05.2016 bis 28.06.2016 am Hydranten HG3933 (SWW)	106
Abbildung 5-3: Mittlere Distanzen der Leckage Lokalisierung, 17.04.2016 - 18.05.2016, Modell „Zonen“	112
Abbildung 5-4: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Zonen (29. April 2016) (SWW).....	112
Abbildung 5-5: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Zonen (17. Mai 2016) (SWW)	113
Abbildung 5-6: Vergleich der mittleren Distanzen der Leckage Lokalisierung, 17.04.2016 - 18.05.2016, Modell „Zonen, Netz: „Jakim““ und Modell „Einbautendichte, Netz: „Georg““	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Hydrantenöffnungsplan, 12.04.2016, Phase 1 (Ramaseder, 2016, SWW, mod.)	41
Tabelle 3-2:	Hydrantenöffnungsplan, 12.04.2016, Phase 2 (Ramaseder, 2016, SWW, mod.)	42
Tabelle 3-3:	Zeitplan der generierten künstlichen Leckagen	43
Tabelle 4-1:	Ausreißer nach Tukey's Test im Nachtminimum	48
Tabelle 4-2:	Durchschnittsmesswerte 30.05.2016 - 21.06.2016, 01:00 Uhr - 04:30 Uhr	50
Tabelle 4-3:	Durchschnittswerte 26. & 27.07.2016 & 05.08.2016 - 16.08.2016, 01:00 Uhr – 04:30 Uhr	50
Tabelle 4-4:	Anpassung der geodätischen Höhen im hydraulischen Modell.....	51
Tabelle 4-5:	Szenarien 00 bis 07, gemessene Werte.....	52
Tabelle 4-6:	Szenarien 08 bis 14, gemessene Werte.....	53
Tabelle 4-7:	Differenzen zwischen Zu- und Abflüsse der Szenarien 01, 06, 07, 11, 12 und 14	54
Tabelle 4-8:	Korrigierte Differenzen der Zu- und Abflüsse der Szenarien 01, 06, 07, 11, 12 und 14	56
Tabelle 4-9:	Szenarien 00 bis 07, gemessene und errechnete Werte.....	57
Tabelle 4-10:	Szenarien 08 bis 14, gemessene und errechnete Werte.....	58
Tabelle 4-11:	Differenz gemessener zu errechneten Druckhöhen; Trial & Error Kalibrierung, Szenarien aus der Lehrveranstaltung.....	60
Tabelle 4-12:	Zonenbeschreibung der Trial-&-Error-Kalibrierung.....	60
Tabelle 4-13:	Mittlere Abweichungen der Drücke bei den hydraulischen Grundmodellen.....	62
Tabelle 4-14:	Übersicht der Evaluierungsmethoden mit Zuordnung der Vergleichskapitel	65
Tabelle 4-15:	Zulässige Abweichungen der Einzelmessungen und Grenzen für den Erwartungswert der Druckabweichung nach DVGW Arbeitsblatt 303-1	66
Tabelle 4-16:	Ergebnisse Modellgüte (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden)	67
Tabelle 4-17:	Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden).....	68
Tabelle 4-18:	Ergebnisse Modellqualität (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden)	73
Tabelle 4-19:	Ergebnisse Modellgüte (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade).....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-20: Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade).....	78
Tabelle 4-21: Ergebnisse Modellqualität (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade)	82
Tabelle 4-22: Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung	83
Tabelle 4-23: Ergebnisse Modellgüte (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung)	91
Tabelle 4-24: Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen, Modelle 01 bis 04)	92
Tabelle 4-25: Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Parameter-gruppierungen, Modelle 05 bis 08)	93
Tabelle 4-26: Ergebnisse Modellqualität (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung)	101
Tabelle 5-1: Differenzen der Mittelwerte im Nachtminimum, vor und nach Tukey's Test.....	104
Tabelle 5-2: Höhendifferenz bei der Anpassung der geodätischen Sensorhöhen mit verschiedenen Rauheiten	105

Abkürzungsverzeichnis

AC	Automatische Kalibrierung (Automatic Calibration)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
GA	Genetischer Algorithmus
GGG	Duktiler Grauguss
GIS	Geoinformationssystem
LL	Leckage Lokalisierung (Leakage Localisation)
ML	Minor Loss Koeffizient
mWS	Meter Wassersäule
NMF	Nachtminimumdurchfluss (Nightminimumflow)
ÖVGW	Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
ST	Stahl
SWW	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz
TWVS	Trinkwasserversorgungssystem
WVN	Wasserversorgungsnetz

1 Einleitung

Wasser ist ein wertvolles, schützenswertes Gut. Neben des Sicherstellens einer erforderlichen Wasserqualität (ÖNORM EN 805, 2000) ist die Minimierung von Wasserverlusten (ÖVGW - *Regelblatt W 63*, 2009) eine weitere sehr wichtige Anforderung an Trinkwasserversorgungssysteme (TWVS).

Da die Infrastruktur der Wasserversorgung jedoch verschiedenen Einflüssen ausgesetzt ist, können Schäden oft auftreten, die ob der Tatsache, dass der größte Teil der Infrastruktur unter der Erde vergraben ist, nicht sofort und offensichtlich erkennbar sind. Demnach gibt es kein TWVS, in dem es keine Leckagen gibt, was zu signifikanten ökonomischen Verlusten führen kann. Daher ist die Leckage Detektion und Lokalisation in TWVS eine große Aufgabe für Wasserversorgungsunternehmen.

In diesem Kapitel bieten die einleitenden Worte Potential für die Motivation und die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit. Anschließend wird auf Grundlagen verschiedener Art eingegangen und mit der Beschreibung von verwendeter Software, Simulatoren, Verfahren und Messgeräten dieses Kapitel abgerundet.

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Ausgangspunkt dieser Arbeit war ein Feldversuch im Wasserversorgungsnetz (WVN) Hart bei Graz im Jahr 2016. Nachdem bereits einige nicht zufriedenstellenden Ergebnisse vorhanden waren, war es erforderlich, den Feldversuch nochmals aufzuarbeiten.

Mit der grundsätzlichen Motivation, die Leckagen in Trinkwassernetzen rasch zu lokalisieren, wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz (SWW) der Simulator *Leakage Localisation* entwickelt. Die Kalibrierung des in der Simulation verwendeten hydraulischen Modells stellt einen zentralen Punkt in der Vorbereitung der modellbasierten Leckage Lokalisierung dar.

Mit dem Messdatenmanagement und einem Tool zur *Automatic Calibration*, das ebenfalls am SWW entwickelt wurde, waren die Eckpfeiler der Aufgabenstellung gesteckt.

In dieser Masterarbeit wurden folgende Forschungsfragen behandelt:

- Welche Schritte sind notwendig für eine präzise Kalibrierung?
- Wie kann man Fehler verschiedener Art in einem hydraulischen Modell handhaben?
- Können die Ergebnisse der Leckage Lokalisierung durch eine verbesserte Kalibrierung verbessert werden?

- Wie verändert sich die Qualität der Ergebnisse der Leckage Lokalisierung, wenn verschiedene Kalibrierungsmethoden, verschieden skeletonisierte Modelle und verschiedene Gruppierungen der Parameter in der automatischen Kalibrierung verwendet werden?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Qualität der Ergebnisse der Leckage Lokalisierung und der Größe der künstlich erzeugten Leckage und / oder der Situierung der künstlichen Leckage im Netz?

1.2 Grundlagen

Im Kapitel der Grundlagen wird darauf eingegangen, wie die Vorgaben zur Vorgehensweise bei der Kalibrierung von Trinkwasserverteilnetzen sind. Grundlagen im Bereich des Wasserverlustmanagements werden erörtert.

Gemäß der International Water Association (IWA) sind die vier grundlegenden Methoden des Wasserverlustmanagement das Infrastrukturmanagement, die Geschwindigkeit und Qualität der Reparatur, das Druckmanagement und die Wasserverlustüberwachung und Leckortung, siehe dazu Abbildung 1-1. Die realen Verluste bestehen dabei aus den unvermeidbaren jährlichen realen Verlusten (UARL) und den potentiell einzusparenden realen Verlusten (CARL). Diese Arbeit beschäftigt sich genauer mit dem rechten Pfeil der Abbildung 1-1, genauer: mit der Leckortung und der Leckage Lokalisation mit dem Ziel, die realen Verluste zu minimieren.

Um die Wasserverluste effektiv reduzieren zu können, braucht es eine geeignete Grundlage. Diese ist mit der Wasserbilanz eines Versorgungssystems gegeben. Die Begriffe und der Aufbau dieser sind in der IWA Wasserbilanz in Abbildung 1-2 dargestellt.

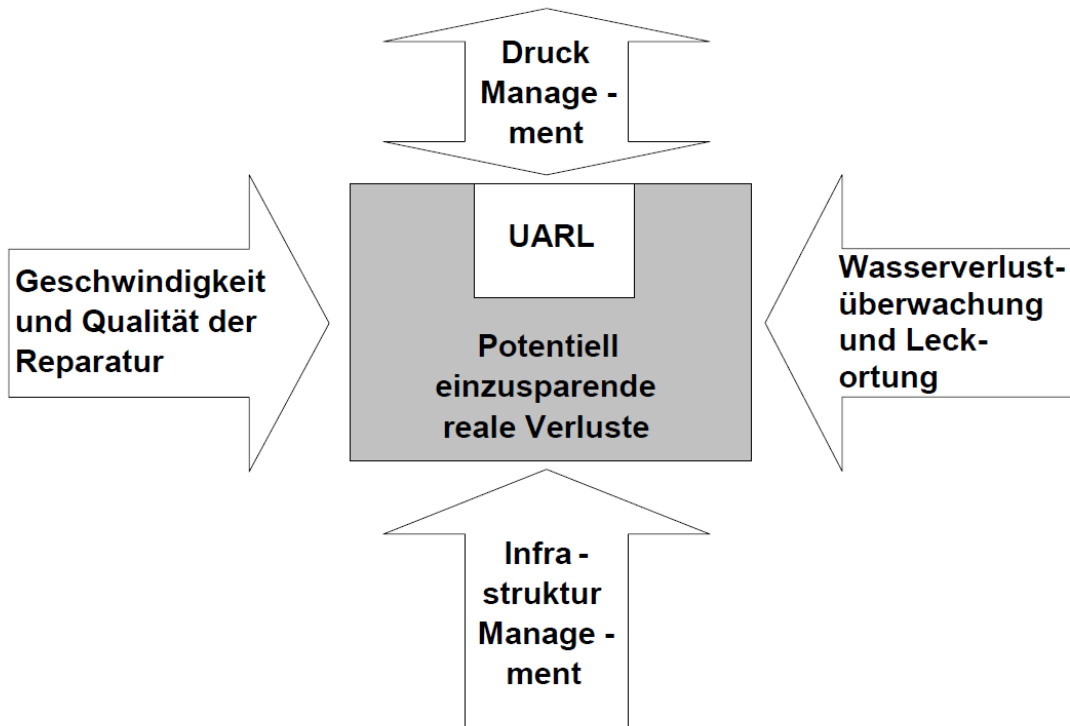


Abbildung 1-1: Grundlegende Methoden des Wasserverlustmanagements (ÖVGW - Regelblatt W 63, 2009)

System- einspeisung Q_{SYS}	Wasser- abgabe	Entgeltliche Abgabe	Gemessener entgeltlicher Verbrauch	In Rechnung gestellte Wasser- menge
			Nicht gemessener entgeltlicher Verbrauch	
		Un- entgeltliche Abgabe	Gemessener unentgeltlicher Verbrauch	
			Nicht gemessener unentgeltlicher Verbrauch	
	Wasser- verluste Q_{VR}	Scheinbare Verluste	Zählerabweichungen und Fehler bei der Rechnungslegung	Nicht in Rechnung gestellte Wasser- menge Q_{NRW}
			Schleichverluste	
			Unzulässige Wasserentnahme	
		Reale Wasser- verluste	Zubringerleitungen	
Behälter				
	Versorgungsleitungen			
	Anschlussleitungen bis zum Wasserzähler			

Abbildung 1-2: IWA Wasserbilanz (ÖVGW - Regelblatt W 63, 2009)

Die Systemeinspeisung unterteilt sich dabei in die entgeltlichen und unentgeltlichen Abgaben, die scheinbaren Verluste und die realen Verluste. Die drei letztgenannten vereinigen sich zu der nicht in Rechnung gestellten Wassermenge, die in Österreich rund 16 % der Systemeinspeisemenge ausmacht (ÖVGW Benchmarking, 2017). Die unentgeltlichen Abgaben, beispielsweise Wassernutzung für Straßenreinigung, Feuerbekämpfung und Gießen öffentlicher Grünanlagen, und die scheinbaren Verluste werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Motivation dieser Arbeit ist die Minimierung der realen Wasserverluste, vor allem jener über Leckagen an Wasserversorgungsleitungen.

Die Einteilung der realen Wasserverluste erfolgt nach dem „Burst and Background Estimates“ (BABE) Konzept (Lambert, 1994). Diese unterteilen sich in nicht detektierbare Hintergrundverluste, nicht gemeldete, detektierbare Leckagen und gemeldete, detektierbare Leckagen.

Die nicht detektierbaren Hintergrundverluste sind kleine, nicht sichtbare und nicht hörbare Lecks zumeist an Verbindungen oder Einbauten mit geringer ausfließender Wassermenge. Diese können geringfügig durch Druckmanagement oder Erneuerung der Leitungen minimiert werden. Nicht gemeldete, aber detektierbare Leckagen werden nach Stand der Technik mit Methoden der aktiven und passiven Leckkontrolle detektiert und lokalisiert. Mittels einer aktiven Leckkontrolle durch die Überwachung von Einspeisemengen in einem hydraulisch begrenzten Gebiet (Messzone) können die Laufzeiten dieser Leckagen verkürzt werden. Gemeldete und detektierbare Leckagen haben vergleichsweise einen größeren Leckagefluss. Dadurch, dass sie jedoch in der Regel von der Bevölkerung oder Kunden dem Wasserversorger relativ schnell gemeldet werden und ein rasches Eingreifen möglich ist, sind die Laufzeiten dieser Leckagen kurz.

Diese Arbeit beschäftigt sich u.a. mit dem Simulator der *Leakage Localisation*, der Leckagen in einem Modell bestmöglich lokalisieren soll. Mittels der modellgestützten Leckageeingrenzung soll mit diesem Simulator die Eingriffszeit zwischen Detektion und Lokalisierung einer Leckage effektiv verkürzt werden. Durch die Eingrenzung der Leckage auf wenige hundert Meter in einem Teilnetz, können die ausgesandten Leckortungstrupps die mögliche Leckage schneller orten und früher entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten. (Steffelbauer u. a., 2017)

1.2.1 Grundlagen zur Kalibrierung von Wasserversorgungsnetzen

Während es in österreichischen Richtlinien keine Hinweise gibt, wie hydraulische Modelle von Trinkwasserversorgungsnetzen am besten kalibriert werden können, liefert das Arbeitsblatt GW 303-1 des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) eine Anleitung zur Erstellung eines Rechnernetzmodells (DVGW GW 303-1, 2006). In dieser wird grundsätzlich die Annahme von hydraulischen Rauheiten, wie sie auch in der ÖNORM EN 805, 2000 zu finden sind, mit

0,1 – 0,4 mm für Zubringer- und Hauptleitungen und 0,4 – 1,0 mm für Versorgungsleitungen erwähnt. Da das Arbeitsblatt DVGW GW 303-1, 2006 jedoch auch von einer Erstellung eines Rechenetzmodells handelt, steht in dieser:

„Für die Berechnung bestehender Rohrleitungen und Rohrnetze sind die Rauheiten grundsätzlich durch Vergleichsmessung und Vergleichsrechnung zu bestimmen.“

(DVGW GW 303-1, 2006, S. 11)

Die im Arbeitsblatt DVGW GW 303-1, 2006 beschriebene Vorgehensweise für die Erstellung eines Rechenetzmodells wird in 1.2.1.1 näher erläutert.

Weitere Grundlagen zur Kalibrierung von Wasserversorgungsnetzen lassen sich aus Haestad Methods, Inc, 2003, einem umfangreichen Nachschlagewerk für die Modellierung und das Management von Wasserverteilsystemen entnehmen. Neben vielen Informationen darüber, wie man z.B. bei der Kalibrierung von WVN agieren soll, werden auch potentielle Fehlerquellen erläutert. Ganz allgemein ist der Hinweis auf gute Datenqualität, der im Feld gewonnenen Messdaten entscheidend, denn gute Daten bringen gute Ergebnisse und schlechte Daten schlechte Ergebnisse. Begründet ist dies damit, dass ein Algorithmus, der für Rauheitswerte der Leitungen ein optimales Ergebnis sucht, dieses natürlich mit den Eingangsdaten macht und nicht entscheiden kann, ob diese von guter oder weniger guter Qualität sind. (Haestad Methods, Inc, 2003)

Der Kalibrierungsprozess ist aus mehreren Gründen notwendig. So soll er Vertrauen geben, dass die existierenden Verhältnisse im Feld im Modell reproduziert werden können. Für den Modellierer soll sich ein Verständnis für das System, das er kalibriert, entwickeln, und das Erkennen von Fehlern im Modell, wie z.B. falsche Durchmesser, fehlende Leitungen oder geschlossener Schieber, soll ermöglicht werden. (Haestad Methods, Inc, 2003)

Ormsbee & Lingireddy, 1997, beschreiben die Kalibrierung mit einem siebenstufigen Ansatz. Zuerst geht es darum, den weiteren Gebrauch des Modells festzulegen, denn je nachdem, was die zukünftigen Anwendungen sind, muss bestimmt werden, mit welcher Genauigkeit das Modell modelliert wird, welche Daten zu erheben sind und wie groß die Fehlertoleranz ist. Im zweiten Schritt geht es um die Abschätzung, in welchem Bereich die Modellparameter sein werden. Anschließend geht es um das Generieren und Sammeln von Kalibrierungsmessdaten. Bei einer ersten Evaluierung des Vergleichs zwischen gemessenen und errechneten Werten, können grobe Fehler bereits detektiert werden und in einer Art „Makrokalibrierung“ oder „Vorkalibrierung“ eliminiert werden. Mit dem vorletzten Schritt empfiehlt Ormsbee eine Sensitivitätsanalyse, so kann der Einfluss unterschiedlicher Modellparameter auf das Gesamtergebnis überprüft werden. Der letzte Schritt behandelt das „Finetuning“ oder die „Mikrokalibrierung“ des Modells.

Savic u. a., 2009 teilt die Arten der Modellkalibrierung in drei Kategorien ein, Modelle, die aus einem iterativen Prozess entstehen, explizite Modelle und implizite Modelle.

Iteratives Kalibrieren erfolgt nach der Methode Trial-&-Error, Parameter werden angenommen, Massenbilanzen und Energiegleichungen gelöst, um zu einem Ergebnis zu kommen. In weiteren Schritten werden Parameter verändert und die Ergebnisse stets mit dem vorigen verglichen. So wird schrittweise das Ergebnis verbessert, bis es nicht mehr besser wird. (Savic u. a., 2009)

Explizites Modellkalibrieren basiert auf der Lösung einer größeren Anzahl von Massenbilanz- und Energiegleichungen. Dabei ist die Anzahl der unbekannt Kalibrierungsparameter begrenzt auf die Anzahl der verfügbaren Messungen. Ist die Anzahl größer, müssen die Kalibrierungsparameter gruppiert werden, da es sich sonst um ein unterbestimmtes Gleichungssystem handelt. Ein weiterer Nachteil der expliziten Methode ist, dass Messfehler nicht als solche identifiziert werden können. (Savic u. a., 2009)

Implizite Modellkalibrierungen werden als Optimierungsprobleme betrachtet. Im Zusammenspiel eines Optimierers und dem Lösen der hydraulischen Berechnungen mittels eines Simulators werden Ergebnisse generiert. Dieser Vorgang, wie der Optimierer die Parameter setzt bzw. korrigiert und der Simulator die anfänglichen bzw. korrigierten Daten in einem angepassten Modell wieder an den Optimierer zurückgibt, wird in Abbildung 1-3 dargestellt. (Savic u. a., 2009)

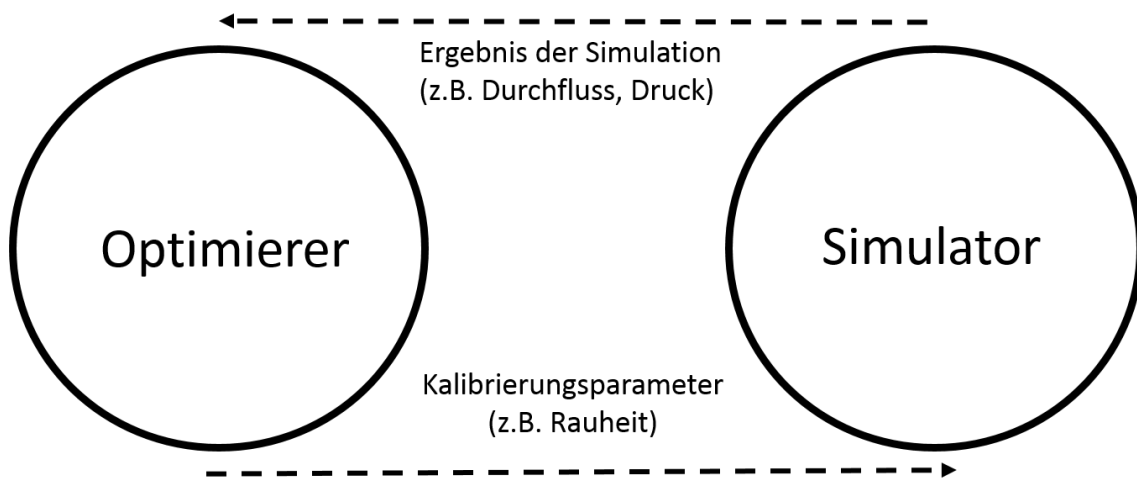


Abbildung 1-3: Vorgang der impliziten Kalibrierung (Savic u. a., 2009, mod.)

Um die Differenzen zwischen gemessenen und simulierten Werten zu minimieren, verwendet der Optimierer eine Zielfunktion, die allgemein wie folgt lauten kann (Gleichung 1-1):

$$\min_x f(x) = \sum_{i=1}^n w_i |y_i^{obs} - y_i(x)|^p \quad \text{Gleichung 1-1}$$

mit:

f ... zu minimierende Zielfunktion, x ... Vektor der unbekannt Parameter, n ... Anzahl der Messungen, w_i ... Gewichtungsfaktoren, y_i^{obs} ... Messvariablen, y_i(x) ... Simulationsvariablen, p ... Exponent für die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Ergebnis, i.d.R. mit p=2 die euklidische Distanz.

Beim impliziten Ansatz werden in der Regel Randbedingungen auf Seiten des Systems (Massenbilanz- und Energiegleichungen) und bei den zu kalibrierenden Parametern (Grenzwerte) definiert. (Savic u. a., 2009)

Neben den erwähnten Kalibrierungen des stationären Zustands und der Extended-Period-Simulationen gibt es auch die Transienten basierte Kalibrierung von Modellen.

Für die Kalibrierung von Modellen von WVN werden zwei Optimierungsmethoden unterschieden. Auf der einen Seite nicht-evolutionäre Optimierungsmethoden und auf der anderen Seite evolutionäre. Bei ersteren, dominieren Gradienten basierte Optimierungsmethoden (z.B. Lansey & Basnet, 1991). Aber auch andere Methoden wie komplexe Methoden (Ormsbee, 1989) oder die Levenberg-Marquardt Methode (Pudar & Liggett, 1992) befinden sich in der Literatur. Auf der Seite der evolutionären Optimierungsmethoden sind vor allem genetische Algorithmen (GA) Stand der Technik. Die Vorteile gegenüber den nicht-evolutionären Methoden liegen darin, dass keine komplexen mathematischen Hintergründe nötig sind um Sensitivitäten zu berechnen, GAs umfangreiche Kalibrierungsprobleme gut bearbeiten können und durch die parallele Eigenschaft von GAs, die Berechnungen ebenfalls parallelisiert und somit beschleunigt werden können. Der größte Nachteil ist jedoch, dass nicht sichergestellt werden kann, dass das globale Optimum als Lösung präsentiert wird. (Savic u. a., 2009)

In seinem Fazit verneint Savic seine am Beginn gestellte Frage, ob die Kalibrierung von WVN ein gelöstes Problem ist mit „noch nicht“. Er begründet dies unter anderem damit, dass die bereits entwickelten Werkzeuge der automatischen Kalibrierung in der Praxis oft nicht verwendet werden. Mögliche Gründe dafür sieht er in den zusätzlichen Kosten für Betreiber oder auch darin, dass unkalibrierte hydraulische Modelle heutzutage bereits gut genug sind und Wasserversorgungsunternehmen daher keinen Grund sehen, ihr Modell kalibrieren zu müssen. (Savic u. a., 2009)

Über mögliche Probleme bei der Modellkalibrierung spricht Walski in „Sherlock Holmes Meets Hardy-Cross“ (Walski, 1990). Darin meint er, dass manchmal ein bisschen Detektivarbeit, ein wenig Intuition und eine gewisse Portion Glück nötig sind, um ein Modell gut zu kalibrieren. Aufgezählt werden dabei Probleme, die bei einer Modellkalibrierung in Austin, Texas, USA aufgetreten sind. Das Netz in

Austin wird von mehreren Betreibern betreut und war ein sehr schnell wachsendes Trinkwassernetz. Durch die verschiedenen Zuständigkeiten kam es vor, dass auf dieselbe Frage an drei verschiedene Personen drei verschiedene Antworten gegeben wurden. Beispiele der Probleme, die auftraten, waren zwei geschlossene Absperrorgane in der Nähe eines Hydranten, tatsächlich existierende, aber nicht in den Plänen aufscheinende Einbauten, falsche Zugehörigkeit von Kunden zu einzelnen Druckzonen, oder falsche geodätische Höhenangaben. Weitere Probleme waren Leitungen, die in Plänen aufschienen und somit in das Modell integriert wurden, real auch existierten, aber aus verschiedenen Gründen nie in Betrieb genommen wurden. Die Frage, ob Teilnetze verschiedener Betreiber eine Verbindung haben oder nicht, wurde u.a. erörtert. Auch auf die Frage, wann ein Schieber wirklich offen ist, gab es wohl verschiedene Antworten. Der „offene“ Schieber, der sich mit drei Umdrehungen wieder ganz schließen ließ, war es offensichtlich nicht. (Walski, 1990)

1.2.1.1 Erstellung des Rechenetzmodells (DVGW GW 303-1)

Im Kapitel *Erstellung des Rechenetzes* in DVGW GW 303-1, 2006 werden die erforderlichen Unterlagen, die Daten des Rechenetzmodells, die Ableitung des Rechenetzmodells, die Vergleichsmessung und die Vergleichsrechnung bzw. Kalibrierung des Rechenetzmodells erläutert. (DVGW GW 303-1, 2006)

1.2.1.1.1 Erforderliche Unterlagen

Ziel des Rechenetzmodells ist es, eine möglichst reale Abbildung des Versorgungssystems darzustellen. Die dafür nötigen Unterlagen sind Rohrnetzpläne, in denen die Lage aller Leitungen, Einbindungen und Speiseanlagen eingetragen sind, sowie weitere netzbeschreibende Unterlagen. Druckzonen sind hierbei besonders hervorzuheben. Diese Daten können oft zu einem großen Teil aus einem GIS exportiert werden. (DVGW GW 303-1, 2006)

1.2.1.1.2 Daten des Rechenetzmodells

Nachfolgende Daten sind für die Erstellung eines Rechenetzmodells notwendig:

- Rohrinnendurchmesser
- Rohrleitungslängen
- Betriebliche Rauheit
- Drücke an den Speisestellen
- Geodätische Höhen an den Knoten
- Lufttemperatur
- Luftdruck
- Speisemenge

- Verbrauch je Knoten
- Temperatur des Mediums
- Dichte des Mediums
- Kinematische Viskosität des Mediums

Zusätzliche Daten, wie Leitungsmaterialien, Leitungsalter, Leitungsnennndruck oder andere Angaben zum Leitungszustand können als Metadaten zur Verbesserung des Rechenetzmodells beitragen. (DVGW GW 303-1, 2006)

1.2.1.1.3 Ableitung des Rechenetzmodells

Grundlegend besteht ein Rechenetzmodell aus Knoten (zumeist Verbindungs- oder Endpunkte) und Strecken (in der Regel Leitungen), wobei eine Strecke zumeist das Abbild eines Leitungsabschnitts ist, das homogene Eigenschaften aufweist. Bezüglich einer möglichen Vereinfachung, um gegebenenfalls Rechenzeit einzusparen, ist die Empfehlung, dass im vermaschten Bereich des Netzes alle Leitungen im Rechenetzplan vorkommen. Kurze Endleitungen ohne Verbrauch können entfallen, allgemein gesagt, können Vereinfachungen, die im Rechenetzmodell keine hydraulischen Auswirkungen, positiv wie negativ, bewirken, durchgeführt werden. Neben den Knoten und den Strecken sind die weiteren Basisdaten: Armaturen (Hydranten, Schieber), Verbrauch oder Verbrauchsverteilungen, Ein- und Ausspeisungen und die physikalischen Stoffwerte. (DVGW GW 303-1, 2006)

Betriebliche Rauheiten sind wie bereits in 1.2.1 zitiert, durch Vergleichsrechnung zu bestimmen, wenn diese nicht durchführbar ist, können die empfohlenen Werte, die auch bereits in 1.2.1 erläutert sind, verwendet werden (DVGW GW 303-1, 2006).

Einspeisemengen oder Einspeisedrücke müssen für ein Rechenetzmodell auch gemessen werden, bei Wasserbehältern gilt es, die Wasserstandshöhe zu berücksichtigen (DVGW GW 303-1, 2006).

Die geodätischen Höhen der Knoten sind mit einer Genauigkeit von $\pm 1,0$ m in das Rechenetzmodell zu implementieren, jene Knoten, an denen Messgeräte für die Vergleichsmessung installiert sind, sind mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ m zu implementieren (DVGW GW 303-1, 2006).

Der Verbrauch muss im Netz entsprechend den Kunden verteilt werden. Grundlage der Verbrauchsverteilung sind die Verbräuche eines Ablesezeitraums aller Kunden im betrachteten Netz (DVGW GW 303-1, 2006).

Der Einfluss der Wassertemperatur auf das Rechenergebnis ist vernachlässigbar, die Wassertemperatur kann deshalb mit 4 °C angenommen werden. Dichte und Viskosität sind auf diese Temperatur zu beziehen (DVGW GW 303-1, 2006).

1.2.1.1.4 Vergleichsmessung

Die anfangs im Rechnetz angesetzten Werte für die Rauheit sind nur Schätzwerte, mögliche Inkrustationen, Ablagerungen und der Einfluss von Einbauten ist noch nicht berücksichtigt. Um die betriebliche Rauheit ermitteln zu können, müssen Vergleichsmessungen durchgeführt werden. Mit diesen Ergebnissen erfolgt anschließend die Vergleichsrechnung bzw. Kalibrierung. (DVGW GW 303-1, 2006)

Für diese Vergleichsmessungen gilt es im Wasserversorgungsnetz Entnahmen durchzuführen, die ausreichend Druckverluste generieren. Dafür haben sich Messungen zu verbrauchsarmen Zeiten (in der Nacht) als vorteilhaft erwiesen. (DVGW GW 303-1, 2006)

Während der Vergleichsmessung sind, mit synchronisiertem Zeitstempel versehen, nachfolgende Werte zu erfassen:

- Drücke, Durchflüsse und Behälterstände an den Einspeisestellen,
- Durchflüsse an den Ausspeisestellen
- Drücke in Punkten im Netz
- Durchflüsse der gezielten Netzentnahmen (Hydrantenentnahmen)
- Verbrauch von etwaigen großen Sonderkunden

Für die Vergleichsrechnungen, die auf den Vergleichsmessungen aufbauen, sind möglichst jene Verbrauchswerte zu verwenden, die zeitlich zu jenen der Vergleichsmessungen passen. Wichtig für die Vergleichsmessungen sind zudem die Erfassung von verschiedenen Betriebszuständen. (DVGW GW 303-1, 2006)

Ein Vergleich des Ruhedrucks ermöglicht es, grobe Fehler der Höhenermittlung der Messpunkte und Anzeigenfehler der Messgeräte zu eliminieren. (DVGW GW 303-1, 2006)

1.2.1.1.5 Vergleichsrechnung bzw. Kalibrierung des Rechnetzmodells

Bei der Vergleichsrechnung werden die betrieblichen Rauheiten kalibriert, mit dem Ziel, dass die Abweichungen zwischen errechneten und gemessenen Druckwerten an den Messpunkten möglichst klein und nicht größer als ein Schwellenwert sind. Beim Start der Berechnung wird zunächst eine einheitliche Rauheit an alle Leitungen des Netzes angesetzt. Ausnahmen davon können nur in begründeten Fällen vorgenommen werden. Ebenso darf die ursprünglich angenommene Verbrauchsverteilung nicht verändert werden. (DVGW GW 303-1, 2006)

Wenn die Druckabweichungen an jedem Messpunkt kleiner als 2 % des Ruhedrucks am entsprechenden Messpunkt sind und zusätzlich der Erwartungswert der Druckabweichung zwischen dem negativen und positiven Grenzwert der zulässigen Abweichung der Einzelmessung (dividiert durch die Wurzel der Anzahl

der Messstellen) ist, wird die Vergleichsrechnung als zutreffend bezeichnet. Die Schwellenwerte, wann eine Vergleichsrechnung als zutreffend gilt, sind genauer in Kapitel 2.3.2.5 erklärt, da an dortiger Stelle die Methodik erläutert wird. (DVGW GW 303-1, 2006)

Wenn die Abweichungen zu groß sind, kann dies auf Fehlstellen, Engpässe, nicht bekannte geschlossene Absperreinrichtungen, größere Verluste oder auch fehlende Übereinstimmungen zwischen Rohrnetz und Planunterlagen zurückzuführen sein. Eindeutig festgestellte, geschlossene Absperreinrichtungen sind in der Vergleichsrechnung zu berücksichtigen. Sollten gröbere Fehler nicht zuordenbar sein, ist eine eindeutige Bestimmung der betrieblichen Rauheit nicht möglich und eine weitere Vorgehensweise muss beschlossen werden. (DVGW GW 303-1, 2006)

1.2.2 Grundlagen zur Leckagedetektion und -lokalisierung

Methoden der Leckagedetektion und der Leckagelokalisierung, die am Stand der Technik sind, werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Grundlage dafür ist die Richtlinie W 63 der österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW) (*ÖVGW - Regelblatt W 63*, 2009).

1.2.2.1 Turnusmäßige Überwachung (Inspektionen auf Dichtheit)

Bei der turnusmäßigen Überwachung wird das Rohrnetz in regelmäßigen Intervallen überprüft. Die Inspektion auf Dichtheit setzt sich dabei u.a. aus nachfolgenden Komponenten zusammen: Prüfung der Geländeoberfläche durch Trassenbegehung und der Prüfung der Dichtheit und Gängigkeit der Hydranten. Empfohlen werden Inspektionszeiträume von ein bis fünf Jahren. (*ÖVGW - Regelblatt W 63*, 2009)

Detailliertere Tätigkeitsbeschreibungen der turnusmäßigen Überwachung von WVN sind in der ÖVGW Richtlinie W59 und ÖNORM B 2539 nachzulesen.

1.2.2.2 Nachtminimumdurchfluss-Überwachung

Bei der Nachtminimumdurchfluss-Überwachung, oder auch Nachtmindestverbrauchsmessung werden die Zuflüsse in eine abgegrenzte Versorgungszone (District Metered Area – DMA) in den Nachtstunden zwischen in etwa 01:00 Uhr und 04:00 Uhr gemessen. Die gemessenen Werte werden dann mit Erfahrungswerten des Verbrauchs verglichen, die bei 0,4 m³/h bis 0,8 m³/h je 1000 versorgte Einwohner liegt (*ÖVGW - Regelblatt W 63*, 2009). Ein möglicher industrieller Nachtverbrauch in dieser Zone muss natürlich berücksichtigt werden. Die Messung muss mindestens über eine Stunde erfolgen, der Zeitbereich ist individuell an das dortige Verbrauchsverhalten anzupassen.

Eine kontinuierliche Überwachung der Zuflüsse in eine Versorgungszone stellt eine einfache und effektive Methode dar, Ereignisse, wie z.B. Rohrgebrennen

über Verhaltensänderungen zu erkennen. Ein Anstieg des Zuflusses in der festgelegten Zeit des Nachtminimumdurchflusses muss aber nicht zwingend mit einem schadhafte Ereignis im Netz zu tun haben. So können außergewöhnliche Ereignisse, wie große Veranstaltungen, oder gerade im Frühjahr, wenn Kunden ihren hauseigenen Swimmingpool befüllen, zum Ansteigen des Verbrauchs führen. (Steffelbauer u. a., 2017)

1.2.2.3 Permanente Überwachung von hydraulisch abgegrenzten Zonen

Bei der laufenden Überwachung müssen für die hydraulisch abgegrenzte Zone die relevanten Messwerte (Einspeisemenge, Druck, Behälterstand und Durchflussmengen) kontinuierlich erfasst werden. Messzonen eignen sich allgemein sehr gut, um ein bereits niedriges Niveau von Wasserverlusten dauerhaft zu halten. Bei hohen Verlusten liegt der Vorteil bei Messzonen darin, dass das Lokalisieren von Leckagen einfacher und gezielter möglich ist und somit eine Reduzierung der Wasserverluste schneller bewerkstelligt werden kann. Die möglichen Nachteile liegen u.a. in der Versorgungssicherheit, da durch das Abschiebern von nicht zur Messzone gehörenden Rohrverbindungen die Redundanz gesenkt wird.

1.2.2.4 Methoden zur Leckeingrenzung und Leckortung

Es gibt viele Methoden der Leckeingrenzung und Leckortung, die sich in die Arten der nicht-akustischen, der akustischen und der kombinierten Verfahren einteilen lassen. Nachfolgend werden einige gängige Methoden, sowohl für die Leckeingrenzung, der sogenannten Vor-Ortung, als auch für die eigentliche Leckortung, der Punktortung, näher erläutert. Abhängig von Parametern des Netzes, wie Rohrmaterial, Vermaschungsgrad und Versorgungsdrücke und ob es sich um eine Eingrenzung oder Punktortung handelt, müssen die Methoden gewählt werden. (ÖVGW - *Regelblatt W 63*, 2009) Eine etwas vollständigere Auflistung der Methoden befindet sich in der (ÖVGW - *Regelblatt W 63*, 2009), Tabelle 10.

1.2.2.4.1 Geräuschlogger

Geräuschlogger kommen bei der Leckeingrenzung, bei Netzen mit überwiegend metallischen Leitungen zum Einsatz und sind eine akustische Methode. Beim Einsatz werden sie mit starken Magneten an Armaturen fixiert. Geräuschlogger sind auf das Detektieren der typischen Leckgeräusche programmiert. Der Einsatz erfolgt entweder dauerhaft in Bereichen, die mit anderen Methoden schwer zu inspizieren sind, wie z.B. an Straßen mit viel Verkehr, oder temporär bei kurzen Leckortungskampagnen. (ÖVGW - *Regelblatt W 63*, 2009)

1.2.2.4.2 Stufentest

Der Stufentest kommt ebenfalls bei der Vor-Ortung zum Einsatz und ist ein nicht-akustisches Verfahren. Beim Stufentest werden für kurze Zeit und stufenweise einzelne Netzbereiche weggeschiebert. Gleichzeitig erfolgt eine Überwachung

der Einspeisemengen, sollte sich diese nach dem Schließen eines bestimmten Absperrorgans verringern, weist das auf eine Leckage im abgeschieberten Bereich hin. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass sehr wenige technische Hilfsmittel – nur eine Einspeisemessung ist erforderlich – benötigt werden. Der Nachteil liegt jedoch im großen Personalaufwand, da stufenweise viele Abschnitte abgeschiebert werden müssen.

1.2.2.4.3 Leckgeräusch-Korrelatoren

Korrelatoren werden in der Punktortung verwendet und gehören zu den akustischen Methoden. Der Einsatz eines Leckgeräusch-Korrelators oder auch Körperschallmikrofons ist vor allem bei metallischen Leitungen weit verbreitet. Hierbei werden zwei Sensoren an zwei Schiebern angesetzt, zwischen denen das Leck punktgeortet wird und das Leckgeräusch aufgenommen. Mit der Kenntnis des Leitungsdurchmessers und des Leitungsmaterials in Zusammenspiel mit der Zeitdifferenz des Eintreffens des Leckgeräusches an den beiden Sensoren wird der exakte Ort der Leckage berechnet. (ÖVGW - *Regelblatt W 63*, 2009)

1.2.2.4.4 Bodenmikrofon

Bodenmikrofone werden zur Punktortung verwendet und sind eine akustische Methode. Diese nutzen, so wie die Korrelatoren auch, das akustische Signal des, durch eine Leckage austretenden Wassers. Das Signal breitet sich dabei sowohl in Rohrlängsachse als auch orthogonal durch den Boden aus. Je nachdem an welchem Rohrmaterial eine Leckage lokalisiert wird, funktioniert diese Methode besser oder schlechter. Metallische Werkstoffe bieten hier wieder bessere Eigenschaften als Kunststoffe. Es wird zwischen direkter Sondierung, was eine Fixierung des Bodenmikrofons an einer Armatur beschreibt, oder indirekter Sondierung, bei der das Bodenmikrofon am Boden, direkt über der Leitung angesetzt wird, unterschieden. Ausreichend geschultes und routiniertes Personal kann so auch kleinere Leckagen, wie z.B. an Rohrverbindungen erkennen und lokalisieren. (ÖVGW - *Regelblatt W 63*, 2009)

1.2.2.4.5 Gasprüfverfahren

Der Einsatz von Spürgas dient dem Lokalisieren von Leckagen und ist ein nicht-akustisches Verfahren. Es wird vorwiegend in Bereichen eingesetzt, in denen Korrelatoren und Bodenmikrofone nicht oder nur bedingt funktionieren, vorzugsweise also bei nichtmetallischen Leitungsmaterialien. Beim Vorgang der Lokalisation mit Gas, wird ein gesundheitlich unbedenkliches Gas, wie z.B. industrieller Wasserstoff in die Leitung gefüllt und das, durch das Leck entweichende Gas an der Geländeoberfläche, durch Abschreiten der Leitung mit einem Gasspürgerät, detektiert. (ÖVGW - *Regelblatt W 63*, 2009)

1.2.3 Modellbasierte Leckage Lokalisierung

Neben den vorher beschriebenen Verfahren, die allesamt Stand der Technik sind, ist die modellbasierte Leckage Lokalisierung noch Gegenstand der Forschung. Bei der modellbasierten Leckage Lokalisierung werden Messdaten aus dem Feld mit einem hydraulischen Rechenetzmodell kombiniert und die Leckageeingrenzung als Optimierungsproblem formuliert. Durch Lösen des Optimierungsproblems werden Bereiche geliefert, in denen die Leckage mit größerer Wahrscheinlichkeit auftritt. Die genaue Position kann bei dieser Methode in der Regel nicht exakt angegeben werden, für die Bestimmung des genauen Punktes müssen Methoden angewendet werden, die in 1.2.2.4 gelistet sind. Durch die deutlich verkürzte Eingriffszeit und dem Eingrenzen auf einen ungefähren Bereich hat die modellbasierte Methode dennoch große Vorteile, vor allem in Richtung Personal- und Zeitressourcen. Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Erstellung und Kalibrierung eines hydraulischen Rechenetzmodells ebenso personal- und zeitintensiv ist. Zusätzlich müssen für die Methode der modellbasierten Leckage Lokalisierung, mehrere hydraulische Sensoren, als sonst üblich, im WVN eingebaut und auch instandgehalten werden. (Steffelbauer u. a., 2017)

Bei der modellbasierten Leckageeingrenzung wird in der Literatur zwischen zwei Methoden unterschieden, der Transientenanalyse (Colombo u. a., 2009) und der stationären (Steady-State) Analysemethode. Die Transientenmethode ermöglicht die Simulation von dynamischen Effekten, wie sie zum Beispiel bei Druckstößen auftreten. Da im Feld jedoch in der Regel über längere Abtastraten der hydraulischen Sensoren gemessen wird, sind solche Effekte vernachlässigbar und stationäre Methoden zu empfehlen. (Steffelbauer u. a., 2017)

In der Literatur findet sich die modellbasierte Leckage Lokalisierung bei Pudar & Liggett, (Pudar & Liggett, 1992), bei denen die Unterschiede zwischen hydraulischem Rechenetzmodell und den Feldmessungen als Fehlerquadrate abgebildet, minimiert werden. Zusätzlich wird an dieser Stelle der Zusammenhang zwischen der Qualität der Ergebnisse und der Anzahl der eingesetzten Sensoren im WVN erwähnt. Der Ansatz von Poulakis (Poulakis u. a., 2003) für die modellbasierte Leckage Lokalisierung ist eine Methode, welche die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet, um Messunsicherheiten und Fehler im Modell miteinzubeziehen. Ein weiterer Ansatz ist jener, die Leckagen als druckabhängigen Verbrauch anzusetzen (Wu u. a., 2009). Mit sensitivitätsbasierten Methoden beschäftigten sich u.a. Pérez u. a., 2011 und Casillas Ponce u. a., 2014. Cugueró-Escofet u. a., 2015 entwickelt einen Ansatz mit Zonotopen, die robust gegen Verbrauchsunsicherheiten bei der Leckage Lokalisierung sind. Mit Methoden von künstlichen neuronalen Netzen und geostatistischen Methoden versucht Romano u. a., 2013 Leckagen zu lokalisieren, diese Methoden hatten bis dato jedoch nur mäßigen Erfolg.

1.2.3.1 Sensorplatzierung

Neben einer ausreichenden Anzahl an Sensoren ist auch die Positionierung dieser im Wasserversorgungsnetz ausschlaggebend für den Erfolg der Leckage Lokalisierung (Kang & Lansey, 2010). Neben der Kalibrierung des hydraulischen Rechenetzmodells sind auch das Auffinden von Kontaminationen und die Leckage Lokalisierung Einsatzgebiete für optimale Sensorplatzierungen. Bei Savic u. a., 2009, werden verschiedene Ansätze idealer Sensorplatzierungen in einem Wasserversorgungsnetz erwähnt. Da die optimale Sensorplatzierung jedoch nicht Teil der vorliegenden Arbeit ist, wird sie an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

1.2.3.2 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen können bei Optimierungsaufgaben angewendet werden und können optimale Lösungen liefern. In dieser Arbeit wurden genetische Algorithmen sowohl in der automatischen Kalibrierung als auch in der Leckage Lokalisation verwendet.

Entwickelt wurden genetische Algorithmen (GA) in den 1970er-Jahren (Rechenberg, 1973; De Jong, 1975; Holland, 1975; Goldberg, 1989) und werden vor allem in den Ingenieurwissenschaften verwendet. GAs haben dabei den Vorteil, dass sie durch das Nachempfinden der natürlichen Evolution und durch die Basis der Populationen stark parallelisierbar sind und somit an modernen Computern schneller gerechnet werden können. GAs sind stochastische Optimierungsverfahren und können daher keine optimale Lösung garantieren, jedoch ist zumindest eine globale optimale Lösung möglich. (Steffelbauer u. a., 2017)

Die Struktur eines genetischen Algorithmus lässt sich grob folgend beschreiben. Zuerst müssen einige Individuen als Lösungen generiert werden, über eine Fitness-Funktion, vgl. 1.2.3.3, werden die Lösungen bewertet, und wenn das Ergebnis gut genug ist und somit ein Abbruchkriterium gegeben ist, ist das Evolutionsende erreicht. Sollten die Lösungen noch nicht gut genug sein, werden in der Selektion die besten Individuen entnommen und durch Rekombination und eventueller Mutation neue Nachkommen erzeugt. Die Individuen der neuen Generation werden durch die Fitness-Funktion überprüft. Sind die Ergebnisse gut genug, ist das Evolutionsende erreicht, ansonsten geht es weiter wie beschrieben. (Fürnkranz, J. & Becher, F., 2006; Ramaseder, 2016)

1.2.3.3 Fitness Funktion

Die Fitness-Funktion ist eine Zielfunktion des genetischen Algorithmus. Mit dem Fitnesswert eines Lösungskandidaten beschreiben genetische Algorithmen, wie gut dieses Individuum das Optimierungsproblem löst. Allgemein ist so eine Fitnessfunktion mit Gleichung 1-1 in Kapitel 1.2.1 angegeben.

1.2.4 Beschreibung der verwendeten Software

In diesem Kapitel wird die verschiedene Software, die für die Ergebnisse dieser Arbeit verwendet wurden, kurz erklärt.

1.2.4.1 EPANET

EPANET ist eine Software der United States Environmental Protection Agency (EPA) die für die Modellierung von Trinkwassersystemen entwickelt wurde. Sie ist kostenlos auf dem Internetauftritt der EPA erhältlich (US EPA, 2014). Die Software EPANET kann Simulationen mit mehreren Zeitschritten rechnen und dafür u.a. den Durchfluss jeder Leitung, den Druck an jedem Knoten, die Höhe des Wassers in jedem Behälter zu jedem Zeitschritt berechnen und ausgeben. Weitere, in dieser Arbeit verwendete Funktionen sind der Ansatz eines Minor Loss Koeffizienten an einem Punkt, das Setzen verschiedener Rohrrauheiten, das Setzen verschiedener Pattern, die Eingabe von Kalibrierungsmessdaten und die Ausgabe der Berichtdatei. (Rossman, 2000)

1.2.4.2 OOPNET

OOPNET (Object-Oriented Python Network Analysis Tool) wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau (SWW) für verschiedene Modellierungsaufgaben entwickelt. Es ist eine pythonbasierte objektorientierte Schnittstelle zu EPANET. Mit dem Hintergedanken, dass OOPNET vor allem auch im Bauingenieurwesen angewendet werden soll, wurde die klare und übersichtliche Syntax der einfach zu erlernenden Programmiersprache Python gewählt. So sollen auch Anwender, die nicht so programmiervertraut sind, die Möglichkeiten haben, einfache eigene Programme zu schreiben. Die objektorientierte Struktur ist dem Aufbau der Software EPANET selbst stark nachempfunden, damit Nutzer, die zuvor nur mit EPANET gearbeitet haben, sich mit OOPNET schneller zurechtfinden können. Durch diese Struktur kann einfach auf einzelne Elemente und Eigenschaften eines WVN zugegriffen werden. Über OOPNET können EPANET Input-Dateien eingelesen, manipuliert und über die Kommandozeilenschnittstelle zu EPANET simuliert werden. Des Weiteren ermöglicht OOPNET ein paralleles Ausführen der Simulationen und beschleunigt somit länger andauernde Berechnungen immens. (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2015)

1.2.4.3 QGIS

QGIS ist ein Open-Source-Geographisches-Informationssystem. In dieser Arbeit dient es dazu, vorhandene GIS-Daten des Wasserversorgungsunternehmens gemeinsam mit Kartendarstellungen von OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2017) in Plandarstellungen des Gebiets des Feldversuchs zu verwandeln.

1.2.4.4 RStudio

RStudio ist eine Entwicklungsumgebung für die Programmiersprache R und ist u.a. Open Source erhältlich. R dient in dieser Arbeit der Datenverarbeitung, Datenveranschaulichung, Durchführung von statistischen Untersuchungen und Generierung von Darstellungen (RStudio, 2017). Messdaten können hierbei mit dem R-Package „influxdbr“ (Leutnant, 2018) direkt ausgelesen werden, außerdem wird das R-Package „epanetReader“ (Eck, 2017) für das Einlesen der Epanet-Bericht-Dateien verwendet.

1.2.4.5 Jenkins

Jenkins ist ein Automatisierungsserver, der Open Source verfügbar ist (Jenkins, 2018). Für diese Arbeit wurde er als Plattform genutzt, um das Ausführen von Simulationen zu starten. Diese Plattform besitzt eine Web-basierte Oberfläche und ist daher für Benutzer, die geringeres Wissen für die Simulationen selbst mitbringen, sehr praktisch, da sie nur durch die Übergabe der Eingangsdaten, die entsprechenden Berechnungen starten können. Die Ergebnisse der einzelnen „Builds“, wie die einzelnen Berechnungen genannt werden, können dann direkt in Jenkins begutachtet werden und zusätzlich werden diese in einer Datenbank abgespeichert. Möglichkeiten, die Ergebnisse nach erfolgreicher Berechnung direkt per Email zu versenden, sind auch gegeben. Weitere Vorteile des Benutzens von Jenkins sind, dass stets die aktuellste Version des Programmcodes verwendet wird und ein paralleles Rechnen auf mehreren Rechnern möglich ist.

Die Web-Plattform Jenkins ist in Abbildung 1-4 für die Oberfläche der automatischen Kalibrierung ersichtlich. Eine genauere Beschreibung der Nutzung des Algorithmus‘ der automatischen Kalibrierung ist in 1.2.5.1 beschrieben. In 1.2.5.2 ist zudem die Vorgehensweise bei der Ausführung des Algorithmus‘ der Leckage Lokalisierung genauer erläutert.

1.2.4.6 Grafana

Grafana ist ein Programmpaket, das Open Source zugänglich ist und zur Visualisierung von Daten auf Webservern dient (Grafana, 2014). Mittels der Einbindung von InfluxDB (influxDB, 2014), eine Zeitseriendatenbank, die ebenfalls open source zugänglich ist, können Messdaten visuell aufbereitet werden. InfluxDB wird von OpenSDM (Open Sensor Data Management Tool), ein am SWW entwickeltes Datenmanagementwerkzeug verwendet (Camhy D. u. a., 2014). OpenSDM speichert Sensordaten in einer Zeitseriendatenbank und kann überdies weitere Metadaten dazu abspeichern. Beispiele von Screenshots von Grafana befinden sich in Anhang A.

Project sww_azm_calibration
Full project name: azm/sww_azm_calibration

Last Successful Artifacts

Calibrated.inp	81,22 KB	view
correlation.png	167,36 KB	view
groups.png	187,97 KB	view
roughness.png	195,05 KB	view

Recent Changes

Disk Usage

Job	2 GB
All builds	2 GB
Locked builds	-
All workspaces	290 MB
Slave workspaces	290 MB
Non-slave workspaces	-

Permalinks

- Last build (#1448), 2 days 23 hr ago
- Last stable build (#1448), 2 days 23 hr ago
- Last successful build (#1448), 2 days 23 hr ago
- Last failed build (#1417), 5 days 22 hr ago
- Last unsuccessful build (#1432), 5 days 10 hr ago
- Last completed build (#1448), 2 days 23 hr ago

Build History

Build #	Time	Size
#1448	Feb 5, 2018 8:55 AM	666 KB
#1447	Feb 5, 2018 8:48 AM	660 KB
#1446	Feb 5, 2018 8:42 AM	662 KB
#1445	Feb 3, 2018 12:48 AM	879 KB
#1444	Feb 3, 2018 12:37 AM	878 KB
#1443	Feb 3, 2018 12:25 AM	875 KB
#1442	Feb 3, 2018 12:12 AM	876 KB
#1441	Feb 3, 2018 12:00 AM	871 KB
#1440	Feb 2, 2018 11:47 PM	870 KB
#1439	Feb 2, 2018 11:34 PM	876 KB
#1438	Feb 2, 2018 11:21 PM	875 KB
#1437	Feb 2, 2018 11:08 PM	876 KB
#1436	Feb 2, 2018 10:55 PM	866 KB
#1435	Feb 2, 2018 10:41 PM	876 KB
#1434	Feb 2, 2018 10:28 PM	874 KB

Abbildung 1-4: Jenkins Plattform, Übersicht automatische Kalibrierung

1.2.5 Beschreibung der verwendeten Simulatoren

Nachfolgend werden die Werkzeuge der *automatischen Kalibrierung*, der *Leckage Lokalisierung* und der *automatischen Skeletonisierung* erläutert.

1.2.5.1 Automatische Kalibrierung

Die automatische Kalibrierung ist eine implizite Methode der Kalibrierung deren Funktionsweise in Kapitel 1.2.1 erläutert wird.

Am SWW wurde ein Algorithmus für die automatische Kalibrierung entwickelt. Dieser kann über Jenkins, siehe 1.2.4.5, gestartet werden und läuft mit OOPNET (1.2.4.2) auf der Software EPANET (1.2.4.1). Ziel des Algorithmus' ist es, opti-

male Rauheiten für die Gruppierungen an Leitungen zu finden, um den Gesamtfehler zwischen den gemessenen Eingangsdruckdaten und den simulierten Drücken zu minimieren. Die in Abbildung 1-3 ersichtlichen Komponenten sind an dieser Stelle ein genetischer Algorithmus, der als Optimierer dient. Simuliert wird über die EPANET Kommandozeilenschnittstelle. Die Kalibrierungsparameter sind die Rauheiten und der Minor Loss Koeffizient, die Ergebnisse der Simulationen sind Drücke und Durchflüsse. Um eine Kalibrierung durchführen zu können, bedarf es der Übergabe einer Datei, in dem das hydraulische Modell, weitere Daten und die Randbedingungen stehen, siehe Abbildung 1-5.

In dieser Datei sind drei Bereiche definiert: *Simulation*, *Genetic_Algorithm* und *Grouping*. Unter dem Punkt *Simulation* wird mit *Name*, das hydraulische Modell, das es zu kalibrieren gilt, ausgewählt. Mit *Metadata* wird die Metadatendatei ausgewählt, mit *Scenarios*, jene Szenarien mit denen man die Kalibrierung durchführen will. *Database* gibt den Speicherort der Ergebnisse an und beim Punkt *MinorLoss* können keine, eine, oder mehrere Leitungen definiert werden, an denen ein Minor Loss Koeffizient kalibriert wird.

Im Bereich des *Genetic_Algorithm* wird bei den Punkten *Population* und *Generations* entsprechend die Anzahl angegeben. *CR* gibt die Kreuzungsrate und *F* den Mutationsfaktor an. Mit *R_Min* und *R_Max* wird die untere bzw. obere Grenze für die, zu kalibrierende Rauheit angegeben. Mit *M_Min* und *M_Max* geschieht das ebenso für den, zu kalibrierenden Minor Loss Koeffizienten.

Im Bereich *Grouping* wird ausgewählt, welche Parameter für die Kalibrierung herangezogen werden, im Fall der Datei, die in Abbildung 1-5 ersichtlich ist, wird nur nach *Material* gruppiert, da die anderen Parameter mit einer Raute auskommentiert sind und daher vom Algorithmus nicht beachtet werden. Bei den kategorialen Parametern wie *Material* oder *Type* erfolgt die Auswahl mit ‚YES‘ und die Abwahl mit ‚NO‘. Für die quantitativen Parameter müssen hingegen Grenzen angegeben werden. So teilt beispielsweise *Age = [1990]* das *Alter* der Leitungen in *bis 1990* und *nach 1990*. Bei *Diameter* werden die Grenzen für die Durchmesser bestimmt, bei *Age* die Grenzen der Verlegejahre und bei *ASL_Density* die Grenzen der Einbautendichte.

Nach Durchführung der Simulation werden die Ergebnisse einerseits in der angegebenen Datenbank gespeichert und andererseits in der Konsolenausgabe angezeigt. In dieser sind einerseits die Gruppen ersichtlich und andererseits wird für alle Generationen der Fitnesswert angegeben. Am Ende der Konsolenausgabe werden die mittleren absoluten Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken für jede Messstelle, die Rauheitswerte für die Gruppierungen, der Minor Loss Koeffizient für die gewählten Leitungen und der finale Fitnesswert angegeben. Zusätzlich werden das kalibrierte Modell und drei Grafiken

erstellt und ausgegeben. Auf den Ergebnisgrafiken sind die Korrelationen zwischen gemessenen und gerechneten Drücken, das Netz nach Gruppen und das Netz nach Rauheiten dargestellt.

```
1 [Simulation]
2 Name = "HartbGrazCorr_JL.inp"
3 Metadata = 'Ragnitz.meta'
4 Scenarios = 'Lippacher_NEW+scen8'
5 Database = 'Ragnitz_tests'
6 MinorLoss = ['LHG4657']
7
8 [Genetic_Algorithm]
9 Population = 50
10 Generations = 50
11 CR = 0.7
12 F = 0.5
13 R_Min = 0.001
14 R_Max = 2.0
15 M_Min = 0.0
16 M_Max = 2000.0
17
18 [Grouping]
19 #Diameter = [85, 100]
20 #Age = [1990]
21 Material = 'YES'
22 #Type = 'NO'
23 #ASL_Density = [20, 80]
24
```

Abbildung 1-5: Übergabe-Datei für die automatische Kalibrierung

1.2.5.2 Leckage Lokalisierung

Der Algorithmus, der für die Leckage Lokalisierung in dieser Arbeit verwendet wurde, ist ein modellbasierter Ansatz und ist am SWW entwickelt worden. Die Grundlagen dafür sind die gemessenen Parameter Druck und Durchfluss im Feld, die mit den simulierten Drücken und Durchflüssen im kalibrierten hydraulischen Rechenetzmodell verglichen werden. Ähnlich wie beim Algorithmus zur automatischen Kalibrierung kann dieser über Jenkins, siehe 1.2.4.5, gestartet werden und läuft mit OOPNET (1.2.4.2) auf der Software EPANET (1.2.4.1). Ziel des Algorithmus ist es, eine künstliche Leckage im Netz auf möglichst geringe Distanz einzugrenzen. Über die Minimierung der Distanzfunktion, bzw. des Unterschieds durch Variation des Vektors x wird jener Leckagevektor gefunden, der die Messwerte am besten beschreibt. Die Distanzfunktion ist in diesem Fall in Gleichung 1-2 zu sehen, sie stellt die Berechnung als Summe der Fehlerquadrate dar. (Steffelbauer u. a., 2017)

$$d(\mathbf{m}, \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{x})) = \sum_{i=1}^n (m_i - \hat{m}_i(\mathbf{x}))^2 \quad \text{Gleichung 1-2}$$

mit:

d ... Distanz, \mathbf{m} ... Vektor der Messwerte, $\hat{\mathbf{m}}(\mathbf{x})$... Vektor der simulierten Werten an denselben Positionen bei Eingabe des Leckagevektors \mathbf{x} , n ... Anzahl der Messungen, m_i ... Messwerte, \hat{m}_i ... Simulationsergebnisse

Das Minimieren der Summe der Fehlerquadrate führt schlussendlich zur Lösung, zu jenem Ort, an dem die Leckage im Netz am wahrscheinlichsten situiert ist. Dies ist ein Optimierungsproblem und wird mit dem Einsatz von einem differentiellen evolutionären Algorithmus behandelt. (Steffelbauer u. a., 2017)

Bei der Durchführung einer Berechnung über Jenkins müssen drei Dateien hochgeladen werden, einerseits das hydraulische Rechnernetz, als EPANET-Inputdatei, eine Datei, die den Zuflusstagesgang beinhaltet im Format NetCDF und eine Datei, in der die Einstellungen und Randbedingungen festgehalten sind. Die letztgenannte ist beispielhaft in Abbildung 1-6 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben.

Die in Abbildung 1-6 dargestellte Übergabedatei für die Leckage Lokalisierung unterteilt sich in fünf Bereiche: *Information*, *Preparator*, *Locator*, *Optimizer* und *Database*.

In der *Information* wird im Punkt *tag* die Bezeichnung dieser Simulation benannt. Unter *real_leak* wird jener Punkt gekennzeichnet, in dem das „reale“ Leck im Netz ist, um einerseits Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck zu berechnen und andererseits die Position in der Grafik kennzeichnen zu können. *start_datetime* und *end_datetime* fixieren den zeitlichen Bereich für die Simulation. D.h. nur Messdaten des angegebenen Zeitbereichs werden für die Vergleichsrechnungen verwendet. *resample_time* gibt die Zeit an, in der Daten zusammengefasst werden und *aggregation* gibt an, wie diese Zusammenfassung geschieht. Unter *sensors* werden jene Messpunkte definiert, deren Messdaten für diese Simulation verwendet werden.

Im Bereich *Preparator* werden Einstellungen, die die Software EPANET betreffen, getätigt. So werden bei *pressure_precision* und *flow_precision* die Genauigkeiten eingestellt. Mit der *duration* wird angegeben, ob es sich um stationäre oder um eine extended-period-Simulation handelt. Bei *hydraulic_timestep*, *pattern_timestep* und *report_timestep* werden die Zeitschritte definiert, unter *pattern_start_time* die Startzeit der Pattern, in dem Fall des Zuflusstagesgangs.

Im Bereich *Locator* werden die Gewichtungen der Durchflüsse (*flow_weight*) und Drücke (*pressure_weight*), sowie die Art der Distanzmetrik (*distance_metric*) definiert.

Einleitung

Im Bereich *Optimizer* werden Einstellungen des evolutionären Algorithmus' getätigt. Mit *runs* wird die Anzahl der durchzuführenden Simulationen definiert, *ndim* gibt die Anzahl der Dimensionen des Problems an. Mit *popsize* wird die Größe der Population für die Optimierung, mit *ngen*, die Anzahl der Generationen für die Optimierung angegeben und *nhof* bestimmt die Anzahl der Individuen in der „hall of fame“. Wenn *boom* auf „true“ gesetzt ist und der „crowding radius“ kleiner als der *boomlevel* ist, wird die Population reinitialisiert. Der *boomlevel* ist somit ein Kontrollparameter, wann die Population zurückgesetzt wird. *optimal_value* bezeichnet den optimalen Wert, an dieser Stelle wird die Optimierung beendet. Die Kreuzungsrate wird mit *cr*, der Mutationsfaktor mit *f* und der Mutationsfaktor betreffend der Mutationsstrategie mit *f2* angegeben. Diese Mutationsstrategie wird in *mutstrat* definiert. *elitism* beschreibt, ob der Selektionsoperator zwischen Nachkommen und Eltern auswählt (wenn er auf „true“ eingestellt ist), oder ob er nur aus den Nachkommen wählt (Einstellung auf „false“).

Im Bereich *Database* wird bei *collection* die Sammlung angegeben, in der die Ergebnisse dieser Simulation gespeichert werden.

```
[Information]

tag = 'Ragnitz_SPUDU_0424_HG3880_047_08'
real_leak = 'HG3880' # for plotting the "X" in the map
start_datetime = 2016-04-24T02:30:00
end_datetime = 2016-04-24T03:30:00
resample_time = '1H'
aggregation = 'mean'
sensors = ['HG3420', 'HG3933', 'HG4162', 'HG4215', 'HG4383', 'LHG2461a']

[Preparator]

pressure_precision = 3
flow_precision = 3
duration = 0
hydraulic_timestep = 1
pattern_timestep = 1
report_timestep = 1
pattern_starttime = 2

[Locator]

flow_weight = 1.0
pressure_weight = 1.0
distance_metric = 'euclidean'

[Optimizer]

runs = 100
ndim = 2
popsize = 30
ngen = 100
nhof = 1
boom = true
boomlevel = 0.0
optimal_value = 0.0
cr = 0.7
f = 0.5
f2 = 0.8
mutstrat = 'DE/rand/1'
elitism = false

[Database]

collection = 'JL_MA'
```

Abbildung 1-6: Übergabe-Datei für die Leckage Lokalisierung

Nach der Durchführung eines Arbeitsauftrages in Jenkins, der in diesem Fall etwa sechs Stunden in Anspruch nahm, werden die Ergebnisse einerseits in der Konsole, aber auch übersichtlich in insgesamt sechs Dateien ausgegeben. Drei Grafiken zeigen dabei die Korrelationen jedes einzelnen Punktes, die simulierten Lecks der, in diesem Fall 100 Berechnungen gemeinsam mit den verwendeten Sensoren und dem realen Leck und die Residuen der verwendeten Sensoren als Boxplotdarstellungen über die 100 Berechnungen. In den drei CSV-Dateien sind in einem die Korrelationen aller Punkte enthalten und in der eigentlichen Ergebnis-Datei sind für die 100 Berechnungen die Distanzen, der Fitness-Wert, und die Orte des realen und des simulierten Lecks angegeben. In der dritten Datei sind für alle 100 Berechnungen die Residuen der verwendeten Sensoren und zusätzlich der Fitness-Wert, der Emitterkoeffizient c_e und der Ort der simulierten Leckage angegeben.

1.2.5.3 Automatische Skeletonisierung

Skeletonisierung beschreibt die Vereinfachung eines Netzes durch Wegnahme und Zusammenlegung einzelner Komponenten, die keinen oder nur sehr geringen Einfluss auf die hydraulischen Verhältnisse haben (Haestad Methods, Inc, 2003).

So in etwa, lauteten auch die Randbedingungen für die Entwicklung eines Algorithmus' für die automatische Skeletonisierung, die am SWW durchgeführt wurde. Wie die beiden anderen Simulatoren wurde auch die automatische Skeletonisierung mit OOPNET (1.2.4.2) über EPANET (1.2.4.1) berechnet. Mit dem Ziel, Netze gezielt vereinfachen zu können und dabei die hydraulischen Berechnungen der verbleibenden Netzkomponenten nicht zu beeinflussen, wurde der Algorithmus mit nachfolgender Methodik entwickelt.

Einerseits wurden Stichleitungen, andererseits Knoten, an denen keine Durchmesseränderung der anschließenden Leitungen festgestellt werden konnte, entfernt.

Für Stichleitungen gilt, wenn kein Großverbraucher am Ende angeschlossen ist, der Endpunkt nicht in einer Liste der Punkte aufscheint, die nicht entfernt werden dürfen (z.B. Punkte, an denen gemessen wird) und der Durchmesser kleiner ist, als eine vorher festgesetzte Grenze der neuen minimalen Durchmesser, so werden sie entfernt. Mit der Entfernung allein ist es aber nicht getan, der Verbrauch, der an dem Endknoten eingetragen war, wird nun an den inneren Knoten gelegt.

Bei der Entfernung von Knoten, an denen keine Durchmesseränderung der anschließenden Leitungen festgestellt wird, sind folgende Randbedingungen im Algorithmus definiert: Am zu entfernenden Knoten darf kein Verbrauch anliegen und der kleinere Winkel der beiden anliegenden Leitungen muss größer sein als ein definierter Minimumwinkel, um die Wiedererkennbarkeit des Netzes zu ga-

rantieren. Des Weiteren sind die gleichen Randbedingungen wie zuvor einzuhalten: die Durchmesser dürfen die Grenzen des neuen Minimumdurchmessers nicht übersteigen und der Knoten darf nicht in der Liste der Knoten aufscheinen, die nicht entfernt werden dürfen.

Eine weitere Methode, jene des Clustering, wurde zudem entwickelt, um einer Überskeletonisierung entgegenzuwirken. Dabei werden Gruppen von Datenobjekten ähnlicher Eigenschaften zusammengefasst. Clusterzentren (Knoten) werden berechnet, die zusätzlich fix im skeletonisierten Netz verbleiben und so einer Überskeletonisierung entgegenstehen.

1.2.6 Beschreibung der verwendeten Verfahren

1.2.6.1 Tukey's Ausreißer Test

Tukey's Ausreißer Test ist an „Tukey's Mean-Difference-Test“ angelehnt. Dabei werden die Mittelwerte einer Gruppe, z.B. aller Zuflusswerte an allen Tagen im Monat Juni, jeweils zwischen 01:00 Uhr und 03:00 Uhr, verglichen. In diesem Fall würden 30 Werte verglichen werden. Für diese 30 Werte werden eine obere und eine untere Grenze und zwar wie folgt festgelegt. Die obere Grenze ist die Summe des dritten Quartils plus k mal dem Interquartilsabstand, die untere Grenze ist das erste Quartil minus k mal dem Interquartilsabstand. Mit $k = 1,5$ werden Ausreißer, mit $k = 3$ werden weite Ausreißer berechnet. Alle Werte, die außerhalb dieser Grenzen sind, werden demnach als Ausreißer bezeichnet. In dieser Arbeit wird der Tukey's Ausreißer Test in iterativer Form angewendet. Werden bei der Grundmenge Ausreißer identifiziert, werden diese aus der Menge genommen und in einem weiteren Iterationsschritt mit der neuen Menge wieder neue Grenzen berechnet. Dies wird so lange fortgesetzt, bis keine Ausreißer mehr identifiziert werden können.

1.2.7 Beschreibung der verwendeten Messgeräte

In diesem Kapitel werden die Messgeräte, die für den Feldversuch, der dieser Arbeit zu Grunde liegt beschrieben.

1.2.7.1 Druckmessgeräte

Es wurden zwölf Drucklogger SEWAD30 von *SETEC Engineering* für den Feldversuch, der in dieser Arbeit beschrieben wird, verwendet. Dieser Drucklogger ist sowohl für Oberflur- als auch für Unterflurhydranten geeignet. Der Signalprozessor mit einem programmierbaren AD-Umwandler ist das Herzstück des Manometers. Messintervalle von einer, fünf, zehn, 15 oder 30 Sekunden, bzw. ein, zwei, fünf, zehn, 30, 60 oder 90 Minuten sind möglich. Jeder Messwert wird mit Datums- und Zeitstempel abgespeichert. Abhängig vom Speicherintervall können 28000 bis 56000 Werte gespeichert werden. Die Messauflösung liegt bei 10 mbar

mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2\%$ des Messwerts. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 30 bar. Um die Messdaten auslesen zu können, wird das Messgerät über Kabel mit einem Computer verbunden und mit der dazugehörigen Software übertragen. (SEWAD30 - SETEC Engineering GmbH & Co.KG, 2018)

1.2.7.2 Ultraschalldurchflussmessgerät

Das für diese Arbeit verwendete Ultraschalldurchflussmessgerät ist das tragbare FLUXUS ADM 6725 von der Firma FLEXIM. Die Durchflussmessung erfolgt über Ultraschall mit Hilfe des Laufzeitverfahrens, womit die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Rohr ermittelt werden kann. Parameter des zu messenden Fluids (Schallgeschwindigkeit, kinematische Viskosität, Dichte und Temperatur) und des Rohres (Außendurchmesser, Wandstärke, Material, Rohrauskleidung und Rohrrauheit) müssen anfangs eingegeben werden. Über die Kontinuitätsgleichung wird schlussendlich der Volumenstrom Q [l/s] generiert. Um die Messdaten auslesen zu können, wird das Messgerät über Kabel mit einem Computer verbunden und mit der dazugehörigen Software übertragen. (FLEXIM GmbH, 2015; Ramaseder, 2016)

1.2.7.3 Woltmannzähler

Der, unabhängig von dem in dieser Arbeit beschriebenen durchgeführten Feldversuch, fix installierte Woltmannzähler wurde für Vergleichszwecke der Zuflussmessung durch das Ultraschallmessgerät verwendet. Beim Prinzip nach Reinhard Woltman erfolgt die Messung von Strömungen mittels hydrometrischer Flügel.

2 Methodik

In diesem Kapitel werden die Methoden vorgestellt, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. Es untergliedert sich in die Unterkapitel der Vorkalibrierung, der Szenarienerstellung und der Evaluierung.

2.1 Vorkalibrierung

In der Vorkalibrierung geht es darum, aus den Rohmessdaten und dem zuvor erstellten hydraulischen Modell ein hydraulisches Modell mit angepassten geodätischen Höhen der Sensoren zu entwickeln. Hierfür sind einige Schritte erforderlich: als Erstes werden die Messdaten visuell über Grafana ausgewertet und grobe Fehler eliminiert. Im Anschluss wird das statistische Verfahren, der Tukey's Test angewendet und mögliche, nicht offensichtliche Ausreißer eliminiert. Aus den verbliebenen Daten wird einerseits eine Zeitspanne für das Nachtminimum bestimmt und zudem eine Periode, möglichst vieler aufeinanderfolgender Tage, an denen keine Fehler in den Daten vorlagen. Daraus werden Mittelwerte im ungestörten System für Drücke, Zufluss und Behälterwasserstand generiert. Im letzten Schritt der Vorkalibrierung werden die Höhen der Punkte im hydraulischen Modell, an denen ein Drucksensor angeschlossen ist, dahingehend verändert, dass die Druckdifferenzen zwischen gemessener, gemittelten Werten, und den simulierten Werten gleich Null sind.

Nachfolgend sind die einzelnen Schritte genauer erläutert.

2.1.1 Datenbereinigung

Ziel der Datenbereinigung war es, jene Messtage zu separieren, an denen das Netz keiner offensichtlichen Störung unterlegen ist. Unter Störungen versteht man in diesem Zusammenhang bewusstes Öffnen von Hydranten, Zeiträume mit unvollständigen Daten und offensichtliche größere Ereignisse, wie z.B. ein Rohrbruch.

2.1.2 Statistische Betrachtung

Für die statistische Betrachtung der Daten wurde zuerst ein Zeitraum des Nachtminimums definiert. In diesem Zeitraum wurden die bereinigten Daten für jeden Messtag und jeden Sensor gemittelt. Anschließend wurde für jeden Sensor extra, der statistische Ausreißer-Test nach Tukey, Kapitel 1.2.6.1, angewendet.

Der Zeitraum des Nachtminimums wurde aus Erfahrung gewählt und in einem iterativen Prozess zwischen der statistischen Betrachtung und der Auswahl der Daten angepasst.

Als Wassertemperatur für die Umrechnung der Messwerte von [bar] auf [mWS] wurde 4 °C gewählt, so wie es in DVGW GW 303-1 (2006) empfohlen ist.

Für den Wert k in der Formel des Tukey's Ausreißer Test wurde 1,5 gewählt. Somit werden nicht nur die weiten Ausreißer, sondern alle Ausreißer berücksichtigt.

Der Ausreißer-Test wurde iterativ angewendet, d.h. gab es beim ersten Test eines Sensors Ausreißer, wurden die im nächsten Iterationsschritt weggelassen und der Test erneut ausgeführt. So lange, bis der Test keine Ausreißer mehr erkannte.

2.1.3 Auswahl der Daten

Ziel dieses Schrittes ist es einerseits, einen Zeitraum in der Nacht zu finden, in dem der Durchfluss einen relativ konstanten niedrigen Wert einnimmt und andererseits, für die späteren Kalibrierungsrechnungen mittlere Druckwerte an den Hydranten, in diesem Nachtminimumbereich abzuleiten.

Dafür wurden die, nach den Vorschriften, übriggebliebenen Daten gesichtet und eine möglichst lange, zusammenhängende Periode an Messtagen für die jeweiligen Messungen ausgesucht.

2.1.4 Anpassung der geodätischen Sensorhöhen

Ziel dieses Punktes und des gesamten Vorganges der Vorkalibrierung ist es, ein hydraulisches Modell des Netzes zu erstellen, das am besten die Gegebenheiten, die im ungestörten Netz während des Nachtminimum-Durchflusszeitraums herrschen, abbildet.

Um das zu erreichen, wird eine Simulation des ungestörten Systems im Zeitraum des Nachtminimum-Durchflusses im hydraulischen Modell durchgeführt und im Anschluss die geodätischen Höhen der Messpunkte, an denen die Drucksensoren angebracht waren so korrigiert, dass die Differenz zwischen gemessenen und simulierten Drücken gegen Null geht.

2.2 Szenarienerstellung

Für die Kalibrierung des hydraulischen Netzes wurden die Messungen der Fire-Flow-Entnahmen in der Nacht des 12. April 2016 verwendet. Für jedes Szenario war eine Zeitspanne von fünf Minuten anberaumt. Für die Szenarien für die Modellierung wurden die Start- und Endphasen jedes Szenario nicht berücksichtigt, damit nur der Bereich verwendet wird, in dem die Entnahmemenge in etwa konstant war.

2.3 Evaluierung

Mit dem Ziel verschiedene Kalibrierungsmethoden, verschieden skeletonisierte Netze und verschiedene Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung zu vergleichen, wurden verschiedene Methoden angewandt, die nachfolgend beschrieben werden.

2.3.1 Grundlagen der Evaluierung

2.3.1.1 Trial & Error Kalibrierung

Bei der Trial-&-Error-Methode tastet man sich durch Ausprobieren verschiedener Werte des zu kalibrierenden Parameters an das bestmögliche Ergebnis an. In dieser Arbeit ist der zu kalibrierende Parameter die Rohrrauheit.

2.3.1.2 Automatische Kalibrierung

In diesem Unterkapitel geht es darum, wie das Werkzeug der automatischen Kalibrierung, wie in 1.2.5.1 beschrieben, angewendet wurde.

Beispielhaft ist dafür eine Übergabe-Datei in Abbildung 1-5 zu sehen.

Unter dem Abschnitt „Simulation“ wurden unter „Name“ verschiedene Ausgangsmodelle für die automatische Kalibrierung verwendet. Das in Abbildung 1-5 angeführte Modell „HartbGrazCorr_JL.inp“ entspricht dem in 4.3.3 beschriebenen Modell: „vorkalibriert“. Weitere Modelle, die verwendet wurden, waren das nicht-vereinfachte Modell „complicated“ und das automatisch skeletonisierte Modell „Georg“, das in 3.4.1.2 näher erläutert wird. Als Metadaten wurden entsprechend den drei verschiedenen Netzen unterschiedliche Metadaten verwendet. Für alle Simulationen wurden die gleichen Szenarien verwendet. Der zu kalibrierende Minor Loss Koeffizient wurde stets an der Leitung LHG4657 angesetzt.

Im Genetischen Algorithmus‘ waren die Grundeinstellungen, wie sie in Abbildung 1-5 ersichtlich sind, stets die gleichen. Die Rauheit („R_Min“ und „R_Max“) stets zwischen 0,001 mm und 2,0 mm definiert, einzig die Grenzen des Minor Losses („M_Min“ und „M_Max“) variierten mit den Überlegungen.

Der letzte Abschnitt, das „Grouping“, wurde am häufigsten verändert. Kann an dieser Stelle doch ausgewählt werden, wie Leitungen in Gruppen zusammengefasst werden können. Durchmesser („Diameter“), Verlegejahr („Age“), und Material sind Beispiele dafür. Die Eigenschaft „Type“ ist grundsätzlich für den Leitungstyp vorgesehen, in dieser Arbeit wurde er jedoch mit Zonen gleichgesetzt, um den Vergleich zwischen Trial-&-Error Kalibrierung und der automatischen Kalibrierung zu verwirklichen. Die letzte mögliche Gruppierungsart ist mit „ASL_Density“, die Einbautendichte. Diese wurde in dieser Arbeit nur mit dem Modell „Georg“ durchgeführt, da nur für dieses Modell die entsprechenden Metadaten vorlagen.

Bei der Gruppierung ist zwischen kategorialen und quantitativen Parametern zu unterscheiden. Während eine Gruppierung der kategorialen Parameter mit „YES“ oder „NO“ ausgewählt wird, sind bei den quantitativen Parametern Grenzen anzugeben. Beispielsweise bedeutet „Age = [1990]“, dass es hier zu zwei Gruppierungen kommt: Leitungen die bis 1990 verlegt wurden und Leitungen, die nach 1990 verlegt wurden. Parameter können einzeln gruppiert werden, aber auch

kombiniert. Die verschiedenen Gruppierungen, die in dieser Arbeit betrachtet wurden, sind in 4.4.3 ersichtlich.

2.3.1.3 Leckage Lokalisierung

In diesem Unterkapitel geht es darum, wie der Simulator der Leckage Lokalisierung, der in 1.2.5.2 beschrieben wird, in dieser Arbeit verwendet wurde.

Für das Starten der Leckage Lokalisierungssimulation über Jenkins sind drei Dateien nötig. Einerseits das hydraulische Modell und der Tagesgang und andererseits die Übergabedatei mit den Einstellungen für den Simulator.

Für alle Simulationen dieser Arbeit wurde der gleiche Tagesgang gewählt. Die hydraulischen Netze, die verglichen wurden, werden in Kapitel 4 betrachtet. Die Varianten der Übergabedatei werden an dieser Stelle behandelt. Die Abbildung 1-6 bildet beispielhaft ab, wie eine Übergabedatei für den Simulator der Leckage Lokalisierung ausschauen könnte.

Im ersten Bereich der Übergabedatei, der „Information“ wurde der „tag“ für jede Simulation geändert, da dieser Teil der Benennungen der Ausgabedateien ist. Ebenso wurde der Punkt „real_leak“ stets dem realen Leck angepasst, da dies wichtig für die Berechnungen der Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck ist. Mit „start_datetime“ und „end_datetime“ wurde der Bereich der Messdaten gewählt, mit denen gemittelt simuliert wurde. In dieser Arbeit wurde stets die Zeit zwischen 02:30 Uhr und 03:30 Uhr gewählt. Die weiteren Punkte im Bereich der „Information“ wurden in dieser Arbeit stets so, wie in Abbildung 1-6 ersichtlich, belassen.

Die Einstellungen im Bereich „Preparator“ waren in dieser Arbeit stets die gleichen, ebenso jene im Bereich „Locator“. Auch die Einstellungen, die unter dem Bereich „Optimizer“ zusammengefasst sind, wurden bei den Simulationen für diese Arbeit nicht verändert. Der Bereich „Database“, der den Speicherort der Ergebnisse angibt, wurde während dieser Arbeit auch nicht verändert.

2.3.2 Evaluierung der Modellgüte

Bei der Evaluierung der Modellgüte wird überprüft, wie gut das Modell an die, für die Modellerstellung verwendeten Daten – die Kalibrierungsszenarien, angepasst wurde.

Dafür wird die Streuung der Rauheit der automatischen Kalibrierung über mehrere Durchläufe betrachtet sowie der Fitness-Wert der automatischen Kalibrierung. Außerdem werden Korrelationen betrachtet und simulierte Drucktagesgänge mit einer Gruppe von Drucktagesgängen verglichen. Zusätzlich werden die zulässigen Einzelabweichungen nach DVGW GW 303-1, 2006, berechnet.

2.3.2.1 Streuung der Ergebnisse der Automatischen Kalibrierung

Um die Streuung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung betrachten zu können, wurden in einem Vorschritt zuerst drei Simulationen gestartet, in denen der Wert für den Minor Loss Koeffizienten im Bereich zwischen 0 und 3000 lag. Aus den drei Simulationen wurden die Werte des Minor Loss Koeffizienten gemittelt, dieser diente anschließend als Fixwert bei den eigentlichen Simulationen.

Zehn Simulationen mit den identen Eingabedaten wurden gerechnet, um für die Streuung der Rauheiten der automatischen Kalibrierung Ergebnisse zu erlangen.

Die Werte wurden aus den Jenkins-Builds ausgelesen, gegebenenfalls ihrer Gruppe zugeordnet und in eine Tabelle eingeschrieben. Über RStudio wurden die Werte eingelesen und als Boxplots ausgegeben.

Anschließend wurde eine der zehn Simulationen, die den jeweiligen Mittelwerten am besten entsprach, als repräsentativ ausgewählt und für die Punkte 2.3.3.1 und 2.3.3.2 weiterverwendet.

2.3.2.2 Fitness-Wert der Automatischen Kalibrierung

Bei der Evaluierung mit dem Fitness-Wert, der bei der automatischen Kalibrierung am Ende ausgegeben wird, wird die Modellgüte über die Höhe des Wertes bestimmt. So ist dem Modell mit niedrigerem Fitness-Wert im Vergleich zu einem Modell mit höherem Fitness-Wert die bessere Modellgüte zuzuordnen. Dieser Vergleich wird nur angewendet, wenn es sich um gleiche Ausgangsmodelle vor der AC handelt.

2.3.2.3 Korrelationen (Kalibrierungsszenarien)

Bei den Korrelationen werden die gemessenen mit den simulierten Drücken verglichen und diese in einem Plot dargestellt.

Korrelationsplots werden bei der Durchführung der automatischen Kalibrierung automatisch erstellt. Um sie zu vereinheitlichen, wurden Korrelationsplots aber auch in zusätzlich in RStudio erstellt.

Weitere Boxplot-Darstellungen der Druckabweichungen zwischen simulierten und gemessenen Drücken an den verschiedenen Messstellen, bzw. in den verschiedenen Szenarien, wurden zudem generiert. Die Abfolge der Erstellung dieser ist in 2.3.3.1 erläutert.

2.3.2.4 Durchschnittliche Druckdifferenz über den gesamten Tag

Ein weiteres Evaluierungskriterium der Modellgüte ist die Druckabweichung der einzelnen Messpositionen zu den entsprechenden Messungen über den Tagesverlauf an Tagen des ungestörten Systems.

Hierzu werden Drucktagesgänge für die verschiedenen hydraulischen Modelle simuliert. Die Differenzen zu den, aus dem Zeitbereich des ungestörten Systems

gewählten Drucktagesgängen, werden im Mittel über 24 Stunden und zusätzlich der Bereich der Standardabweichung dargestellt.

2.3.2.5 Überprüfung der zulässigen Einzelabweichungen

Nach DVGW Arbeitsblatt GW 303-1 (DVGW GW 303-1, 2006) gilt eine Vergleichsrechnung dann als zutreffend, wenn die Abweichungen der errechneten von den gemessenen Drücken innerhalb gewisser Richtwerte liegen, ausgenommen sind begründete Abweichungen. Nachfolgend werden diese Richtwerte erläutert.

Es werden dazu die zulässige Abweichung der Einzelmessung (a) und der Erwartungswert der Druckabweichung (U) mit nachfolgenden Formeln berechnet.

$$|a| \leq \max \left\{ \begin{array}{l} 2 \% \text{ des Ruhedrucks am Messpunkt} \\ 0,2 \text{ bar} \end{array} \right. \quad \text{Gleichung 2-1}$$

$$-\frac{a}{\sqrt{n}} \leq U \leq +\frac{a}{\sqrt{n}} \text{ mit } U = \frac{\sum_1^n p_m - p_e}{n} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

mit

$p_m \dots$ gemessene Drucke, $p_e \dots$ errechnete Druck, $n \dots$ Anzahl der Druckmessstellen

Da die Druckberechnungen in dieser Arbeit durchwegs mit der Einheit [mWS] gerechnet werden, ist zu Gleichung 2-1 anzumerken, dass die maximale Größe 2,04 mWS ist.

Verglichen werden die Werte der einzelnen Messstellen über die gemittelten Werte der Kalibrierungsszenarien.

Für Vergleichszwecke verschiedener Modelle kann die Anzahl der Überschreitungen herangezogen werden.

2.3.3 Evaluierung der Modellqualität

Bei der Evaluierung der Modellqualität wird überprüft, wie gut die Ergebnisse sind, wenn das Modell mit Daten, die nicht für die Erstellung des Modells verwendet wurden, gespeist wird.

Dafür werden einerseits Korrelationen mit Validierungsszenarien betrachtet, aber auch weitere Darstellungen der Druckabweichungen zwischen simulierten und realen Drücken werden betrachtet. Wobei an dieser Stelle für die simulierten Drücke, die für die Modellerstellung nicht gebrauchten Validierungsszenarien verwendet werden. Über die Differenz der Mittelwerte dieser letztgenannten, in 2.3.3.1 erklärten Methode von Kalibrierungs- und Validierungsszenarien, kann zusätzlich die Modellqualität evaluiert werden.

Der zweite große Punkt der Modellqualitätsevaluierung erfolgt mit der Anwendung der Leckage Lokalisierung. Dabei werden die Distanzen zwischen realen und simulierten Leckagen betrachtet.

2.3.3.1 Validierung über Validierungsszenarien

Bei der Validierung über EPANET werden die kalibrierten Inputfiles des Ergebnisses der automatischen Kalibrierung, aber auch das Input-File der Trial & Error-Kalibrierung in EPANET geöffnet.

Anschließend werden die Szenarien in Form von Pattern in EPANET geladen und den entsprechenden Messstellen (HG3302, HG3409, HG3537, HG3880, HG4118, HG4504 und dem Reservoir) zugeordnet. Bei der Zuordnung wird zusätzlich der Base Demand an diesen Knoten auf 1 gestellt. Über die Einstellungen wird die Gesamtdauer der Extended-Period-Simulation für die acht Kalibrierungsszenarien auf „07:00“ gestellt. Aus Gründen der Weiterverarbeitbarkeit wird an dieser Stelle das Netz exportiert und als neue Input-Datei abgespeichert. Diese wird anschließend mit einem Texteditor geöffnet und im Abschnitt „[REPORT]“ werden die Zeilen „Links All“ und „Nodes All“ hinzugefügt. (Eck, 2017)

An dieser Stelle wird das Input-File kopiert und für die Validierungsszenarien erneut abgespeichert.

Anschließend wird das Input-File mit den Kalibrierungsdaten erneut mit EPANET geöffnet und die Messwerte der Kalibrierungsszenarien werden über „Calibration Data – Pressure“ als Text-File in EPANET geladen. Die Simulation wird gestartet und das Ergebnis in einem Report-File abgespeichert.

Bei der Kopie des Input-Files für die Validierung wird ähnlich vorgegangen, jedoch sind nicht mehr ganz so viele Schritte nötig.

Nach dem Öffnen mit EPANET werden die Kalibrierungs-Pattern durch Validierungs-Pattern ersetzt. Die Zeit wird auf „06:00“ gestellt, da es ein Validierungsszenario weniger gibt als Kalibrierungsszenarien. Danach werden unter „Calibration Data – Pressure“ die Messwerte der Validierungsszenarien geladen und die Simulation gestartet. Das Ergebnis wird erneut in einem Report-File abgespeichert.

In RStudio mit dem Paket „epanetReader“ (Eck, 2017) werden die Report-Files eingelesen und die Simulationsergebnisse verarbeitet.

Es werden Boxplot-Darstellungen aller Szenarien und aller Messstellen generiert, die für verschiedene Vergleiche herangezogen werden.

2.3.3.2 Validierung über die Leckage Lokalisierung

Die Validierung über die Leckage Lokalisierung wird mittels eines Vergleichs zweier oder mehrerer Modelle über die mittlere Distanz zwischen realem und simuliertem Leck durchgeführt. Hierzu sind die Grundparameter jeder Leckage-

Lokalisierungs-Simulation die gleichen, es werden aber verschiedene Modelle verwendet. Für die Vergleiche werden sowohl der Median-Wert als auch der Mittelwert der jeweils 100 Simulationen eines Durchgangs auf Jenkins herangezogen.

Eine weitere Evaluierung mittels der Leckage Lokalisierung ist die Betrachtung der Ergebnisse eines Modells über verschiedene Tage und verschiedene Leck-Positionen mit verschiedener Leckage-Größe. Hier werden die Ergebnisse in einem Plot über die Zeit mit mittlerer Distanz, Leck-Ort und –Größe zusammengefasst.

3 Feldversuch in Hart bei Graz

Als Grundlage dieser Arbeit dient ein Abschnitt des Wasserverbands Grazerfeld Südost und zwar der Teilabschnitt Hart bei Graz / Ragnitz, vgl. Abbildung 3-1. In diesem wurden in der Nacht von 11. auf den 12. April 2016 Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Nachlaufend wurden bis zum 29. August 2016 weitere Druck-, Durchfluss und Behälterwasserstandsmessungen in diesem Trinkwasserversorgungsnetz durchgeführt. (Ramaseder, 2016; Steffelbauer u. a., 2017)

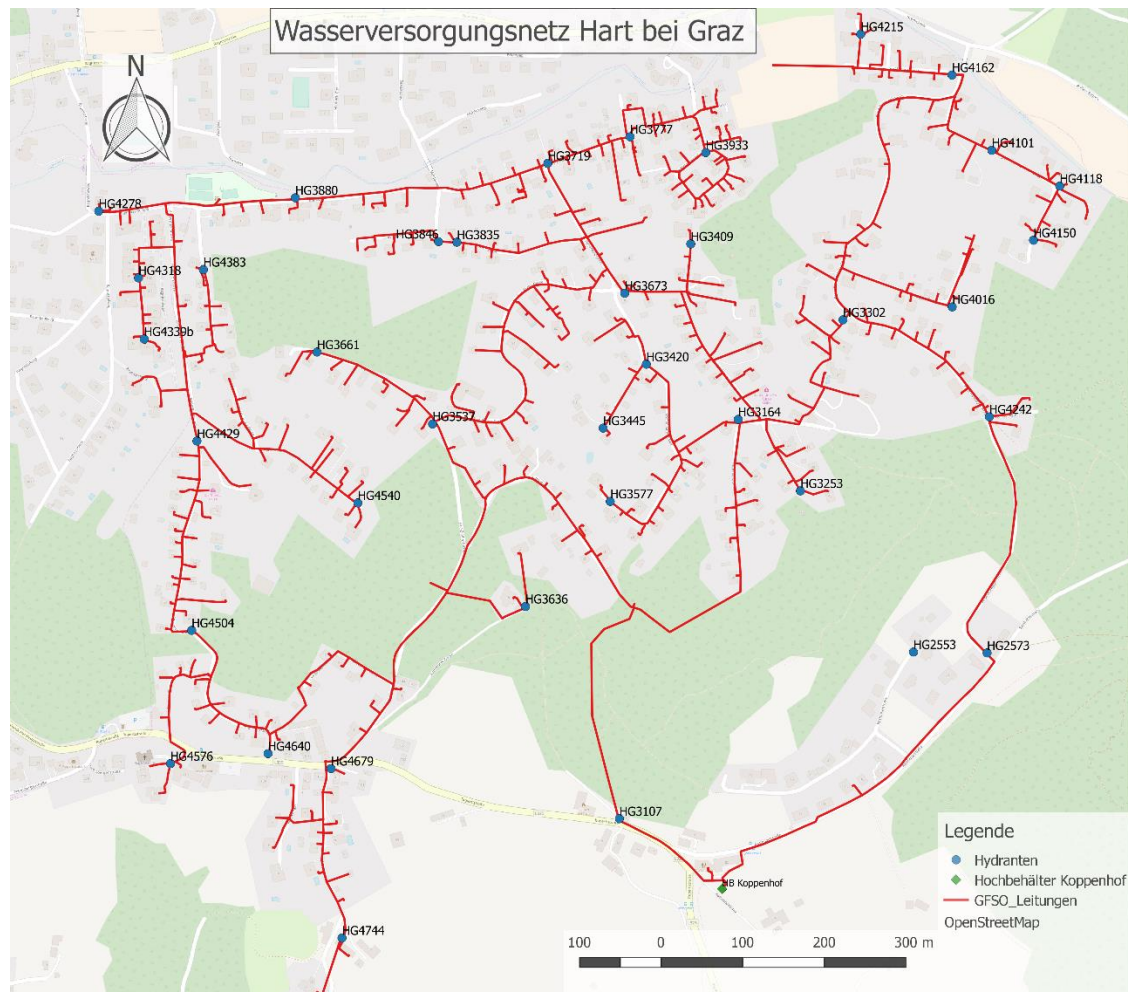


Abbildung 3-1: Wasserversorgungsnetz Hart bei Graz (SWW, mod.)

Neben dem Feldversuch wurde gleichzeitig ein hydraulisches Modell des WVN mit der Software EPANET erstellt. Grundlage dafür waren Geoinformationsdaten des Leitungskatasters, sowie Verbrauchsdaten aus Jahresrechnungen der angeschlossenen Verbraucher (Steffelbauer u. a., 2017).

Der Feldversuch, wie auch die grundsätzliche Erstellung des hydraulischen Modells wurden von Mitarbeitern des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz und Diplomanden ohne der Mithilfe des Autors dieser Arbeit durchgeführt.

3.1 Geografische und geodätische Lage

Der Abschnitt des Trinkwasserverteilnetzes, der in dieser Arbeit behandelt wird, liegt östlich von Graz in Hart bei Graz, vgl. Abbildung 3-2. Die Rupertistraße und die Rastbühelstraße bilden im Süden die Grenze des Gebiets, die Peter Rosegger-Straße im Osten, der Rothweg im Norden und im Westen die Angermayrstraße bzw. der Ragnitztalweg. Die geodätischen Höhen des Netzes bewegen sich zwischen 404,5 m.ü.A. und 504,7 m.ü.A. – ein großer Höhenunterschied von ca. 100 m ist in diesem Wasserverteilungsteilnetz vorhanden.

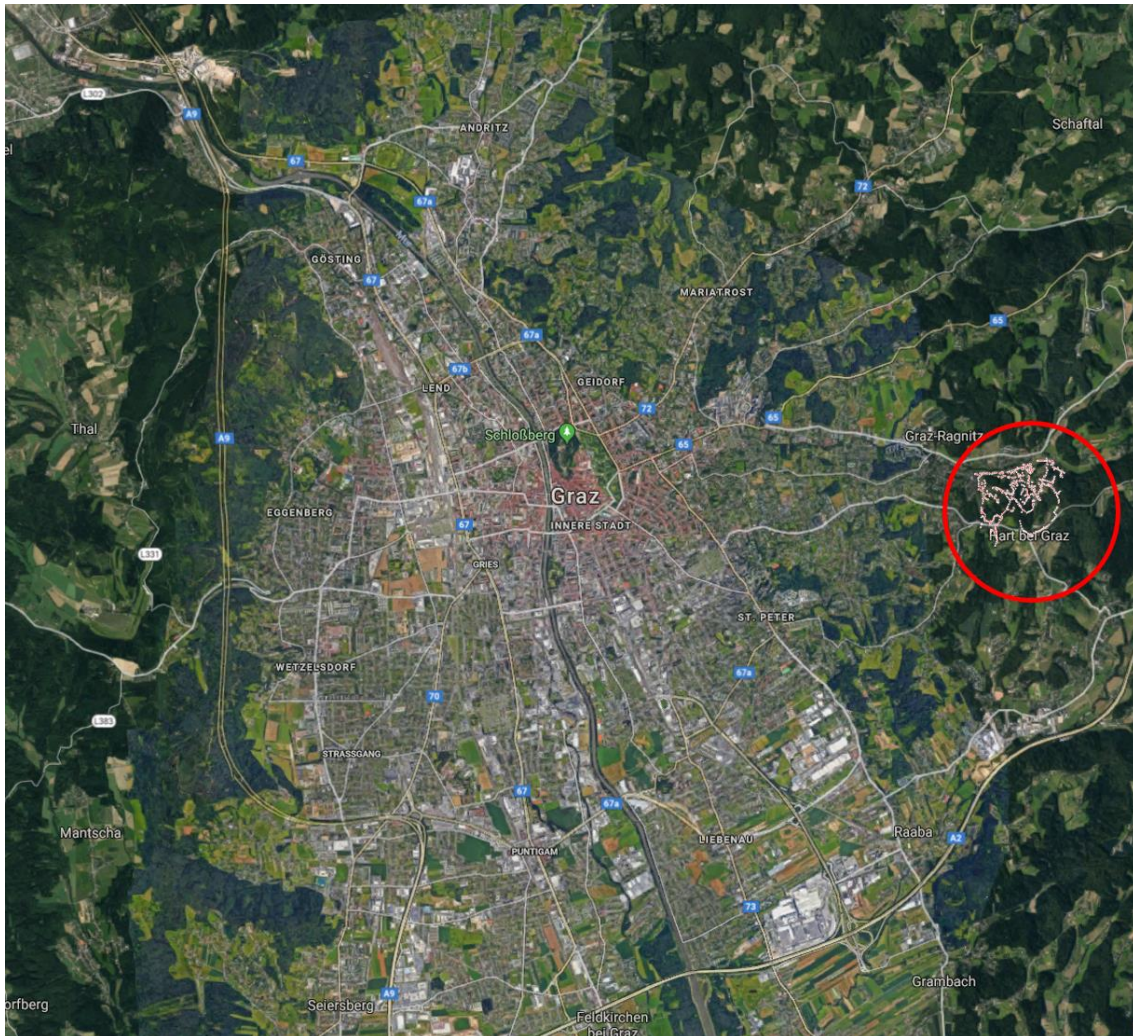


Abbildung 3-2: Lage des Untersuchungsgebiets (Google Maps, mod.)

3.2 Eigenschaften des Trinkwasserverteilnetzes Hart bei Graz

Dieses Wasserversorgungsteilnetz umfasst 1309 Leitungsabschnitte über eine Gesamtlänge von über 16,2 km. Beinahe alle Leitungsabschnitte sind im hydraulischen Modell mit Längen unter 100 Metern vorhanden, es gibt nur einige wenige Ausreißer mit Längen bis zu über 300 Metern, vgl. Abbildung 3-3. Die Durchmesser, der im hydraulischen Modell erfassten Leitungen, bewegen sich zwischen 25,4 mm und 126,6 mm, wobei die größte Anzahl auf die kleineren Durchmesser entfallen, vgl. Abbildung 3-4. Die Materialien des Rohrnetzes bestehen aus einem Mix aus duktilem Gusseisen (GGG), Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC) und Stahl (ST), wobei die Kunststoffrohre den größten Anteil stellen, vgl. Abbildung 3-5. Achtung, diese Abbildung stellt nicht das Verhältnis der Leitungslängen der verschiedenen Materialien dar. Bezüglich des Alters dieses Wasserversorgungsteilnetzes ist zu sagen, dass die meisten Rohre bereits vor 1980 verlegt wurden, vgl. Abbildung 3-6.

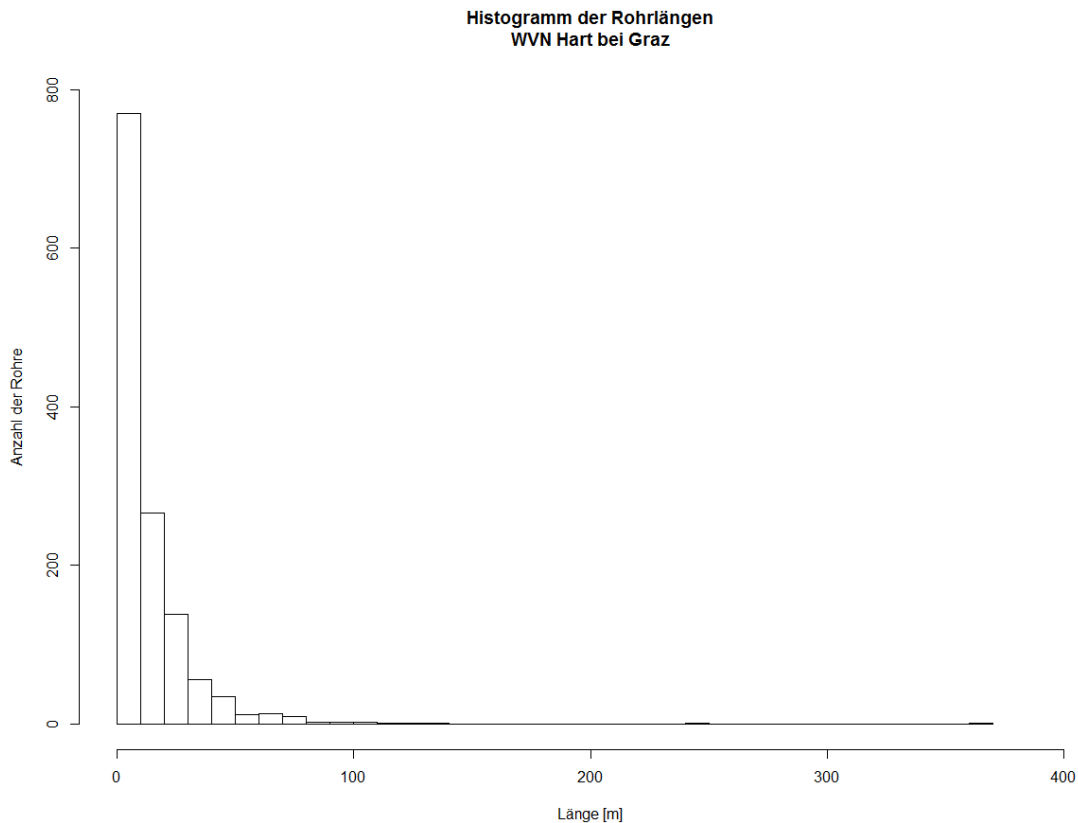


Abbildung 3-3: Histogramm der Rohrlängen, WVTL Hart bei Graz

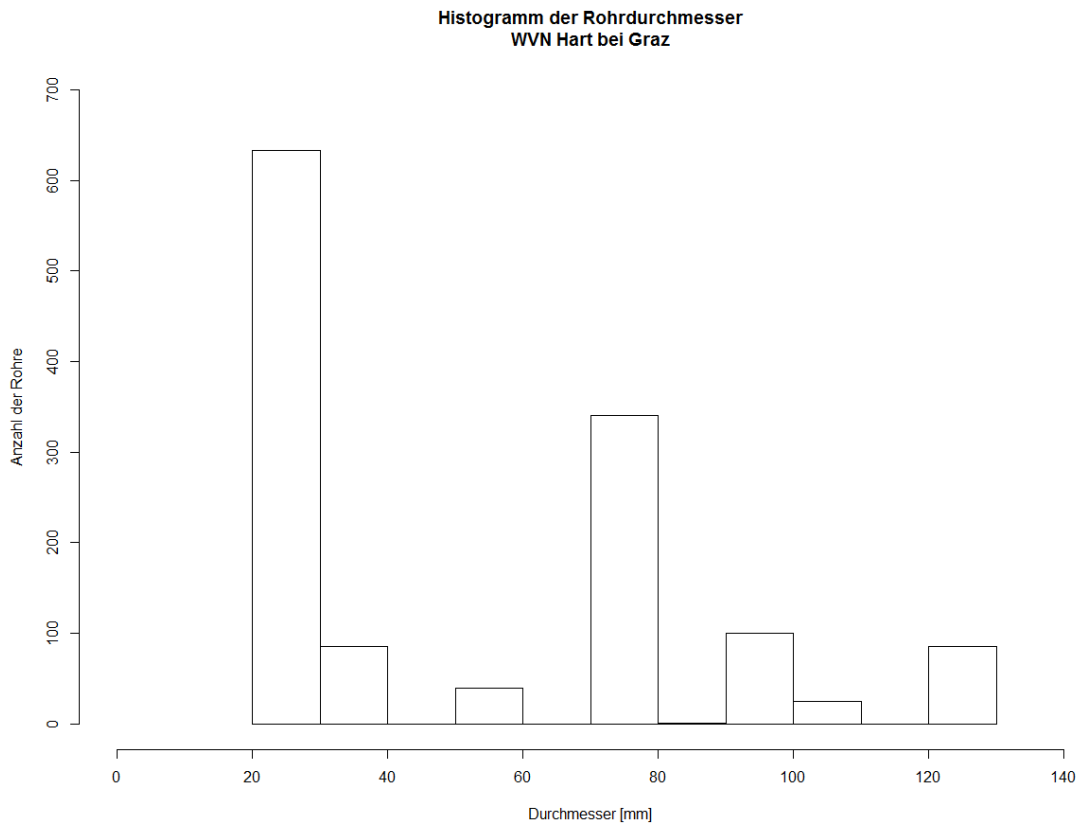


Abbildung 3-4: Histogramm der Rohrdurchmesser im WVTL Hart bei Graz

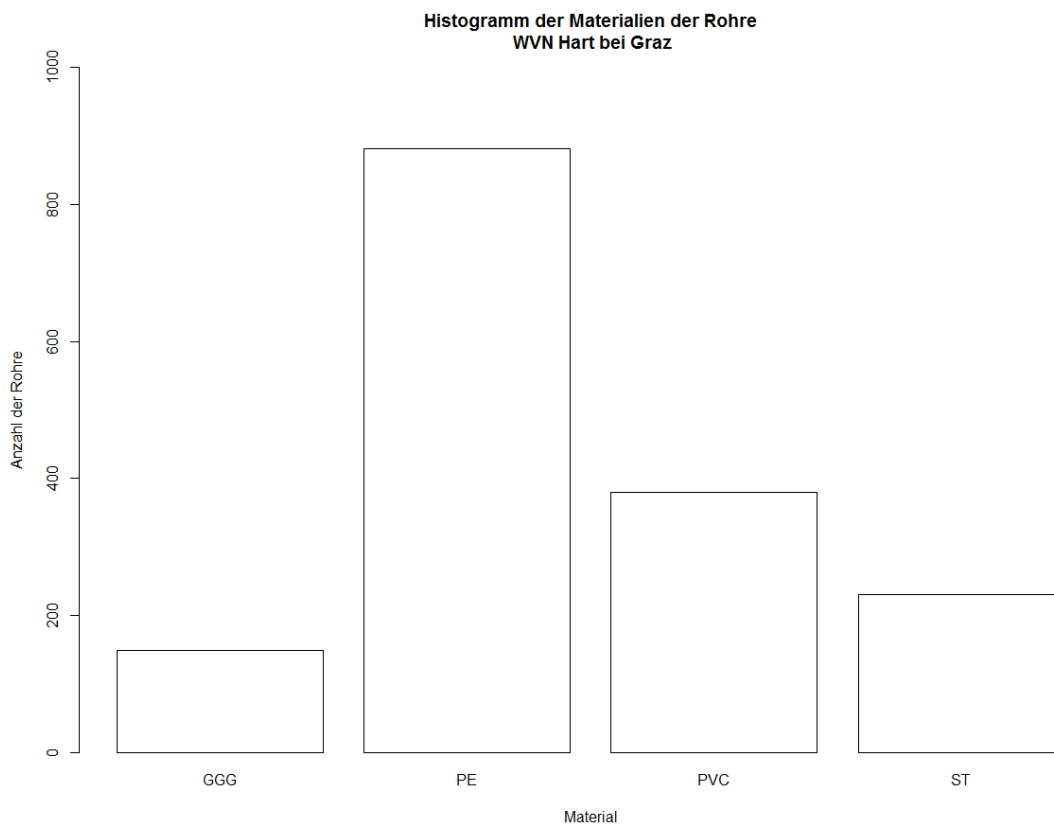


Abbildung 3-5: Histogramm der Rohrmaterialien im WVTL Hart bei Graz

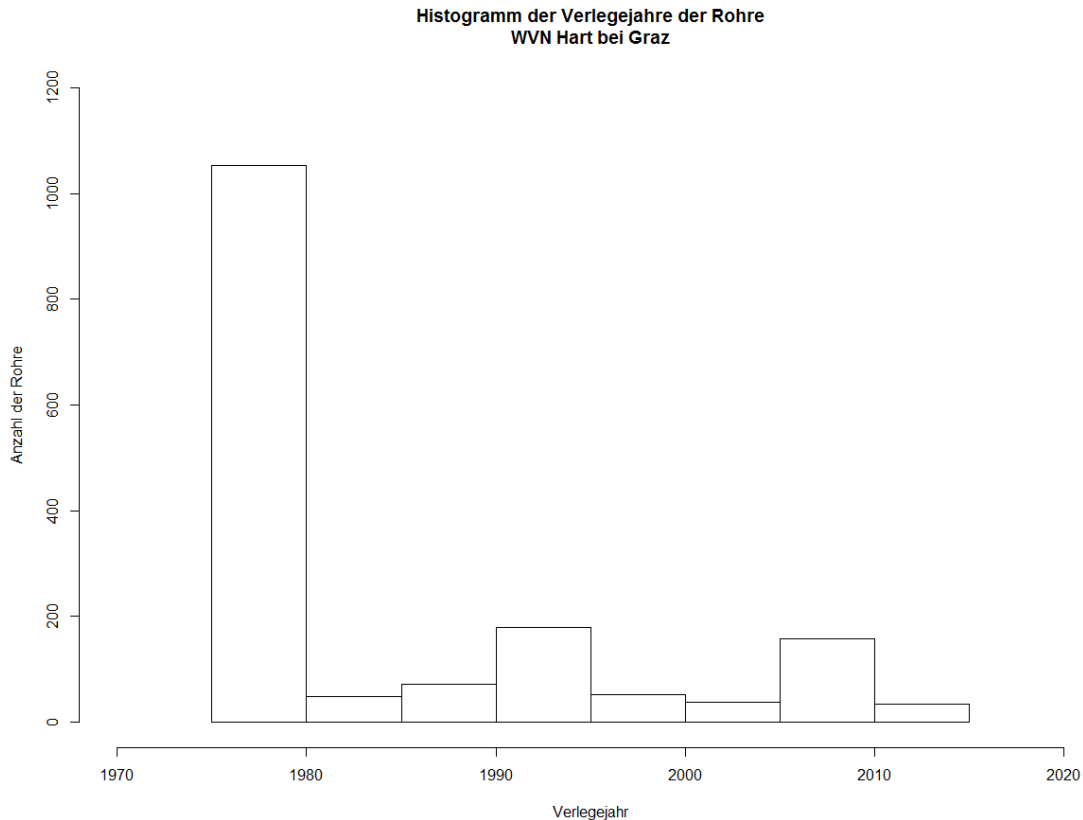


Abbildung 3-6: Histogramm der Verlegejahre der Rohre im WVTL Hart bei Graz

3.3 Ablauf des Feldversuchs

Der gesamte Zeitraum der Messungen, die im Feldversuch durchgeführt wurden, erstreckt sich vom 05. April 2016 bis zum 29. August 2016. Am Beginn wurde eine Woche das ungestörte System mit zwölf Drucksensoren und einem Durchflussmessgerät, das direkt nach dem Hochbehälter angebracht war, gemessen. Am 12. April 2016 wurden in der Nacht große Mengen Wasser an sechs verschiedenen Hydranten im Netz entnommen, diese Fire-Flow-Szenarien dienen der Kalibrierung des Netzes. Nach dem 12. April 2016 wurden an verschiedenen Stellen im Netz künstliche Leckagen verschiedener Größenordnung generiert.

3.3.1 Platzierung der Sensoren

Eine weitere Fragestellung, die mit diesem Feldversuch abgedeckt wurde, war die optimale Platzierung der Drucksensoren im Netz. Sechs verschiedene Platzierungen wurden hierfür ausgewählt. Ab dem Zeitpunkt, an dem dem Versuchsteam weniger Sensoren zur Verfügung standen, wurden zuerst jene Stellen im Netz mit den verbliebenen sechs Sensoren ausgestattet, so dass sich zumindest zwei verschiedene Platzierungen ergaben. Bei einer Umsetzung der Sensoren am 25. Juli 2016 wurden danach die anderen sechs ausgewählten Stellen im Netz gemessen. Die optimale Platzierung der Sensoren ist jedoch nicht Teil der Arbeit, kann aber bei Ramaseder, 2016; und Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2016 nachgelesen werden.

3.3.2 Die Kalibrierungsnacht

Am 12. April 2016 wurden in der Nacht die Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Dafür wurde am 11. April 2016 die Auflösung aller zwölf Drucksensoren, die zu diesem Zeitpunkt im Wasserversorgungsnetz in Hart bei Graz eingesetzt waren, hinaufgesetzt, um somit jede Sekunde einen Druckwert zu messen. Um das Wasserversorgungsnetz danach kalibrieren zu können, wurden an sechs verschiedenen Hydranten im System größere Wassermengen entnommen. Die Nacht am 12. April 2016 gliederte sich in zwei Phasen, in der ersten Phase zwischen 01:30 Uhr und 02:45 Uhr wurde an den Hydranten HG3880, HG3409 und HG4118 Wasser entnommen. Die Position dieser Hydranten im Netz ist in Abbildung 3-7 ersichtlich.

Der Hydrant HG3409 wurde deswegen verwendet, da der ursprünglich geplante Hydrant HG3673 leckte, wenn er geöffnet wurde. In der zweiten Phase zwischen 03:15 Uhr und 04:30 Uhr wurde an den Hydranten HG4504, HG3537 und HG3302 Wasser entnommen. Die geplanten Wassermengen, die jeweils entnommen werden sollten und die Uhrzeiten können aus den Tabellen Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 entnommen werden. Wobei die Uhrzeiten jenen Bereich, der jeweils circa fünf Minuten, die jedes Szenario eingestellt war, anzeigen, in denen die Entnahmemengen konstant waren.

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Person, die die Wassermengen an den Hydranten HG3409 bzw. HG4504 entnommen hat, über keinen Datenlogger für die Entnahmemenge verfügte, aber da es sich um einen routinierten Mitarbeiter der SAS Styrian Aqua Service GmbH handelte, war davon auszugehen, dass er die Mengen relativ gut einschätzen konnte.

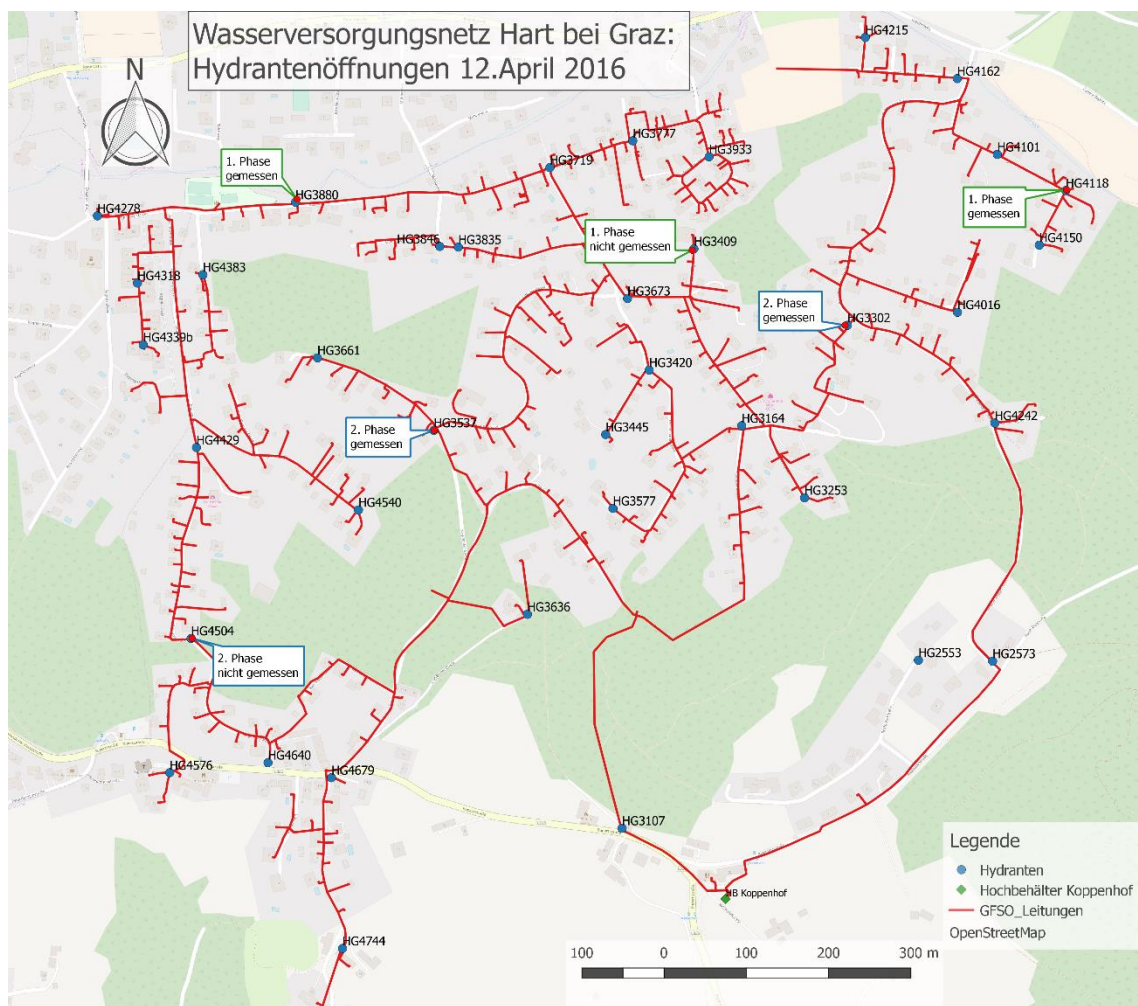


Abbildung 3-7: WVN Hart bei Graz: Hydrantenöffnungen am 12. April 2016 (SWW, mod.)

Tabelle 3-1: Hydrantenöffnungsplan, 12.04.2016, Phase 1 (Ramaseder, 2016, SWW, mod.)

HG3880	HG3409	HG4118	Uhrzeit
15 l/s	0 l/s	0 l/s	01:37:45 – 01:40:30
8 l/s	8 l/s	0 l/s	01:47:30 – 01:49:45
5 l/s	5 l/s	5 l/s	01:58:00 – 01:59:30
0 l/s	16 l/s	0 l/s	02:04:00 – 02:06:00
0 l/s	7 l/s	7 l/s	02:09:15 – 02:11:45
0 l/s	0 l/s	12 l/s	02:15:45 – 02:18:15
7 l/s	0 l/s	7 l/s	02:22:15 – 02:25:15

Tabelle 3-2: Hydrantenöffnungsplan, 12.04.2016, Phase 2 (Ramaseder, 2016, SWW, mod.)

HG4504	HG3537	HG3302	Uhrzeit
10 l/s	0 l/s	0 l/s	03:23:45 – 03:26:30
6 l/s	6 l/s	0 l/s	03:31:30 – 03:33:30
5 l/s	5 l/s	5 l/s	03:36:45 – 03:39:30
0 l/s	16 l/s	0 l/s	03:44:00 – 03:46:45
0 l/s	6 l/s	6 l/s	03:51:45 – 03:54:45
6 l/s	0 l/s	6 l/s	03:58:30 – 04:01:00
0 l/s	0 l/s	9 l/s	04:04:30 – 04:07:45

3.3.3 Künstliche Leckagen und ungestörtes System

Im Anschluss an die Kalibrierungsnacht wurden bis zum 29. August 2016 im Wasserversorgungsnetz Hart bei Graz weitere Messungen kontinuierlich durchgeführt. Der Zufluss wurde dauerhaft gemessen und bis zum 17. Mai 2016 konnten auch an allen zwölf gewählten Hydranten Druckmessungen vorgenommen werden. Im Anschluss wurde mit sechs Drucksensoren weiter gemessen, diese wurden vom 20. Mai 2016 bis zum 24. Juli 2016 an den Hydranten HG3420, HG3835, HG3933, HG4162, HG4215 und HG4383 montiert. Anschließend wurden die sechs Sensoren auf die Hydranten HG3445, HG4150, HG4339b, HG4540, HG4576 und HG4744 umgesetzt und maßen an diesen Stellen bis zum 22. August 2016.

Neben dem ungestörten System, welches vom 05. Mai 2016 bis 08. Mai 2016, vom 26. Mai 2016 bis 03. Juli 2016, vom 16. Juli 2016 bis 26. Juli 2016, sowie vom 04. August 2016 bis zum 21. August 2016 gemessen wurde, wurden an verschiedenen Stellen an Hydranten künstliche Leckagen generiert. Der genaue Aufbau des „Apparatus“, der an den Hydranten installiert wurde, kann bei Ramaseder, 2016 nachgelesen werden. An welchem Hydranten, zu welchem Zeitpunkt, welche Menge Wasser entnommen wurde, ist in Tabelle 3-3 ersichtlich.

Tabelle 3-3: Zeitplan der generierten künstlichen Leckagen

Hydrant	Entnahme menge	Datum Start	Uhrzeit Start	Datum Ende	Uhrzeit Ende
HG3880	0,5 l/s	15.04.2016	11:15:00	17.04.2016	12:32:20
HG3880	0,7 l/s	17.04.2016	12:33:20	20.04.2016	09:49:40
HG3880	0,3 l/s	20.04.2016	09:51:30	22.04.2016	09:47:30
HG3880	0,5 l/s	22.04.2016	10:35:00	25.04.2016	10:51:00
HG4504	0,25 l/s	25.04.2016	12:15:00	28.04.2016	15:16:20
HG4504	0,5 l/s	28.04.2016	15:19:00	01.05.2016	16:12:00
HG4504	0,7 l/s	01.05.2016	16:13:00	04.05.2016	08:29:00
HG3164	0,5 l/s	09.05.2016	11:30:00	12.05.2016	14:37:00
HG3164	1,0 l/s	12.05.2016	14:38:00	15.05.2016	10:40:00
HG3164	0,25 l/s	15.05.2016	10:51:40	18.05.2016	14:38:00
HG3880	0,7 l/s	04.07.2016	12:20:00	12.07.2016	09:15:00
HG4118	0,9 l/s	12.07.2016	10:21:00	15.07.2016	09:44:00
HG3164	0,7 l/s	22.08.2016	14:22:00	26.08.2016	09:32:20
HG4118	0,5 l/s	26.08.2016	10:15:00	29.08.2016	11:16:40

Alle Messdaten wurden regelmäßig ausgelesen und in eine Datenbank gespielt und können über das Datenbetrachtungstool Grafana visuell betrachtet werden.

Eine Übersicht als Zeitablaufdiagramm der gesammelten Daten im Wasserversorgungsnetz in Hart bei Graz ist im Anhang F ersichtlich.

3.4 Verwendete Modelle

Die grundlegenden Daten für das hydraulische Modell kamen aus dem Leitungskataster des Wasserversorgungsunternehmens. Das so gebildete hydraulische Modell ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

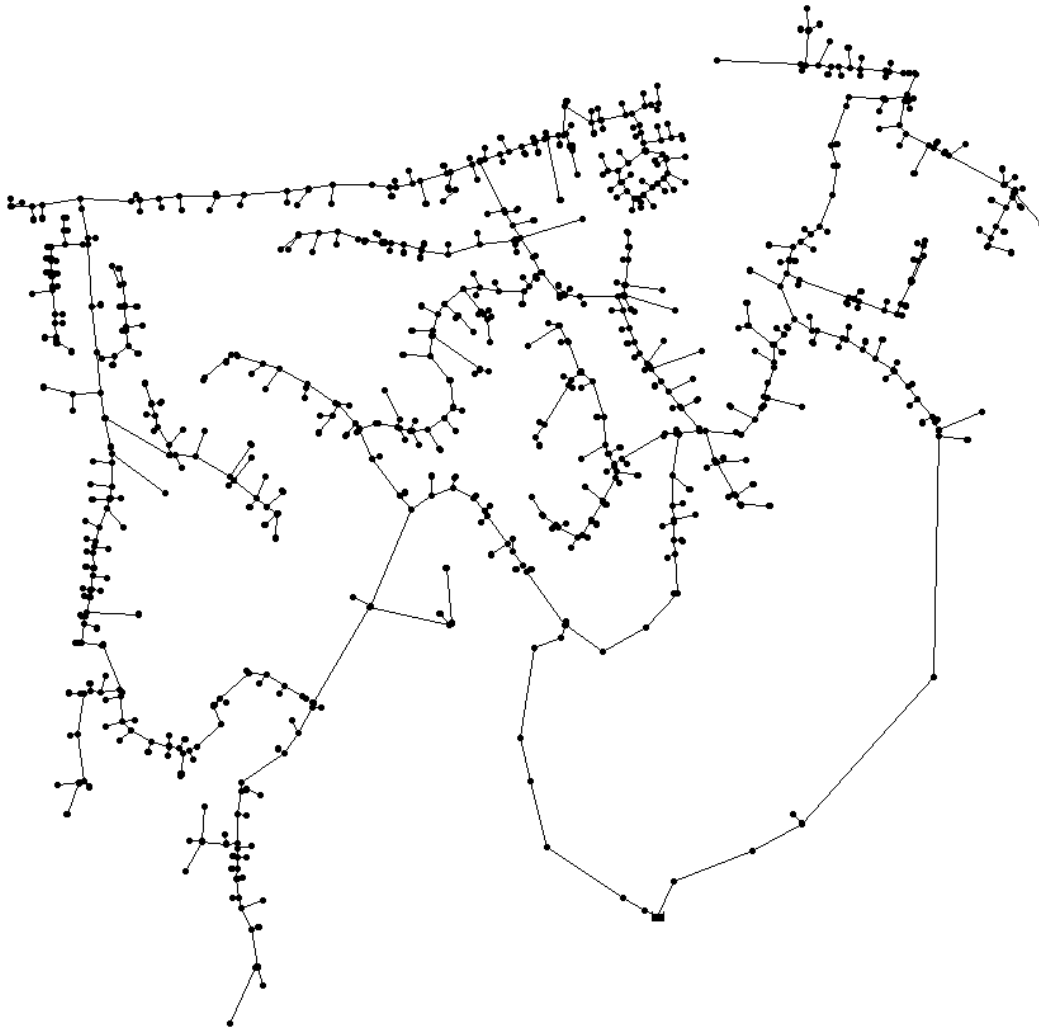


Abbildung 3-8: Hydraulisches Modell aus GIS-Daten

Weitere Attribute, die aus dem Leitungskataster importiert werden konnten und für die weitere Arbeit wichtig waren, sind Oberflur- und Unterflurhydranten, Rohrmaterial, Rohrdurchmesser, Verlegejahr der Rohre und Einbauten. Da nicht alle dieser Attribute in die Software EPANET eingegeben werden können, wurde eine dazugehörige Metadatendatei erstellt.

Eine weitere wichtige Netzinformation stellt den Verbrauch von Wasser von den versorgten Abnehmern in diesem Gebiet dar. Diese Informationen kamen jedoch nicht aus den GIS-Daten, sondern von Jahresrechnungen der Anrainer aus den Jahren 2010 bis 2014. Die Daten wurden dem Modell zugeordnet und die Menge auf einen durchschnittlichen Stundenverbrauch (l/s) umgerechnet (Landuyt, 2015; Steffelbauer u. a., 2017).

3.4.1 Skeletonisierung

Um das hydraulische Modell zu vereinfachen, wurde es im Anschluss skeletonisiert. Bei der Skeletonisierung wird ein Modell soweit vereinfacht, dass Elemente, die für das Ergebnis unerheblich sind, vereinfacht oder eliminiert werden.

3.4.1.1 Händische Skeletonisierung

Bei der händischen Skeletonisierung wurden die für die hydraulische Modellierung unwichtigen Stichleitungen entfernt und ein etwaiger Verbrauch am Ende der Stichleitung dem Knoten zugeordnet, an dem zuvor die Stichleitung angebunden war. Das veränderte Modell „Jakim“ ist in Abbildung 3-9 ersichtlich.

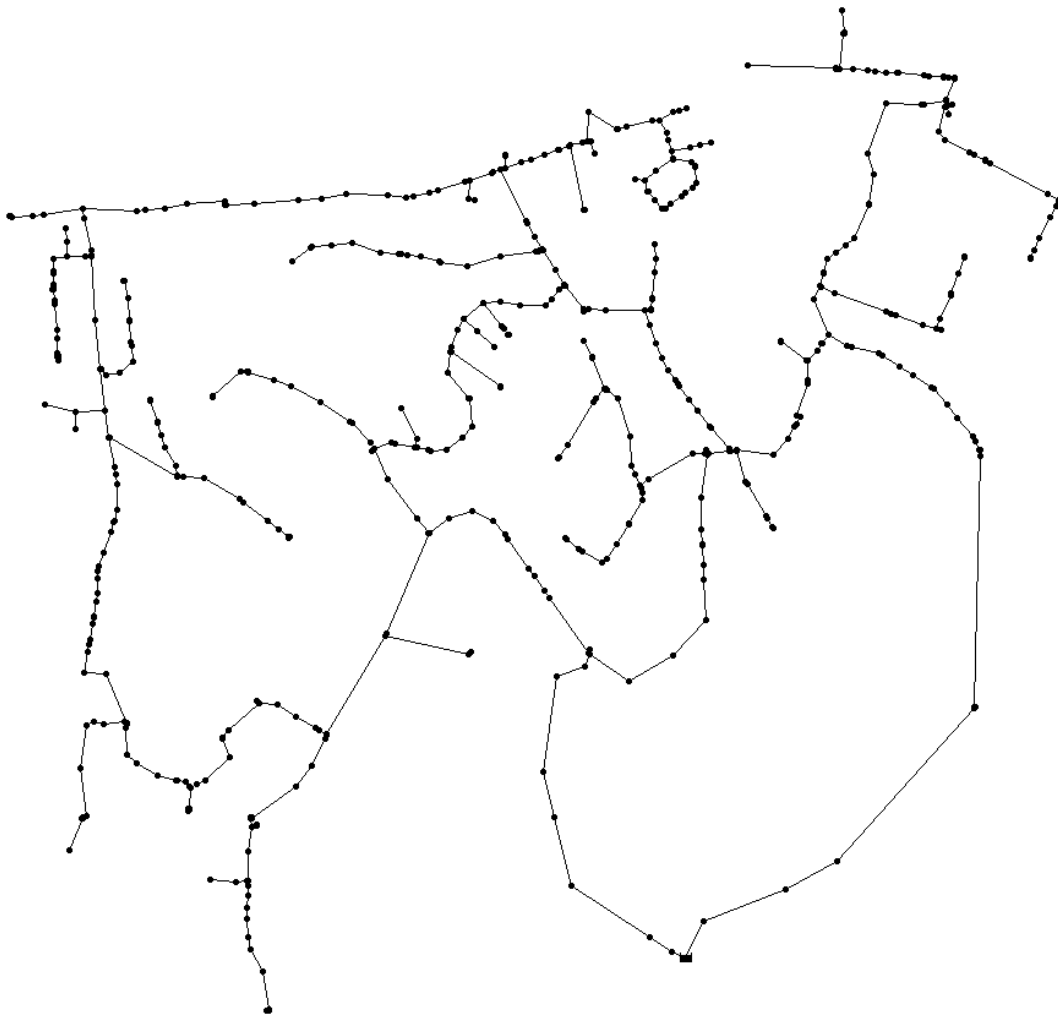


Abbildung 3-9: Hydraulisches Modell „Jakim“, händisch skeletonisiert

Das händisch skeletonisierte Netz „Jakim“ wurde auf 658 Leitungen reduziert.

3.4.1.2 Automatische Skeletonisierung

Neben der händischen Skeletonisierung wurde das Modell mit einem, am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau entwickelten Algorithmus zur automatischen Skeletonisierung, vereinfacht.

Die genaue Funktionsweise der automatischen Skeletonisierung ist in 1.2.5.3 nachzulesen.

Das Ergebnis der automatischen Skeletonisierung ist in Abbildung 3-10 ersichtlich.

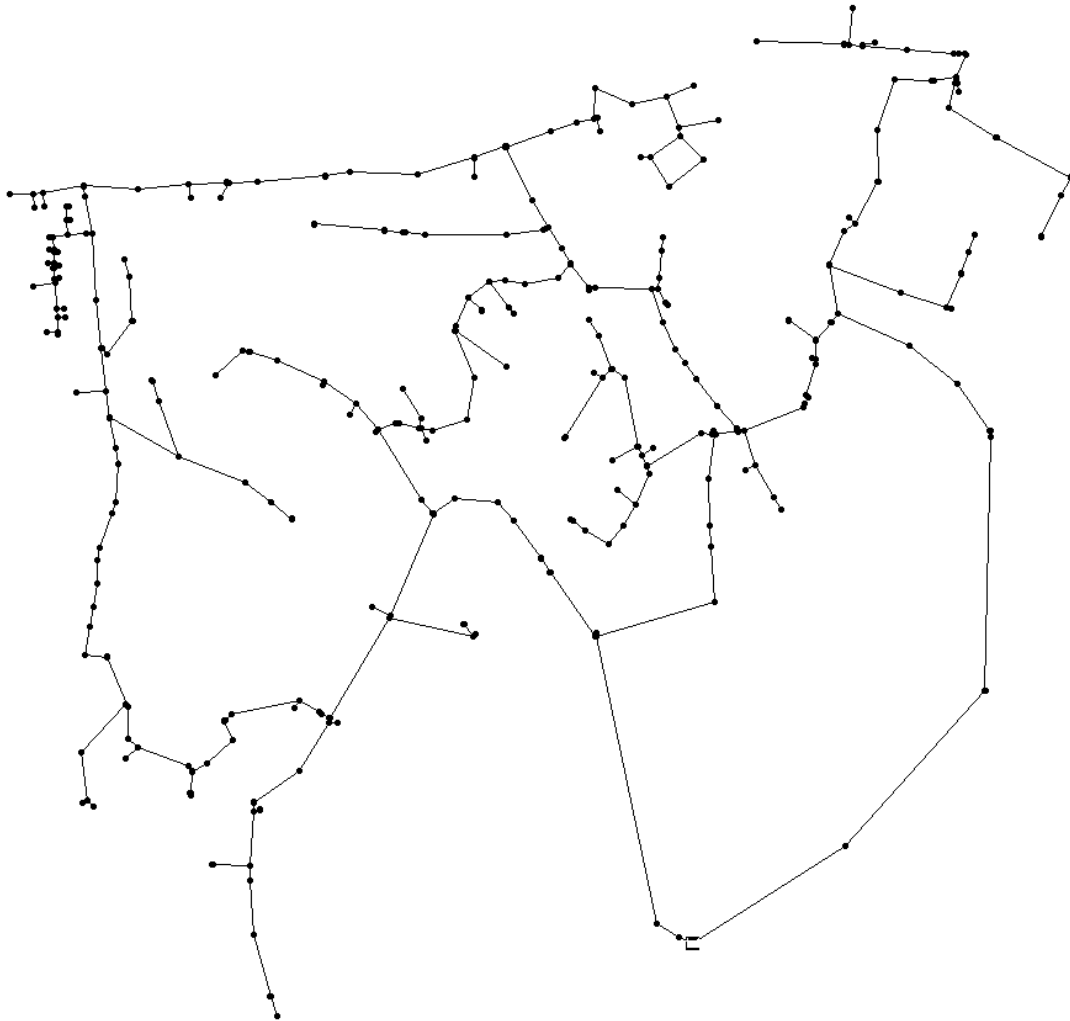


Abbildung 3-10: Hydraulisches Modell „Georg“, automatisch skeletonisiert

Das automatisch skeletonisierte Modell „Georg“ besteht aus 481 Abschnitten und 477 Knoten.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Vorkalibrierung, die Szenarienerstellung, der Status Quo der hydraulischen Modelle vor der eigentlichen Kalibrierung und die Ergebnisse der Vergleiche von Modellgüte und –qualität beschrieben.

4.1 Ergebnisse der Vorkalibrierung

4.1.1 Ergebnisse der Datenbereinigung

Der Feldversuch im WVN Hart bei Graz lief insgesamt von 05. April 2016 bis zum 29. August 2016 über 147 Tage. Um die Tage des ungestörten Systems zu filtern, mussten der Tag der Kalibrierungsmessungen, 41 Tage, an denen an Hydranten künstlich generierte Leckagen liefen, 23 Tage wegen unvollständiger Daten und ein Tag, an dem sich ein größerer Rohrbruch im Netz ereignete, eliminiert werden.

Nach der Datenbereinigung blieben somit im Zeitraum vom 05. Mai 2016 bis zum 21. August 2016, 81 von den 147 Tagen übrig, in denen das ungestörte System gemessen wurde.

Beispiele für die Datenbereinigung aus den dargestellten Daten befinden sich im Anhang A.

4.1.2 Ergebnisse der statistischen Betrachtung

Der für den Mittelwert herangenommene Zeitbereich für das Nachtminimum wurde am Anfang aus Erfahrungswerten mit 00:30 Uhr bis 03:30 Uhr angenommen. Über einen iterativen Prozess mit dem nachfolgenden Schritt, wurde dieser Zeitbereich anschließend auf 01:30 Uhr bis 04:30 Uhr korrigiert und in einem weiteren Schritt auf 01:00 Uhr bis 04:30 Uhr geändert und schlussendlich auch belassen.

In der Durchflussmessung des Zuflusses wurden beim Start des Ausreißer-Tests neun Werte als Ausreißer klassifiziert, vier davon sogar als weite Ausreißer. Vier weitere Werte wurden im ersten Iterationsschritt, zusätzlich drei im zweiten Iterationsschritt eliminiert. Insgesamt wurden somit bei der Zuflussmessung 16 Werte als Ausreißer definiert, alle 16 sind Ausreißer der oberen Grenze.

Bei den Druckmesswerten am Hydranten HG3420 wurden am Start gleich zwölf Werte als Ausreißer errechnet, zehn davon als weite Ausreißer. Somit wurde eine, bei der Sichtung der Daten getätigte Annahme bestätigt, dass dieser Sensor an dieser Stelle kaputtging. Dies war Ende Juni der Fall, wie am Zeitablaufdiagramm in Anhang F erkennbar ist.

Ergebnisse

Die weiteren Druckmessungen ergaben nicht mehr so eine große Anzahl an Ausreißern, zusammengefasst ist dies in Tabelle 4-1 ersichtlich. Welche Messtage direkt betroffen sind, ist auch im Zeitablaufdiagramm in Anhang F ersichtlich.

Zusammenfassend wurden an 43 Messtagen an einem oder mehreren Sensoren Ausreißer im Zeitbereich des Nachtminimums detektiert. Da der Sensor am Hydrant HG3420 jedoch kaputtging, wurden jene acht Messtage, an denen nur dieser Sensor Ausreißer generierte, nicht als Ausreißer-Tag festgelegt, jedoch die Messungen dieses Sensors in dieser Zeitspanne trotzdem nicht berücksichtigt. Somit bleiben von den 81 Messtagen, die nach der Datenbereinigung übrig geblieben waren noch 46 Messtage übrig.

Tabelle 4-1: Ausreißer nach Tukey's Test im Nachtminimum

Hydrant	Iteration 0		Iteration 1		Iteration 2		Iteration 3		s	s	s							
	k= 3		k= 1,5		k= 3		k= 1,5											
O/U	O	U	O	U	O	U	O	U	O	U	O	U	O	U	s			
Q Zufluss	4	0	5	0	0	0	4	0	0	0	3	0	0	0	0	16	0	16
HG3420	10	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	13
HG3445	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HG3835	0	0	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5
HG3933	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HG4150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HG4162	0	0	0	3	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	2	4	6
HG4215	3	0	4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
HG4339b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HG4383	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
HG4540	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
HG4576	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
HG4744	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Zur Erklärung der Tabelle 4-1, „O“ bedeutet, dass ein Ausreißer über der oberen Grenze ist, „U“, dass ein Ausreißer unter der unteren Grenze ist. „k“ ist der Faktor aus Tukey's Test, vgl. 1.2.6.1.

4.1.3 Ergebnis der Auswahl der Daten

Für das Finden eines Zeitraums für einen relativ konstanten Nachtminimum-Zufluss-Wert wurden die Daten über all jene Tage verwendet, an denen beim Tukey's Test keine Ausreißer errechnet wurden. Der sich daraus ergebende durchschnittliche Tagesgang ist in Abbildung 4-1 zu sehen. Die Daten wurden hierfür in 30-Minuten-Intervallen gemittelt. Der Punkt über der Beschriftung der X-Achse in Abbildung 4-1 von z.B. „12:00“ beinhaltet den Mittelwert der Werte im Zeitraum zwischen 12:00 Uhr und 12:30 Uhr. Demzufolge markiert der rote Bereich die Werte zwischen 01:00 Uhr und 04:30 Uhr und bildet den Bereich des konstanten Nachtminimum-Durchfluss ab.

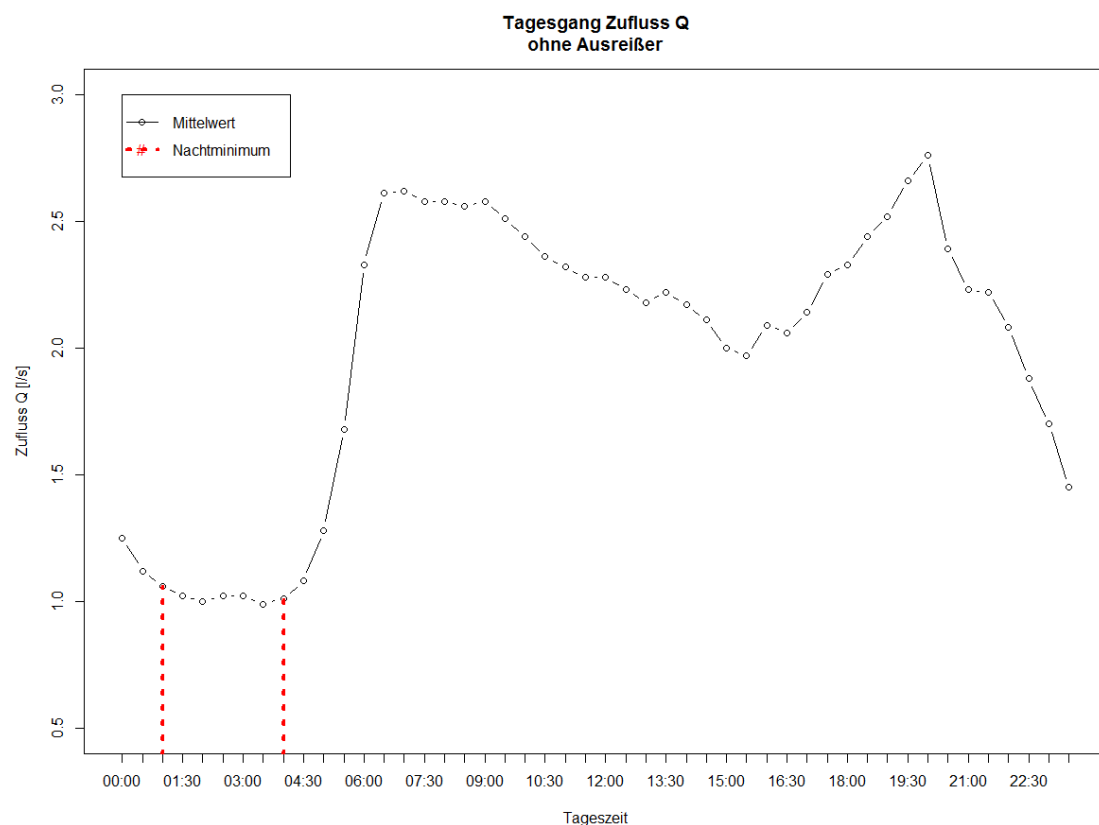


Abbildung 4-1: Durchschnittlicher Tagesgang Zufluss Q, ohne Ausreißer

Für die durchschnittlich gemessenen Drücke galt es eine möglichst lange zusammenhängende Periode an Messwerten zu finden. So wurde der Zeitraum vom 30. Mai 2016 bis zum 21. Juni 2016 für die Hydranten HG3420, HG3835, HG3933, HG4162, HG4215 und HG4383 gewählt, wobei die Messungen des 04. Juni 2016 nicht miteingerechnet wurden, da an diesem Tag, an drei Sensoren in der Nacht Ausreißer gemessen wurden. Die Werte für diese Hydranten wurden für diese Periode in der Zeit zwischen 01:00 Uhr und 04:30 Uhr gemittelt und sind in Tabelle 4-2 ersichtlich.

Ergebnisse

Tabelle 4-2: Durchschnittsmesswerte 30.05.2016 - 21.06.2016, 01:00 Uhr - 04:30 Uhr

HG3420	HG3835	HG3933	HG4162	HG4215	HG4383
[mWS]	[mWS]	[mWS]	[mWS]	[mWS]	[mWS]
83,69	89,41	91,23	87,69	90,29	90,13

Die Druckhöhen der anderen sechs Hydranten wurden jeweils auch in der Zeit zwischen 01:00 Uhr und 04:30 Uhr über die Messungen am 26. Juli 2016, 27. Juli 2016 und 05. August 2016 bis 16. August 2016 gemittelt. Eine Ausnahme wurde nur für den Sensor am Hydranten HG4576 gemacht, für dessen Mittelwert wurden die Messungen vom 26. Juli 2016 bis 01. August 2016 und 06. August 2016 bis 08. August 2016 berücksichtigt. Dies ist damit begründet, dass die Messungen an diesem Sensor im Anschluss an den 08. August 2016 Ausreißer produzierten bzw. keine plausiblen Werte annahmen.

Tabelle 4-3: Durchschnittswerte 26. & 27.07.2016 & 05.08.2016 - 16.08.2016, 01:00 Uhr – 04:30 Uhr

HG3445	HG4150	HG4339b	HG4540	HG4576	HG4744
[mWS]	[mWS]	[mWS]	[mWS]	[mWS]	[mWS]
69,81	76,25	96,22	62,67	31,20	31,78

Die Begründung für die Auswahl dieser Perioden ist, dass ein möglichst langer Zeitraum mit möglichst zusammenhängenden Daten gesucht wurde. In diesem Fall sind es 22 Tage mit einem Tag Pause bzw. 19 Tage mit drei Tagen Pause außer für den Hydrant HG4576, da sind es zehn Tage mit vier Tagen Pause. Vor der Kalibrierungsnacht wären maximal sechs Tage in Frage gekommen.

4.1.4 Ergebnis der Anpassung der geodätischen Sensorhöhen

Mit den gemittelten Druckhöhen aus Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 wurde für die Simulation des ungestörten Systems das Null-Szenario erstellt. Der gemittelte Nachtminimum-Zufluss von 1,10 l/s wurde entsprechend den zugeordneten Verbräuchen an den verschiedenen Messpunkten im hydraulischen Modell anteilmäßig zugeteilt.

Die nach der Simulation auftretenden Differenzen zwischen gemessenen und errechneten Druckhöhen wurden bei den geodätischen Höhen dieser Messpunkte dazu addiert, bzw. abgezogen. Eine abschließende Simulation mit den neuen Messpunkthöhen brachte an allen Punkten die Differenz von 0,00 m, so wurden diese neuen Höhen im hydraulischen Modell für die weiteren Bearbeitungen fixiert. Tabelle 4-4 zeigt für die Hydranten, an denen Drucksensoren angebracht waren, die in 4.1.3 ermittelten gemessenen Werte, sowie die geodätischen Höhen der Messpunkte, wie sie im GIS notiert sind, die geodätischen Höhen, wie

sie nach der Justierung im hydraulischen Modell vorhanden sind und, ob es sich bei den Hydranten um einen Oberflur- oder Unterflurhydranten handelt.

Tabelle 4-4: Anpassung der geodätischen Höhen im hydraulischen Modell

Hydrant	Ober oder Unter	gemessen [mWS]	GIS- Höhen [m.ü.A.]	EPANET- Höhen [m.ü.A.]	Differenz Höhen [m]
HG3420	U	83,69	423,74	423,94	+ 0,20
HG3445	O	69,81	436,88	437,82	+ 0,94
HG3835	U	89,41	418,60	418,22	- 0,38
HG3933	O	91,23	415,26	416,39	+ 1,13
HG4150	U	76,25	431,18	431,38	+ 0,20
HG4162	O	87,69	419,00	419,94	+ 0,94
HG4215	U	90,29	417,44	417,34	- 0,10
HG4339b	U	96,22	410,92	411,39	+ 0,47
HG4383	U	90,13	417,69	417,49	- 0,20
HG4540	O	62,67	443,26	444,95	+ 1,69
HG4576	U	31,20	476,71	476,42	- 0,29
HG4744	O	31,78	474,67	475,85	+ 1,18

Die Ausführung der Hydranten, ob sie sich unter der Erde befinden oder nicht, ist auch klar aus der letzten Spalte der Tabelle 4-4 ersichtlich. Die Höhendifferenzwerte bei Unterflurhydranten streuen zwischen – 0,38 m und + 0,47 m, bei den Oberflurhydranten streuen die Werte zwischen + 0,94 m und + 1,69 m.

4.2 Ergebnisse der Szenarienerstellung

Da die Werte in den ursprünglich anberaumten fünf Minuten je Szenario gerade am Beginn, wie auch am Ende inkonstant sind, werden jeweils zwei bis drei Minuten mit konstantem Ausfluss für die Szenarien gewählt. Die entsprechenden Zeitspannen sind in den Tabellen Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 ersichtlich. Nur für das „Null-Szenario“, dem ungestörten System, wurde ein längerer Zeitraum von neun Minuten, kurze Zeit vor dem ersten Szenario gewählt.

Der Nachtminimum-Durchfluss wurde für diese Nacht einmal zwischen 01:22 Uhr und 01:31 Uhr und ein weiteres Mal, kurz vor Beginn der zweiten Szenarien-Phase, ermittelt. Mit den Werten von 1,14 l/s bzw. 1,06 l/s wurde schlussendlich der Nachtminimum-Durchfluss von 1,10 l/s für diese Nacht bestimmt.

Ergebnisse

Die gemessenen Ausflüsse an den Hydranten für die Szenarien sind in den Tabellen Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 ersichtlich. Wie bereits in 3.3.2 erwähnt, konnte jeweils an einem Hydranten je Phase die Ausflussmenge nicht gemessen werden und wird deshalb in den Tabellen mit einem Fragezeichen gekennzeichnet.

Tabelle 4-5: Szenarien 00 bis 07, gemessene Werte

Szenario	Zeit	Zufluss gemessen [l/s]	HG3880 gemessen [l/s]	HG3409 gemessen [l/s]	HG4118 gemessen [l/s]
00	01:22:00 – 01:31:00	1,14	0	0	0
01	01:37:45 – 01:40:30	14,85	15,03	0	0
02	01:47:30 – 01:49:45	12,48	8,06	?	0
03	01:58:00 – 01:59:30	11,58	4,97	?	5,10
04	02:04:00 – 02:06:00	11,89	0	?	0
05	02:09:15 – 02:11:45	10,15	0	?	7,05
06	02:15:45 – 02:18:15	12,13	0	0	12,03
07	02:22:15 – 02:25:15	13,95	6,93	0	7,06

Tabelle 4-6: Szenarien 08 bis 14, gemessene Werte

Szenario	Zeit	Zufluss gemessen [l/s]	HG4504 gemessen [l/s]	HG3537 gemessen [l/s]	HG3302 gemessen [l/s]
08	03:23:45 – 03:26:30	8,29	?	0	0
09	03:31:30 – 03:33:30	8,46	?	6,06	0
10	03:36:45 – 03:39:30	11,76	?	5,08	5,05
11	03:44:00 – 03:46:45	15,81	0	15,97	0
12	03:51:45 – 03:54:45	12,00	0	6,00	6,00
13	03:58:30 – 04:01:00	8,78	?	0	6,02
14	04:04:30 – 04:07:45	9,87	0	0	9,07

Beim Betrachten der Wassermengen die während eines Zeitraums in das System zufließen und abfließen mit Beachtung des Nachtminimum-Durchflusses (NMF) ist erkennbar, dass mehr Wasser das System verlässt als hineinfließt.

Mit der Gleichung 4-1 lassen sich die Differenzen errechnen, die in Tabelle 4-7 in der letzten Spalte dargestellt sind. In diese Tabelle sind nur jene Szenarien gelistet, bei denen an Hydranten Wassermengen entnommen worden sind, die auch gemessen werden konnten.

$$\Delta = \sum_{H_i} A_i + NMF - Z \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit:

Δ ... Differenz [l/s], H_i ... Hydranten, A_i ... Ausflüsse [l/s], NMF ... Nachtminimumdurchfluss [l/s], Z ... Zufluss [l/s]

Ergebnisse

Tabelle 4-7: Differenzen zwischen Zu- und Abflüsse der Szenarien 01, 06, 07, 11, 12 und 14

#	Zufluss [l/s]	NMF [l/s]	HG3880 [l/s]	HG4118 [l/s]	HG3537 [l/s]	Hg3302 [l/s]	Differenz [l/s]
01	14,85	1,10	15,03				- 1,28
06	12,13	1,10		12,03			- 1,00
07	13,95	1,10	6,93	7,06			- 1,14
11	15,81	1,10			15,98		- 1,26
12	12,00	1,10			6,00	6,00	- 1,09
14	9,87	1,10				9,07	- 0,30

Der Nachtminimum-Durchfluss des ungestörten Systems im Wasserversorgungsnetz Hart bei Graz pendelte während des gesamten Zeitraums des Feldversuchs in Extremfällen maximal zwischen 0,7 l/s und 1,6 l/s. Er wich also maximal um 0,5 l/s von den 1,1 l/s, die für die Nacht am 12. April 2016 für den NMF errechnet wurde, ab. Da die Differenzen in Tabelle 4-7 meist größer sind als diese Abweichung kommen als Ursache Ausreißer nicht in Frage.

Mögliche Fehlerquellen sind die Zuflussmessung mit dem Ultraschalldurchflussmessgerät, die Ausflussmessungen an den Hydranten und / oder eine falsche Annahme der Menge des NMF.

Wie bereits oben erwähnt, sind die Differenzen aus Tabelle 4-7 zu groß, um sie durch eine mögliche falsche Annahme des NMF zu begründen.

Fehler bei der Ausfluss- wie bei der Zuflussmessung sind eher möglich, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass diese Fehler bei der Zuflussmessung passiert sind, etwas wahrscheinlicher ist. Denn es ist nicht restlos geklärt, ob der, für die Ultraschallmessung gewählte Außendurchmesser des Rohres auch mit dem realen Durchmesser an dieser Stelle übereinstimmt.

Ein wesentlich stärkeres Indiz bietet eine zweite unabhängige Messung des Zuflusses in das Netz Hart bei Graz, - der Woltmannzähler.

4.2.1 Einführung des Korrekturfaktors für die Zufluss-Messung

Vom Woltmannzähler liegen stündlich gemittelte Daten vor. Wenn man diese mit jenen des Ultraschallmessgeräts vergleicht (auch stündlich gemittelt) ist zu erkennen, dass der Woltmannzähler stets größere Zuflussmengen gemessen hat als das Ultraschallmessgerät.

Um daraus einen zählbaren Zusammenhang ableiten zu können, wurden die Daten der Ultraschall-Zufluss-Messung und die Daten der Woltmann-Zuflussmessung im Zeitraum zwischen 17. April 2016 und 17. Mai 2016 betrachtet.

Die Messfrequenz des Ultraschallgeräts war vom 17. April 2016 bis zum 21. April 2016 auf drei Hertz eingestellt. Ab dem 23. April 2016 wurde mit einem Hertz gemessen. Der 20. April, 22. April, 28. April und der 09. Mai 2016 wurden nicht weiter berücksichtigt, da an diesen Tagen entweder eine Frequenzumstellung war, oder Daten fehlten.

Auf Grund des stark ansteigenden Verlaufs der Schallgeschwindigkeit nach dem 09. Mai 2016 wurden die Tage danach für die weitere Betrachtung nicht berücksichtigt.

Für die verbleibenden Daten wurde der Korrekturfaktor f_M^2 eingeführt.

$$f_M^2 = \frac{Q_W}{Q_U} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit:

f_M^2 ... Korrekturfaktor Messgeräte [-], Q_W ... Zufluss gemessen mit dem Woltmannzähler [l/s],
 Q_U ... Zufluss gemessen mit dem Ultraschallmessgerät [l/s]

Über dem vorher beschriebenen Zeitraum wurden die gemittelten Stundenwerte beider Messgeräte zu jeweils einem Korrekturfaktor für jede Stunde an jedem Tag umgerechnet. Der gewichtete Mittelwert über all diese Korrekturfaktoren bildet schlussendlich den finalen Korrekturfaktor $f_M^2 = 1,0692$. Eine Diskrepanz dieser beiden Messgeräte ist erkennbar, ein möglicher Fehler bei der Ultraschallmessung wird wahrscheinlicher.

Um diesen Verdacht genauer zu untersuchen, wird parallel ein Korrekturfaktor mit Gleichung 4-3 für die Szenarienmessungen berechnet.

$$f_S^2 = \frac{\sum A_i + NMF}{Z} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

mit:

f_S^2 ... Korrekturfaktor Szenarien [-], A_i ... Ausflüsse [l/s], NMF ... Nachtminimumdurchfluss [l/s],
 Z ... Zufluss [l/s]

In diesem Fall werden über die Gleichung 4-3 sechs Korrekturfaktoren für die Szenarien, 01, 06, 07, 11, 12 und 14 berechnet. Über die Dauer der Szenarien, die in Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 ersichtlich sind, werden diese gewichtet zu einem $f_S^2 = 1,0745$ gemittelt.

Wenn man nun die beiden Korrekturfaktoren vergleicht, sieht man, dass sie sich nur um etwa 0,5 % unterscheiden. Eine Unterschätzung der Zuflussmenge durch das Ultraschallmessgerät von circa 7 % wird nun von zwei unabhängigen Berechnungen aufgezeigt.

Die Zuflusswerte und der NMF in Tabelle 4-7 werden mit dem Faktor $f_M^2 = 1,0692$ multipliziert. Daraus ergeben sich neue Differenzen, die jedoch deutlich verringert werden konnten, siehe Tabelle 4-8.

Ergebnisse

Tabelle 4-8: Korrigierte Differenzen der Zu- und Abflüsse der Szenarien 01, 06, 07, 11, 12 und 14

#	Zufluss neu [l/s]	NMF neu [l/s]	HG3880 [l/s]	HG4118 [l/s]	HG3537 [l/s]	Hg3302 [l/s]	Differenz neu [l/s]
01	15,88	1,17	15,03				- 0,32
06	12,97	1,17		12,03			- 0,23
07	14,91	1,17	6,93	7,06			- 0,25
11	16,91	1,17			15,98		- 0,24
12	12,83	1,17			6,00	6,00	- 0,34
14	10,55	1,17				9,07	+ 0,31

4.2.2 Einteilung in Kalibrierungs- und Validierungsszenarien

Um neben den sechs gemessenen Szenarien (siehe Tabelle 4-8), auch die übrigen generierten Szenarien (siehe Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6) verwenden zu können, werden die Werte für die Hydranten HG3409 und HG4504 berechnet. Diese Werte werden über Gleichung 4-4 errechnet.

$$H = Z - NMF - \sum_{H_i} A_i \quad \text{Gleichung 4-4}$$

mit:

H ... gesuchte Hydrantenausflussmenge [l/s], H_i ... andere Hydranten, A_i ... Ausflüsse [l/s], NMF ... Nachtminimumdurchfluss [l/s], Z ... Zufluss [l/s]

Die sich daraus ergebenden Werte sind in Tabelle 4-9 und Tabelle 4-10 ersichtlich.

Tabelle 4-9: Szenarien 00 bis 07, gemessene und errechnete Werte

Szenario	Zeit	Zufluss neu [l/s]	HG3880 gemessen [l/s]	HG3409 errechnet [l/s]	HG4118 gemessen [l/s]
00	01:22:00 – 01:31:00	1,22	0	0	0
01	01:37:45 – 01:40:30	15,88	15,03	0	0
02	01:47:30 – 01:49:45	13,34	8,06	4,11	0
03	01:58:00 – 01:59:30	12,38	4,97	1,14	5,10
04	02:04:00 – 02:06:00	12,71	0	11,54	0
05	02:09:15 – 02:11:45	10,85	0	2,62	7,05
06	02:15:45 – 02:18:15	12,97	0	0	12,03
07	02:22:15 – 02:25:15	14,92	6,93	0	7,06

Ergebnisse

Tabelle 4-10: Szenarien 08 bis 14, gemessene und errechnete Werte

Szenario	Zeit	Zufluss neu [l/s]	HG4504 errechnet [l/s]	HG3537 gemessen [l/s]	HG3302 gemessen [l/s]
08	03:23:45 – 03:26:30	8,86	7,60	0	0
09	03:31:30 – 03:33:30	9,05	1,81	6,06	0
10	03:36:45 – 03:39:30	12,57	1,27	5,08	5,05
11	03:44:00 – 03:46:45	16,90	0	15,97	0
12	03:51:45 – 03:54:45	12,83	0	6,00	6,00
13	03:58:30 – 04:01:00	9,39	2,20	0	6,02
14	04:04:30 – 04:07:45	10,55	0	0	9,07

Als Kalibrierungsszenarien wurden in einem ersten Schritt jene Szenarien herangezogen, die keine Werte beinhalten, die mit Gleichung 4-4 errechnet wurden, plus zusätzlich das Null-Szenario, des ungestörten Systems.

Nach der Erkenntnis, dass ein Schieber während der Zeit des Feldversuchs ganz oder teilweise geschlossen war, vgl. Abbildung 4-2, wurde zusätzlich Szenario 08 auch als Kalibrierungsszenario aufgenommen.

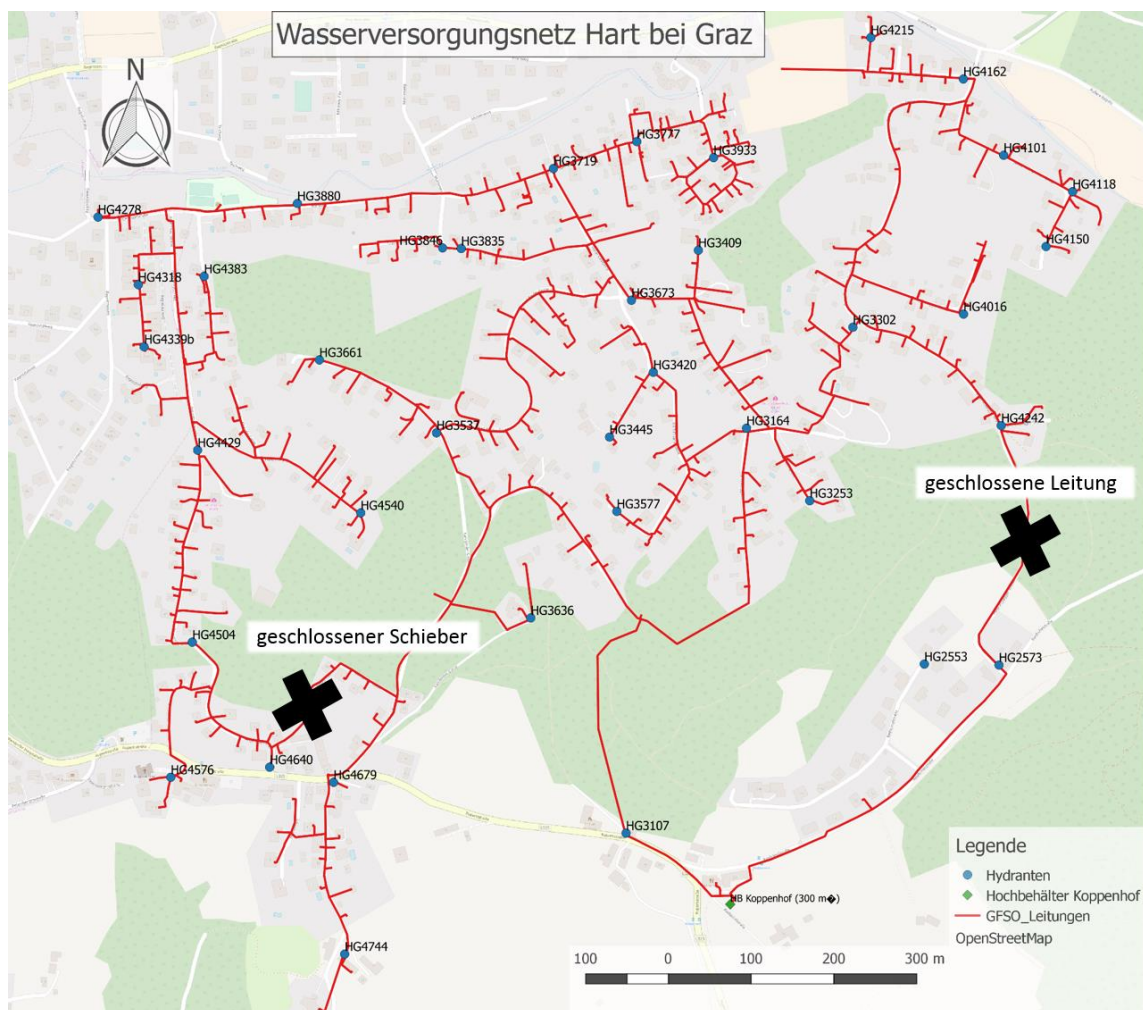


Abbildung 4-2: WVN Hart bei Graz, geschlossener Schieber & geschlossene Leitung (SWW, mod.)

Die Kalibrierungsszenarien sind somit: Szenario 00, 01, 06, 07, 08, 11, 12 und 14. Die Validierungsszenarien setzen sich aus den Szenarien 02, 03, 04, 05, 09, 10 und 13 zusammen.

4.3 Status Quo der hydraulischen Modelle

Da ein Schieber im WVN Hart bei Graz während des Feldversuchs teils geschlossen war, galt es diese Randbedingung bestmöglich in das hydraulische Modell zu integrieren. Mit dem finalen Ziel, eine Leckage Lokalisierung durchführen zu können, die zufriedenstellende Ergebnisse liefert, wurden drei verschiedene Modelle ausgewählt:

- Modell „Trial-&-Error“
- Model: „OENORM“
- Modell: „vorkalibriert“

Diese drei Modelle werden nachfolgend näher erläutert.

4.3.1 Modell „Trial-&Error“

Das in dieser Arbeit verwendete Modell, das mit Trial & Error kalibriert wurde, ist das Ergebnis aus einer vorangegangenen Studienarbeit. In dieser war es die Aufgabe, das hydraulische Modell „Jakim“, mit den Rohmessdaten der Nacht am 12. April 2016 zu kalibrieren.

Für die Aufgabe damals verarbeitete ich die Rohdaten, ohne sie zu korrigieren, und die mir am plausibelsten vorkommenden Szenarien, darunter auch drei Szenarien des ungestörten Systems, je eins vor, zwischen und nach den Fire-Flow-Ausflüssen. Die Zielsetzung war, dass an jeder Messstelle der mittlere Fehler maximal 1,50 m beträgt. Wie in Tabelle 4-11 ersichtlich, ist das an allen Messstationen der Fall.

Tabelle 4-11: Differenz gemessener zu errechneten Druckhöhen; Trial & Error Kalibrierung, Szenarien aus der Lehrveranstaltung

Hydrant	HG3420	HG3445	HG3835	HG3933	HG4101	HG4150	HG4162	HG4215	HG4339b	HG4383	HG4540	HG4576	HG4744	Mittel
[m]	0,48	0,44	0,36	0,42	0,56	0,65	0,48	0,49	0,51	0,59	0,65	1,15	0,40	0,55

Die in Tabelle 4-11 ersichtlichen Ergebnisse erreichte ich dadurch, dass ich das Netz in Zonen unterteilte und die Rauheitswerte in den Zonen variierte.

Unter den für die Kalibrierung dieses Netzes verwendeten Szenarien befanden sich drei des ungestörten Systems, und einige weitere kleinere Szenarien. Für die Szenarien, die in dieser Arbeit verwendet wurden, wurden die Rauheiten nicht mehr angepasst.

Das zu den Ergebnissen in Tabelle 4-11 passende Netz ist in Abbildung 4-3 ersichtlich. In dieser Abbildung sind grob 5 Zonen erkennbar, die wie in Tabelle 4-12 ersichtlich, eingeteilt sind.

Tabelle 4-12: Zonenbeschreibung der Trial-&-Error-Kalibrierung

Zonen	Beschreibung
Zone A	in Rot dargestellt mit einem Rauheitswert von 2,0 mm
Zone B	in Gelb dargestellt mit einem Rauheitswert von 1,0 mm
Zone C	in Grün in der oberen Hälfte des Netzes dargestellt, mit einem Rauheitswert von 0,4 mm
Zone D	in Blau dargestellt mit einem Rauheitswert von 0,1 mm
Zone E	in Grün unten rechts (die Leitungen die vom Hochbehälter direkt wegführen) dargestellt mit einem Rauheitswert von 0,4 mm

Die Spaltung der ehemaligen Gruppe C in C und E war notwendig, um die Hauptleitung, die vom Hochbehälter direkt wegführt separat, betrachten zu können.

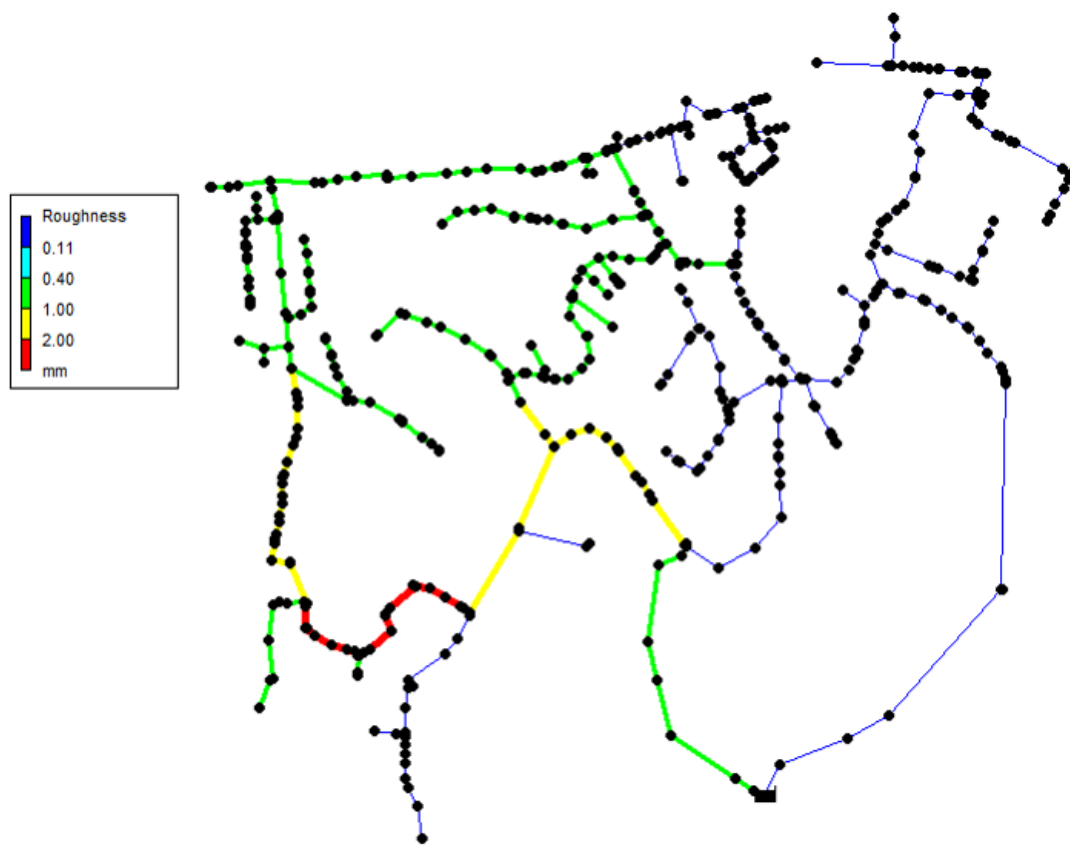


Abbildung 4-3: Trial & Error Netz mit Rauheitswerten

4.3.2 Modell „ÖENORM“

Die Grundlage dieses Modells bildet die ÖNORM EN 805 sowie das Datenblatt der DVGW GW 303-1 (ÖNORM EN 805, 2000; DVGW GW 303-1, 2006). In diesen steht, dass die betriebliche Rauheit für Fern- und Zubringerleitungen mit 0,1 mm und für Leitungen mit weitgehend gestreckter Leitungsführung mit 0,4 mm anzusetzen ist. Mit dem Zusatzwissen des (teil-)geschlossenen Schiebers, der in Abbildung 4-2 ersichtlich ist, wurde die Leitung „LHG4654a“ in diesem Bereich als geschlossen definiert. Die geodätischen Höhen der Messpunkte wurden im ungestörten System auf diese Begebenheiten nivelliert.

4.3.3 Modell „vorkalibriert“

Dem Modell „vorkalibriert“ ist, an allen Leitungen eine Rauheit von 0,4 mm zugewiesen. Um den (teil-)geschlossenen Schieber, vgl. Abbildung 4-2, abzubilden, wurde in der Leitung „LHG4657a“ ein Minor Loss Koeffizient von 150 angesetzt. Abschließend wurden die geodätischen Höhen der Messpunkte im ungestörten

System auf diese Begebenheiten nivelliert. Der Minor Loss Koeffizient wurde nach der Einrichtung der geodätischen Höhen der Messpunkte wieder entfernt.

Anzumerken ist, dass einige Rauheitswerte, zwischen 0,01 mm und 1,0 mm ausprobiert wurden, der Effekt beim Justieren der geodätischen Höhen im ungestörten System aber nicht zu groß waren. So wurden schlussendlich die 0,4 mm als Rauheitswert gewählt, da dieser relativ in der Mitte des oben beschriebenen Bereichs liegt und auch in der DVGW GW 303-1, 2006 empfohlen wird.

4.3.4 Status Quo der hydraulischen Modelle – Vergleich

Um diese drei Modelle zu vergleichen, wurden Korrelationsplots der gemessenen und simulierte Drücke, jeweils für Kalibrierungs- und Validierungsszenarien erstellt. Zusätzlich wurden auch die mittleren Abweichungen der beiden Szenariengruppen für diese Modelle bestimmt. Nachfolgend sind die Korrelationsplots der Kalibrierungsszenarien abgebildet, jene der Validierungsszenarien befinden sich im Anhang B. Ebenso befinden sich die Darstellungen der Abweichungen in Abhängigkeit der Messstelle, bzw. in Abhängigkeit des Szenarios in Anhang C und Abbildung 4-9 bzw. Anhang D. An dieser Stelle, sind die Werte der mittleren Abweichung der Drücke in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-13: Mittlere Abweichungen der Drücke bei den hydraulischen Grundmodellen

Modell	Rauheiten [mm]	Besonderheiten	mittlere Ab- weichung Kal.-Szen.	mittlere Ab- weichung Val.-Szen.
Trial-&- Error	0,1; 0,4; 1,0; 2,0	-	1,00 m	0,68 m
OENORM	0,1; 0,4	geschlossene Leitung	6,23 m	2,48 m
vor- kalibriert	0,4	-	1,60 m	1,02 m

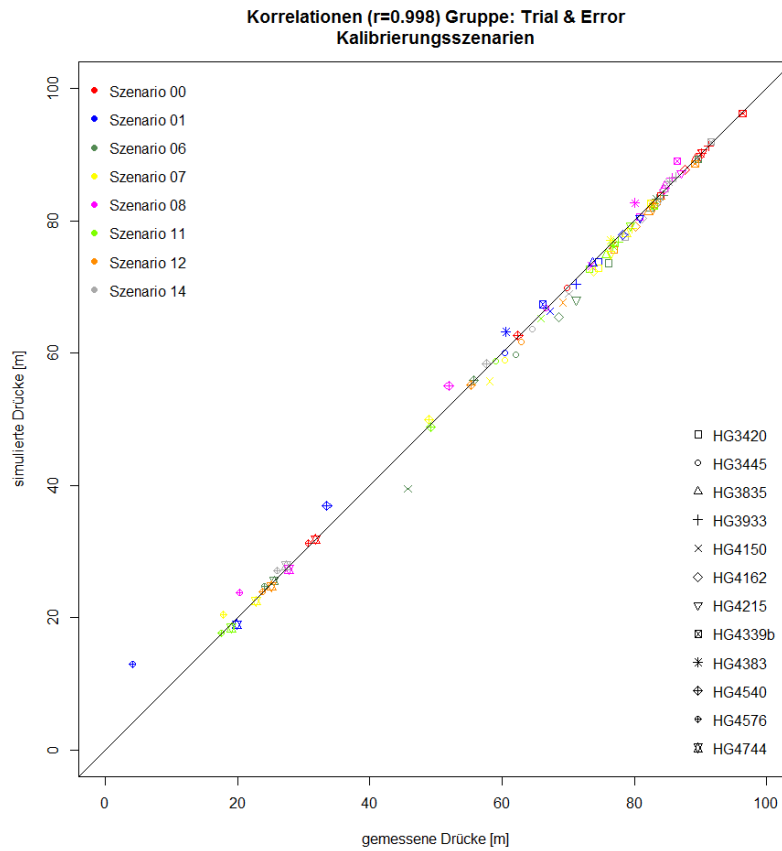


Abbildung 4-4: Korrelationen: Modell: "Trial-&Error", Kalibrierungsszenarien

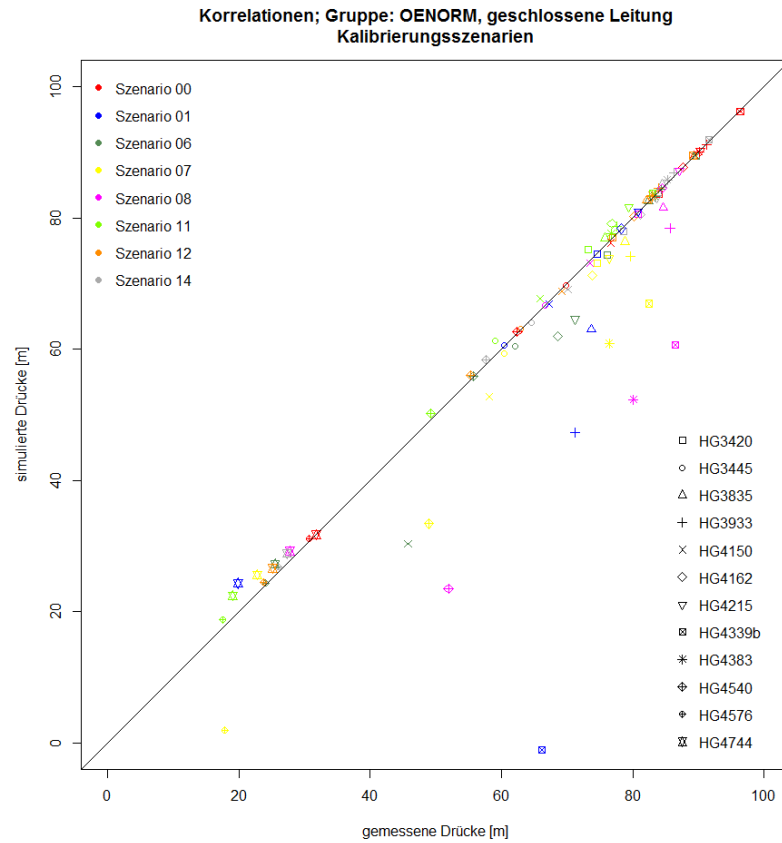


Abbildung 4-5: Korrelationen: Modell: "OENORM", Kalibrierungsszenarien

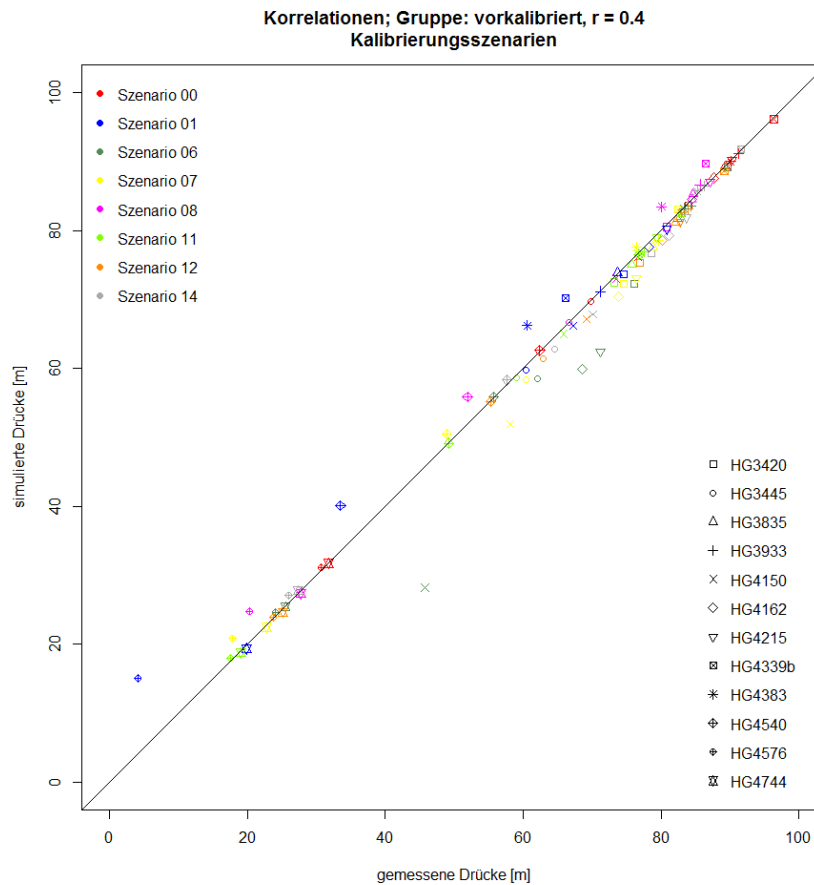


Abbildung 4-6: Korrelationen: Modell: "vorkalibriert", Kalibrierungsszenarien

In Abbildung 4-4 sind die Korrelationen der Trial-&-Error-Kalibrierung abgebildet. Wie zu erkennen, streuen die Ergebnisse sehr nah um das Optimum, dargestellt mit der diagonalen Geraden. Dies ist nicht erstaunlich, da dieses Modell bereits kalibriert wurde.

Die Korrelationen des Modells „OENORM“ in Abbildung 4-5 zeigen ein wesentlich breiter gestreutes Bild. Die Korrelationen des Modells „vorkalibriert“ in Abbildung 4-6 zeigen wieder geringer streuende Ergebnisse.

Alle mittleren, absoluten Druckabweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten der Modelle, jeweils von Kalibrierungs- und Validierungsszenarien sind in Tabelle 4-13 zusammengefasst.

Nach Tabelle 4-13 liefert das Modell: „Trial-&-Error“ die besten Ergebnisse. Da es sich jedoch um ein bereits kalibriertes Modell handelt, wurde das zweitbeste dieser Modelle, das Modell „vorkalibriert“, als Grundlage für die automatische Kalibrierung verwendet.

4.4 Ergebnisse der Vergleiche

In diesem Unterkapitel werden verschiedene Kalibrierungsmethoden, verschiedenen skeletonisierte Modelle und verschiedene Gruppierungen der Parameter der automatischen Kalibrierung verglichen. Die Methoden hierfür sind in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3 erläutert. Tabelle 4-14 gibt eine Übersicht welche Methoden für welche Vergleiche geeignet sind.

Tabelle 4-14: Übersicht der Evaluierungsmethoden mit Zuordnung der Vergleichskapitel

Methode	Methodik-Kapitel	Ergebnis	Vergleichs-Kapitel
Modellgüte, Kapitel 2.3.2			
Korrelationsplot Kalibrierungsszenarien	2.3.2.3	optisch	4.4.1, 4.4.2, 4.4.3
Streuung der AC	2.3.2.1	optisch	4.4.2, 4.4.3
Fitness-Wert	2.3.2.2	Wert	4.4.2, 4.4.3
durchschnittliches Δp über den Tagesgang	2.3.2.4	optisch	5
Mittelwert der Druckabweichungen der Kalibrierungsszenarien	2.3.3.1	Wert	4.4.1, 4.4.2, 4.4.3
Überprüfung der zulässigen Einzelabweichungen	2.3.2.5	Werte	4.4.1, 4.4.2, 4.4.3
Modellqualität, Kapitel 2.3.3			
Korrelationsplot Validierungsszenarien	2.3.2.3	optisch	4.4.1, 4.4.2, 4.4.3
Mittelwert der Druckabweichungen der Validierungsszenarien	2.3.3.1	Wert	4.4.1, 4.4.2, 4.4.3
Differenz der Mittelwerte der Druckabweichungen von Kalibrierungs- und Validierungsszenarien	2.3.3.1	Wert	4.4.1, 4.4.2, 4.4.3
Mittelwert der Distanzen zwischen realem und simulierten Leck	2.3.3.2	Wert	4.4.1, 4.4.2, 4.4.3

Ergebnisse

Die für die Überprüfung der zulässigen Einzelabweichungen nach DVGW GW 303-1, 2006 berechneten Abweichungen sind in Tabelle 4-15 ersichtlich.

Tabelle 4-15: Zulässige Abweichungen der Einzelmessungen und Grenzen für den Erwartungswert der Druckabweichung nach DVGW Arbeitsblatt 303-1

Hydrant	Zulässige Abweichung der Einzelmessung a [mWS]	Grenzen für den Erwartungswert der Druckabweichung U [mWS]
HG3420	1,67	+ - 0,48
HG3445	1,40	+ - 0,40
HG3835	1,79	+ - 0,52
HG3933	1,82	+ - 0,53
HG4150	1,53	+ - 0,44
HG4162	1,75	+ - 0,51
HG4215	1,81	+ - 0,52
HG4339b	1,92	+ - 0,55
HG4383	1,80	+ - 0,52
HG4540	1,25	+ - 0,36
HG4576	0,63	+ - 0,18
HG4744	0,64	+ - 0,18

4.4.1 Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Kalibrierungsmethoden

Verglichen werden die händische Methode der Trial-and-Error-Kalibrierung und die automatische Kalibrierung, vgl. 2.3.1.2. Bei der automatischen Kalibrierung wird zudem unterschieden, zwischen einer Kalibrierung, in der nur die Rauheiten kalibriert werden und einer Kalibrierung, in der sowohl Rauheiten als auch ein Minor Loss Koeffizient kalibriert werden. Jedes der drei Modelle wurde in Zonen unterteilt in denen gleiche Rauheitseigenschaften angenommen wurden. Für die Modelle, die mit der AC kalibriert wurden, befand sich die Zuflussleitung in einer eigenen Zone, in der Trial-&-Error-Kalibrierung war das nicht der Fall. Die beinahe gleiche Zoneneinteilung gewährt eine gute Vergleichbarkeit der verschiedenen Kalibrierungsmethoden.

Für den Vergleich dieser drei Methoden werden drei Netze verwendet, die in Zonen (siehe Tabelle 4-12) eingeteilt wurden. Zum Vergleich der Modellgüten wurden Korrelationsplots der Kalibrierungsszenarien und Boxplots über die Messstellen bzw. Kalibrierungsszenarien mit der Verteilung der Druckabweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken erstellt. Zusätzlich wurden die Druckabweichungen über den gesamten Tagesgang betrachtet. Bei diesem Vergleich der Modellqualitäten wurden Korrelationsplots der Validierungsszenarien und Boxplots über die Messstellen bzw. Validierungsszenarien mit der Verteilung der Druckabweichungen erstellt. Außerdem wurde mit allen drei hydraulischen Modellen als Eingangsdaten Leckage Lokalisierungssimulationen gerechnet. Mit dem gleichen Eingangsparameter des Zeitraums am 18. April 2016 zwischen 02:30 Uhr und 03:30 Uhr wurden jeweils Simulationen für die drei Netze gemacht.

4.4.1.1 Modellgüte (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden)

Mit einem optischen Vergleich der Korrelationen der Kalibrierungsszenarien der betrachteten Modelle startet der Vergleich der Modellgüte. Hierzu befindet sich Abbildung 4-4 bereits in Kapitel 4.3.4 und wird an dieser Stelle nicht noch einmal angeführt. Die Darstellungen für die Modelle der automatischen Kalibrierung (Rauheit und Minor Loss Koeffizient) und der automatischen Kalibrierung (Rauheit) sind in Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 ersichtlich.

Die Darstellungen der Boxplots über die Kalibrierungsszenarien mit der Verteilung der Druckabweichungen befinden sich gesammelt in Anhang D, die gemittelten durchschnittlichen Druckabweichungen dieser drei Modelle sind in Tabelle 4-16 ersichtlich.

Die Abweichungen der Einzelmessungen a (gemittelt über die Kalibrierungsszenarien) und der Erwartungswert der Druckabweichungen U sind in Tabelle 4-17 ersichtlich. Werte in roter kursiver Schrift markieren Werte, die nach DVGW GW 303-1, 2006, als nicht zutreffend bewertet werden, vgl. Werte in Tabelle 4-15.

Tabelle 4-16: Ergebnisse Modellgüte (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden)

Modell	mittlere Abweichung der Kalibrierungsszenarien
Trial-&-Error (Zonen)	1,00 m
AC: Rauheit und Minor Loss Koeffizient (Zonen)	0,33 m
AC: Rauheit (Zonen)	0,66 m

Ergebnisse

Tabelle 4-17: Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden)

Modell	Trial & Error		AC (Rauheit & ML)		AC (Rauheit)	
	a [mWS]	U [mWS]	a [mWS]	U [mWS]	a [mWS]	U [mWS]
Hydrant						
HG3420	0,94	0,28	0,48	0,03	0,56	0,02
HG3445	0,69	0,28	0,25	0,03	0,33	0,02
HG3835	0,32	0,28	0,00	0,03	0,30	0,02
HG3933	0,59	0,28	0,02	0,03	0,34	0,02
HG4150	1,01	0,28	0,41	0,03	0,30	0,02
HG4162	0,56	0,28	0,00	0,03	- 0,04	0,02
HG4215	0,57	0,28	0,02	0,03	- 0,04	0,02
HG4339b	0,02	0,28	0,24	0,03	0,20	0,02
HG4383	- 0,31	0,28	0,05	0,03	- 0,10	0,02
HG4540	- 0,52	0,28	- 0,17	0,03	- 0,60	0,02
HG4576	- 0,90	0,28	- 0,52	0,03	- 1,09	0,02
HG4744	0,34	0,28	- 0,45	0,03	0,13	0,02

Korrelationen; Gruppe: Zonen (automatische Kalibrierung)
Kalibrierungsszenarien

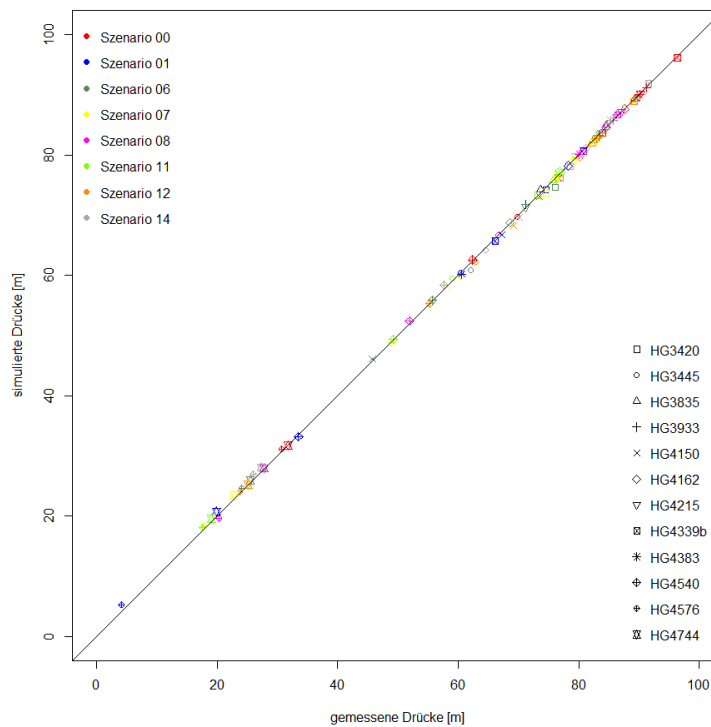


Abbildung 4-7: Korrelationen: Modell: automatische Kalibrierung (Rauheit und Minor Loss Koeffizient), Kalibrierungsszenarien

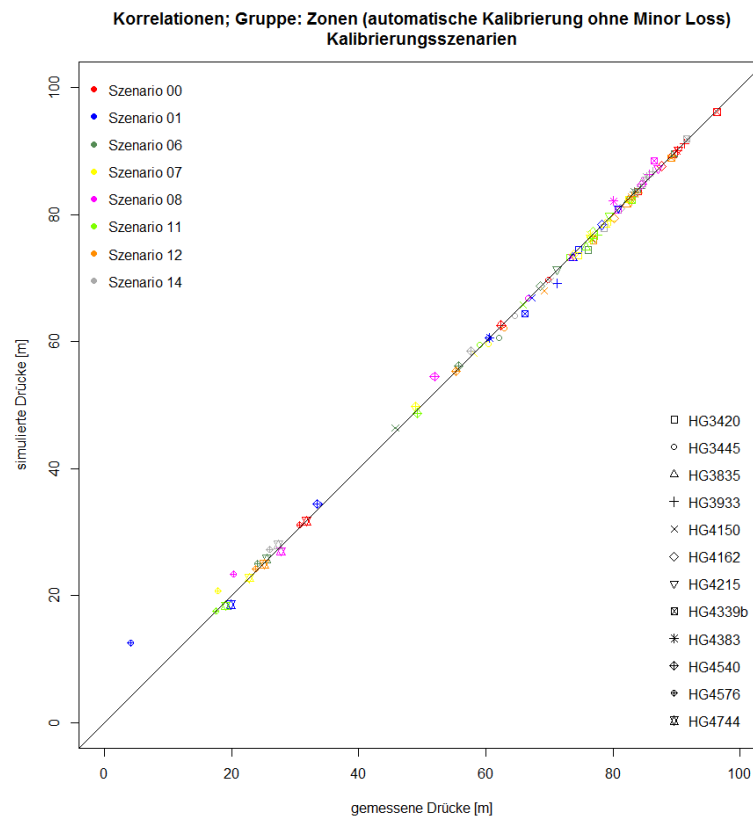


Abbildung 4-8: Korrelationen: Modell: automatische Kalibrierung (Rauheit), Kalibrierungsszenarien

4.4.1.2 Modellqualität (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden)

Bei der Betrachtung der Modellqualität werden am Beginn die Korrelationsplots der Validierungsszenarien betrachtet, diese befinden sich im Anhang B.

Die Darstellungen der Boxplots über die Validierungsszenarien, mit der Verteilung der Druckabweichungen befinden sich gesammelt in Anhang D.

An dieser Stelle werden die Boxplot-Darstellungen der Kalibrierungs- und Validierungsszenarien jeweils in einem Bild dargestellt. Abbildung 4-9 zeigt die Verteilung der Druckdifferenzen für das Trial-&-Error-Modell, Abbildung 4-10 jene des Modells der AC (Rauheit und Minor Loss Koeffizient, Zonen) und Abbildung 4-11 jene des Modells der AC (Rauheit, Zonen). Im Sinne der Vergleichbarkeit sind die Achsenskalierungen ident.

Darstellungen der Simulationen der Leckage Lokalisierung sind in Abbildung 4-12 für das Trial-&-Error-Modell, in Abbildung 4-13 für das Modell der AC (Rauheit und Minor Loss Koeffizient) und in Abbildung 4-14 für das Modell der AC (Rauheit) zu finden. Hierbei markiert die Darstellung des „X“ das reale künstliche Leck, die Dreiecke symbolisieren die Druckmessstellen die für diese Simulation verwendet wurden, die Kreise markieren die simulierten Leckagen. Durch die insgesamt 100 Simulationen pro durchgeführte Berechnung werden so 100 Kreise in die Abbildung gezeichnet. Erscheinen Kreise dunkler, so liegen an dieser Stelle

Ergebnisse

Kreise verschiedener Simulationen mit gleicher simulierter Leckage übereinander.

In Anhang E befinden sich zudem die Histogramme der berechneten Distanzen zwischen realen und simulierten Leckagen dieser Berechnungen.

Die mittleren Abweichungen der Validierungsszenarien dieser Modelle, die Differenz der Mittelwerte der Druckabweichungen von Kalibrierungs- und Validierungsszenarien sowie die mittleren Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck als Ergebnis der Simulation der Leckage Lokalisierung sind in Tabelle 4-18 zusammengefasst.

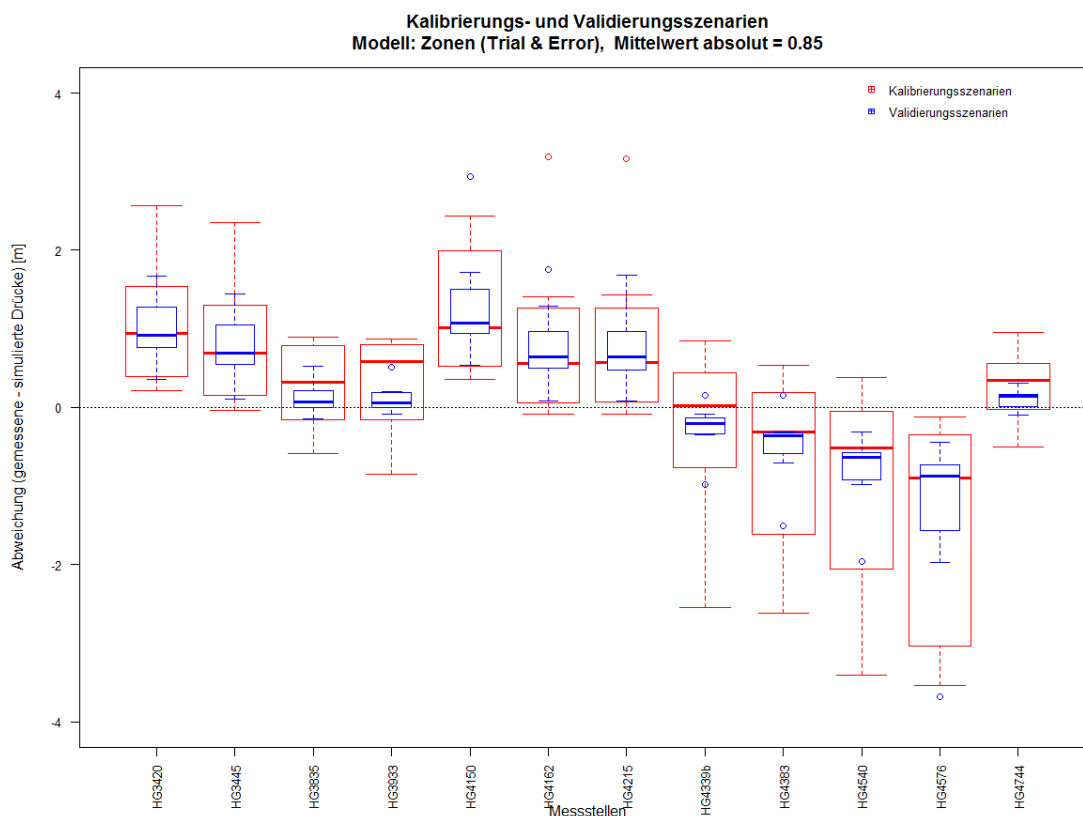


Abbildung 4-9: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: Trial-&-Error

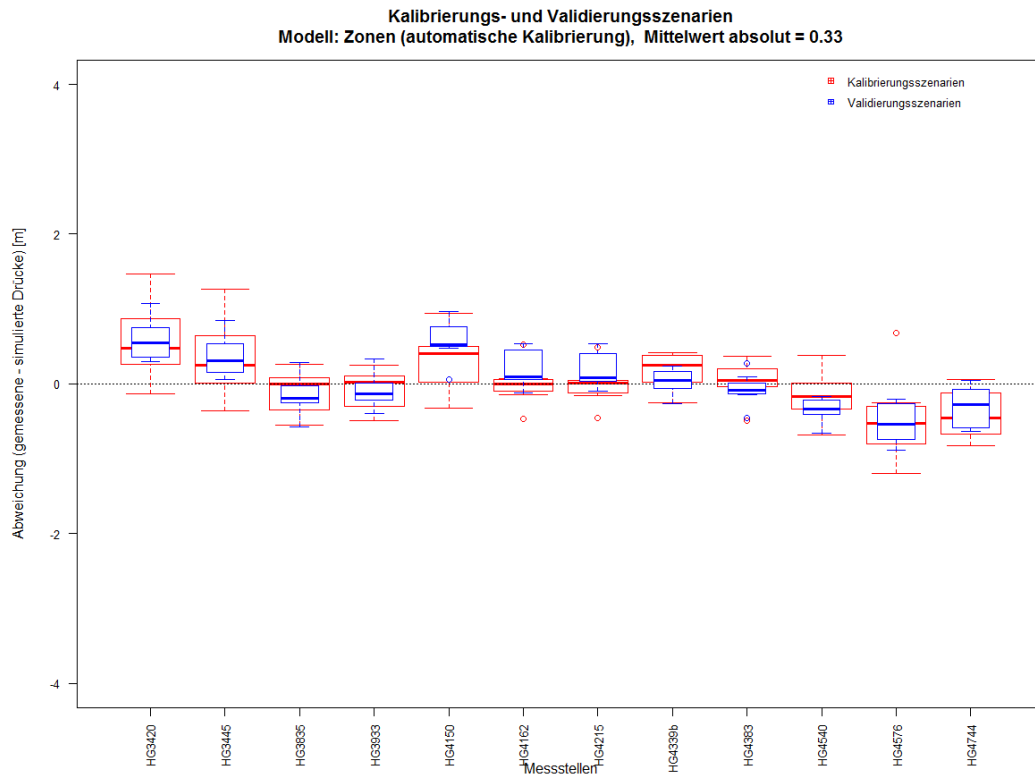


Abbildung 4-10: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: AC (Rauheit und Minor Loss Koeffizient)

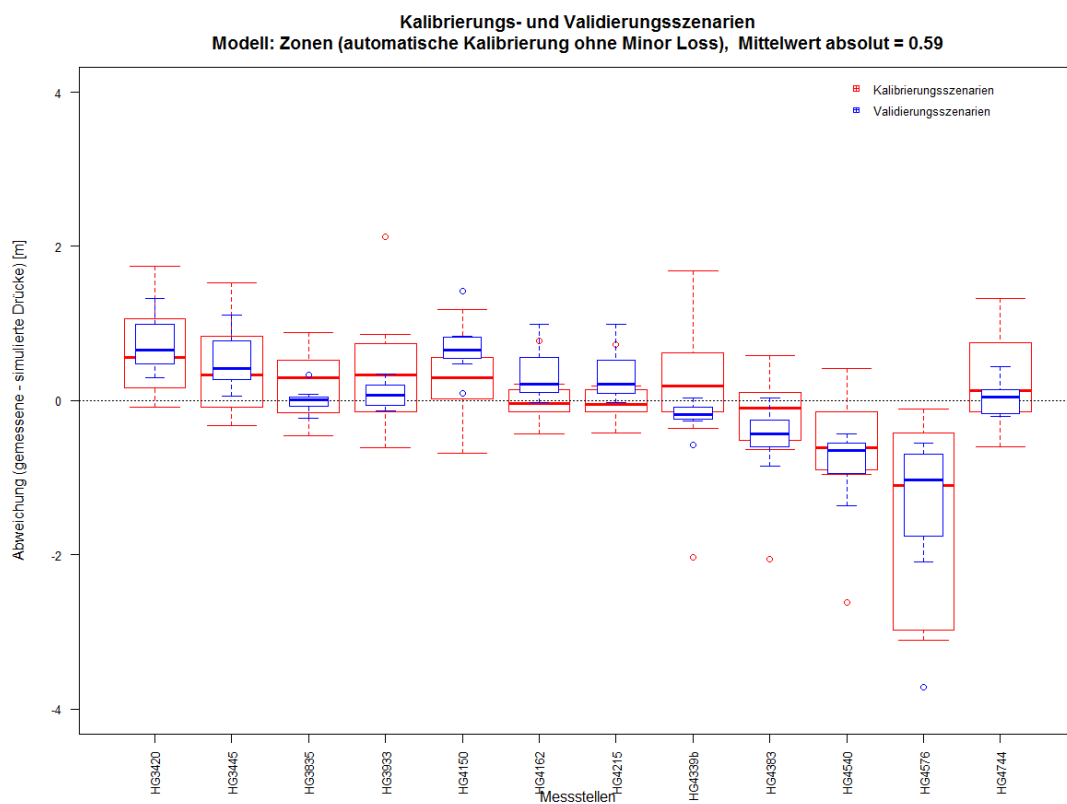


Abbildung 4-11: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: AC (Rauheit)

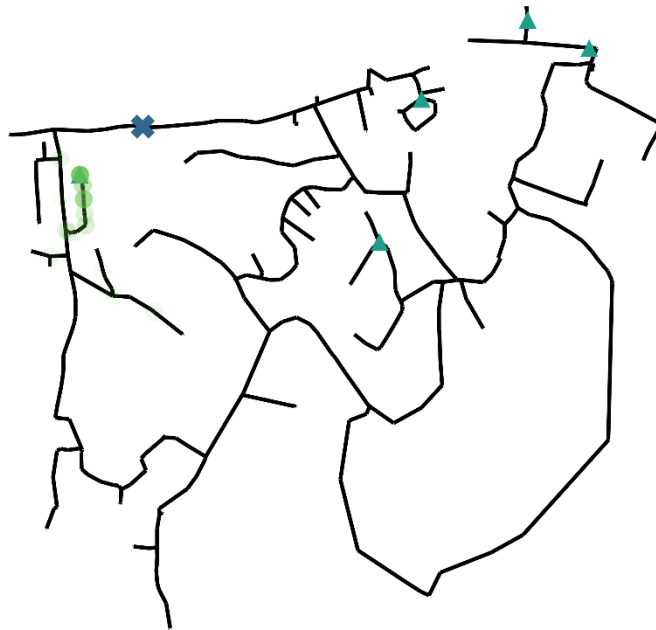


Abbildung 4-12: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Trial-&-Error-Modell (18. April 2016) (SWW)

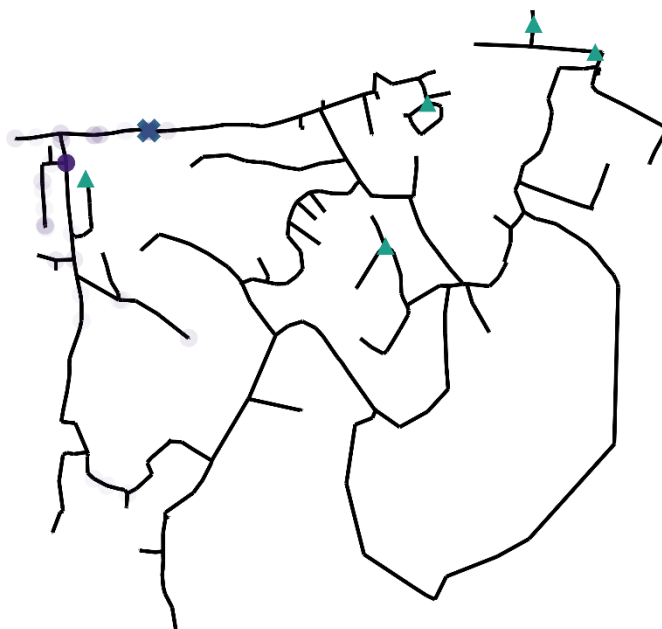


Abbildung 4-13: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: AC (Rauheit und Minor Loss Koeffizient) (18. April 2016) (SWW)

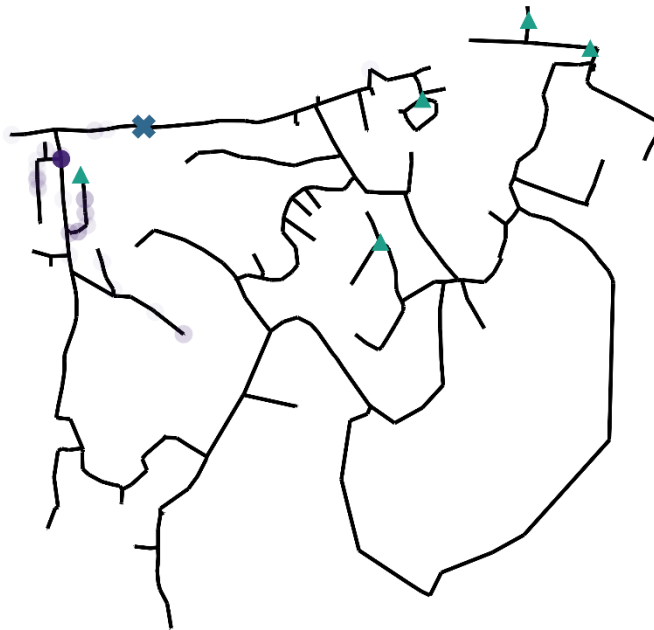


Abbildung 4-14: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: AC (Rauheit) (18. April 2016) (SWW)

Tabelle 4-18: Ergebnisse Modellqualität (Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden)

Modell	mittlere Abweichung der Validierungsszenarien	Differenz der Mittelwerte (Kal – Val)	mittlere Distanz zwischen realem und simuliertem Leck (18.04.)
Trial-&-Error (Zonen)	0,68 m	+ 0,32 m	Mittelwert: 454 m Median: 472 m
AC: Rauheit und Minor Loss Koeffizient (Zonen)	0,33 m	0,00 m	Mittelwert: 247 m Median: 221 m
AC: Rauheit (Zonen)	0,50 m	+ 0,16 m	Mittelwert: 299 m Median: 221 m

4.4.2 Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Skeletonisierungsgrade

Verglichen werden an dieser Stelle verschiedene Skeletonisierungsgrade des hydraulischen Modells des WVN Hart bei Graz. Ausgehend vom gesamten nicht vereinfachten Netz „complicated“, siehe Abbildung 3-8, werden auch das hän-

disch skeletonisierte Modell „Jakim“, vgl. Abbildung 3-9 in der Ausführung „vor-kalibriert“ aus Kapitel 4.3.4 und das automatisch skeletonisierte Modell „Georg“, vgl. Abbildung 3-10 behandelt. Um diese drei Modelle vergleichen zu können, werden alle drei nach Materialien gruppiert. Die ursprüngliche Idee, den zu kalibrierenden Minor Loss Koeffizient für alle drei Modelle ident zu verwenden, wurde verworfen, nachdem dadurch keine sinnvollen Ergebnisse simuliert werden konnten. Die geodätischen Höhen der Messpunkte, der drei zu kalibrierenden Modelle, sind jeweils auf das ungestörte System eingerichtet.

4.4.2.1 Modellgüte (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade)

Beim Vergleich der Modelle mit verschiedenen Skeletonisierungsgraden lassen sich alle in 2.3.2 vorgestellten Methoden anwenden. Zuerst werden an dieser Stelle die Streuungen der Ergebnisse der AC betrachtet. In den Abbildungen Abbildung 4-15, Abbildung 4-16 und Abbildung 4-17 sind diese für die drei verschiedenen Modelle: Originalnetz „complicated“ (vgl. Abbildung 3-8), „Jakim“ (vgl. Abbildung 3-9) und „Georg“ (vgl. Abbildung 3-10) zu sehen.

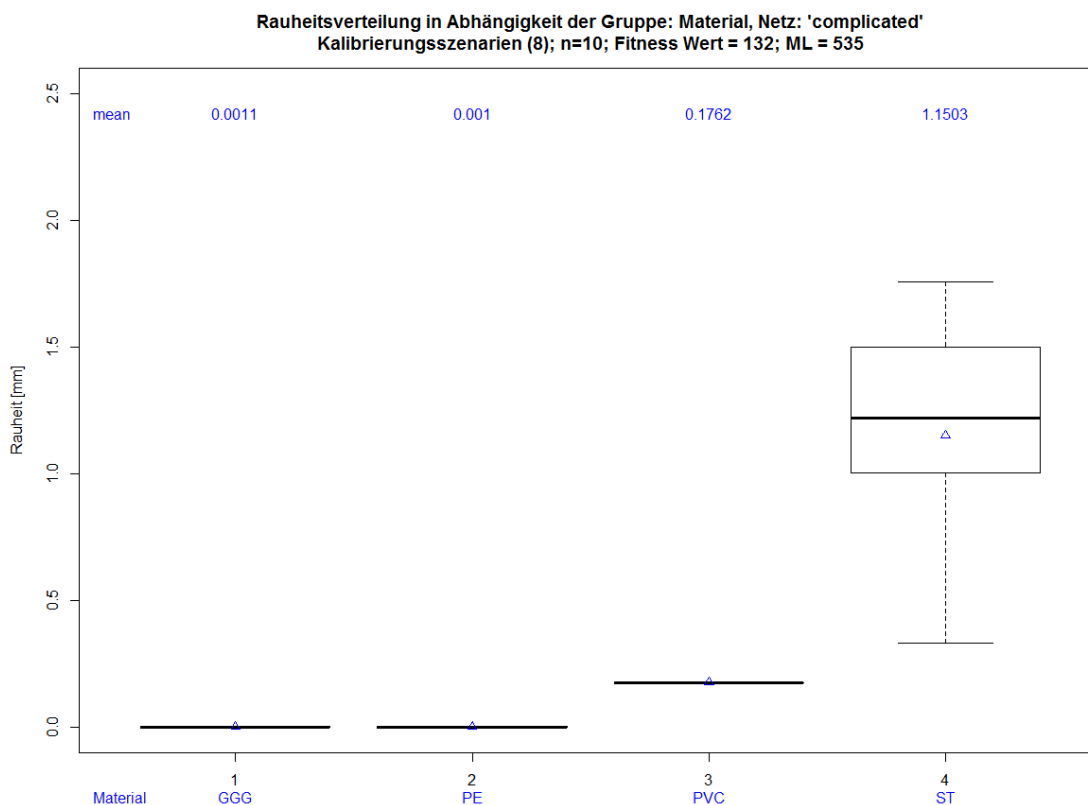


Abbildung 4-15: Streuung der Ergebnisse der AC, Modell: „complicated“, ML = 535

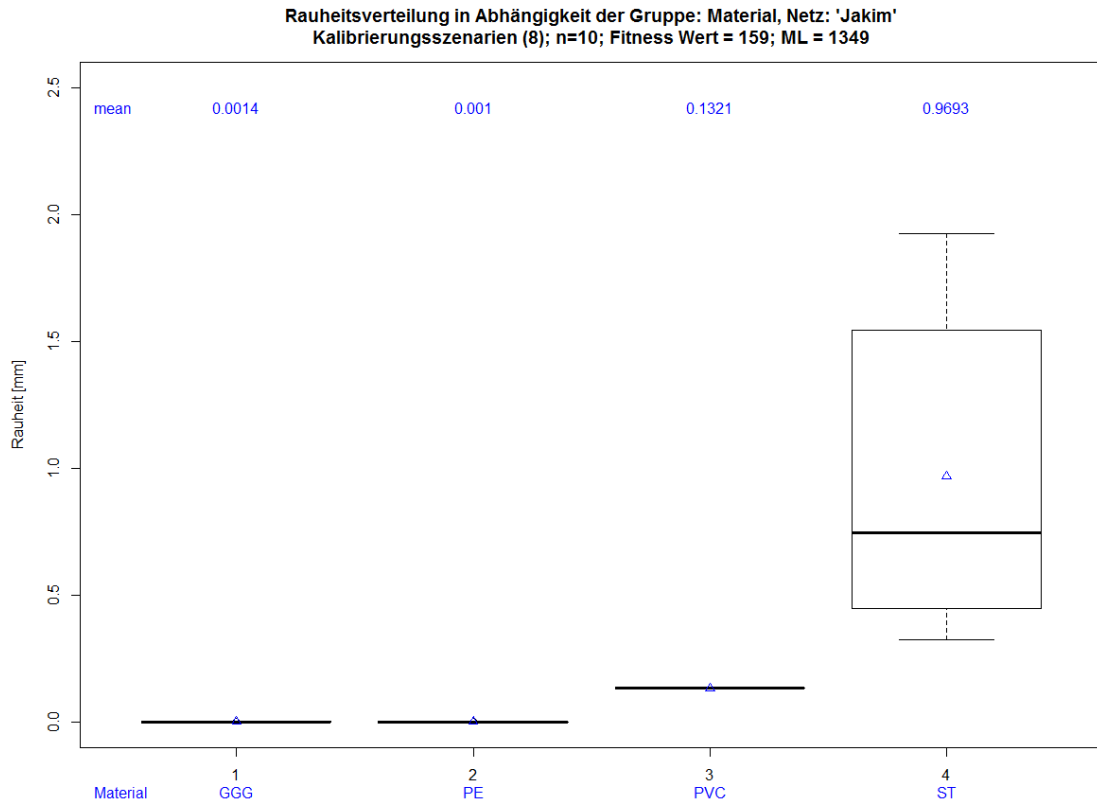


Abbildung 4-16: Streuung der Ergebnisse der AC, Modell „Jakim“, ML = 1349

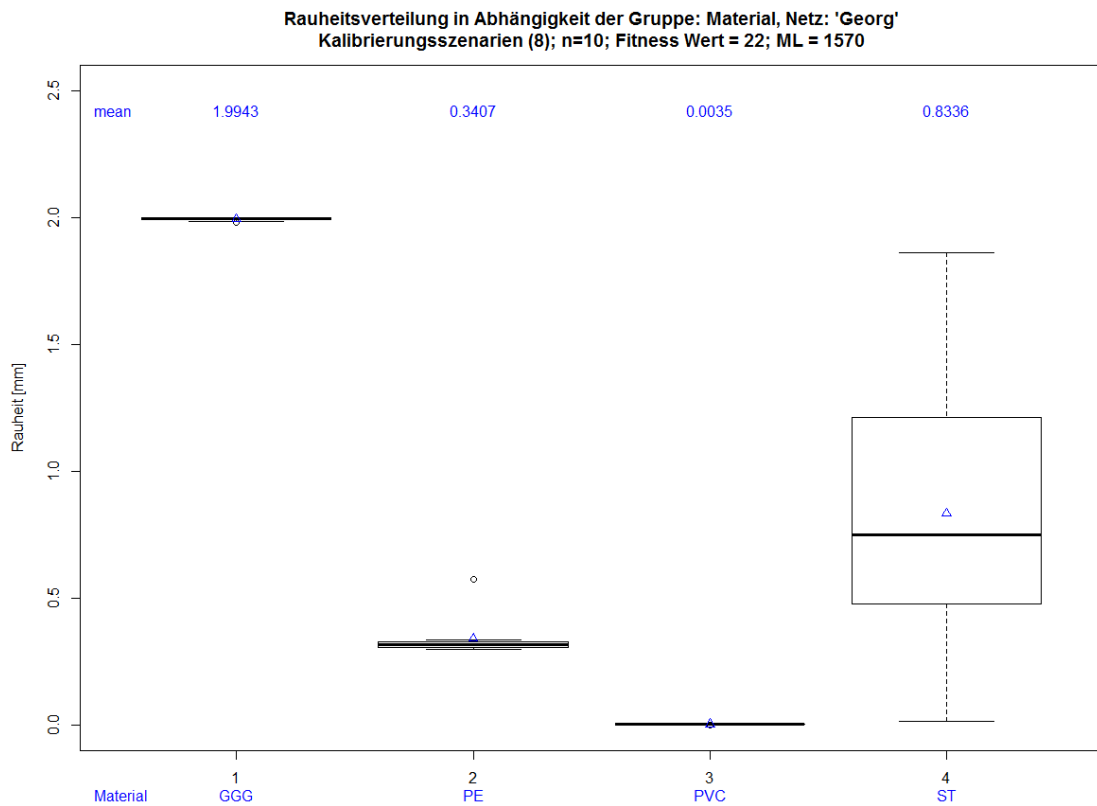


Abbildung 4-17: Streuung der Ergebnisse der AC, Modell: „Georg“, ML = 1570

Ergebnisse

Nach Auswahl jeweils einer repräsentativen Simulation je Modell wurden Korrelationsplots der Kalibrierungsszenarien dieser Modelle erstellt, die in den Abbildungen Abbildung 4-18, Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20 ersichtlich sind.

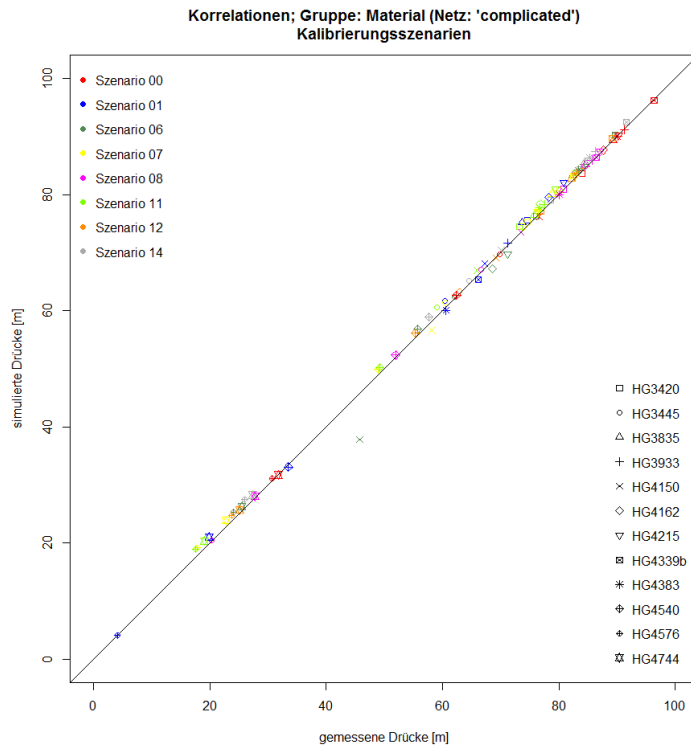


Abbildung 4-18: Korrelationen: Modell: „complicated“, Kalibrierungsszenarien

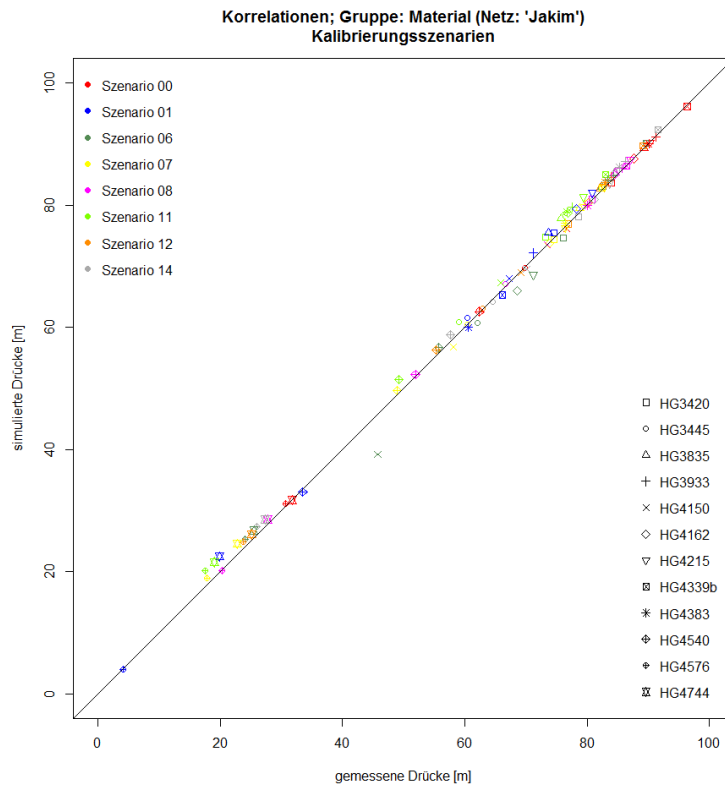


Abbildung 4-19: Korrelationen: Modell „Jakim“, Kalibrierungsszenarien

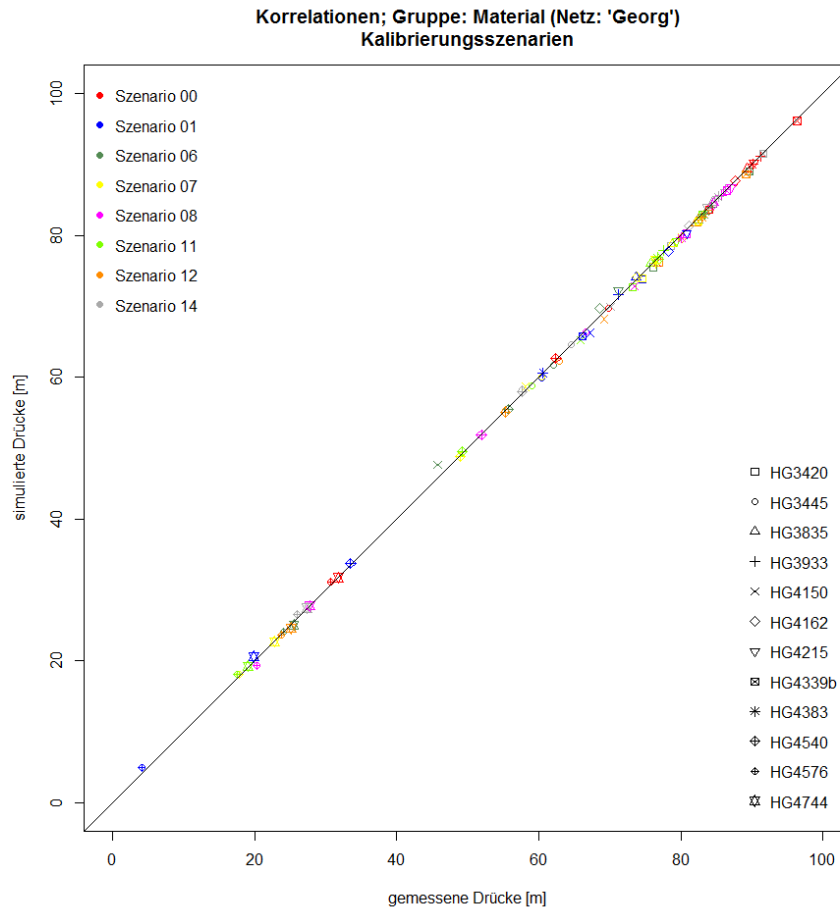


Abbildung 4-20: Korrelationen: Modell: „Georg“, Kalibrierungsszenarien

Die Fitnesswerte und die mittlere Abweichung der Drücke bei den Kalibrierungsszenarien sind für den Vergleich der verschiedenen Skeletonisierungsgrade in Tabelle 4-19 zusammengefasst. Die dazugehörigen Abbildungen befinden sich im Anhang D.

Tabelle 4-19: Ergebnisse Modellgüte (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade)

Modell	Fitnesswert	mittlere Abweichung der Kalibrierungsszenarien
„complicated“	132	0,79 m
„Jakim“	159	0,89 m
„Georg“	22	0,37 m

Die Abweichungen der Einzelmessungen a (gemittelt über die Kalibrierungsszenarien) und der Erwartungswert der Druckabweichungen U sind in Tabelle 4-20 ersichtlich. Werte in roter kursiver Schrift markieren Werte, die nach DVGW GW 303-1, 2006, als nicht zutreffend bewertet werden, vgl. Tabelle 4-15.

Tabelle 4-20: Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade)

Modell	„complicated“		„Jakim“		„Georg“	
	a [mWS]	U [mWS]	a [mWS]	U [mWS]	a [mWS]	U [mWS]
HG3420	- 0,30	- 0,64	0,15	- 0,43	0,60	0,17
HG3445	- 0,52	- 0,64	- 0,08	- 0,43	0,36	0,17
HG3835	- 0,84	- 0,64	- 0,64	- 0,43	0,01	0,17
HG3933	- 0,70	- 0,64	- 0,62	- 0,43	0,06	0,17
HG4150	0,04	- 0,64	0,37	- 0,43	0,57	0,17
HG4162	- 0,53	- 0,64	- 0,06	- 0,43	0,11	0,17
HG4215	- 0,54	- 0,64	- 0,08	- 0,43	0,12	0,17
HG4339b	- 0,58	- 0,64	- 0,40	- 0,43	0,28	0,17
HG4383	- 0,77	- 0,64	- 0,64	- 0,43	0,18	0,17
HG4540	- 0,98	- 0,64	- 0,84	- 0,43	- 0,04	0,17
HG4576	- 1,14	- 0,64	- 1,11	- 0,43	- 0,27	0,17
HG4744	- 0,82	- 0,64	- 1,19	- 0,43	0,03	0,17

4.4.2.2 Modellqualität (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade)

Bei der Betrachtung der Modellqualität werden am Beginn die Korrelationsplots der Validierungsszenarien herangezogen, diese befinden sich im Anhang B.

Die Darstellungen der Boxplots über die Validierungsszenarien, mit der Verteilung der Druckabweichungen befinden sich gesammelt in Anhang D.

An dieser Stelle werden die Boxplot-Darstellungen der Kalibrierungs- und Validierungsszenarien jeweils in einem Bild dargestellt. Abbildung 4-21 zeigt die Verteilung der Druckdifferenzen für das Modell „complicated“, Abbildung 4-22 jene des Modells „Jakim“ und Abbildung 4-23 jene des Modells „Georg“. Im Sinne der Vergleichbarkeit sind die Achsenskalierungen ident.

Darstellungen der Simulationen der Leckage Lokalisierung sind in Abbildung 4-24 für das Modell „complicated“, in Abbildung 4-25 für das Modell „Jakim“ und in Abbildung 4-26 für das Modell „Georg“ zu finden. Hierbei markiert die Darstellung des „X“ das reale künstliche Leck, die Dreiecke symbolisieren die Druckmessstellen, die für diese Simulation verwendet wurden, die Kreise markieren

die simulierten Leckagen. Durch die insgesamt 100 Simulationen pro durchgeführte Berechnung werden so 100 Kreise in die Abbildung gezeichnet. Erscheinen Kreise dunkler, so liegen an dieser Stelle Kreise verschiedener Simulationen mit gleicher simulierter Leckage übereinander.

In Anhang E befinden sich zudem die Histogramme der berechneten Distanzen zwischen realen und simulierten Leckagen dieser Berechnungen.

Die mittleren Abweichungen der Validierungsszenarien dieser Modelle, die Differenz der Mittelwerte der Druckabweichungen von Kalibrierungs- und Validierungsszenarien sowie die mittleren Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck als Ergebnis der Simulation der Leckage Lokalisierung sind in Tabelle 4-21 zusammengefasst.

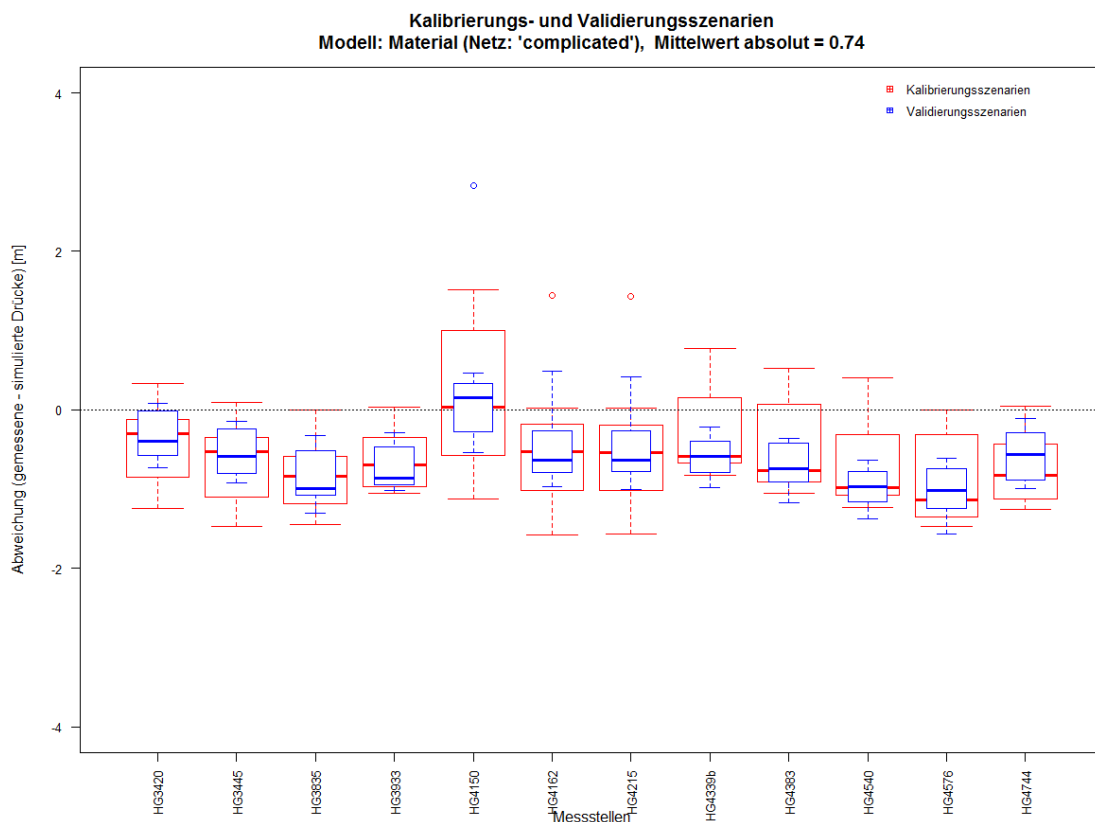


Abbildung 4-21: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: „complicated“

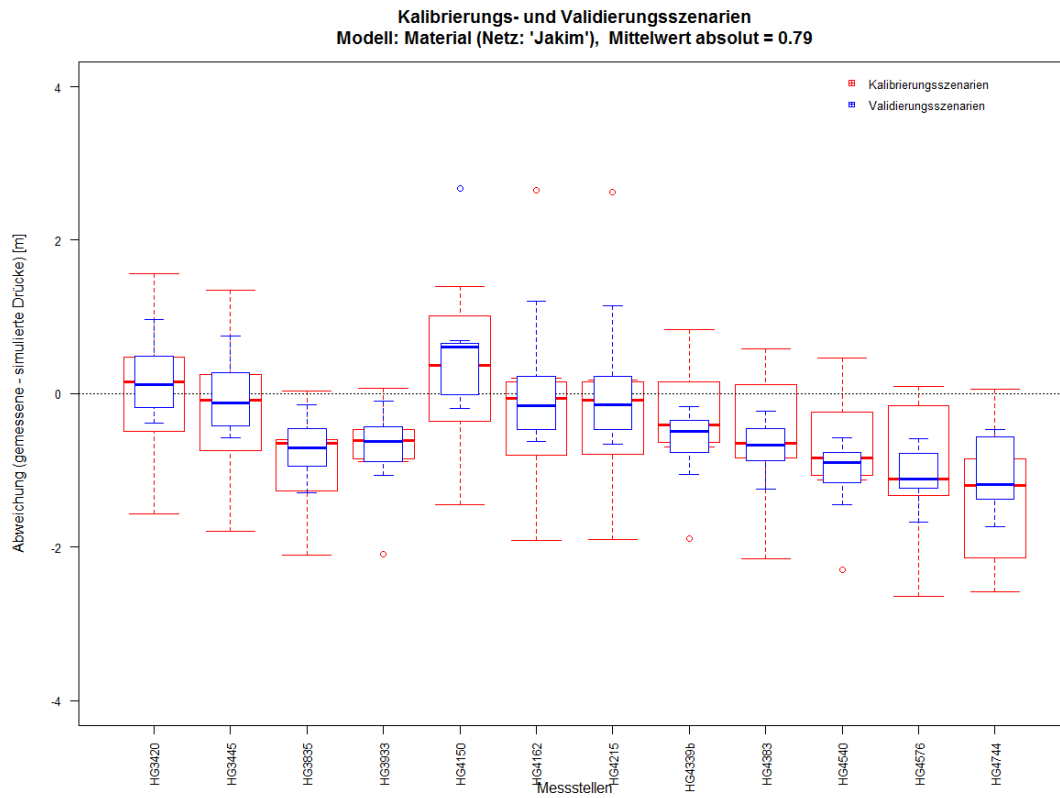


Abbildung 4-22: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell: „Jakim“

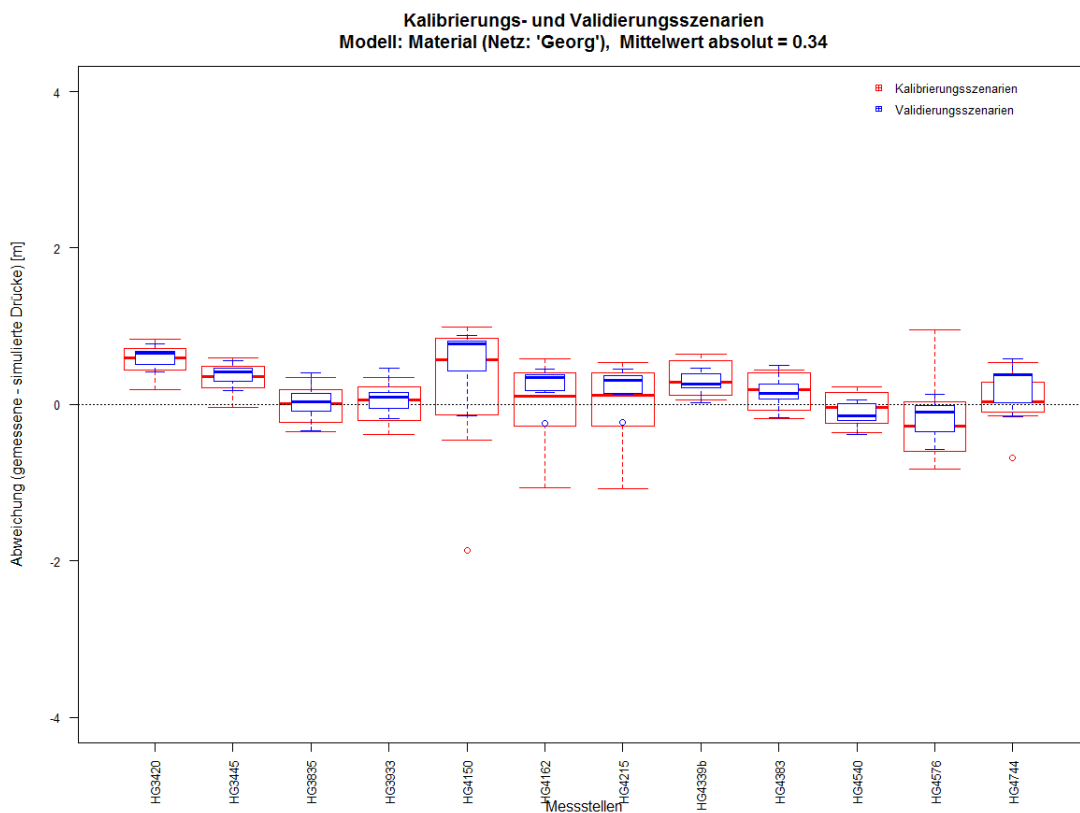


Abbildung 4-23: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Modell „Georg“

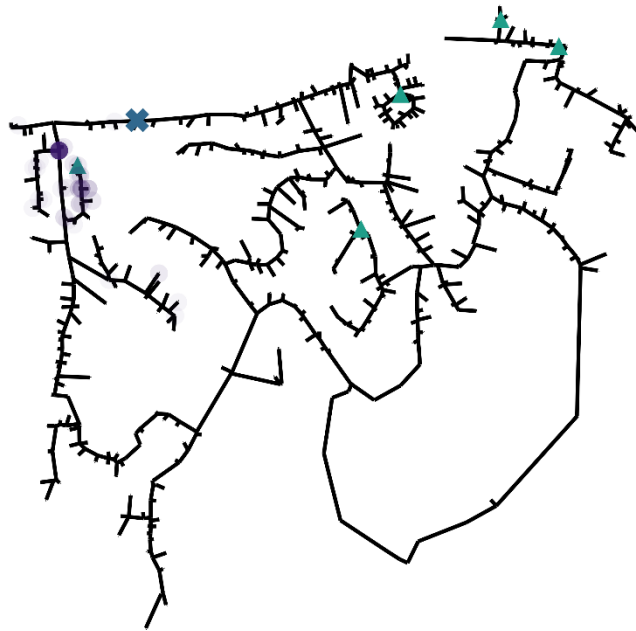


Abbildung 4-24: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: „complicated“
(18. April 2016) (SWW)

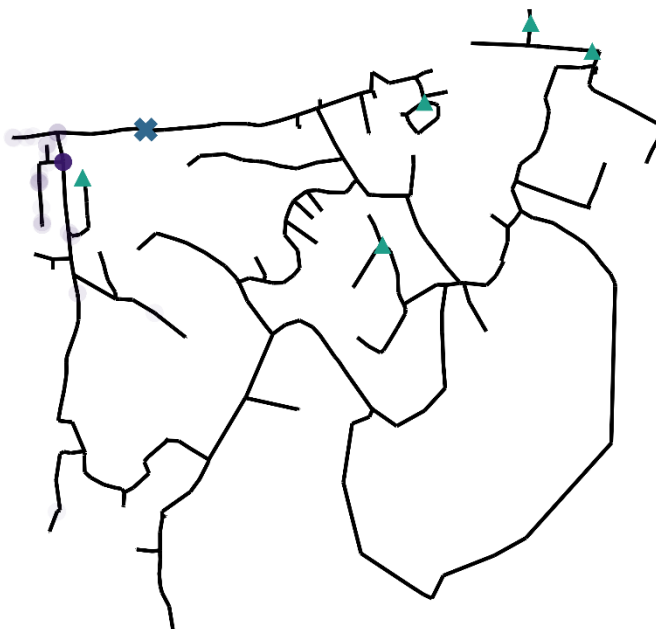


Abbildung 4-25: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: „Jakim“
(18. April 2016) (SWW)

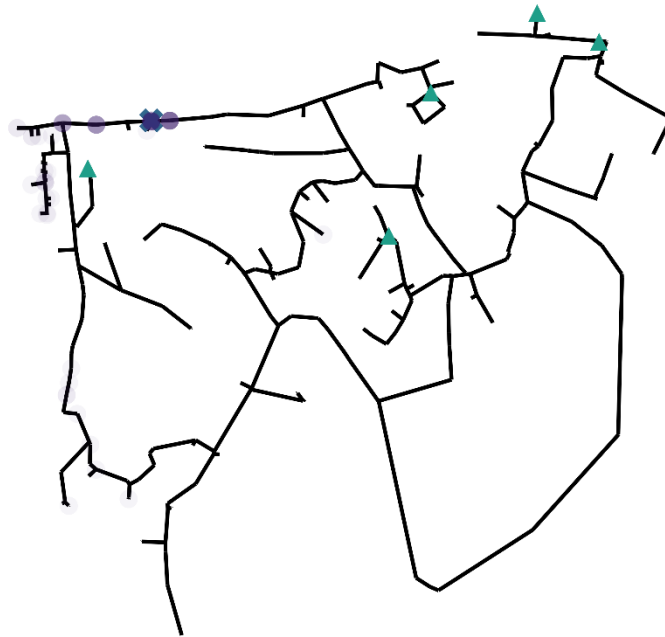


Abbildung 4-26: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Modell: „Georg“ (18. April 2016) (SWW)

Tabelle 4-21: Ergebnisse Modellqualität (Vergleich verschiedener Skeletonisierungsgrade)

Modell	mittlere Abweichung der Validierungsszenarien	Differenz der Mittelwerte (Kal – Val)	mittlere Distanz zwischen realem und simuliertem Leck (18.04.)
„complicated“	0,68 m	+ 0,11 m	Mittelwert: 333 m Median: 295 m
„Jakim“	0,68 m	+ 0,21 m	Mittelwert: 255 m Median: 221 m
„Georg“	0,31 m	+ 0,06 m	Mittelwert: 168 m Median: 101 m

4.4.3 Ergebnisse des Vergleichs verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung verglichen. Die Gruppierungen sind in Tabelle 4-22 zusammengefasst. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde als Grundmodell das Modell „Jakim“ in der Ausführung „vorkalibriert“ (siehe 4.3.4) verwendet, außer für die Gruppierungen 05 und 06. Da diese u.a. nach Einbautendichte gruppiert wurden, war das nicht möglich. Stattdessen

wurde für diese beiden Gruppierungen das Grundmodell „Georg“ als zu kalibrierendes Modell gewählt, da nur für dieses die Daten der Einbautendichte vorlagen.

Bei der Auswahl der Intervalle der quantitativen Parameter wurde darauf geachtet, dass die Gruppen nicht zu wenige Individuen beinhalten, wenn möglich auch ähnlich groß sind. Einige Grenzen sind auch auf die Historie des vielen Ausprobierens zurückzuführen.

Tabelle 4-22: Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung

#	Gruppenbeschreibung	hydr. Modell	Anzahl der Gruppen
01	Material (GGG, PE, PVC, ST)	„Jakim“	4
02	Durchmesser (0 – 81 mm, 81 – 90 mm, 90 – 100 mm, über 100 mm)	„Jakim“	4
03	Verlegejahr (vor 1978, 1978 – 1990, nach 1990)	„Jakim“	3
04	Zonen (A, B, C, D, E)	„Jakim“	5
05	Einbautendichte (0 / km, bis 40 / km, 40 – 80 / km, über 80 / km, Zuflussleitung)	„Georg“	5
06	Einbautendichte (0 / km, bis 40 / km, 40 – 80 / km, über 80 / km, Zuflussleitung), Verlegejahr (vor 1978, 1978 – 1990, nach 1990)	„Georg“	13
07	Material (GGG, PE, PVC, ST), Durchmesser (0 – 85 mm, 85 – 100 mm, über 100 mm), Verlegejahr (bis 1990, nach 1990)	„Jakim“	19
08	Durchmesser (0 – 81 mm, 81 – 90 mm, über 90), Verlegejahr (bis 1978, ab 1978)	„Jakim“	6

4.4.3.1 Modellgüte (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung)

Im Vergleich der verschiedenen Parametergruppierungen in der AC lassen sich alle in 2.3.2 erwähnten Methoden anwenden. Zuerst werden die Streuungen der Ergebnisse der AC betrachtet, die in den Abbildungen Abbildung 4-27, Abbildung 4-28, Abbildung 4-29, Abbildung 4-30, Abbildung 4-31, Abbildung 4-32, Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34 ersichtlich sind.

Ergebnisse

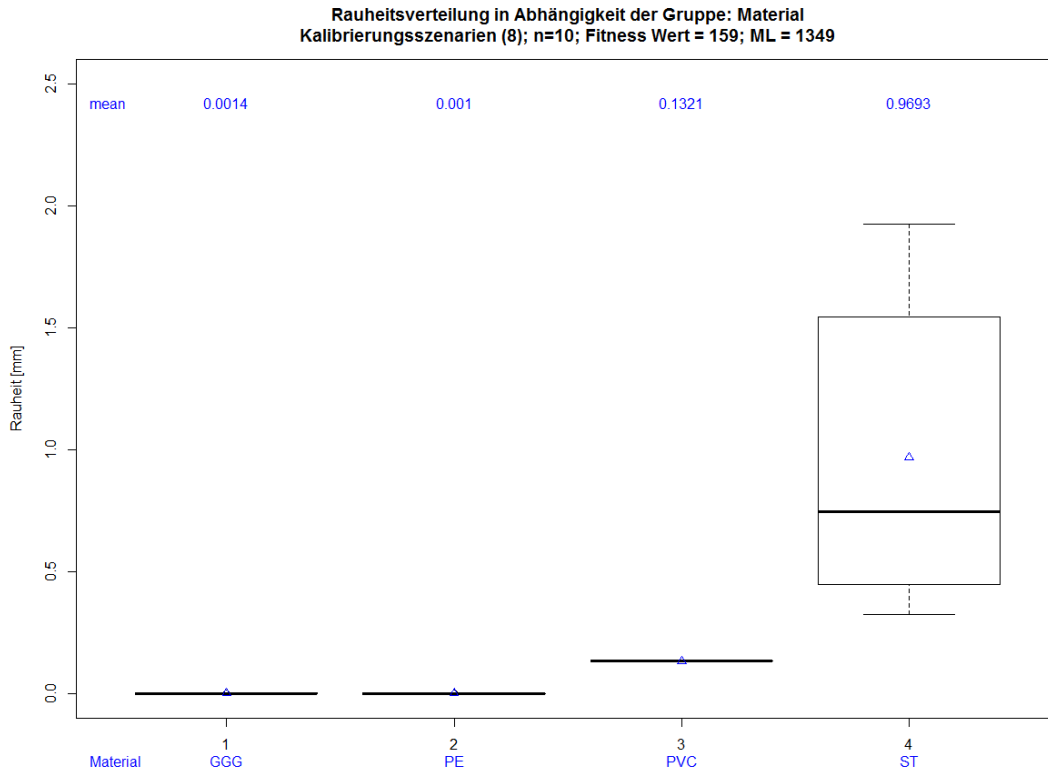


Abbildung 4-27: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Material

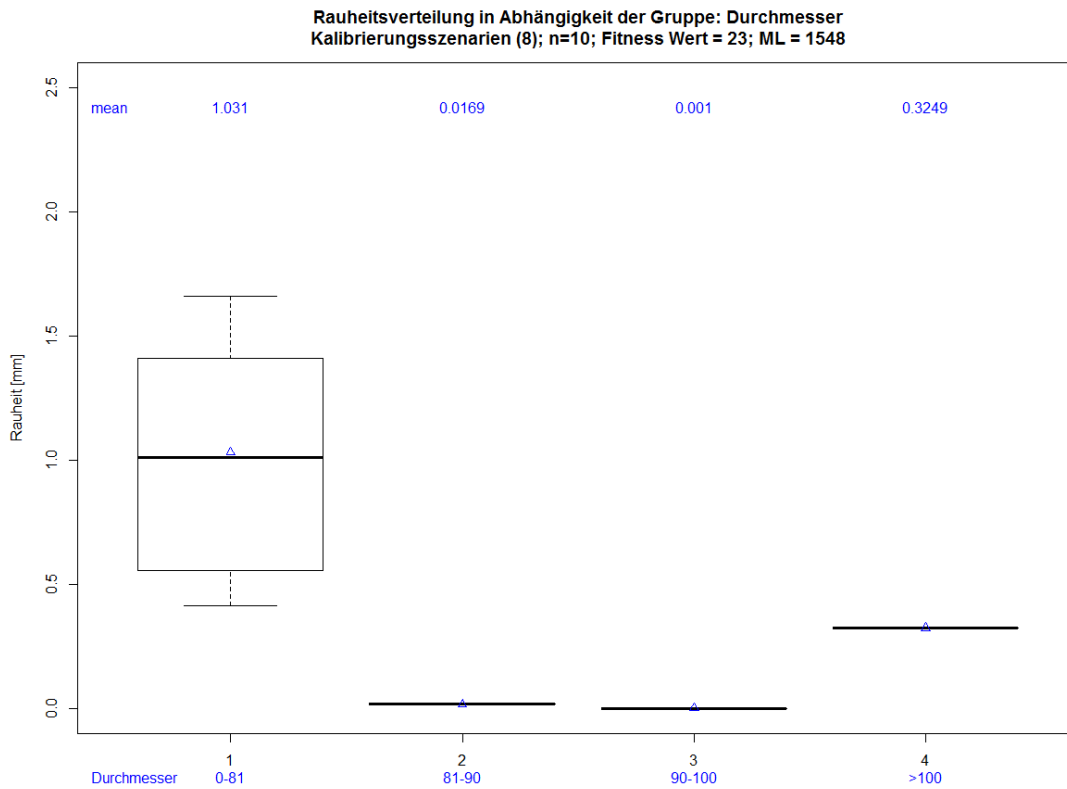


Abbildung 4-28: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Durchmesser

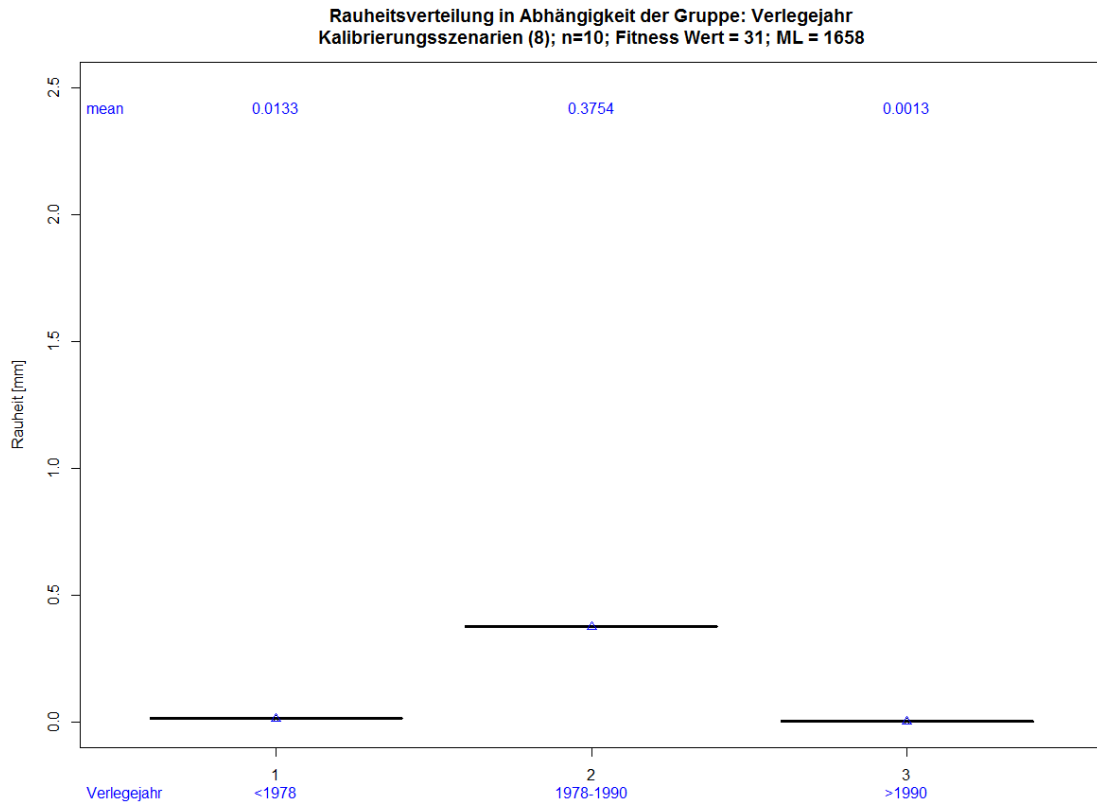


Abbildung 4-29: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Verlegejahr

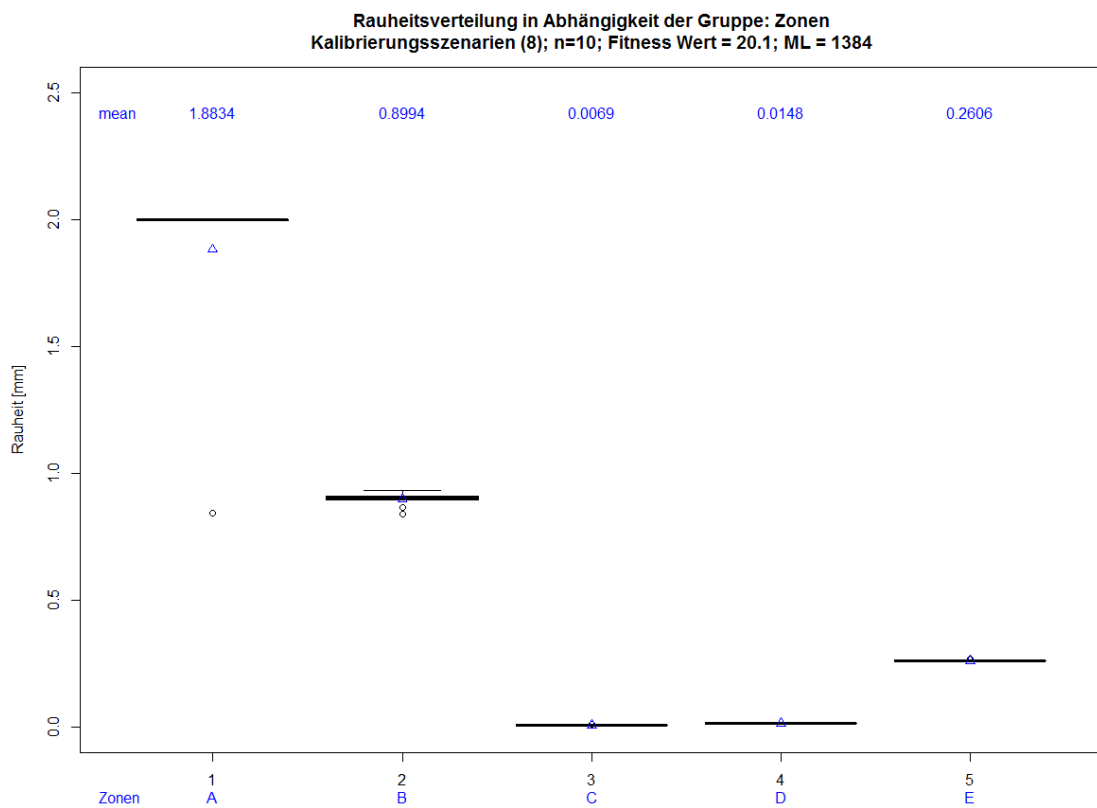


Abbildung 4-30: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Zonen

Ergebnisse

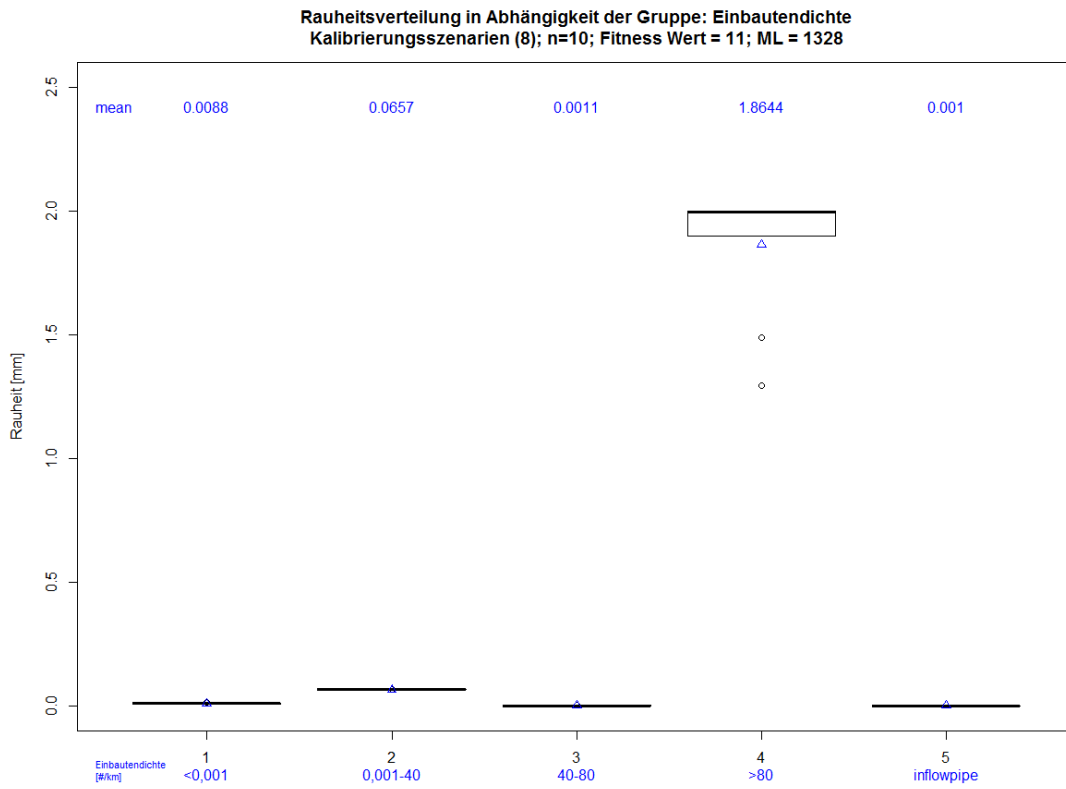


Abbildung 4-31: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Einbautendichte

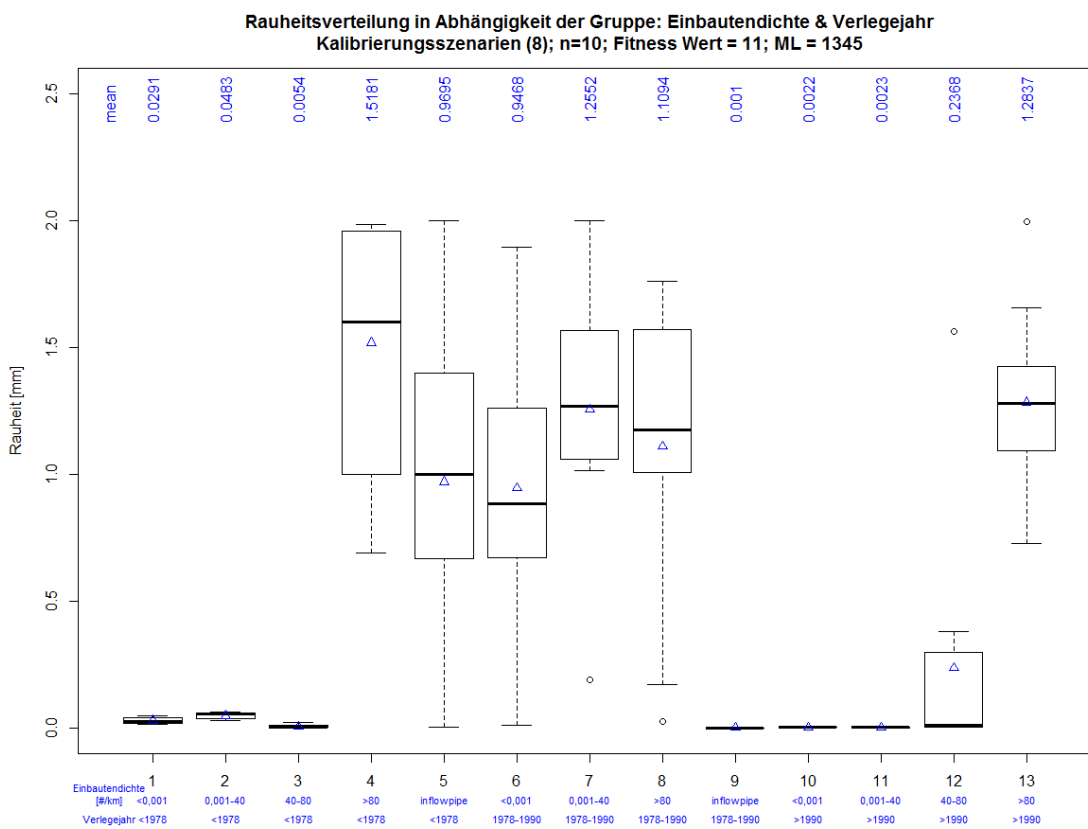


Abbildung 4-32: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Einbautendichte & Verlegejahr

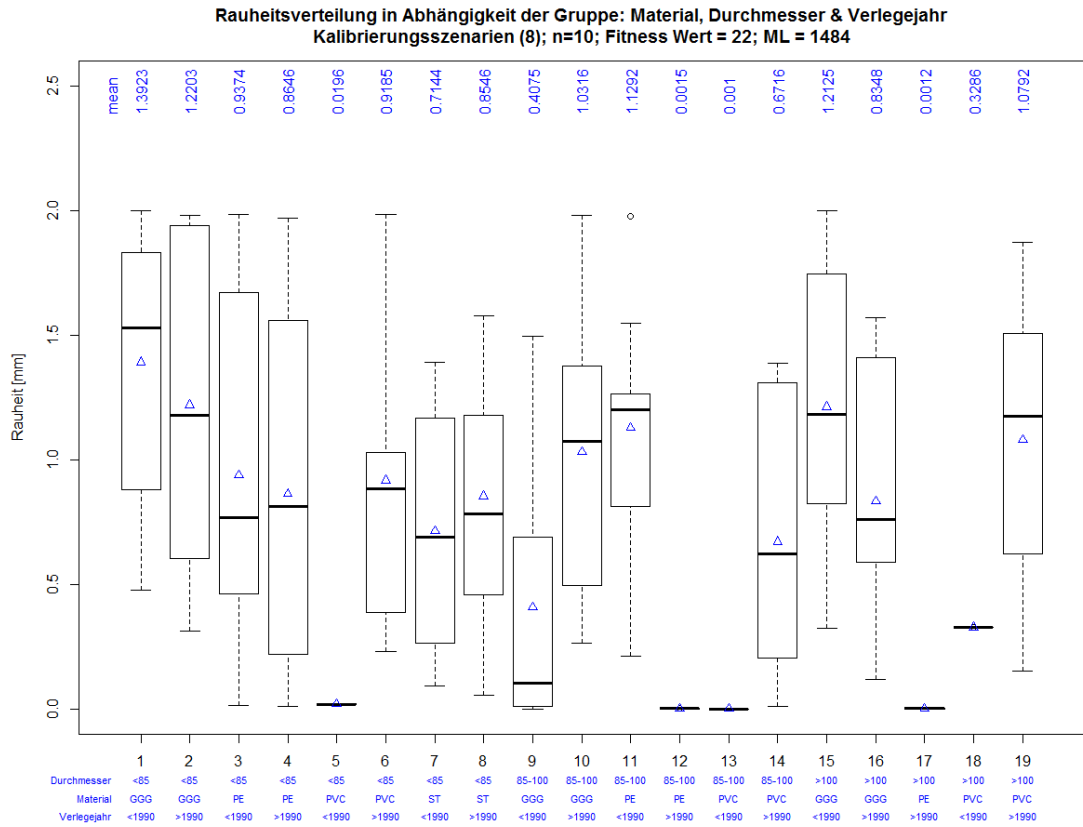


Abbildung 4-33: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Material, Durchmesser & Verlegejahr

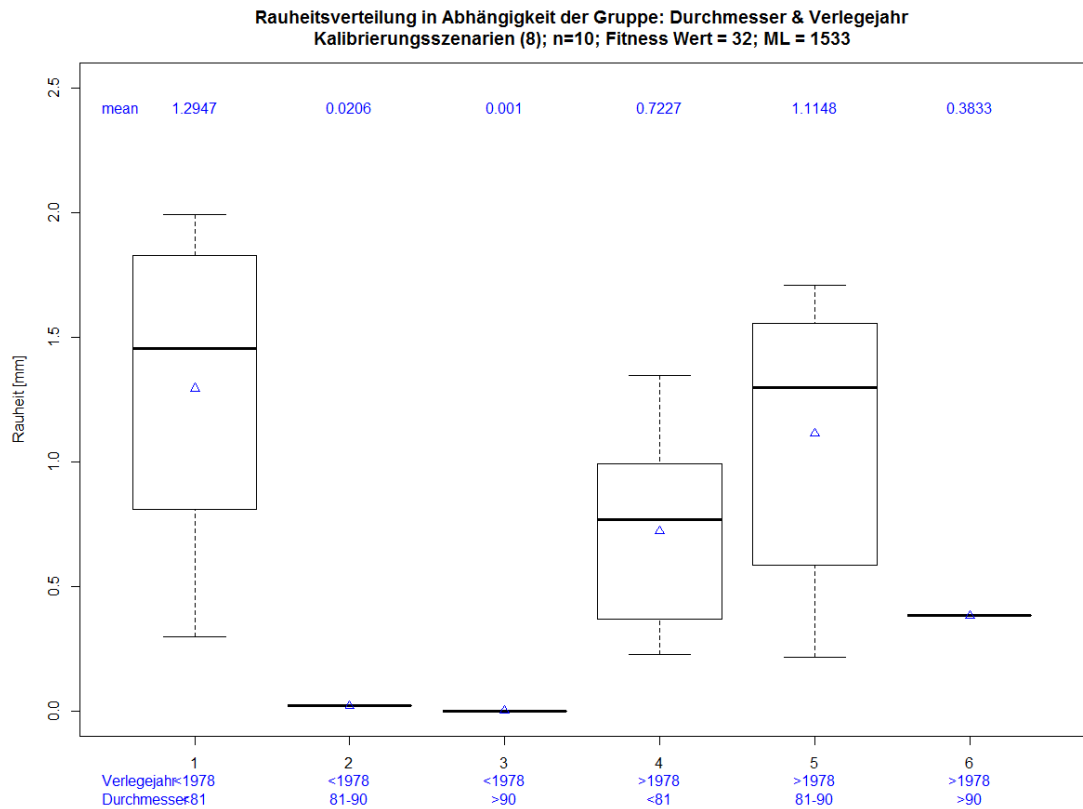


Abbildung 4-34: Streuung der Ergebnisse der AC, Gruppierung: Durchmesser & Verlegejahr

Ergebnisse

Nach Auswahl jeweils einer repräsentativen Simulation wurden Korrelationsplots der Kalibrierungsszenarien dieser Modelle erstellt, die in den Abbildungen Abbildung 4-19, Abbildung 4-35, Abbildung 4-36, Abbildung 4-7, Abbildung 4-37, Abbildung 4-38, Abbildung 4-39 und Abbildung 4-40 ersichtlich sind.

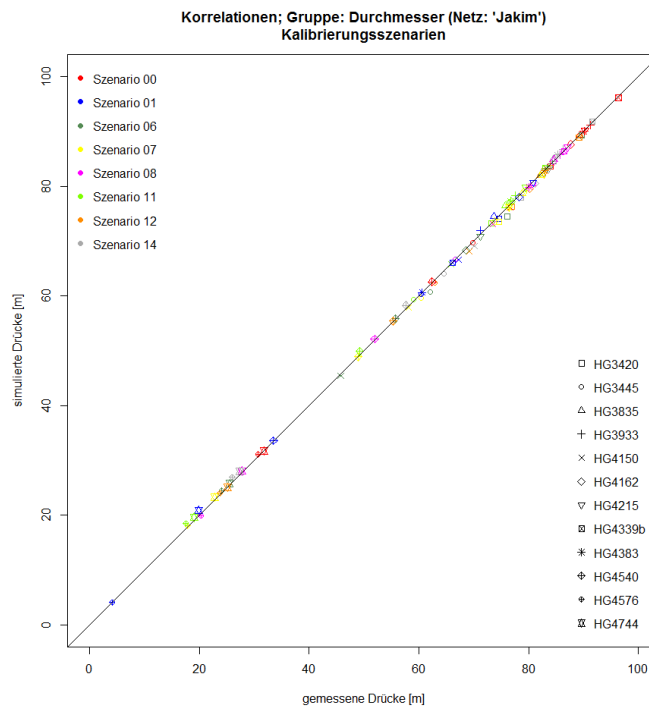


Abbildung 4-35: Korrelationen: Modell: Durchmesser (02), Kalibrierungsszenarien

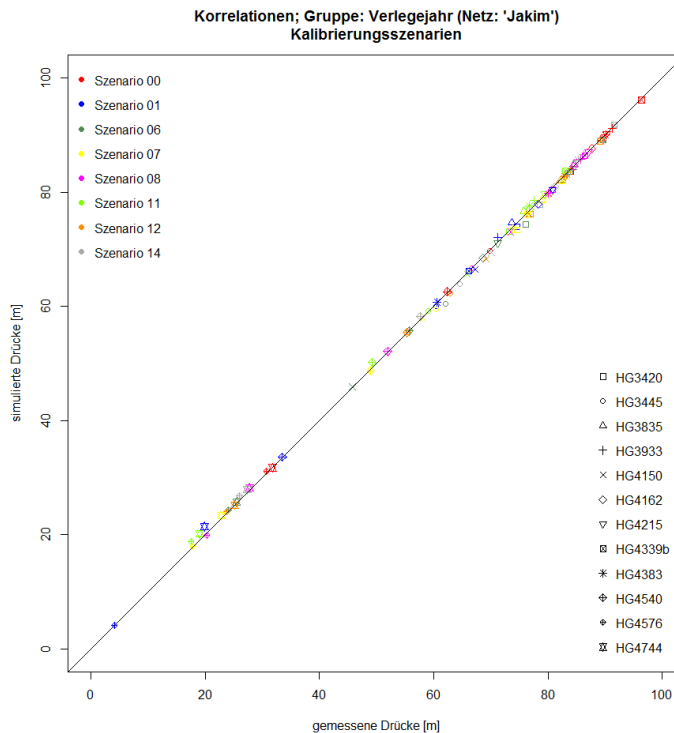


Abbildung 4-36: Korrelationen: Modell: Verlegejahr (03), Kalibrierungsszenarien

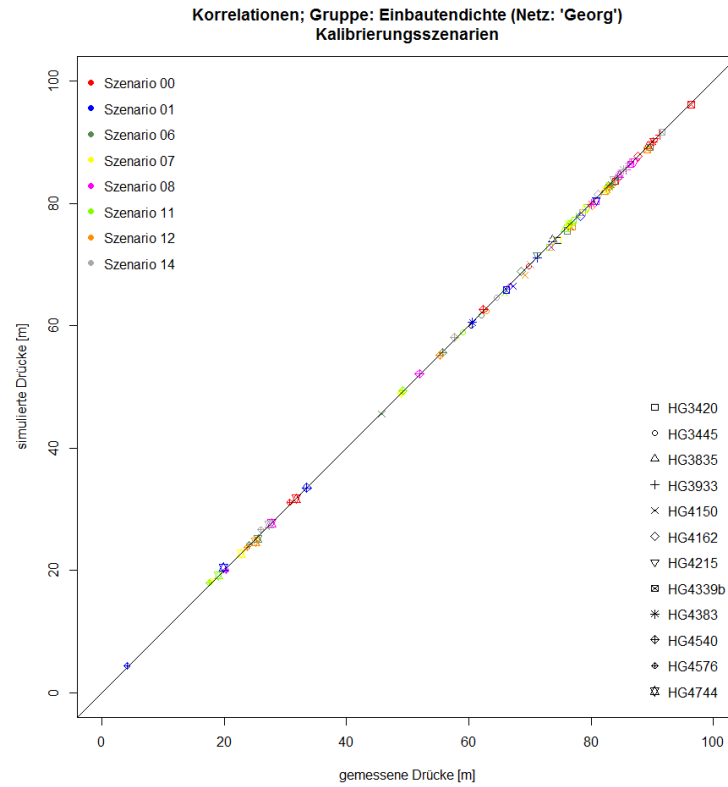


Abbildung 4-37: Korrelationen: Modell: Einbautendicht (05), Kalibrierungsszenarien

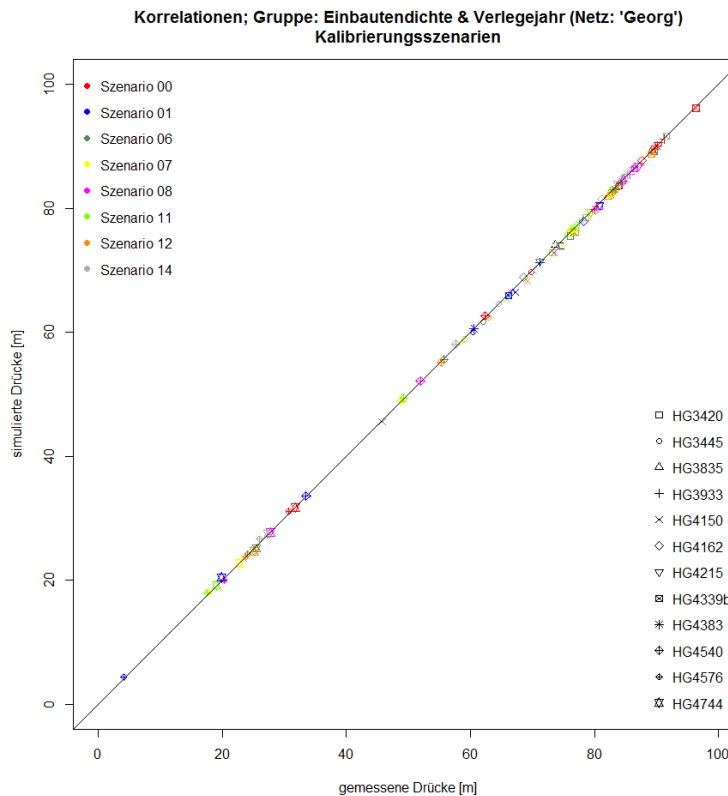


Abbildung 4-38: Korrelationen: Modell: Einbautendichte & Verlegejahr (06), Kalibrierungsszenarien

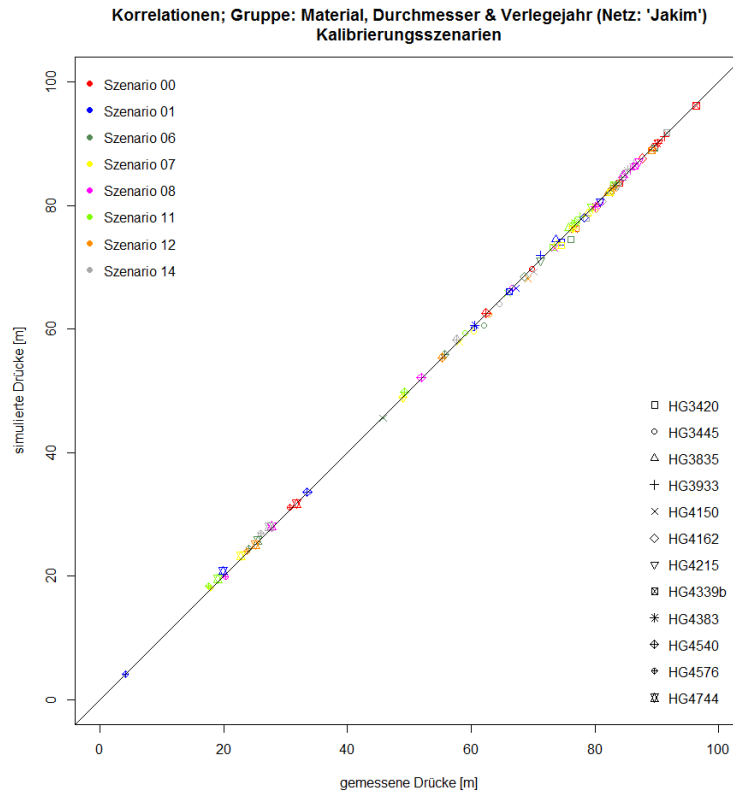


Abbildung 4-39: Korrelationen: Modell: Material, Durchmesser & Verlegejahr (07), Kalibrierungsszenarien

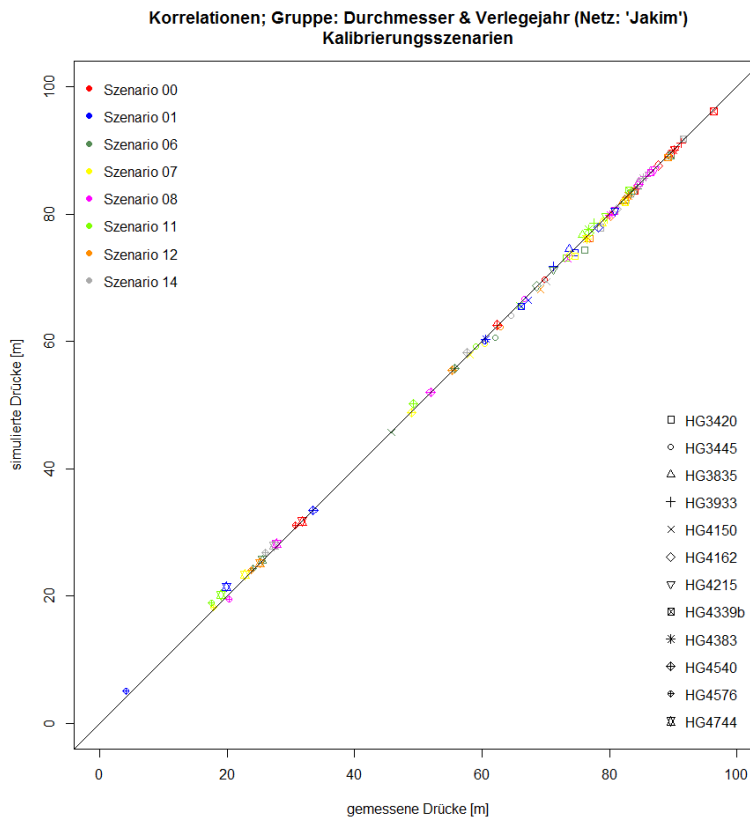


Abbildung 4-40: Korrelationen: Modell: Durchmesser & Verlegejahr (08), Kalibrierungsszenarien

Die Fitness-Werte und die mittlere Abweichung der Drücke bei den Kalibrierungsszenarien sind für den Vergleich der verschiedenen Parametergruppierungen der AC in Tabelle 4-23 zusammengefasst. Die dazugehörigen Abbildungen befinden sich im Anhang D.

Tabelle 4-23: Ergebnisse Modellgüte (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung)

Modell	Fitness-Wert	mittlere Abweichung der Kalibrierungsszenarien
Material (01)	159	0,89 m
Durchmesser (02)	23	0,37 m
Verlegejahr (03)	31	0,41 m
Zonen (04)	20	0,33 m
Einbautendichte (05)	11	0,26 m
Einbautendichte & Verlegejahr (06)	11	0,26 m
Material, Durchmesser & Verlegejahr (07)	22	0,35 m
Durchmesser & Verlegejahr (08)	32	0,43 m

Die Abweichungen der Einzelmessungen a (gemittelt über die Kalibrierungsszenarien) und der Erwartungswert der Druckabweichungen U sind in den Tabellen Tabelle 4-24 und Tabelle 4-25 ersichtlich. Werte in roter kursiver Schrift markieren Werte, die nach DVGW GW 303-1, 2006, vgl. Tabelle 4-15, als nicht zutreffend bewertet werden.

Tabelle 4-24: Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen, Modelle 01 bis 04)

Modell	01		02		03		04	
Hydrant	a	U	a	U	a	U	a	U
HG3420	0,15	- 0,43	0,58	0,08	0,74	0,11	0,48	0,03
HG3445	- 0,08	- 0,43	0,34	0,08	0,50	0,11	0,25	0,03
HG3835	- 0,64	- 0,43	- 0,12	0,08	- 0,13	0,11	0,00	0,03
HG3933	- 0,62	- 0,43	- 0,02	0,08	- 0,03	0,11	0,02	0,03
HG4150	0,37	- 0,43	0,47	0,08	0,50	0,11	0,41	0,03
HG4162	- 0,06	- 0,43	0,17	0,08	0,16	0,11	0,00	0,03
HG4215	- 0,08	- 0,43	0,19	0,08	0,16	0,11	0,02	0,03
HG4339b	- 0,40	- 0,43	0,16	0,08	0,18	0,11	0,24	0,03
HG4383	- 0,64	- 0,43	0,08	0,08	0,10	0,11	0,05	0,03
HG4540	- 0,84	- 0,43	- 0,15	0,08	- 0,15	0,11	- 0,17	0,03
HG4576	- 1,11	- 0,43	- 0,30	0,08	- 0,24	0,11	- 0,52	0,03
HG4744	- 1,19	- 0,43	- 0,40	0,08	- 0,50	0,11	- 0,45	0,03

Tabelle 4-25: Abweichungen der Messungen an den Hydranten und der Erwartungswerte der Druckabweichungen (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen, Modelle 05 bis 08)

Modell	05		06		07		08	
Hydrant	a	U	a	U	a	U	a	U
HG3420	0,53	0,11	0,54	0,11	0,59	0,08	0,72	0,09
HG3445	0,29	0,11	0,30	0,11	0,34	0,08	0,48	0,09
HG3835	- 0,02	0,11	- 0,02	0,11	- 0,12	0,08	- 0,15	0,09
HG3933	0,09	0,11	0,04	0,11	- 0,02	0,08	- 0,08	0,09
HG4150	0,48	0,11	0,48	0,11	0,48	0,08	0,49	0,09
HG4162	0,02	0,11	0,02	0,11	0,13	0,08	0,10	0,09
HG4215	0,03	0,11	0,03	0,11	0,13	0,08	0,11	0,09
HG4339b	0,24	0,11	0,20	0,11	0,17	0,08	0,25	0,09
HG4383	0,08	0,11	0,08	0,11	0,09	0,08	0,15	0,09
HG4540	- 0,12	0,11	- 0,12	0,11	- 0,15	0,08	- 0,13	0,09
HG4576	- 0,30	0,11	- 0,26	0,11	- 0,30	0,08	- 0,32	0,09
HG4744	0,04	0,11	0,04	0,11	- 0,38	0,08	- 0,49	0,09

4.4.3.2 Modellqualität (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung)

Bei der Betrachtung der Modellqualität der Modelle mit verschiedenen Parametergruppierungen werden am Beginn die Korrelationsplots der Validierungsszenarien betrachtet, diese befinden sich im Anhang B.

Die Darstellungen der Boxplots über die Validierungsszenarien, mit der Verteilung der Druckabweichungen befinden sich gesammelt in Anhang D.

An dieser Stelle werden die Boxplot-Darstellungen der Kalibrierungs- und Validierungsszenarien jeweils in einem Bild dargestellt. Abbildung 4-21 zeigt die Verteilung der Druckdifferenzen für das Modell, in dem nach Material gruppiert wurde, Abbildung 4-41 jene des Modells, in dem nach Durchmesser gruppiert wurde. Abbildung 4-42 beinhaltet die Darstellung des Modells, das nach Verlegetagen gruppiert wurde, Abbildung 4-10 jenes, das nach Zonen gruppiert wurde und Abbildung 4-43 das, das nach Einbautendichte gruppiert wurde. Die Modelle, in denen über mehrere Parameter gruppiert wurde, finden sich in Abbildung 4-44 (Einbautendichte & Verlegetag), Abbildung 4-45 (Material, Durchmesser & Verlegetag) und Abbildung 4-46 (Durchmesser und Verlegetag). Im Sinne der Vergleichbarkeit sind die Achsenskalierungen ident.

Ergebnisse

Darstellungen der Simulationen der Leckage Lokalisierung sind in nachfolgenden Abbildungen zu finden: Abbildung 4-25 (Material), Abbildung 4-47 (Durchmesser), Abbildung 4-48 (Verlegejahr), Abbildung 4-13 (Zonen), Abbildung 4-49 (Einbautendichte), Abbildung 4-50 (Einbautendichte & Verlegejahr), Abbildung 4-51 (Material, Durchmesser & Verlegejahr) und Abbildung 4-52 (Durchmesser & Verlegejahr). Hierbei markiert die Darstellung des „X“ das reale künstliche Leck, die Dreiecke symbolisieren die Druckmessstellen, die für diese Simulation verwendet wurden, die Kreise markieren die simulierten Leckagen. Durch die insgesamt 100 Simulationen pro durchgeführte Berechnung werden so 100 Kreise in die Abbildung gezeichnet. Erscheinen Kreise dunkler, so liegen an dieser Stelle Kreise verschiedener Simulationen mit gleicher simulierter Leckage übereinander.

In Anhang E befinden sich zudem die Histogramme der berechneten Distanzen zwischen realen und simulierten Leckagen dieser Berechnungen.

Die mittleren Abweichungen der Validierungsszenarien dieser Modelle, die Differenz der Mittelwerte der Druckabweichungen von Kalibrierungs- und Validierungsszenarien, sowie die mittleren Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck als Ergebnis der Simulation der Leckage Lokalisierung sind in Tabelle 4-26 zusammengefasst.

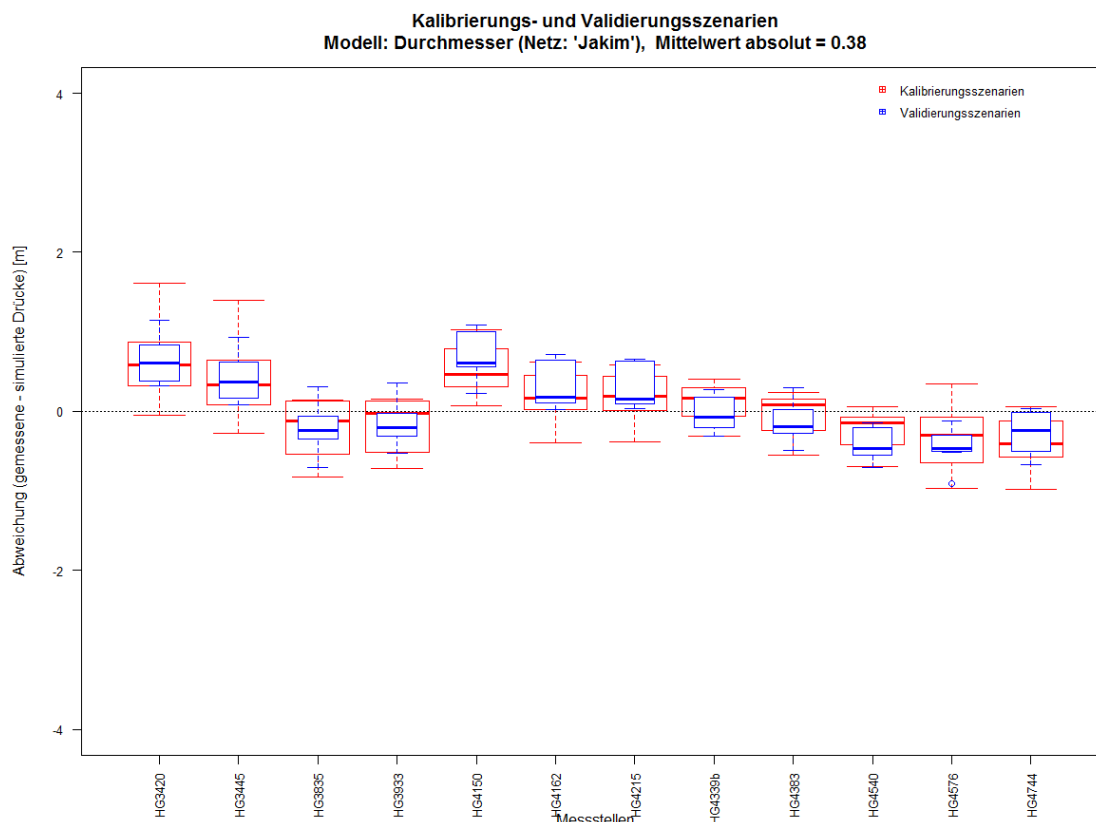


Abbildung 4-41: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Durchmesser

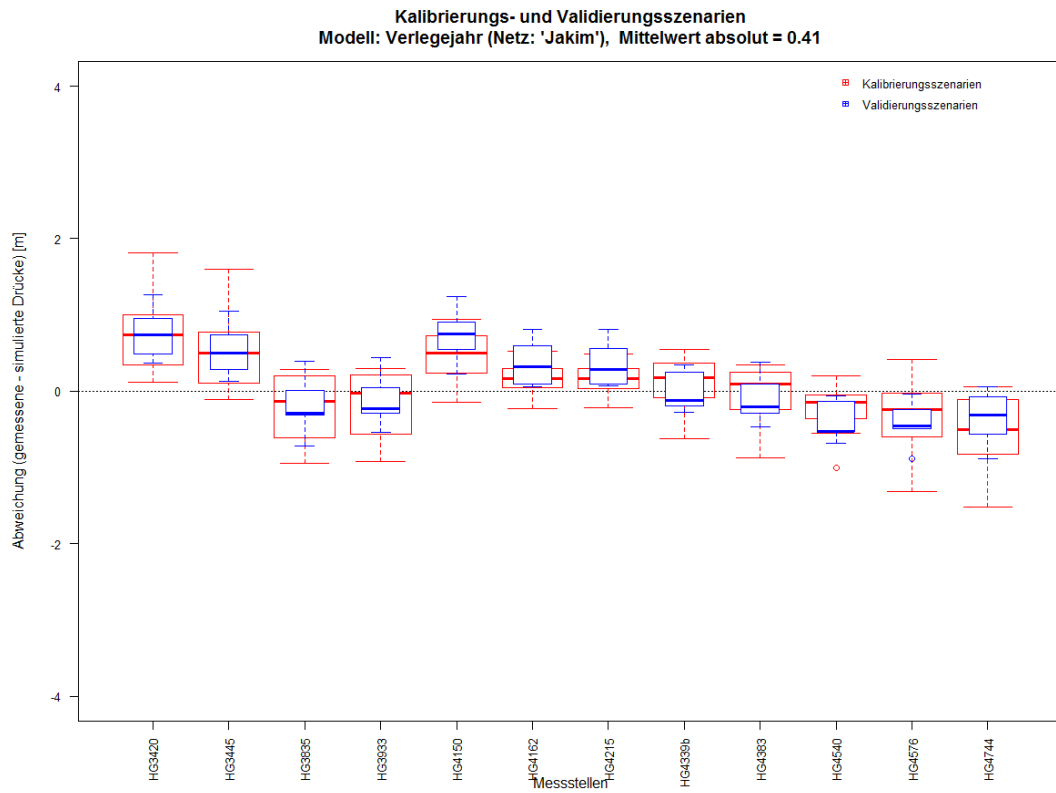


Abbildung 4-42: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Verlegejahr

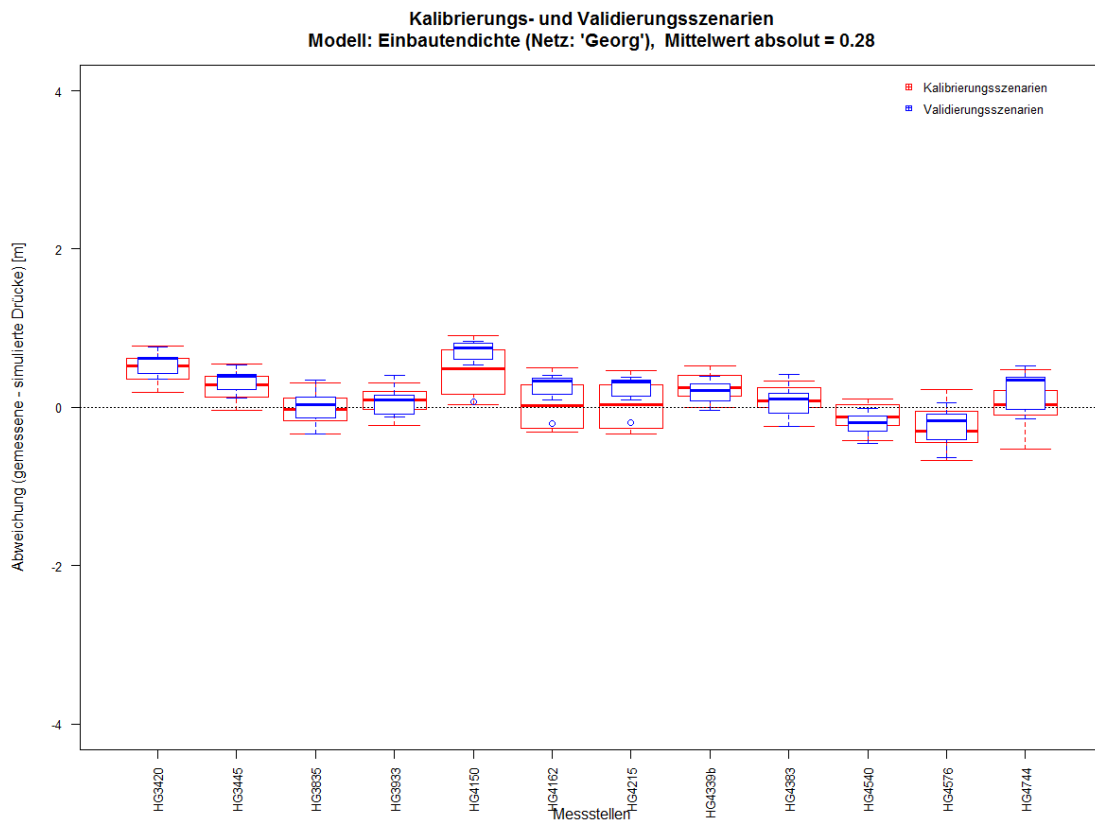


Abbildung 4-43: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Einbautendichte

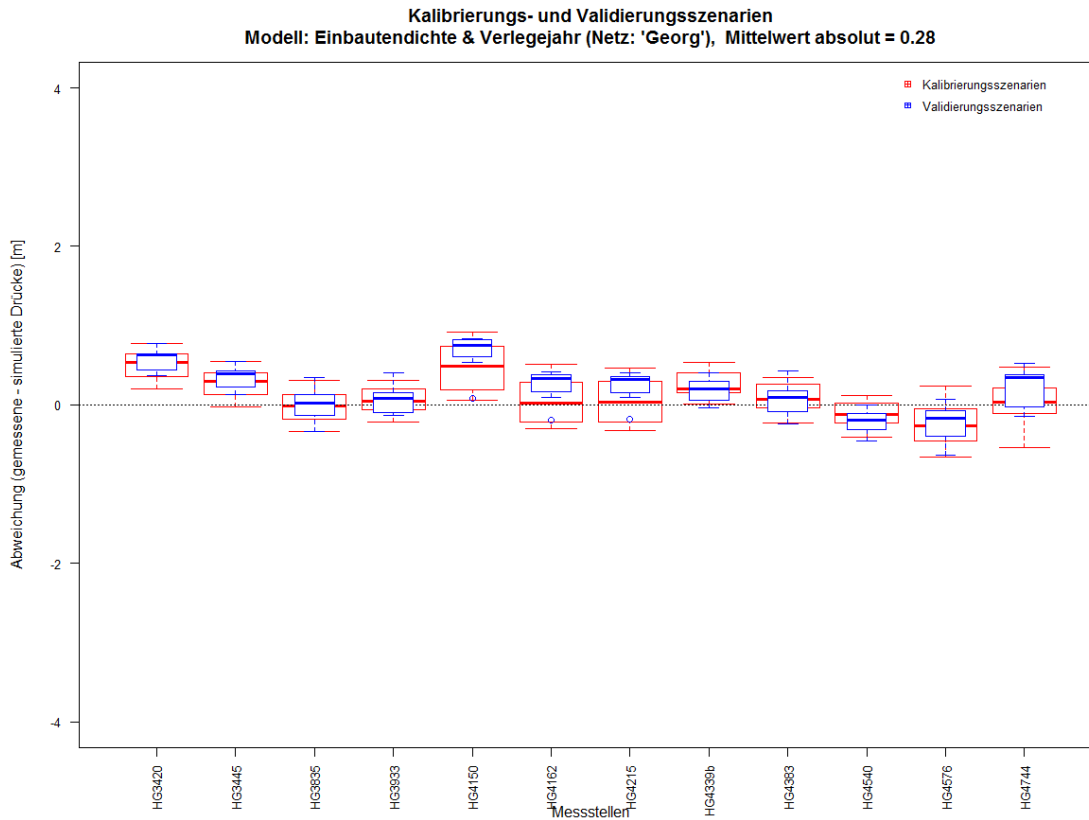


Abbildung 4-44: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Einbautendichte & Verlegejahr

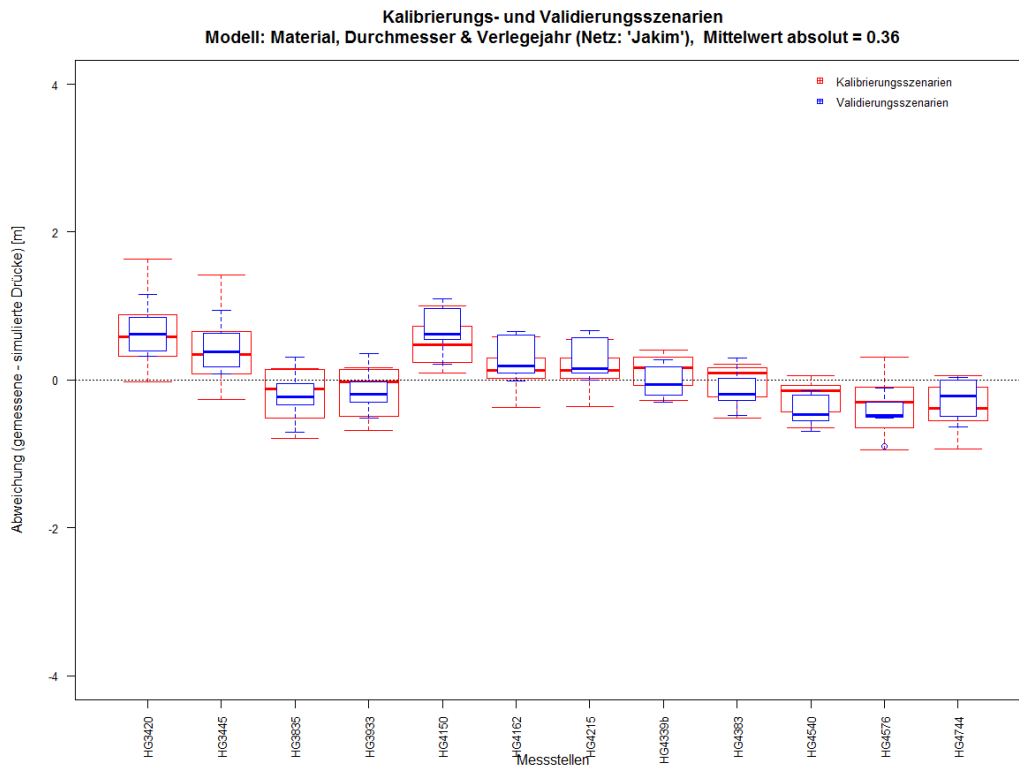


Abbildung 4-45: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Material, Durchmesser & Verlegejahr

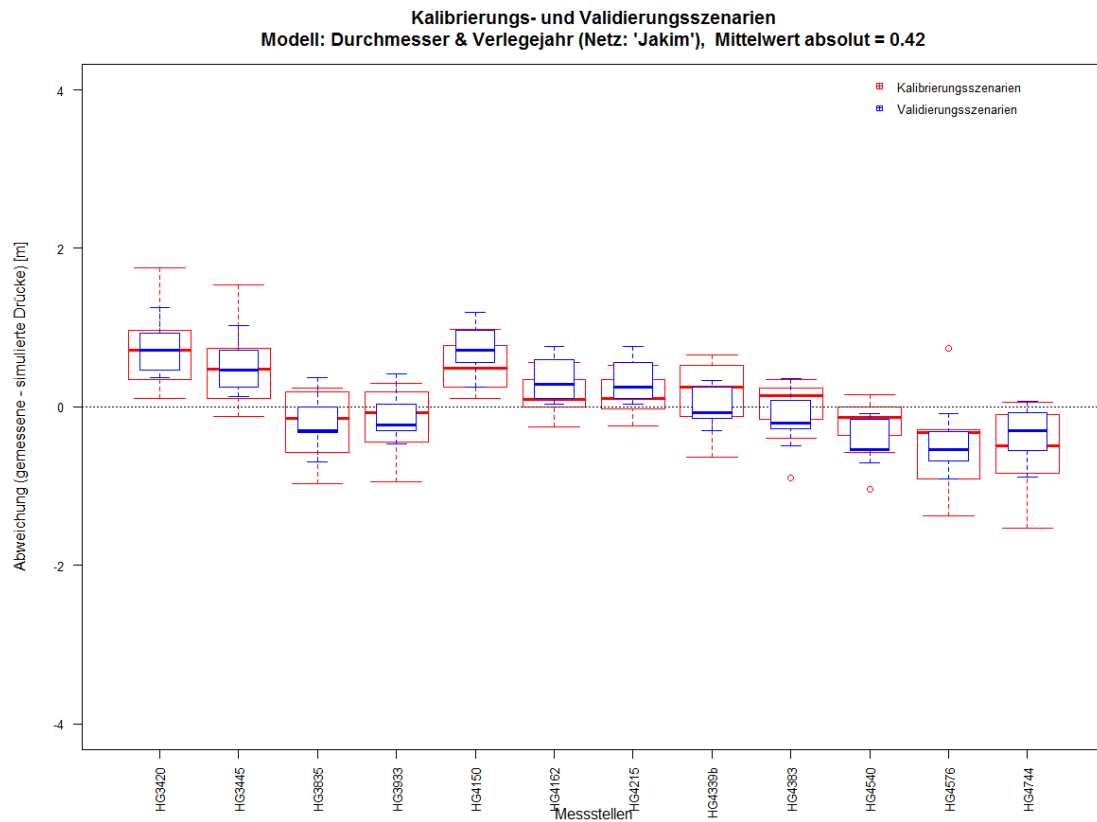


Abbildung 4-46: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien, Gruppierung: Durchmesser & Verlegejahr

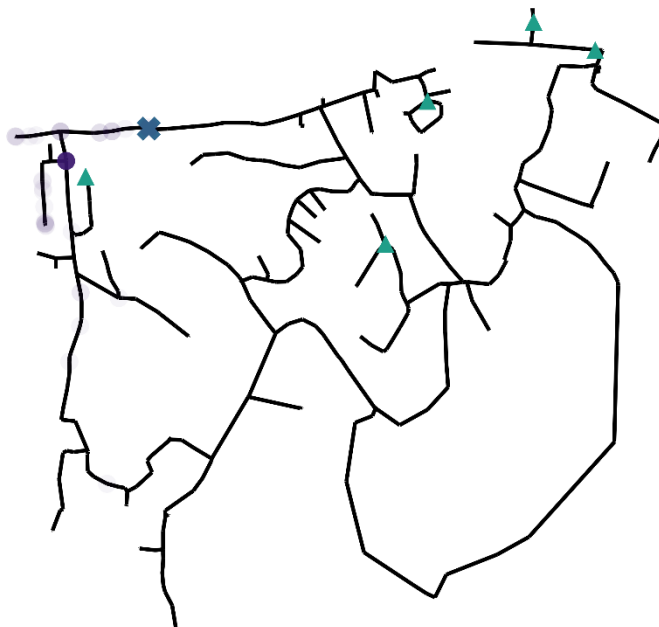


Abbildung 4-47: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Durchmesser (18. April 2016) (SWW)

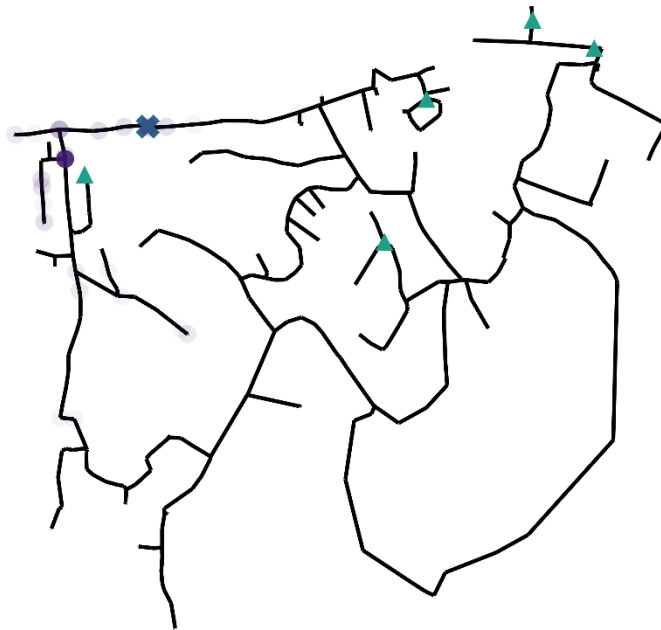


Abbildung 4-48: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Verlegete (18. April 2016) (SWW)

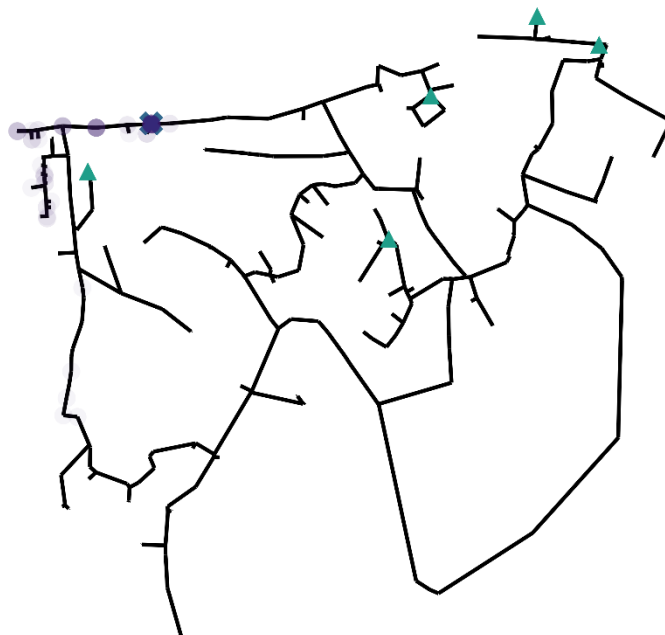


Abbildung 4-49: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Einbautendichte (18. April 2016) (SWW)

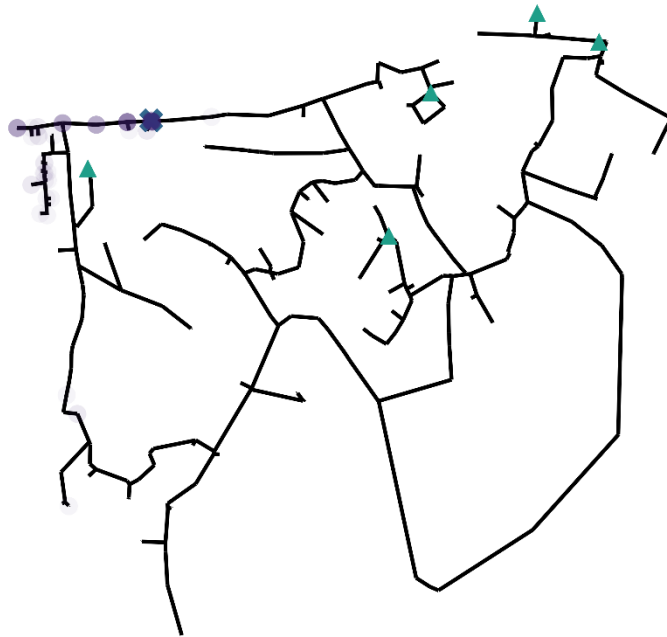


Abbildung 4-50: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Einbautendichte & Verlegejahr (18. April 2016) (SWW)

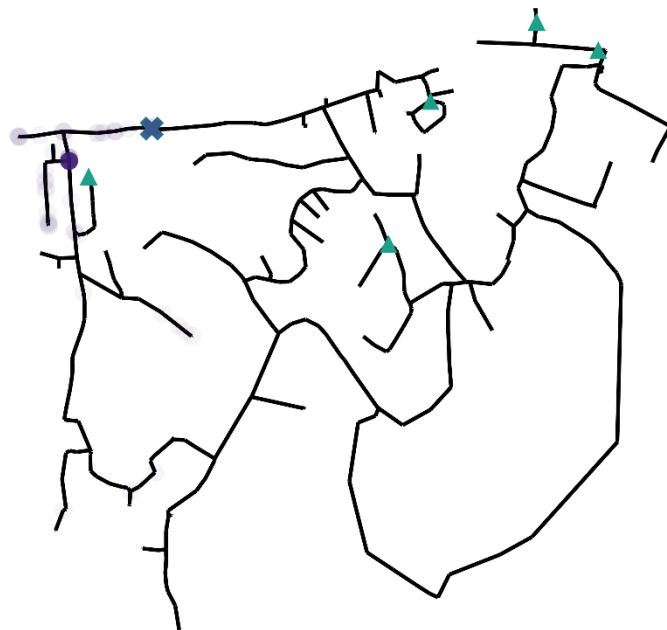


Abbildung 4-51: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Material, Durchmesser & Verlegejahr (18. April 2016) (SWW)

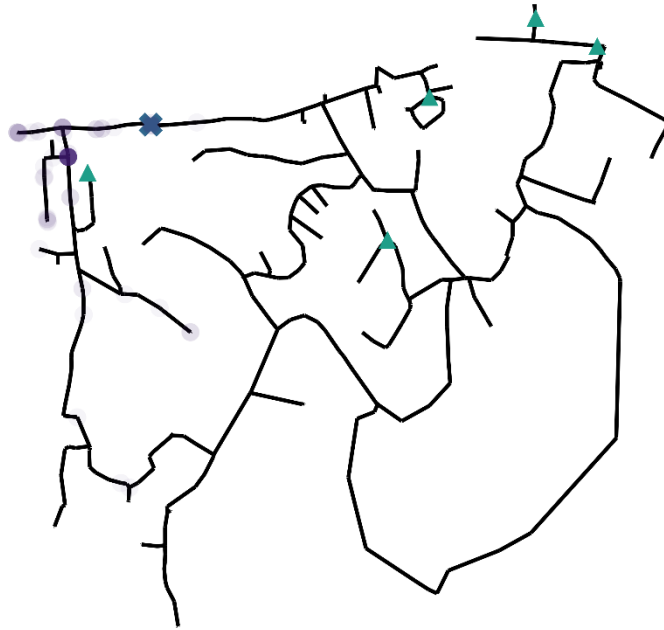


Abbildung 4-52: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Durchmesser & Verlegejahr (18. April 2016) (SWW)

Tabelle 4-26: Ergebnisse Modellqualität (Vergleich verschiedener Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung)

Modell	mittlere Abweichung der Validierungsszenarien	Differenz der Mittelwerte (Kal – Val)	mittlere Distanz zwischen realem und simuliertem Leck (18.04.)
Material (01)	0,68 m	+ 0,21 m	Mittelwert: 255 m Median: 221 m
Durchmesser (02)	0,39 m	- 0,02 m	Mittelwert: 241 m Median: 221 m
Verlegejahr (03)	0,41 m	0,00 m	Mittelwert: 237 m Median: 221 m
Zonen (04)	0,33 m	0,00 m	Mittelwert: 247 m Median: 221 m
Einbautendichte (05)	0,29 m	- 0,03 m	Mittelwert: 137 m Median: 101 m
Einbautendichte & Verlegejahr (06)	0,30 m	- 0,04 m	Mittelwert: 148 m Median: 101 m
Material, Durchmesser & Verlegejahr (07)	0,38 m	- 0,03 m	Mittelwert: 259 m Median: 221 m
Durchmesser & Verlegejahr (08)	0,41 m	- 0,02 m	Mittelwert: 257 m Median: 221 m

5 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 4 erlangten Ergebnisse interpretiert und diskutiert. Strukturiert wird dieses Kapitel erneut in der Chronologie der Arbeitsschritte.

5.1 Vorkalibrierung

Für die Filterung des ungestörten Systems wurden in der Datenbereinigung von ursprünglich 147 Messtagen 66 Messtage eliminiert, wobei 23 Messtage auf Grund unvollständiger oder nicht vorhandener Daten eliminiert wurden. Unter anderem davon betroffen, waren die fünf Messtage vor den Fire-Flow-Test-Messungen am 12. April 2016, die auf Grund von überschriebenen Daten im Datenlogger des Zufluss-Messgeräts nicht verwendet werden konnten.

Für die statistische Betrachtung mittels des Tukey's Tests stellte sich nach einigen iterativen Versuchen, der Bereich zwischen 01:00 Uhr und 04:30 Uhr für den Nachtminimumdurchfluss als geeignetster heraus. Bezüglich der Ergebnisse des Ausreißertests, vgl. Tabelle 4-1, lassen sich zwei verschiedene Ausreißer klassifizieren: einerseits klassische Ausreißer auf Grund von Verbrauchsschwankungen und andererseits Ausreißer, die auf Fehler des Messgeräts zurückzuführen sind. So driftete der Sensor am Hydrant HG3420 z.B. ab und generierte dadurch Ausreißer. Die Ausreißer beim Zufluss lassen sich hingegen dem schwankenden Verbrauch zuordnen. Zur Überprüfung der Sinnhaftigkeit des Ausreißertests wurden jeweils die Mittelwerte und Mediane, sowie Standardabweichungen, im Zeitbereich des NMF für alle, nach der optischen Datensichtung verbliebenen Daten und für die Daten, die von Ausreißern eliminiert wurden, errechnet. Die Differenzen dieser Werte sind in Tabelle 5-1 für alle Messstellen zusammengefasst.

Wie in Tabelle 5-1 ersichtlich, ist der Test vor allem deshalb wichtig, um fehlerhafte Sensoren – vor allem wenn sie langsam kaputt werden – zu identifizieren und die entsprechenden Daten dann zu eliminieren. Beispiele dafür sind die Druckmessgeräte an den Hydranten HG3420 und HG4576, die gerade in der Differenz der Mittelwerte und Standardabweichungen stark auffallen. Der Median-Wert, der für die Mittelwertberechnungen der Daten im Bereich des NMF dieser Arbeit nicht verwendet wurde, wäre grundsätzlich geringer anfällig auf Ausreißer. Das heißt, dadurch, dass der Mittelwert zur Berechnung der durchschnittlichen Messwerte während des NMF herangezogen wurde, werden vermutlich zwar mehr Ausreißer produziert, da diese aber eliminiert werden, sollte das Ergebnis nicht schlechter ausfallen, als wenn die Median-Werte herangezogen worden wären. Der Vergleich der Mittelwerte und Medianwerte in den in 4.1.3 festgelegten Perioden bestätigt diese Annahme auch, ist doch der größte Unterschied einer Druckmessung jener beim HG4150 mit 1,7 cm.

Tabelle 5-1: Differenzen der Mittelwerte im Nachtminimum, vor und nach Tukey's Test

Messung	Differenz zwischen allen und allen Daten ohne Ausreißer		
	Mittelwert	Median	Standardabweichung
Zufluss Q [l/s]	0,104	0,050	0,110
Behälterfüllung [m]	0,000	0,000	0,000
HG3420 [mWs]	0,389	0,037	1,160
HG3445 [mWS]	0,000	0,000	0,000
HG3835 [mWS]	-0,014	-0,010	0,007
HG3933 [mWS]	0,000	0,000	0,000
HG4150 [mWS]	0,000	0,000	0,000
HG4162 [mWS]	-0,007	-0,005	0,007
HG4215 [mWS]	0,061	0,027	0,065
HG4339b [mWS]	0,000	0,000	0,000
HG4383 [mWs]	-0,003	-0,002	0,002
HG4540 [mWs]	0,121	0,022	0,245
HG4576 [mWs]	-1,545	-0,08	2,958
HG4744 [mWs]	0,000	0,000	0,000

Die Anpassung der geodätischen Höhen der Messpunkte an denen die Drucksensoren angebracht waren, ist für das Ergebnis dieser Arbeit wesentlich, wie sich an der Größe der Veränderungen, die in Tabelle 4-4 eingetragen sind, zeigt. Die Differenzen von $-0,38$ m bis $+0,47$ m bei den Unterflurhydranten und $+0,94$ m bis $+1,69$ m bei den Oberflurhydranten ist eine wesentliche Korrektur und hat großen Einfluss auf die weiteren Anwendungen, vgl. Abbildung 5-1 (mit geodätischer Höhenanpassung) und Abbildung 5-2 (ohne geodätischer Höhenanpassung). Der größte Anteil der Höhendifferenzen entfällt bei den Oberflurhydranten natürlich darauf, dass im GIS die Höhe des Geländes an dieser Stelle angegeben ist und der Sensor an der Hydrantenöffnungseinrichtung angebracht ist und somit in etwa einen Meter über dem GIS-Messpunkt liegt. Andere Bestandteile der Differenzen können Messungenauigkeiten auf Seiten des GIS oder fehlerhafte Annahmen im Bereich der durchschnittlichen Druckhöhen oder des NMF sein. Der Einfluss der gewählten Rauheit beim Vorgang der Anpassung der geodätischen Sensorhöhen ist als gering zu vermerken. Es wurden Rauheiten

zwischen 0,01 mm und 1,00 mm dafür getestet, mit dem Ergebnis, dass diese unterschiedlichen Rauheiten in ihren optimalen geodätischen Sensorhöhen maximal sieben Zentimeter auseinanderliegen. In Tabelle 5-2 ist die Spalte mit den Rauheiten von 0,4 mm als Referenz angegeben, da diese letztendlich verwendet wurde. Diese Einstellung garantiert eine maximale Abweichung von vier Zentimetern zu der Einstellung mit $r = 1,00$ mm, bzw. drei Zentimetern zu $r = 0,1$ mm. Die Wahl der 0,4 mm für die Grundrauheit ist auch durch Richtlinien begründbar (ÖNORM EN 805, 2000; DVGW GW 303-1, 2006).

Tabelle 5-2: Höhendifferenz bei der Anpassung der geodätischen Sensorhöhen mit verschiedenen Rauheiten

Hydrant	$r = 0,01$ mm	$r = 0,10$ mm	$r = 0,40$ mm	$r = 1,00$ mm
HG3420	0,00 m	0,00 m	0,00 m	- 0,01 m
HG3445	0,00 m	0,00 m	0,00 m	- 0,01 m
HG3835	+ 0,01 m	0,00 m	0,00 m	- 0,02 m
HG3933	+ 0,01 m	+ 0,01 m	0,00 m	- 0,02 m
HG4150	+ 0,01 m	+ 0,01 m	0,00 m	- 0,01 m
HG4162	0,00 m	0,00 m	0,00 m	- 0,01 m
HG4215	0,00 m	0,00 m	0,00 m	- 0,01 m
HG4339b	+ 0,03 m	+ 0,03 m	0,00 m	- 0,03 m
HG4383	+ 0,03 m	+ 0,02 m	0,00 m	- 0,02 m
HG4540	+ 0,03 m	+ 0,02 m	0,00 m	- 0,04 m
HG4576	+ 0,03 m	+ 0,02 m	0,00 m	- 0,03 m
HG4744	0,00 m	0,00 m	0,00 m	- 0,01 m

Die in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 dargestellten Verläufe zeigen die Druckhöhendifferenzen (Messwert – simulierter Wert) in der Ausreißer bereinigten Periode von 31. Mai 2016 bis 28. Juni 2016 über den Tagesverlauf. Die blaue Kurve beschreibt hierbei den Mittelwert dieser Periode, der blaue Bereich um die Kurve gibt die Standardabweichung für den jeweiligen Zeitabschnitt an.

Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

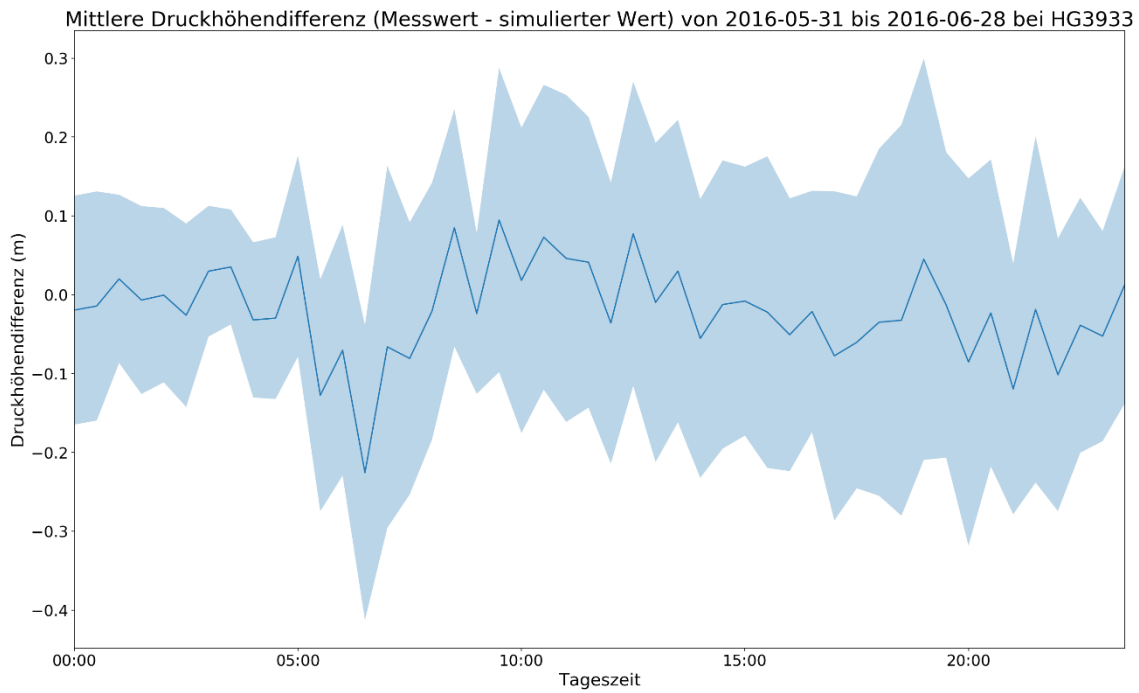


Abbildung 5-1: Mittlere Druckhöhendifferenz über den Tag mit angepassten geodätischen Höhen, Zeitspanne: 31.05.2016 bis 28.06.2016 am Hydranten HG3933 (SWW)

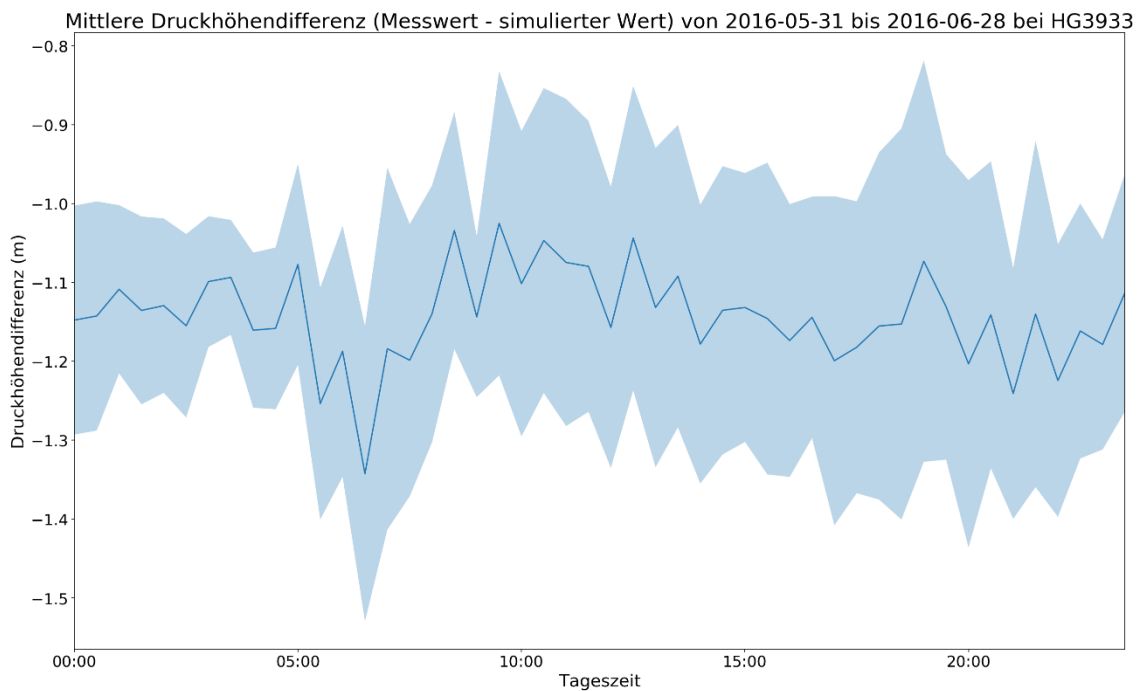


Abbildung 5-2: Mittlere Druckhöhendifferenz über den Tag mit GIS-Originalhöhen, Zeitspanne: 31.05.2016 bis 28.06.2016 am Hydranten HG3933 (SWW)

5.2 Szenarienerstellung

Kurz zusammengefasst haben sich bei der Szenarienerstellung nachfolgende Herausforderungen ergeben. Einerseits standen für beide Phasen der Durchführung der Fire-Flows nur an zwei von drei Positionen Messgeräte zur Verfügung, andererseits waren die gemessenen Abflussmengen größer als die gemessenen Zuflussmengen.

Zweiteres konnte durch Einführung eines Korrekturfaktors, der die Zuflussmessung um ca. 7 % nach oben korrigierte, verbessert werden, vgl. 4.2.1. Die durchschnittlich pro Szenario fehlenden Wassermengen konnten so von 1,01 l/s auf 0,18 l/s reduziert werden.

Um nun alle angedachten Szenarien verwenden zu können, mussten die nicht gemessenen Abflussmengen am Hydranten HG3409 bzw. HG4504 abgeschätzt werden. Die Mengen wurden nach Anwendung des oben beschriebenen Korrekturfaktors über eine Differenzrechnung ermittelt.

Bei der Splittung der Daten, wurden jene Szenarien, an denen alle Abflüsse gemessen werden konnten als Kalibrierungsszenarien verwendet. Jene, mit teilweise berechneten Abflüssen wurden zur Validierung herangezogen. Da ein Schieber während der Zeit des Feldversuchs teilweise geschlossen war, wurde zusätzlich ein Szenario als Kalibrierungsszenario aufgenommen, das einen berechneten Wert beinhaltet.

5.3 Hydraulische Ausgangsmodelle

Als hydraulische Ausgangsmodelle wurden drei verschiedene Modelle untersucht, die die Basis für die weiteren Kalibrierungen darstellten. Ziel dabei war es, den Fakt des teilgeschlossenen Schiebers im WVN Hart bei Graz bestmöglich zu modellieren. Die genauen Randbedingungen der Modelle „Trial-&-Error“, „OENORM“ und „vorkalibriert“ sind in 4.3 erläutert. Beim abschließenden Vergleich der drei Modelle in 4.3.4 zeigt sich das Modell „vorkalibriert“ als das geeignetste für die weiteren Kalibrierungsschritte, da das Modell „OENORM“ mit dem Ansatz einer geschlossenen Leitung, um den teilgeschlossenen Schieber zu modellieren, wesentlich schlechtere Werte hat und das Modell „Trial-&-Error“ zwar bessere Werte liefert, aber bereits auf andere Szenarien kalibriert wurde. Das Modell „Trial-&-Error“ wird aber beim Vergleich der Kalibrierungsarten noch weiter analysiert.

5.4 Verschiedene Kalibrierungsmethoden

Anhand der Abbildungen der Korrelationen erkennt man, dass sich die Werte beim Vergleich der Kalibrierungsmethoden, sowohl die Trial-&-Error-Kalibrierung, als auch die automatische Kalibrierung (einmal nur Rauheiten und einmal Rauheiten und einen Minor Loss Koeffizient) gut an die Korrelationsgerade anschmiegen.

Beim Vergleich der mittleren Druckabweichungen der Kalibrierungsszenarien, aber auch der Validierungsszenarien, lässt sich eine Reihenfolge der drei zu untersuchenden Modelle ablesen. Am besten schneidet dabei die automatische Kalibrierung (Rauheit und Minor Loss Koeffizient vor nur Rauheit) ab.

Während die mittleren Druckabweichungen bei der automatischen Kalibrierung mit Rauheit und Minor Loss Koeffizient bei den Kalibrierungs- und Validierungsszenarien gleich gut ausfallen, streuen bei den anderen beiden Modellen die Druckabweichungen bei den Validierungsszenarien weniger als bei den Kalibrierungsszenarien.

Bezüglich der Kriterien nach DVGW GW 303-1, 2006, deren Ergebnisse in Tabelle 4-17 ersichtlich sind, wird nur das Modell mit der Methode der AC (Rauheit und Minor Loss Koeffizient) als zutreffend beschrieben. Beim Modell mit der Methode der AC (Rauheit) fällt ein Wert beim Hydranten HG4576 heraus, beim Modell mit der Trial-&-Error-Methode fallen insgesamt drei Werte heraus und werden somit nicht als voll zutreffend bezeichnet.

Beim Vergleich der Ergebnisse der Leckage Lokalisierung fällt das Trial-&-Error-kalibrierte Modell gegenüber den anderen beiden etwas ab. Mit einer mittleren Distanz zwischen realem und simuliertem Leck von 454 m und zusätzlich einer rechtsschiefen Verteilung kann es mit den Modellen, die automatisch kalibriert wurden, nicht mithalten. Bei beiden Möglichkeiten – nur Kalibrierung der Rauheit oder auch Kalibrierung der Rauheit und des ML – ergeben sich für den Medianwert 221 m. Die Mittelwerte sind mit 299 m (nur Rauheit) und 247 m (Rauheit und ML) etwas höher, damit sind beide Verteilungen linksschief.

Zusammenfassend bietet die Methode der automatischen Kalibrierung optimierte Ergebnisse. Im Vergleich zu einem Ausprobieren und immer wieder Ändern bei der Trial-&-Error-Kalibrierung sind diese Ergebnisse auch schneller verfügbar. Die Einführung der zusätzlichen Möglichkeit einen Minor Loss Koeffizienten zu kalibrieren erwies sich als sinnvoll, um die „Problemstelle“ des teilgeschlossenen Schiebers zu modellieren.

5.5 Verschiedene Skeletonisierungsgrade

Beim Vergleich der Netze mit verschiedenen Skeletonisierungsgraden wurden die Modelle „complicated“, „Jakim“ und „Georg“ jeweils mit der automatischen Kalibrierung (Rauheit und ML), Gruppierung nach Materialien, verglichen. Die Bilder der Streuung der Ergebnisse ähneln einander bei den Modellen „complicated“ und „Jakim“ sehr. Im Vergleich dazu, sieht das Bild beim Modell „Georg“ ganz anders aus. Der Rauheitswert von GGG ist am oberen Limit und auch der Wert von PE ist signifikant höher als bei den anderen beiden Modellen. Die Rauheitswerte von PVC sind hingegen etwas geringer als bei den anderen beiden

Modellen. Während bei den jeweils zehn Durchläufen der drei Modelle, die Rauheitswerte von GGG, PE und PVC jeweils praktisch fixe Werte lieferten, streut die Kategorie ST sehr stark.

Beim Vergleich der mittleren Abweichungen der Kalibrierungs- und der Validierungsszenarien schneidet jeweils das Modell „Georg“ klar am besten ab. Die anderen beiden sind sehr ähnlich, mit leicht besseren Ergebnissen für das Modell „complicated“. Die Fitnesswerte der automatischen Kalibrierung bestätigen dies. Beim Vergleich zwischen Kalibrierungs- und Validierungsszenarien verbessern sich die Werte bei den Validierungsszenarien bei allen drei Modellen.

Bezüglich der Kriterien nach DVGW GW 303-1, 2006, deren Ergebnisse in Tabelle 4-20 ersichtlich sind, wird nur das Modell „Georg“ als zutreffend beschrieben. Beim Modell „Jakim“ fallen sechs Werte, beim Modell „complicated“ insgesamt 14 Werte von 24 Werten hinaus und werden somit nicht als zutreffend bezeichnet.

Bei der Vergleichsbetrachtung dieser drei Modelle über die Anwendung der Leckage Lokalisierung wird das Modell „Georg“ mit dem Median-Wert von 101 m und dem Mittelwert von 168 m der Verteilung der Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck als das beste erkannt. Die Modelle „Jakim“ mit 221 m bzw. 255 m und „complicated“ mit 295 m bzw. 333 m folgen mit etwas Abstand.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass mit dem Modell „Jakim“ am meisten hantiert wurde, das Modell „complicated“ bereits frühzeitig eher beiseitegeschoben wurde und das Modell „Georg“ zumeist nur für die Anwendungen der Einbautendichte verwendet wurde.

Neben der besseren Anpassung an die Vergleichsmessungen, spricht natürlich auch die verkürzte Rechenzeit, sowohl der automatischen Kalibrierung als auch der Leckage Lokalisierung für ein skeletonisiertes Netz. So konnte eine automatische Kalibrierung von elf Minuten (Modell „complicated“) auf sechs Minuten (Modelle „Jakim“ und „Georg“) und eine Berechnung mit 100 Simulationen der Leckage Lokalisierung von ca. elf Stunden (Modell „complicated“) auf ca. sechs Stunden (Modelle „Jakim“ und „Georg“) reduziert werden. Weiters sieht es bei diesem Vergleich danach aus, dass die Verkürzung der Gesamtnetzlänge, die Ergebnisse der Leckage Lokalisierung positiv beeinflussen kann.

5.6 Verschiedene Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung

Bei diesem Vergleich wurden acht unterschiedliche Parametergruppierungen der automatischen Kalibrierung miteinander verglichen, diese sind in Tabelle 4-22 beschrieben.

Bezüglich der Streuung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung fällt auf, dass bei Gruppierungen, mit nur einem Parameter meist keine Streuungen auftreten. Falls Gruppen Streuungen aufweisen, dann jene, die vermutlich wenig Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Was klar ersichtlich ist, dass bei Modellen, die eine große Anzahl an Gruppen haben, da verschiedene Parameter kombiniert betrachtet wurden, die Ergebnisse einer Mehrzahl der Gruppen sehr stark streuen. Ein Zusammenhang der Gruppenanzahl mit der Menge an Gruppen, die stark streuen, ist klar erkenntlich.

Bei der Betrachtung der mittleren Druckabweichungen der Kalibrierungsszenarien fällt auf, dass alle Gruppierungen, mit Ausnahme der Gruppierung nach Material ähnlich gute Werte aufweisen. Mit dem besten Modell beginnend sind das „Einbautendichte“ (0,26 m), „Einbautendichte & Verlegejahr“ (0,26 m), „Zonen“ (0,33 m), „Material, Durchmesser & Verlegejahr“ (0,35 m), „Durchmesser“ (0,37 m), „Verlegejahr“ (0,41 m), „Durchmesser & Verlegejahr“ (0,43 m) und „Material“ (0,89 m). Diese Reihenfolge ist auch bei den Fitnesswerten und der Betrachtung der mittleren Druckabweichungen der Validierungsszenarien ident. Fünf Modelle verschlechtern sich um zwei bis vier Zentimeter, zwei Modelle haben bei den Validierungsszenarien das gleiche Ergebnis wie bei den Kalibrierungsszenarien und die Gruppierung mit dem Material verbessert sich um 21 Zentimeter.

Bezüglich der Kriterien nach DVGW GW 303-1, 2006, deren Ergebnisse in Tabelle 4-24 und Tabelle 4-25 ersichtlich sind, wird nur das Modell „01“, jenes das nach Materialien gruppiert wurde, als nicht zutreffend eingestuft, da sechs Werte über den Grenzwerten liegen. Die anderen sieben Modelle werden nach diesen Kriterien als zutreffend kalibriert bezeichnet.

Bei der Betrachtung der mittleren Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck bei diesen Modellen, liefern die beiden Modelle, die das Modell „Georg“ als Grundmodell haben, die besten Ergebnisse (137 m, 148 m mit linksschiefer Verteilung). Die restlichen Modelle präsentieren alle sehr ähnliche Ergebnisse, der Median-Wert ist mit 221 m sogar bei allen ident, zudem sind alle Verteilungen linksschief. Der Unterschied dieser Modelle liegt nur im Mittelwert. Dieser ist bei der Gruppierung „Verlegejahr“ mit 237 m am geringsten, dicht gefolgt von „Durchmesser“ (241 m) und „Zonen“ (247 m). Die Mittelwerte der Gruppierungen „Material“ (255 m), „Durchmesser und Verlegejahr“ (257 m) und „Material, Durchmesser und Verlegejahr“ (259 m) unterscheiden sich kaum.

Zusammenfassend ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung bei einer Überparametrisierung sehr stark streuen: viele Gruppen erzeugen viele optimale Lösungen. Modelle, denen das Modell „Georg“ zu Grunde liegt, bieten geringe Druckabweichungen beim Vergleich mit den Szenarien und generieren bessere Ergebnisse bei der Leckage Lokalisierung. Wenn man die

anderen Gruppierungen vergleicht, liefern diese gering unterschiedliche Ergebnisse bei den Modellgütekriterien und bei der Anwendung der Leckage Lokalisierung haben sie auch sehr ähnliche Ergebnisse. Bei diesem Vergleich erreichen Gruppierungen nach Einbautendichte bessere Ergebnisse, dies hat einerseits den Grund, dass Modelle mit dem Grundmodell „Georg“ grundsätzlich bessere Ergebnisse liefern (5.5) und andererseits ergibt eine Gruppierung nach Einbautendichte auch als bauingenieursmäßiger Sicht Sinn.

5.7 Vergleich der Ergebnisse der Leckage Lokalisierung an verschiedenen Tagen

Auf Basis der Ergebnisse, die in 5.6 erläutert sind, wurden für einige dieser Modelle Leckagelokalisierungssimulationen über mehrere Tage gerechnet. So wurde immer für die gleiche Nachtzeit (02:30 Uhr bis 03:30 Uhr), vom 17. April 2016 bis zum 04. Mai 2016, sowie vom 10. Mai 2016 bis zum 18. Mai 2016 Simulation gerechnet. Die dafür verwendeten Modelle waren das aus bauingenieursmäßigen Überlegungen entstandene Modell „Zonen, Netz: „Jakim““ und das Modell „Einbautendichte, Netz: „Georg““ Der gesamte Zeitbereich unterteilt sich in drei Bereiche, in denen jeweils an unterschiedlichen Positionen im Netz künstliche Leckagen generiert wurden. So wurde vom 17. April 2016 bis 25. April 2016 ein künstliches Leck am Hydranten HG3880 generiert, in der Zeitspanne vom 26. April 2016 bis 04. Mai 2016 ein Leck am Hydranten HG4504 und vom 10. Mai 2016 bis zum 18. Mai 2016 ein Leck am Hydranten HG3164. Zusätzlich wird die Menge, die als künstliche Leckage am Hydranten entnommen wurde, direkt beim entsprechenden Eintrag angezeigt. Auf der Y-Achse sind die Mittelwerte der Distanzen zwischen realem und simuliertem Leck aufgetragen. Beispielhaft sind in Abbildung 5-3 die mittleren Distanzen der Simulationen für das hydraulische Modell „Zonen“ dargestellt.

Die jeweils besten Ergebnisse für jede Leckageposition für das Modell „Zonen, Netz: „Jakim““ sind in den Abbildungen Abbildung 4-14, Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 dargestellt. Die dazugehörigen Histogramme der berechneten Distanzen zwischen realen und simulierten Leckagen dieser Berechnungen befinden sich in Anhang E.

Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

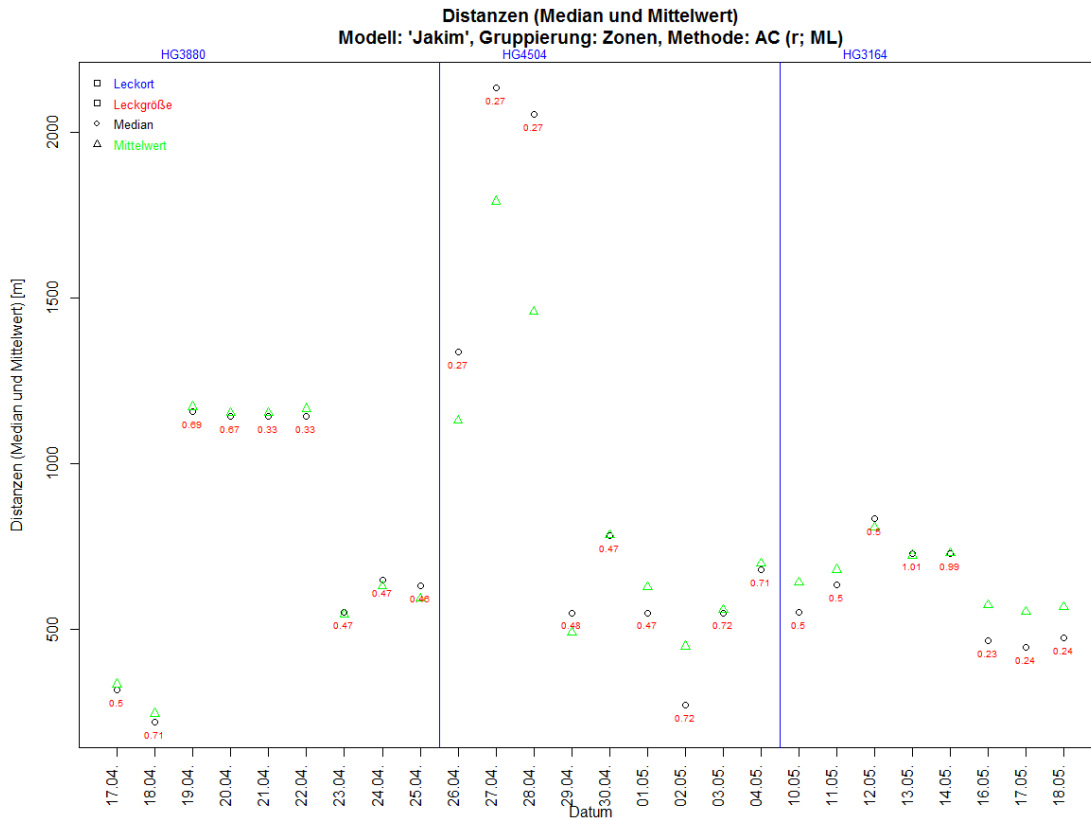


Abbildung 5-3: Mittlere Distanzen der Leckage Lokalisierung, 17.04.2016 - 18.05.2016, Modell „Zonen“

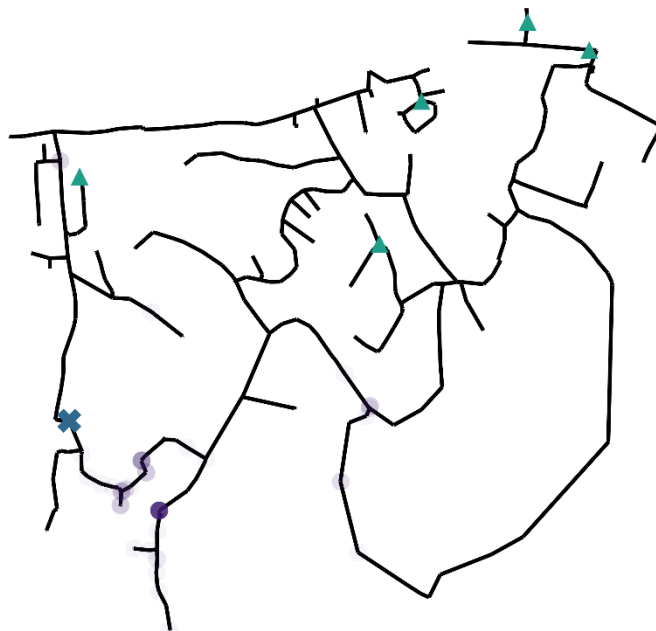


Abbildung 5-4: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Zonen (29. April 2016) (SWW)

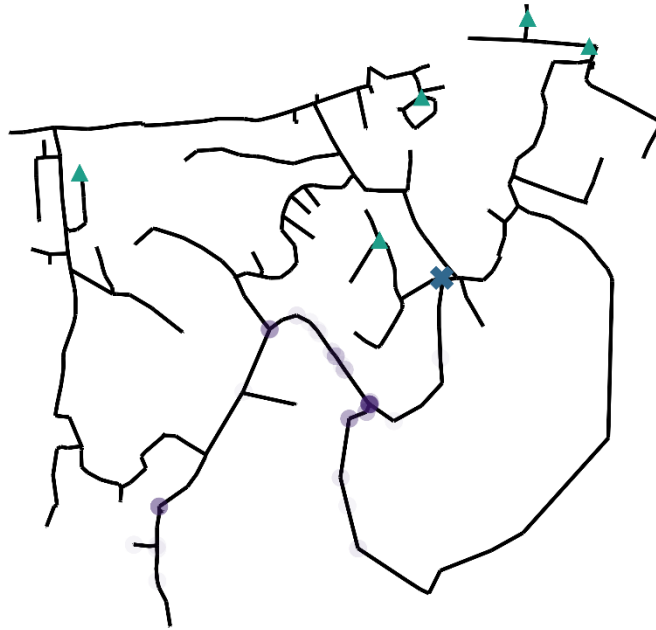


Abbildung 5-5: Ergebnis der Leckage-Lokalisierungssimulation, Gruppierung: Zonen (17. Mai 2016) (SWW)

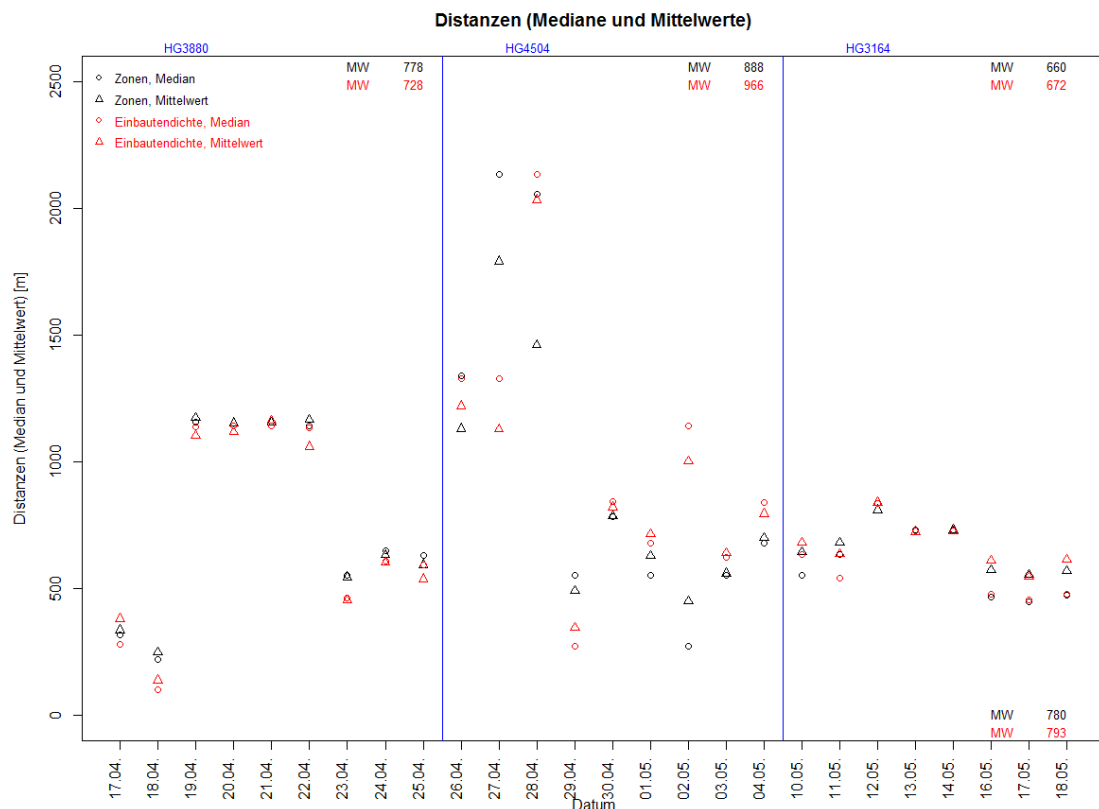


Abbildung 5-6: Vergleich der mittleren Distanzen der Leckage Lokalisierung, 17.04.2016 - 18.05.2016, Modell „Zonen, Netz: „Jakim““ und Modell „Einbautendichte, Netz: „Georg““

Die Frage, ob es eine negative Korrelation zwischen Leckagegröße und mittlerer Distanz zwischen realem und simuliertem Leck gibt, ist nach Abbildung 5-3 nicht eindeutig zu beantworten. Für die simulierte Leckage am Hydranten HG4504 sieht es so aus, dass eine Leckagegröße von unter 0,30 l/s nicht bzw. schlecht lokalisierbar ist.

Bezüglich eines möglichen Zusammenhangs zwischen Leckageort und mittlerer Distanz zum simulierten Leck scheint es nach Abbildung 5-3 und Abbildung 5-6 so zu sein, dass die Ergebnisse im Mittel beim Hydranten HG3164 die besten wären und jene beim HG4504 im Mittel die schlechtesten. Bei der quantitativen Betrachtung von Abbildung 5-6 erkennt man einige Ausreißer nach oben im April die hauptverantwortlich für die höheren Mittelwerte sind. Ansonsten bewegen sich die Mittelwerte zumeist in einem Bereich zwischen 400 m und 800 m.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für den Leckageort HG3880, siehe Abbildung 5-6, lassen sich über die Zuflusswerte an den Tagen 19. Bis 22. April 2016 keine Zusammenhänge, mit den an diesen Tagen, schlechter ausfallenden Ergebnissen erkennen.

Der Vergleich der Werte der zwei unterschiedlichen Modelle, die in Abbildung 5-6 aufgetragen sind zeigt im Mittel (780 m bzw. 793 m) keine so großen Unterschiede, demnach bieten die beiden Modelle im Mittel ähnlich gute Ergebnisse.

5.8 Herausforderungen dieser Arbeit

Die größte Herausforderung der Arbeit mit diesem Feldversuch im Wasserverteilnetz Hart bei Graz war das sukzessive Herausfinden von weiteren Randbedingungen für das Netz. Lisa Landuyt, die bereits 2015 mit einem Feldversuch im gleichen WVN, gearbeitet hatte, fand in diesem Zusammenhang eine Leitung, die östlich vom Hochbehälter wegführte und nicht im GIS verzeichnet war (Landuyt, 2015).

Eine weitere sehr große Herausforderung war die Erkenntnis, dass laut Wasserversorger ein Schieber im südwestlichen Bereich, vgl. Abbildung 4-2, geschlossen war. Diese Information erreichte das Forschungsteam jedoch erst nach Festlegung der Sensorpositionen und auch weit nach den Kalibrierungsmessungen. Nach einer Überprüfung im hydraulischen Modell, ob an dieser Position ein Schieber wirklich ganz geschlossen sein konnte, wurde festgestellt, dass der Schieber nur teilgeschlossen gewesen sein kann, da die geplante Wassermenge am Hydranten HG4504 in der Nacht am 12. April 2016 sonst nicht entnommen werden hätte können. Nachdem die Modellierung dieser neuen Randbedingung durch ein Schließen einer Leitung in dieser Gegend nicht die gewünschten Ergebnisse brachte, wurde an dieser Stelle ein Minor Loss Koeffizient angesetzt, der einen einzelnen Druckhöhenverlust generiert. Daraus folgend wurde die

Möglichkeit einer Minor Loss Koeffizienten Kalibrierung, zusätzlich zur Rauheitskalibrierung, auch in den Code der automatischen Kalibrierung aufgenommen, siehe auch 1.2.5.1.

Zusammenfassend kann man sagen, da es sich um unterirdische Infrastruktur handelt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die entdeckten Abweichungen zu den Daten, die aus dem GIS kommen, die einzigen falschen Angaben sind. Die Möglichkeit von falschen Durchmesserangaben und oder weiteren fehlenden Leitungsverbindungen kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Ultraschallmessung beim Zufluss. Durch die Einführung des Korrekturfaktor in 4.2.1, sollte der Fehler zumindest vermindert werden können.

Auf einen weiteren Fehler wurde der Autor dieser Arbeit in der Evaluierung der Ergebnisse Modellgüten aufmerksam. Im hydraulischen Modell mit der Software EPANET wurde die Gesamtmenge der Verbräuche, die aus den Jahresrechnungen berechnet wurden, mit einem „Default Pattern“ auf die Durchflussmenge der Nachtminimumperiode heruntergebrochen. Da dieser Wert jedoch in den Eingangsdateien für die automatische Kalibrierung verblieb, wurden bei dieser zu Beginn, die Szenarien ebenfalls mit dem Faktor des „Default Pattern“ multipliziert. Die ersten automatischen Kalibrierungen simulierten also mit Szenarien, die nur gut 80 % der angegebenen Abflüsse beinhalteten. Dieser Fehler wurde schlussendlich ausgemerzt und die Ergebnisse verbesserten sich bei der Evaluierung der Modellgüte und Modellqualität leicht und bei der Anwendung der Leckage Lokalisierung stark.

Weitere Möglichkeiten, die bessere Ergebnisse in der Anwendung der Leckage Lokalisierung behindert haben könnten:

- Reale, nicht detektierte Leckagen
- Ungewöhnliche Verbräuche (z.B. Swimmingpool-Füllungen im Frühling und Sommer)
- Mögliche Veränderung des hydraulischen Systems auf Grund der Fire-Flow-Auslässe
- Weitere Messfehler (z.B. Einfluss von Umweltfaktoren (Luftdruck, Temperatur))
- Fehler im Code der automatischen Kalibrierung und / oder der Leckage Lokalisierung
- Fehler in der Datenverarbeitung (z.B. Umrechnung der Einheiten von Drücken)
- Weitere, nicht entdeckte Fehler in der Vorbereitung der Modelle für die automatische Kalibrierung

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dem Ziel, ein adäquates hydraulisches Modell für den Anwendungsfall der Leckage Lokalisierung zu generieren, ist es definitiv notwendig, im Punkt der Vorkalibrierung falsche und unlogische Messdaten zu eliminieren. Noch viel wichtiger ist die Korrektur der geodätischen Höhen der Messpunkte, an denen die Messrichtungen installiert sind.

Des Weiteren wurde in dieser Arbeit gezeigt, wie man mit unvorhersehbaren Randbedingungen, zum Beispiel einem teilgeschlossenen Schieber und Messfehlern des Zuflussmessgeräts umgehen kann. Es wurde versucht, diese Randbedingungen bestmöglich in das hydraulische Modell zu integrieren.

Neben diesen Herausforderungen sind potentielle weitere Fehlerquellen, wie reale Leckagen, ungewöhnliche Verbräuche und / oder Veränderungen des hydraulischen Systems während des Feldversuchs, weitere Messfehler, Fehler im Code der Algorithmen und / oder Fehler in der Datenverarbeitung möglich. Wobei der Autor nach langer Beschäftigung mit dieser Arbeit die Meinung vertritt, dass das Auftreten einer dieser Möglichkeiten wahrscheinlicher ist, je früher sie genannt wurde. Bei manch erwähntem Problem, wie z.B. geschlossene, aber nicht bekanntgegebene Absperrorgane, das Walski in seinem Bericht über die Modellkalibrierung in Austin beschreibt, können Ähnlichkeiten mit dem Netz in Hart bei Graz nicht abgestritten werden.

Beim Vergleich der Kalibrierungsmethoden bietet die automatische Kalibrierung gegenüber der Trial-&-Error-Kalibrierung eine schnellere und optimiertere Lösung. Mit der Adaption, neben der Rauheit auch noch einen Minor Loss Koeffizienten kalibrieren zu können, konnte das „Problem“ des teilgeschlossenen Schiebers verringert werden. Potential ist an dieser Stelle aber noch vorhanden, wenn man zum Beispiel mehr als nur eine „Problemstelle“ beheben möchte.

Bei der Untersuchung, welche Auswirkungen verschiedene Parametergruppierungen in der automatischen Kalibrierung haben, lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen: Eine Überparametrisierung mit vielen Gruppen erzeugen auch viele optimale Lösungen. Gruppierungen, die aus bauingenieursmäßiger Sicht Sinn ergeben, mit Ausnahme der Gruppierung nach Material, liefern eine bessere Qualität im Ergebnis der Leckage Lokalisierung.

Die Durchführung von Leckage Lokalisierungssimulationen über mehrere Tage zeigt, wenn die Leckage am Hydranten HG4504 situiert ist, dass mit Leckagegrößen größer als 0,30 l/s wesentlich bessere Ergebnisse generiert werden. Ein Zusammenhang zwischen Leckageort und Qualität des Ergebnisses ist nicht belegbar.

Zusammenfassend liefert die Leckage Lokalisierung vermutlich genau dann gute Ergebnisse, wenn die hydraulischen Verhältnisse in dem Zeitraum, für den die

Leckage Lokalisierung durchgeführt wird, jenen durchschnittlichen Werten ähneln, die für das vergleichende Rechenetzmodell herangezogen wurden.

Verbesserungen sind durch eine längere Phase der Messungen des ungestörten Systems vor den Kalibrierungsmessungen vermutlich möglich. Interessant ist auch die Frage, wie die Ergebnisse der Leckage Lokalisierung, bei einer Durchführung der Simulation an einer anderen Tageszeit ausfallen würden. So wurde unter anderem bei Moors u. a., 2018 in der Morgenspitze nach Leckagen gesucht.

Da die hydraulischen Verhältnisse in einem kleinen Teilnetz wie das betrachtete, durchaus tageweise stark unterschiedlich sind, könnte eine kontinuierliche Kalibrierung zur Leckage Detektion und Lokalisation die Ergebnisse verbessern.

Da die Verbraucherunsicherheiten möglicherweise einen größeren Einfluss haben als die Rauheiten, bietet das Thema der Verbrauchskalibrierung, wie Sanz & Pérez, 2015 das mit der Software MATLAB bereits entwickelt haben, Möglichkeiten zur Verbesserung der Ergebnisse der Leckage Lokalisierung.

Literaturverzeichnis

- Camhy D., Gruber G., Steffelbauer D., Hofer T. F., & Muschalla D. (2014) „OpenSDM - An Open Sensor Data Management Tool“ in 11th International Conference on Hydroinformatics.
- Casillas Ponce M. V., Garza Castañón L. E., & Puig V. (2014) model-based leak detection and location in water distribution networks an extended-horizon analysis of pressure sensitivities.
- Colombo A. F., Lee P., & Karney B. W. (2009) A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-environment Research*, **2**(4), 212–227.
- Cugueró-Escofet P., Blesa J., Pérez R., Cugueró-Escofet M. A., & Sanz G. (2015) Assessment of a Leak Localization Algorithm in Water Networks under Demand Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, **48**(21), 226–231.
- De Jong K. A. (1975) *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*.
- DVGW GW 303-1 (2006) *Hydraulische Grundlagen, Netzmodellierung und Berechnung*.
- Eck B. (2017) *epanetReader: Read text files in Epanet's .inp and .rpt formats into R*, [online] <https://github.com/bradleyjeck/epanetReader> (Zugegriffen 1. Februar 2018).
- FLEXIM GmbH (2015) *Bedienungsanleitung UMADM6725V3-0DE*. [online] <https://www.ehlersgmbh.com/media/pdf/Bedienungsanleitungen/Flexim/BED-FL-Fluxus-ADM-6725-Bedienungsanleitung-Ultraschall-Auf-schnell-Durchflussmesser-mobil.pdf> (Zugegriffen 6. Februar 2018).
- Fürnkranz, J. & Becher, F. (2006) *Genetic Algorithms*. [online] <http://www.ke.tu-darmstadt.de/lehre/archiv/ss06/se-spiele/slides/GenetischeAlgorithmen-Becher.pdf> (Zugegriffen 10. Februar 2018).
- Goldberg D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.
- Google Maps Google Maps. [online] <https://www.google.at/maps/@47.0651784,15.4357774,14148m/data=!3m1!1e3> (Zugegriffen 26. Jänner 2018).
- Grafana - The open platform for analytics and monitoring (2014) Grafana Labs. [online] <https://grafana.com/> (Zugegriffen 8. Februar 2018).
- Haestad Methods, Inc (2003) *Advanced water distribution modeling and management* (T. M. Walski, Hrsg.), Haestad Press, Waterbury, CT.

- Holland J. H. (1975) *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, U Michigan Press, Oxford, England.
- InfluxData (InfluxDB) | Time Series Database Monitoring & Analytics (2014) InfluxData. [online] <https://www.influxdata.com/> (Zugegriffen 8. Februar 2018).
- Jenkins (2018) Jenkins. [online] <https://jenkins.io/index.html> (Zugegriffen 8. Februar 2018).
- Kang D. & Lansey K. (2010) Optimal Meter Placement for Water Distribution System State Estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**(3), 337–347.
- Lambert A. (1994) Accounting for Losses: The Bursts and Background Concept. *Water and Environment Journal*, **8**(2), 205–214.
- Landuyt L. (2015) *Calibration of a hydraulic network model in a Styrian water distribution company*, Universiteit Gent.
- Lansey K. E. & Basnet C. (1991) Parameter Estimation for Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **117**(1), 126–144.
- Leutnant D. (2018) *influxdbr: R Interface to InfluxDB*, [online] <https://cran.r-project.org/web/packages/influxdbr/index.html> (Zugegriffen 3. Februar 2018).
- Moors J., Scholten L., van der Hoek J. P., & den Besten J. (2018) Automated leak localization performance without detailed demand distribution data. *Urban Water Journal*, 1–8.
- ÖNORM EN 805 Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden (2000)
- OpenStreetMap (2017) OpenStreetMap. [online] <https://www.openstreetmap.org/> (Zugegriffen 7. Februar 2018).
- Ormsbee L. E. (1989) Implicit Network Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **115**(2), 243–257.
- Ormsbee L. E. & Lingireddy S. (1997) Calibrating hydraulic network models. , **89**(2), 42–50.
- ÖVGW - *Regelblatt W 63 - Wasserverluste in Trinkwasserversorgungssystemen* (2009) Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach, Vienna, Austria.
- Pérez R., Quevedo J., Puig V., Nejari F., Cuguero M. A., Sanz G., & Mirats J. M. (2011) „Leakage isolation in water distribution networks: A comparative study of two methodologies on a real case study“ in 2011 19th Mediterranean Conference on Control Automation (MED)., 138–143.

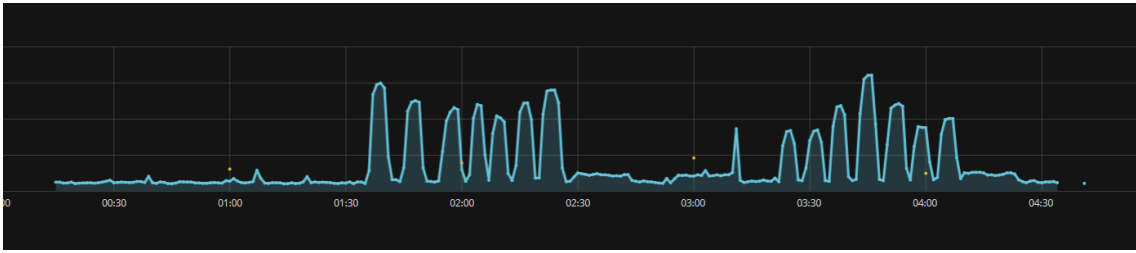
- Poulakis Z., Valougeorgis D., & Papadimitriou C. (2003) Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework. *Probabilistic Engineering Mechanics*, **18**(4), 315–327.
- Pudar R. & Liggett J. (1992) Leaks in Pipe Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, **118**(7), 1031–1046.
- Ramaseder L. (2016) *Comparison of different sensor placement algorithms for model-based leak localization in a real world case study (Hart close to Graz)*, Master Thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria.
- Rechenberg I. (1973) *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog.
- Romano M., Kapelan Z., & Savić D. A. (2013) Geostatistical techniques for approximate location of pipe burst events in water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, **15**(3), 634.
- Rossman L. A. (2000) EPANET 2: users manual. [online] <http://ghalambaz.persiangig.com/Amoozeshi/P1007WWU.pdf> (Zugegriffen 27. März 2014).
- RStudio (2017) RStudio. [online] <https://www.rstudio.com/> (Zugegriffen 7. Februar 2018).
- Sanz G. & Pérez R. (2015) Comparison of demand calibration in water distribution networks using pressure and flow sensors. *Procedia Engineering*, **119**, 771–780.
- Savic D. A., Kapelan Z. S., & Jonkergouw P. M. R. (2009) Quo vadis water distribution model calibration? *Urban Water Journal*, **6**(1), 3–22.
- SEWAD30 - SETEC Engineering GmbH & Co.KG (2018) [online] <http://www.setec.at/en/100.html> (Zugegriffen 6. Februar 2018).
- Steffelbauer D. B. & Fuchs-Hanusch D. (2016) Efficient Sensor Placement for Leak Localization Considering Uncertainties. *Water Resources Management*, **30**(14), 5517–5533.
- Steffelbauer D. B., Günther M., Neumayer M., & Fuchs-Hanusch D. (2017) *AZM – Aktives Zustandsmonitoring von Trinkwasserverteilnetzen*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW, Wien, Österreich. [online] <https://www.bmlfuw.gv.at/service/publikationen/wasser/AZM-Trinkwasserverteilnetze.html> (Zugegriffen 17. Mai 2017).
- Steffelbauer D. & Fuchs-Hanusch D. (2015) OOPNET: An object-oriented EPANET in Python. *Procedia Engineering*, **119**, 710–718.
- US EPA O. (2014) EPANET. US EPA. [online] <https://www.epa.gov/water-research/epanet> (Zugegriffen 7. Februar 2018).

- Walski T. M. (1990) Sherlock Holmes Meets Hardy-Cross or Model Calibration in Austin, Texas. *Journal (American Water Works Association)*, **82**(3), 34–38.
- Wu Z., Sage P., & Turtle D. (2009) Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **136**(1), 116–128.

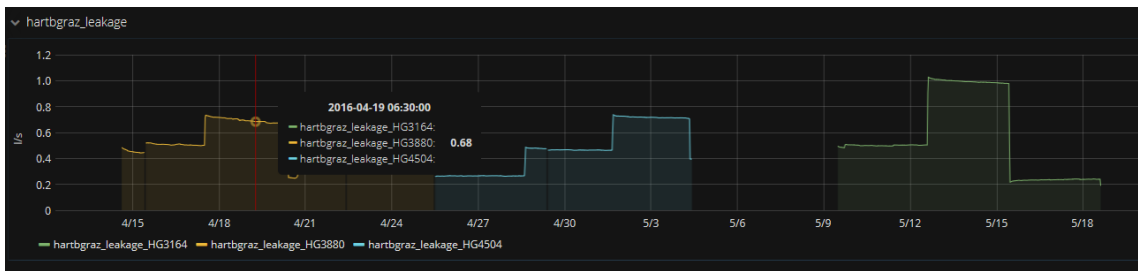
Anhang

- Anhang A Beispiele zur Datenbereinigung (Grafana)
- Anhang B Korrelationsgrafiken mit Validierungsszenarien, verschiedene Modelle
- Anhang C Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien, verschiedene Modelle
- Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle
- Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle
- Anhang F Gantt-Diagramm des Feldversuchs in Hart bei Graz

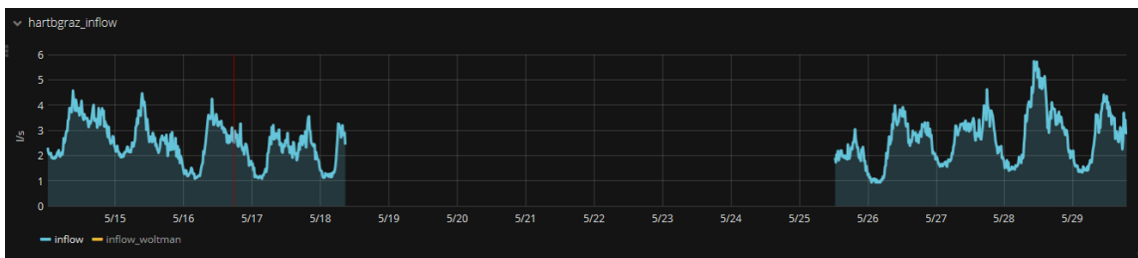
Anhang A Beispiele zur Datenbereinigung (Grafana)



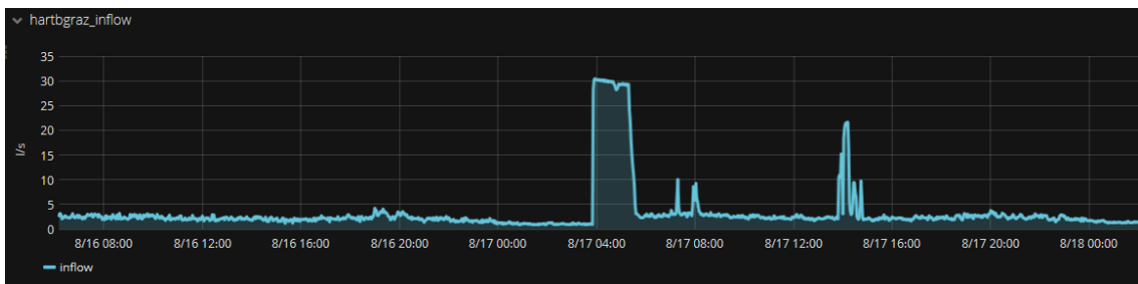
Zuflussmessung in der Kalibrierungsnacht am 12.04.2016 in Hart bei Graz (SWW)



Leckagemessungen im April und Mai 2016 in Hart bei Graz (SWW)

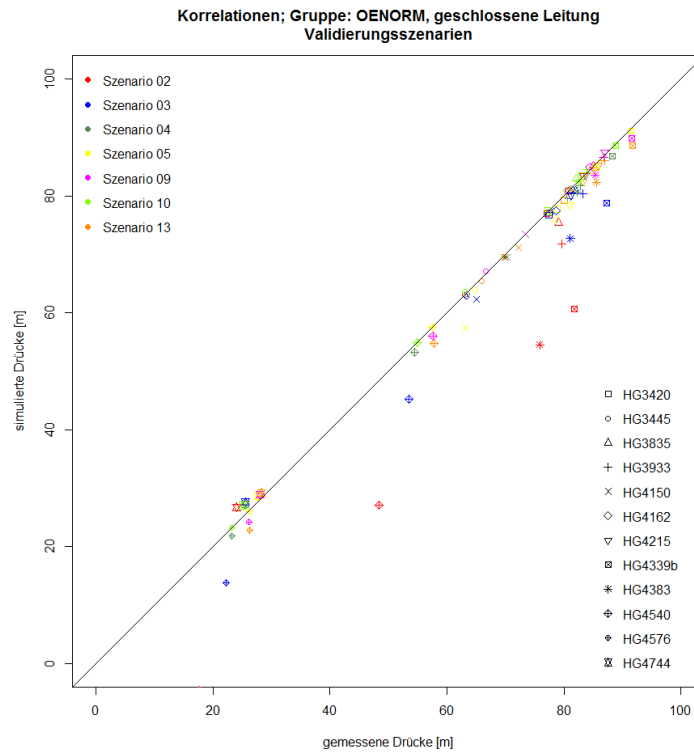


Datenlücken im Mai 2016 in Hart bei Graz (SWW)

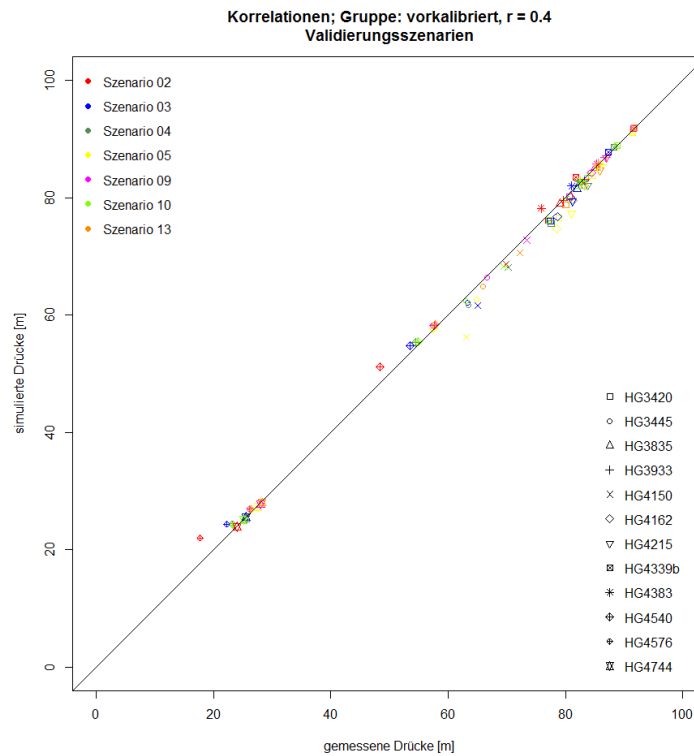


Rohrbruchereignis am 17.08.2016 in Hart bei Graz (SWW)

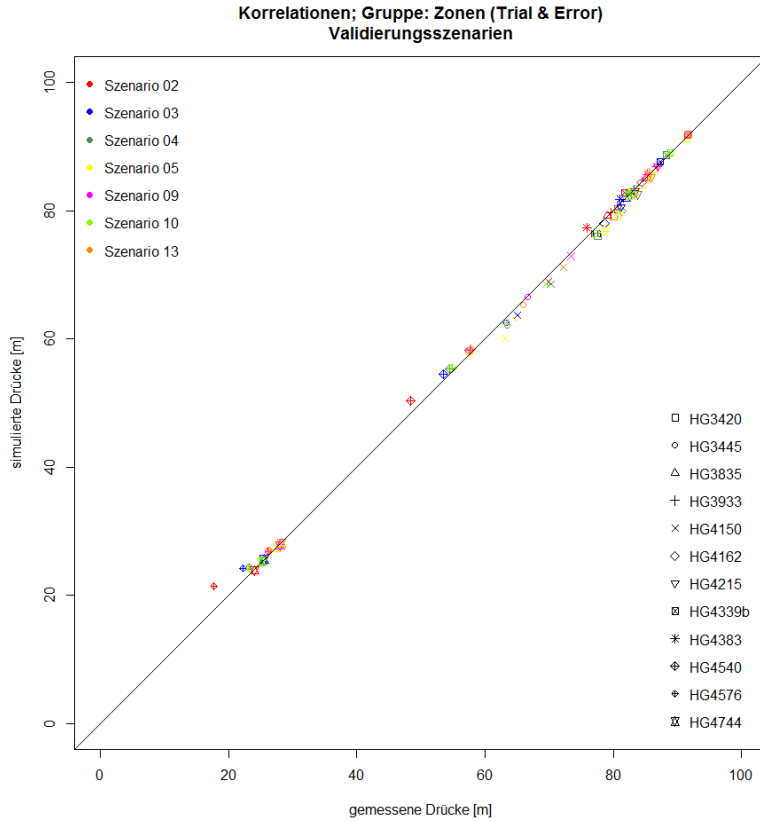
Anhang B Korrelationsgrafiken mit Validierungsszenarien, verschiedene Modelle



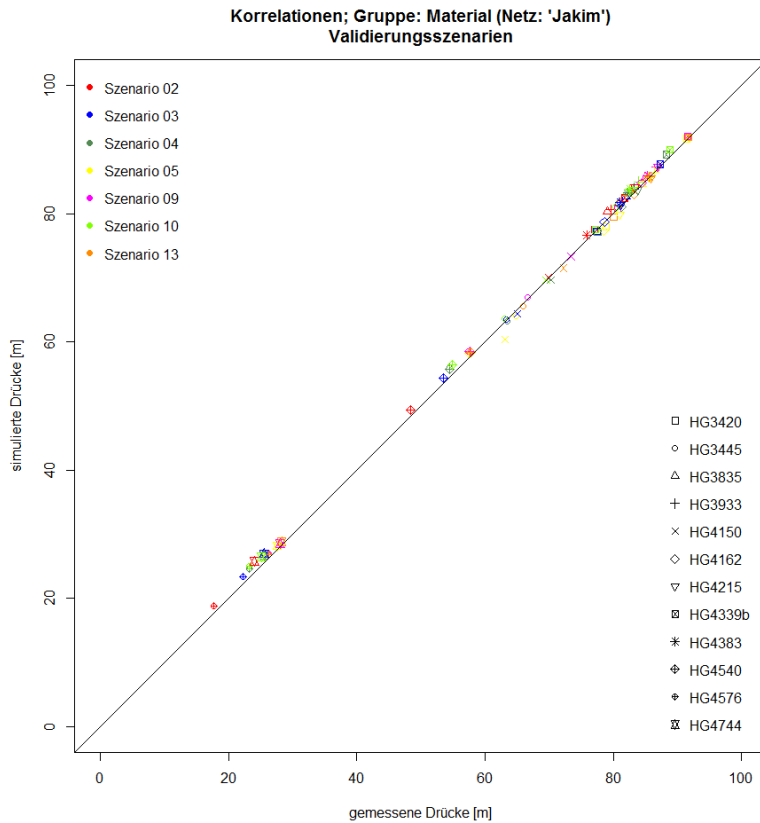
Korrelationen: Modell: „OENORM“, Validierungsszenarien



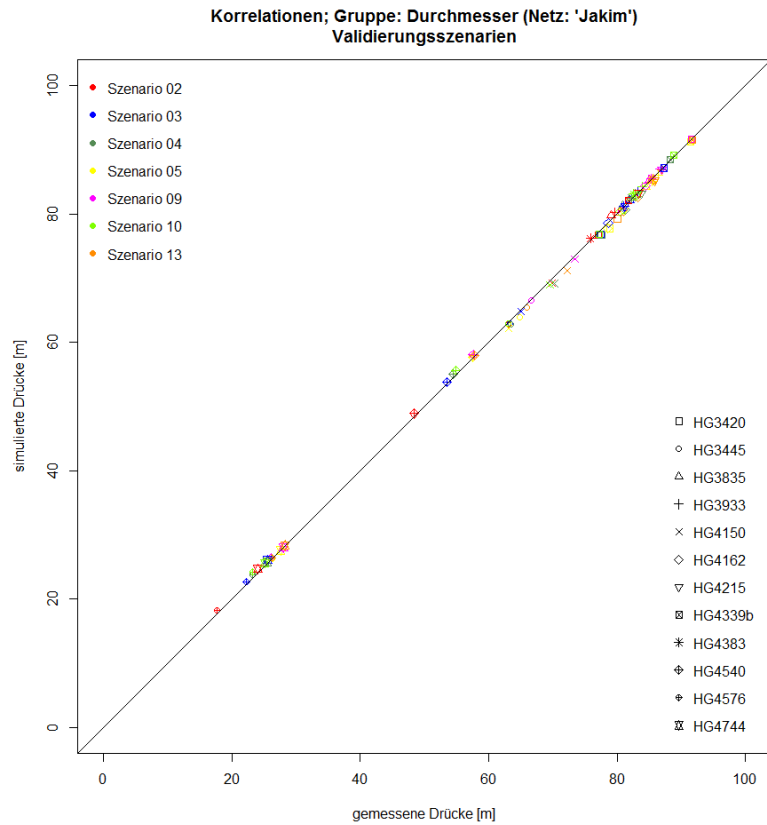
Korrelationen: Modell: „vorkalibriert“, Validierungsszenarien



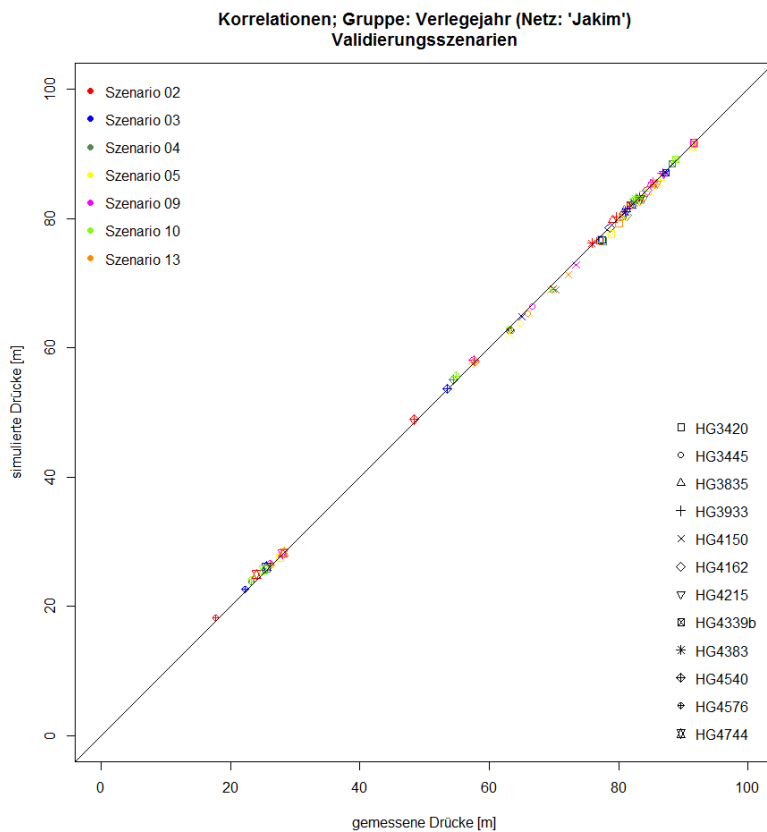
Korrelationen: Modell: Zonen (Trial & Error), Validierungsszenarien



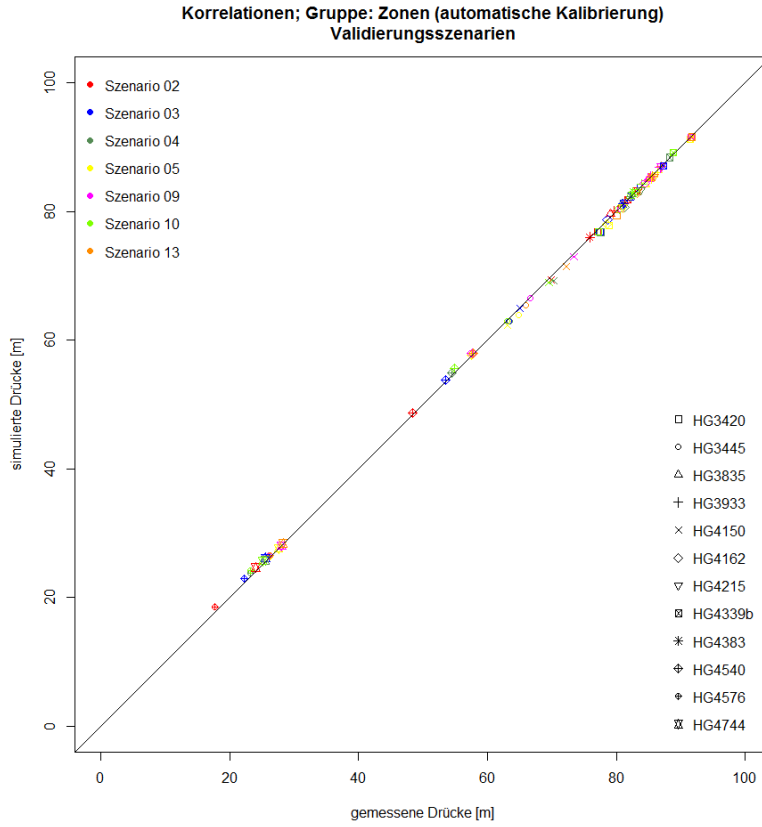
Korrelationen: Modell: Material, Validierungsszenarien



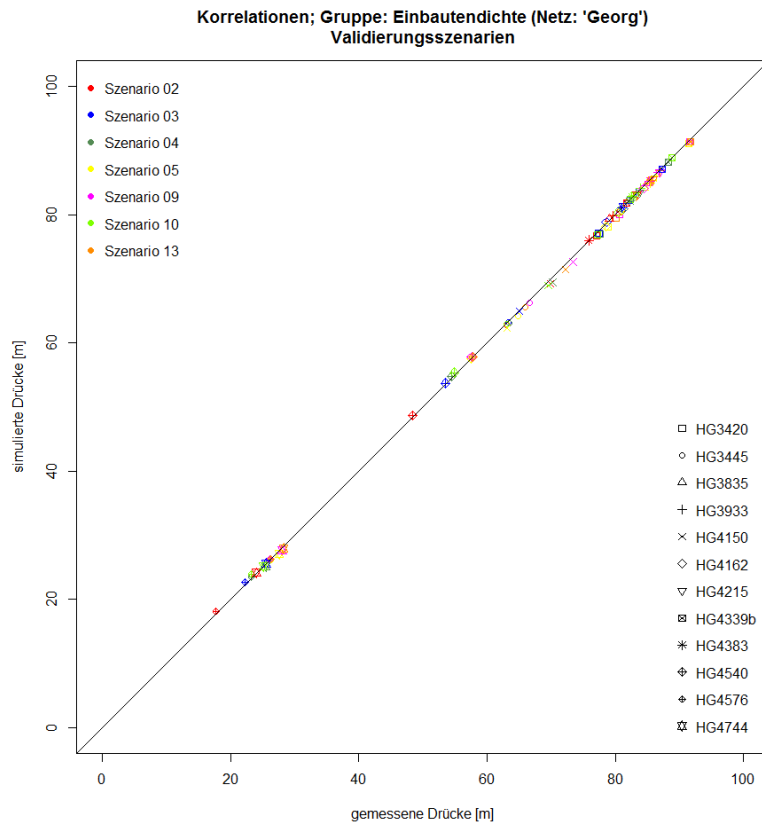
Korrelationen: Modell: Durchmesser, Validierungsszenarien



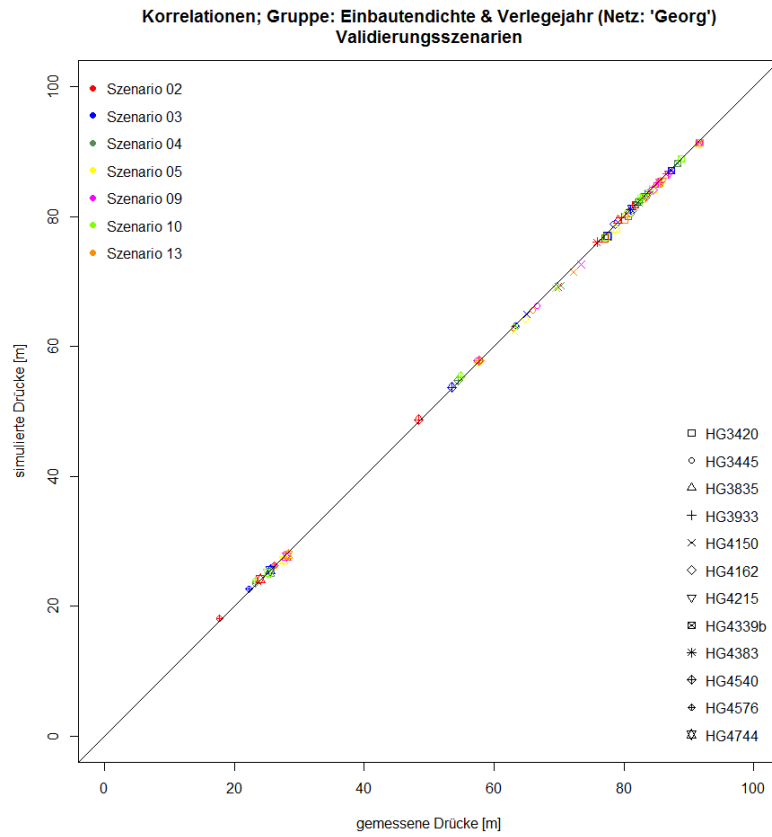
Korrelationen: Modell: Verlegejahr, Validierungsszenarien



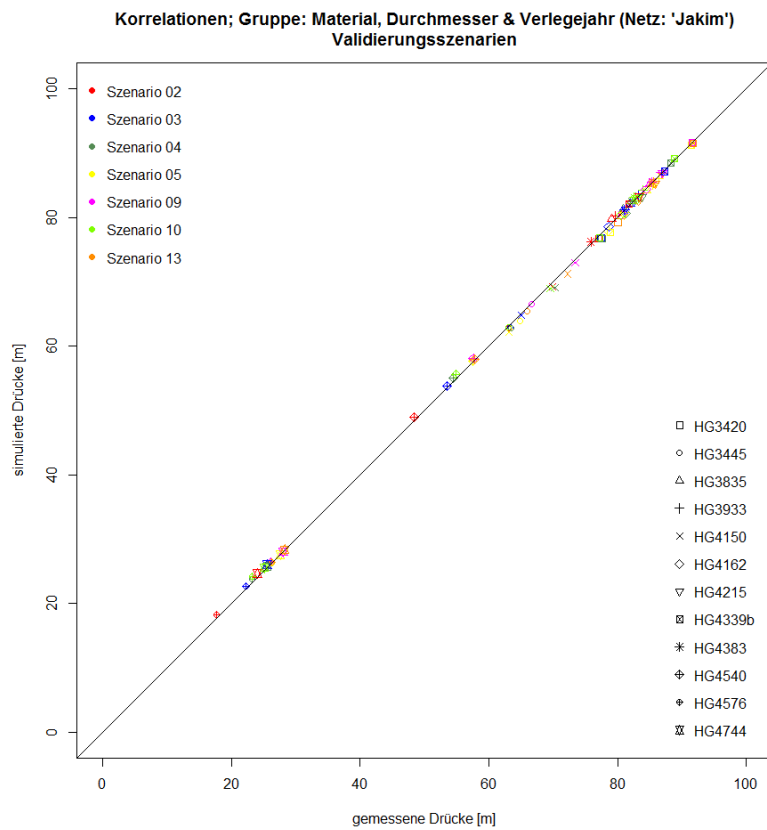
Korrelationen: Modell: Zonen, Validierungsszenarien



Korrelationen: Modell: Einbautendichte, Validierungsszenarien

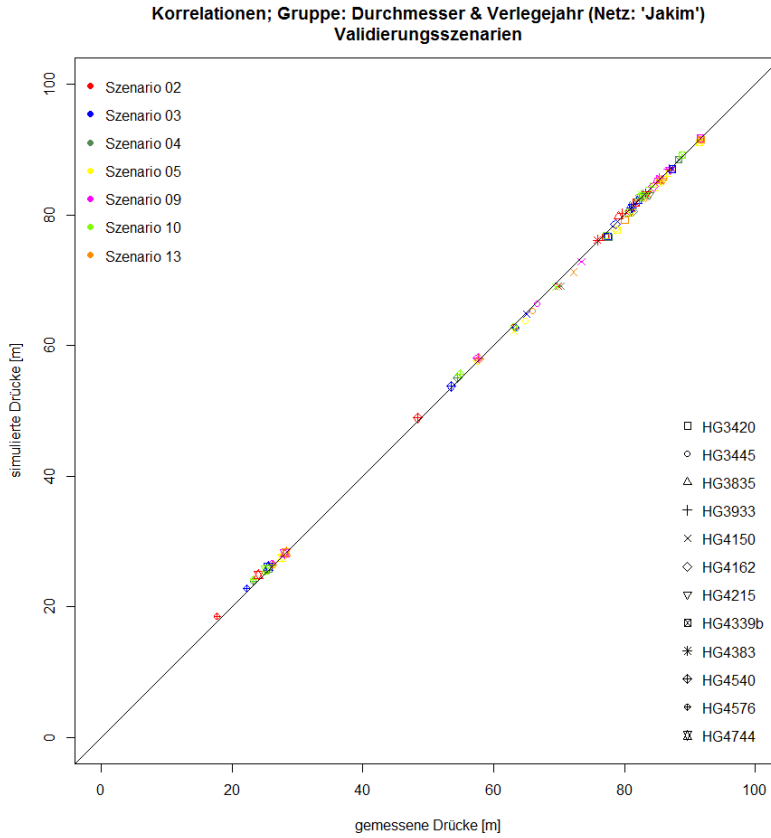


Korrelationen: Modell: Einbautendichte & Verlegejahr, Validierungsszenarien

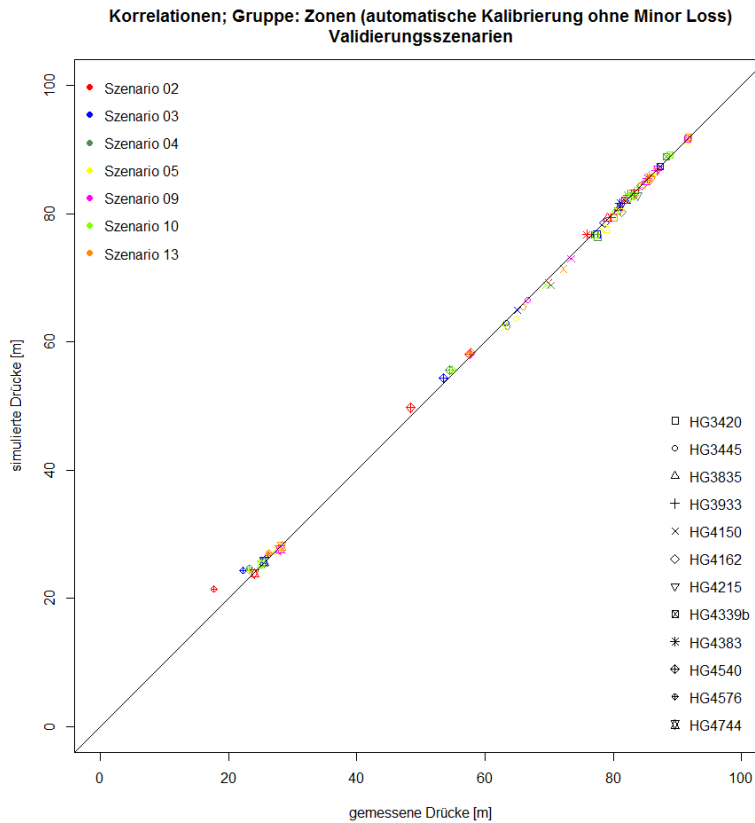


Korrelationen: Modell: Material, Durchmesser & Verlegejahr, Validierungsszenarien

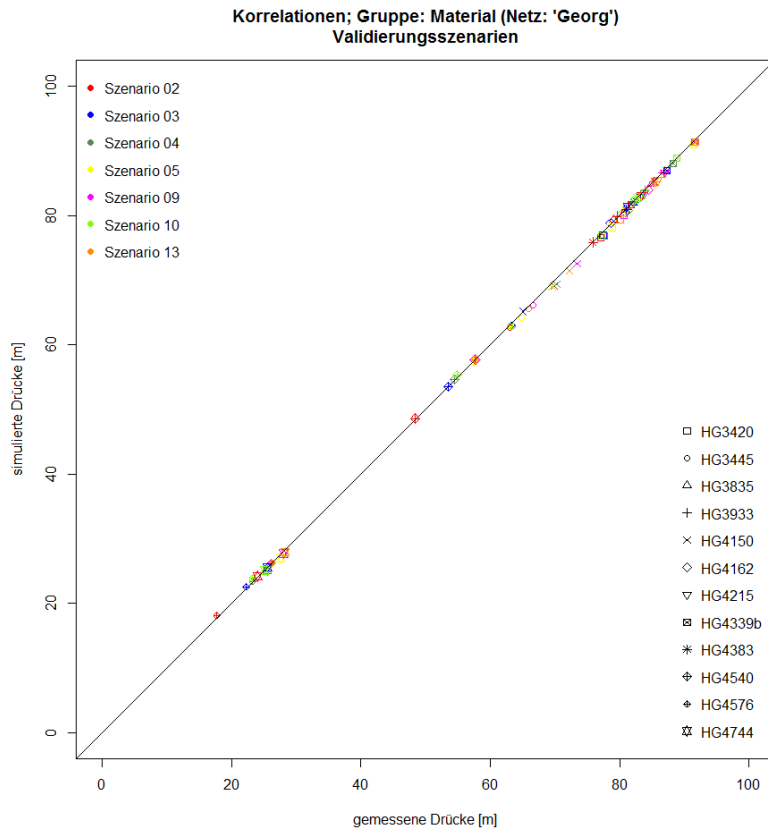
Anhang B Korrelationsgrafiken mit Validierungsszenarien, verschiedene Modelle



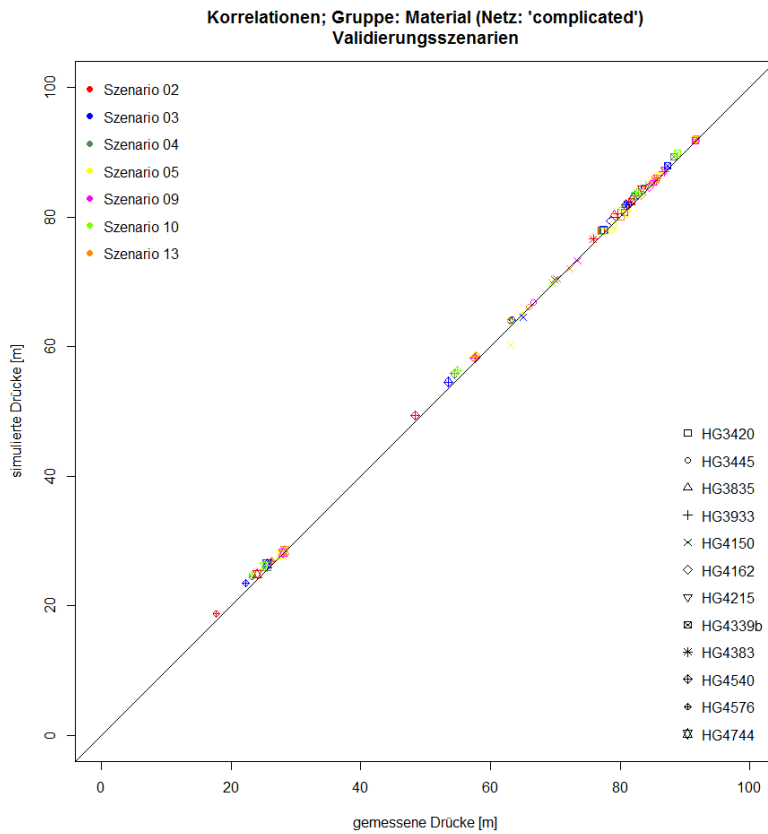
Korrelationen: Modell: Durchmesser & Verlegejahr, Validierungsszenarien



Korrelationen: Modell: Zonen (AC ohne ML), Validierungsszenarien

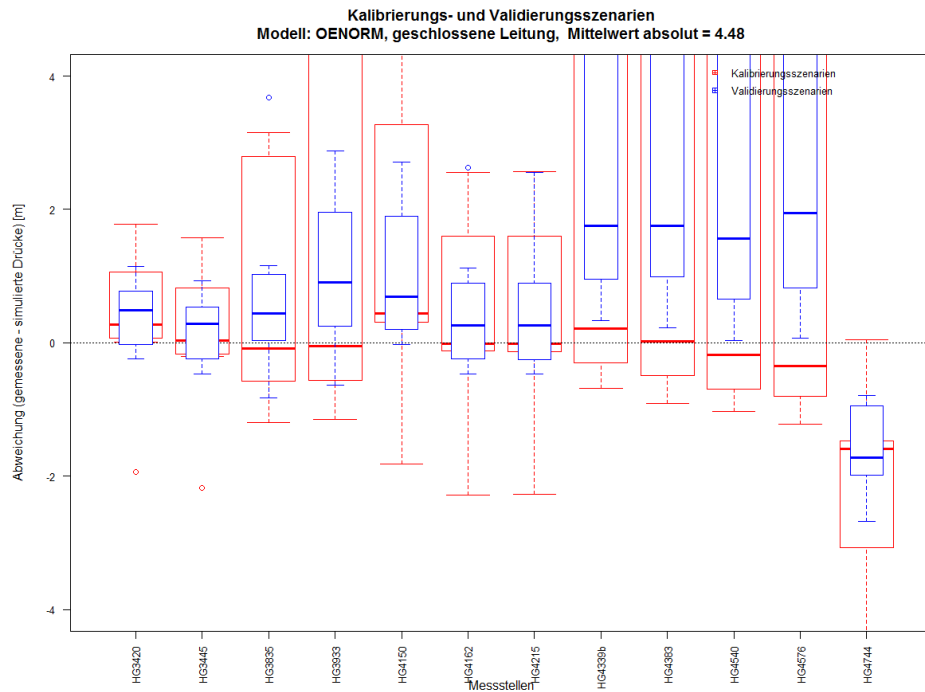


Korrelationen: Modell: Material (Netz: „Georg“), Validierungsszenarien

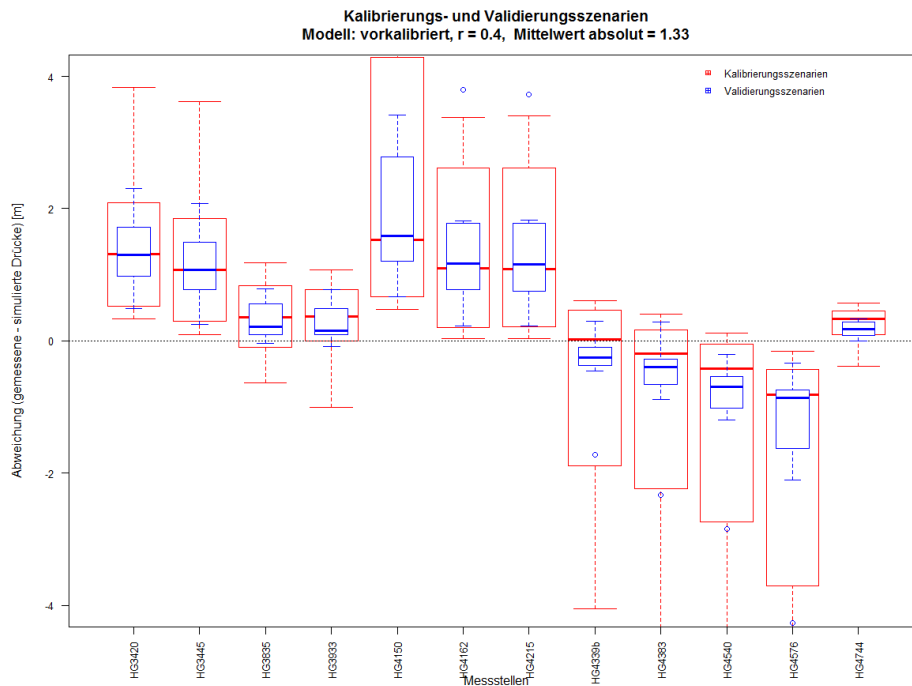


Korrelationen: Modell: Material (Netz: „complicated“), Validierungsszenarien

Anhang C Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien, verschiedene Modelle

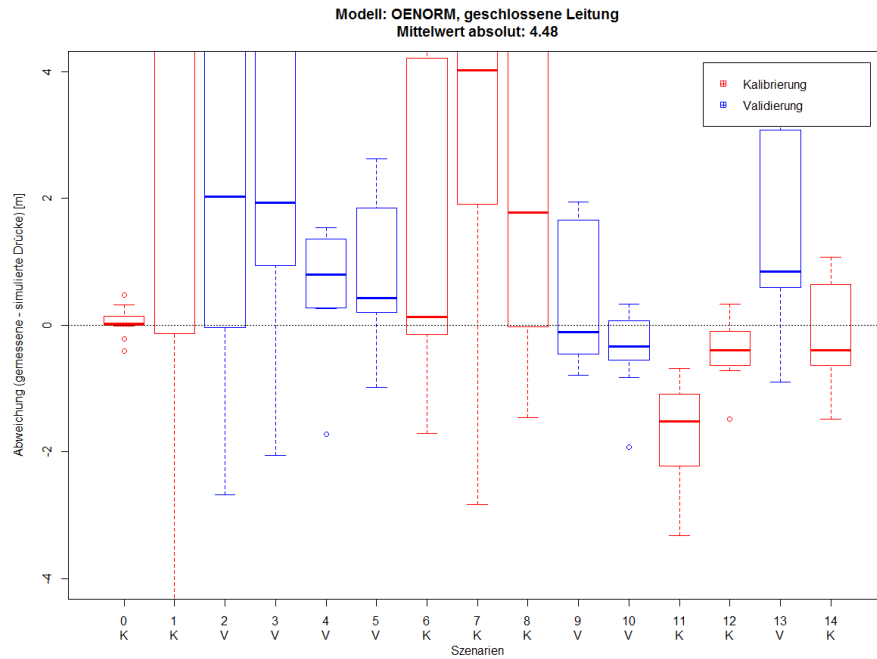


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien,
Modell: „OENORM“

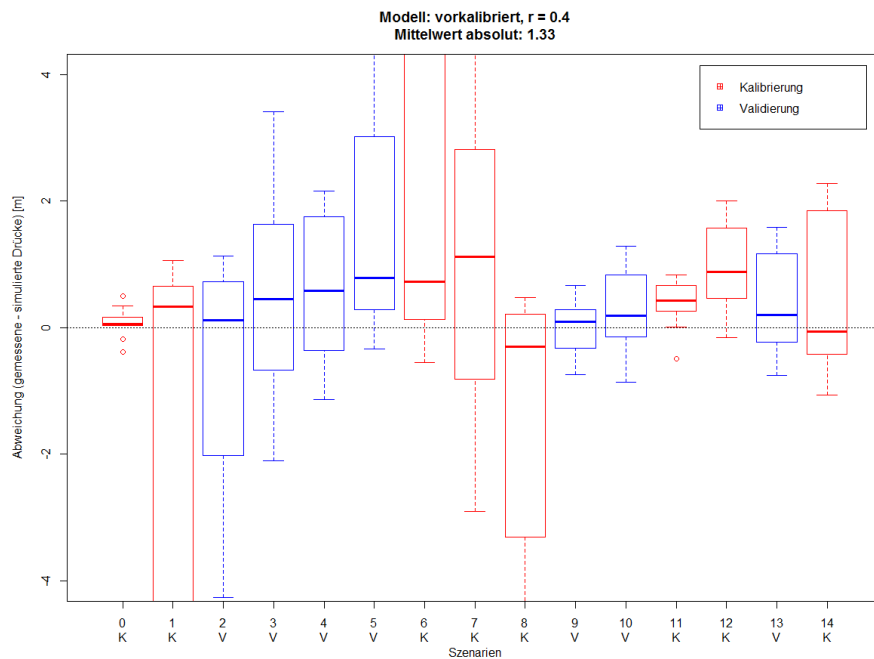


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Szenarien,
Modell: „vorkalibriert“

Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle

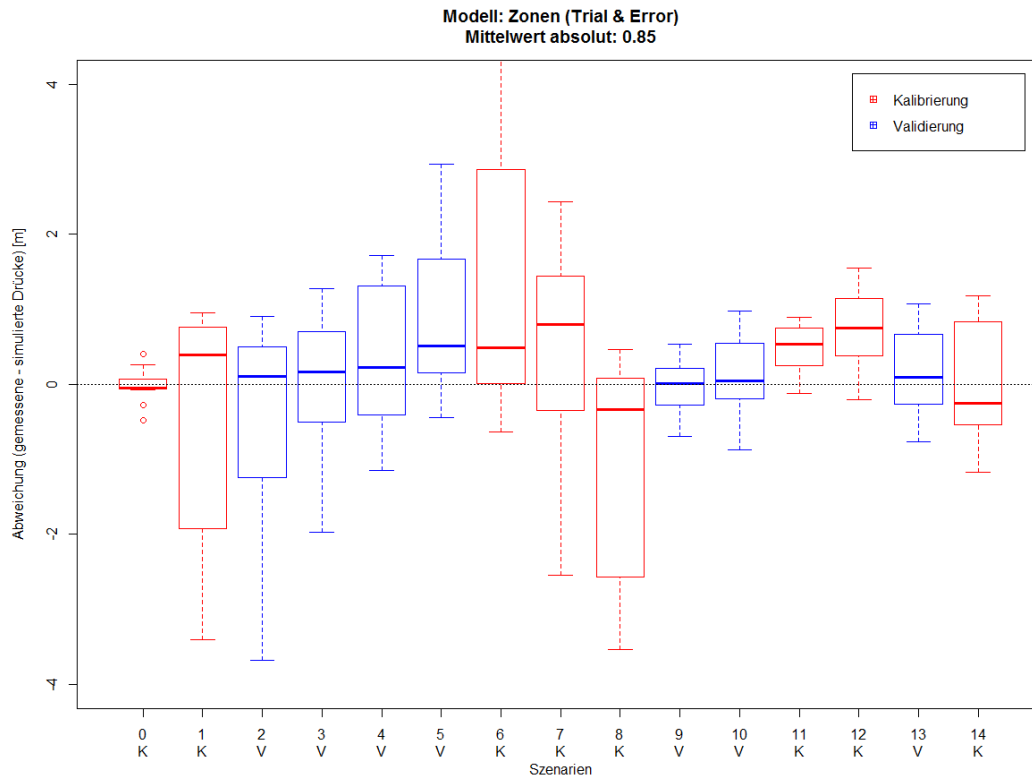


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte, Modell: „OENORM“

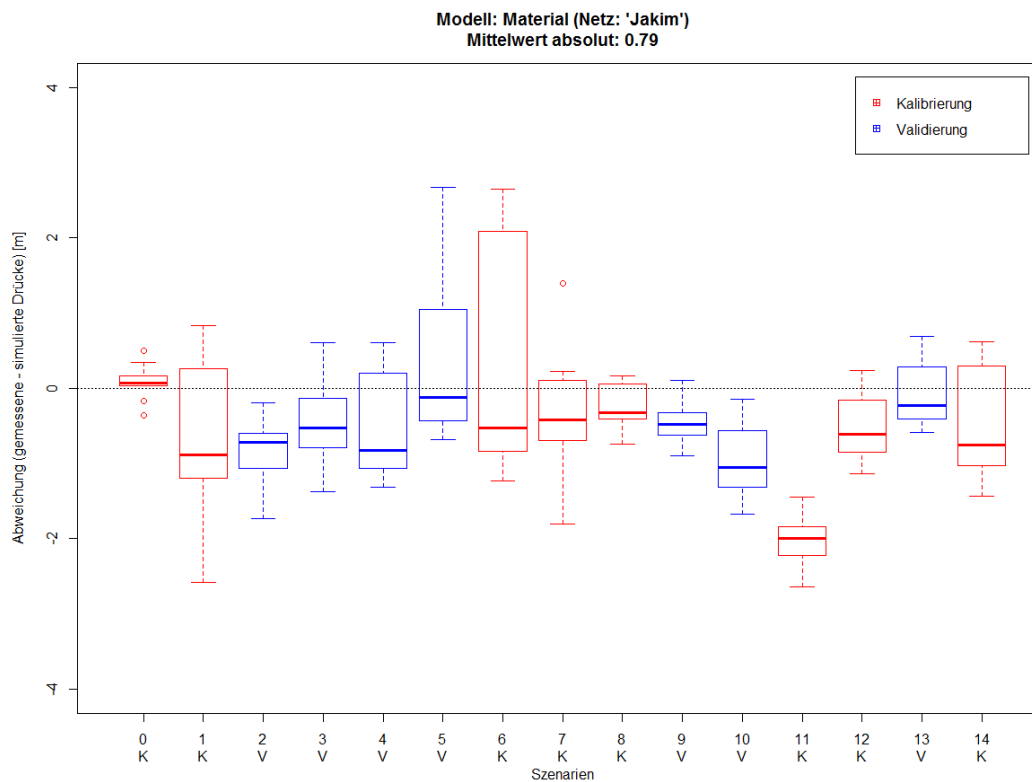


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte, Modell: „vorkalibriert“

Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle

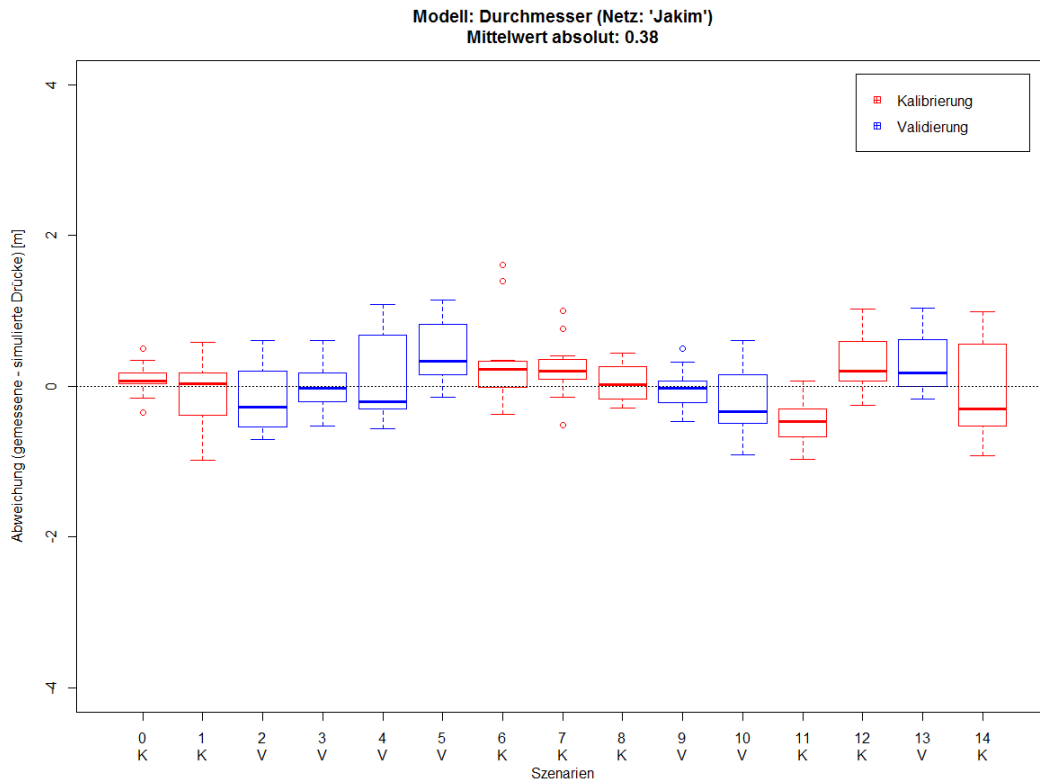


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte, Modell: Zonen (Trial & Error)

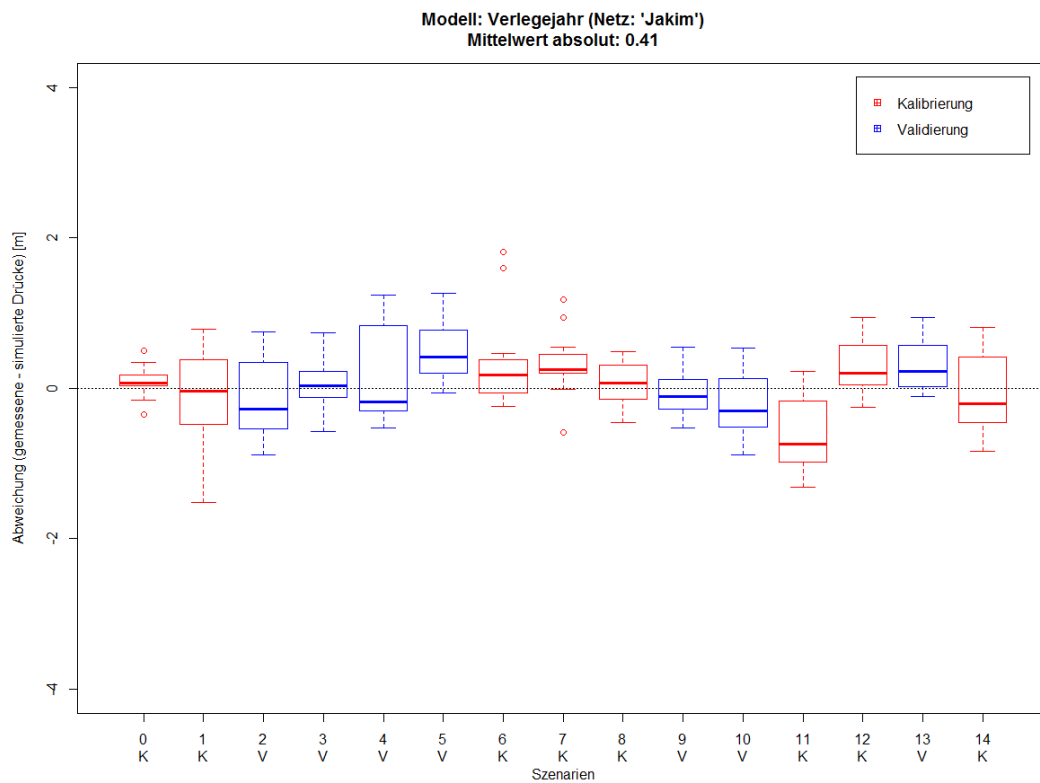


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte, Modell: Material (Netz: „Jakim“)

Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle

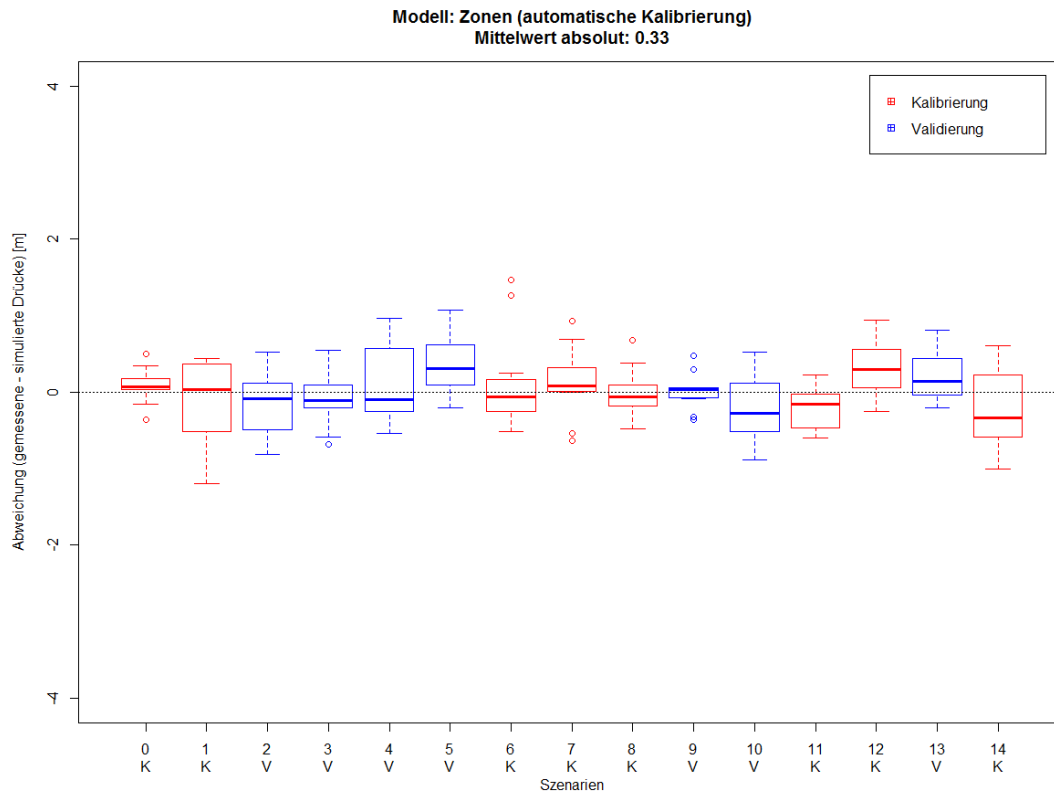


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Durchmesser

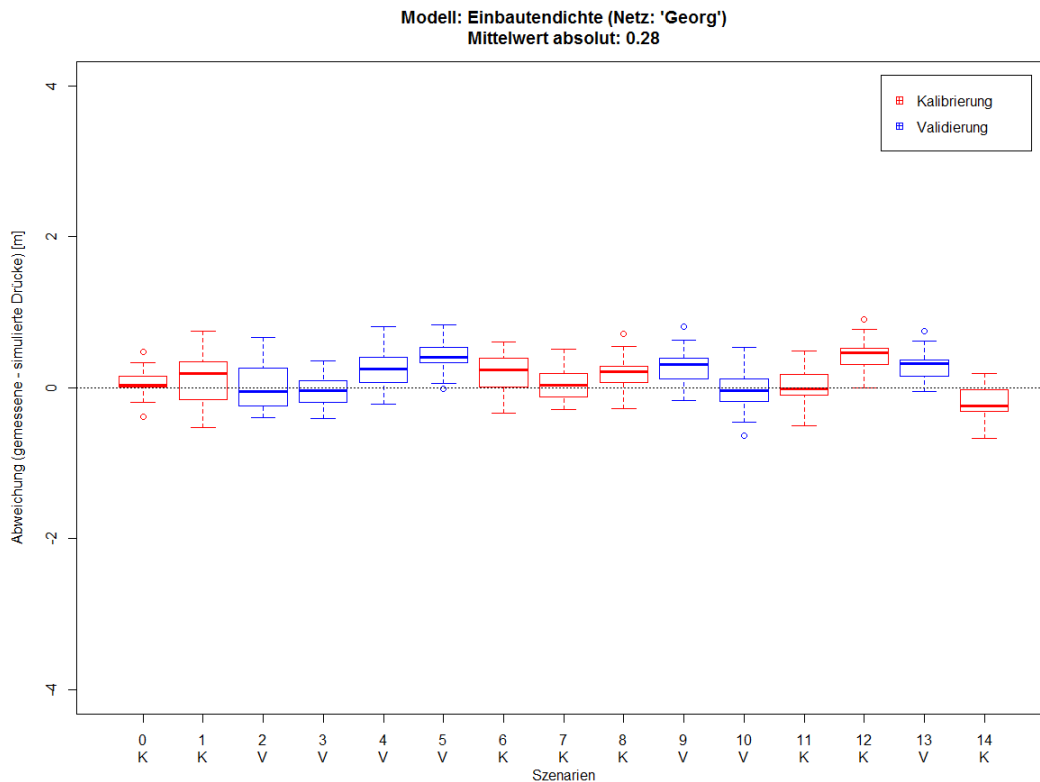


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Verlegejahr

Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle

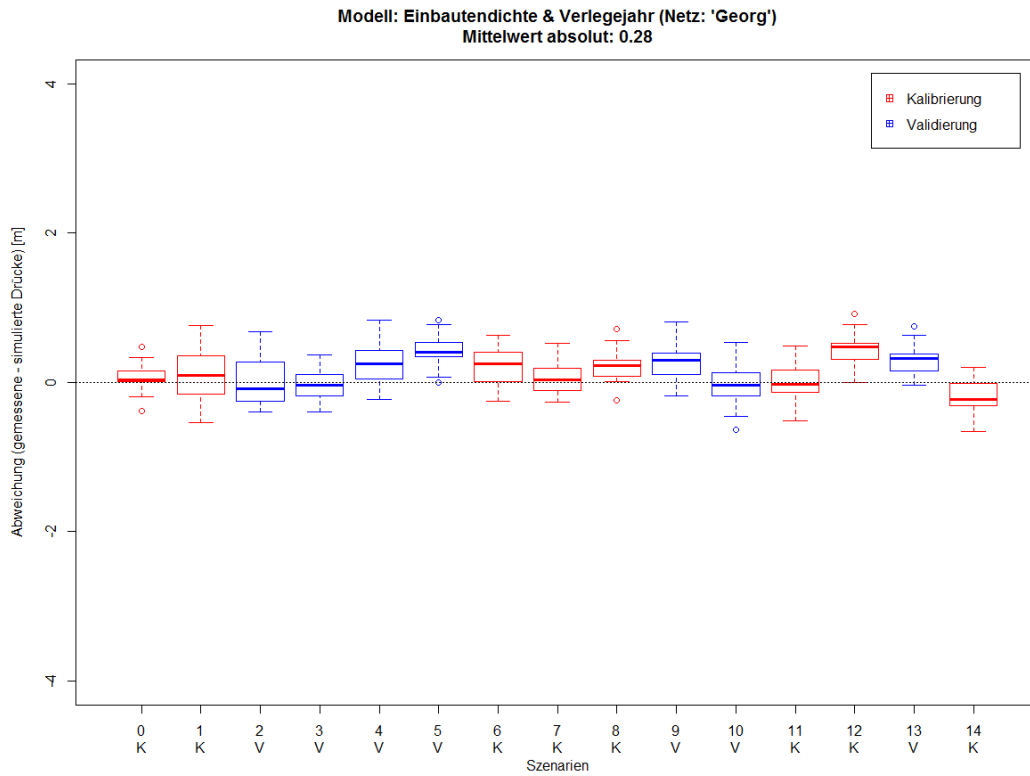


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Zonen (AC)

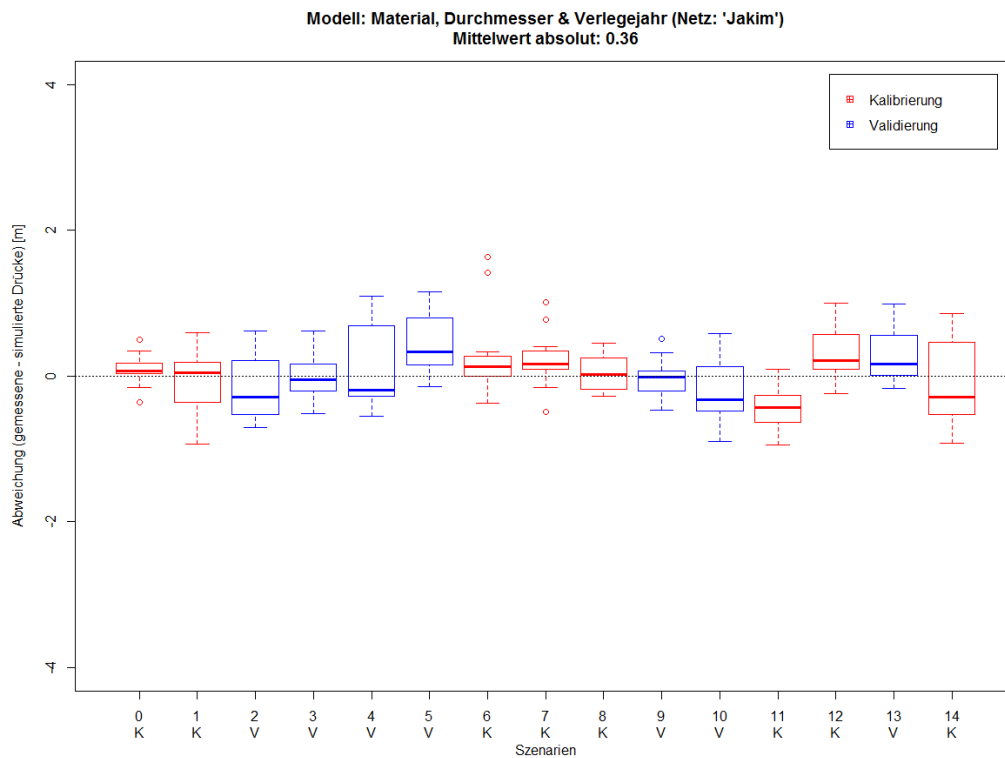


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Einbautendichte

Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle

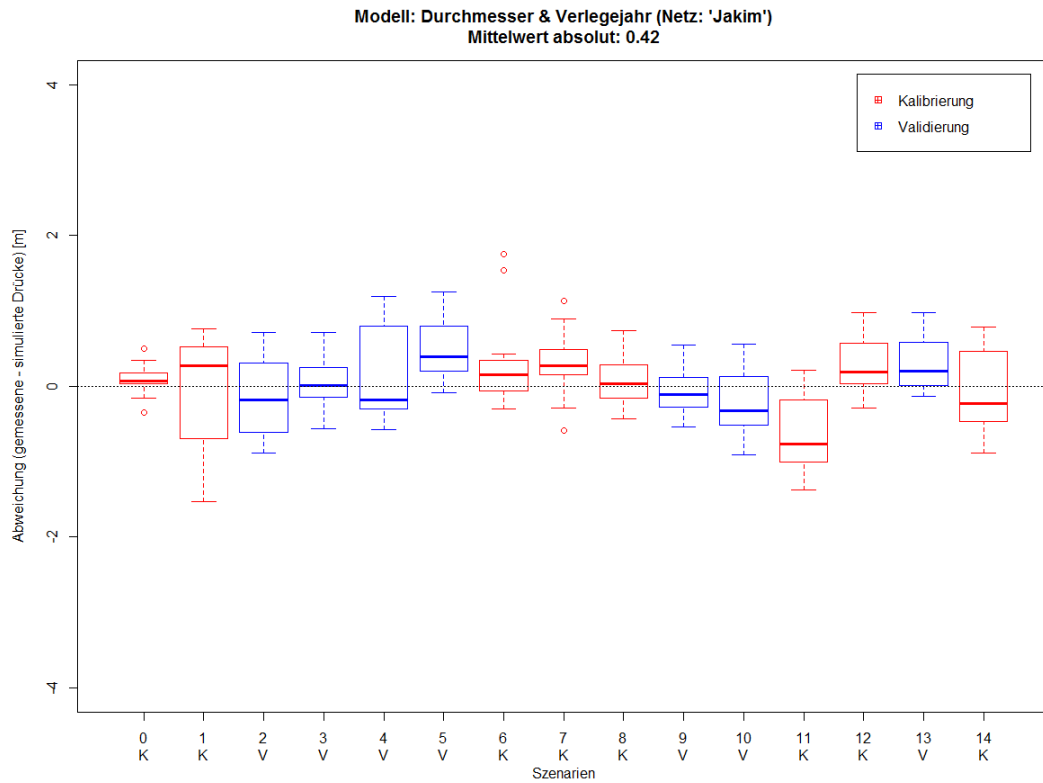


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Einbautendichte & Verlegejahr

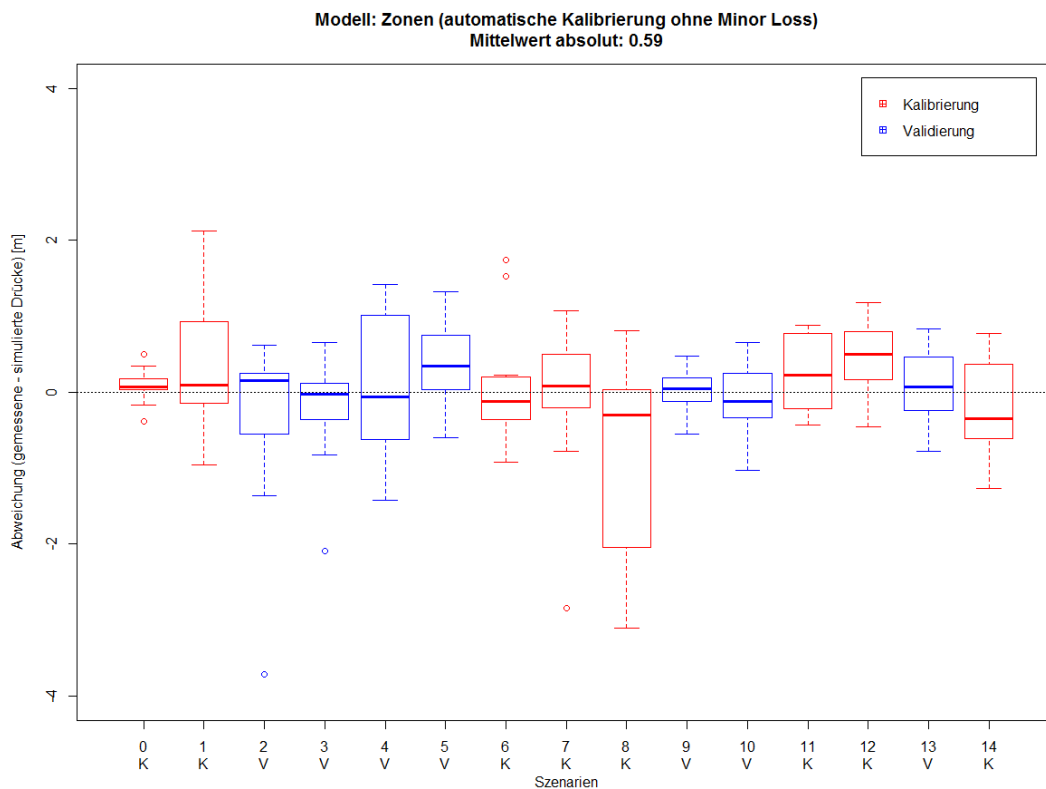


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Material, Durchmesser & Verlegejahr

Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle

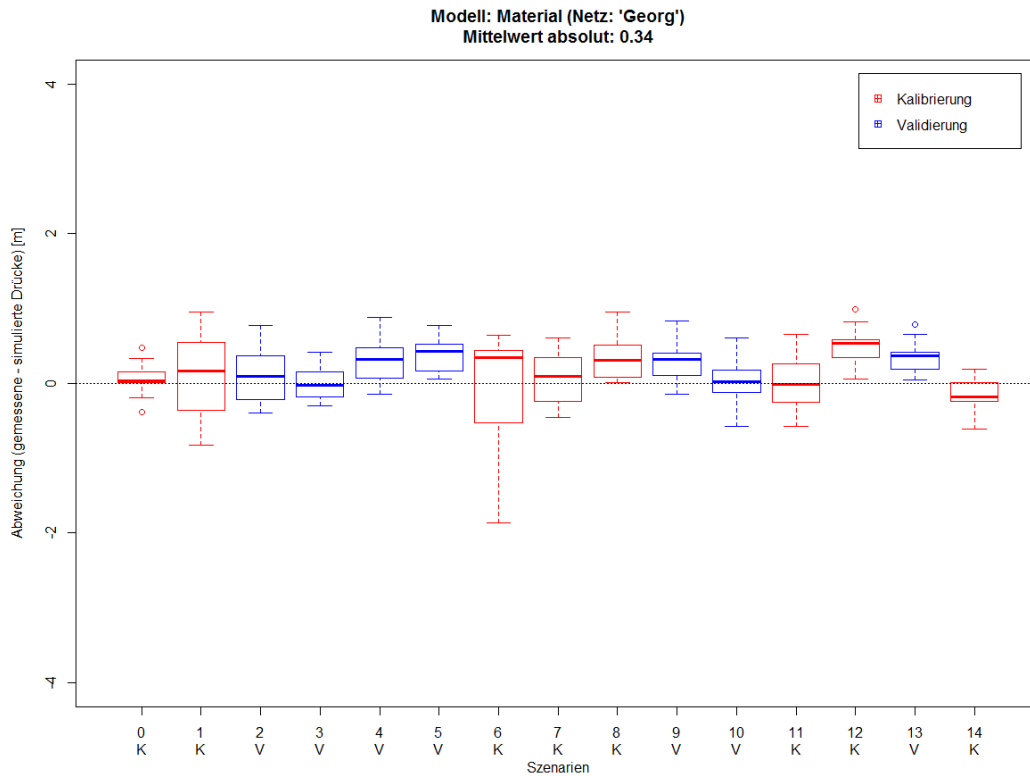


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Durchmesser & Verlegejahr

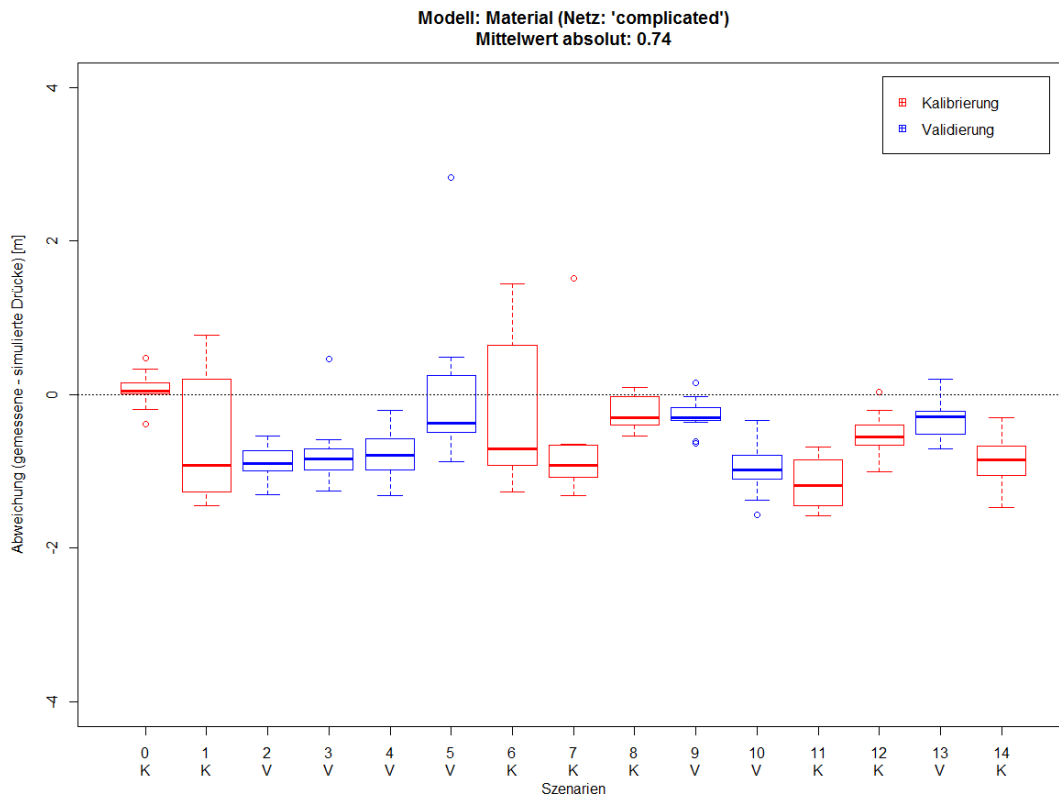


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte,
Modell: Zonen (AC ohne ML)

Anhang D Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) aller Szenarien in Abhängigkeit der Szenarien, verschiedene Modelle

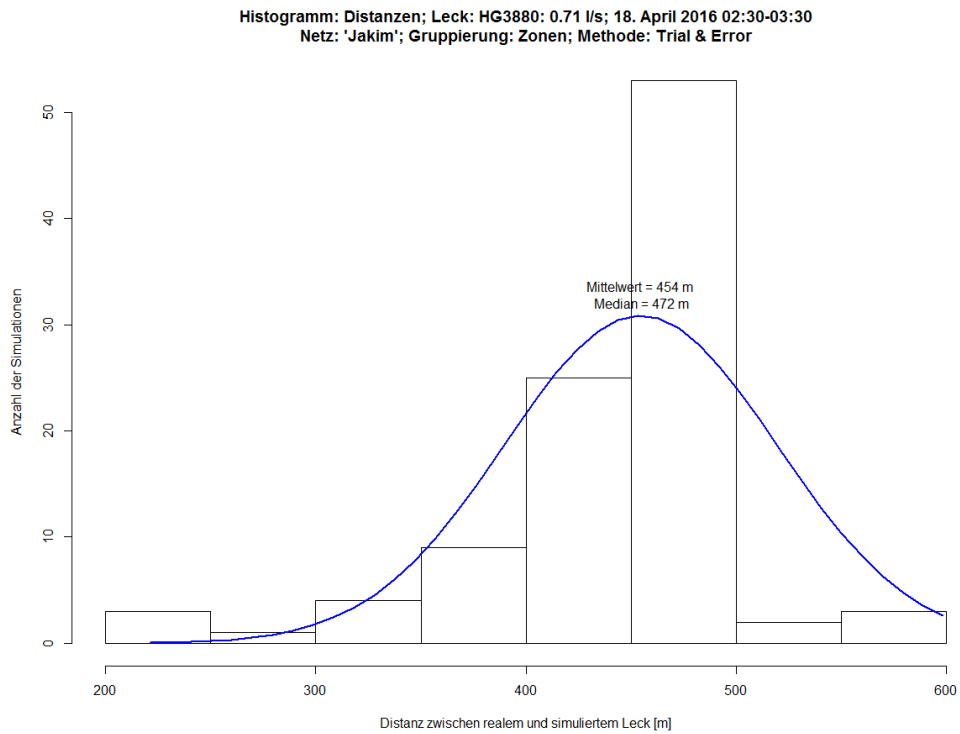


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte, Modell: Material (Netz: „Georg“)

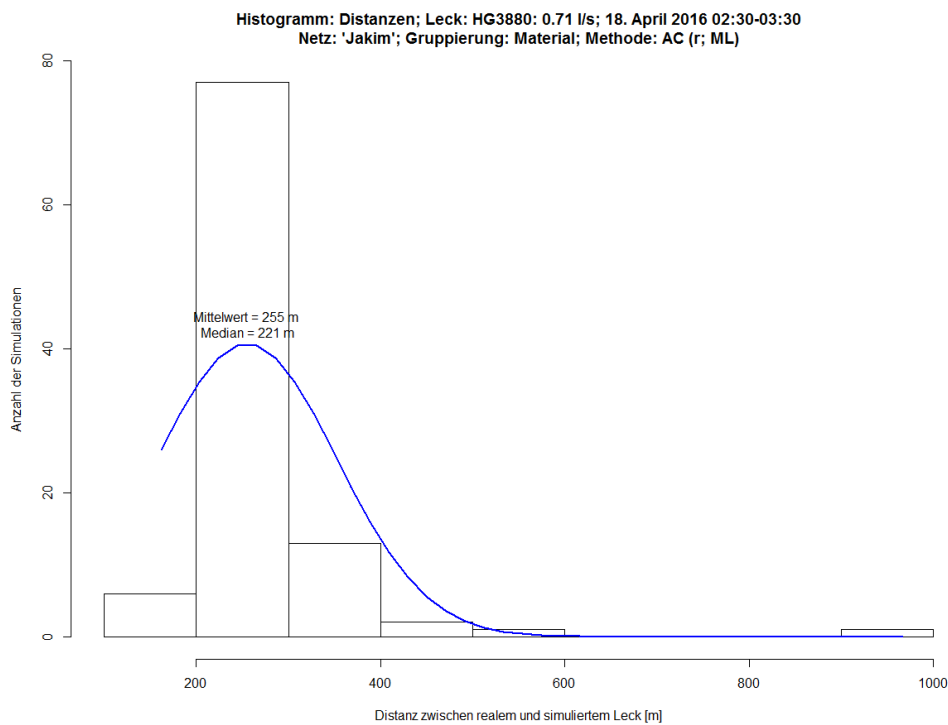


Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene - simulierte Drücke) aller Messpunkte, Modell: Material (Netz: „complicated“)

Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle



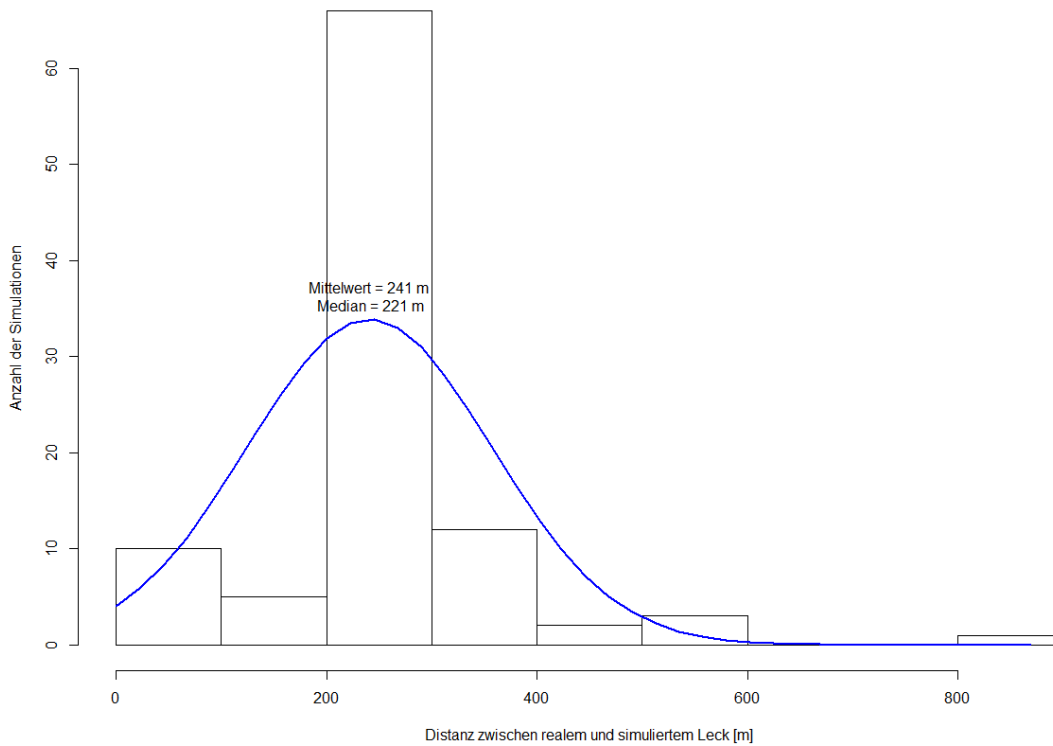
Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Zonen (Trial & Error)



Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Material (AC)

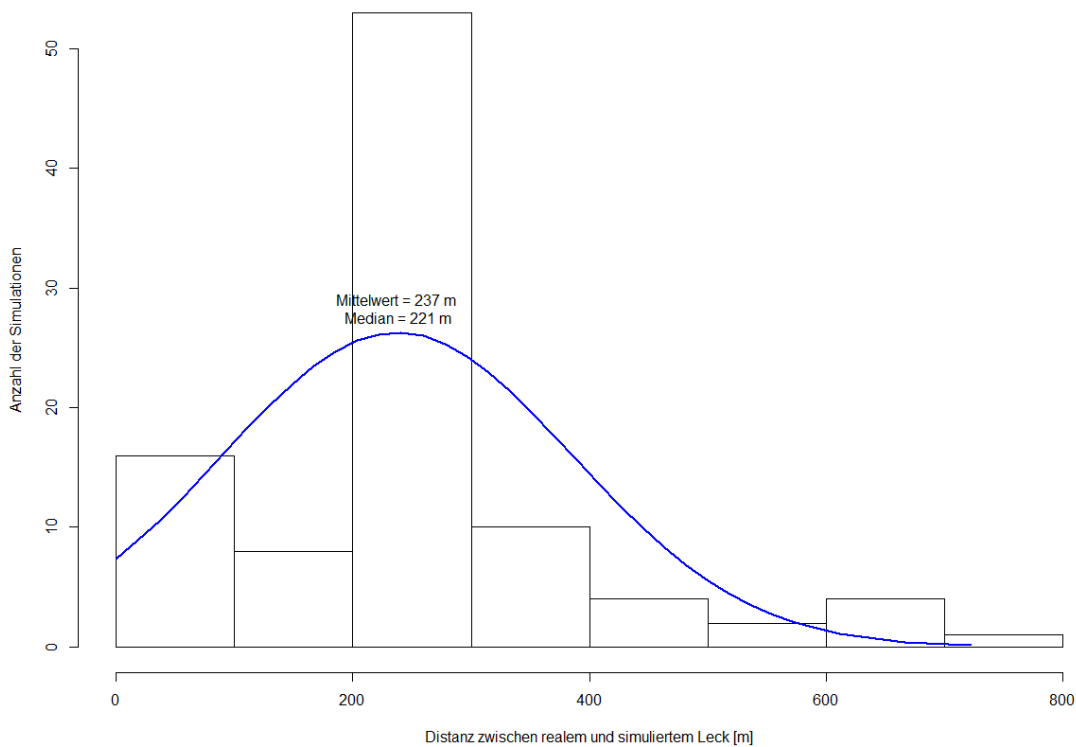
Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle

Histogramm: Distanzen; Leck: HG3880: 0.71 l/s; 18. April 2016 02:30-03:30
Netz: 'Jakim'; Gruppierung: Durchmesser; Methode: AC (r; ML)



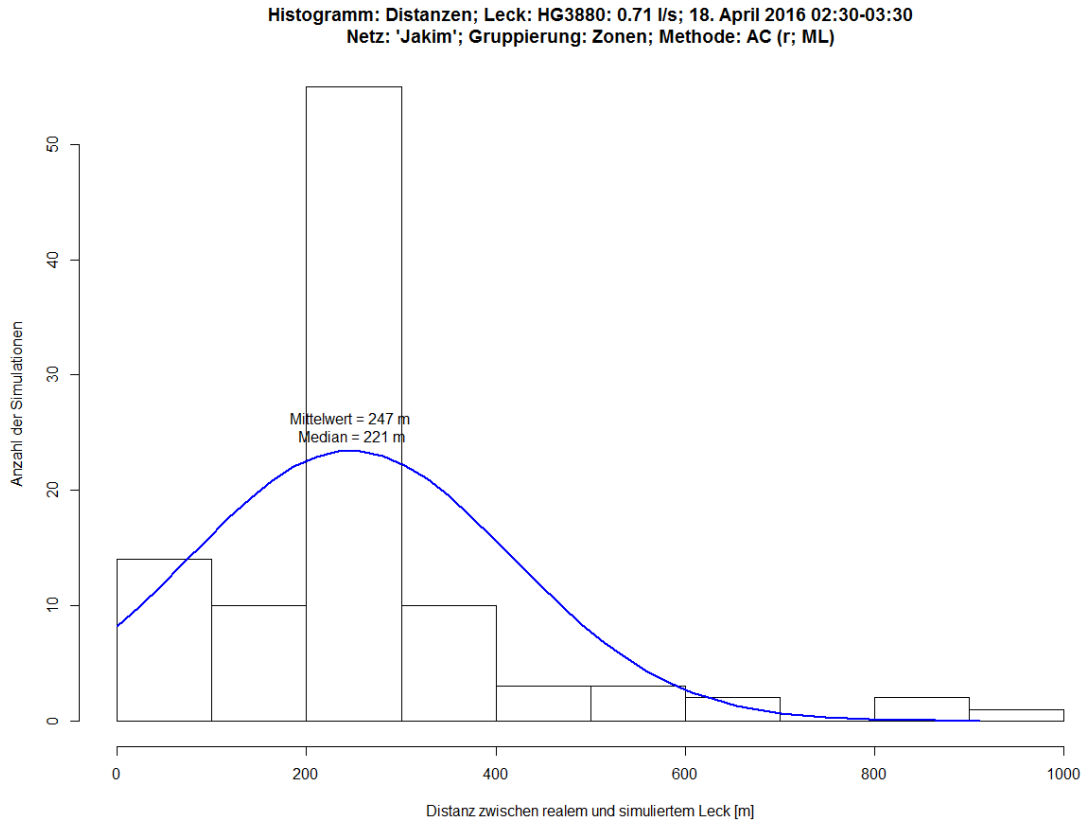
Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Durchmesser

Histogramm: Distanzen; Leck: HG3880: 0.71 l/s; 18. April 2016 02:30-03:30
Netz: 'Jakim'; Gruppierung: Verlegejahr; Methode: AC (r; ML)

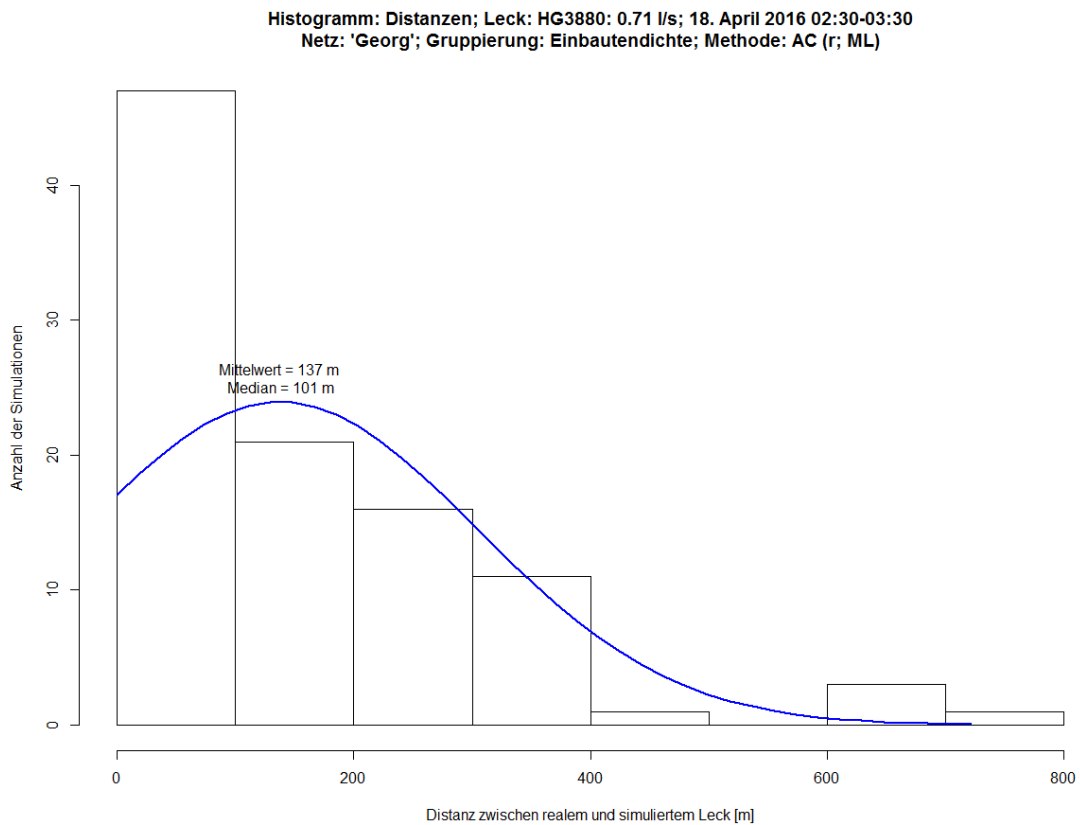


Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Verlegejahr

Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle



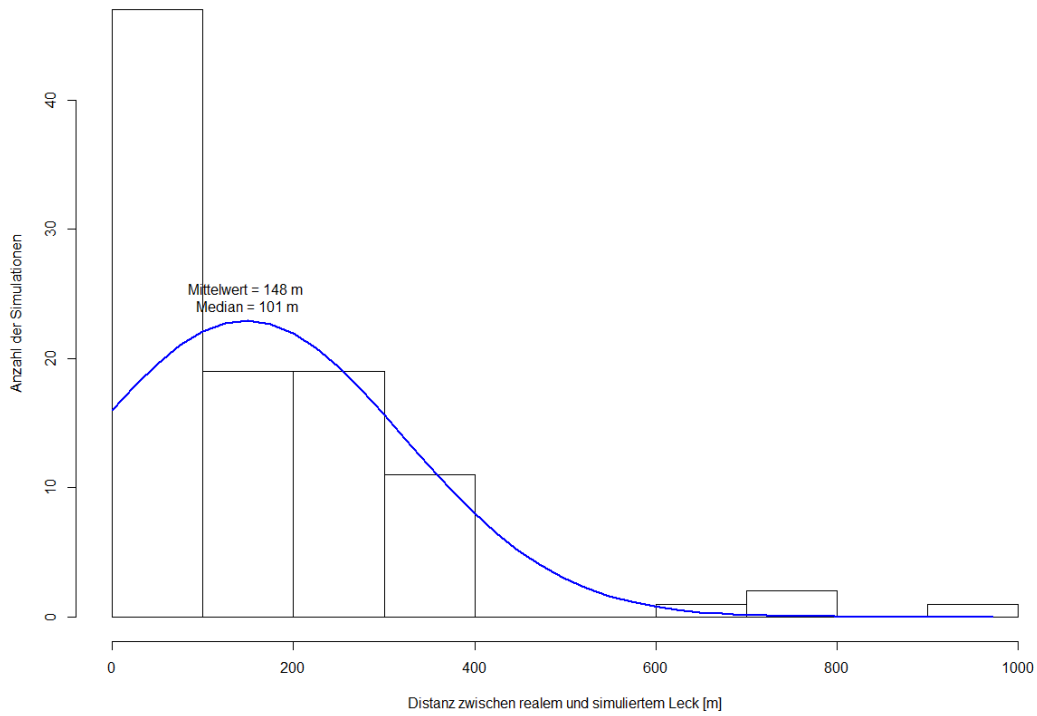
Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Zonen (AC)



Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Einbautendichte

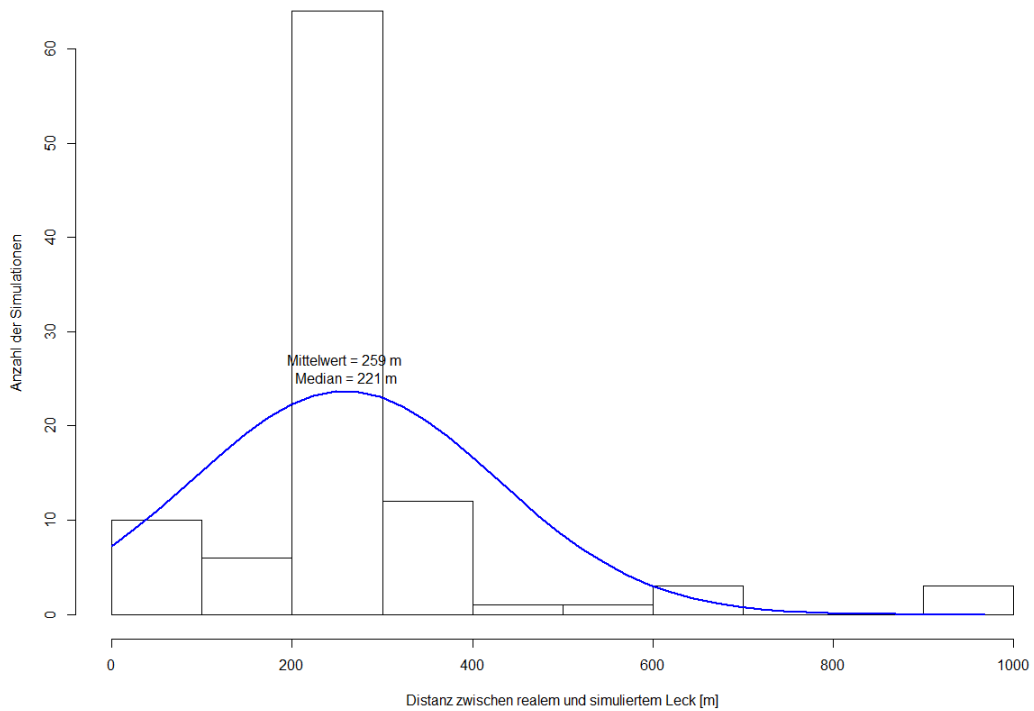
Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle

Histogramm: Distanzen; Leck: HG3880: 0.71 l/s; 18. April 2016 02:30-03:30
Netz: 'Georg'; Gruppierung: Einbautendichte & Verlegejahr; Methode: AC (r; ML)



Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Einbautendichte & Verlegejahr

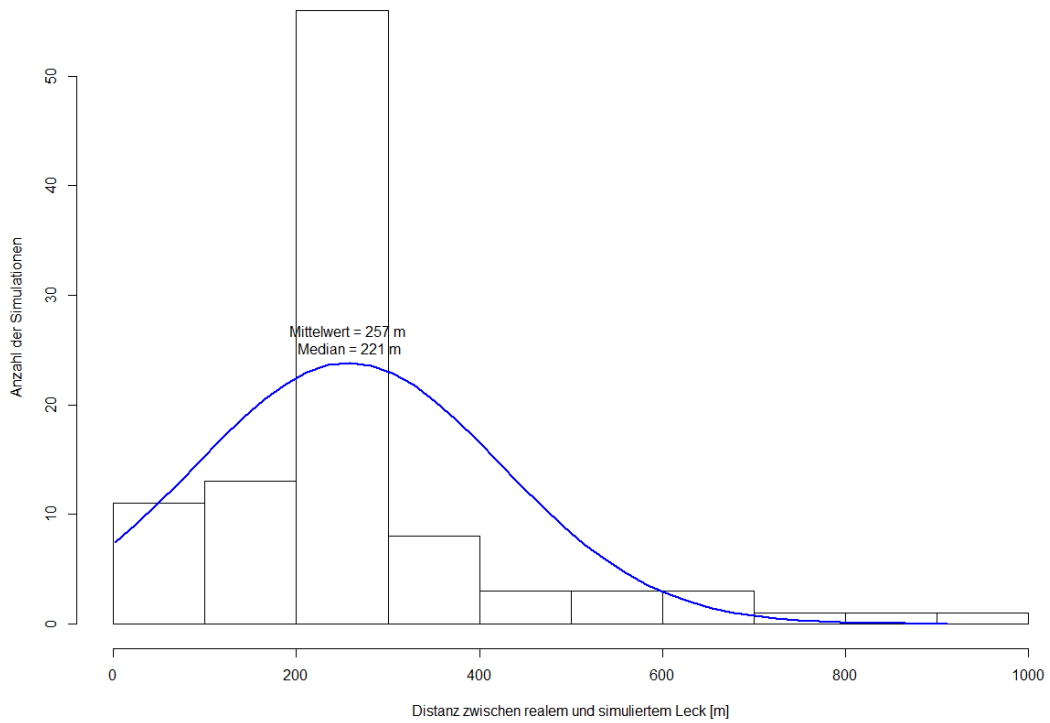
Histogramm: Distanzen; Leck: HG3880: 0.71 l/s; 18. April 2016 02:30-03:30
Netz: 'Jakim'; Gruppierung: Material, Durchmesser & Verlegejahr; Methode: AC (r; ML)



Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Material, Durchmesser & Verlegejahr

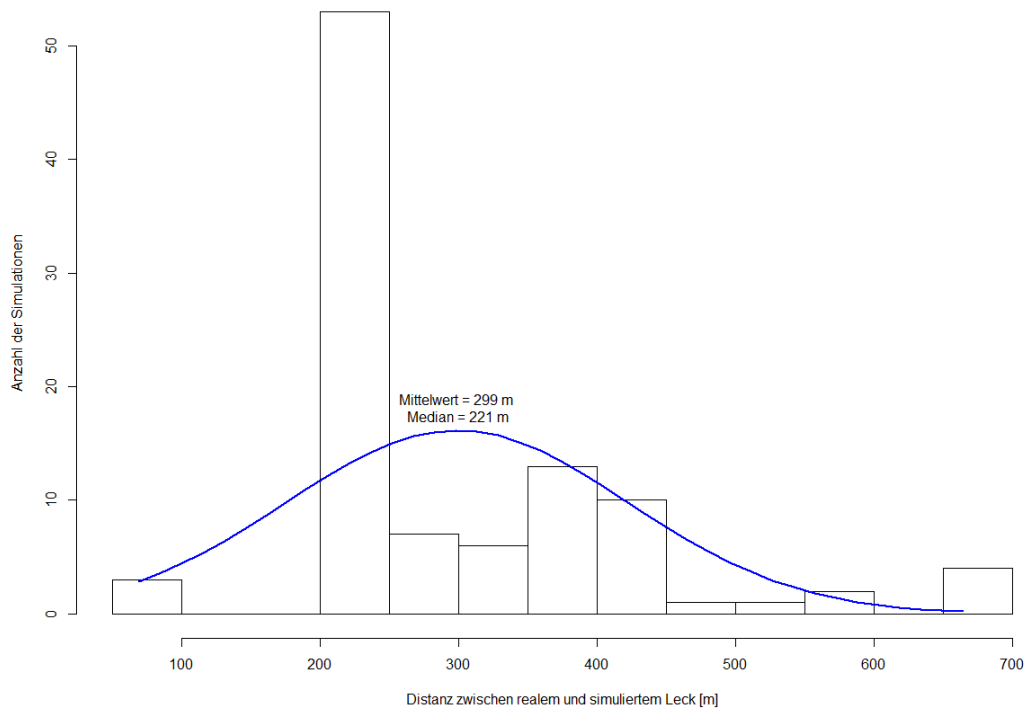
Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle

Histogramm: Distanzen; Leck: HG3880: 0.71 l/s; 18. April 2016 02:30-03:30
Netz: 'Jakim'; Gruppierung: Durchmesser & Verlegejahr; Methode: AC (r; ML)



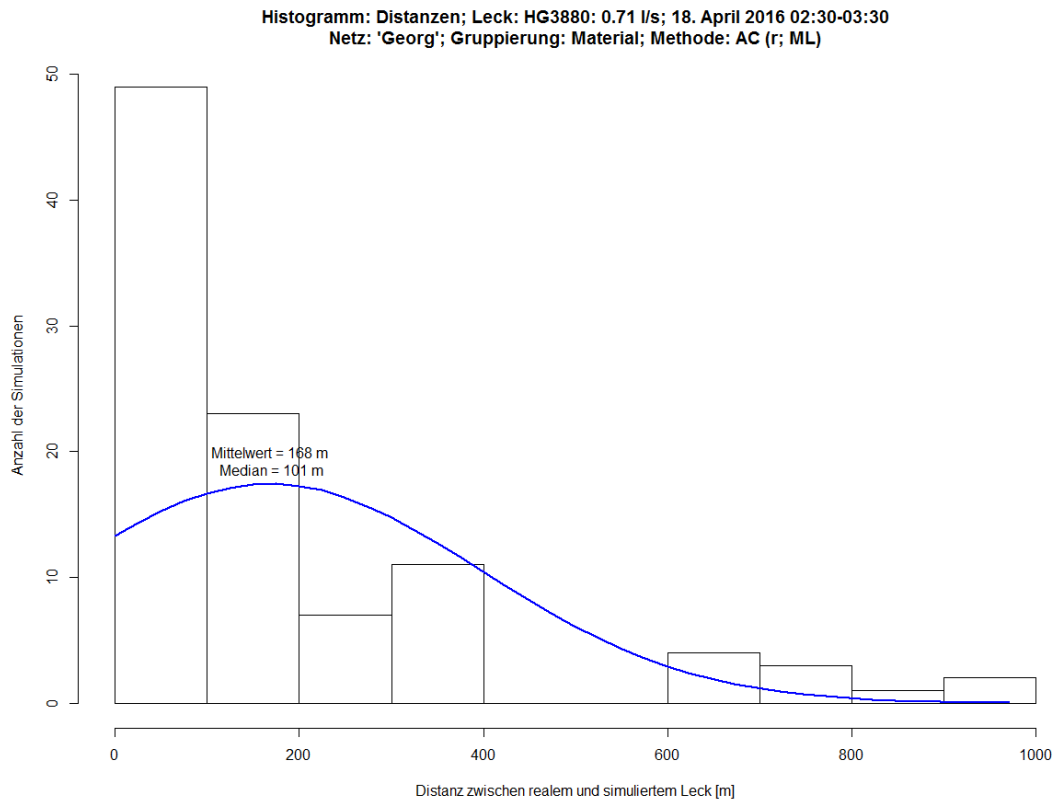
Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Durchmesser & Verlegejahr

Histogramm: Distanzen; Leck: HG3880: 0.71 l/s; 18. April 2016 02:30-03:30
Netz: 'Jakim'; Gruppierung: Zonen; Methode: AC (ML)

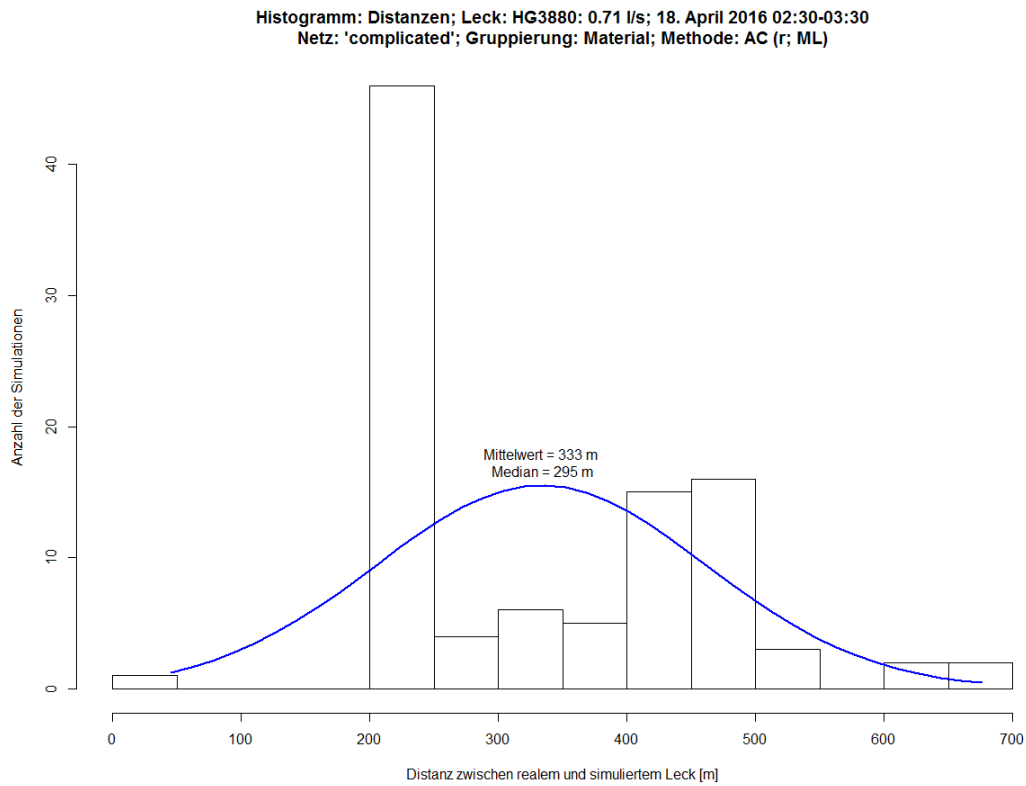


Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Zonen, AC ohne ML

Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle

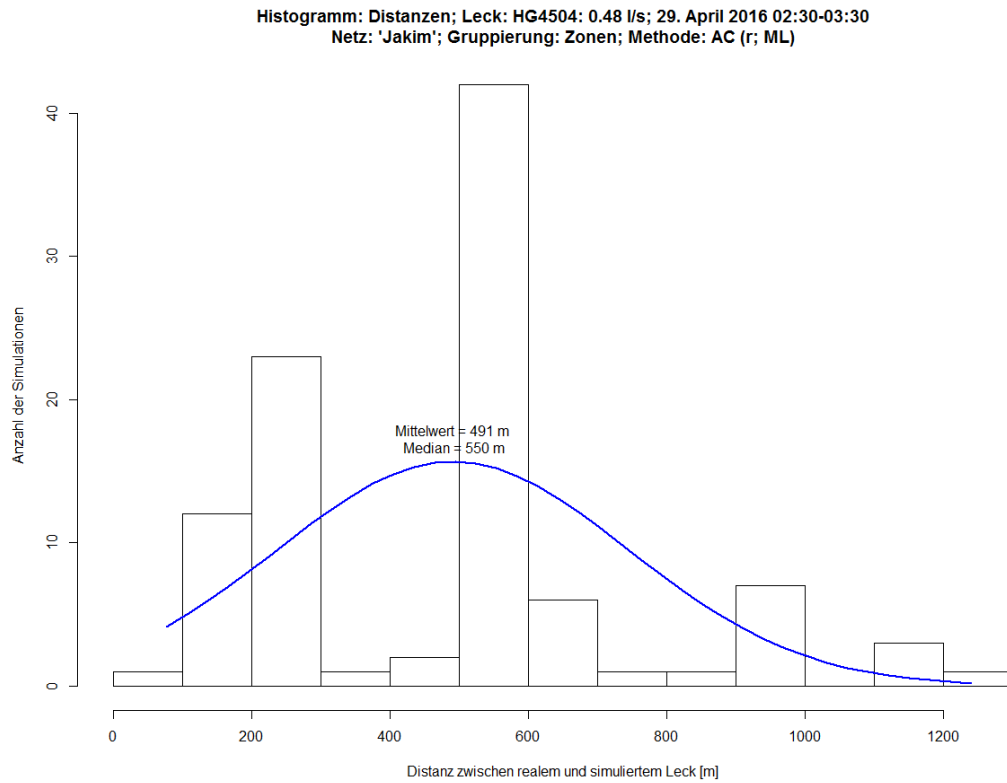


Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Material (Netz: „Georg“)

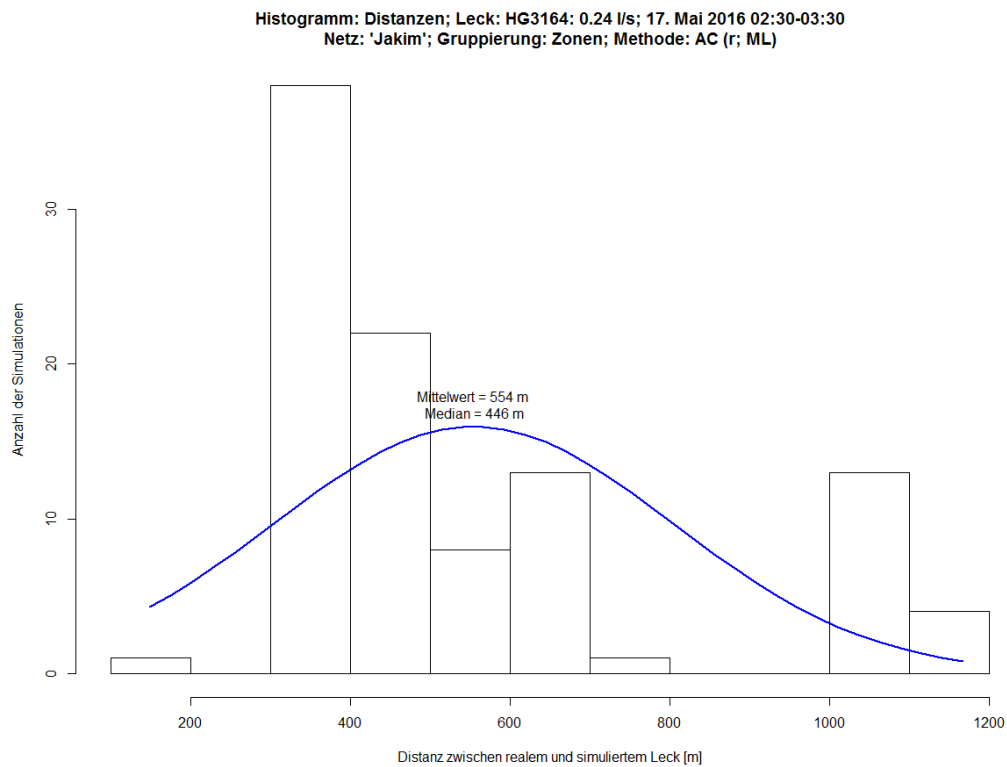


Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Material (Netz: „complicated“)

Anhang E Histogramme der berechneten Distanzen in der Leckage Lokalisierung, verschiedene Modelle

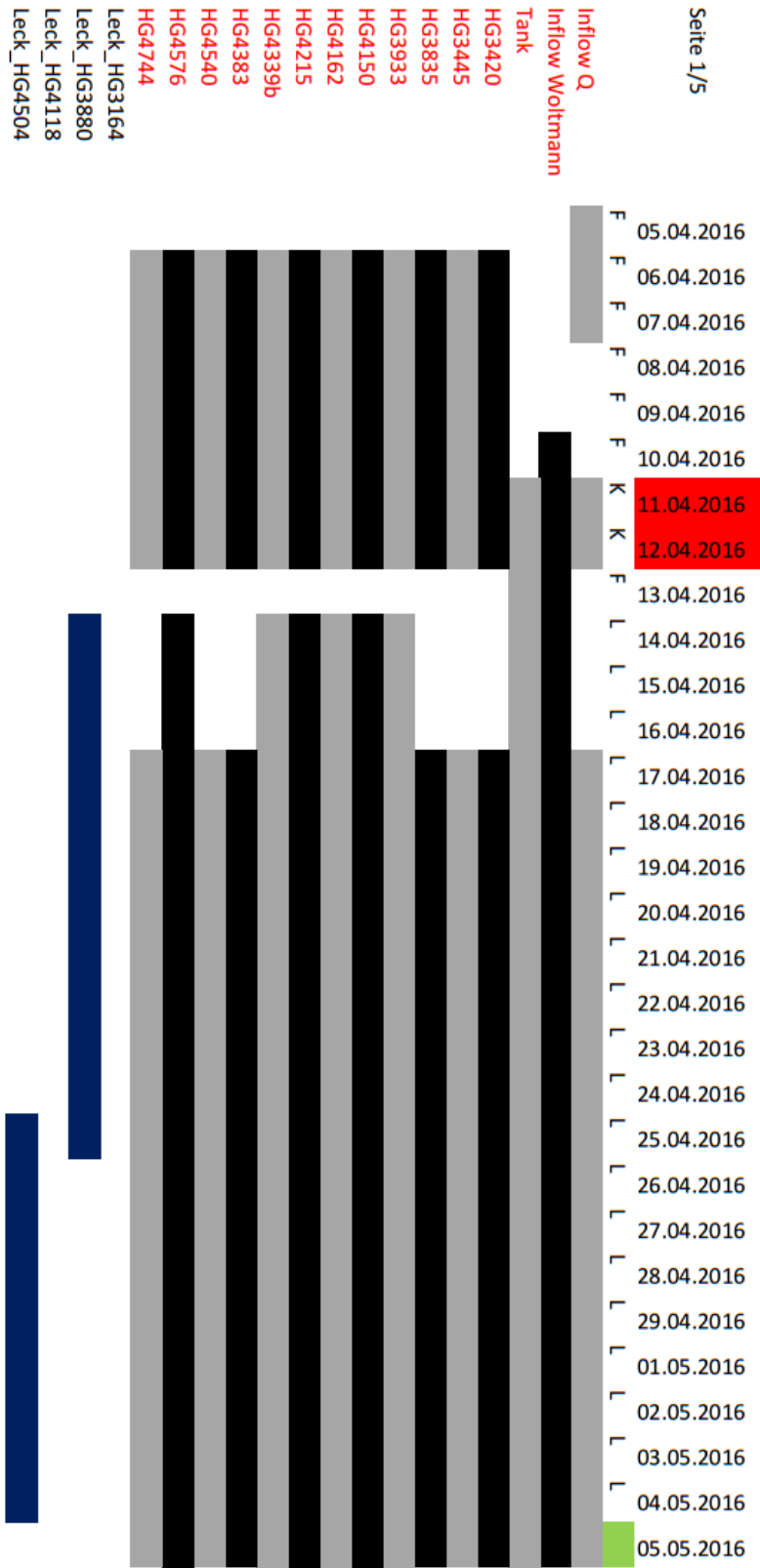


Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Zonen (Netz: „Jakim“)
(29. April 2016)



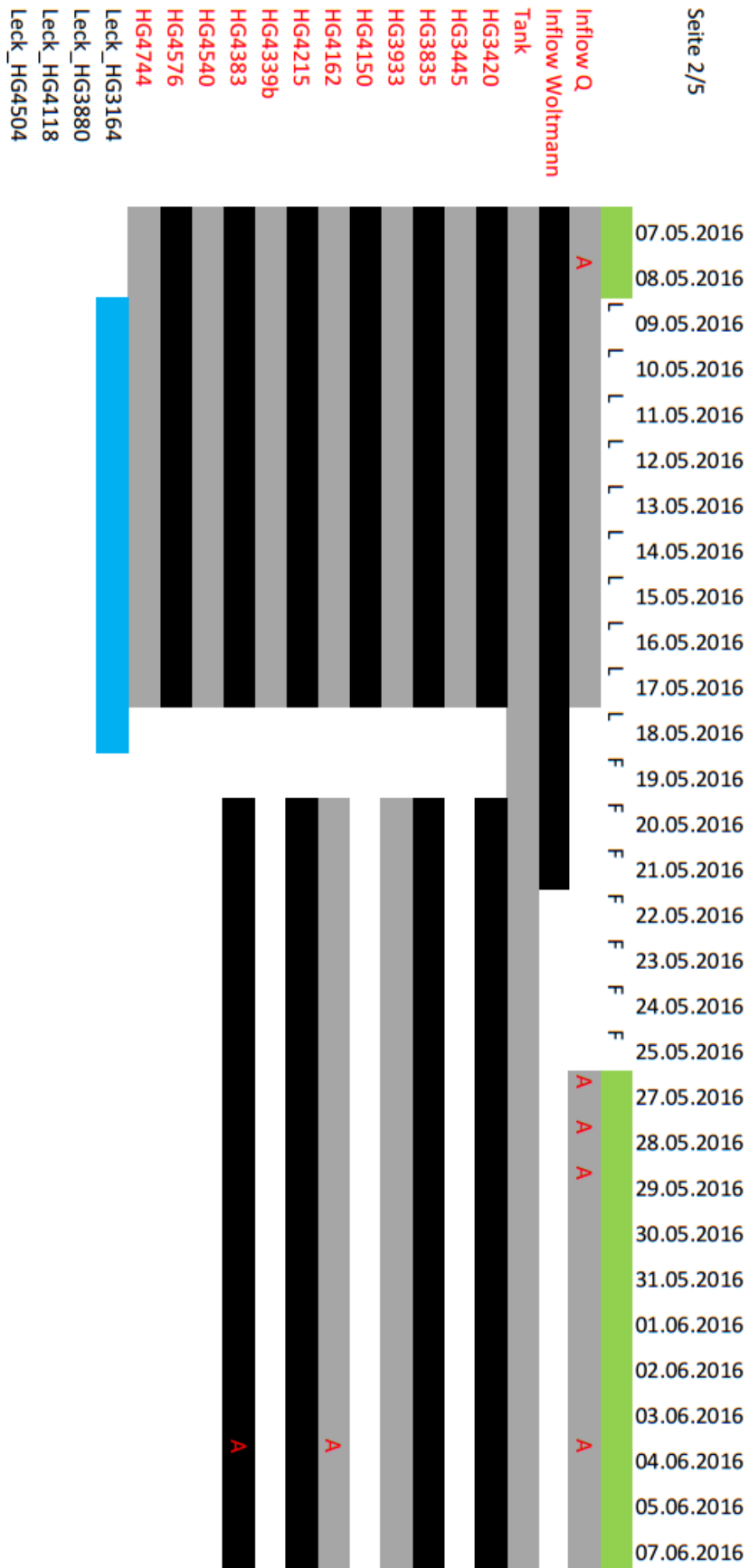
Histogramm der Distanzen der Leckage Lokalisierung, Modell: Zonen (Netz: „Jakim“)
(17. Mai 2016)

Anhang F Gantt-Diagramm des Feldversuchs in Hart bei Graz (April bis August 2016)

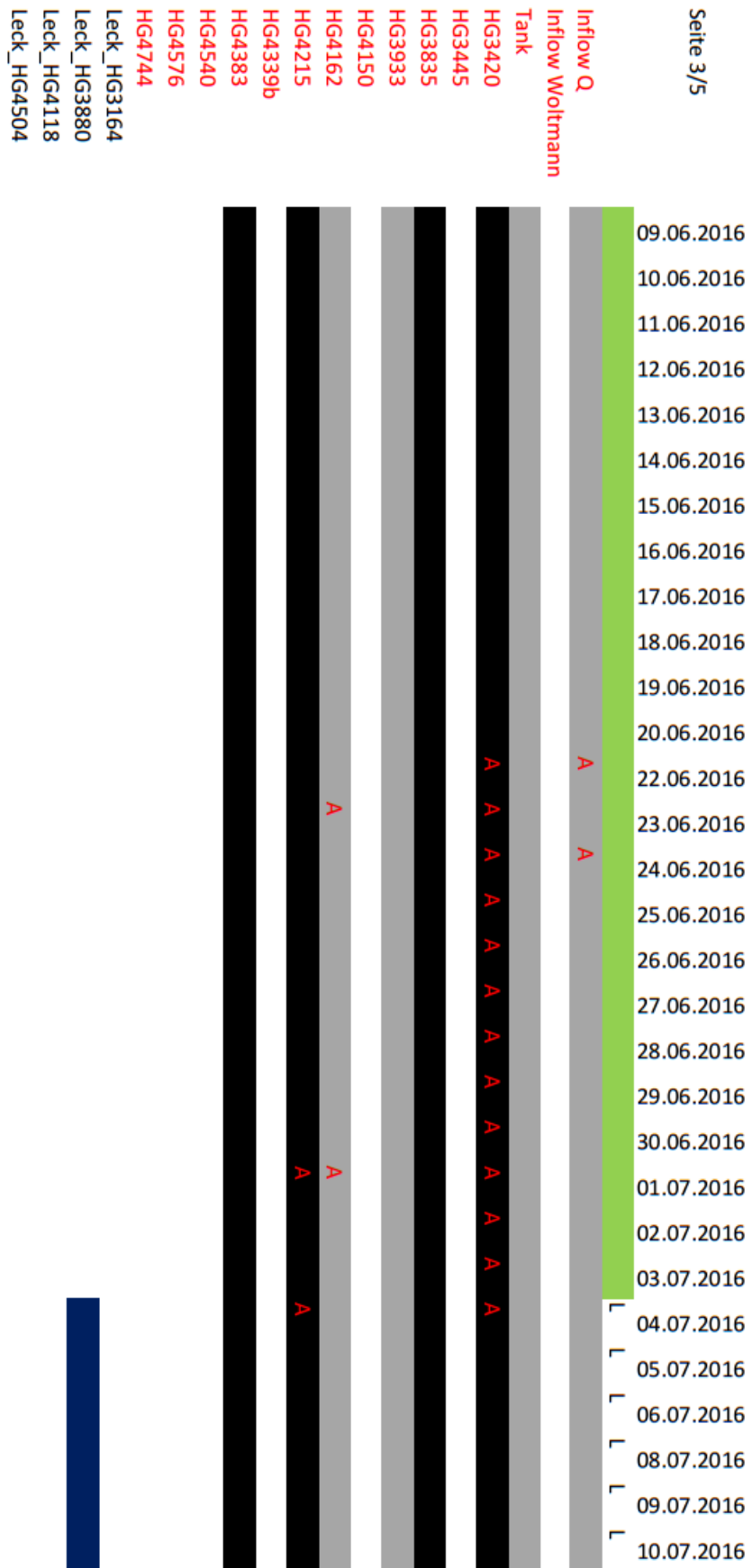


Gantt-Diagramm, Zeitstrahl Feldversuch Hart bei Graz, Teil 1 / 5

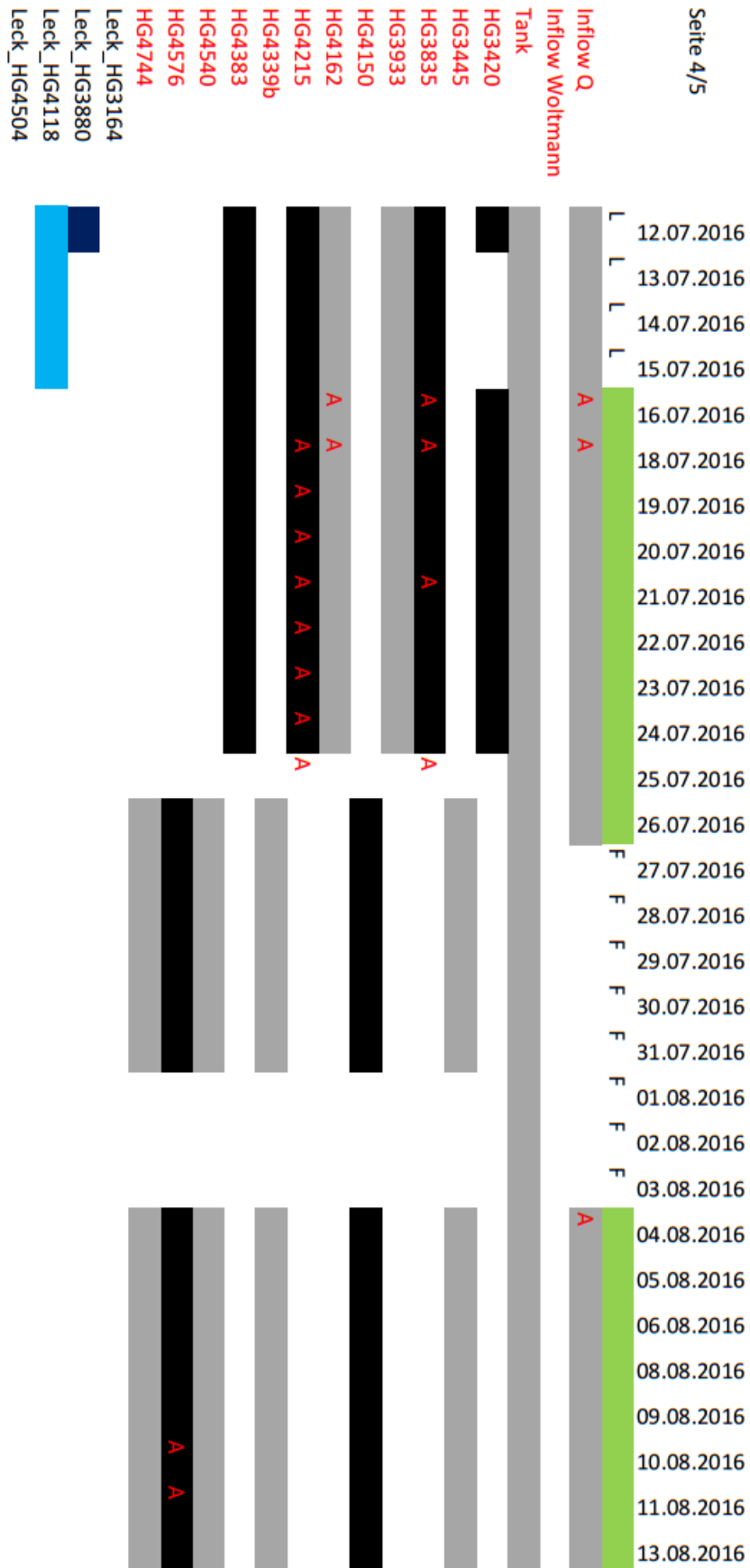
Anhang F Gantt-Diagramm des Feldversuchs in Hart bei Graz (April bis August 2016)



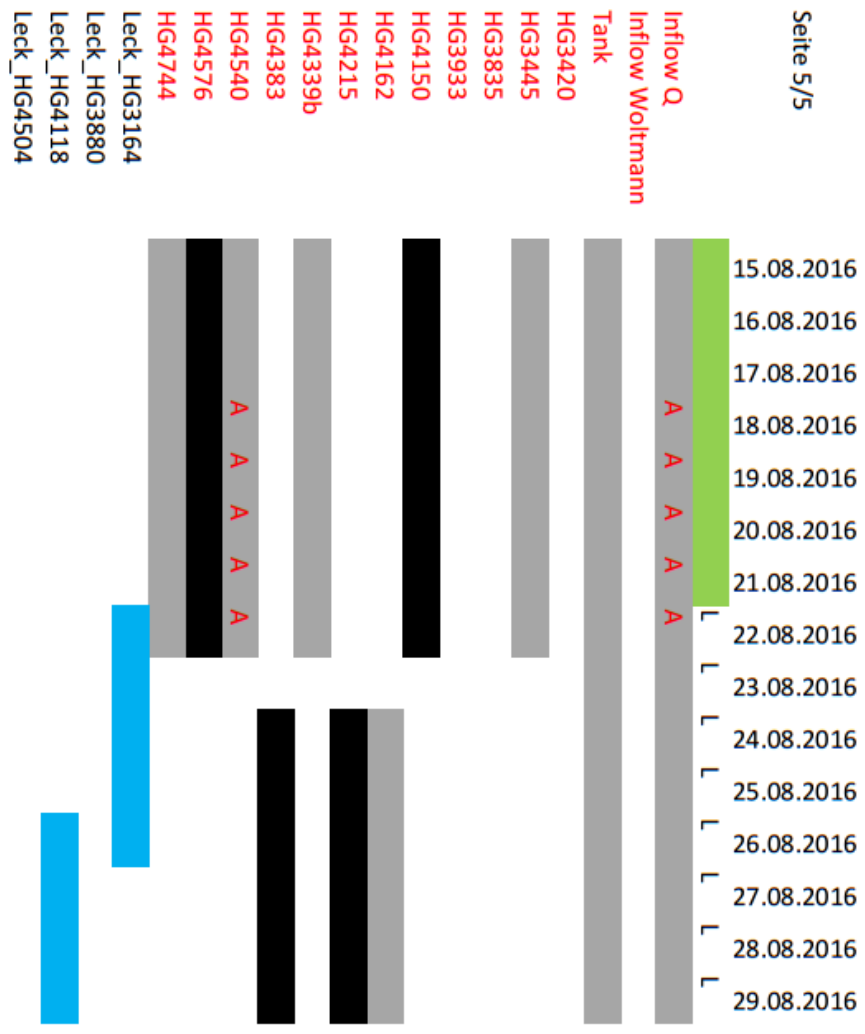
Gantt-Diagramm, Zeitstrahl Feldversuch Hart bei Graz, Teil 2 / 5



Gantt-Diagramm, Zeitstrahl Feldversuch Hart bei Graz, Teil 3 / 5



Gantt-Diagramm, Zeitstrahl Feldversuch Hart bei Graz, Teil 4 / 5



Legende:
 A ... Ausreißer
 F ... Fehlerhaft
 K ... Kalibrierungsnacht
 L ... künstliche Leckage

Gantt-Diagramm, Zeitstrahl Feldversuch Hart bei Graz, Teil 5 / 5

