



Tino Taffanek, BSc

Erweiterung und Evaluierung einer automatischen Kalibrierung für hydraulische Modelle von Trinkwassernetzen mit Differential Evolution

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuerin:

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

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, März 2019

Kontakt:
Tino Taffanek
taffanek@gmx.at

EIDESSTÄTTLICHE 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

Mein herzlicher Dank gilt allen, die mich bei meinem Studium unterstützt haben oder mir anderweitig zur Seite gestanden sind.

Zuerst möchte ich allen Personen am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau danken. Insbesondere natürlich meiner Betreuerin Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch. Weiters Dipl.-Ing. Jakim Lippacher, BSc, auf dessen Arbeit ich oft aufbauen konnte und der mir Fragen immer gern beantwortete. Auch Dipl.-Ing. Georg Arbesser-Rastburg, BSc, der mich bei einigen Fragestellungen meiner Arbeit unterstützte. David Camhy, schließlich, danke ich für die Betreuung bei der unbürokratischen Nutzung der Serverinfrastruktur des Instituts.

Ich danke meiner gesamten Familie und im Besonderen meinen Eltern für die, auch finanzielle, Unterstützung bei meinem Studium.

Ich danke meinen Kommilitonen Alex, Ian, Linda und Tina für das zusammen verbrachte Studium und die vielen verlebten lustigen Stunden.

Meinem Mitbewohner Kilian danke ich für Organisation meiner Unterkunft während des Verfassens dieser Arbeit und für die vielen gespielten Bummerl.

Ich bedanke mich bei Leonie für das Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit und bei Monika für die Korrektur der englischen Zusammenfassung.

Schließlich bedanke ich mich noch bei Patrick und Mario die während meiner gesamten Zeit in Graz stets für mich da waren.

Kurzfassung

Hydraulische Computermodelle von Trinkwassernetzen können für verschiedene Anwendungen wie Planung, Betrieb und Wasserverlustmanagement eingesetzt werden. Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten ist die Bestimmung der Modellparameter durch Kalibrierung des Modells erforderlich.

Für diese Aufgabe wurde am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau eine automatische Kalibrierung von Rohrrauheiten für hydraulische Modelle von Trinkwassernetzen entwickelt und am Trinkwassernetz der Gemeinde Hart bei Graz getestet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die automatische Kalibrierung an einem weiteren Trinkwassernetz getestet und um neue Methoden erweitert.

Zur Einsparung von Rechenzeit wurden für die automatische Kalibrierung verschiedene Abbruchkriterien getestet und eine Methode zur Festlegung und Evaluierung derselben entwickelt. Es wurde ein normiertes Kriterium festgelegt, welches unabhängig vom zugrundeliegenden Modell zwischen 0 und 1 gewählt werden kann.

Zur Evaluierung der Robustheit der Ergebnisse wurde die Streuung der Modellparameter innerhalb der Population des Optimierungsverfahrens, welches zur Kalibrierung verwendet wurde, bewertet. Die Bewertung erfolgt sowohl graphisch als auch durch die Berechnung der Standardabweichungen.

Da die Anwendung bisher nur am Netz in Hart bei Graz erfolgte, wurde die automatische Kalibrierung an einer neuen Fallstudie an einem Netz der ehemaligen Gemeinde Seiersberg evaluiert. Es konnten gute Ergebnisse erzielt werden, die auch die normativen Anforderungen aus Deutschland für Modellkalibrierung erfüllten. Die Evaluierung der neuen Methoden erfolgte an Modellen von beiden Trinkwassernetzen.

Durch die Abbruchkriterien konnte bei den beiden vorliegenden Fallstudien zwischen 60 und 80 Prozent Rechenzeit eingespart werden und dies bei annähernd gleich guter Qualität der Ergebnisse. Die Bewertung der Robustheit der Ergebnisse mittels Betrachtung der Population erzielte eine Übereinstimmung von 81 Prozent mit einer bewährten Methode, welche auf der mehrmaligen Durchführung der Kalibrierung beruht. Es konnte also mit 10 Prozent der Rechenzeit eine Übereinstimmung von 81 Prozent erzielt werden. Somit können beide Methoden als zur Anwendung geeignet bezeichnet werden.

Eine entsprechende Vorkalibrierung und Datenqualität vorausgesetzt, können mit den untersuchten Methoden der automatischen Kalibrierung sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Der nächste Schritt wäre es, die Kalibrierung von Verbräuchen, dem zweiten wichtigen Modellparameter für Trinkwassernetze, in die automatische Kalibrierung zu implementieren.

Abstract

Hydraulic computer models of water distribution systems (WDS) are used for planning, operation and water loss management. In order to obtain reliable results, it is necessary to calibrate the model parameters beforehand.

For this purpose, the Institute of Urban Water Management and Landscape Water Engineering developed an automatic calibration method for pipe roughness of WDS and tested it on the WDS of the municipality Hart bei Graz. In this thesis the automatic calibration was tested on an additional WDS and new methods were introduced.

To reduce computation time several termination criteria were tested for the automatic calibration and a method to determine and evaluate the criteria was developed. A normalized criterion was defined, which can be chosen between 0 and 1 irrespective of the underlying model.

To evaluate the robustness of the solutions the variance of the parameters within the population of the optimization method used to perform the calibration was assessed. The assessment was done graphically and by calculating the standard deviations.

Because so far, the automatic calibration has been only tested on the WDS in Hart bei Graz a new case study on a WDS of the former municipality Seiersberg was investigated. Good results were acquired, and the requirements stated in a German standard for model calibration were met. The new methods were tested on both WDS.

Due to the termination criteria between 60 and 80 percent of the computation time was saved in the two case studies, while the quality of the results was almost equally good. Evaluating the robustness by assessing the population achieved an 81 percent correspondence with a proven methodology, which relies on repeated calibration. With only 10 percent of the computational time an 81 percent correspondence was achieved. Thus, both methods can be used reliably with automatic calibration.

Presuming good data quality and pre-calibration the investigated methods for automatic calibration all yield very good results. The next step would be to implement the calibration of demands, the second important model parameter for WDS models, in the automatic calibration.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.2	Motivation	2
2	Grundlagen	3
2.1	Erstellung des Modells	3
2.1.1	Erforderliche Unterlagen	3
2.1.2	Daten des Rechnetzmmodells	3
2.1.3	Ableitung des Rechnetzmmodells	4
2.2	Kalibrierung des Modells	4
2.2.1	Siebenstufiger Ansatz zur Modellkalibrierung	4
2.2.2	Vergleichsmessung und Vergleichsrechnung	5
2.2.3	Kalibrierungsmethoden	6
2.3	Optimierungsverfahren	7
2.3.1	Differential Evolution	7
2.4	Automatische Kalibrierung	10
2.5	Programmiersprache und Tools	11
2.5.1	Python	11
2.5.2	PyCharm	11
2.5.3	EPANET	11
2.5.4	OOPNET	11
2.5.5	JENKINS	12
2.5.6	ArcGIS	12
2.5.7	TOML	12
2.5.8	Automatische Skeletonisierung	12
3	Methodik	15
3.1	Vorkalibrierung	15
3.1.1	Szenarien	15
3.1.2	Anpassung der geodätischen Sensorhöhen	16
3.1.3	Geschlossenen Schieber ausfindig machen	16
3.2	Evaluierung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung	16

3.2.1	Grundlagen und Einstellungen.....	16
3.2.2	Gruppierung der Rohrleitungen.....	17
3.2.3	Evaluierung der Modellgüte	17
3.2.4	Evaluierung der Modellqualität.....	19
3.3	Abbruchkriterien	20
3.3.1	Übersicht.....	20
3.3.2	Festlegung der Kriterien.....	22
3.3.3	Evaluierung der Kriterien	22
3.3.4	Normiertes Abbruchkriterium	23
4	Fallstudien.....	25
4.1	Seiersberg	25
4.1.1	Geografische und geodätische Lage	25
4.1.2	Ablauf der Messungen	26
4.1.3	Erstellung des hydraulischen Modells.....	29
4.1.4	Eigenschaften des hydraulischen Modells	30
4.2	Hart bei Graz	33
4.2.1	Geografische und geodätische Lage	33
4.2.2	Ablauf der Messungen	34
4.2.3	Erstellung des hydraulischen Modells.....	36
4.2.4	Eigenschaften des hydraulischen Modells	38
5	Ergebnisse	41
5.1	Ergebnisse der Vorkalibrierung	41
5.1.1	Verwendete Szenarien.....	41
5.1.2	Ergebnis der Anpassung der geodätischen Sensorhöhen	43
5.1.3	Positionen der geschlossenen Schieber	44
5.2	Ergebnisse der Anwendung an der Fallstudie „Seiersberg“	47
5.2.1	Ergebnisse der Gruppierung der Rohrleitungen	47
5.2.2	Evaluierung der Modellgüte	50
5.2.3	Evaluierung der Modellqualität.....	56
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Fallstudie „Hart bei Graz“	60
5.3.1	Ergebnisse der Gruppierung der Rohrleitungen	61

5.3.2	Ergebnisse der Evaluierung von Modellgüte und Modellqualität	62
5.4	Ergebnisse der Abbruchkriterien	63
5.4.1	Fallstudie „Seiersberg“	63
5.4.2	Fallstudie „Hart bei Graz“	69
5.5	Ergebnisse der Streuung der Population des Optimierers	74
5.5.1	Fallstudie „Seiersberg“	75
5.5.2	Fallstudie „Hart bei Graz“	80
6	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse.....	87
6.1	Fallstudie Seiersberg	87
6.2	Fallstudie Hart bei Graz	88
6.3	Abbruchkriterien	88
6.4	Streuung der Population des Optimierers	89
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	91
	Literaturverzeichnis	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schema der impliziten Kalibrierung (Lippacher, 2018).....	7
Abbildung 2-2: Schema des Differential Evolution Algorithmus.....	8
Abbildung 2-3: Berechnung von $v_{i,G+1}$ durch Mutation dargestellt für eine zweidimensionale Fitnessfunktion (Storn & Price, 1995)	9
Abbildung 3-1: Grundlegende Einstellungen in der Konfigurationsdatei der automatischen Kalibrierung	17
Abbildung 3-2: Populationsradius im zweidimensionalen Parameterraum.....	21
Abbildung 4-1: Lage des Untersuchungsgebiets in Seiersberg (Google Maps, 2018, mod.).....	26
Abbildung 4-2: Entnahmen und Druckmesspunkte Seiersberg (SAS Styrian Aqua Service GmbH, 2015, mod.).....	28
Abbildung 4-3: Vollständiges hydraulisches Modell Seiersberg	29
Abbildung 4-4: Skeletonisiertes hydraulisches Modell Seiersberg	30
Abbildung 4-5: Histogramm der Verlegejahre Seiersberg	31
Abbildung 4-6: Histogramm der Einbautendichte Seiersberg.....	31
Abbildung 4-7: Histogramm der Rohrdurchmesser Seiersberg	32
Abbildung 4-8: Diagramm der Rohrmaterialien Seiersberg	32
Abbildung 4-9: Lage des Untersuchungsgebietes in Hart bei Graz (Google Maps, 2018, mod.)	33
Abbildung 4-10: Entnahmen und Druckmesspunkte Hart bei Graz (Lippacher, 2018).....	35
Abbildung 4-11: Vollständiges hydraulisches Modell Hart bei Graz	37
Abbildung 4-12: Skeletonisiertes hydraulisches Modell Hart bei Graz	38
Abbildung 4-13: Histogramm der Verlegejahre Hart bei Graz	39
Abbildung 4-14: Histogramm der Einbautendichte Hart bei Graz.....	39
Abbildung 4-15: Histogramm der Rohrdurchmesser Hart bei Graz	40
Abbildung 4-16: Diagramm der Rohrmaterialien Hart bei Graz	40
Abbildung 5-1: Ergebnis der Rauheit nach Zonen – Seiersberg	45
Abbildung 5-2: geschlossener Schieber – Seiersberg (SAS Styrian Aqua Service GmbH, 2015, mod.)	46
Abbildung 5-3: geschlossener Schieber & geschlossene Leitung – Hart bei Graz (Lippacher, 2018)	47
Abbildung 5-4: Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg	48
Abbildung 5-5: Gruppierung „Zonen fein“ – Seiersberg.....	49
Abbildung 5-6: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Verlegejahr“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7	50
Abbildung 5-7: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Einbautendichte“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7	51

Abbildung 5-8: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Durchmesser“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7	51
Abbildung 5-9: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Material“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7.....	52
Abbildung 5-10: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Zonen grob“, Gruppennummern laut Abbildung 5-4.....	52
Abbildung 5-11: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Zonen fein“, Gruppennummern laut Abbildung 5-5	53
Abbildung 5-12: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Kombination“, Gruppennummern laut Tabelle 5-8	53
Abbildung 5-13: Korrelationsgerade der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Verlegejahr“ – Seiersberg	54
Abbildung 5-14: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Verlegejahr“	57
Abbildung 5-15: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Verlegejahr“	57
Abbildung 5-16: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Durchmesser“	58
Abbildung 5-17: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Material“.....	58
Abbildung 5-18: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Zonen grob“	59
Abbildung 5-19: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Zonen fein“	59
Abbildung 5-20: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Kombination“.....	60
Abbildung 5-21: Gruppierung „Zonen“ – Hart bei Graz	61
Abbildung 5-22: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg	64
Abbildung 5-23: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg	65
Abbildung 5-24: Entwicklung des Populationsradius bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg.....	65
Abbildung 5-25: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Seiersberg.....	67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-26: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Seiersberg	67
Abbildung 5-27: Entwicklung des Populationsradius bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Seiersberg	68
Abbildung 5-28: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz.....	70
Abbildung 5-29: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz.....	70
Abbildung 5-30: Entwicklung des Populationsradius bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz	71
Abbildung 5-31: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz	72
Abbildung 5-32: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz	73
Abbildung 5-33: Entwicklung des Populationsradius bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz	73
Abbildung 5-34: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 5 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg.....	75
Abbildung 5-35: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 10 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg	76
Abbildung 5-36: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 20 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg	76
Abbildung 5-37: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 30 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg	77
Abbildung 5-38: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Verlegejahr“ – Seiersberg.....	78
Abbildung 5-39: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Einbautendichte“ – Seiersberg.....	78
Abbildung 5-40: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Durchmesser“ – Seiersberg.....	78
Abbildung 5-41: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Material“ – Seiersberg	79
Abbildung 5-42: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg.....	79
Abbildung 5-43: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Zonen fein“ – Seiersberg	79
Abbildung 5-44: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Kombination“ – Seiersberg	80
Abbildung 5-45: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 5 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz	81

Abbildung 5-46: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 10 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz.....	81
Abbildung 5-47: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 15 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz.....	82
Abbildung 5-48: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 20 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz.....	82
Abbildung 5-49: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Verlegejahr“ – Hart bei Graz	83
Abbildung 5-50: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Einbautendichte“ – Hart bei Graz	83
Abbildung 5-51: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Durchmesser“ – Hart bei Graz.....	84
Abbildung 5-52: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Material“ – Hart bei Graz	84
Abbildung 5-53: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz.....	84
Abbildung 5-54: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Kombination fein“ – Hart bei Graz	85
Abbildung 5-55: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Zonen“ – Hart bei Graz.....	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Siebenstufiger Ansatz zur Modellkalibrierung (Ormsbee & Lingireddy, 1997, mod.).....	5
Tabelle 2-2:	Mutationsstrategien des Differential Evolution Algorithmus (Steffelbauer, 2018, mod.).....	9
Tabelle 3-1:	Zur Evaluierung festgelegte Werte für das normierte Epsilon-Kriterium	23
Tabelle 4-1:	Entnahmeplan Seiersberg Phase 1	27
Tabelle 4-2:	Entnahmeplan Seiersberg Phase 2.....	27
Tabelle 4-3:	Bezeichnung der Druckmesspunkte im hydraulischen Modell Seiersberg	29
Tabelle 4-4:	Entnahmeplan Hart bei Graz Phase 1 (Ramaseder, 2016; Lippacher, 2018, mod.)	35
Tabelle 4-5:	Entnahmeplan Hart bei Graz Phase 2 (Ramaseder, 2016; Lippacher, 2018, mod.)	36
Tabelle 5-1:	Entnahmemessungen Szenarien Phase 1 – Seiersberg	41
Tabelle 5-2:	Entnahmemessungen Szenarien Phase 2 – Seiersberg	42
Tabelle 5-3:	Entnahmemessungen Szenarien Phase 1 – Hart bei Graz (Lippacher, 2018, mod.)	42
Tabelle 5-4:	Entnahmemessungen Szenarien Phase 2 – Hart bei Graz (Lippacher, 2018, mod.)	42
Tabelle 5-5:	Anpassung der geodätischen Höhen im hydraulischen Modell Seiersberg	43
Tabelle 5-6:	Anpassung der geodätischen Höhen im hydraulischen Modell Hart bei Graz (Lippacher, 2018, mod.).....	44
Tabelle 5-7:	Gruppierung der Rohrleitung nach Parametern – Seiersberg.....	48
Tabelle 5-8:	Gruppierung „Kombination“ nach Verlegejahr und Einbautendichte – Seiersberg	49
Tabelle 5-9:	Standardabweichungen der Streuung der Rohrrauheiten der AC – Seiersberg.....	54
Tabelle 5-10:	Zulässige Abweichungen der Einzelmessungen und Grenzen für den Erwartungswert der Druckabweichung nach DVGW Arbeitsblatt 303-1	55
Tabelle 5-11:	Abweichungen der Messungen an den Messstellen und Erwartungswerte der Druckabweichungen für Gruppierung nach Verlegejahr, Einbautendichte, Durchmesser und Material	55
Tabelle 5-12:	Abweichungen der Messungen an den Messstellen und Erwartungswerte der Druckabweichungen für	

	Gruppierung nach Zonen grob, Zonen fein und Kombination.....	56
Tabelle 5-13:	Fitnesswert und mittlere Druckabweichung der Kalibrierungsszenarien – Seiersberg	56
Tabelle 5-14:	Mittlere Druckabweichung der Validierungsszenarien und Differenz zu den Kalibrierungsszenarien – Seiersberg	60
Tabelle 5-15:	Gruppierung der Rohrleitung nach Parametern – Hart bei Graz.....	61
Tabelle 5-16:	Gruppierung „Kombination grob“ nach Verlegejahr und Durchmesser – Hart bei Graz	62
Tabelle 5-17:	Gruppierung „Kombination fein“ nach Einbautendichte und Verlegejahr – Hart bei Graz	62
Tabelle 5-18:	Standardabweichungen der Streuung der Rohrrauheiten der AC – Hart bei Graz	62
Tabelle 5-19:	Fitnesswert und mittlere Druckabweichung der Kalibrierungsszenarien – Hart bei Graz	63
Tabelle 5-20:	Mittlere Druckabweichung der Validierungsszenarien und Differenz zu den Kalibrierungsszenarien – Hart bei Graz	63
Tabelle 5-21:	Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg.....	64
Tabelle 5-22:	Erreichter Fitnesswert der Abbruchkriterien – Seiersberg	66
Tabelle 5-23:	Erreichte Generation der Abbruchkriterien – Seiersberg	66
Tabelle 5-24:	Erreichter Fitnesswert des normierten Epsilon-Kriteriums – Seiersberg	68
Tabelle 5-25:	Erreichte Generation des normierten Epsilon-Kriteriums – Seiersberg	69
Tabelle 5-26:	Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz.....	69
Tabelle 5-27:	Erreichter Fitnesswert der Abbruchkriterien – Hart bei Graz.....	71
Tabelle 5-28:	Erreichte Generation der Abbruchkriterien Hart bei Graz	72
Tabelle 5-29:	Erreichter Fitnesswert des normierten Epsilon-Kriteriums – Hart bei Graz	74
Tabelle 5-30:	Erreichte Generation des normierten Epsilon-Kriteriums – Hart bei Graz	74
Tabelle 5-31:	Vergleich der sortierten Standardabweichungen aus der Streuung der Rauheiten der Population des Optimierers mit der Streuung der Rauheiten aus 10 AC-Ergebnissen – Seiersberg	80
Tabelle 5-32:	Vergleich der sortierten Standardabweichungen aus der Streuung der Rauheiten der Population des Optimierers mit der Streuung der Rauheiten aus 10 AC-Ergebnissen – Hart bei Graz	86
Tabelle 6-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse – Seiersberg	87
Tabelle 6-2:	Zusammenfassung der Ergebnisse – Hart bei Graz	88

Tabelle 6-3:	Evaluierung der allgemeinen Abbruchkriterien	89
Tabelle 6-4:	Evaluierung des normierten Abbruchkriteriums.....	89
Tabelle 6-5:	Übereinstimmung der Streuungen von Differential Evolution und automatischer Kalibrierung	90
Tabelle 7-1:	Vergleich der mittleren Druckabweichung über Kalibrierungs- und Validierungsszenarien für automatische und manuelle Kalibrierung	91

Abkürzungsverzeichnis

AC	Automatische Kalibrierung (automatic calibration)
DE	Differential Evolution
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
GGG	Duktiler Grauguss
GIS	Geoinformationssystem
Guss	Gusseisen
Kal	Kalibrierung
LF	Lastfall (auch Szenario)
m.ü.A.	Meter über Adria
mWS	Meter Wassersäule
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte (high density)
PE-RC	Polyethylen rissbeständig (resistant to cracks)
PVC	Polyvinylchlorid
SAS GmbH	Styrian Aqua Service GmbH
ST	Stahl
SWW	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz
Val	Validierung
WDS	Wasserverteilungssystem (water distribution system)

1 Einleitung

Hydraulische Computermodelle von Trinkwassernetzen können für viele verschiedene Anwendungen eingesetzt werden. Zu den Anwendungsmöglichkeiten zählen unter anderem:

- Planung und Dimensionierung von Trinkwassernetzen
- Optimierung des Betriebs von Trinkwassernetzen
- Modellbasierte Lokalisierung von Leckagen
- Modellierung der Trinkwasserqualität

Wie bei allen Computermodellen müssen die Modellparameter für Modelle von Trinkwassernetzen kalibriert werden bevor man sinnvolle Ergebnisse erhält (Savic u. a., 2009). Die beiden wichtigsten Modellparameter bei Trinkwassernetzen sind Rohrrauheiten und Verbräuche. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Kalibrierung von Rohrrauheiten.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau wurde eine automatische Kalibrierung (AC) von Rohrrauheiten für hydraulische Modelle von Trinkwassernetzen entwickelt und am Trinkwassernetz der Gemeinde Hart bei Graz getestet.

Zur Einsparung von Rechenzeit soll für das beim vorliegenden Algorithmus verwendete evolutionäre Optimierungsverfahren (Differential Evolution) ein geeignetes Abbruchkriterium gefunden werden. Es sollen verschiedene mögliche Abbruchkriterien untersucht, evaluiert und verglichen werden, um eine für die praktische Anwendung der automatischen Kalibrierung einsetzbare Variante zu finden.

Eine bisher für die automatische Kalibrierung eingesetzte Methode zur Überprüfung der Modellqualität ist ebenfalls sehr rechenzeitintensiv. Sie beruht auf einer wiederholten Berechnung der Ergebnisse und einer Evaluierung der Streuung derselben. Da ein populationsbasiertes Optimierungsverfahren eingesetzt wird, soll getestet werden, ob sich aus der Streuung der Ergebnisse der verschiedenen Individuen innerhalb der Population ebenfalls eine Bewertung der Modellqualität herleiten lässt.

Da die automatische Kalibrierung bisher nur für das Trinkwassernetz in Hart bei Graz angewendet wurde, sollen die Ergebnisse der AC mit einer neuen Fallstudie aus dem Trinkwassernetz der Gemeinde Seiersberg-Pirka evaluiert werden. Hierzu ist ein hydraulisches Modell aufzustellen und anschließend mit der AC zu kalibrieren. Die neu zu entwickelnden Methoden (Abbruchkriterium und Evaluierung der Modellqualität) sollen sowohl an der neuen Fallstudie in Seiersberg als auch an der bereits verwendeten Fallstudie Hart bei Graz getestet werden.

1.2 Motivation

Im Rahmen einer Studienarbeit für eine Lehrveranstaltung am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau (SWW) hatte ich die Chance, die automatische Kalibrierung selbst anzuwenden. Vor allem die Verwendung eines evolutionären Optimierungsverfahrens zur Modellkalibrierung weckte sofort mein Interesse. Da ich mich bei meinem Masterstudium hauptsächlich im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft vertieft hatte, war es naheliegend, auch in diesem Bereich die Masterarbeit zu absolvieren. Deshalb fragte ich um eine Masterarbeit in Zusammenhang mit der automatischen Kalibrierung an und brachte meine Ideen ein, die ich bei der Studienarbeit gewonnen hatte. Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis dieser Bemühungen.

2 Grundlagen

Die Grundlagen von Modellerstellung und Modellkalibrierung werden in diesem Kapitel dargelegt. Weiters wird das verwendete Optimierungsverfahren erklärt und die Grundzüge der automatischen Kalibrierung vorgestellt. Auf Software und Programmiersprache wird ebenfalls eingegangen.

2.1 Erstellung des Modells

In diesem Kapitel wird die Erstellung eines Rechnernetzmodells nach DVGW GW 303-1 (2016) erläutert. Es wird auf die erforderlichen Unterlagen, die erforderlichen Daten und die Ableitung des Rechnernetzmodells daraus eingegangen. Auf Vergleichsmessung und Vergleichsrechnung zur Kalibrierung des Modells wird im nächsten Kapitel eingegangen.

2.1.1 Erforderliche Unterlagen

Für eine reale Abbildung des Systems in Modell sind die Rohrnetzpläne mit der Lage aller Leitungen, Einbindungen und Speiseanlagen sowie alle sonstigen netzbeschreibenden Unterlagen notwendig. Druckzonen und planmäßig geschlossene Absperrarmaturen sind zu kennzeichnen. Üblicherweise können diese Unterlagen aus einem GIS abgeleitet werden. (DVGW, 2016)

2.1.2 Daten des Rechnernetzmodells

Folgende Daten sind für das Rechnernetzmodell erforderlich:

- Rohrinnendurchmesser
- Rohrleitungslängen
- betriebliche Rauheit
- Drücke an Einspeisestellen und Druckregelanlagen
- geodätische Höhen an den Knoten
- Lufttemperatur
- Luftdruck
- Einspeisemenge
- Verbrauch je Knoten oder Leitung
- Temperatur des Mediums
- Dichte des Mediums
- kinematische Viskosität des Mediums

Zusätzliche Informationen, wie beispielsweise Verlegejahr oder Leitungsmaterial können bei der Kalibrierung als Metadaten verwendet werden. (DVGW, 2016)

2.1.3 Ableitung des Rechenetzmodells

Grundsätzlich besteht das Rechenetzmodell aus Knoten und Kanten, wobei eine Kante üblicherweise einen Rohrleitungsabschnitt mit gleichbleibenden hydraulischen Eigenschaften abbildet. Die Knoten sind virtuelle Elemente, die im Modell Anfang und Ende von Kanten definieren. Der reale Leitungsverlauf soll lage-treu nachgebildet werden, um die Orientierung zu erleichtern. In vermaschten Bereichen sollen alle Leitungen abgebildet werden und allfällige Vereinfachungen dürfen keinen hydraulischen Auswirkungen haben. Beispielsweise können Stichleitungen ohne Verbrauch entfernt werden. Armaturen wie Schieber und Hydranten sollten ebenfalls als Knoten im Modell abgebildet werden. (DVGW, 2016)

Die betriebliche Rauheit fasst alle widerstandsbildenden Anteile einer Leitung oder eines Netzes zusammen. Die Rauheit ist grundsätzlich durch Vergleichsmessung und Vergleichsrechnung zu bestimmen (2.2). Ist dies nicht möglich, können folgende Richtwerte verwendet werden: Für Fern- und Zubringerleitungen 0,1 mm, für Leitungen mit weitgehender gestreckter Leitungsführung 0,4 mm und für vermaschte Leitungen 1,0 mm. (DVGW, 2016)

Einspeisedrücke und Einspeisemessungen sowie die geodätischen Höhen sind mit einer vorgegebenen Genauigkeit zu implementieren. Die Verbräuche werden im Netz entsprechend der Kunden verteilt. Grundlage dafür sind die Zählerablesungen für den benutzten Zeitraum. Der Einfluss der Wassertemperatur auf das Rechenergebnis ist vernachlässigbar. Daher können Dichte und kinematische Viskosität auf 4 °C bezogen werden. (DVGW, 2016)

2.2 Kalibrierung des Modells

In diesem Kapitel wird zuerst ein siebenstufiger Ansatz zur allgemeinen Modellkalibrierung vorgestellt und dann auf die Durchführung von Vergleichsmessungen und Vergleichsrechnungen nach DVGW GW 303-1 (2016) eingegangen. Weiters werden verschiedene Kalibrierungsmethoden vorgestellt, und auf die Verwendete näher eingegangen.

2.2.1 Siebenstufiger Ansatz zur Modellkalibrierung

Nach dem Sammeln der Daten und der Erstellung des Modells müssen die dem Modell zugeordneten Parameter bestimmt werden. Üblicherweise können für hydraulische Modelle von Trinkwassernetzen zwei Parameter bestimmt werden. Rohrrauheiten und Verbräuche an Knoten. In dieser Arbeit werden nur Rohrrauheiten bestimmt. Da eine zuverlässige und ökonomische Erfassung dieser Parameter sehr schwierig ist, werden sie durch Modellkalibrierung bestimmt. Prinzipiell werden die Modellparameter variiert, bis das Modell eine hinreichend genaue

Anpassung an im Feld gemessene Daten aufweist. Zur Kalibrierung eines Modells kann von einem siebenstufigen Ansatz (Tabelle 2-1) ausgegangen werden. (Ormsbee & Lingireddy, 1997)

Tabelle 2-1: Siebenstufiger Ansatz zur Modellkalibrierung (Ormsbee & Lingireddy, 1997, mod.)

Stufe	Beschreibung
1	Festlegung der Verwendung des Modells
2	Erste Abschätzung der Modellparameter
3	Sammeln der Daten zur Kalibrierung
4	Erste Evaluierung der Modellergebnisse
5	Vorkalibrierung
6	Sensitivitätsanalyse
7	Feinkalibrierung

In dieser Arbeit werden die Modelle nur für die Evaluierung der vorgestellten Methoden und der Kalibrierung selbst verwendet. Für die erste Abschätzung der Parameter wurden Richtwerte verwendet (2.1.3). Die Daten zur Kalibrierung entstammen der verwendeten Fallstudien (4). Die erste Evaluierung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen der Vorkalibrierung (3.1). Da in dieser Arbeit nur ein Parameter kalibriert wird, wurde auf eine Sensitivitätsanalyse verzichtet. Die Feinkalibrierung erfolgte mit der automatischen Kalibrierung (2.4) und wurde umfangreich evaluiert (3.2).

2.2.2 Vergleichsmessung und Vergleichsrechnung

Für das Sammeln von Daten zur Kalibrierung und für die Evaluierung der Modellergebnisse im Rahmen der Kalibrierung wird hier auf die Vorgaben zu Vergleichsmessung und Vergleichsrechnung nach DVGW GW 303-1 (2016) eingegangen.

Bei der Vergleichsmessung müssen ausreichende Druckverluste erzeugt werden, um die betriebliche Rauheit ermitteln zu können. Dazu werden üblicherweise Entnahmen an Hydranten (Fire-Flow-Test) durchgeführt. Eine Durchführung der Messungen während verbrauchsarmen Zeiten (Nachtminimum) hat sich als vorteilhaft erwiesen. Der Einfluss von Zufälligkeiten im Verbrauchsverhalten kann so weitgehend eliminiert werden. Bei den Messungen ist darauf zu achten, dass die Messwerte erst verwendet werden, wenn sich stationäre Strömungszustände im System eingestellt haben. Folgende Werte sind zeitgleich zu erfassen:

- Drücke und Durchflüsse sowie Behälterstände an den Einspeisestellen
- Durchflüsse an den Ausspeisestellen, ggf. auch Drücke
- Drücke im Netz, ggf. auch Durchflüsse
- Gezielte Netzentnahmen
- Verbrauch von großen Sonderkunden (DVGW, 2016)

Die Vergleichsrechnung ist die Nachbildung eines gemessenen Betriebszustandes und der Ermittlung der betrieblichen Rauheit. Zu Beginn der Rechnung wird von einer einheitlichen Rauheit für das gesamte Rohrnetz ausgegangen. Die Annahme unterschiedlicher Rauheiten ist zulässig, wenn dies durch Besonderheiten wie unterschiedliche Materialien begründet werden kann. Erheblich vom Messwert abweichende Rechenwerte können unter anderem auf geschlossene Absperreinrichtungen hinweisen. Geschlossene Absperreinrichtungen werden in die Vergleichsrechnung übernommen. Eine Vergleichsrechnung gilt als zutreffend, wenn die Abweichung innerhalb der in Kapitel 3.2.3.3. angeführten Grenzwerte liegt. (DVGW, 2016)

2.2.3 Kalibrierungsmethoden

Bei der Feinkalibrierung, die dem Anpassen der Vergleichsrechnung an die Vergleichsmessung entspricht, können die Verfahren in drei Kategorien eingeteilt werden. Iterative, explizite und implizite Kalibrierung. (Savic u. a., 2009)

Bei iterativen Kalibrierungsmethoden werden die Modellparameter per Versuch und Irrtum für jede Iteration neu festgelegt. Die Festlegung erfolgt anhand von Drücken und/oder Durchflüssen, die durch das Lösen von stationären Massenbilanzen und Energiegleichungen berechnet werden. Das Modell wird von Iteration zu Iteration manuell verbessert, bis keine weitere Verbesserung mehr möglich ist. (Savic u. a., 2009)

Explizite Kalibrierungsmethoden basieren auf der Lösung eines erweiterten Gleichungssystems von Massenbilanz- und Energiegleichungen. Das Gleichungssystem besteht aus Gleichungen, die den stationären Zustand des Systems beschreiben, sowie aus zusätzlichen Gleichungen, die aus den verfügbaren Druck- und Durchflussmessungen hergeleitet werden. Pro Messwert kann eine zusätzliche Gleichung gewonnen werden, was die Anzahl der Modellparameter auf die Anzahl der Messungen beschränkt. Die Lösung des Gleichungssystem erfolgt mit numerischen Verfahren wie dem Newton-Verfahren. (Savic u. a., 2009)

Bei der impliziten Kalibrierung wird das Problem durch die Kombination eines hydraulischen Simulators mit einem Optimierungsverfahren gelöst. Das Optimierungsverfahren berechnet die Parameter, welche dann an den Simulator übergeben werden. Der Simulator berechnet dann die Ergebnisse, welche mit den gemessenen Werten verglichen werden (Abbildung 2-1). Der Vergleich der Messwerte mit den simulierten Werten erfolgt mit einer Zielfunktion (Gleichung 2-1), die vom Optimierer minimiert wird. Die Einhaltung der hydraulischen Randbedingungen wird vom Simulator sichergestellt, im Optimierer können obere und untere Randbedingungen für die Modellparameter festgelegt werden. (Savic u. a., 2009)

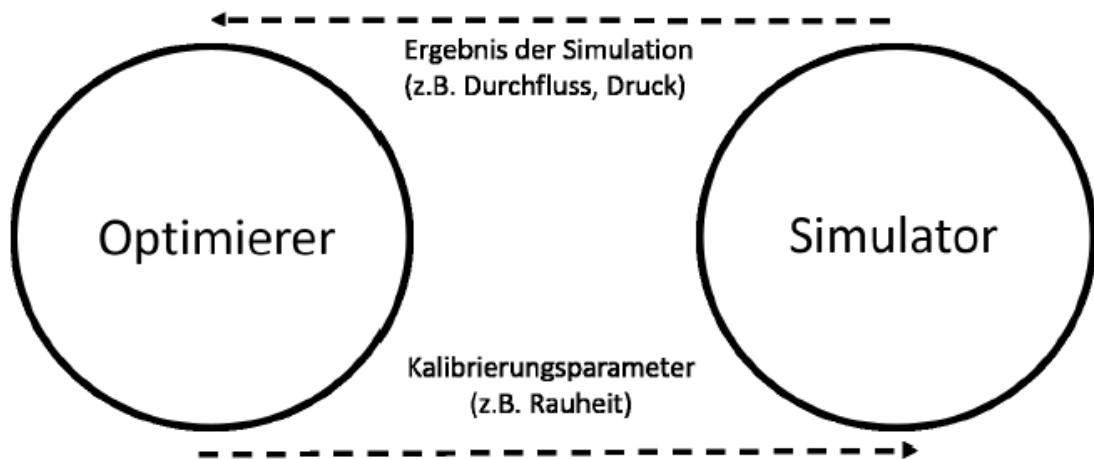


Abbildung 2-1: Schema der impliziten Kalibrierung (Lippacher, 2018)

$$\min_x f(x) = \sum_{i=1}^n w_i |y_i^{obs} - y_i(x)|^p \quad \text{Gleichung 2-1}$$

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.

2.3 Optimierungsverfahren

Die Optimierungsverfahren, die für die implizite Modellkalibrierung verwendet werden, können in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Es kann zwischen deterministischen und stochastischen Optimierungsverfahren unterschieden werden. Bei den deterministischen Verfahren dominieren auf Gradienten basierende Optimierungsmethoden, bei den stochastischen Verfahren dominieren evolutionäre Algorithmen (Savic u. a., 2009).

Bei den deterministischen Verfahren werden beispielsweise Gradientenverfahren (E. Lansey & Basnet, 1991) oder das Gauß-Newton-Verfahren (Reddy u. a., 1996) verwendet. Bei den stochastischen Verfahren werden neben einer Vielzahl an evolutionären Algorithmen auch Verfahren wie Simulated Annealing (Tucciarelli u. a., 1999) eingesetzt. Auch der in dieser Arbeit eingesetzte Differential Evolution Algorithmus gehört zu den stochastischen und in weiterer Folge zu den evolutionären Optimierungsverfahren. Bei evolutionären Optimierungsverfahren wird die Zielfunktion (vgl. Gleichung 2-1) als Fitnessfunktion und das Ergebnis als Fitnesswert bezeichnet. In den folgenden Kapiteln wird grundsätzlich dieser Begriff verwendet.

2.3.1 Differential Evolution

Differential Evolution ist ein populationsbasiertes stochastisches Optimierungsverfahren. Es folgt dem in Abbildung 2-2 dargestellten grundsätzlichen Schema.

Auf die Initialisierungen einer zufälligen Startpopulation folgen die Mutation der einzelnen Individuen der Populationen, die Rekombination zwischen den Individuen und abschließend die Selektion der neuen Individuen. Dieser Vorgang wird solange iterativ wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Die einzelnen Schritte des Verfahrens werden in den folgenden Kapiteln näher erklärt. (Storn & Price, 1997)

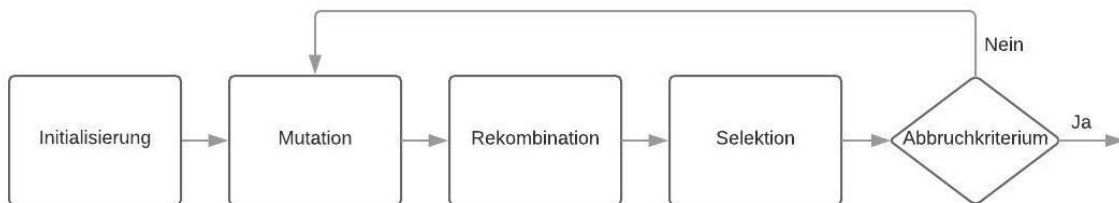


Abbildung 2-2: Schema des Differential Evolution Algorithmus

2.3.1.1 Initialisierung

Über die als Parameter wählbare Anzahl der Individuen NP und die Anzahl der Parameter des Optimierungsproblems D ergeben sich NP D -Dimensionale Vektoren als Population für jede Generation G (Gleichung 2-2). Die Vektoren der ersten Generation werden zufällig im Parameterraum mittels Gleichverteilung festgelegt.

$$x_{i,G}, i = 1, 2, \dots, NP \quad \text{Gleichung 2-2}$$

mit:

x ... Parametervektor, G ... Generation, NP ... Anzahl der Individuen, i ... Index

2.3.1.2 Mutation

Bei der Mutation wird für jeden Vektor aus der Population ein neuer Vektor generiert, welcher wie in Gleichung 2-3 dargestellt berechnet wird.

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F(x_{r_2,G} - x_{r_3,G}) \quad \text{Gleichung 2-3}$$

mit:

v ... mutierter Vektor, x ... ursprünglicher Vektor, G ... Generation, F ... Faktor der Mutationsstärke $\in [0,2]$, r_1, r_2, r_3 ... zufällige ganzzahlige voneinander und von i unterschiedliche Indizes $\in \{1, 2, \dots, NP\}$, i ... fortlaufender Index

Der zweidimensionale Fall der Mutation zu einem neuen Vektor ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

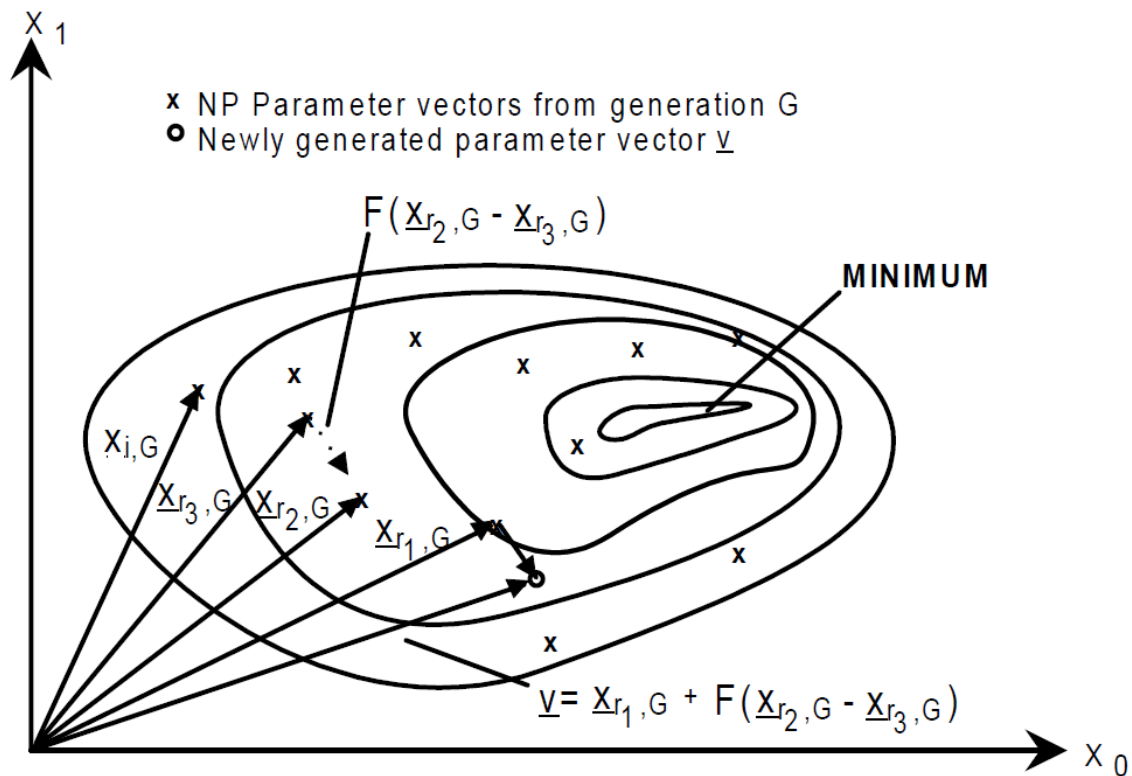


Abbildung 2-3: Berechnung von $v_{i,G+1}$ durch Mutation dargestellt für eine zweidimensionale Fitnessfunktion (Storn & Price, 1995)

Abgesehen von dieser Variante der Mutation stehen für den Differential Evolution Algorithmus noch weitere mögliche Vektorkombination zur Verfügung, um den neuen Vektor v zu erhalten. Diese weiteren Möglichkeiten sind in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Mutationsstrategien des Differential Evolution Algorithmus (Steffelbauer, 2018, mod.)

Strategie	Berechnung des Vektors ($v_j = \dots$)
DE/rand/1	$x_{r_1} + F_1(x_{r_2} - x_{r_3})$
DE/best/1	$x_{best} + F_1(x_{r_2} - x_{r_3})$
DE/rand to best/1	$x_{r_1} + F_1(x_{r_2} - x_{r_3}) + F_2(x_{best} - x_{r_1})$
DE/current to best/1	$x_j + F_1(x_{r_2} - x_{r_3}) + F_2(x_{best} - x_j)$
DE/rand/2	$x_{r_1} + F_1(x_{r_2} - x_{r_3} + x_{r_4} - x_{r_5})$
DE/best/2	$x_{best} + F_1(x_{r_2} - x_{r_3} + x_{r_4} - x_{r_5})$

2.3.1.3 Rekombination

Bei der Rekombination werden durch einen Zufallsprozess, der durch den Parameter CR bestimmt wird, die Parameter des ursprünglichen Vektors mit dem des durch Mutation veränderten Vektors zum finalen Testvektor für die Selektion kombiniert. Der Parameter CR kann zwischen 0 und 1 gewählt werden und bestimmt den durchschnittlichen Anteil des mutierten Vektors am Testvektor.

2.3.1.4 Selektion

Die Selektion erfolgt durch einfaches Vergleichen der Zielfunktion (Fitnesswert) des Testvektors mit der des ursprünglichen Vektors. Schneidet der Testvektor besser ab, ersetzt er den ursprünglichen Vektor in der nächsten Generation G. Schneidet der ursprüngliche Vektor besser ab, bleibt dieser auch in der nächsten Generation erhalten.

2.4 Automatische Kalibrierung

Der Algorithmus zur automatischen Kalibrierung von Trinkwassernetzen ist eine Methode der impliziten Kalibrierung (2.2.3). Der Programmcode ist in der Programmiersprache Python (2.5.1) geschrieben. Gestartet wird das Programm über eine Weboberfläche von Jenkins (2.5.5). Als hydraulischer Simulator wird EPANET (2.5.3) verwendet. Zur Parametermanipulation wird OOPNET (2.5.4) eingesetzt. Der eingesetzte Optimierer ist ein Differential Evolution Algorithmus (2.3.1) mit der Mutationsstrategie „DE/rand to best/1“ dargestellt in Tabelle 2-2.

Die Kalibrierungsparameter sind die Rauheiten der Rohrleitungen sowie lokale Verluste, die an Einbauten und dergleichen angesetzt werden können. Die Rohrleitungen werden anhand verschiedener Eigenschaften gruppiert und für jede Gruppe ergibt sich eine Rauheit als Kalibrierungsparameter. Die lokalen Verluste müssen manuell angesetzt werden und der zugehörige Koeffizient ist der Kalibrierungsparameter.

Die Ergebnisse der Simulation sind Durchflüsse und Drücke. Diese Ergebnisse werden mit den gemessenen Eingangsdaten verglichen und der absolute Gesamtfehler wird minimiert.

Die Einstellungen der automatischen Kalibrierung werden mit einer TOML-Datei vorgenommen, die über die Weboberfläche von Jenkins übergeben wird. Hier wird das hydraulische Modell festgelegt, die Metadaten anhand derer die Gruppierung der Rohrleitungen erfolgt, die Eingangsmessdaten sowie die optionalen Positionen für lokale Verluste.

Bei den Einstellungen für den Optimierer können die maximale Anzahl der Generationen, die Größe der Population sowie die Parameter F und CR angegeben werden. Weiters müssen die oberen und unteren Grenzen für Rohrrauheit und lokalem Verlustkoeffizienten als Randbedingungen angegeben werden.

Die wichtigste Einstellungsmöglichkeit ist die Gruppierung der Rohrleitungen, die in 3.2.2 näher beschrieben wird.

Als Ergebnis wird die erfolgte Gruppierung gemäß den übergebenen Einstellungen in der Konsolenausgabe und als Grafik ausgegeben. Die Entwicklung des Fitnesswerts sowie anderer Faktoren des Optimierers über die Anzahl der Generationen hinweg werden in der Konsolenausgabe ebenfalls angegeben. Als Er-

gebnisse der Kalibrierung werden die mittlere absolute Abweichung zwischen gemessen und simulierten Drücken je Messstelle angegeben, sowie die zugehörigen Rauheitswerte, der Verlustkoeffizient und der erreichte Fitnesswert. Die Rauheiten werden auch als Grafik ausgegeben. Weiters wird eine Korrelationsgrafik erstellt und das kalibrierte Netz als .inp-Datei für EPANET zurückgegeben.

2.5 Programmiersprache und Tools

In diesem Kapitel werden Programmiersprache, Software und weitere Tools vorgestellt.

2.5.1 Python

Python ist eine interpretierte, objektorientierte, höhere Programmiersprache mit dynamischer Typisierung. Sie verfügt über zahlreiche Datenstrukturen und wird oft als Skriptsprache genutzt. Die einfache, leicht erlernbare Syntax, die große Anzahl der Bibliotheken und die kostenlose Verfügbarkeit tragen zur Popularität von Python im wissenschaftlichen Bereich bei. (What is Python?, 2018)

Die automatische Kalibrierung (2.4), OOPNET (2.5.4) sowie die automatische Skeletonisierung (2.5.8) wurden mit Python implementiert. Die Erweiterungen zur automatischen Kalibrierung wurden ebenso mit Python implementiert wie zahlreiche Skripte, die im Laufe der Masterarbeit verwendet wurden.

2.5.2 PyCharm

PyCharm ist eine integrierte Entwicklungsumgebung für die Programmiersprache Python und wurde von JetBrains entwickelt. Sie unterstützt Git zur Versionsverwaltung von Dateien und ist in einer kostenlosen Version verfügbar. Sie wurde für die mit Python implementierten Methodiken verwendet.

2.5.3 EPANET

EPANET ist eine Software zur Modellierung von Trinkwassernetzen. Sie wurde von der United States Environmental Protection Agency entwickelt und kann kostenlos heruntergeladen werden (US EPA, 2014). Mit EPANET können Langzeitsimulationen für Druckrohrleitungen durchgeführt werden. Die Abbildung des Netzes erfolgt durch Knoten und Leitungen. Für jeden Zeitpunkt einer Langzeitsimulation wird der Druck an jedem Knoten und der Durchfluss in jeder Leitung berechnet. Verschiedene Rohrrauheiten und lokale Verluste können bei der Berechnung berücksichtigt werden. (Rossman, 2000)

2.5.4 OOPNET

OOPNET ist eine objektorientierte, auf Python basierende, Schnittstelle zu EPANET zur ingenieurmäßigen Verwendung. Eingangsdateien aus EPANET werden in die objektorientierte Struktur von OOPNET übersetzt und über die Kom-

mandozeilenschnittstelle von EPANET bearbeitet und simuliert. Durch die Verwendung eines speziellen Pakets für Python werden die Berechnungen parallelisiert und dadurch beschleunigt. (Steffelbauer & Fuchs-Hanusch, 2015)

2.5.5 JENKINS

Jenkins ist ein unabhängiger, quelloffener Automatisierungsserver, der für verschiedene Anwendungen beim Entwickeln, Testen und Anwenden von Software eingesetzt werden kann (Jenkins, 2019). Jenkins wurde zum Starten der automatischen Kalibrierungen auf den Servern des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau verwendet.

2.5.6 ArcGIS

ArcGIS ist eine Softwarepaket für Geographische Informationssysteme (GIS) des Unternehmens ESRI. Verwendet wurde die Desktoplösung ArcMap zur Darstellung und Bearbeitung der zweidimensionalen Daten aus den Leitungskatastern.

2.5.7 TOML

TOML ist ein Dateiformat für Konfigurationsdateien mit dem Anspruch auf leichte Lesbarkeit aufgrund einer offensichtlichen Semantik. TOML steht für „Tom's Obvious, Minimal Language“ und bezieht sich auf den Entwickler Tom Preston-Werner. (GitHub, 2019)

2.5.8 Automatische Skeletonisierung

Unter Skeletonisierung versteht man die Vereinfachung eines Netzes, indem nur Komponenten inkludiert werden, die einen nennenswerten Einfluss auf das Verhalten des Systems ausüben. Der Einfluss der weggelassenen Komponenten soll jedoch trotzdem abgebildet werden. (Haestad u. a., 2004)

Am SWW wurde ein auf OOPNET (2.5.4) basierender Algorithmus entwickelt, der nach dieser Definition eine automatische Vereinfachung von EPANET-Netzen ermöglicht. Es werden dabei Stichleitungen und Knoten zwischen Leitungen mit dem gleichen Durchmesser entfernt. Zusätzlich existiert eine „Whitelist“ mit Knoten, die unter keinen Umständen entfernt werden. In diese Liste können Knoten aufgenommen werden, an denen beispielsweise Entnahmen und Messungen durchgeführt werden. Durch Clustering werden bestimmte Knoten als Zentrum eines Bereichs festgelegt und in die Whitelist aufgenommen. Dadurch soll einer Überskeletonisierung entgegengewirkt werden. Die Entfernung von Stichleitungen wird unter einem Grenzdurchmesser und Grenzverbrauch durchgeführt. Ein eventuell am Ende der Stichleitung auftretender Verbrauch wird am Anfangsknoten der Stichleitung angesetzt. Die Entfernung von Knoten zwischen Leitungen mit gleichem Durchmesser erfolgt ebenfalls nur bis zu einem festzulegenden Grenzdurchmesser. Weiters darf am zu entfernenden Knoten kein Verbrauch auftreten. Zusätzlich darf ein bestimmter Winkel zwischen den beiden Leitungen

nicht überschritten werden, um die Wiedererkennbarkeit des Netzes zu gewährleisten. (Lippacher, 2018)

3 Methodik

In diesem Kapitel wird die Methodik, die zur Erzielung und Bewertung der Ergebnisse verwendet wurde, vorgestellt. Das Kapitel unterteilt sich in die Schritte, welche vor Verwendung der automatischen Kalibrierung gesetzt wurden, die Methoden zur Evaluierung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung und die Festlegung eines Abbruchkriteriums.

3.1 Vorkalibrierung

Vor der Verwendung der hydraulischen Modelle in der AC sind einige Schritte zur Anpassung des Modells und der zugehörigen Daten notwendig. Diese Schritte werden in den nachfolgenden Kapiteln erklärt. Wenn bereits vorbereitete Daten verwendet wurden, so wird dies bei den jeweiligen Ergebnissen erwähnt.

3.1.1 Szenarien

Für die Fallstudie Hart bei Graz liegen Messdaten über mehrere Tage hinweg vor. Hier werden die Daten zuerst von offensichtlichen Störungen und Zeiträumen mit fehlenden Daten bereinigt. Danach werden die Daten mittels Ausreißer-Test bereinigt und die Zeit des Nachtminimums bestimmt. Aus den so bereinigten Daten werden dann Mittelwerte für Drücke, Zufluss und Behälterwasserstand für den Ruhezustand des Systems bestimmt. (Lippacher, 2018)

Bei der Fallstudie Seiersberg wurden nur in einer Nacht Daten erhoben. Der Messzeitraum des Nachtminimums wurde von den Mitarbeitern der SAS GmbH aus der Erfahrung gewählt. Vor Beginn der Kalibrierungsmessungen wurden hier aus einmaligen Messungen Drücke, Zuflüsse und Behälterwasserstände ermittelt. (Schrotter, 2016)

Für die Kalibrierung wurden bei beiden Fallstudien Entnahmen aus Hydranten durchgeführt. Für jede Entnahme wurde eine Zeit von einigen Minuten angesetzt. Die Start- und Endphase jeder Entnahme wird aufgrund der Druck- und Durchflussschwankungen nicht berücksichtigt. Abschließend wird aus den Zeiträumen mit konstanten Messwerten je Entnahme ein Szenario für die weiteren Schritte berechnet.

Der letzte Schritt ist die Unterteilung der Szenarien in Kalibrierungs- und Validierungsszenarien (3.2.4). Bei der Fallstudie Hart bei Graz wurde nicht bei allen Entnahmen eine Durchflussmessung durchgeführt (4.2.2). Deshalb werden die Szenarien, bei denen keine Durchflussmessung vorlag, als Validierungsszenarien verwendet, die übrigen Szenarien zur Kalibrierung. Bei der Fallstudie Seiersberg werden die Szenarien zu 2/3 zur Kalibrierung und zu 1/3 für die Validierung verwendet. Szenarien, bei den 2 oder mehr Entnahmen gleichzeitig durchgeführt wurden, werden zur Validierung verwendet.

3.1.2 Anpassung der geodätischen Sensorhöhen

Durch diesen Punkt soll das hydraulische Modell möglichst gut an die Gegebenheiten im Ruhezustand während des Nachtminimums angepasst werden. Auf dieser Grundlage wird dann die automatische Kalibrierung angewendet.

Nach einer einzelnen Simulation mit dem Nullszenario (Szenario ohne Hydrantenentnahmen) des Nachtminimums werden die Druckabweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken berechnet. Danach werden die geodätischen Höhen der Knoten, an denen Druckmessungen durchgeführt wurden, so angepasst, dass die Druckabweichung zu Null wird. (Lippacher, 2018)

3.1.3 Geschlossenen Schieber ausfindig machen

Bei beiden Fallstudien war während der Messnacht ein Schieber irrtümlich teilweise geschlossen. Um das Modell dennoch kalibrieren zu können, wird an der Position des Schiebers ein lokaler Verlust angesetzt. Hohe Rauheiten bei der Kalibrierung ohne lokalen Verlust weisen auf die Position des geschlossenen Schiebers hin. Durch das Anbringen des lokalen Verlusts und die Evaluierung des Kalibrierungsergebnisses kann die Position bestätigt werden.

3.2 Evaluierung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung

In diesem Kapitel wird erklärt, wie die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung evaluiert werden. Weiters werden die neu entwickelten und in die automatische Kalibrierung implementierten Funktionen zur Evaluierung sowie deren Anwendung beschrieben.

3.2.1 Grundlagen und Einstellungen

Grundsätzlich wurden für die Evaluierung die hydraulischen Modelle der in Kapitel 4 vorgestellten Fallstudien verwendet. Als Metadaten wurden die entsprechenden, dem jeweiligen Modell zugehörigen, Datensätze verwendet. Lokale Verluste wurden an den jeweiligen bei der Vorkalibrierung als teilgeschlossene Schieber identifizierten Einbauten angesetzt (3.1.3).

In Abbildung 3-1 sind die Einstellungen der automatischen Kalibrierung dargestellt, welche bei allen Berechnungen verwendet wurden. Sie wurden von Lippacher (2018) übernommen und haben sich der Erfahrung nach als geeignet erwiesen. Die Populationsgröße wurde mit 50 festgelegt. Dies deckt sich mit der Empfehlung von Storn & Price (1997), wo eine Populationsgröße vom 5- bis 10-fachen der Parameteranzahl empfohlen wird. Das Abbruchkriterium von 50 Generationen stellte bei allen Berechnungen die Konvergenz der Lösung sicher. Die Randbedingungen für die zu kalibrierenden Rauheiten entsprechen hydraulisch sinnvollen Bereichen.


```
9 [Genetic_Algorithm]
10 Population = 50
11 Generations = 50
12 CR = 0.7
13 F = 0.5
14 R_Min = 0.001
15 R_Max = 2.0
16 M_Min = 0.0
17 M_Max = 5000.0
```

Abbildung 3-1: Grundlegende Einstellungen in der Konfigurationsdatei der automatischen Kalibrierung

3.2.2 Gruppierung der Rohrleitungen

Bei der Kalibrierung muss für jede Rohrleitung durch Lösung des Optimierungsproblems eine Rauheit gefunden werden. Die Anzahl der Freiheitsgrade bzw. Parameter sollte für die Optimierung jedoch nicht zu groß werden. Weiters ist es hydraulisch nicht möglich, den Einfluss der Rauheiten von im selben Strang liegenden Leitungen zu unterscheiden, wenn dazwischen keine Messpunkte liegen.

Um also zu einer technisch sinnvollen und im Rechenaufwand überschaubaren Lösung des Optimierungsproblems zu gelangen ist es notwendig, die Rauheiten mehrerer Rohrleitungen zu einem einzelnen Optimierungsparameter zusammenzufassen.

Dieses Zusammenfassen nach Gruppen kann entweder anhand von Metadaten oder anhand der geographischen Lage der Leitungen durchgeführt werden. Eine Kombination beider Methoden ist ebenfalls möglich. Die Gruppen sollten nach einem Parameter erstellt werden, der einen nennenswerten Einfluss auf die betriebliche Rauheit des Systems ausübt. Durch die Evaluierung der Ergebnisse kann dieser Einfluss überprüft werden.

Die in dieser Arbeit verwendeten Metadaten sind Material, Durchmesser, Verlegejahr und Einbautendichte. Bei den quantitativen Kategorien ist weiters die Anzahl der Gruppen sowie deren Grenzen festzulegen. Dabei soll auf eine möglichst ähnliche Gruppengröße Wert gelegt werden.

3.2.3 Evaluierung der Modellgüte

Zur Evaluierung der Modellgüte wird einerseits die Anpassung des Modells an die Messdaten herangezogen (Fitnesswert und Druckabweichung, Korrelationen), andererseits werden die Streuungen der Ergebnisse betrachtet. Zusätzlich erfolgt der Vergleich der Einzelabweichungen und Erwartungswerte mit den laut DVGW (2016) zulässigen Werten.

3.2.3.1 Streuung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung

Zur Betrachtung der Streuung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung werden zehn Kalibrierungen mit identischen Eingabedaten gerechnet. Aus diesen zehn Ergebnissen werden die Streuungen der Rauheiten und des Minor Loss-Koeffizienten ermittelt, als Boxplots dargestellt und optisch bewertet. Für die Rohrrauheiten wird zusätzlich die Standardabweichung über alle zehn Kalibrierungen berechnet und anschließend über alle Gruppierungen gemittelt. Je niedriger die Standardabweichung, desto robuster die Ergebnisse (Lippacher u. a., 2019). Für die weiteren Schritte wird das repräsentativste der zehn Ergebnisse ausgewählt.

3.2.3.2 Korrelation

Bei der automatischen Kalibrierung werden Korrelationsplots der gemessenen gegenüber den simulierten Drücken erstellt. Diese Plots können zu einer groben optischen Beurteilung der Modellgüte herangezogen werden. Eine weitere grafische Darstellung der Druckabweichung der Kalibrierung findet sich bei der Überprüfung der Modellqualität in Kapitel 3.2.4.

3.2.3.3 Überprüfung der zulässigen Einzelabweichungen

Laut DVGW (2016) gilt die Kalibrierung mittels Vergleichsrechnung als zutreffend, wenn die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken innerhalb gewisser Richtwerte liegen. Bei begründeten Abweichungen sind Überschreitungen der Richtwerte zulässig.

Die zulässige Abweichung einer Einzelmessung (a) und der Erwartungswert der Druckabweichung (U) werden nach Gleichung 3-1 und Gleichung 3-2 berechnet.

$$|a| \leq \min \begin{cases} 2\% \text{ des Ruhedrucks am Messpunkt} \\ 0,2 \text{ bar} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

a ... zulässige Abweichung der Einzelmessung

$$-\frac{a}{\sqrt{n}} \leq U \leq +\frac{a}{\sqrt{n}} \quad \text{mit } U = \frac{\sum_1^n p_m - p_e}{n} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

a ... zulässige Abweichung der Einzelmessung, U ... Erwartungswert der Druckabweichung, n ... Anzahl der Messstellen, p_m ... gemessener Druck, p_e ... errechneter Druck

Der Vergleich mit den Richtwerten erfolgt pro Messpunkt und über die Kalibrierungsszenarien gemittelt. Um unterschiedliche Modelle zu vergleichen kann die Anzahl oder der Anteil der Überschreitungen herangezogen werden. (Lippacher, 2018)

3.2.3.4 Fitnesswert und Druckabweichung der automatischen Kalibrierung

Aus den den mittleren absoluten Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken je Messstelle wird ein Mittelwert berechnet. Je niedriger dieser Wert desto besser kann die Güte des Modells bewertet werden.

Der Fitnesswert berechnet sich aus den oben genannten Druckabweichungen und den Abweichungen von etwaigen Durchflussmessungen. Der Fitnesswert stellt also ein den Druckabweichungen ähnliches Gütemaß dar, bezieht jedoch zusätzliche Messdaten mit ein.

Der Mittelwert der Druckabweichungen kann auch für den Vergleich zwischen verschiedenen Modellen verwendet werden. Der Fitnesswert ist auch von der Anzahl der Messstellen und Szenarien abhängig, kann also nur verwendet werden, um Ergebnisse bei gleichem Ausgangmodell zu vergleichen.

3.2.3.5 Streuung der Population des Optimierers

Da der Differential Evolution Algorithmus ein populationsbasiertes Verfahren ist, herrscht innerhalb der Population eine gewisse Streuung. Diese Streuung nimmt mit zunehmender Generationenanzahl und steigender Konvergenz zu einer Lösung ab. Es soll überprüft werden, ob aus der Streuung der Population eine ähnliche Beurteilung der Güte wie aus der Betrachtung der Streuung mehrerer Kalibrierungen hergeleitet werden kann. Dazu werden analog zu Kapitel 3.2.3.1 die Streuungen der Population als Boxplots dargestellt, die Standardabweichungen berechnet und mit den Ergebnissen aus ebenjenem Kapitel verglichen.

Da die Wahl des Abbruchkriteriums die Streuung innerhalb der Population am Ende der Kalibrierung maßgebend beeinflusst, soll ein geeignetes Abbruchkriterium (3.3) zur Beurteilung der Streuung der Population festgelegt werden.

3.2.4 Evaluierung der Modellqualität

Entsprechend der Unterteilung der Messdaten in Kalibrierungsszenarien und Validierungsszenarien wurden Daten, die nicht für die Kalibrierung verwendet wurden, herangezogen um die Modellqualität zu beurteilen.

Dazu wurde die automatische Kalibrierung um eine automatische Validierung erweitert. Es wurde die Möglichkeit implementiert bei den Eingangsmessdaten auch die Validierungsszenarien zu übergeben. Mit dem als Ergebnis der automatischen Kalibrierung entstehenden Modell und den Validierungsszenarien werden mit OOPNET die mittleren absoluten Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken berechnet.

Diese Druckabweichungen werden den Druckabweichungen der automatischen Kalibrierung gegenübergestellt und als Boxplot je Messstelle dargestellt. Weiters

wird auch der Mittelwert der absoluten Druckabweichungen der automatischen Validierung berechnet und die Differenz zur Kalibrierung ausgegeben.

3.3 Abbruchkriterien

Durch den iterativen Charakter des Optimierers muss in jedem Fall ein Abbruchkriterium festgelegt werden. In den nachfolgenden Punkten soll erklärt werden, welche Abbruchkriterien für den Differential Evolution Algorithmus zur Verfügung stehen und welches Kriterium in der automatischen Kalibrierung implementiert ist. Weiters soll die Methodik für die konkrete Festlegung der Kriterien und ihrer nachfolgenden Evaluierung gezeigt werden. Zusätzlich wird ein normiertes Abbruchkriterium festgelegt.

3.3.1 Übersicht

Dieses Kapitel enthält eine Übersicht über die untersuchten Abbruchkriterien. Die Grundlagen für die verschiedenen Kriterien stammen aus der Lehrveranstaltung Stochastic Optimization Methods am Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik der Technischen Universität Graz.

3.3.1.1 Maximum-Kriterium

Als Maximum-Kriterium kann entweder eine maximale Zeit für die Dauer der Berechnung oder eine maximale Anzahl der Evaluierungen der Zielfunktion festgelegt werden. Da beim Differential Evolution die Populationsgröße konstant ist, ist die Anzahl der Evaluierungen direkt von der Anzahl der Generationen abhängig (Gleichung 3-3). Aufgrund dieses Zusammenhangs wird bei der automatischen Kalibrierung die Anzahl der Generationen als Abbruchkriterium herangezogen.

$$n_{eval} = G * NP \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit:

n_{eval} ... Anzahl der Evaluierungen der Zielfunktion, G ... Anzahl der Generationen, NP ... Anzahl der Individuen

3.3.1.2 Epsilon-Kriterium

Es kann ein absolutes Epsilon-Kriterium angewendet werden bei dem abgebrochen wird, wenn der Fitnesswert einen vorher festgelegten Schwellenwert unterschreitet (Gleichung 3-4).

$$f(x) < \varepsilon \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit:

f ... Fitnesswert, x ... Vektor der unbekannt Parameter, ε ... absolutes Epsilon-Kriterium

Beim relativen Epsilon-Kriterium wird das Verfahren abgebrochen, wenn die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fitnesswerten eine bestimmte Schwelle unterschreitet (Gleichung 3-5).

$$f(x_G) - f(x_{G+1}) < \varepsilon \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

f ... Fitnesswert, x ... Vektor der unbekannt Parameter, G ... Generation, ε ... relatives Epsilon-Kriterium

Da die Gruppierung der Rohrleitungen (3.2.2) einen großen Einfluss auf das Ergebnis und somit auch auf die absolute Höhe des Fitnesswerts, hat wird für die automatische Kalibrierung ein relatives Epsilon-Kriterium verwendet.

Um ein möglichst stabiles Verhalten des Abbruchkriteriums zu erreichen, wird der Mittelwert des Fitnesswerts über die gesamte Population verwendet.

3.3.1.3 Populationsradius

Für ein populationsbasiertes Optimierungsverfahren kann der Populationsradius als Abbruchkriterium genutzt werden. Vom Schwerpunkt aller Individuen im Parameterraum kann eine Sphäre berechnet werden, die alle Individuen enthält. Der Radius dieser Sphäre wird als Populationsradius (Crowding Radius) bezeichnet. Unterschreitet dieser einen bestimmten Schwellwert, so wird die Optimierung abgebrochen. Für den zweidimensionalen Fall ist das Prinzip des Populationsradius in Abbildung 3-2 dargestellt.

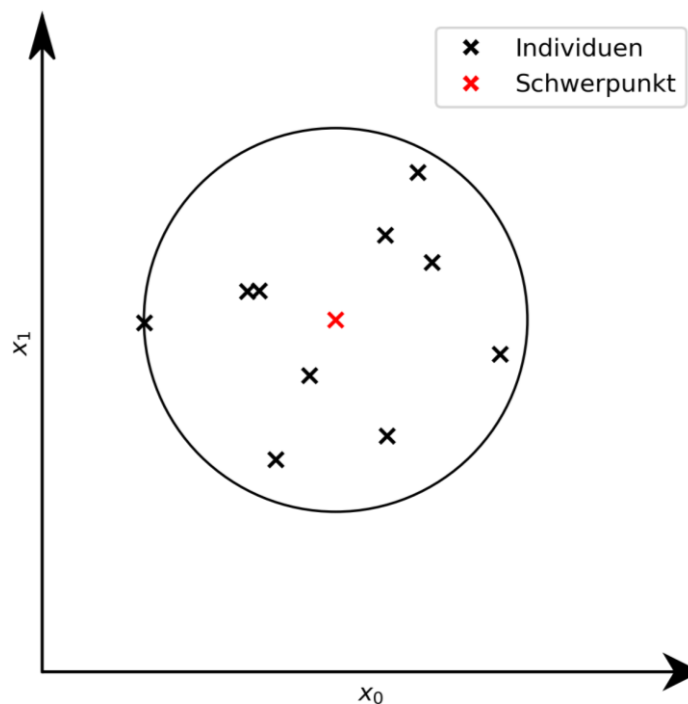


Abbildung 3-2: Populationsradius im zweidimensionalen Parameterraum

3.3.2 Festlegung der Kriterien

In den Teilen dieser Arbeit, die sich nicht im Speziellen mit den Abbruchkriterien beschäftigen, wurde ein Maximum-Kriterium von 50 Generationen benutzt. Dieses entstammt Erfahrungswerten und wird auch bei Lippacher (2018) verwendet. Dieses Kriterium wird auch als Grundlage zur Bestimmung der exakten Kriterien herangezogen.

Im ersten Schritt werden für jede Fallstudie drei Gruppierungen (3.2.2) zur Festlegung der Kriterien bestimmt. Die übrigen Gruppierungen werden zur anschließenden Evaluierung der Kriterien verwendet.

Zur Bestimmung der Kriterien wird ein Fitnesswert festgelegt der 99,95 Prozent der Fitness entspricht, die bei einem Maximum-Kriterium von 50 Generationen erreicht wird (Gleichung 3-6). Ist dieser Fitnesswert erreicht, werden das aktuelle Maximum-Kriterium, Epsilon-Kriterium und der Populationsradius bestimmt. Für jede, zur Festlegung der Abbruchkriterien bestimmten Gruppierungen, werden 10 Kalibrierungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden über alle zur Festlegung verwendeten Kalibrierungen gemittelt. Verwendet wird jeweils der über die gesamte Population gemittelte Fitnesswert.

$$f_k = (1 - P)f_1 + Pf_{50} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

mit:

f_k ... Fitnesswert zur Festlegung der Kriterien, f_1 ... Fitnesswert in Generation 1, f_{50} ... Fitnesswert in Generation 50, P ... Prozent der zu erreichenden Fitness (hier $P=0,9995$)

3.3.3 Evaluierung der Kriterien

Zur Evaluierung der Kriterien werden ebenfalls 10 Kalibrierungen pro Gruppierung durchgeführt. Für jedes Abbruchkriterium wird der Fitnesswert bestimmt, bei dem das Kriterium erreicht wird. Anschließend wird berechnet, zu wieviel Prozent der Fitnesswert bei Verwendung eines Maximum-Kriteriums von 50 Generation erreicht wird (Gleichung 3-7). Zusätzlich wird die entsprechende Generation bestimmt. Die erreichten Prozent des Fitnesswertes werden je Kriterium gemittelt und zur Evaluierung mit den zur Festlegung verwendeten 99,95 Prozent verglichen. Anhand der erreichten Generation kann die potenzielle Einsparung an Rechenzeit bewertet werden. Auch hier werden die Mittelwerte der Fitness über die gesamte Population verwendet.

$$P_e = \frac{f_e - f_1}{f_{50} - f_1} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

mit:

P_e ... erreichter Fitnesswert in Prozent f_e ... Fitnesswert bei erreichtem Kriterium, f_1 ... Fitnesswert in Generation 1, f_{50} ... Fitnesswert in Generation 50

3.3.4 Normiertes Abbruchkriterium

Für die Verwendung der bisher festgelegten Abbruchkriterien ist eine vorherige Berechnung derselben wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben notwendig. Um dieses Vorgehen anwenden zu können, muss ein Maximum-Kriterium bekannt sein, bei dem vom Finden einer nahezu optimalen Lösung ausgegangen werden kann. Ist ein solches Kriterium nicht bekannt, muss eine andere Herangehensweise gewählt werden.

Aus diesem Grund wurde ein normiertes Abbruchkriterium eingeführt. Es basiert auf dem relativen Epsilon-Kriterium (3.3.1.2) und nimmt durch die Normierung immer einen Wert zwischen 0 und 1 beziehungsweise 0 und 100 Prozent an. Die Berechnung des normierten Epsilon-Kriteriums ist in Gleichung 3-8 dargestellt.

$$\frac{f(x_G) - f(x_{G+1})}{f(x_G)} < \varepsilon_n \quad \text{Gleichung 3-8}$$

mit:

f ... Fitnesswert, x ... Vektor der unbekannt Parameter, G ... Generation, ε_n ... normiertes Epsilon-Kriterium

Da dieses Kriterium immer zwischen 0 und 1 liegt, kann es ohne Kenntnis der Fitnessfunktion oder einer vorhergehenden rechnerischen Festlegung verwendet werden. Es kann aus Erfahrungswerten und nach erwünschter Güte des Ergebnisses frei gewählt werden. Um diese Vorgehensweise abzubilden werden fünf plausible Werte für das normierte Epsilon-Kriterium willkürlich festgelegt (Tabelle 3-1). Die Evaluierung erfolgt analog zum vorherigen Kapitel wie in Gleichung 3-7 festgelegt.

Tabelle 3-1: Zur Evaluierung festgelegte Werte für das normierte Epsilon-Kriterium

Bezeichnung Kriterium in Prozent	ε_n
ε_{10}	0,100
ε_5	0,050
ε_1	0,010
$\varepsilon_{0,5}$	0,005
$\varepsilon_{0,1}$	0,001

4 Fallstudien

An zwei Fallstudien mit Druck- und Durchflussmessungen aus zwei unterschiedlichen Trinkwassernetzen sollen die bisher erläuterte Methodik angewendet werden.

Die Fallstudie Seiersberg wurde von der SAS Styrian Aqua Service GmbH zur Verfügung gestellt. Anhand dieser Fallstudie sollen die allgemeinen Ergebnisse der automatischen Kalibrierung an einem weiteren Trinkwasserverteilnetz bewertet und mit einer manuellen Kalibrierung der SAS GmbH verglichen werden. In weiterer Folge soll auch die neue Methodik auf diese Fallstudie angewendet werden.

Die Fallstudie Hart bei Graz des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau wurde bei Lippacher (2018) bereits ausführlich mit der automatischen Kalibrierung bearbeitet. Die Messdaten dieser Fallstudie werden vorrangig zur Untersuchung der neuen Methodik zur Evaluierung der Modellgüte (3.2.3.5) sowie der Abbruchkriterien (3.3) verwendet.

4.1 Seiersberg

Die SAS GmbH wurde von der Gemeinde Seiersberg-Pirka beauftragt, den Zusammenschluss der beiden Netze Seiersberg und Pirka modelltechnisch abzubilden. Um das zu erstellende Modell zu kalibrieren, wurden in Seiersberg und in Pirka am 05.11.2015 und 06.11.2015 jeweils zwischen 00:00 Uhr und 05:00 Uhr Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Diese Messdaten wurden von der SAS GmbH zur Verfügung gestellt und das Netz Seiersberg als Fallstudie verwendet. (Schrotter, 2016)

4.1.1 Geografische und geodätische Lage

Das Netz Seiersberg befindet sich auf dem Gebiet der Gemeinde Seiersberg-Pirka süd-westlich von Graz, vgl. Abbildung 4-1. Die geodätischen Höhen des Netzes liegen zwischen 335,7 m.ü.A. und 400,0 m.ü.A.

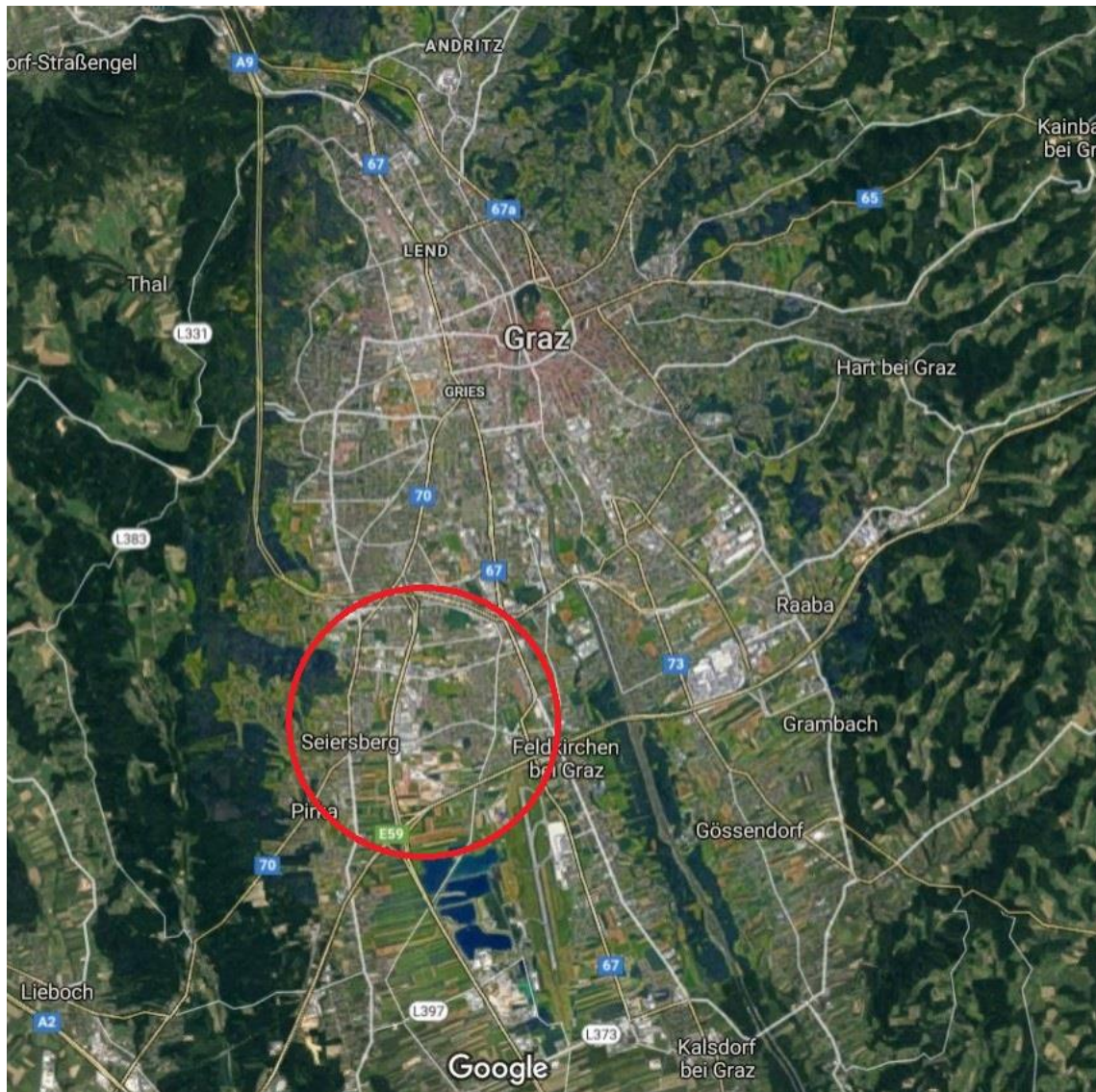


Abbildung 4-1: Lage des Untersuchungsgebiets in Seiersberg (Google Maps, 2018, mod.)

4.1.2 Ablauf der Messungen

Für das System standen sieben Drucksensoren zur Verfügung. Die Einspeisung erfolgte nur über die Hochbehälter, alle anderen Einspeisepunkte waren außer Betrieb. Die Messungen erfolgten in zwei Phasen.

In Phase eins von 01:09 Uhr bis 02:41 Uhr wurden Druckmessungen in den Punkten P_01 bis P_07 durchgeführt und Wasser an den Punkten Q_01 bis Q_03 entnommen. Danach wurden die Drucksensoren an den Positionen P_01 bis P_06 zu den Positionen P_08 bis P_13 umgesetzt. Die Entnahmen in Phase zwei an den Punkten Q_04 bis Q_06 wurden zwischen 03:38 Uhr und 04:06 Uhr durchgeführt. Die Positionen der Drucksensoren und Entnahmen können der Abbildung 4-2 entnommen werden. Die geplanten Entnahmemengen sowie der Zeitraum der jeweiligen Entnahme können aus Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 entnommen werden.

Die Druckmessdaten an der Position P_01 waren fehlerhaft und standen für diese Arbeit nicht zur Verfügung.

Tabelle 4-1: Entnahmeplan Seiersberg Phase 1

Q_01	Q_02	Q_03	Uhrzeit
maxQ	-	-	01:13:10 - 01:15:23
-	maxQ	-	01:19:07 - 01:20:42
maxQ*	maxQ*	-	01:54:03 - 01:56:48
-	-	maxQ	02:33:06 - 02:34:38
maxQ*	maxQ*	maxQ*	02:39:04 - 02:41:34

maxQ bezeichnet die maximal mögliche Entnahme, maxQ* bezeichnet die maximal mögliche gleiche[!] Entnahme bei mehreren Hydranten

Tabelle 4-2: Entnahmeplan Seiersberg Phase 2

Q_04	Q_05	Q_06	Uhrzeit
maxQ	-	-	03:39:07 - 03:40:40
-	maxQ	-	03:42:13 - 03:44:19
maxQ*	maxQ*	-	03:48:00 - 03:50:27
-	-	maxQ	03:59:06 - 04:00:43
maxQ*	maxQ*	maxQ*	04:04:01 - 04:06:32

maxQ bezeichnet die maximal mögliche Entnahme, maxQ* bezeichnet die maximal mögliche gleiche[!] Entnahme bei mehreren Hydranten

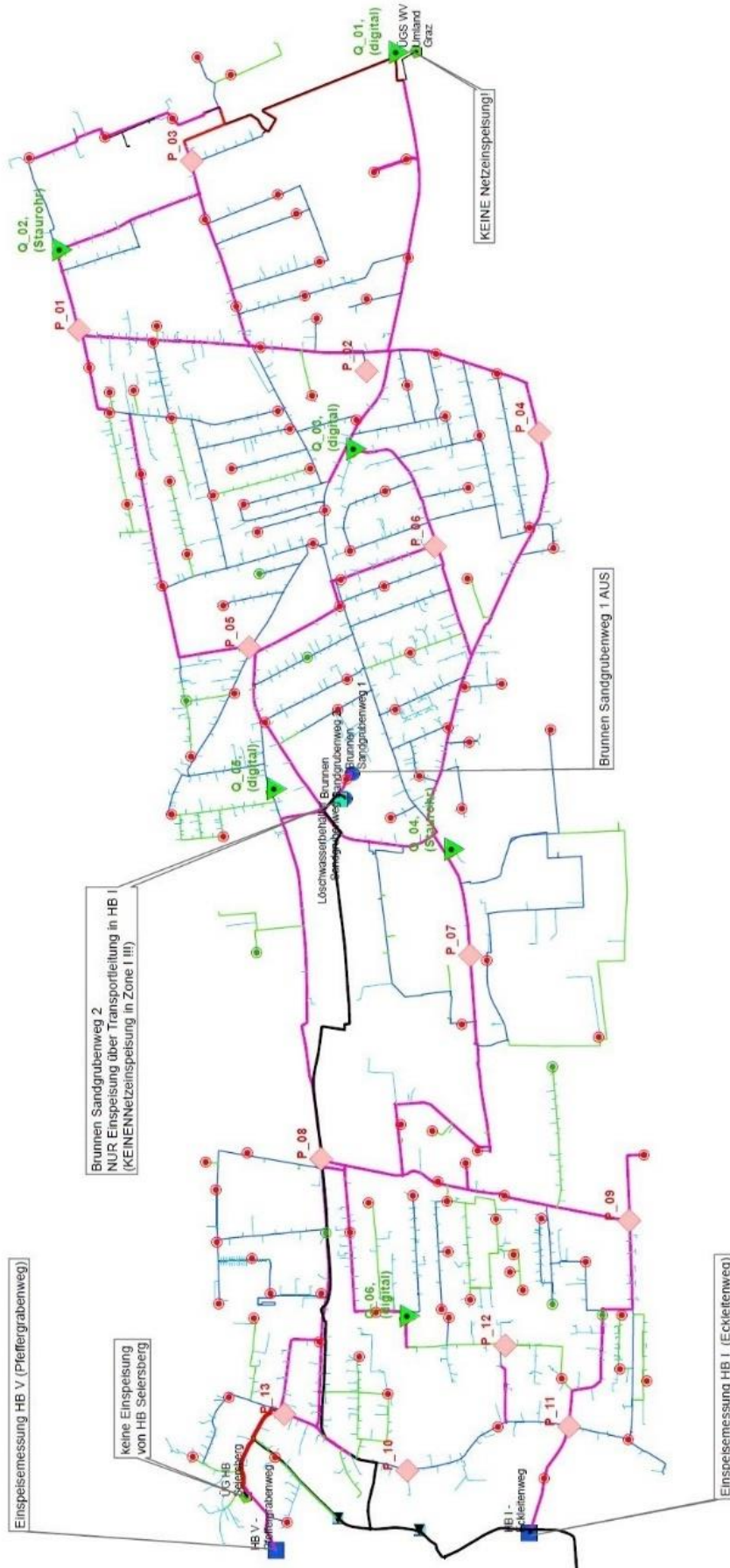


Abbildung 4-2: Entnahmen und Druckmesspunkte Seiersberg (SAS Styrian Aqua Service GmbH, 2015, mod.)

4.1.3 Erstellung des hydraulischen Modells

Für das Netz von Seiersberg existiert ein von der SAS GmbH erstelltes hydraulisches Modell für EPANET, welches jedoch bereits skelettonisiert ist. Da sich die Einbautendichte aus der Skelettonisierung (2.5.8) ergibt, wurde ein vollständiges Modell (Abbildung 4-3) aus dem von der SAS GmbH zur Verfügung gestelltem Leitungskataster erstellt. Durch die Erstellung des Modells aus den neuen Daten ergaben sich für die Druckmesspunkte die in Tabelle 4-3 dargestellten neuen Bezeichnungen. Diese werden in den Ergebnissen der automatischen Kalibrierung verwendet. Die Verbräuche des Nachtminimums wurden aus den Einspeisemessungen der Messnacht berechnet da keine anderen Daten zur Verfügung standen.

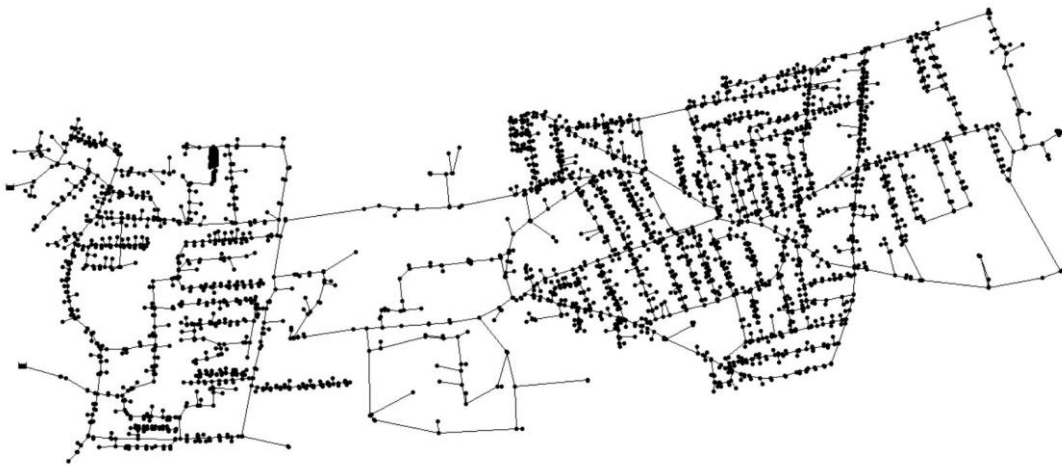


Abbildung 4-3: Vollständiges hydraulisches Modell Seiersberg

Tabelle 4-3: Bezeichnung der Druckmesspunkte im hydraulischen Modell Seiersberg

Druckmesspunkt	Bezeichnung neu
P01	5861
P02	7435
P03	5973
P04	6767
P05	7973
P06	6576
P07	8279
P08	5017
P09	7236
P10	3991
P11	3936
P12	4629
P13	4034

Danach wurde das vollständige Netz skeletonisiert, bis eine ähnliche Leitungszahl wie beim zur Verfügung gestellten Netz vorhanden war. Die sich aus dieser Skeletonisierung ergebende Einbautendichte wurde in die Metadaten übernommen. Das skeletonisierte Netz ist in Abbildung 4-4 ersichtlich.

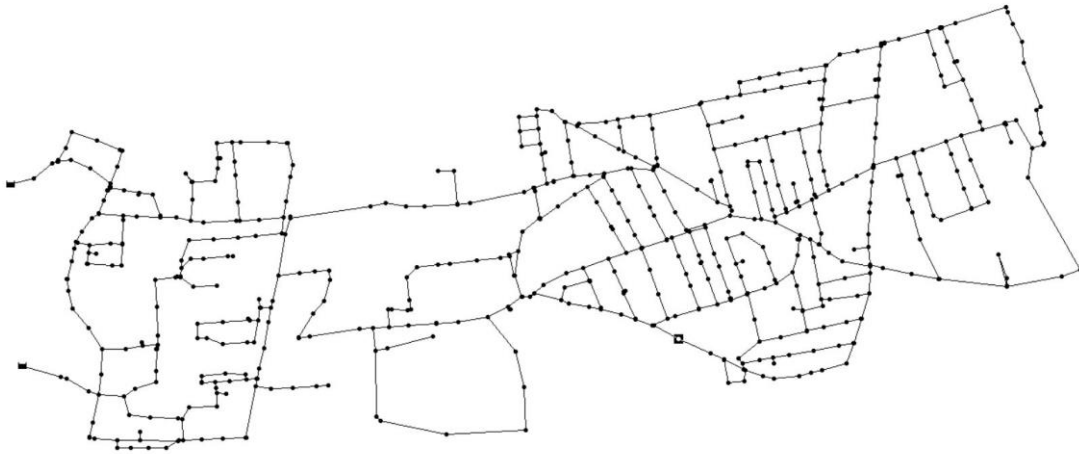


Abbildung 4-4: Skeletonisiertes hydraulisches Modell Seiersberg

4.1.4 Eigenschaften des hydraulischen Modells

Das hydraulische Modell umfasst 929 Leitungsabschnitte mit einer Gesamtlänge von 38,03 km. Die meisten Leitungen wurden zwischen 1980 und 1990 verlegt, der zweite größere Teil zwischen 1970 und 1980, vgl. Abbildung 4-5. Der Großteil der Leitungen verfügt über keine erfassten Einbauten, die übrigen Einbautendichten liegen größtenteils im zweistelligen Bereich. Es treten Ausreißer bei kurzen Leitungen auf, vgl. Abbildung 4-6. Die dominanten Rohrdurchmesser sind 100 mm und 150 mm. Kleine Durchmesser wurden im Modell größtenteils durch die Skeletonisierung entfernt, vgl. Abbildung 4-7. Die meisten Rohre bestehen aus PVC oder Gusseisen, die übrigen Rohre aus verschiedenen Varianten von PE, vgl. Abbildung 4-8.

Histogramm der Verlegejahre im hydraulischen Modell Seiersberg

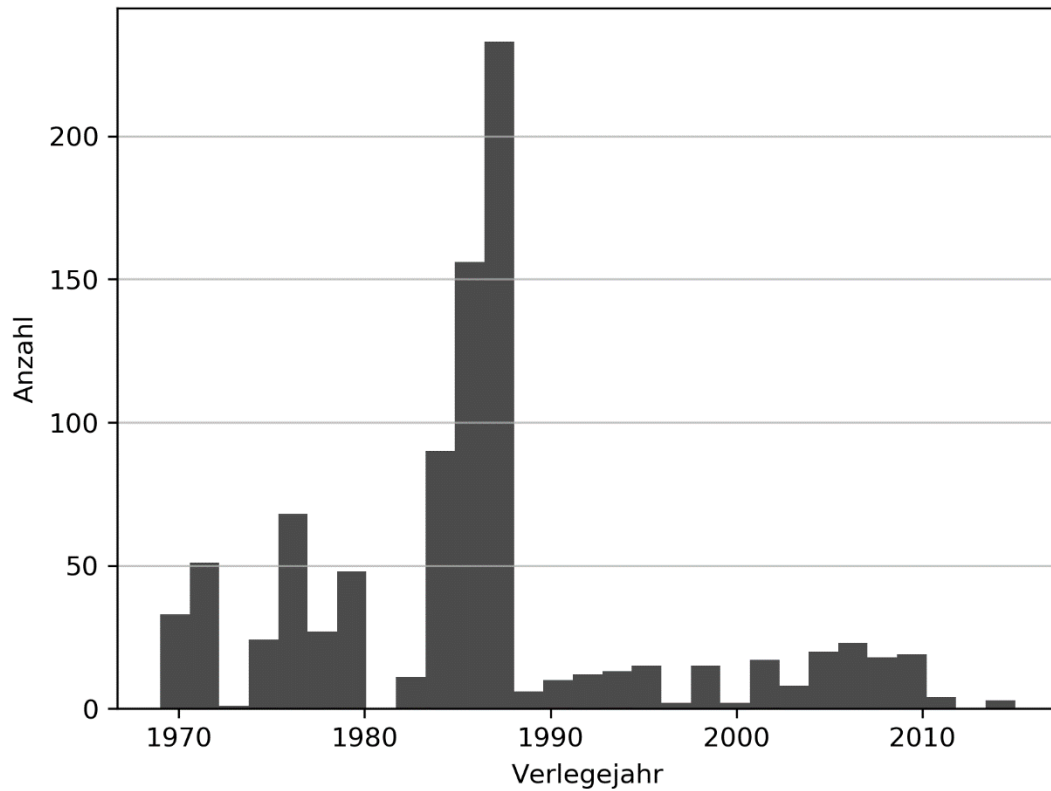


Abbildung 4-5: Histogramm der Verlegejahre Seiersberg

Histogramm der Einbautendichte im hydraulischen Modell Seiersberg

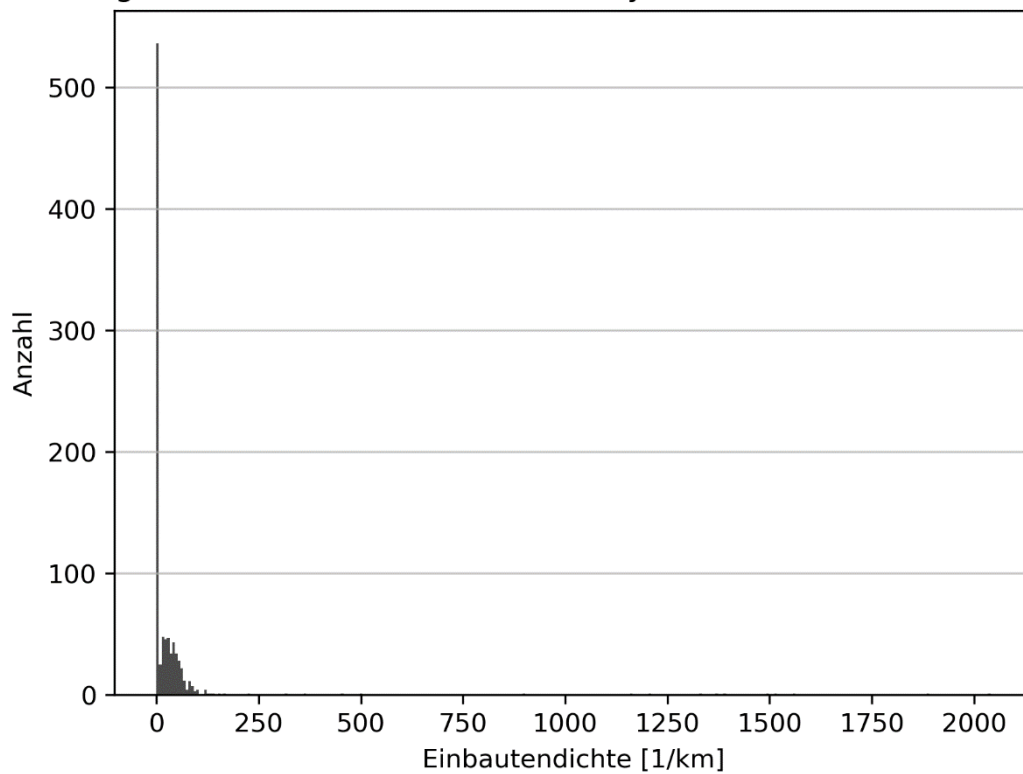


Abbildung 4-6: Histogramm der Einbautendichte Seiersberg

Histogramm der Rohrdurchmesser im hydraulischen Modell Seiersberg

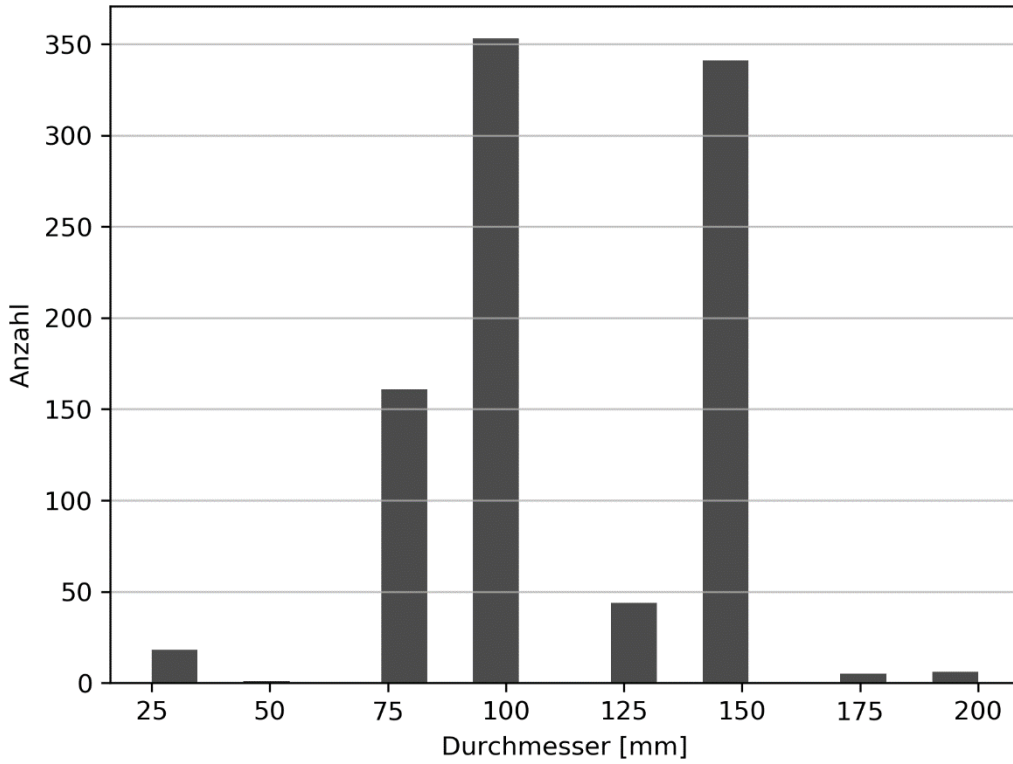


Abbildung 4-7: Histogramm der Rohrdurchmesser Seiersberg

Rohrmaterialien im hydraulischen Modell Seiersberg

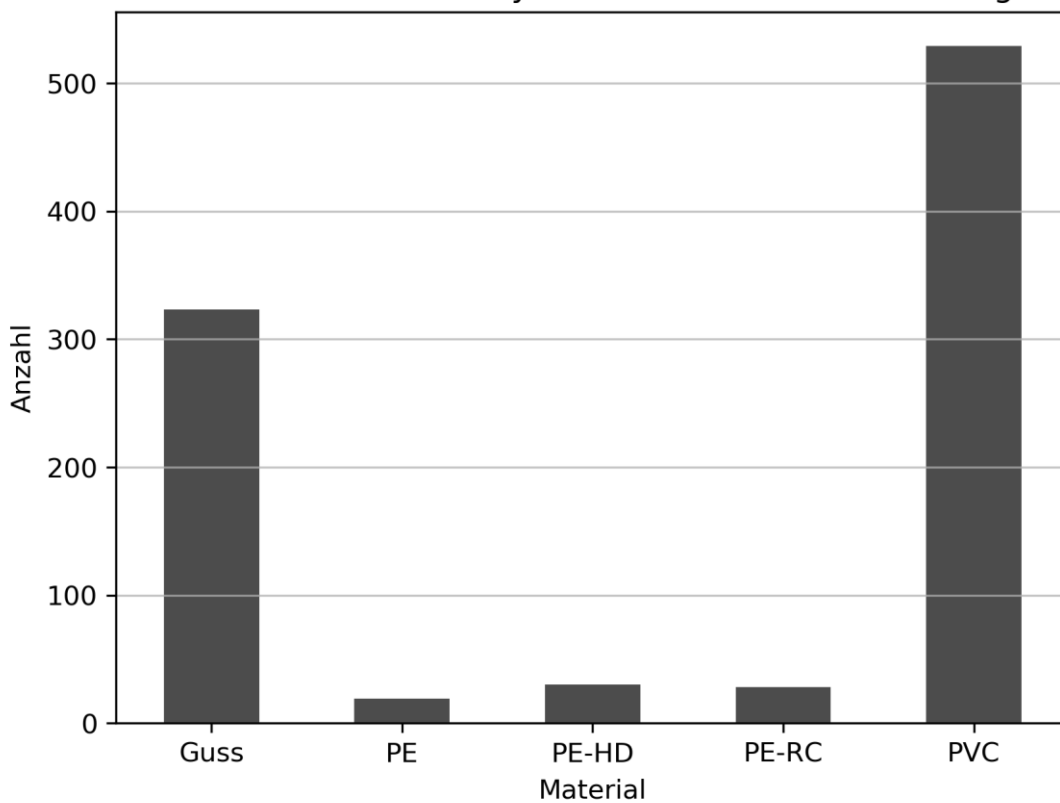


Abbildung 4-8: Diagramm der Rohrmaterialien Seiersberg

4.2 Hart bei Graz

Die Grundlage dieser Fallstudie bildet ein Feldversuch im Teilabschnitt Hart bei Graz / Ragnitz des Wasserverbandes Grazerfeld, der von Mitarbeitern und Diplomanden des Instituts durchgeführt wurde. Der Feldversuch erstreckte sich vom 5. April 2016 bis zum 29. August 2016. Es wurden Druck-, Durchfluss- und Behälterwasserstandsmessungen durchgeführt. Zusätzlich zum Feldversuch wurde ein hydraulisches Modell des Netzes mit EPANET erstellt. (Ramaseder, 2016; Steffelbauer, 2018)

4.2.1 Geografische und geodätische Lage

Das Versuchsgebiet liegt östlich von Graz auf dem Gebiet der Gemeinde Hart bei Graz. Die geodätischen Höhen des Netzes liegen zwischen 404,5 m.ü.A. und 504,7 m.ü.A. Der große Höhenunterschied von ca. 100 m führt zu relativ hohen Drücken im System. (Lippacher, 2018)

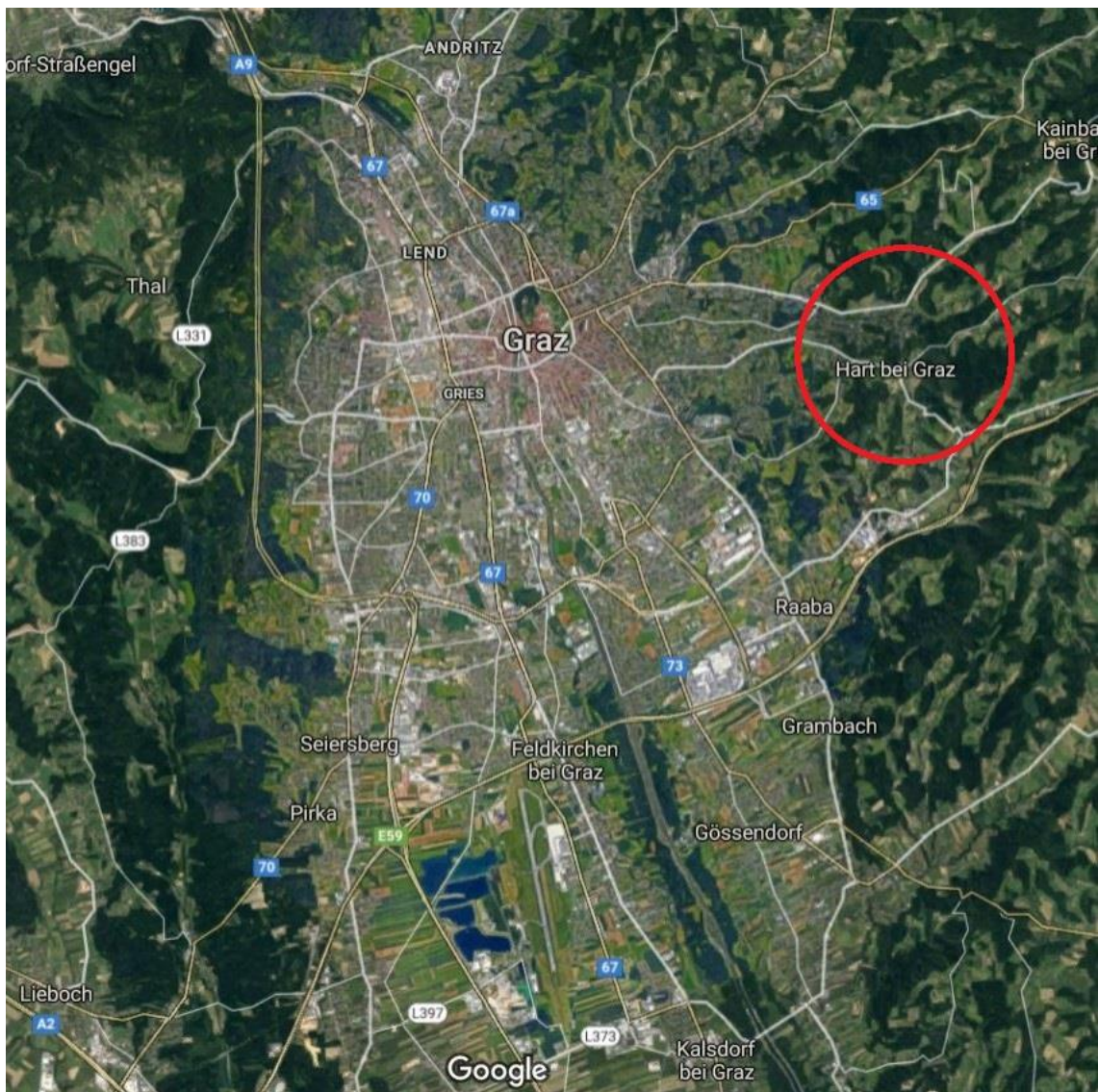


Abbildung 4-9: Lage des Untersuchungsgebietes in Hart bei Graz (Google Maps, 2018, mod.)

4.2.2 Ablauf der Messungen

Im System wurden zwölf Drucksensoren und ein Durchflussmessgerät am Hochbehälter angebracht. Die für diese Arbeit relevanten Daten wurden in der Nacht des 12. April 2016 gemessen, als an sechs verschiedenen Hydranten große Mengen Wasser entnommen wurden.

Die Entnahmen wurden in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase zwischen 01:30 Uhr und 02:45 Uhr wurde an den Hydranten HG3880, HG3409 und HG4118 Wasser entnommen. Danach wurden die Entnahmepunkte umgesetzt und in der zweiten Phase zwischen 03:15 Uhr und 04:30 Uhr an den Hydranten HG4504, HG3537 und HG3302 Wasser entnommen. Die Positionen der Hydranten können der Abbildung 4-10 entnommen werden. Die geplanten Entnahmemengen sowie der genaue Zeitpunkt der jeweiligen Entnahme sind Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5 ersichtlich.

Weiters ist zu erwähnen, dass die Entnahmemengen bei den Hydranten HG3409 und HG4504 nicht gemessen, sondern nur geschätzt wurden. Für die anschließende Kalibrierung wurde diese Entnahmemenge aus der Einspeisemessung und den anderen Entnahmen berechnet.

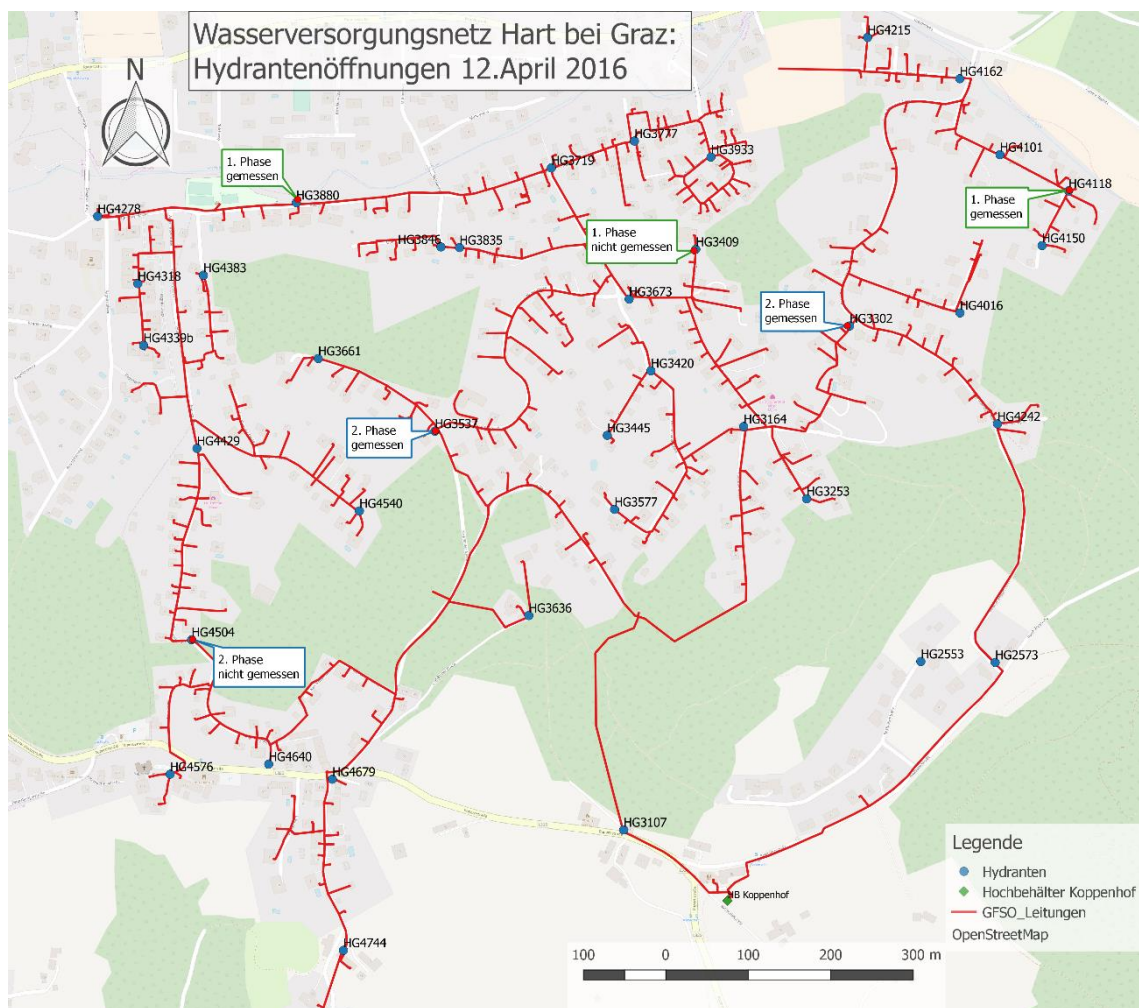


Abbildung 4-10: Entnahmen und Druckmesspunkte Hart bei Graz (Lippacher, 2018)

Tabelle 4-4: Entnahmeplan Hart bei Graz Phase 1 (Ramaseder, 2016; Lippacher, 2018, mod.)

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

Tabelle 4-5: Entnahmeplan Hart bei Graz Phase 2 (Ramaseder, 2016; Lippacher, 2018, mod.)

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

4.2.3 Erstellung des hydraulischen Modells

Aus dem Leitungskataster des Wasserversorgungsunternehmens wurde das hydraulische Modell in Abbildung 4-11 erstellt. Dem Modell zugehörig ist eine Metadatendatei, welche insbesondere Informationen über Rohrmaterial und Verlegejahr enthält. Die Daten über die Verbräuche im Allgemeinen stammen aus Zählerablesungen in den Jahren 2010 bis 2014 (Steffelbauer u. a., 2017). Die Verbräuche des Nachtminimums stammen aus den Einspeisemessungen des Feldversuchs (Lippacher, 2018).



Abbildung 4-11: Vollständiges hydraulisches Modell Hart bei Graz

Um das Netz zu vereinfachen, und zusätzliche Metadaten über die Einbautendichte zu erhalten, wurde dieses zugrundeliegende Netz automatisch skeletonisiert (2.5.8). Das automatisch skeletonisierte Netz ist in Abbildung 4-12 ersichtlich.

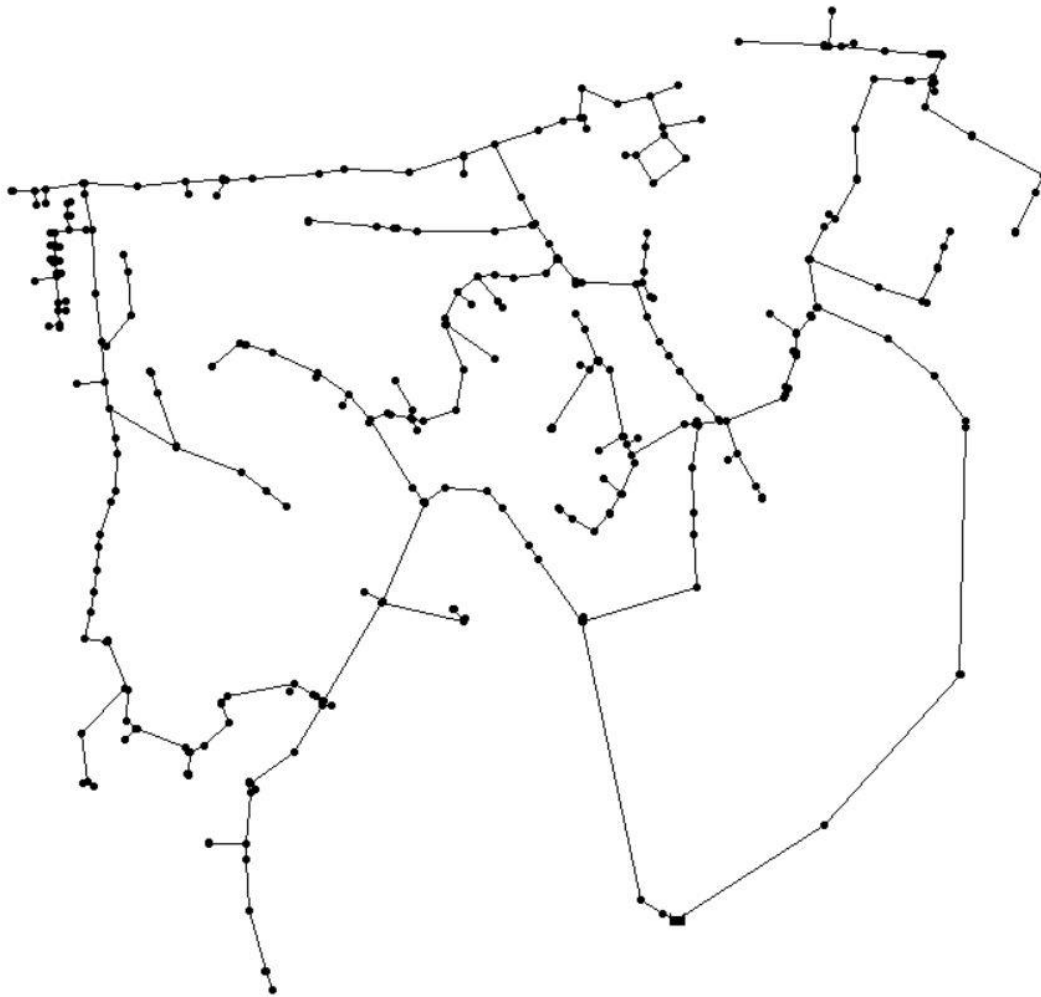


Abbildung 4-12: Skeletonisiertes hydraulisches Modell Hart bei Graz

4.2.4 Eigenschaften des hydraulischen Modells

Das hydraulische Modell umfasst 481 Leitungsabschnitte mit einer Gesamtlänge von 10,26 km. Der Großteil der Leitungen wurde vor dem Jahr 1980 verlegt, vgl. Abbildung 4-13. Die meisten Leitungen verfügen über keinerlei Einbauten. Sind Einbauten vorhanden, liegt die Einbautendichte bei den meisten Leitungen zwischen 0 und 100 Einbauten/km mit Ausreißern nach oben bei sehr kurzen Leitungen, vgl. Abbildung 4-14. Der häufigste Durchmesser im Modell ist 81,4 mm bei Versorgungsleitungen. Anschlussleitungen mit kleinen Durchmessern treten im Modell selten auf, da sie durch die Skeletonisierung Großteiles entfernt wurden, vgl. Abbildung 4-15. Die auftretenden Materialien sind hauptsächlich Kunststoffe und Grauguss, vgl. Abbildung 4-16. Anzumerken ist, dass die Metallleitungen auf die Leitungslänge bezogen einen weitaus geringeren Anteil ausmachen, was in dieser Abbildung nicht ersichtlich ist.

Histogramm der Verlegejahre im hydraulischen Modell Hart bei Graz

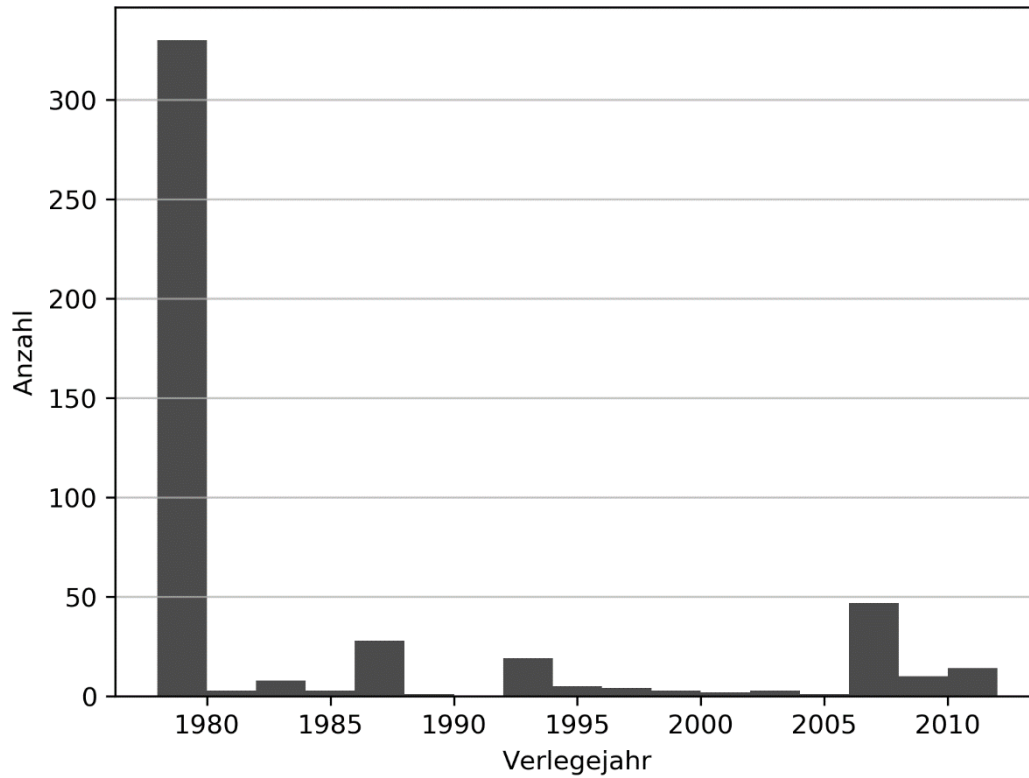


Abbildung 4-13: Histogramm der Verlegejahre Hart bei Graz

Histogramm der Einbautendichte im hydraulischen Modell Hart bei Graz

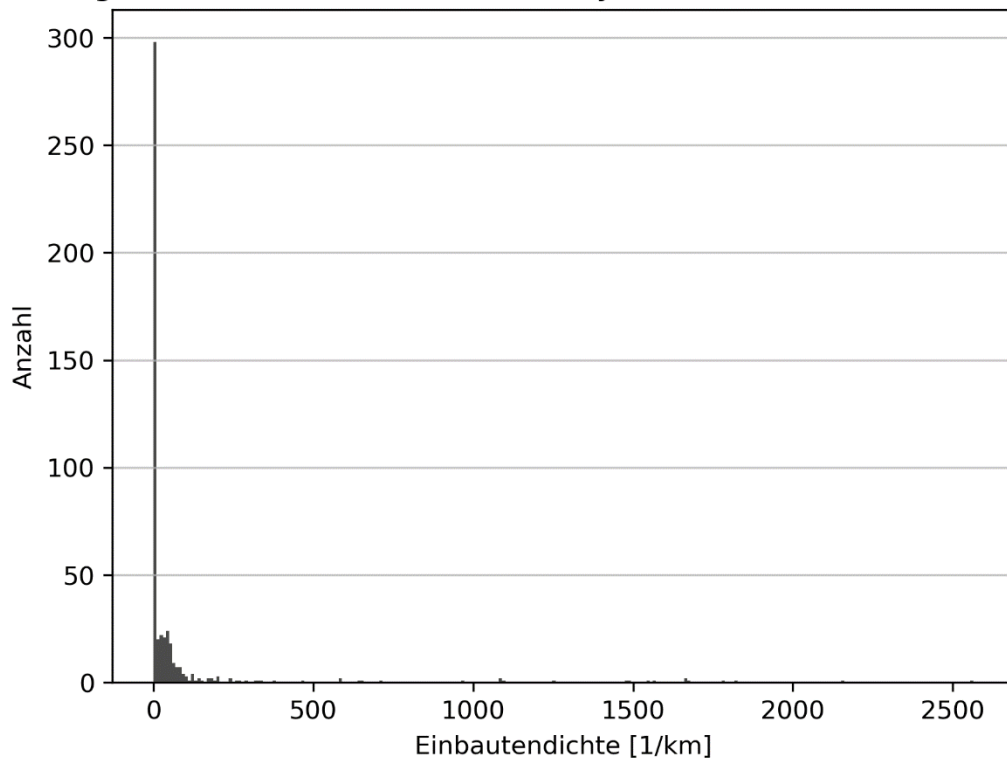


Abbildung 4-14: Histogramm der Einbautendichte Hart bei Graz

Histogramm der Rohrdurchmesser im hydraulischen Modell Hart bei Graz

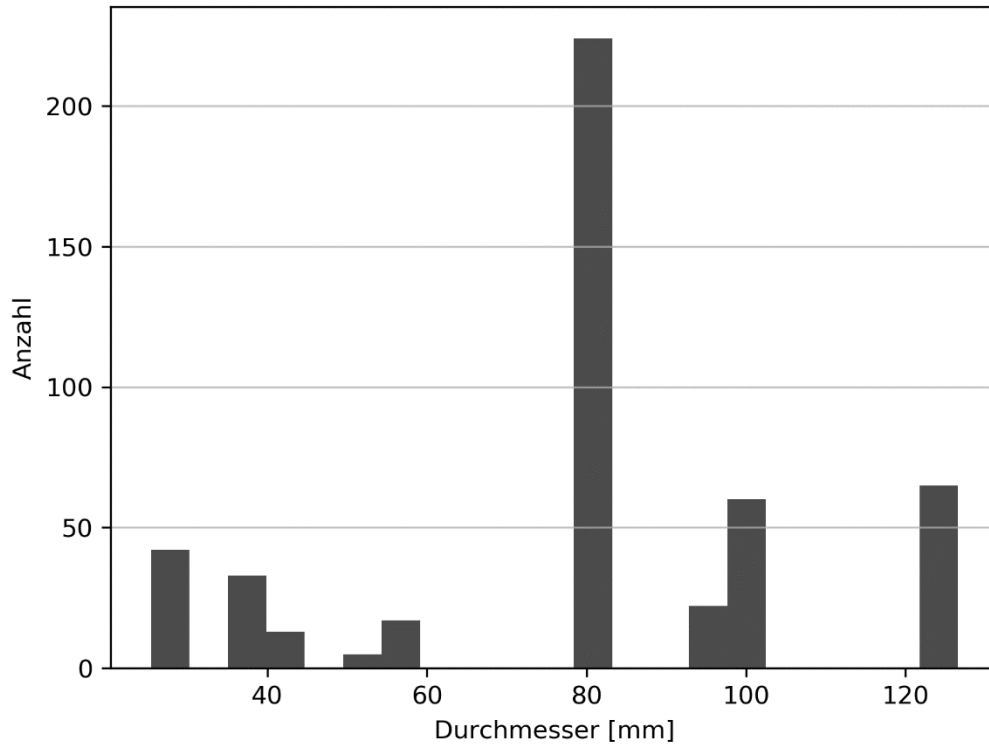


Abbildung 4-15: Histogramm der Rohrdurchmesser Hart bei Graz

Rohrmaterialien im hydraulischen Modell Hart bei Graz

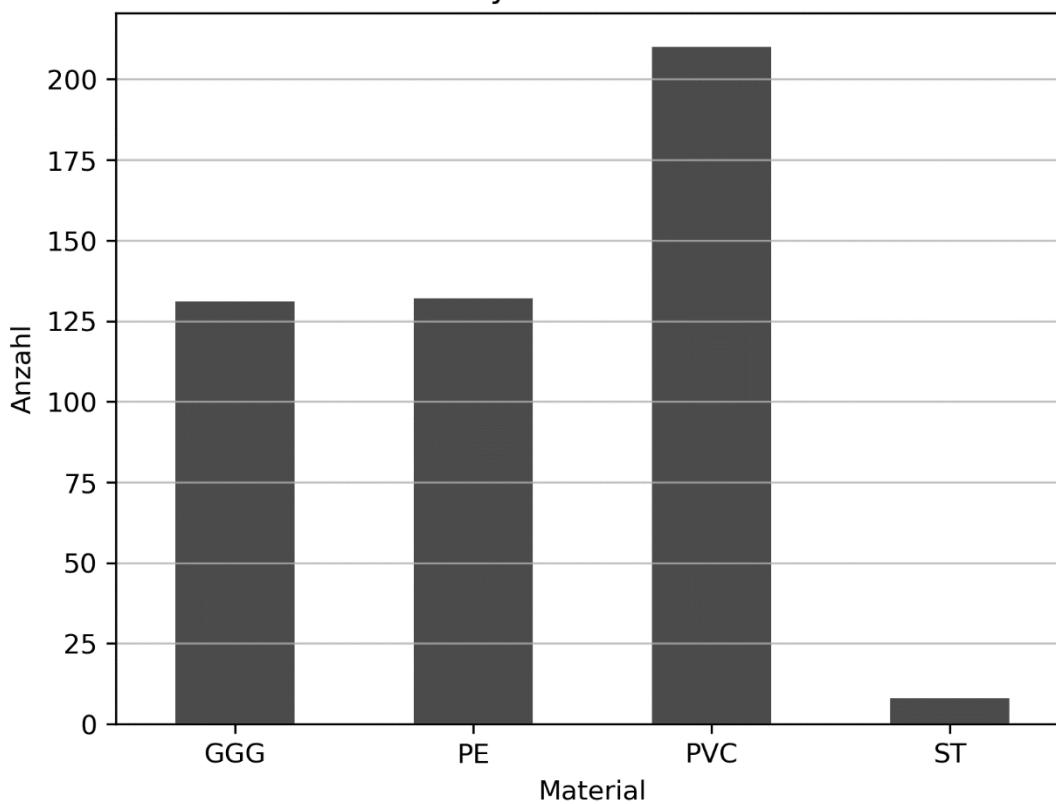


Abbildung 4-16: Diagramm der Rohrmaterialien Hart bei Graz

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der Vorkalibrierung beider Fallstudien als Grundlage für die Anwendung der automatischen Kalibrierung und dann die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung an der Fallstudie „Seiersberg“ beschrieben. Weiters werden die Ergebnisse der Fallstudie „Hart bei Graz“, welche neben der Fallstudie „Seiersberg“ für die weiteren Schritte verwendet wurde, kurz zusammengefasst. Danach werden die Ergebnisse der verschiedenen Abbruchkriterien sowie der neuen Methodik zur Evaluierung der Modellgüte aus der Streuung der Population des Optimierers dargelegt.

5.1 Ergebnisse der Vorkalibrierung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Vorkalibrierung (3.1) jeweils zuerst für die Fallstudie „Seiersberg“ und dann für die Fallstudie „Hart bei Graz“ beschrieben.

5.1.1 Verwendete Szenarien

In diesem Kapitel werden die Kalibrierungs- und Validierungsszenarien für beide Fallstudien dargestellt. Es werden die Entnahmen an den jeweiligen Positionen angegeben sowie die Zeitspanne bzw. der Zeitpunkt der verwendeten Daten.

In Tabelle 5-1 sind die Szenarien der ersten Messphase, in Tabelle 5-2 die Szenarien der zweiten Messphase der Fallstudie „Seiersberg“ abgebildet. Das Nullszenario und alle Szenarien mit nur einer Entnahme wurden zur Kalibrierung verwendet, die übrigen Szenarien zur Validierung. Beim Szenario 5 wurde die Entnahme Q_03 und beim Szenario 10 die Entnahme Q_04 nicht mit einem elektronischen Messgerät, sondern mit einem Staurohr gemessen. Dies legt ebenfalls die Verwendung dieser Szenarien zur Validierung nahe.

Damit ergeben sich die Kalibrierungsszenarien zu: Szenario 0, 1, 2, 3, 6, 7 und 8. Die Validierungsszenarien ergeben sich zu: Szenario 4, 5, 9 und 10.

Tabelle 5-1: Entnahmemessungen Szenarien Phase 1 – Seiersberg

Szenario	Zeit	Q_01 [l/s]	Q_02 [l/s]	Q_03 [l/s]
0	01:09:00-01:13:00	0,00	0,00	0,00
1	01:14:30	36,43	0,00	0,00
2	01:20:00	0,00	37,49	0,00
3	02:34:15	0,00	0,00	38,13
4	01:56:00	19,89	19,97	0,00
5	02:41:00	17,03	17,05	12,00

Ergebnisse

Tabelle 5-2: Entnahmemessungen Szenarien Phase 2 – Seiersberg

Szenario	Zeit	Q_04 [l/s]	Q_05 [l/s]	Q_06 [l/s]
6	03:40:00	35,60	0,00	0,00
7	03:43:30	0,00	37,90	0,00
8	04:00:00	0,00	0,00	46,13
9	03:50:00	19,50	19,50	0,00
10	04:06:00	17,00	16,95	16,95

In Tabelle 5-3 sind die Szenarien der ersten Messphase, in Tabelle 5-4 die Szenarien der zweiten Messphase der Fallstudie „Hart bei Graz“ abgebildet. Das Nullszenario und sämtliche Szenarien ohne errechnete Daten wurden zur Kalibrierung verwendet (vgl. 4.2.2). Zusätzlich wurde das Szenario 8 aufgrund des teilweise geschlossenen Schiebers (vgl. 5.1.3) in die Kalibrierungsszenarien aufgenommen. (Lippacher, 2018)

Damit ergeben sich die Kalibrierungsszenarien zu: Szenario 0, 1, 6, 7, 8, 11, 12 und 14. Die Validierungsszenarien ergeben sich zu: Szenario 2, 3, 4, 5, 9, 10 und 13.

Tabelle 5-3: Entnahmemessungen Szenarien Phase 1 – Hart bei Graz (Lippacher, 2018, mod.)

Szenario	Zeit	HG3880 [l/s]	HG3409 [l/s]	HG4118 [l/s]
0	01:22:00 – 01:31:00	0,00	0,00	0,00
1	01:37:45 – 01:40:30	15,03	0,00	0,00
2	01:47:30 – 01:49:45	8,06	4,11	0,00
3	01:58:00 – 01:59:30	4,97	1,14	5,10
4	02:04:00 – 02:06:00	0,00	11,54	0,00
5	02:09:15 – 02:11:45	0,00	2,62	7,05
6	02:15:45 – 02:18:15	0,00	0,00	12,03
7	02:22:15 – 02:25:15	6,93	0,00	7,06

Tabelle 5-4: Entnahmemessungen Szenarien Phase 2 – Hart bei Graz (Lippacher, 2018, mod.)

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

5.1.2 Ergebnis der Anpassung der geodätischen Sensorhöhen

Mit dem jeweiligen Nullszenario wurde die Simulation des Nachtminimums durchgeführt. Nach der Simulation wurden die Abweichungen von gemessenen und simulierten Drücken berechnet und zu der geodätischen Höhe des Messpunktes addiert bzw. subtrahiert. Eine abschließende Simulation ergab keine weiteren Druckdifferenzen mehr und die neu berechneten Höhen wurden für die AC verwendet.

Die Ergebnisse für die Fallstudie „Seiersberg“ sind in Tabelle 5-5 dargestellt, die Ergebnisse für die Fallstudie „Hart bei Graz“ in Tabelle 5-6. Es sind zuerst die gemessenen Drücke der Nullszenarien, dann die geodätischen Höhen aus dem Leitungskataster sowie die die angepassten Höhen im EPANET-Modell angegeben. Abschließend ist die Differenz der Anpassung angeführt.

Tabelle 5-5: Anpassung der geodätischen Höhen im hydraulischen Modell Seiersberg

Messpunkt	Druck [mWS]	gemessen	GIS-Höhen [m.ü.A.]	EPANET-Höhen [m.ü.A.]	Differenz [m]
P_02	57,09		343,69	346,29	2,60
P_03	57,09		343,97	346,29	2,32
P_04	59,13		342,50	344,26	1,76
P_05	56,07		345,33	347,31	1,98
P_06	58,11		343,47	345,28	1,81
P_07	57,09		344,05	346,32	2,27
P_08	56,07		346,10	347,39	1,29
P_09	58,11		344,14	345,38	1,24
P_10	42,81		358,93	360,69	1,76
P_11	53,01		348,82	350,50	1,68
P_12	56,07		345,86	347,44	1,58
P_13	45,87		356,03	357,64	1,61

Ergebnisse

Tabelle 5-6: Anpassung der geodätischen Höhen im hydraulischen Modell Hart bei Graz (Lippacher, 2018, mod.)

Messpunkt	Druck [mWS]	gemessen GIS-Höhen [m.ü.A.]	EPANET-Höhen [m.ü.A.]	Differenz [m]
HG3420	83,69	423,74	423,94	0,20
HG3445	69,81	436,88	437,82	0,94
HG3835	89,41	418,6	418,22	-0,38
HG3933	91,23	415,26	416,39	1,13
HG4150	76,25	431,18	431,38	0,20
HG4162	87,69	419	419,94	0,94
HG4215	90,29	417,44	417,34	-0,10
HG4339b	96,22	410,92	411,39	0,47
HG4383	90,13	417,69	417,49	-0,20
HG4540	62,67	443,26	444,95	1,69
HG4576	31,20	476,71	476,42	-0,29
HG4744	31,78	474,67	475,85	1,18

In der letzten Spalte ist ersichtlich, dass die Höhendifferenz bei der Fallstudie „Hart bei Graz“ zwischen -0,38 m und +1,69 m, bei der Fallstudie „Seiersberg“ zwischen +1,24 m und +2,60 m liegt. Der Unterschied ergibt sich dadurch, dass bei der Fallstudie „Hart bei Graz“ Druckmessungen an Oberflur- und Unterflurhydranten durchgeführt wurden, bei der Fallstudie „Seiersberg“ hingegen nur bei Oberflurhydranten.

5.1.3 Positionen der geschlossenen Schieber

Um den geschlossenen Schieber der Fallstudie „Seiersberg“ zu finden, wurden mehrere Simulationen mit der AC durchgeführt, jeweils unter Verwendung einer Gruppierung nach geografischen Zonen. Die Ergebnisse wiesen eine hohe Streuung auf, nach mehreren Kalibrierungen konnte jedoch ein Strang als Position für den geschlossenen Schieber ausfindig gemacht werden. In Abbildung 5-1 ist beispielhaft eines der Ergebnisse dargestellt, welches eine hohe Rauheit auf dem betreffenden Strang ergab.



Abbildung 5-1: Ergebnis der Rauheit nach Zonen – Seiersberg

Durch Anbringen eines lokalen Verlusts an mehreren Positionen dieses Stranges sowie an benachbarten Strängen und anschließendem Kalibrieren mit der AC konnte schließlich die in Abbildung 5-2 ersichtliche Position bestimmt werden. Der Vergleich der verschiedenen Schieberpositionen erfolgte mittels der Methodik zur Evaluierung der Modellgüte (3.2.3). Eine Rücksprache mit der SAS GmbH konnte diese Position schließlich bestätigen. Die SAS GmbH verwendete zur Modellierung einen ähnlichen Ansatz und konnte die Position des teilweise geschlossenen Schiebers nach Rücksprache mit dem Wassermeister verifizieren.

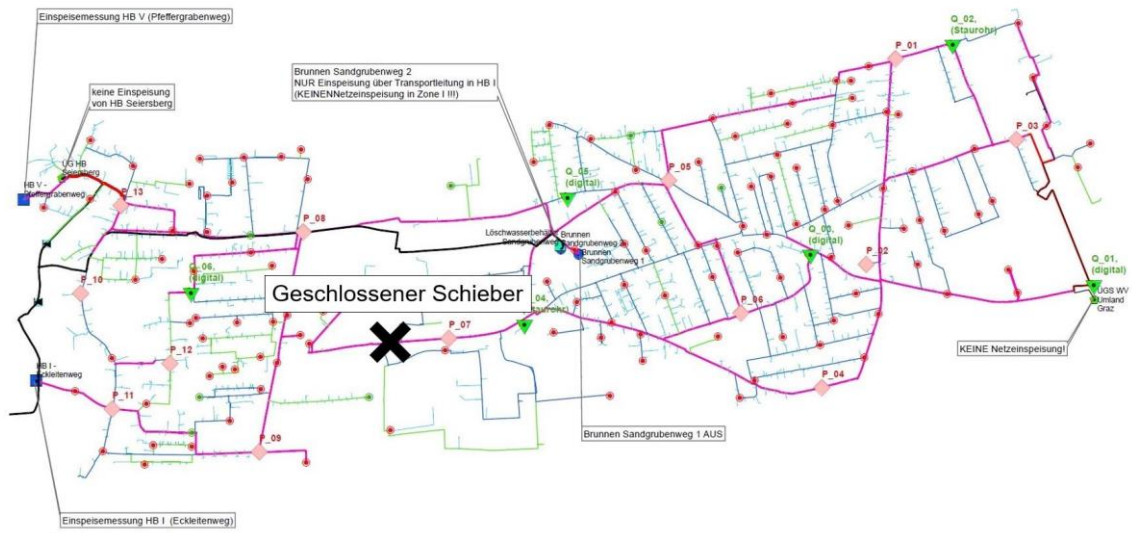


Abbildung 5-2: geschlossener Schieber – Seiersberg (SAS Styrian Aqua Service GmbH, 2015, mod.)

Bei der Fallstudie „Hart bei Graz“ waren in der Messnacht ein Schieber teilweise und eine Leitung ganz geschlossen. Die Positionen der geschlossenen Einbauten sind in Abbildung 5-3 ersichtlich und wurden von Lippacher (2018) übernommen.

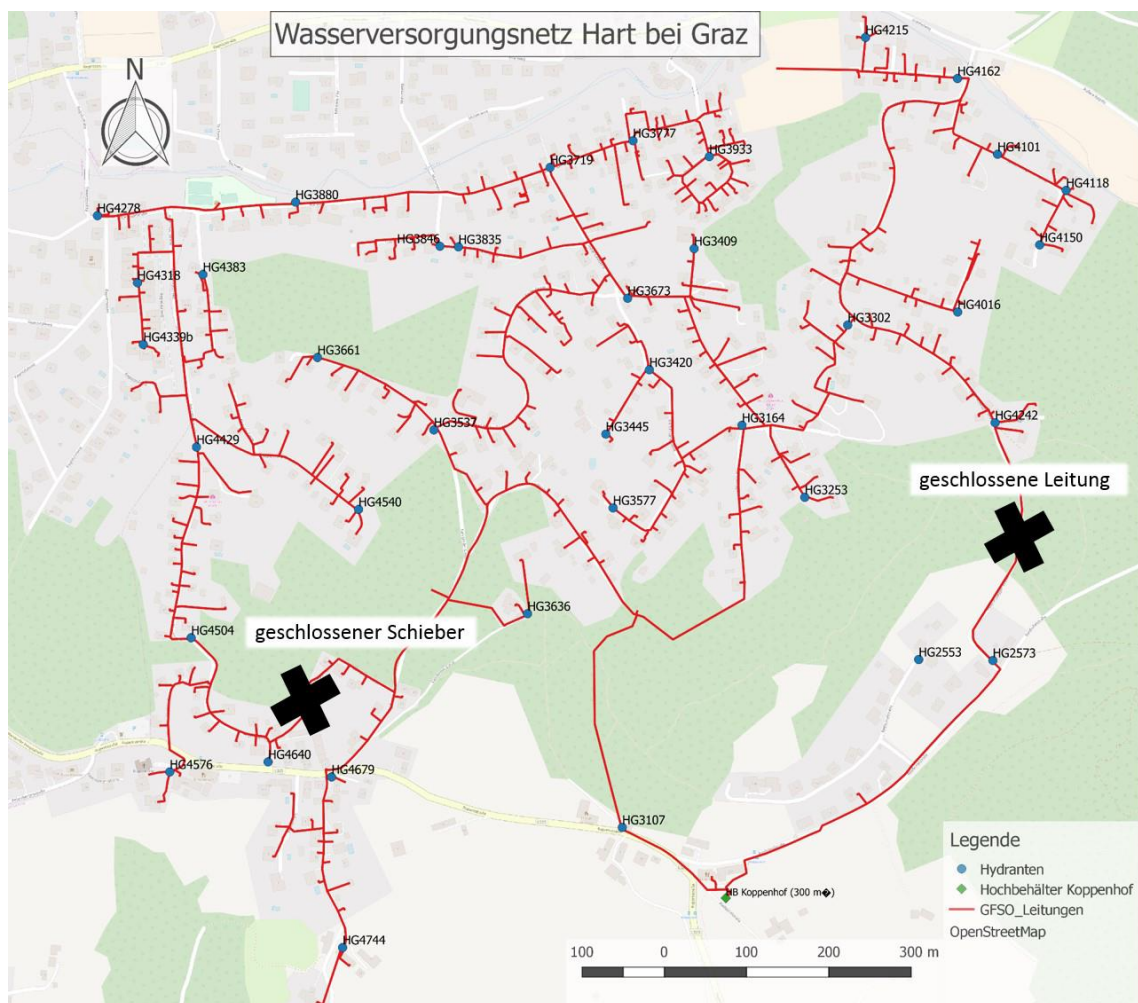


Abbildung 5-3: geschlossener Schieber & geschlossene Leitung – Hart bei Graz (Lip-pacher, 2018)

5.2 Ergebnisse der Anwendung an der Fallstudie „Seiersberg“

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung an der Fallstudie „Seiersberg“ für verschiedene Gruppierungen verglichen. Die Gruppierung erfolgte nach Verlegejahr, Einbautendichte, Durchmesser, Material, geogra-fischen Zonen sowie aus einer Kombination mehrerer Gruppierungsparameter.

5.2.1 Ergebnisse der Gruppierung der Rohrleitungen

Die Gruppierungen nach Netzeigenschaften sind in Tabelle 5-7 dargestellt, die nach geografischen Zonen in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5. Die Intervalle der quantitativen Gruppierungen ergaben sich aus den Eigenschaften des Netzes unter Zuhilfenahme der Histogramme (4.1.4).

Ergebnisse

Tabelle 5-7: Gruppierung der Rohrleitung nach Parametern – Seiersberg

Parameter	Gruppennummer				
	0	1	2	3	4
Verlegejahr	$(-\infty; 1984]$	$(1984; 1990]$	$(1990; \infty)$	-	-
Einbautendichte [1/km]	$(-\infty; 0,001]$	$(0,001; 40]$	$(40; 80]$	$(80; \infty)$	-
Durchmesser [mm]	$(-\infty; 90]$	$(90; 110]$	$(110; 160]$	$(160; \infty)$	-
Material	Guss	PE	PE-HD	PE-RC	PVC

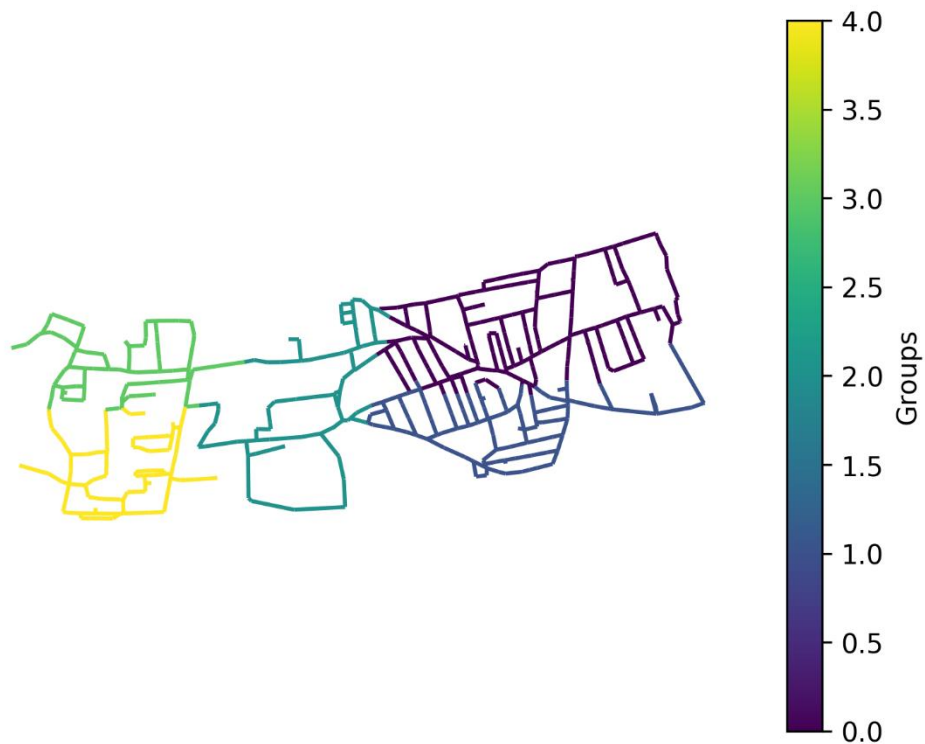


Abbildung 5-4: Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg

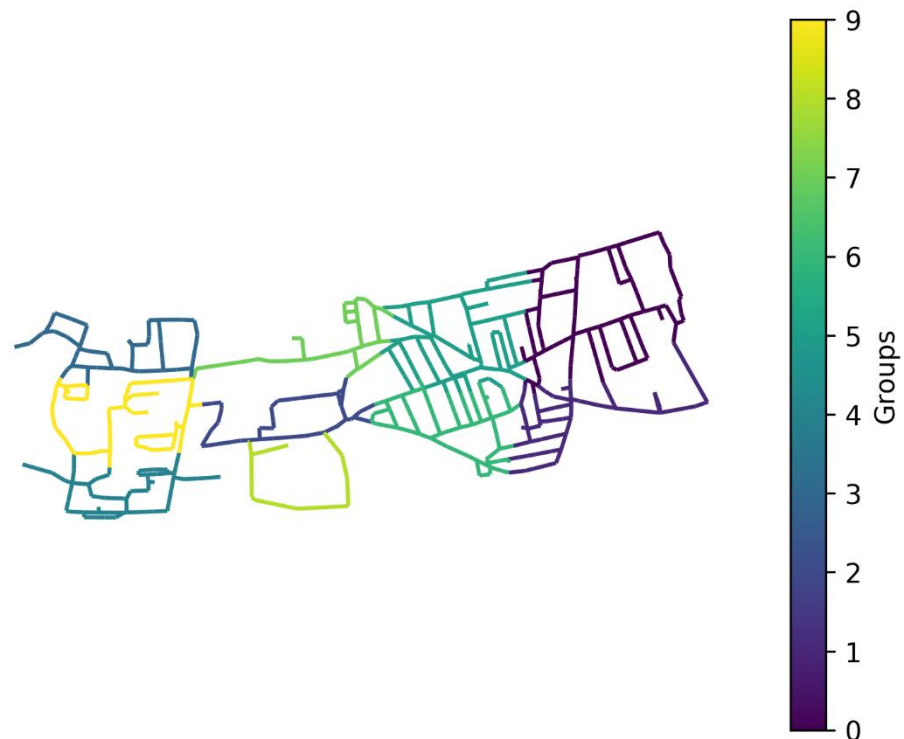


Abbildung 5-5: Gruppierung „Zonen fein“ – Seiersberg

Zusätzlich zu den einzelnen Gruppierungen wurden noch weitere Gruppierungen durch die Kombination der oben genannten Gruppierungen erstellt und evaluiert. Die Gruppierungskombination mit dem niedrigsten Fitnesswert wurde in die Ergebnisse aufgenommen und ist in Tabelle 5-8 dargestellt.

Tabelle 5-8: Gruppierung „Kombination“ nach Verlegejahr und Einbautendichte – Seiersberg

Gruppennummer	Verlegejahr	Einbautendichte [1/km]
0	$(-\infty; 1984]$	$(-\infty; 0,001]$
1	$(1984; 1990]$	$(-\infty; 0,001]$
2	$(1990; \infty)$	$(-\infty; 0,001]$
3	$(-\infty; 1984]$	$(0,001; 40]$
4	$(1984; 1990]$	$(0,001; 40]$
5	$(1990; \infty)$	$(0,001; 40]$
6	$(-\infty; 1984]$	$(40; 80]$
7	$(1984; 1990]$	$(40; 80]$
8	$(1990; \infty)$	$(40; 80]$
9	$(-\infty; 1984]$	$(80; \infty)$
10	$(1984; 1990]$	$(80; \infty)$
11	$(1990; \infty)$	$(80; \infty)$

5.2.2 Evaluierung der Modellgüte

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Methoden zur Evaluierung der Modellgüte dargestellt.

5.2.2.1 Streuung der Ergebnisse der automatischen Kalibrierung

Zur Überprüfung der Modellgüte der Kalibrierungen nach verschiedenen Gruppierungen wurde als erstes die Streuung der Ergebnisse herangezogen (3.2.3.1). Die Streuung der Rohrrauheiten und des Minor Loss-Koeffizienten sind für die jeweilige Gruppierung in Abbildung 5-6, Abbildung 5-7, Abbildung 5-8, Abbildung 5-9, Abbildung 5-10, Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 ersichtlich.

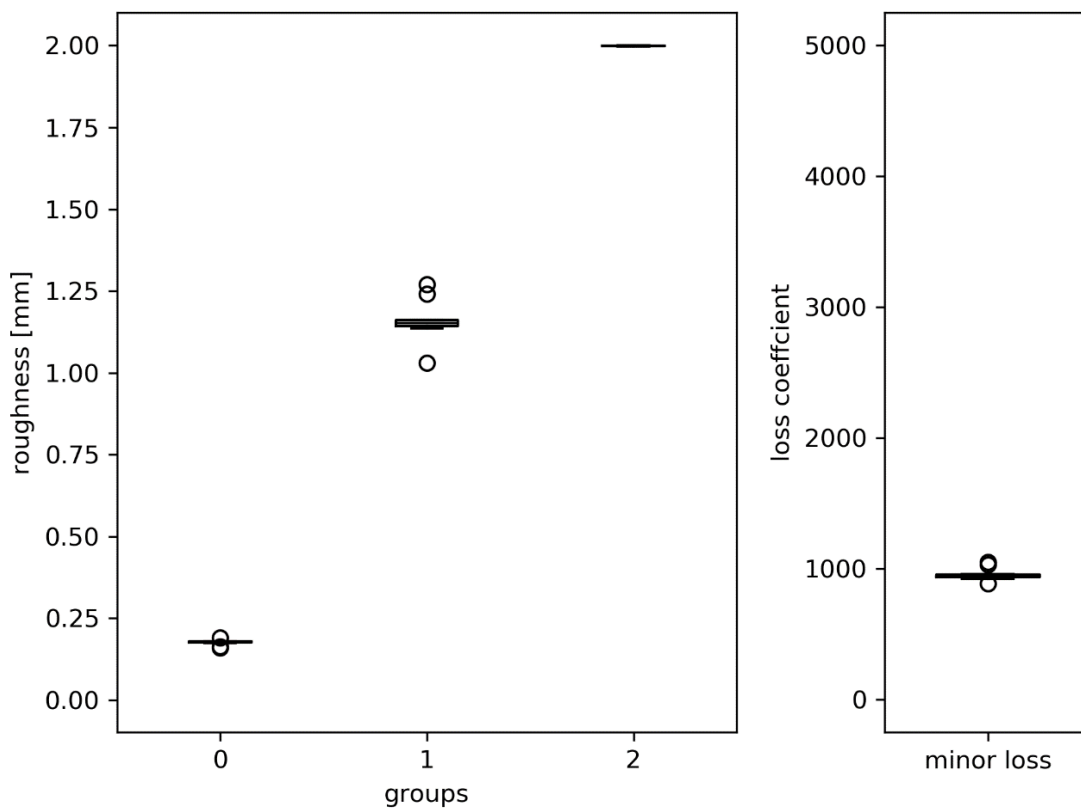


Abbildung 5-6: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Verlegejahr“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7

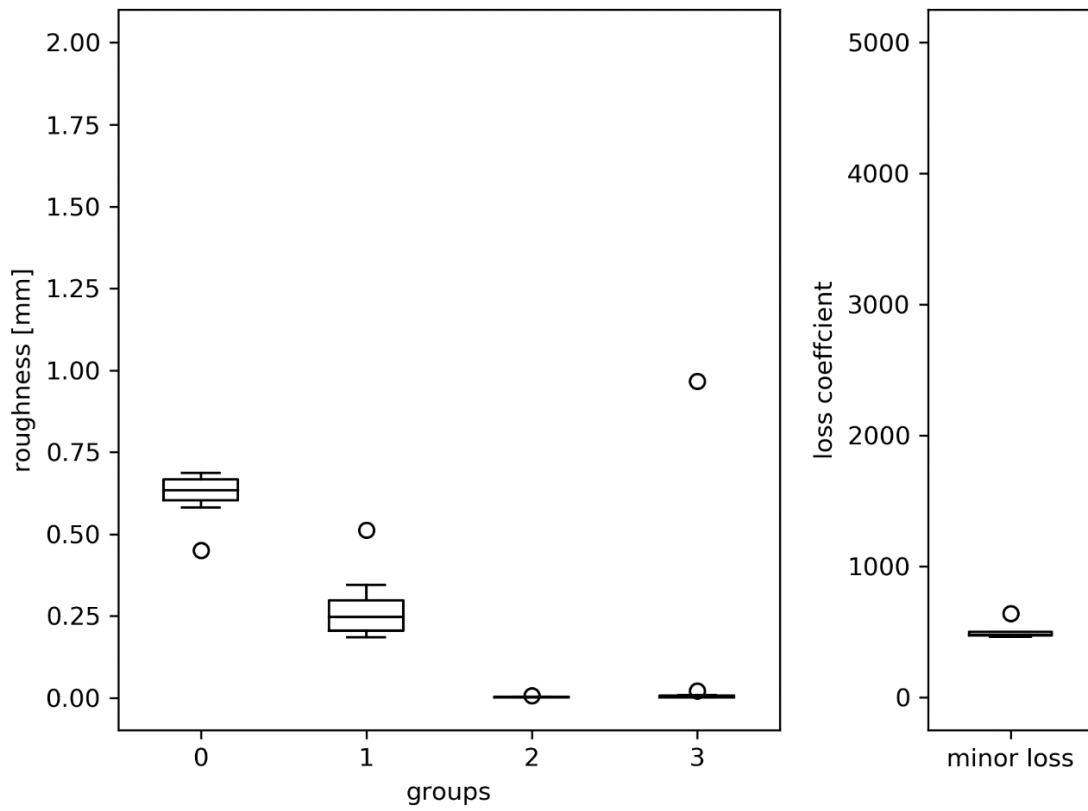


Abbildung 5-7: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Einbautendichte“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7

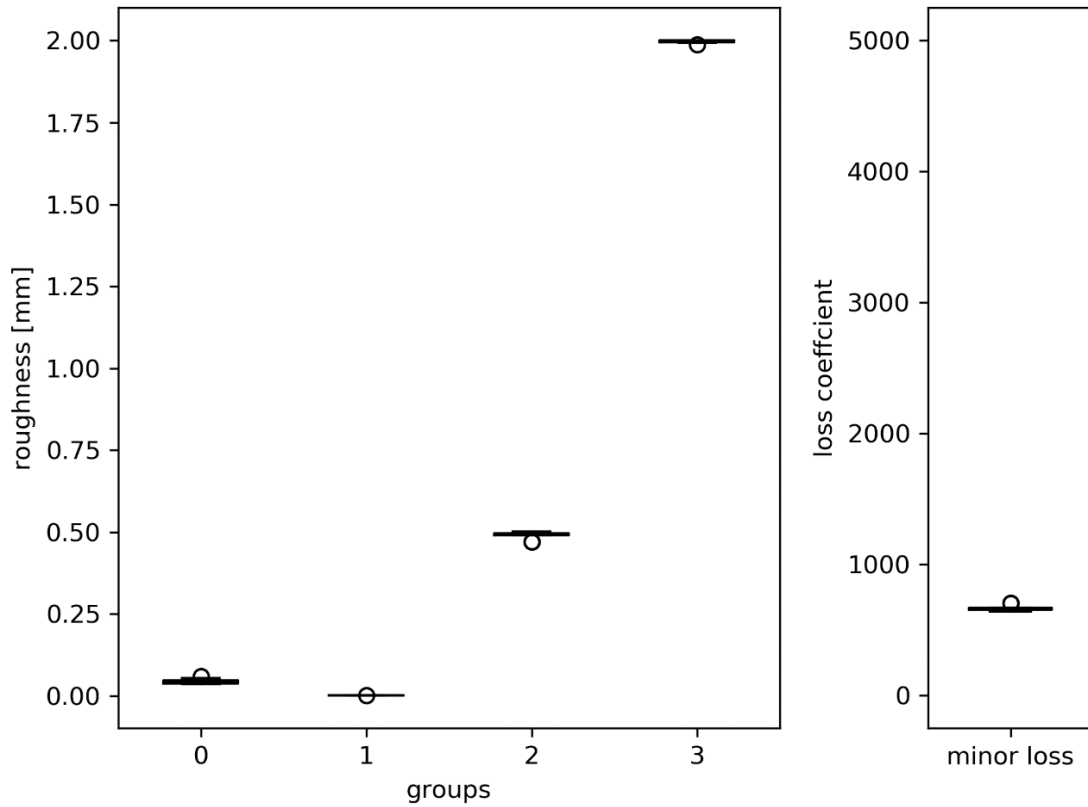


Abbildung 5-8: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Durchmesser“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7

Ergebnisse

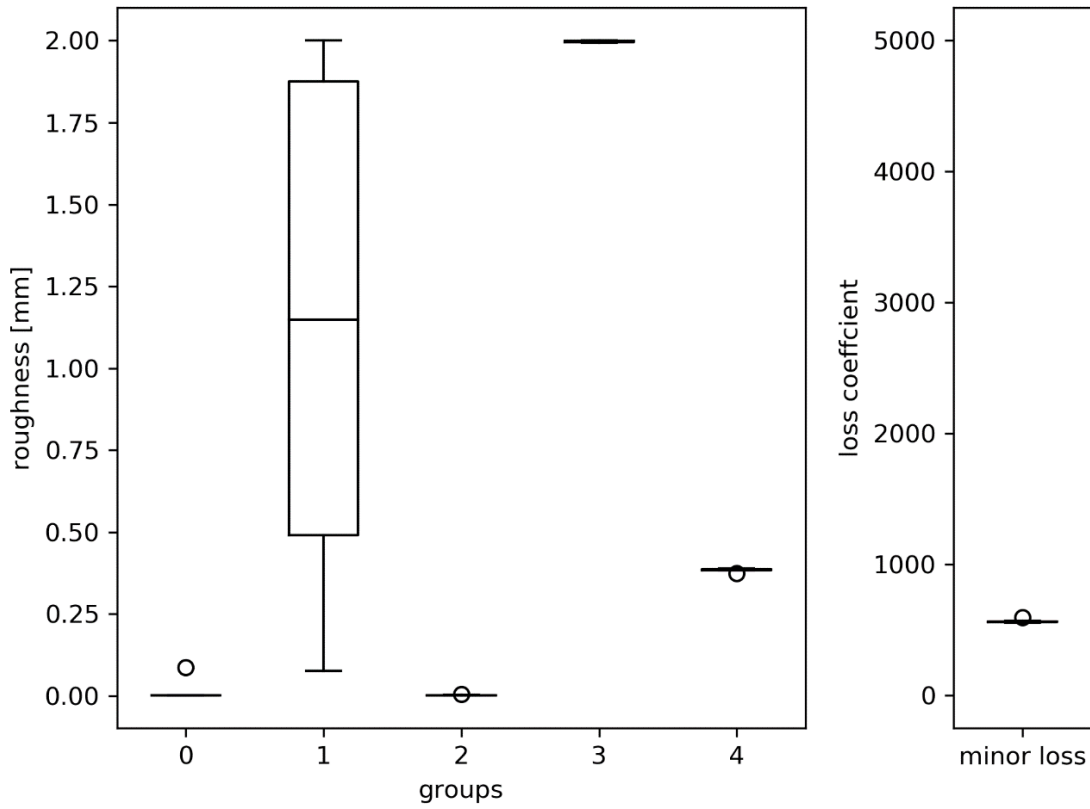


Abbildung 5-9: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Material“, Gruppennummern laut Tabelle 5-7

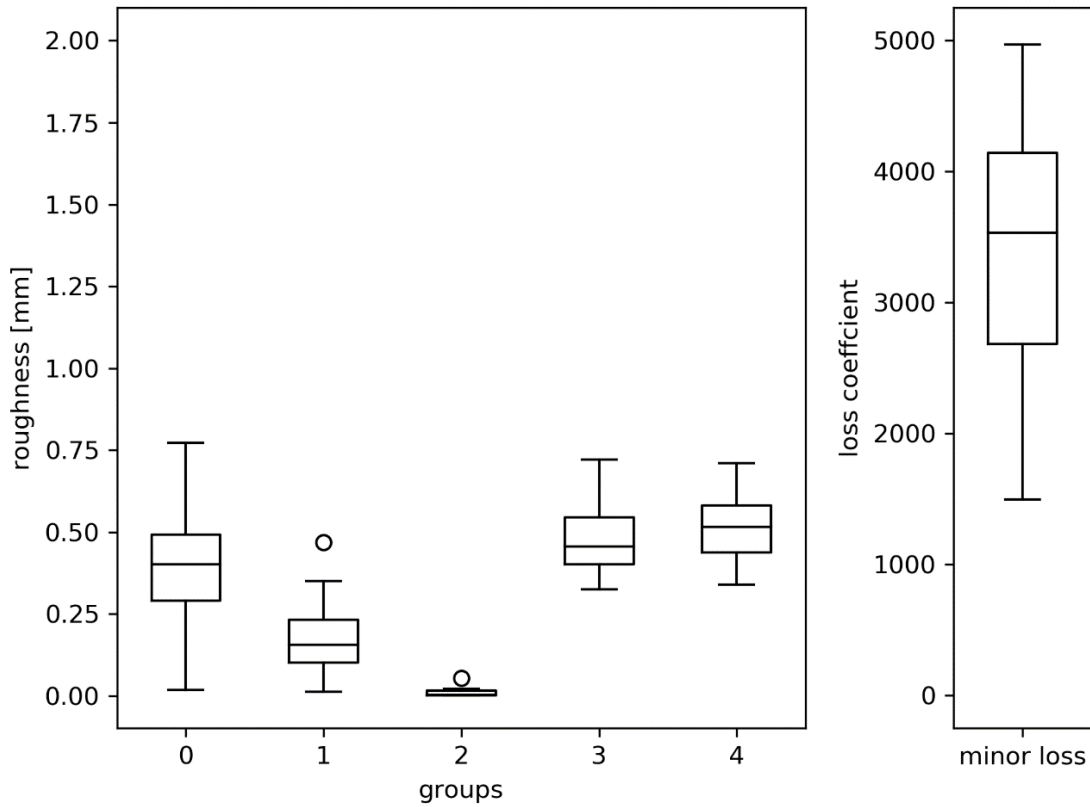


Abbildung 5-10: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Zonen grob“, Gruppennummern laut Abbildung 5-4

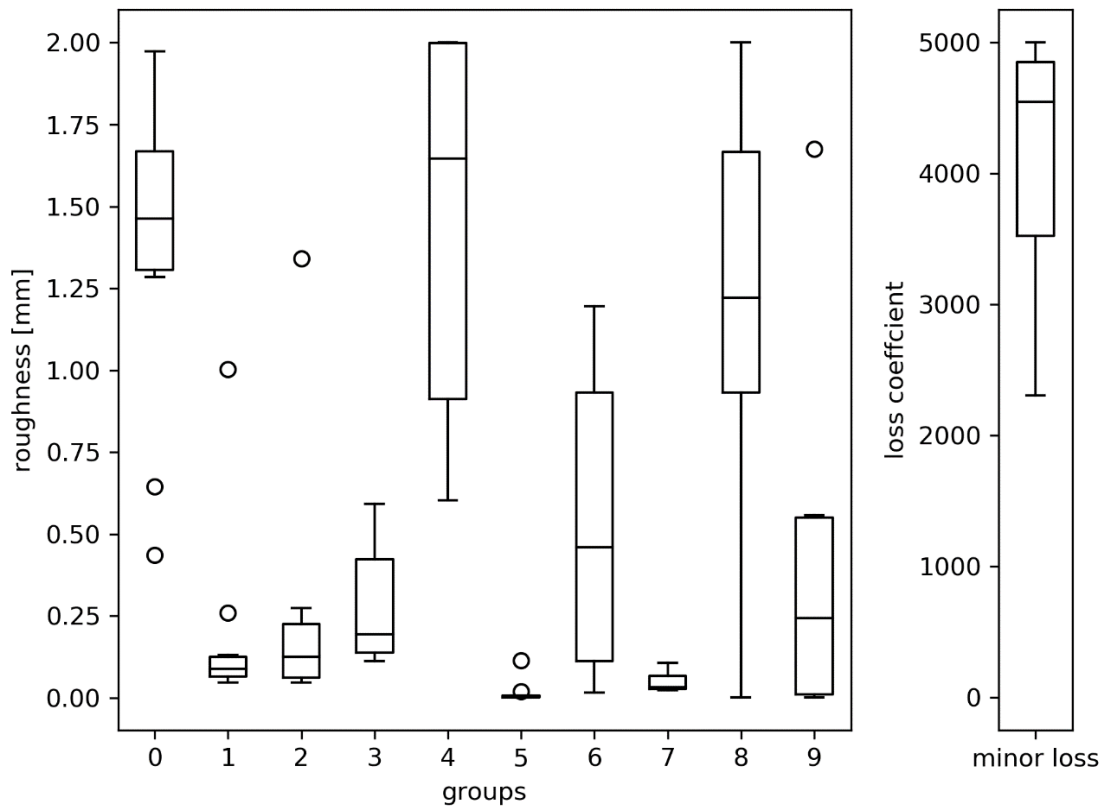


Abbildung 5-11: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Zonen fein“, Gruppennummern laut Abbildung 5-5

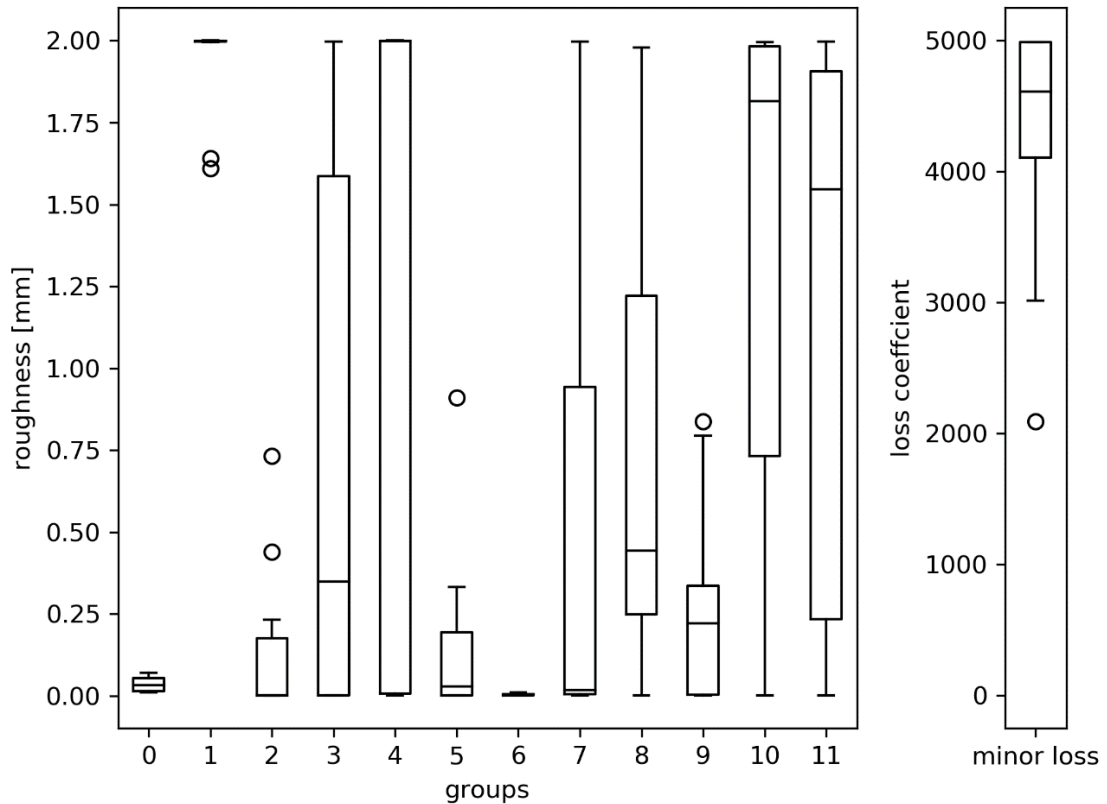


Abbildung 5-12: Streuung der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Kombination“, Gruppennummern laut Tabelle 5-8

Ergebnisse

Die sich aus der Streuung der Rohrrauheiten ergebenden Standardabweichungen je Gruppierung sind in Tabelle 5-9 dargestellt.

Tabelle 5-9: Standardabweichungen der Streuung der Rohrrauheiten der AC – Seiersberg

Gruppierung	Standardabweichung der Rauheiten (gemittelt über alle Gruppen)
Verlegejahr	0,025
Einbautendichte	0,119
Durchmesser	0,006
Material	0,158
Zonen grob	0,120
Zonen fein	0,360
Kombination	0,510

5.2.2.2 Korrelation

Alle Ergebnisse zeigen eine ähnliche Nähe zur Korrelationsgerade und können optisch kaum unterschieden werden. Die geringen Unterschiede bei Fitnesswert und Druckabweichungen (vgl. 5.2.2.4) bestätigen den optischen Eindruck. Beispielhaft ist in Abbildung 5-13 die Korrelation für die Gruppierung nach Verlegejahr dargestellt.

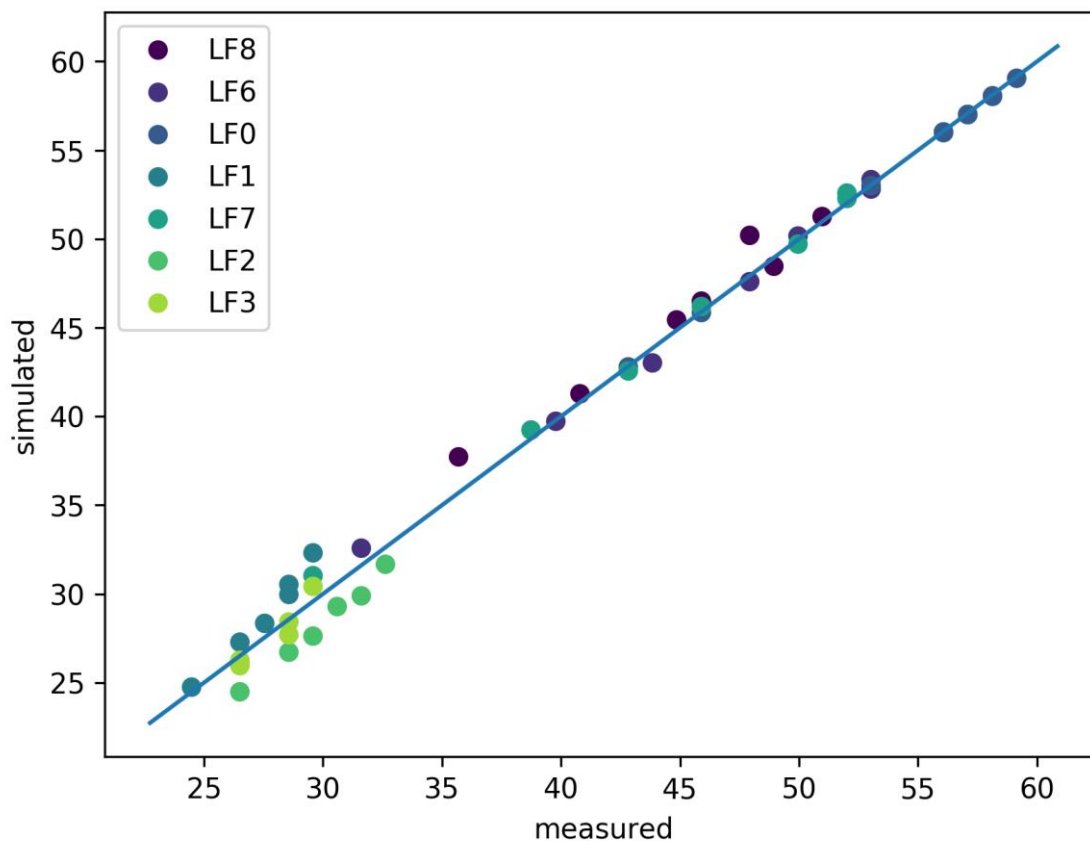


Abbildung 5-13: Korrelationsgerade der Ergebnisse der AC nach Gruppierung „Verlegejahr“ – Seiersberg

5.2.2.3 Überprüfung der zulässigen Einzelabweichungen

Die für die Überprüfung der zulässigen Abweichungen nach DVGW (2016) berechneten Werte sind in Tabelle 5-10 dargestellt.

Tabelle 5-10: Zulässige Abweichungen der Einzelmessungen und Grenzen für den Erwartungswert der Druckabweichung nach DVGW Arbeitsblatt 303-1

Messpunkt	Zulässige Abweichung der Einzelmessung a [mWS]	Grenzen für den Erwartungswert der Druckabweichung U [mWS]
3936	1,06	+/- 0,31
3991	0,86	+/- 0,25
4034	0,92	+/- 0,26
4629	1,12	+/- 0,32
5017	1,12	+/- 0,32
5973	1,14	+/- 0,33
6576	1,16	+/- 0,34
6767	1,18	+/- 0,34
7236	1,16	+/- 0,34
7435	1,14	+/- 0,33
7973	1,12	+/- 0,32
8279	1,14	+/- 0,33

In Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12 sind die Druckabweichungen für jede Messstelle, gemittelt über die Kalibrierungsszenarien, sowie der Erwartungswert der Druckabweichung je Gruppierung dargestellt. Es traten keine Überschreitungen der in Tabelle 5-10 dargestellten zulässigen Werte auf.

Tabelle 5-11: Abweichungen der Messungen an den Messstellen und Erwartungswerte der Druckabweichungen für Gruppierung nach Verlegejahr, Einbautendichte, Durchmesser und Material

Gruppierung	Verlegejahr		Einbautendichte		Durchmesser		Material	
	a	U	a	U	a	U	a	U
Messpunkt								
3936	0,23	-0,07	0,34	-0,02	0,41	0,00	0,26	-0,07
3991	0,65	-0,07	0,61	-0,02	0,56	0,00	0,74	-0,07
4034	0,39	-0,07	0,41	-0,02	0,43	0,00	0,39	-0,07
4629	0,70	-0,07	0,66	-0,02	0,49	0,00	0,72	-0,07
5017	0,31	-0,07	0,23	-0,02	0,31	0,00	0,22	-0,07
5973	0,71	-0,07	0,75	-0,02	0,82	0,00	0,73	-0,07
6576	0,90	-0,07	0,89	-0,02	0,89	0,00	0,91	-0,07
6767	0,96	-0,07	0,97	-0,02	0,97	0,00	0,99	-0,07
7236	0,32	-0,07	0,37	-0,02	0,23	0,00	0,30	-0,07
7435	0,80	-0,07	0,82	-0,02	0,82	0,00	0,84	-0,07
7973	0,76	-0,07	0,79	-0,02	0,80	0,00	0,81	-0,07
8279	1,10	-0,07	1,04	-0,02	1,06	0,00	1,04	-0,07

Ergebnisse

Tabelle 5-12: Abweichungen der Messungen an den Messstellen und Erwartungswerte der Druckabweichungen für Gruppierung nach Zonen grob, Zonen fein und Kombination

Gruppierung	Zonen grob		Zonen fein		Kombination	
	a	U	a	U	a	U
3936	0,31	-0,02	0,50	0,04	0,25	-0,02
3991	0,64	-0,02	0,55	0,04	0,52	-0,02
4034	0,40	-0,02	0,42	0,04	0,50	-0,02
4629	0,65	-0,02	0,59	0,04	0,68	-0,02
5017	0,57	-0,02	0,20	0,04	0,17	-0,02
5973	0,68	-0,02	0,62	0,04	0,66	-0,02
6576	0,84	-0,02	0,80	0,04	0,82	-0,02
6767	0,97	-0,02	0,98	0,04	0,99	-0,02
7236	0,14	-0,02	0,23	0,04	0,13	-0,02
7435	0,75	-0,02	0,69	0,04	0,77	-0,02
7973	0,73	-0,02	0,71	0,04	0,71	-0,02
8279	0,73	-0,02	0,67	0,04	0,74	-0,02

5.2.2.4 Fitnesswert und Druckabweichung der automatischen Kalibrierung

Die Fitnesswerte und die mittleren Druckabweichungen der Ergebnisse der unterschiedlichen Gruppierungen sind in Tabelle 5-13 dargestellt.

Tabelle 5-13: Fitnesswert und mittlere Druckabweichung der Kalibrierungsszenarien – Seiersberg

Gruppierung	Fitnesswert	mittlere Abweichung der Kalibrierungsszenarien [mWS]
Verlegejahr	49	0,65
Einbautendichte	47	0,66
Durchmesser	45	0,65
Material	49	0,66
Zonen grob	42	0,62
Zonen fein	39	0,58
Kombination	40	0,58

5.2.3 Evaluierung der Modellqualität

Die Druckabweichungen der Kalibrierungs- und Validierungsszenarien werden als Boxplots je Messstelle dargestellt. Die direkt aus der automatischen Kalibrierung entnommen Grafiken sind für die jeweilig angegebene Gruppierung in Abbildung 5-14, Abbildung 5-15, Abbildung 5-16, Abbildung 5-17, Abbildung 5-18, Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20 ersichtlich.

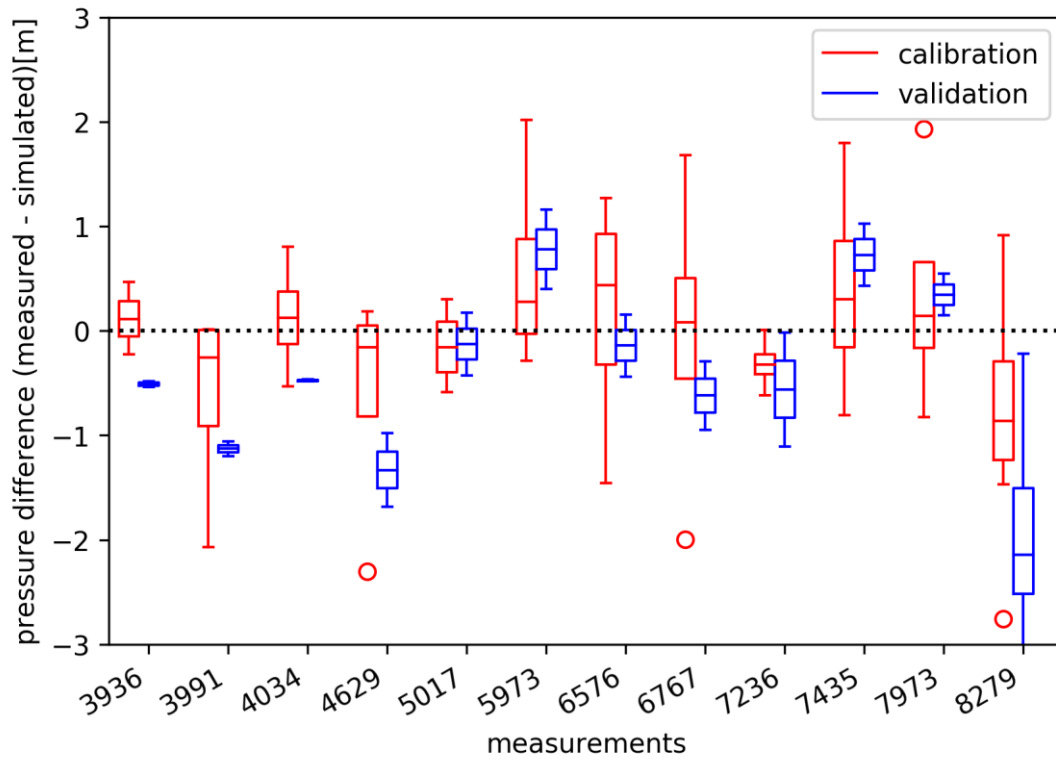


Abbildung 5-14: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Verlegejahr“

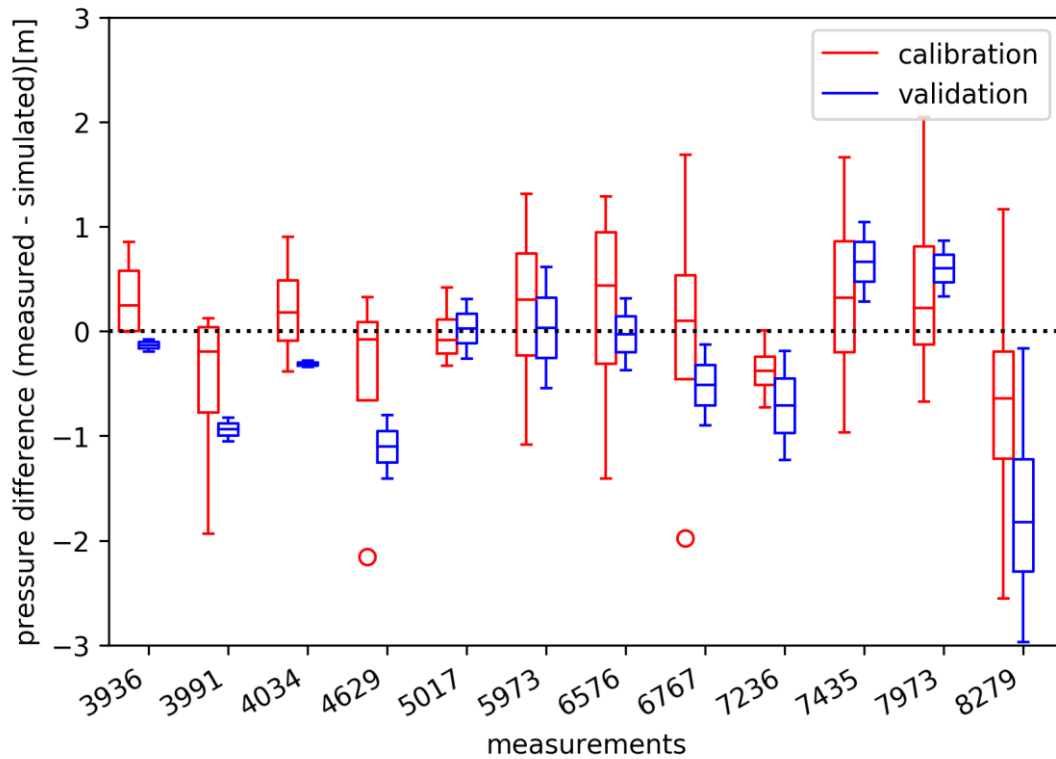


Abbildung 5-15: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Verlegejahr“

Ergebnisse

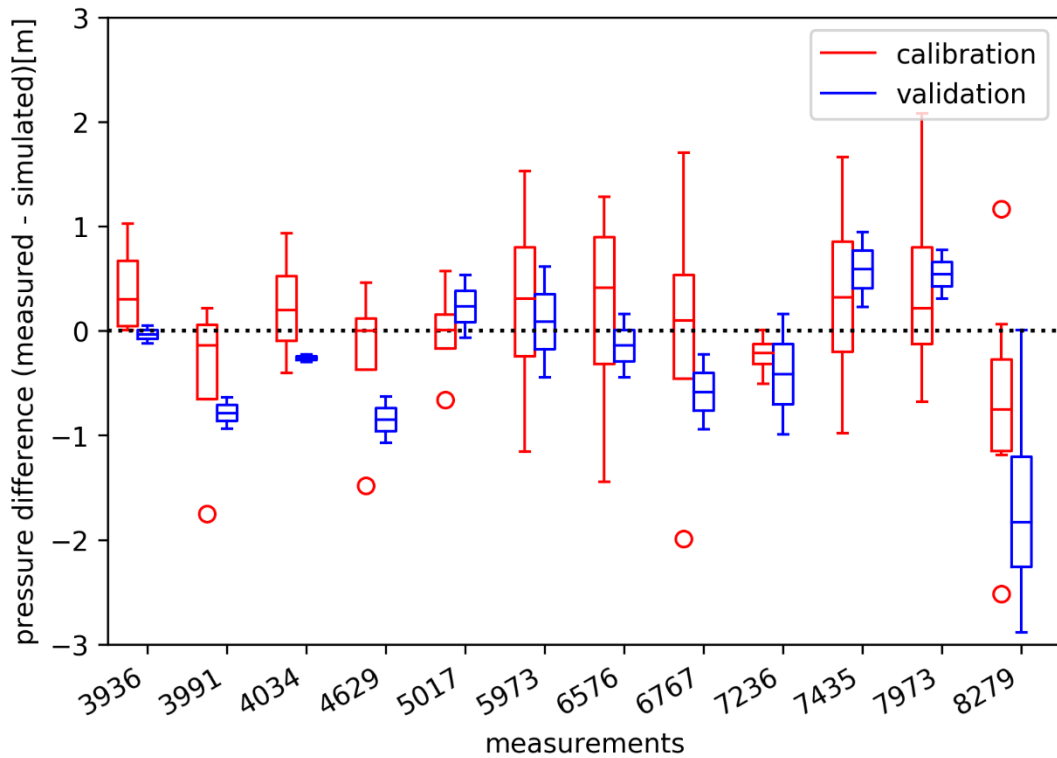


Abbildung 5-16: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Durchmesser“

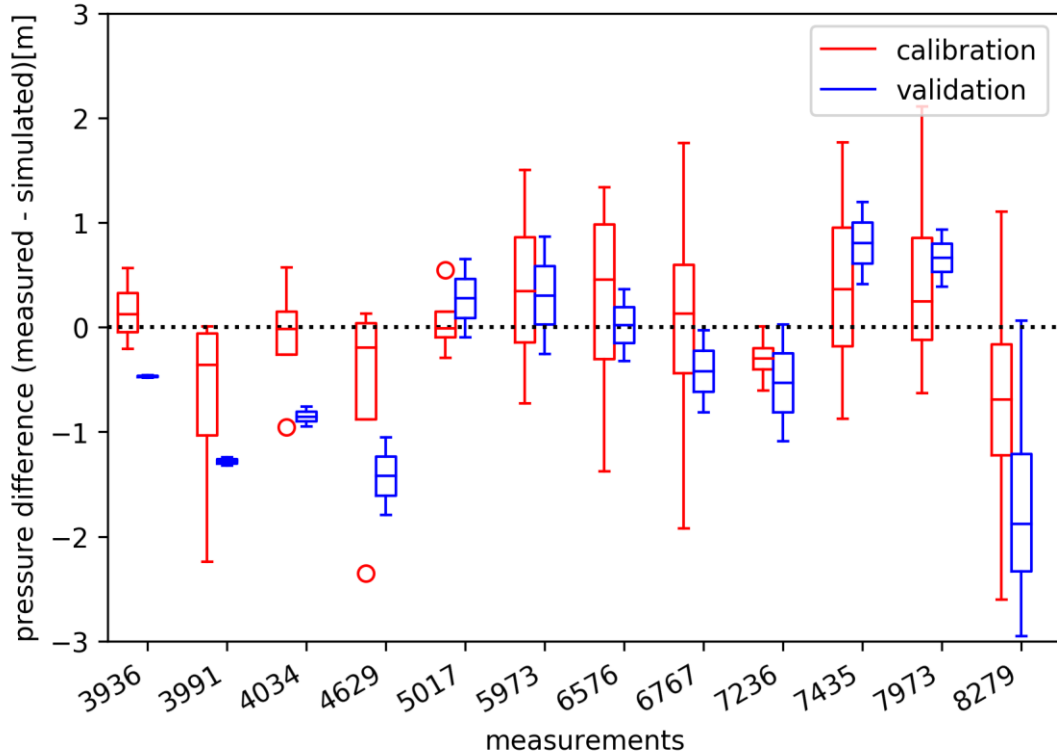


Abbildung 5-17: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Material“

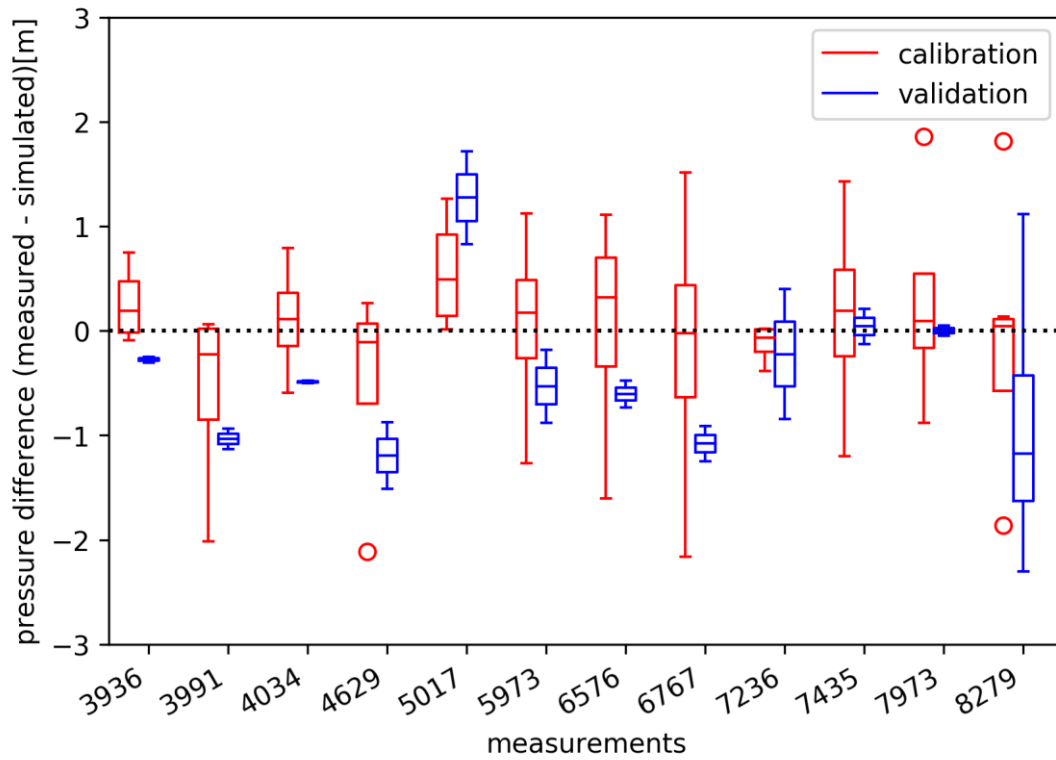


Abbildung 5-18: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Zonen grob“

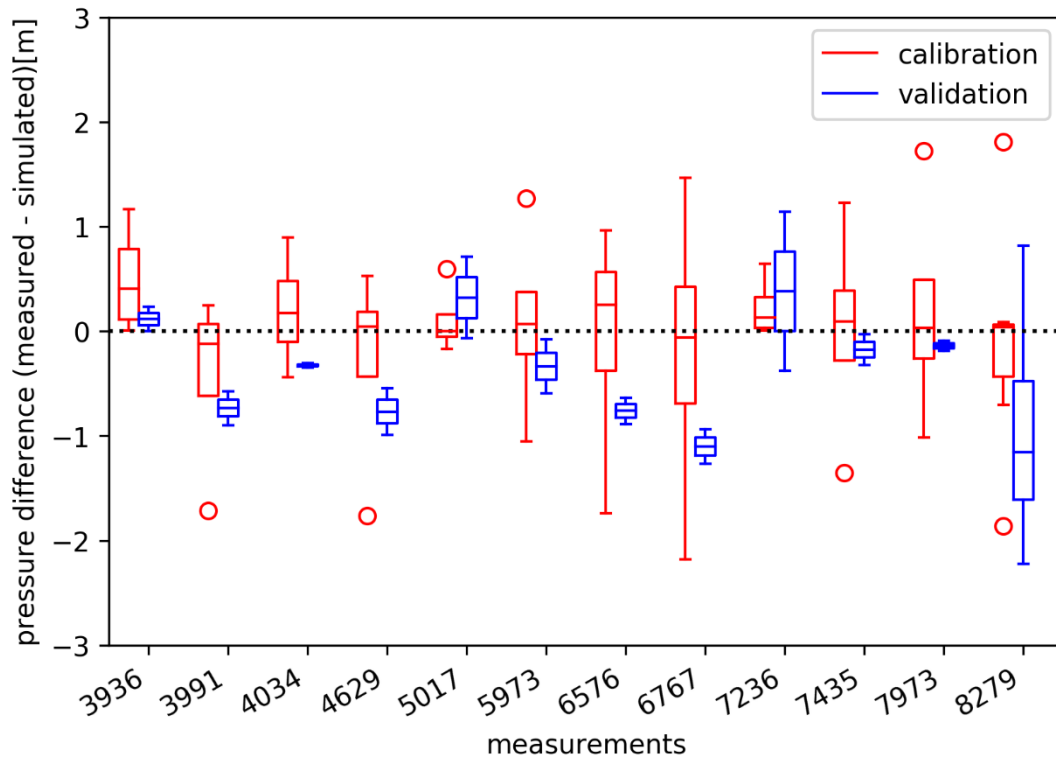


Abbildung 5-19: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Zonen fein“

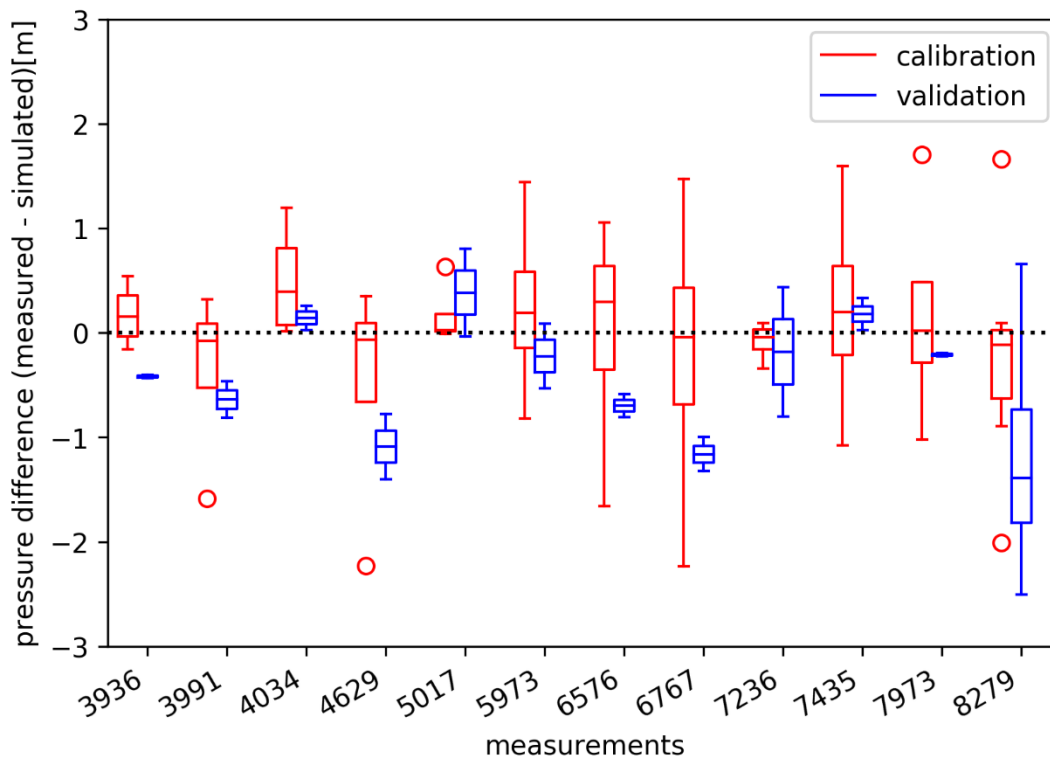


Abbildung 5-20: Verteilung der Druckdifferenzen (gemessene – simulierte Drücke) für Kalibrierung und Validierung je Messstelle nach Gruppierung „Kombination“

Die zusammengefassten Druckabweichungen der Validierungsszenarien und die Differenz zu den Kalibrierungsszenarien sind für jede Gruppierung in Tabelle 5-14 dargestellt.

Tabelle 5-14: Mittlere Druckabweichung der Validierungsszenarien und Differenz zu den Kalibrierungsszenarien – Seiersberg

Gruppierung	mittlere Abweichung der Validierungsszenarien [mWS]	Differenz zu den Kalibrierungsszenarien (Kal - Val) [mWS]
Verlegejahr	0,75	-0,09
Einbautendichte	0,66	0,00
Durchmesser	0,59	0,06
Material	0,79	-0,13
Zonen grob	0,73	-0,11
Zonen fein	0,58	0,00
Kombination	0,61	-0,04

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Fallstudie „Hart bei Graz“

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung nach Gruppierung an der zweiten Fallstudie zusammengefasst. Die Gruppierung erfolgte nach Verlegejahr, Einbautendichte, Durchmesser, Material sowie geographischen Zonen.

5.3.1 Ergebnisse der Gruppierung der Rohrleitungen

Die Gruppierungen nach Netzeigenschaften sind in Tabelle 5-15 dargestellt, die nach geografischen Zonen in Abbildung 5-21. Die Intervalle der quantitativen Gruppierungen wurden von Lippacher (2018) übernommen. Sie ergeben sich aus den Eigenschaften des Netzes unter Zuhilfenahme der Histogramme (4.2.4).

Tabelle 5-15: Gruppierung der Rohrleitung nach Parametern – Hart bei Graz

Parameter	Gruppennummer			
	0	1	2	3
Verlegejahr	$(-\infty; 1978,5]$	$(1978,5; 1990]$	$(1990; \infty)$	-
Einbautendichte [1/km]	$(-\infty; 0,001]$	$(0,001; 40]$	$(40; 80]$	$(80; \infty)$
Durchmesser [mm]	$(-\infty; 81]$	$(81; 90]$	$(90; 100]$	$(100; \infty)$
Material	Guss	PE	PVC	Stahl

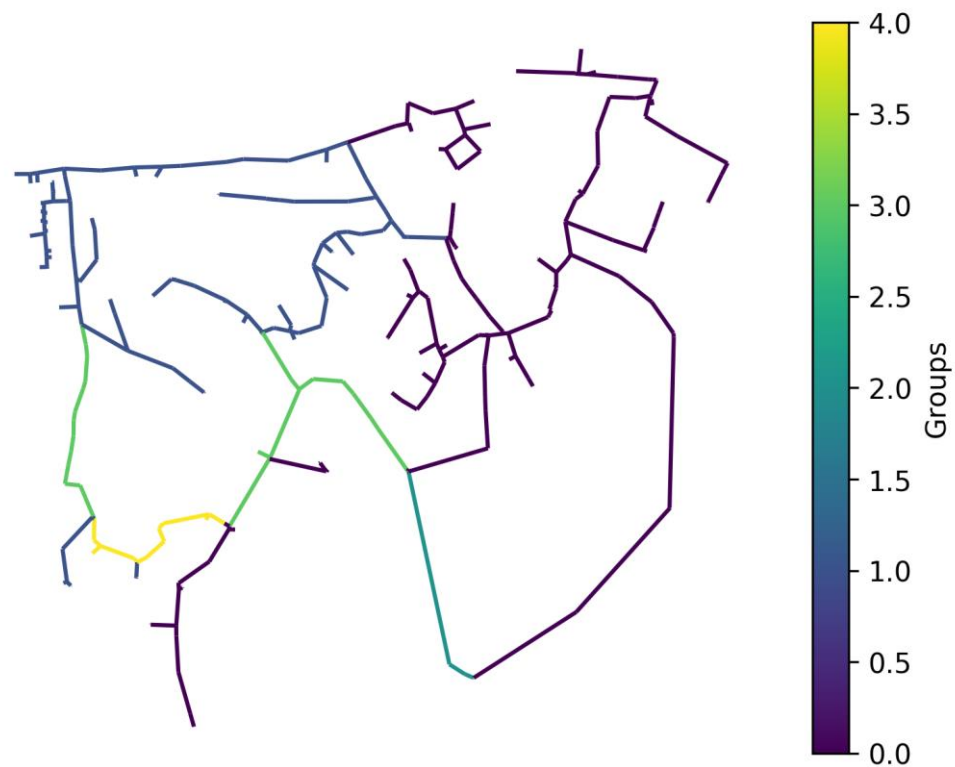


Abbildung 5-21: Gruppierung „Zonen“ – Hart bei Graz

Zusätzlich zu den einzelnen Gruppierungen wurden noch zwei weitere bei Lippacher (2018) verwendete Kombinationen verschiedener Gruppierung in die Fallstudie einbezogen. Die Gruppierung „Kombination grob“ ist in Tabelle 5-16, die Gruppierung „Kombination fein“ in Tabelle 5-17 dargestellt.

Ergebnisse

Tabelle 5-16: Gruppierung „Kombination grob“ nach Verlegejahr und Durchmesser – Hart bei Graz

Gruppennummer	Verlegejahr	Durchmesser [mm]
0	$(-\infty; 1978,5]$	$(-\infty; 81]$
1	$(-\infty; 1978,5]$	$(81; 90]$
2	$(-\infty; 1978,5]$	$(90; \infty)$
3	$(1978,5; \infty)$	$(-\infty; 81]$
4	$(1978,5; \infty)$	$(81; 90]$
5	$(1978,5; \infty)$	$(90; \infty)$

Tabelle 5-17: Gruppierung „Kombination fein“ nach Einbautendichte und Verlegejahr – Hart bei Graz

Gruppennummer	Einbautendichte [1/km]	Verlegejahr
0	$(-\infty; 0,001]$	$(-\infty; 1978,5]$
1	$(-\infty; 0,001]$	$(1978,5; 1990]$
2	$(-\infty; 0,001]$	$(1990; \infty)$
3	$(0,001; 40]$	$(-\infty; 1978,5]$
4	$(0,001; 40]$	$(1978,5; 1990]$
5	$(0,001; 40]$	$(1990; \infty)$
6	$(40; 80]$	$(-\infty; 1978,5]$
7	$(40; 80]$	$(1990; \infty)$
8	$(80; \infty)$	$(-\infty; 1978,5]$
9	$(80; \infty)$	$(1978,5; 1990]$
10	$(80; \infty)$	$(1990; \infty)$

5.3.2 Ergebnisse der Evaluierung von Modellgüte und Modellqualität

Die numerischen Ergebnisse der Evaluierung nach Kapitel 3.2.3.1, Kapitel 3.2.3.4 und Kapitel 3.2.4 sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst. In Tabelle 5-18 und Tabelle 5-19 sind die Ergebnisse der Evaluierung der Modellgüte dargestellt, in Tabelle 5-20 die der Evaluierung der Modellqualität.

Tabelle 5-18: Standardabweichungen der Streuung der Rohrrauheiten der AC – Hart bei Graz

Gruppierung	Standardabweichung der Rauheiten (gemittelt über alle Gruppen)
Verlegejahr	0,000
Einbautendichte	0,094
Durchmesser	0,125
Material	0,131
Kombination grob	0,344
Kombination fein	0,563
Zonen	0,149

Tabelle 5-19: Fitnesswert und mittlere Druckabweichung der Kalibrierungsszenarien – Hart bei Graz

Gruppierung	Fitnesswert	mittlere Abweichung der Kalibrierungsszenarien [mWS]
Verlegejahr	12,06	0,28
Einbautendichte	11,03	0,26
Durchmesser	13,66	0,30
Material	22,22	0,37
Kombination grob	11,81	0,27
Kombination fein	12,78	0,28
Zonen	11,98	0,28

Tabelle 5-20: Mittlere Druckabweichung der Validierungsszenarien und Differenz zu den Kalibrierungsszenarien – Hart bei Graz

Gruppierung	mittlere Abweichung der Validierungsszenarien [mWS]	Differenz zu den Kalibrierungsszenarien (Kal - Val) [mWS]
Verlegejahr	0,30	-0,02
Einbautendichte	0,29	-0,03
Durchmesser	0,29	0,01
Material	0,31	0,06
Kombination grob	0,30	-0,03
Kombination fein	0,31	-0,02
Zonen	0,30	-0,02

5.4 Ergebnisse der Abbruchkriterien

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Festlegung und der Evaluierung der Abbruchkriterien sowie die Ergebnisse für das normierte Abbruchkriterium für beide Fallstudien beschrieben.

5.4.1 Fallstudie „Seiersberg“

Die in Kapitel 5.2.1 festgelegten Gruppierungen „Verlegejahr“, „Einbautendichte“, „Durchmesser“ und „Material“, dargestellt in Tabelle 5-7, „Zonen grob“ und „Zonen fein“, dargestellt in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5, sowie „Kombination“, dargestellt in Tabelle 5-8, wurden für die Berechnung der folgenden Ergebnisse verwendet. Die Gruppierungen „Verlegejahr“, „Material“ und „Zonen grob“ wurden zur Festlegung der Kriterien verwendet. Die übrigen Gruppierungen „Einbautendichte“, „Durchmesser“, „Zonen fein“ und „Kombination“ wurden für die nachfolgende Evaluierung verwendet.

5.4.1.1 Festlegung der Kriterien

In Tabelle 5-21 sind die Ergebnisse der Festlegung der Kriterien für die jeweilige Gruppierung und die gemittelten Kriterien dargestellt. Für die Evaluierung der Kri-

Ergebnisse

terien wurden für das Epsilon-Kriterium und den Populationsradius die Mittelwerte verwendet, für das Maximum-Kriterium wurde der auf ganze Zahlen gerundete Mittelwert verwendet.

Tabelle 5-21: Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg

Gruppierung	Maximum-Kriterium	Epsilon-Kriterium	Populationsradius
Verlegejahr	16,80	0,31	291.078,77
Material	16,50	0,35	33.554,96
Zonen grob	18,80	0,10	1.129.598,44
Gesamt	17,37	0,26	484.744,06

Die Entwicklung der Fitness, des Epsilon-Kriteriums und des Populationsradius sind gemittelt über die drei zur Festlegung der Kriterien verwendeten Gruppierungen in Abbildung 5-22, Abbildung 5-23 und Abbildung 5-24 dargestellt.

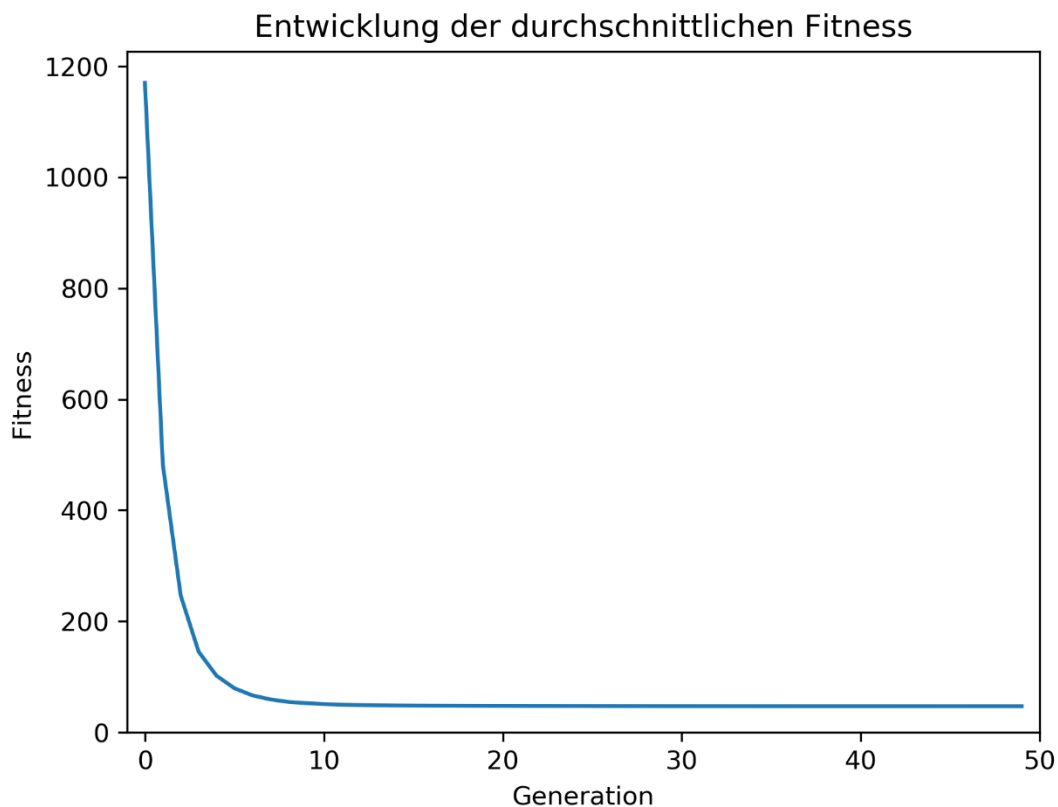


Abbildung 5-22: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg

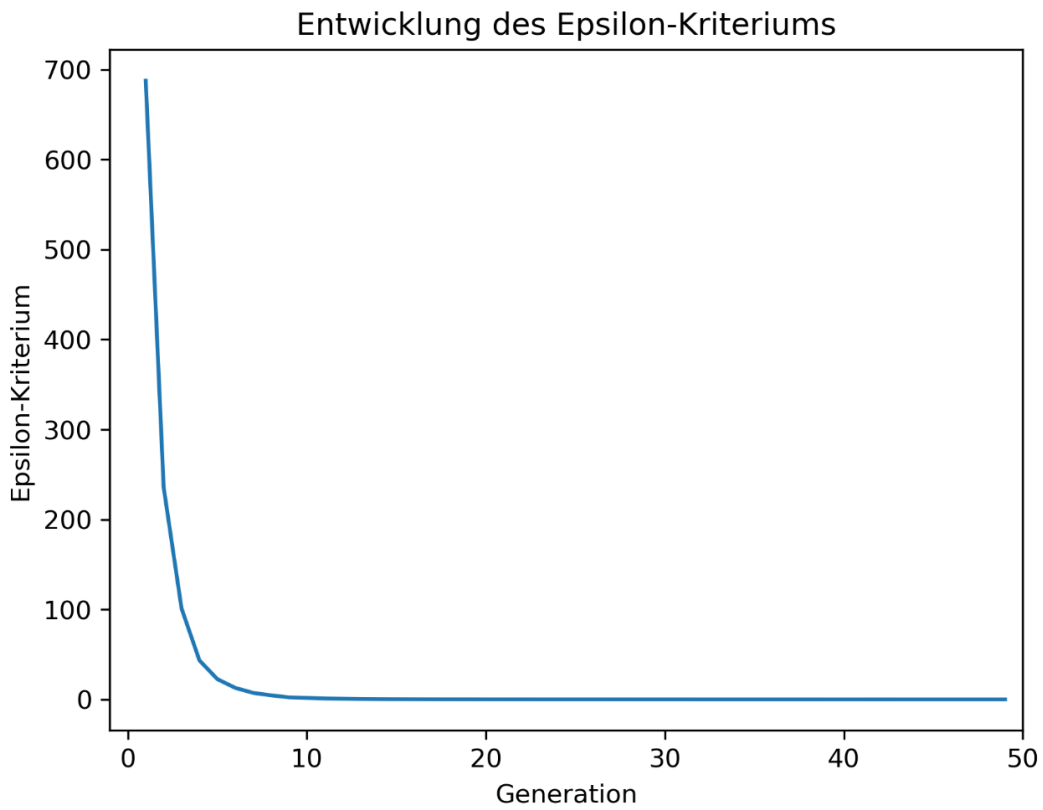


Abbildung 5-23: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg

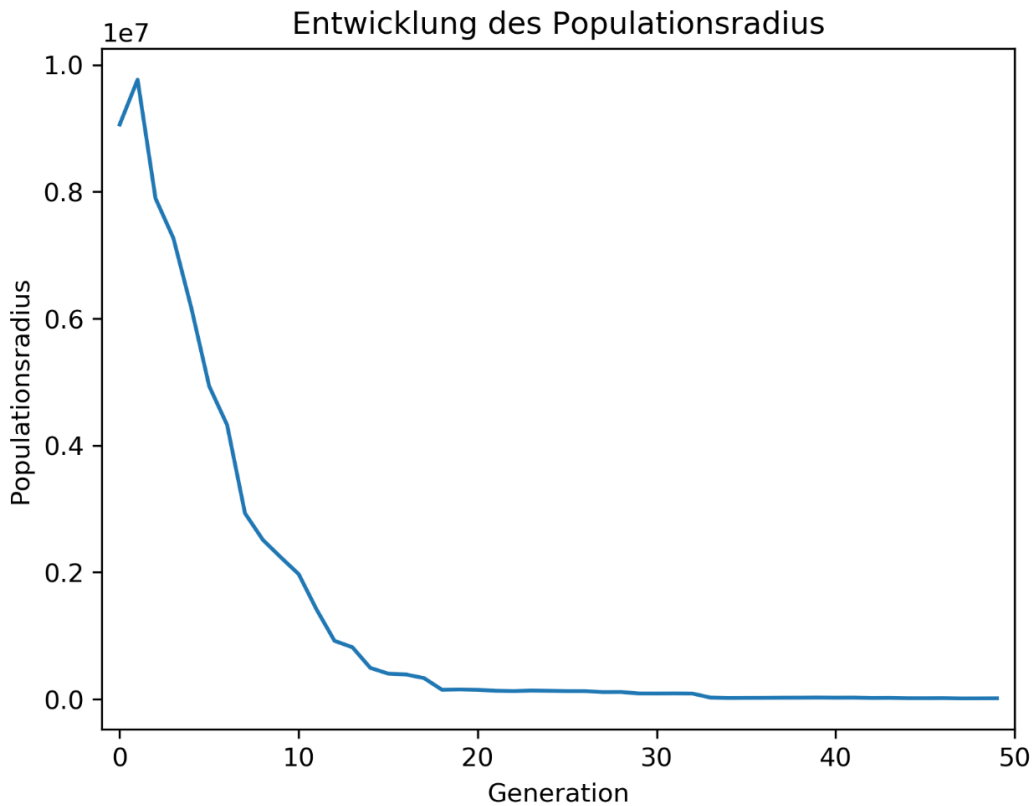


Abbildung 5-24: Entwicklung des Populationsradius bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Seiersberg

5.4.1.2 Evaluierung der Kriterien

Die Ergebnisse in Prozent des vom maximalen Fitnesswert erreichten Wertes sind in Tabelle 5-22 für jede Gruppierung und im Mittel dargestellt. Weiters ist der Zielwert in Prozent und die Abweichung von Zielwert in derselben Tabelle angegeben. In Tabelle 5-23 ist angegeben, in welcher Generation das jeweilige Abbruchkriterium erreicht wurde.

Tabelle 5-22: Erreichter Fitnesswert der Abbruchkriterien – Seiersberg

Gruppierung	Maximum-Kriterium	Epsilon-Kriterium	Populationsradius
Einbautendichte	99,70%	99,85%	99,61%
Durchmesser	99,90%	99,90%	99,62%
Zonen fein	99,63%	99,68%	99,76%
Kombination	99,85%	99,84%	99,86%
Gesamt	99,77%	99,82%	99,71%
Zielwert	99,95%	99,95%	99,95%
Differenz	0,18%	0,13%	0,24%

Tabelle 5-23: Erreichte Generation der Abbruchkriterien – Seiersberg

Gruppierung	Maximum-Kriterium	Epsilon-Kriterium	Populationsradius
Einbautendichte	17,00	20,10	16,00
Durchmesser	17,00	16,90	12,00
Zonen fein	17,00	18,20	20,60
Kombination	17,00	15,50	17,80
Gesamt	17,00	17,68	16,60

Die Entwicklung der Fitness, des Epsilon-Kriteriums und des Populationsradius bei der Evaluierung der Kriterien sind gemittelt über alle vier Gruppierungen in Abbildung 5-25, Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27 dargestellt.

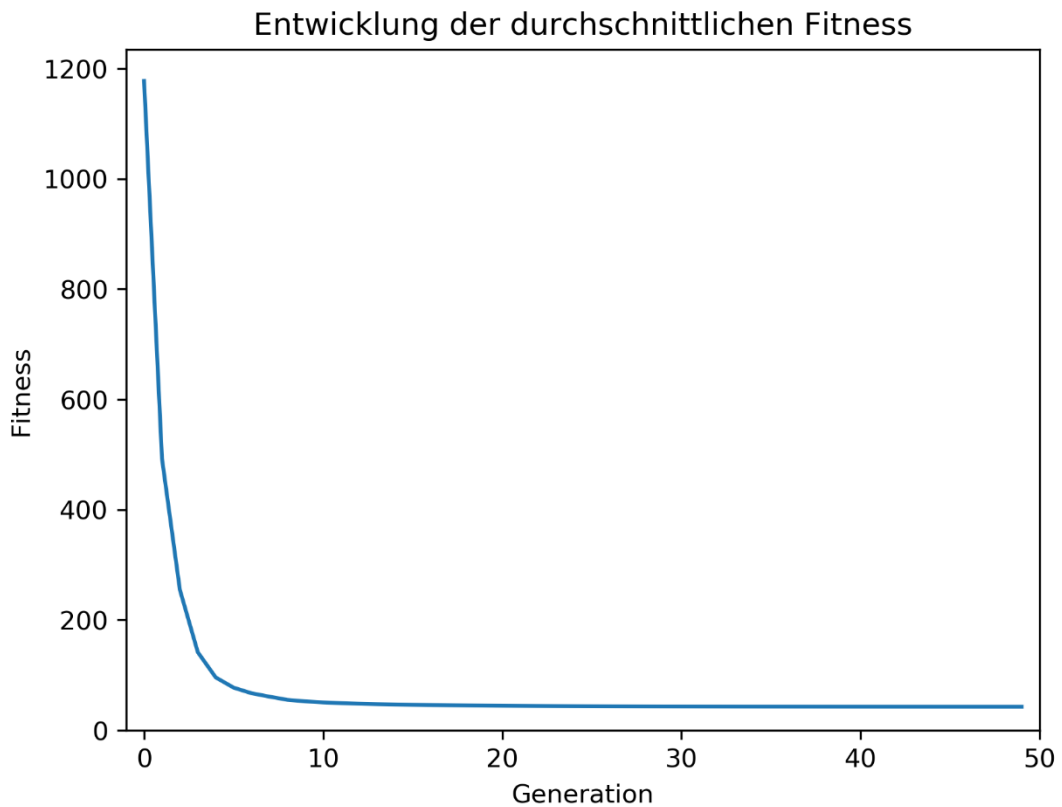


Abbildung 5-25: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Seiersberg

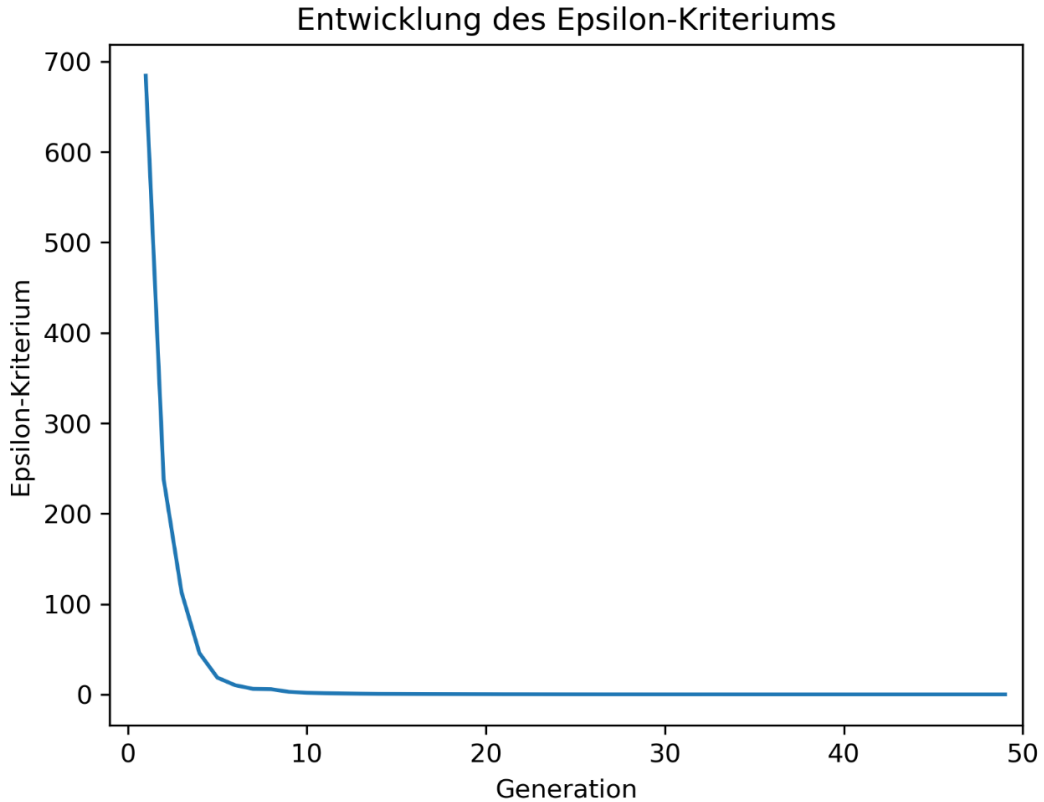


Abbildung 5-26: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Seiersberg

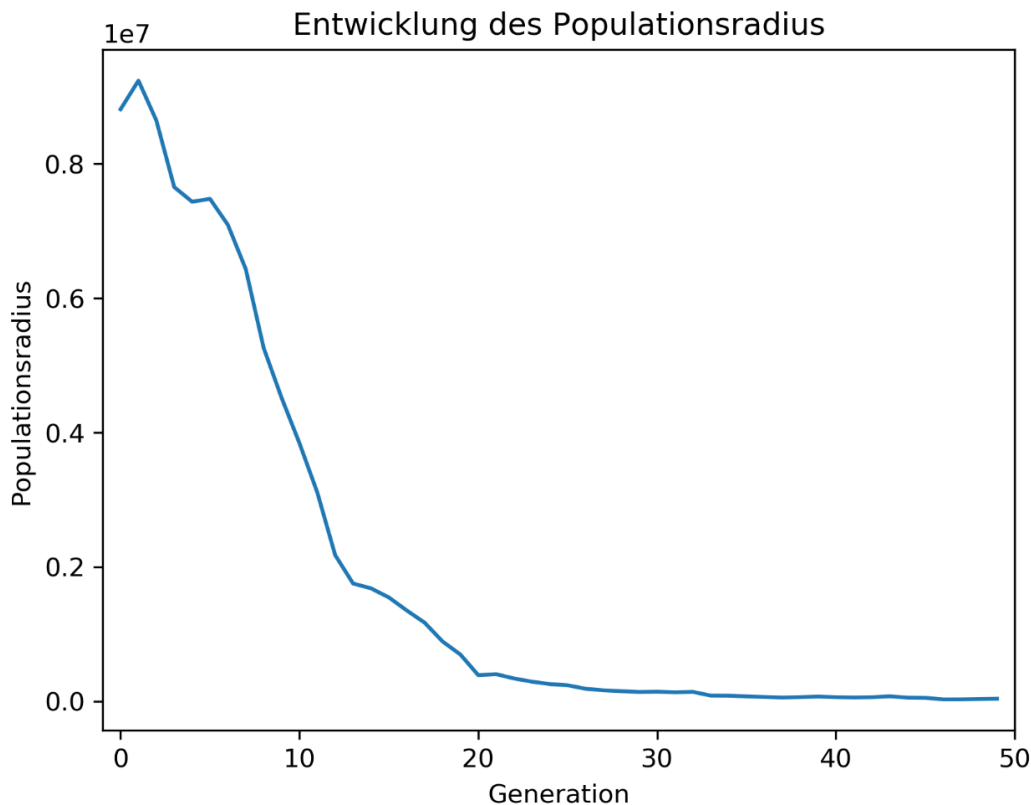


Abbildung 5-27: Entwicklung des Populationsradius bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Seiersberg

5.4.1.3 Normiertes Abbruchkriterium

Die Evaluierung des normierten Abbruchkriteriums wurde mit allen Gruppierungen durchgeführt, da keine Gruppierungen zur Festlegung des Kriteriums verwendet wurden. Der beim jeweiligen Epsilon-Kriterium erzielte Fitnesswert in Prozent vom maximalen Fitnesswert nach 50 Generationen ist in Tabelle 5-24 dargestellt. Die Generation, in welcher das jeweilige Kriterium erreicht wurde, ist in Tabelle 5-25 dargestellt.

Tabelle 5-24: Erreichter Fitnesswert des normierten Epsilon-Kriteriums – Seiersberg

Gruppierung	ϵ_{10}	ϵ_5	ϵ_1	$\epsilon_{0,5}$	$\epsilon_{0,1}$
Verlegejahr	99,17%	99,42%	99,85%	99,91%	99,97%
Einbautendichte	98,19%	98,55%	99,68%	99,85%	99,97%
Durchmesser	98,56%	99,33%	99,82%	99,90%	99,98%
Material	98,69%	99,50%	99,83%	99,90%	99,99%
Zonen grob	98,59%	99,38%	99,84%	99,89%	99,96%
Zonen fein	97,65%	98,86%	99,58%	99,68%	99,87%
Kombination	98,27%	99,21%	99,74%	99,86%	99,95%
Gesamt	98,44%	99,18%	99,76%	99,86%	99,95%

Tabelle 5-25: Erreichte Generation des normierten Epsilon-Kriteriums – Seiersberg

Gruppierung	ϵ_{10}	ϵ_5	ϵ_1	$\epsilon_{0,5}$	$\epsilon_{0,1}$
Verlegejahr	7,10	8,00	11,40	13,20	19,00
Einbautendichte	6,60	7,90	15,70	20,10	28,60
Durchmesser	6,70	9,00	14,70	17,00	24,50
Material	6,90	8,70	11,90	14,00	22,30
Zonen grob	7,10	9,30	13,30	14,90	20,60
Zonen fein	7,00	9,50	15,60	18,60	33,60
Kombination	6,10	8,10	12,50	16,50	26,30
Gesamt	6,79	8,64	13,59	16,33	24,99

5.4.2 Fallstudie „Hart bei Graz“

Die in Kapitel 5.3.1 festgelegten Gruppierungen „Verlegejahr“, „Einbautendichte“, „Durchmesser“ und „Material“, dargestellt in Tabelle 5-15, „Zonen“, dargestellt in Abbildung 5-21, sowie „Kombination grob“ und „Kombination fein“, dargestellt in Tabelle 5-16 und Tabelle 5-17, wurden für die Berechnung der folgenden Ergebnisse verwendet. Die Gruppierungen „Verlegejahr“, „Material“ und „Kombination grob“ wurden zur Festlegung der Kriterien verwendet. Die übrigen Gruppierungen „Einbautendichte“, „Durchmesser“, „Zonen“ und „Kombination fein“ wurden für die nachfolgende Evaluierung der Kriterien verwendet.

5.4.2.1 Festlegung der Kriterien

In Tabelle 5-26 sind die Ergebnisse der Festlegung der Kriterien für die jeweilige Gruppierung und die Mittelwerte dargestellt. Für die Evaluierung der Kriterien wurden für das Epsilon-Kriterium und den Populationsradius die Mittelwerte verwendet, für das Maximum-Kriterium wurde der auf ganze Zahlen gerundete Mittelwert verwendet.

Tabelle 5-26: Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

Gruppierung	Maximum-Kriterium	Epsilon-Kriterium	Populationsradius
Verlegejahr	11,10	2,34	100.850,55
Material	5,50	73,19	633.903,40
Kombination grob	10,80	5,10	209.382,78
Gesamt	9,13	26,87	314.712,24

Die Entwicklung der Fitness, des Epsilon-Kriteriums und des Populationsradius sind gemittelt über die drei zur Festlegung der Kriterien verwendeten Gruppierungen in Abbildung 5-28, Abbildung 5-29 und Abbildung 5-30 dargestellt.

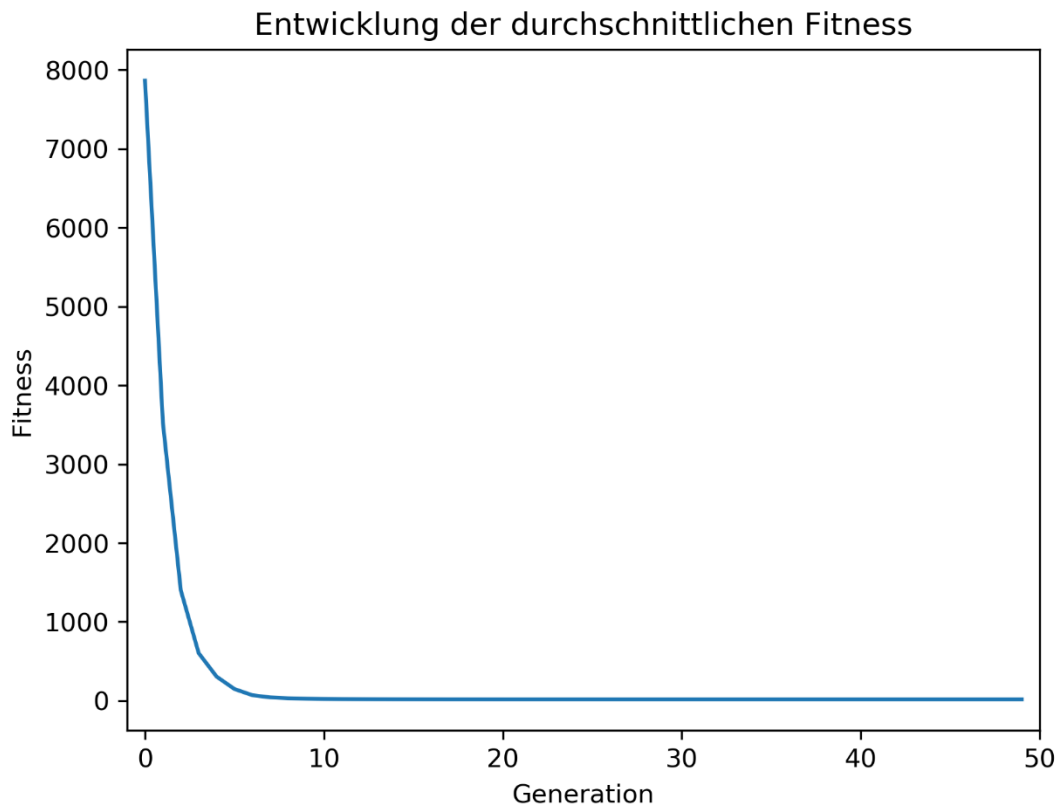


Abbildung 5-28: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

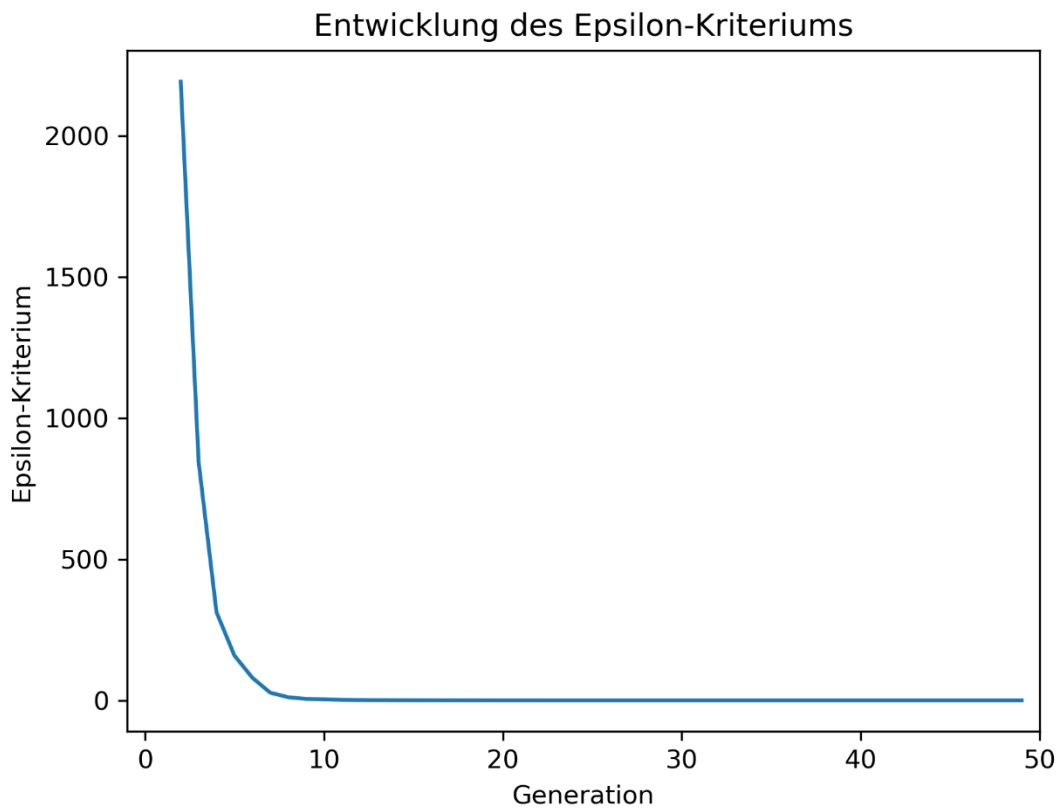


Abbildung 5-29: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

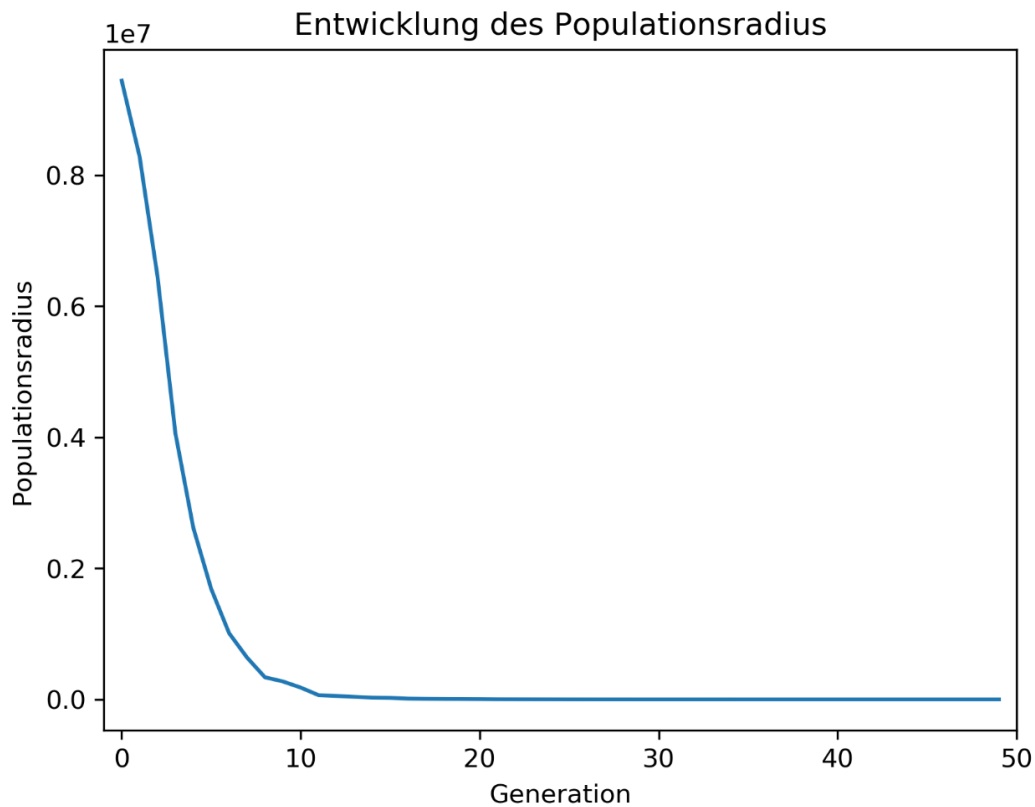


Abbildung 5-30: Entwicklung des Populationsradius bei der Festlegung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

5.4.2.2 Evaluierung der Kriterien

Die Ergebnisse in Prozent des vom maximalen Fitnesswert erreichten Wertes sind in Tabelle 5-27 für jede Gruppierung und im Mittel dargestellt. Weiters ist der Zielwert in Prozent und die Abweichung von Zielwert in derselben Tabelle angegeben. In Tabelle 5-28 ist angegeben, in welcher Generation das jeweilige Abbruchkriterium erreicht wurde.

Tabelle 5-27: Erreichter Fitnesswert der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

Gruppierung	Maximum-Kriterium	Epsilon-Kriterium	Populationsradius
Einbautendichte	99,91%	99,75%	99,67%
Durchmesser	99,97%	99,78%	99,91%
Kombination fein	99,71%	99,72%	99,60%
Zonen	99,85%	99,66%	99,80%
Gesamt	99,86%	99,73%	99,75%
Zielwert	99,95%	99,95%	99,95%
Differenz	0,09%	0,22%	0,20%

Ergebnisse

Tabelle 5-28: Erreichte Generation der Abbruchkriterien Hart bei Graz

Gruppierung	Maximum-Kriterium	Epsilon-Kriterium	Populationsradius
Einbautendichte	9,00	6,90	7,80
Durchmesser	9,00	6,80	7,80
Kombination fein	9,00	8,60	8,90
Zonen	9,00	7,30	9,30
Gesamt	9,00	7,40	8,45

Die Entwicklung der Fitness, des Epsilon-Kriteriums und des Populationsradius bei der Evaluierung der Kriterien sind gemittelt über alle vier Gruppierungen in Abbildung 5-31, Abbildung 5-32 und Abbildung 5-33 dargestellt.

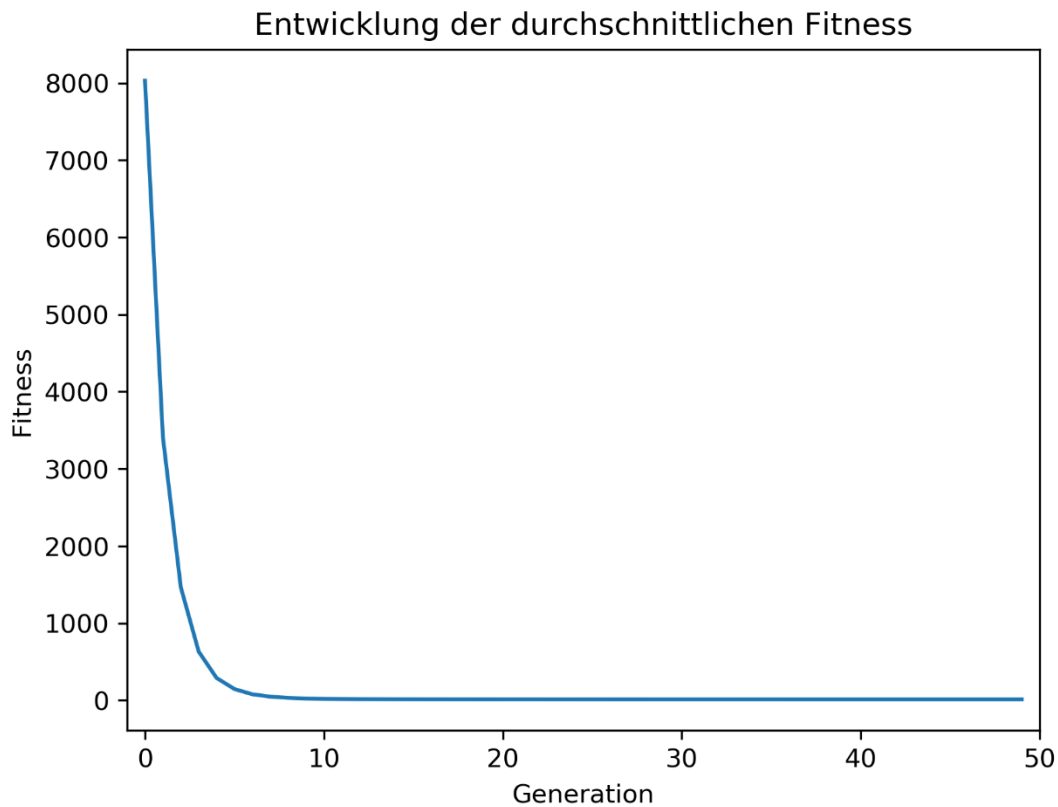


Abbildung 5-31: Entwicklung der durchschnittlichen Fitness bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

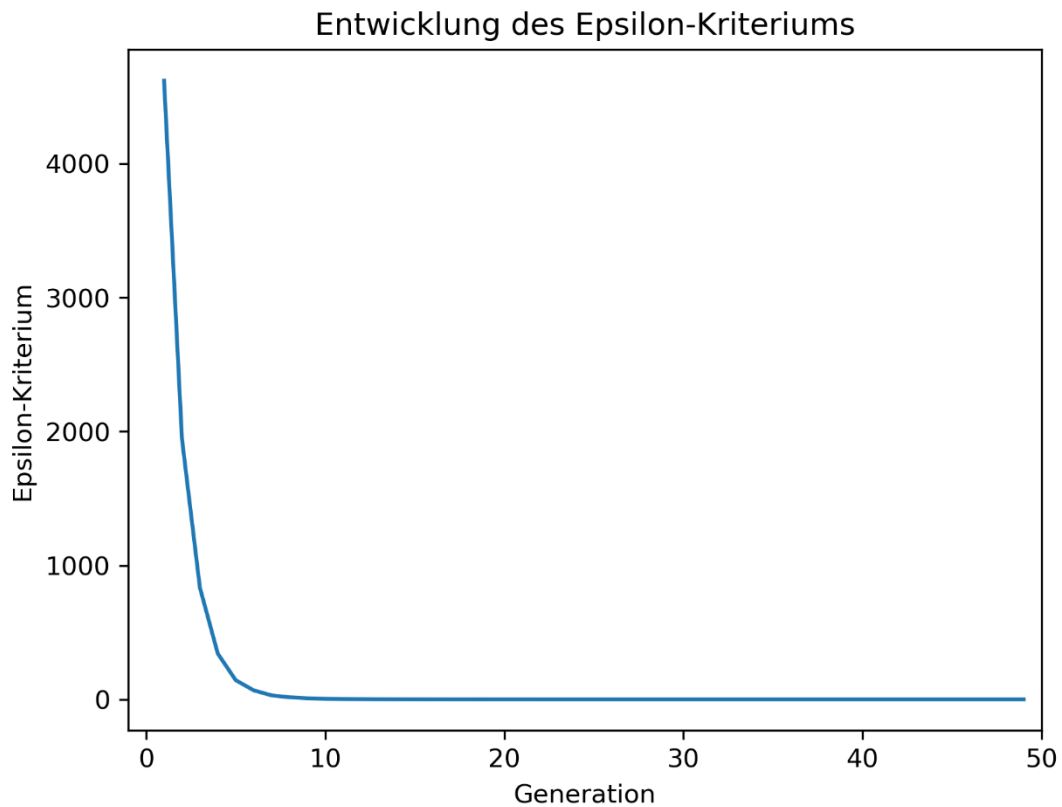


Abbildung 5-32: Entwicklung des Epsilon-Kriteriums bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

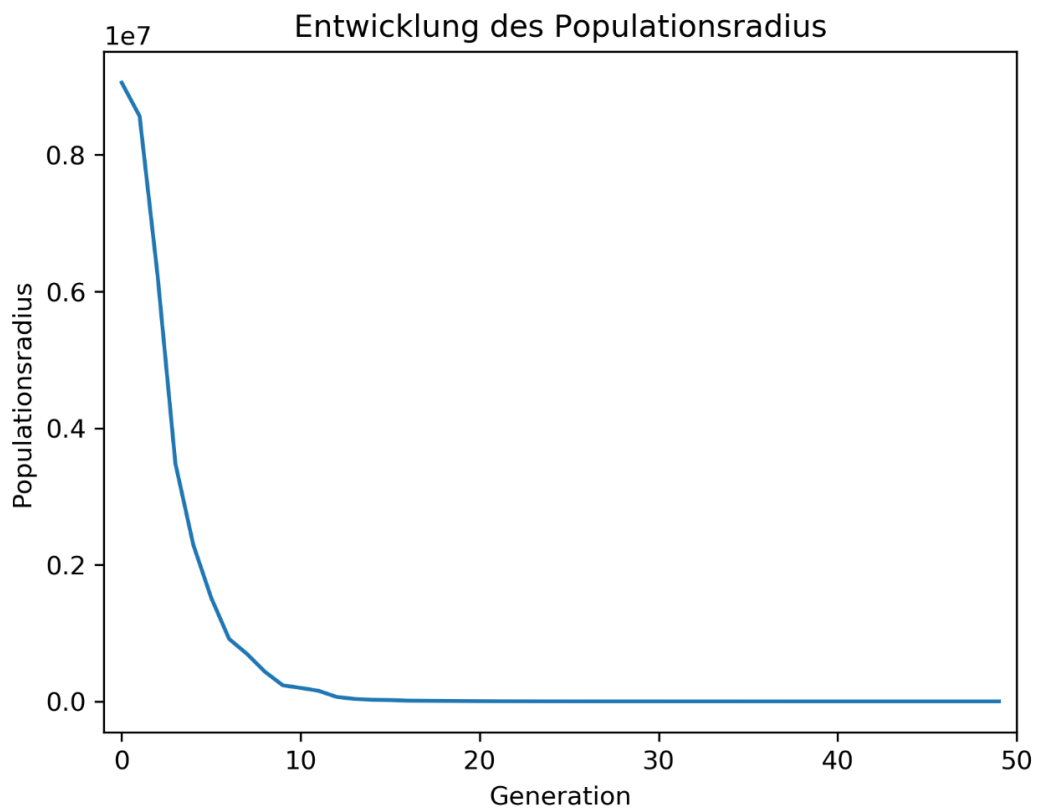


Abbildung 5-33: Entwicklung des Populationsradius bei der Evaluierung der Abbruchkriterien – Hart bei Graz

5.4.2.3 Normiertes Abbruchkriterium

Die Evaluierung des normierten Abbruchkriteriums wurde analog zur Fallstudie „Seiersberg“ mit allen Gruppierungen durchgeführt. Der beim jeweiligen Epsilon-Kriterium erzielte Fitnesswert in Prozent vom maximalen Fitnesswert nach 50 Generationen ist in Tabelle 5-29 dargestellt. Die Generation, in welcher das jeweilige Kriterium erreicht wurde, ist in Tabelle 5-30 dargestellt. Bei der Gruppierung „Kombination fein“ wurde das letzte Abbruchkriterium in 2 von 10 Berechnungen nicht erreicht, da die Berechnung nach 50 Generationen abgebrochen wurde. Bei der Berechnung des in der jeweiligen Tabelle markierten Wertes wurden daher nur die Ergebnisse, bei denen das Kriterium erreicht wurde, verwendet.

Tabelle 5-29: Erreichter Fitnesswert des normierten Epsilon-Kriteriums – Hart bei Graz

Gruppierung	ϵ_{10}	ϵ_5	ϵ_1	$\epsilon_{0,5}$	$\epsilon_{0,1}$
Verlegejahr	99,93%	99,97%	100,00%	100,00%	100,00%
Einbautendichte	99,98%	99,99%	100,00%	100,00%	100,00%
Durchmesser	99,98%	99,99%	100,00%	100,00%	100,00%
Material	99,40%	99,42%	99,99%	100,00%	100,00%
Kombination grob	99,97%	99,99%	100,00%	100,00%	100,00%
Kombination fein	99,93%	99,96%	99,99%	99,99%	100,00%*
Zonen	99,95%	99,99%	100,00%	100,00%	100,00%
Gesamt	99,88%	99,90%	100,00%	100,00%	100,00%

*Kriterium bei 2 der 10 Berechnungen nicht erreicht

Tabelle 5-30: Erreichte Generation des normierten Epsilon-Kriteriums – Hart bei Graz

Gruppierung	ϵ_{10}	ϵ_5	ϵ_1	$\epsilon_{0,5}$	$\epsilon_{0,1}$
Verlegejahr	9,90	12,40	17,00	18,40	20,90
Einbautendichte	11,00	12,40	15,50	17,30	22,20
Durchmesser	9,80	11,00	13,60	14,50	17,50
Material	6,70	7,50	10,50	11,90	16,30
Kombination grob	12,60	14,70	18,50	20,40	24,10
Kombination fein	12,40	14,80	21,90	26,10	32,25*
Zonen	11,40	13,70	17,60	19,20	24,00
Gesamt	10,54	12,36	16,37	18,26	22,46

*Kriterium bei 2 der 10 Berechnungen nicht erreicht

5.5 Ergebnisse der Streuung der Population des Optimierers

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Beurteilung der Modellgüte mittels der Betrachtung der Streuung der Population des Optimierers (3.2.3.5) für beide Fallstudien dargestellt.

5.5.1 Fallstudie „Seiersberg“

5.5.1.1 Abhängigkeit der Streuung vom Abbruchkriterium

Aufgrund der geringen Unterschiede der verschiedenen Abbruchkriterien (5.4.1.2) wurde als einfachstes Kriterium das Maximum-Kriterium bei der Beurteilung der Streuung verwendet. In Abbildung 5-34, Abbildung 5-35, Abbildung 5-36 und Abbildung 5-37 ist die Entwicklung der Streuung für die Gruppierung „Zonen grob“ bei fortschreitendem Maximum-Kriterium von 5 bis 30 Generationen beispielhaft dargestellt.

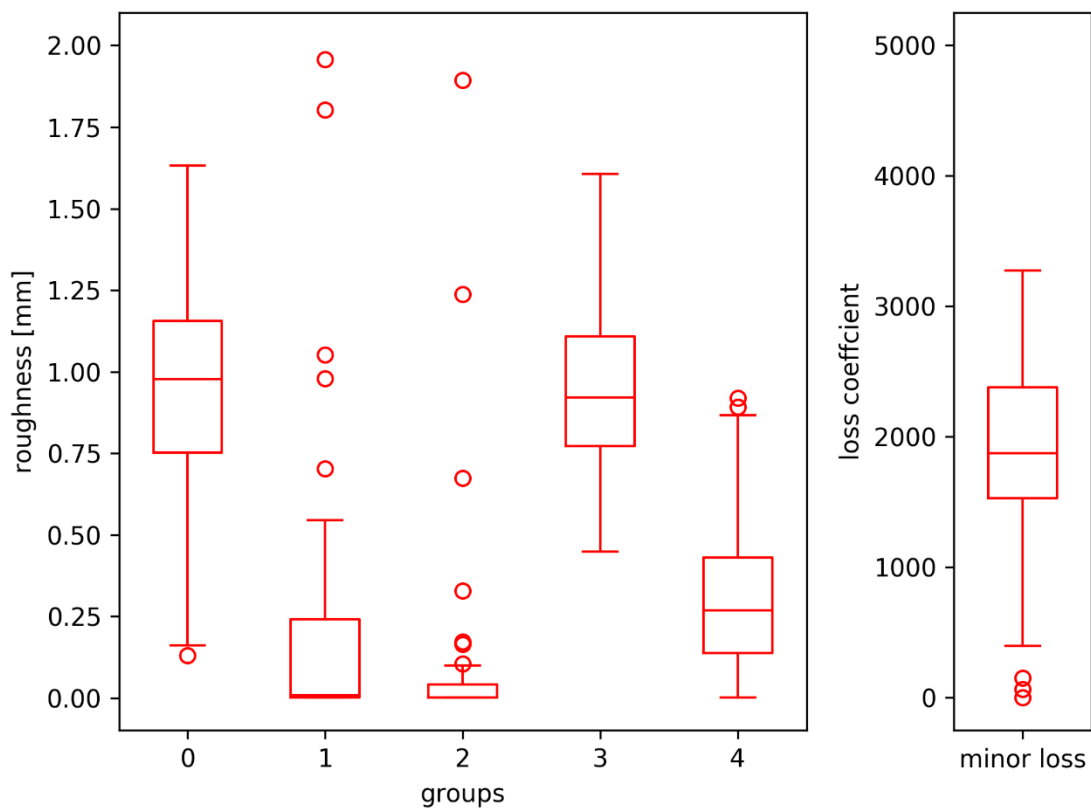


Abbildung 5-34: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 5 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg

Ergebnisse

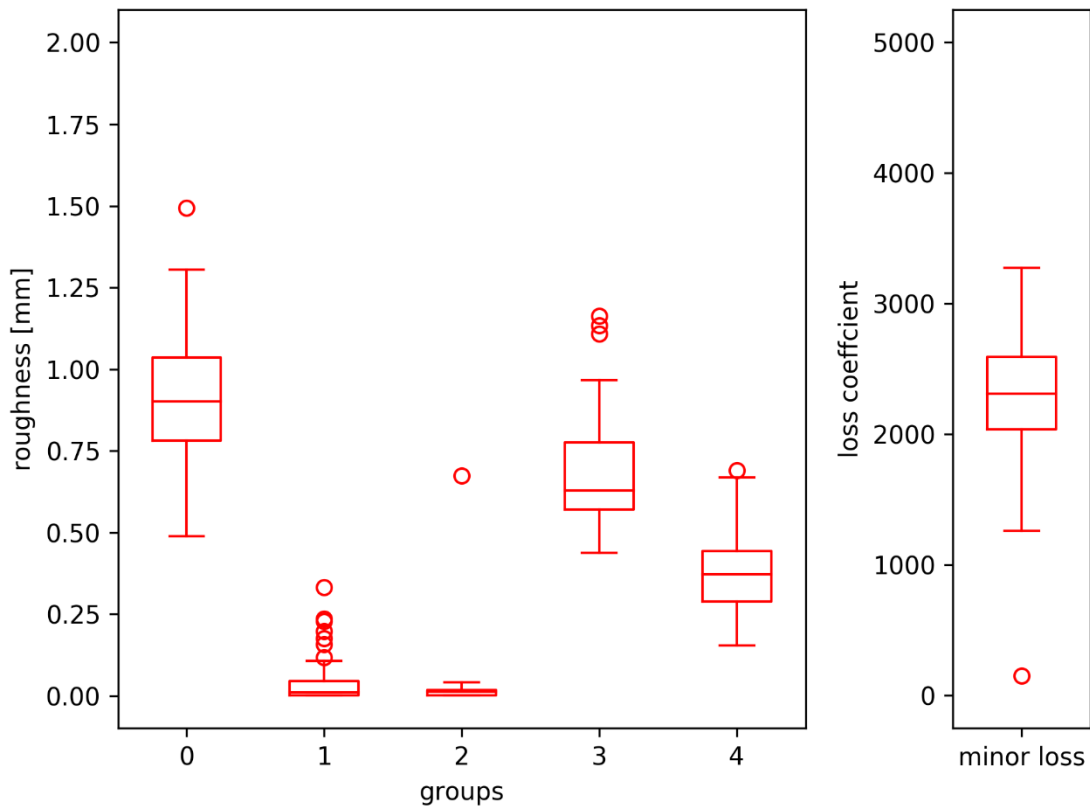


Abbildung 5-35: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 10 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg

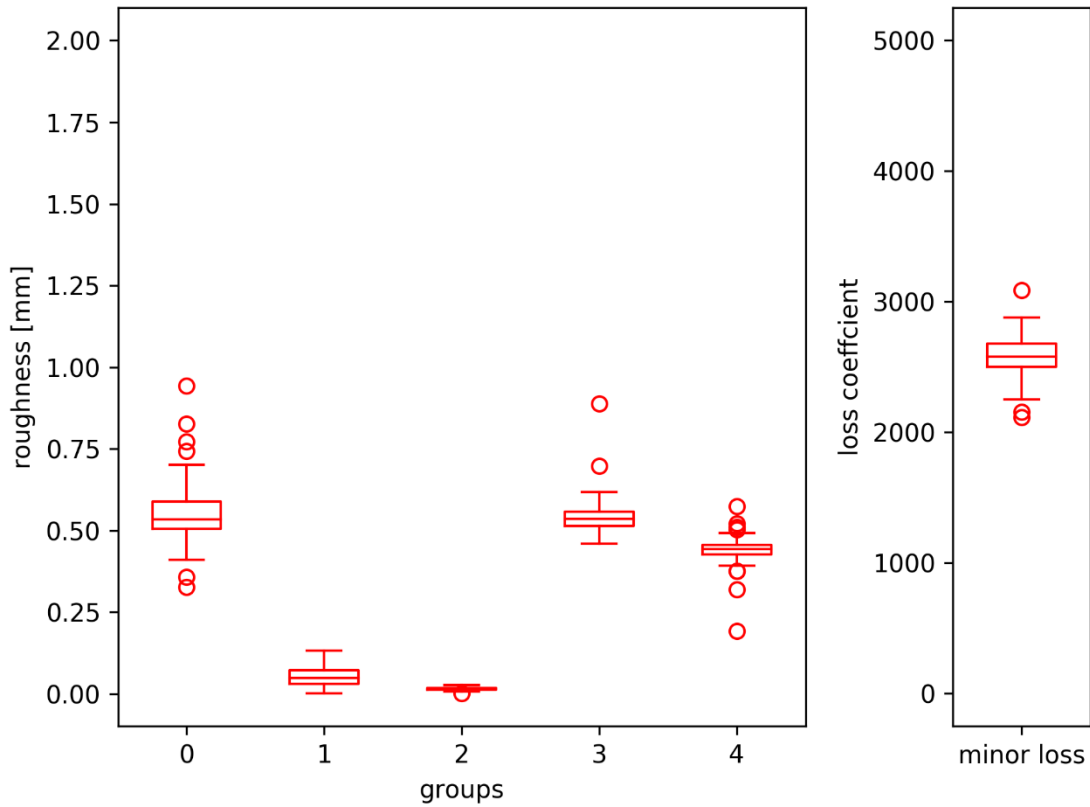


Abbildung 5-36: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 20 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg

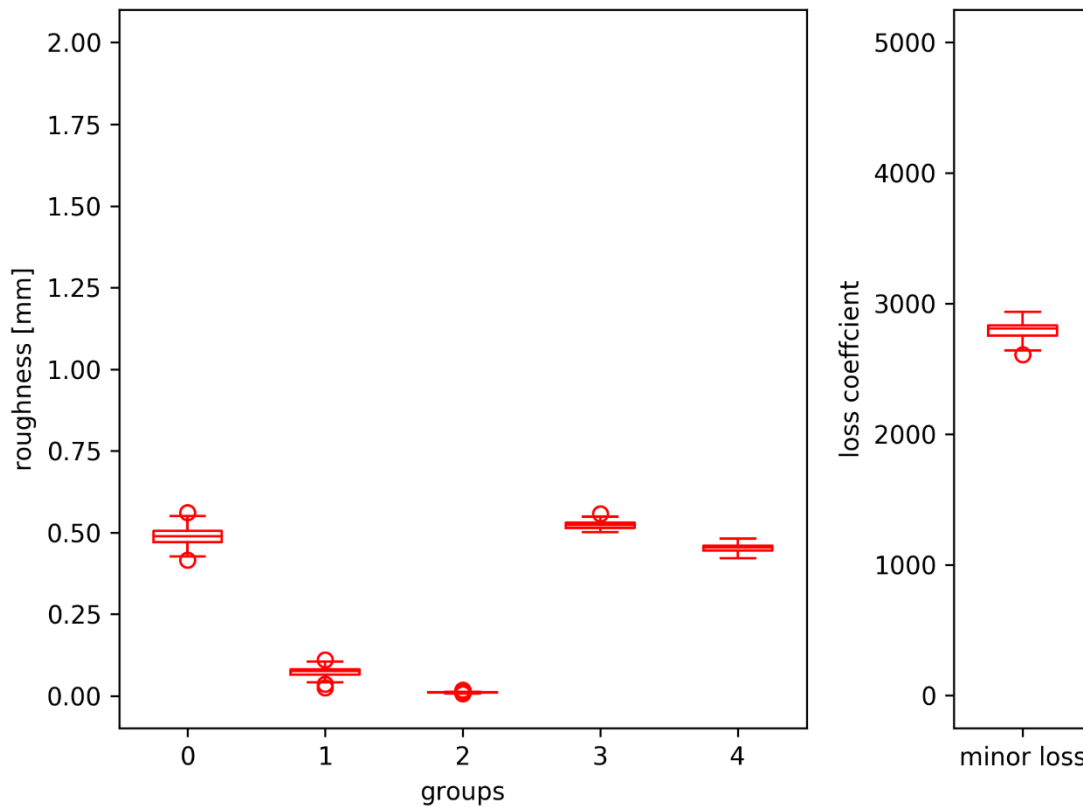


Abbildung 5-37: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 30 der Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg

Aufgrund der Betrachtung der Streuungen der Rauheiten aller Gruppierung, wie für die Gruppierung „Zonen grob“ beispielhaft dargestellt, und des in Kapitel 5.4.1 berechneten Maximum-Kriteriums von 17,37 Generationen, wurde das Maximum-Kriterium für die folgenden Vergleiche mit 20 Generationen festgelegt.

5.5.1.2 Graphischer Vergleich mit der Rauheiten-Streuung der automatischen Kalibrierung

In Abbildung 5-38, Abbildung 5-39, Abbildung 5-40, Abbildung 5-41, Abbildung 5-42, Abbildung 5-43 und Abbildung 5-44 sind die Streuungen des Optimierers für jede der in Kapitel 5.2.1 festgelegten Gruppierungen der Streuung der Ergebnisse der AC nach Kapitel 3.2.3.1 gegenübergestellt. Die Streuung des Optimierers ist in Rot, die Streuung der Ergebnisse der AC jeweils in Schwarz dargestellt.

Ergebnisse

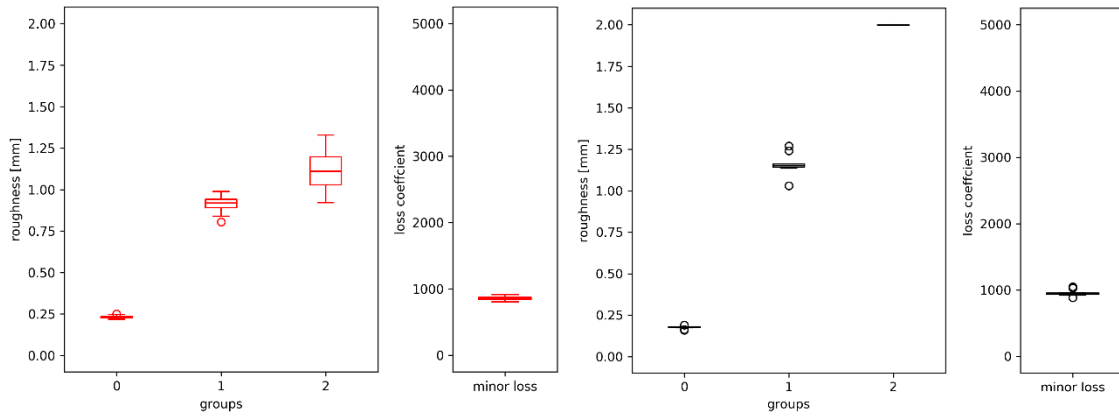


Abbildung 5-38: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Verlegejahr“ – Seiersberg

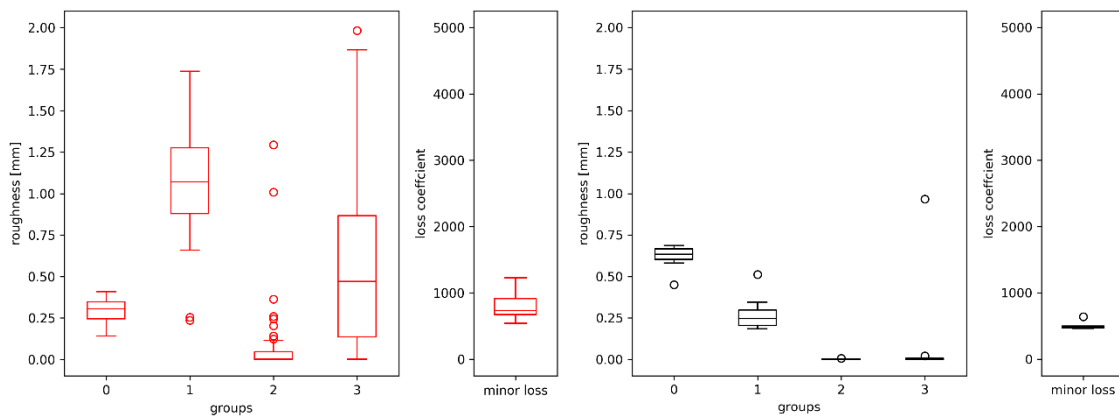


Abbildung 5-39: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Einbaudichte“ – Seiersberg

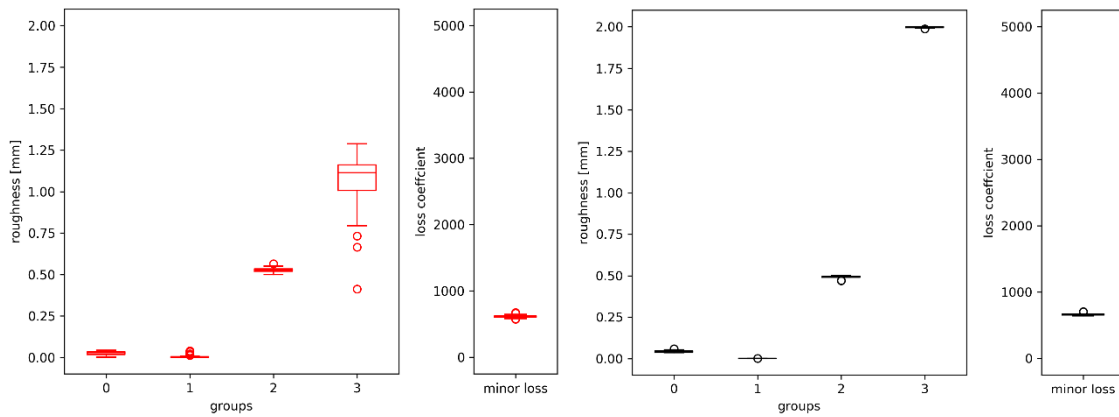


Abbildung 5-40: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Durchmesser“ – Seiersberg

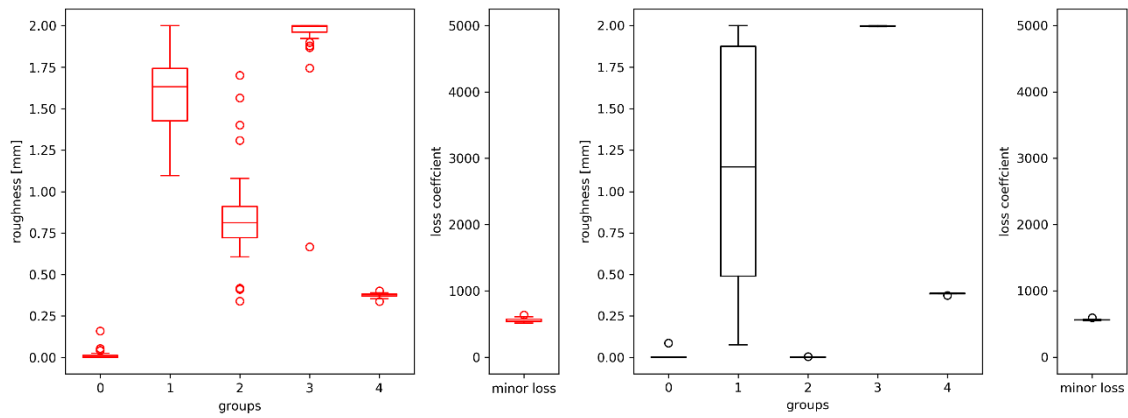


Abbildung 5-41: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Material“ – Seiersberg

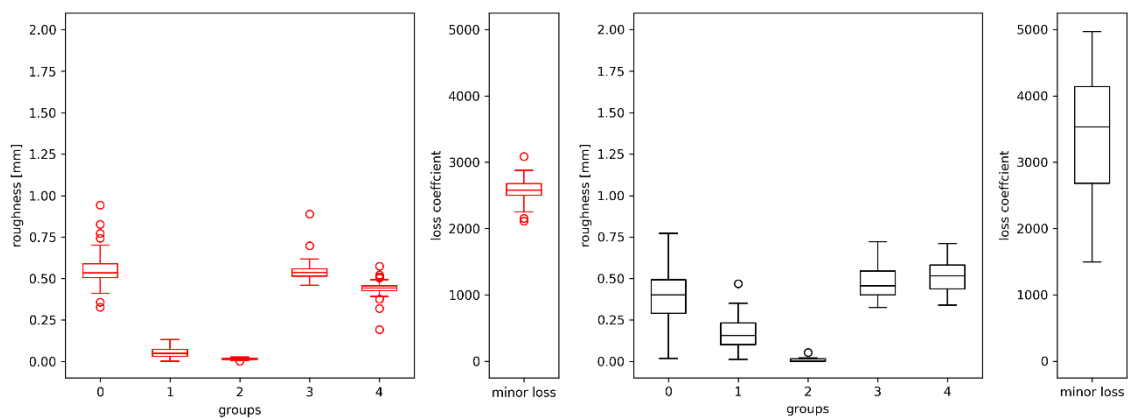


Abbildung 5-42: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Zonen grob“ – Seiersberg

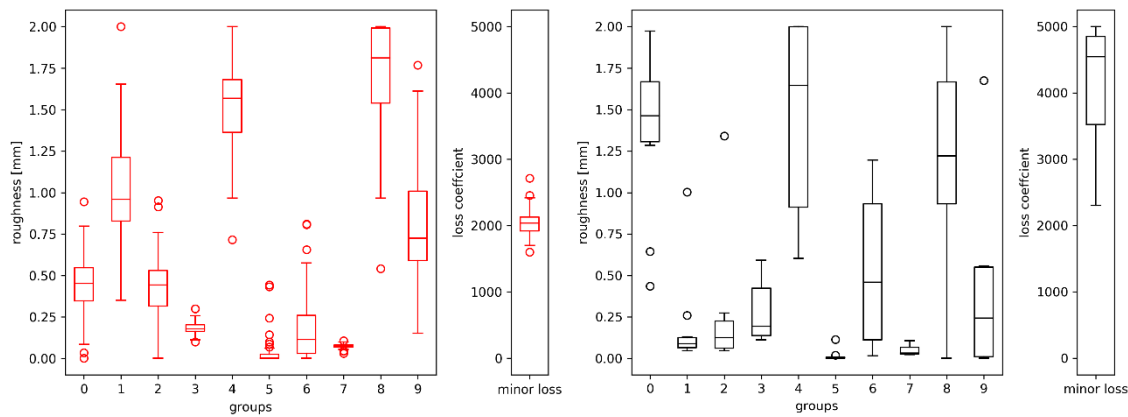


Abbildung 5-43: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Zonen fein“ – Seiersberg

Ergebnisse

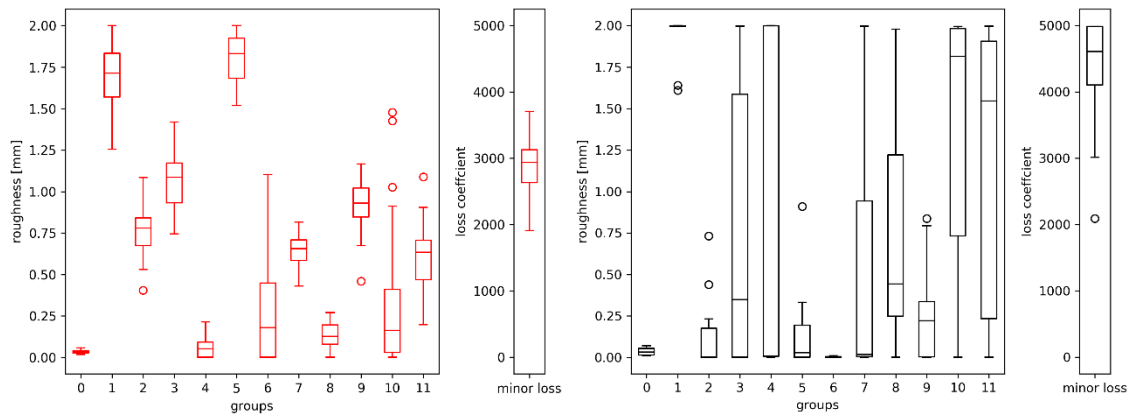


Abbildung 5-44: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Kombination“ – Seiersberg

5.5.1.3 Vergleich der Standardabweichungen

Die aus den Streuungen der Rohrrauheiten berechneten Standardabweichungen für die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung und die Population des Optimierers wurden in aufsteigender Reihenfolge sortiert und anschließend in Tabelle 5-31 gegenübergestellt. Der größte Unterschied trat bei der Gruppierung „Einbautendichte“ auf. Die Ergebnisse der anderen Gruppierungen sind großteils vergleichbar.

Tabelle 5-31: Vergleich der sortierten Standardabweichungen aus der Streuung der Rauheiten der Population des Optimierers mit der Streuung der Rauheiten aus 10 AC-Ergebnissen – Seiersberg

Streuung Population Optimierer		Streuung Ergebnisse AC	
Gruppierung	Standardabweichung	Gruppierung	Standardabweichung
Durchmesser	0,049	Durchmesser	0,006
Verlegejahr	0,050	Verlegejahr	0,025
Zonen grob	0,052	Einbautendichte	0,119
Material	0,138	Zonen grob	0,120
Kombination	0,154	Material	0,158
Zonen fein	0,201	Zonen fein	0,360
Einbautendichte	0,293	Kombination	0,510

5.5.2 Fallstudie „Hart bei Graz“

5.5.2.1 Abhängigkeit der Streuung vom Abbruchkriterium

Aufgrund der geringen Unterschiede der verschiedenen Abbruchkriterien (5.4.2.2) wurde als einfachstes Kriterium das Maximum-Kriterium bei der Beurteilung der Streuung verwendet. In Abbildung 5-45, Abbildung 5-46, Abbildung 5-47 und Abbildung 5-48 ist die Entwicklung der Streuung für die Gruppierung „Kombination grob“ bei fortschreitendem Maximum-Kriterium von 5 bis 20 Generationen dargestellt.

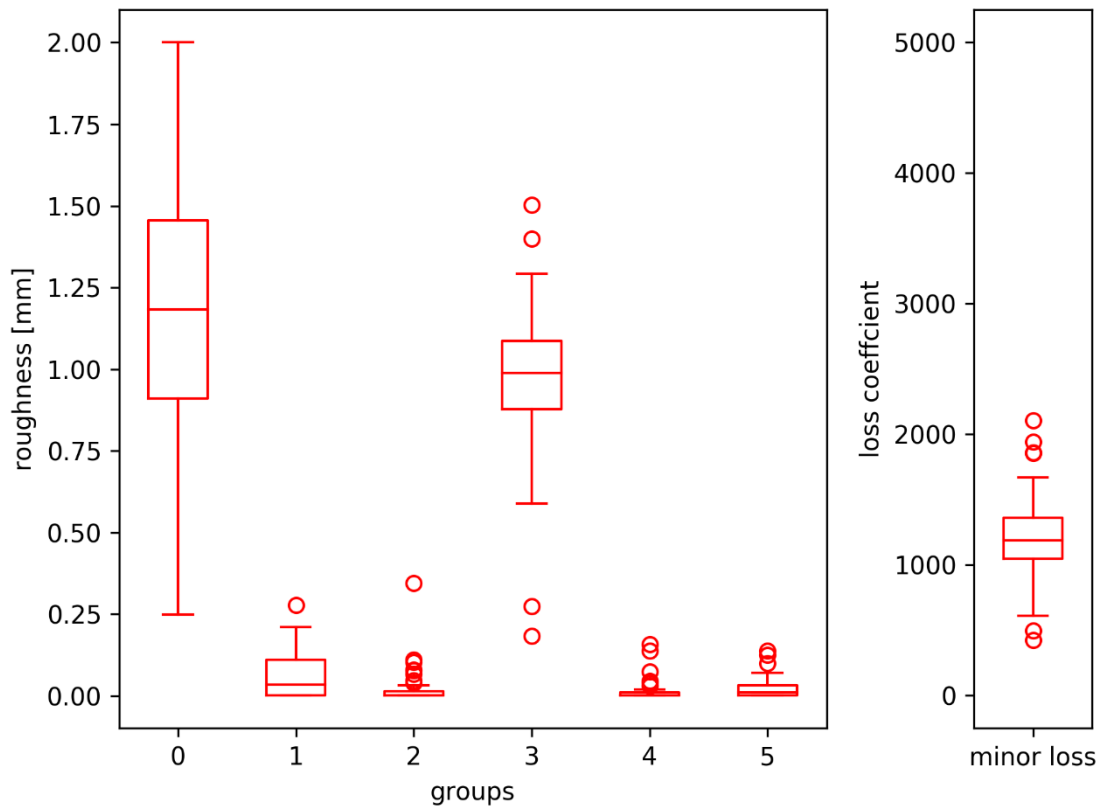


Abbildung 5-45: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 5 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz

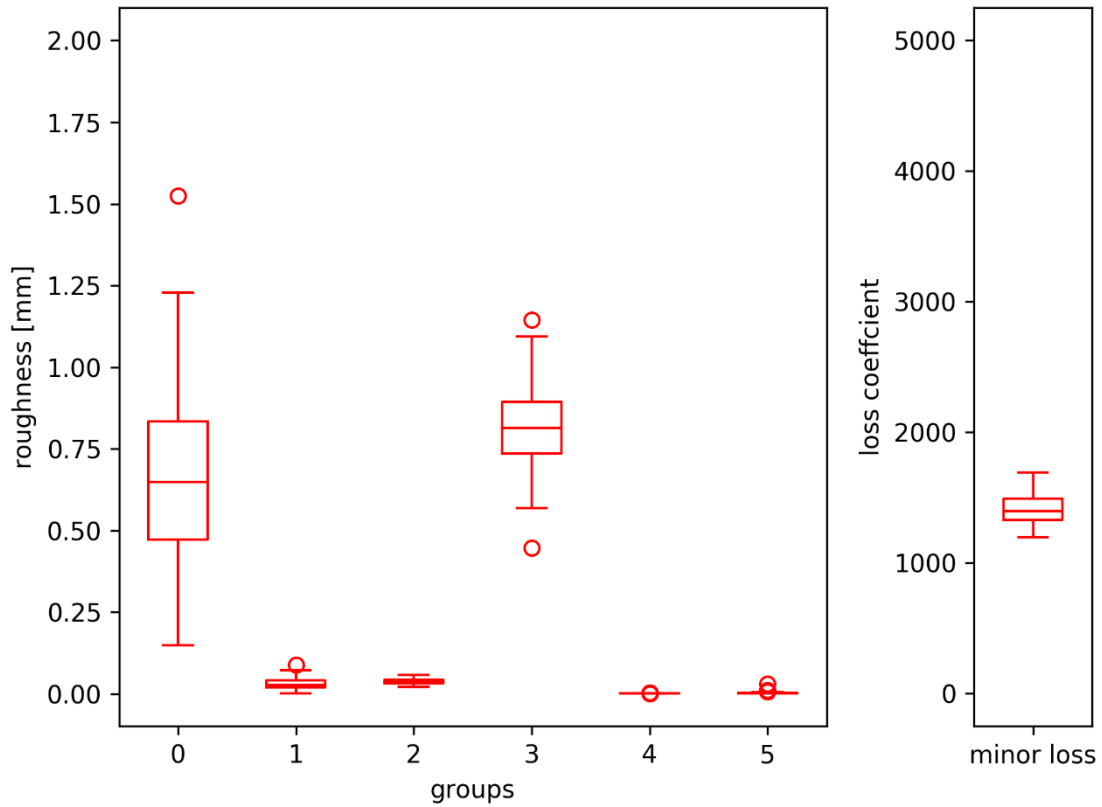


Abbildung 5-46: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 10 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz

Ergebnisse

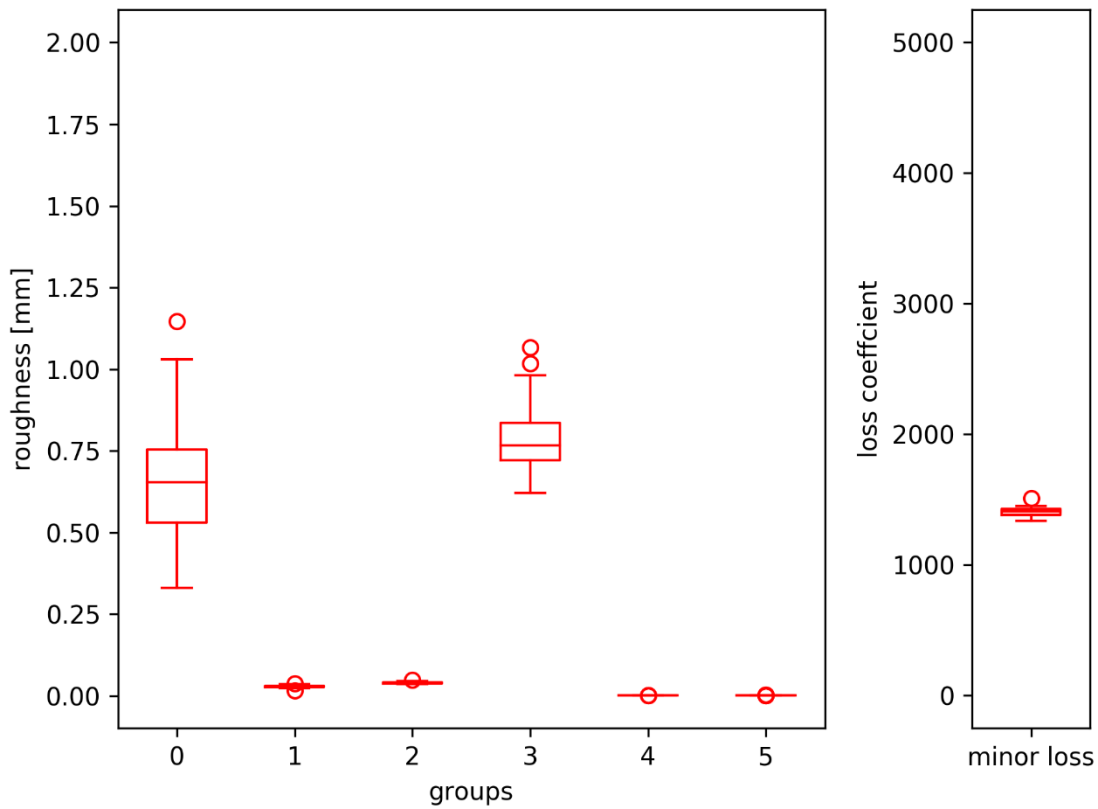


Abbildung 5-47: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 15 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz

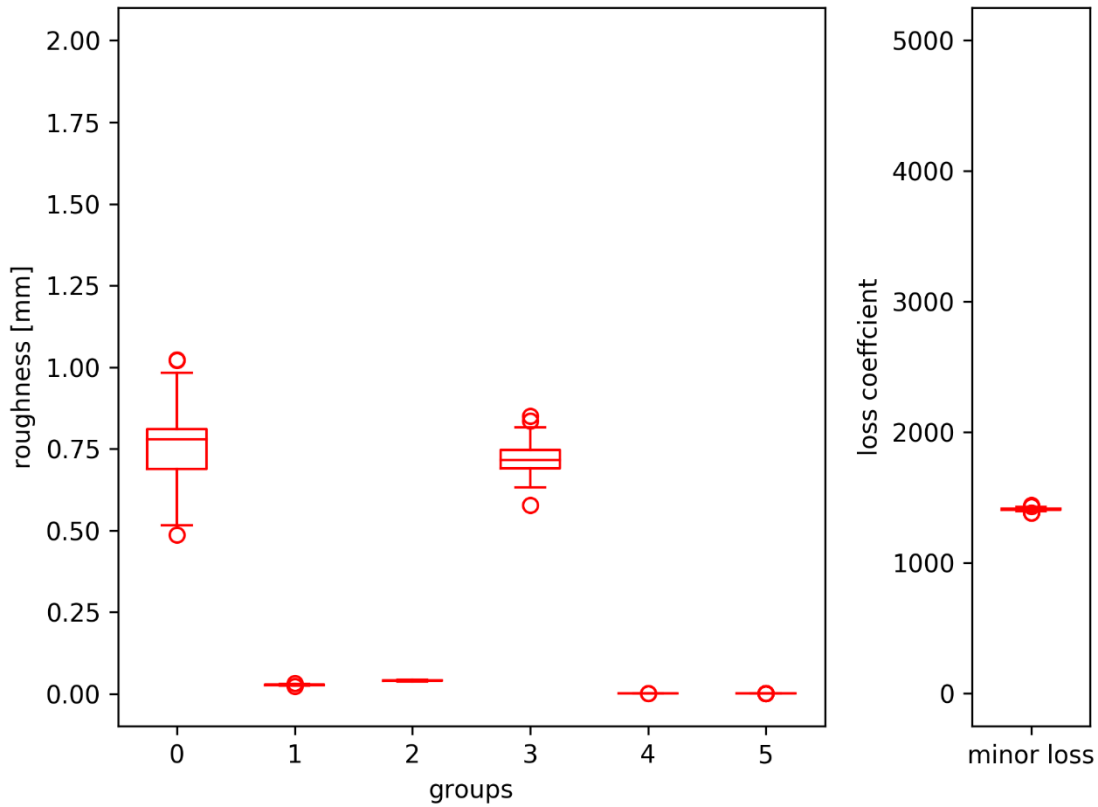


Abbildung 5-48: Streuung der Rauheiten der Population bei Generation 20 der Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz

Aufgrund der Betrachtung der Streuungen der Rauheiten aller Gruppierung, wie für die Gruppierung „Kombination grob“ beispielhaft dargestellt, und des in Kapitel 5.4.2.1 berechneten Maximum-Kriteriums von 9,13 Generationen, wurde das Maximum-Kriterium für die folgenden Vergleiche mit 10 Generationen festgelegt.

5.5.2.2 Graphischer Vergleich mit der Rauheiten-Streuung der automatischen Kalibrierung

In Abbildung 5-49, Abbildung 5-50, Abbildung 5-51, Abbildung 5-52, Abbildung 5-53, Abbildung 5-54 und Abbildung 5-55 sind die Streuungen des Optimierers für alle in Kapitel 5.3.1 gezeigten Gruppierungen der Streuung der Ergebnisse nach Kapitel 3.2.3.1 gegenübergestellt. Die Streuung des Optimierers ist in Rot, die Streuung der Ergebnisse der AC jeweils in Schwarz dargestellt.

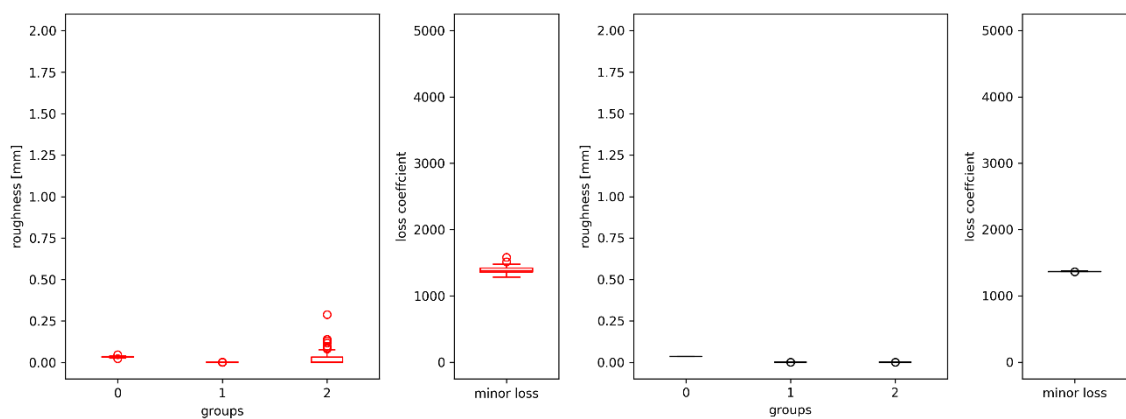


Abbildung 5-49: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Verlegejahr“ – Hart bei Graz

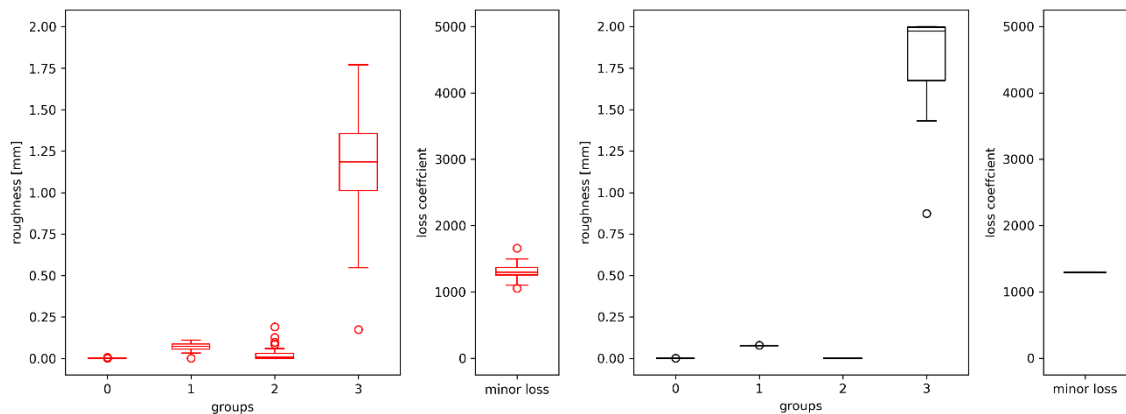


Abbildung 5-50: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Einbaudichte“ – Hart bei Graz

Ergebnisse

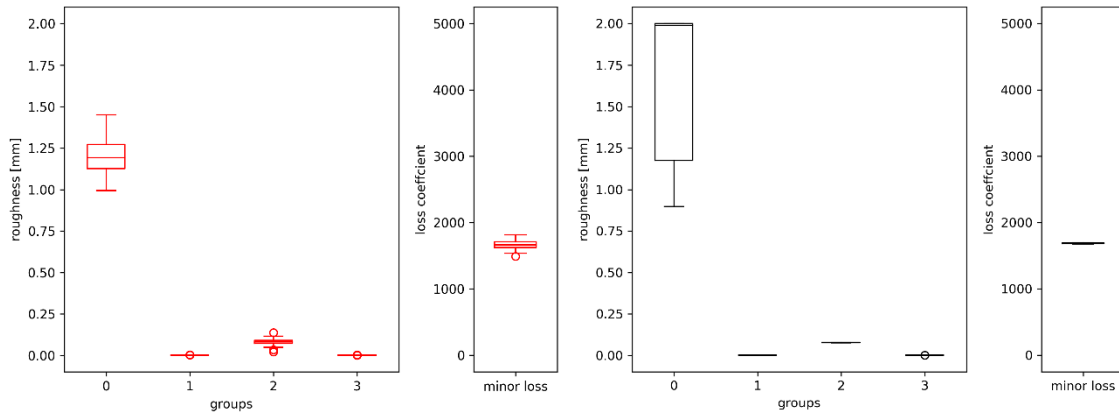


Abbildung 5-51: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Durchmesser“ – Hart bei Graz

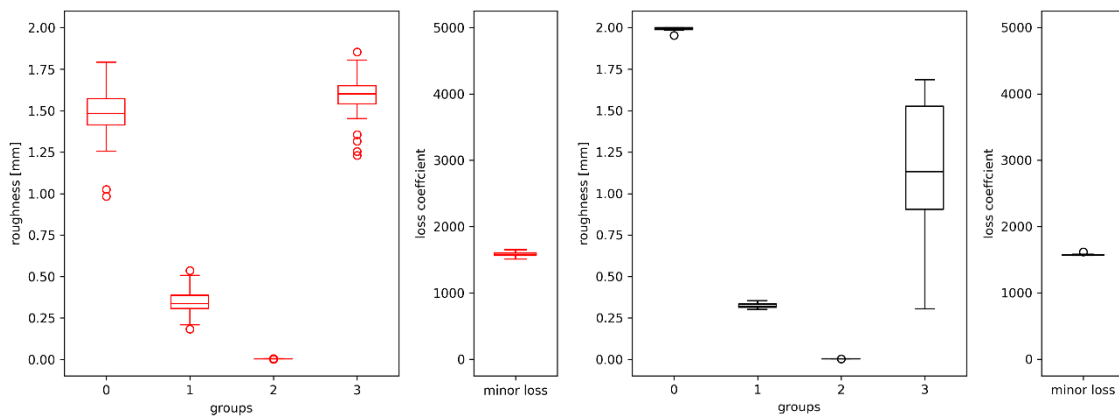


Abbildung 5-52: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Material“ – Hart bei Graz

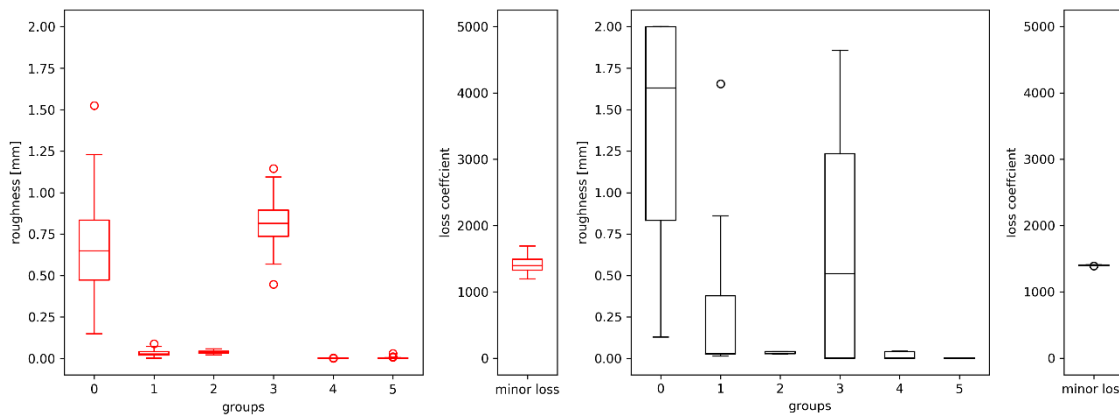


Abbildung 5-53: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Kombination grob“ – Hart bei Graz

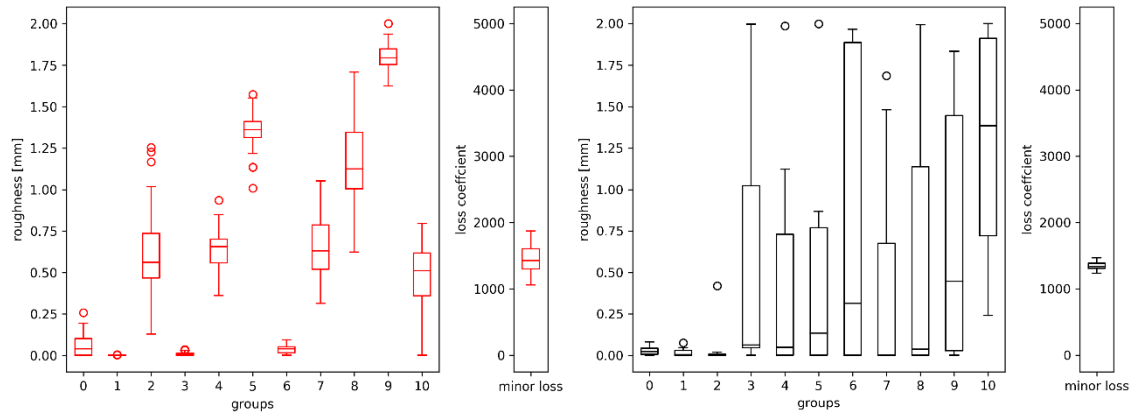


Abbildung 5-54: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Kombination fein“ – Hart bei Graz

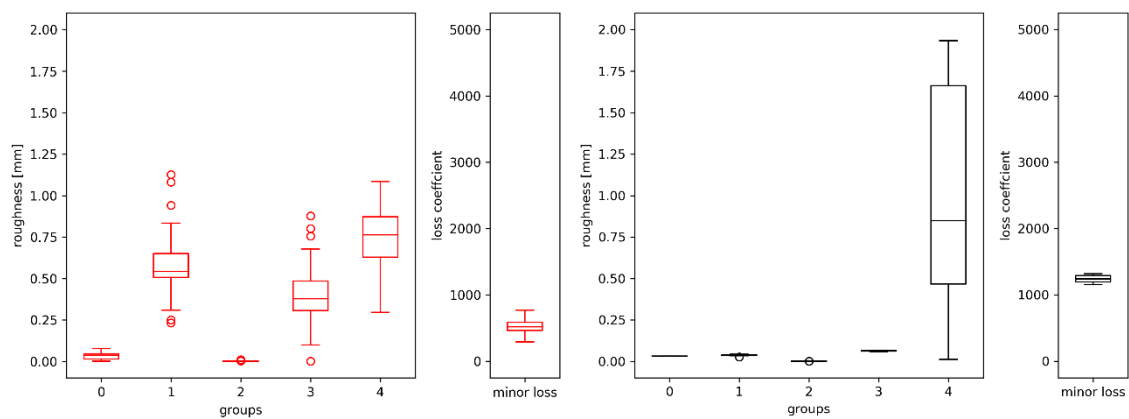


Abbildung 5-55: Vergleich der Streuungen der Rauheiten nach Gruppierung „Zonen“ – Hart bei Graz

5.5.2.3 Vergleich der Standardabweichungen

Die Standardabweichungen für die Ergebnisse der automatischen Kalibrierung und die Population des Optimierers sind auch hier in sortierter Reihenfolge in Tabelle 5-32 gegenübergestellt. Bei den Gruppierungen „Einbautendichte“ und „Kombination grob“ gibt es einen größeren Unterschied, die Reihenfolge der restlichen Gruppierungen ist gleich.

Ergebnisse

Tabelle 5-32: Vergleich der sortierten Standardabweichungen aus der Streuung der Rauheiten der Population des Optimierers mit der Streuung der Rauheiten aus 10 AC-Ergebnissen – Hart bei Graz

Streuung Population Optimierer		Streuung Ergebnisse AC	
Gruppierung	Standardabweichung	Gruppierung	Standardabweichung
Verlegejahr	0,019	Verlegejahr	0,000
Durchmesser	0,031	Einbautendichte	0,094
Kombination grob	0,075	Durchmesser	0,125
Material	0,086	Material	0,131
Einbautendichte	0,091	Zonen	0,149
Zonen	0,111	Kombination grob	0,344
Kombination fein	0,117	Kombination fein	0,563

6 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zuerst die allgemeinen Ergebnisse für die beiden Fallstudien diskutiert, anschließend wird auf die neu entwickelte Methodik zu Abbruchkriterien und Evaluierung der Modellgüte mittels Streuung des Optimierungsverfahrens eingegangen.

6.1 Fallstudie Seiersberg

Die nach der Vorkalibrierung erzielten Ergebnisse bei der Anwendung der AC an der Fallstudie Seiersberg (vgl. 5.2) sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst. Anhand der Standardabweichung kann die Robustheit der Ergebnisse beurteilt werden, anhand der Druckabweichung und der Differenz der Druckabweichung zu den Validierungsszenarien kann die Anpassung des Modells an die Messdaten bewertet werden.

Nach der Vorkalibrierung kann eine sehr gute Anpassung des Modells an die Messdaten erreicht werden. Was die Robustheit der Ergebnisse angeht liegt allerdings ein Zielkonflikt vor. Das robusteste Ergebnisse der Gruppierung nach Durchmesser weist auch eine der schlechtesten Anpassungen an die Messdaten auf. Die bei Kalibrierung und Validierung am besten abschneidende Gruppierung nach feiner Zonierung hingegen den zweitschlechtesten Wert bei der Beurteilung der Robustheit. Bei der Auswahl eines Ergebnisses sollte deshalb mit Bedacht vorgegangen und das Augenmerk auf die geplante Verwendung des Modells gerichtet werden.

Weiters ist zu beachten, dass mit keiner der nach Metadaten durchgeführten Gruppierungen bauingenieurmäßig sinnvolle Verteilungen der Rauheiten erzielt wurden (beispielsweise höhere Rauheiten bei neueren Rohren). Der Grund dafür ist vermutlich die Position und der hydraulische Einfluss des teilweise geschlossenen Schiebers, der mit den Gruppierungen nach Zonen besser abgebildet werden konnte. Zweifelsfrei nachgewiesen werden könnte dies aber nur durch eine Wiederholung der Messkampagne bei geöffnetem Schieber.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Ergebnisse – Seiersberg

Gruppierung	Standardabweichung der Rauheiten	mittlere Druckabweichung [mWS]	Druckdifferenz Validierungsszenarien [mWS]
Verlegejahr	0,025	0,65	-0,09
Einbautendichte	0,119	0,66	0,00
Durchmesser	0,006	0,65	0,06
Material	0,158	0,66	-0,13
Zonen grob	0,120	0,62	-0,11
Zonen fein	0,360	0,58	0,00
Kombination	0,510	0,58	-0,04

6.2 Fallstudie Hart bei Graz

Auch für diese Fallstudie sind die Ergebnisse nach der Vorkalibrierung (vgl. 5.3) in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Die Ergebnisse für die Standardabweichung und somit die Robustheit des Modells entspricht von den Größenordnungen her den Werten der Fallstudie Seiersberg. Die Druckdifferenzen entsprechen circa der Hälfte der Werte bei der Fallstudie Seiersberg. Die Anpassung an die Messwerte ist hier wesentlich besser. Dies dürfte auf die geringere Größe des Netzes in Hart bei Graz und die höhere Anzahl an Messwerten zurückzuführen sein. Im Unterschied zu den vorigen Ergebnissen gibt es hier Gruppierungen, wie Verlegejahr und Einbautendichte, die sowohl bei der Robustheit als auch bei der Anpassung an die Messdaten gut abschneiden. Die Auswahl eines Ergebnisses zur praktischen Anwendung ist hier wesentlich einfacher und würde auf eine der zwei vorher genannten Gruppierungen fallen.

Tabelle 6-2: Zusammenfassung der Ergebnisse – Hart bei Graz

Gruppierung	Standardabweichung der Rauheiten	mittlere Druckabweichung [mWS]	Druckdifferenz Druckdifferenzszenarien [mWS]	Validierungsszenarien [mWS]
Verlegejahr	0,000	0,28	-0,02	
Einbautendichte	0,094	0,26	-0,03	
Durchmesser	0,125	0,30	0,01	
Material	0,131	0,37	0,06	
Kombination grob	0,344	0,27	-0,03	
Kombination fein	0,563	0,28	-0,02	
Zonen	0,149	0,28	-0,02	

6.3 Abbruchkriterien

In Tabelle 6-3 sind die Ergebnisse der Evaluierung der verschiedenen Abbruchkriterien für beide Fallstudien (vgl. 5.4) zusammengefasst. Zuerst ist die Differenz vom Zielwert von 95,95 Prozent angegeben und danach die Generation, in der dieser Wert erreicht wurde.

Die Unterschiede in der Differenz liegen zwischen den beiden Fallstudien bei maximal 0,09 Prozent, zwischen den verschiedenen Kriterien bei maximal 0,13 Prozent. Das Maximum-Kriterium schneidet am besten ab, gefolgt von Epsilon-Kriterium und Populationsradius. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering. Für die praktische Anwendung kann deshalb davon ausgegangen werden, dass mit allen drei Kriterien zuverlässig ein angestrebter Fitnesswert annähernd erreicht wird.

Bei der erreichten Generation besteht kaum ein Unterschied zwischen den verschiedenen Kriterien. Auffällig ist, dass die Abbruchkriterien bei der Fallstudie Seiersberg bei etwas 17 Generationen und bei der Fallstudie Hart bei Graz bei etwa 8 Generationen erreicht wurde. Das Netz von Seiersberg weist etwa die vierfache Leitungslänge und die doppelte Leitungsanzahl als das Netz von Hart

bei Graz auf. Es liegt nahe, dass die höhere hydraulische Komplexität auch zu einem schwerer zu lösendem Optimierungsproblem führt. Vorliegende Ergebnisse bestätigen diese Annahme.

Tabelle 6-3: Evaluierung der allgemeinen Abbruchkriterien

		Maximum-Kriterium	Epsilon-Kriterium	Populationsradius
Seiersberg	Zieldifferenz	0,18%	0,13%	0,24%
	Generation	17,00	17,68	16,60
Hart bei Graz	Zieldifferenz	0,09%	0,22%	0,20%
	Generation	9,00	7,40	8,45

In Tabelle 6-4 sind die Ergebnisse des normierten Epsilon-Kriteriums zusammengefasst. An der Entwicklung des Fitnesswerts in Prozent mit fortschreitendem Kriterium lässt sich feststellen, dass die Fallstudie Seiersberg den maximalen Fitnesswert viel langsamer erreicht. Dies legt ebenfalls eine höhere Komplexität des sich aus der Kalibrierung ergebenden Optimierungsproblems nahe.

Es zeigt sich jedoch auch, dass trotz der Normierung des Kriteriums das Verhalten von dem zugrundeliegendem Optimierungsproblem abhängt. Es können zwar durch eine geeignete Wahl des normierten Kriteriums Ergebnisse erzielt werden, die den Vorherigen entsprechen, dazu ist aber eine Abschätzung der Komplexität des Problems notwendig. Ohne diese Abschätzung ist nur eine eher grobe Annäherung an das erwünschte Ergebnis möglich. Der Vergleich der beiden Fallstudien legt nahe, dass die benötigte Abschätzung der Komplexität anhand der zugrundeliegenden Hydraulik erfolgen kann.

Tabelle 6-4: Evaluierung des normierten Abbruchkriteriums

		ϵ_{10}	ϵ_5	ϵ_1	$\epsilon_{0,5}$	$\epsilon_{0,1}$
Seiersberg	Zielerreichung	98,44%	99,18%	99,76%	99,86%	99,95%
	Generation	6,79	8,64	13,59	16,33	24,99
Hart bei Graz	Zielerreichung	99,88%	99,90%	100,00%	100,00%	100,00%
	Generation	10,54	12,36	16,37	18,26	22,46

6.4 Streuung der Population des Optimierers

Um den Vergleich der Streuungen (vgl. 5.5) besser bewertbar zu machen, wurde der Rangordnung der sortierten Ergebnisse herangezogen und die Übereinstimmung in Prozent berechnet. In Tabelle 6-5 ist der Rang der Robustheit des Ergebnisses nach der Streuung des Optimierungsverfahrens (DE) und Streuung der automatischen Kalibrierung (AC) gegenübergestellt und die Übereinstimmung angegeben. Die durchschnittliche Übereinstimmung beträgt bei beiden Fallstudien 80,95 Prozent.

Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Für die Berechnung der Streuung der AC müssen 10 Berechnungen mit identischen Eingabedaten durchgeführt werden. Um die Streuung von DE zu bewerten ist nur eine Berechnung notwendig. Für eine erste Bewertung der Robustheit der Ergebnisse, die mit 10 Prozent des Zeit- und Berechnungsaufwandes auskommt, ist eine Übereinstimmung von etwa 81 Prozent als äußerst gutes Ergebnis zu bewerten.

Tabelle 6-5: Übereinstimmung der Streuungen von Differential Evolution und automatischer Kalibrierung

Seiersberg	Gruppierung	Rang DE	Rang AC	Übereinstimmung
	Verlegejahr	2	2	100,00%
	Einbautendichte	7	3	33,33%
	Durchmesser	1	1	100,00%
	Material	4	5	83,33%
	Zonen grob	3	4	83,33%
	Zonen fein	6	6	100,00%
	Kombination	5	7	66,67%
Hart bei Graz	Verlegejahr	1	1	100,00%
	Einbautendichte	5	2	50,00%
	Durchmesser	2	3	83,33%
	Material	4	4	100,00%
	Kombination grob	3	6	50,00%
	Kombination fein	7	7	100,00%
	Zonen	6	5	83,33%

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bei beiden Fallstudien ist unter der Verwendung der vorgestellten Methodik zur Vorkalibrierung und der anschließenden Anwendung der automatischen Kalibrierung eine gute Anpassung der simulierten Werte an die realen Messwerte möglich. Bei beiden Fallstudien waren teilweise geschlossene Absperrorgane zu berücksichtigen, die in beiden Modellen zufriedenstellend abgebildet werden konnten. Die neu für die AC entwickelten Methoden (Abbruchkriterien und Streuung der Kalibrierungsparameter) wurden mit beiden Fallstudien evaluiert und lieferten die gewünschten Ergebnisse. Beide Ansätze könnten in die AC integriert und beispielsweise in Studienarbeiten ausführlicher getestet werden.

Vergleicht man die von Schrotter (2016) und Lippacher (2018) mit manueller Trail & Error-Kalibrierung erzielten Druckabweichungen mit den in dieser Arbeit mit der AC berechneten Ergebnissen, so zeigt sich, dass diese um mehr als die Hälfte verbessert werden konnten. In Tabelle 7-1 sind das jeweils beste und schlechteste Endresultat der AC den erwähnten Ergebnissen der händischen Kalibrierung für beide Fallstudien gegenübergestellt.

Tabelle 7-1: Vergleich der mittleren Druckabweichung über Kalibrierungs- und Validierungsszenarien für automatische und manuelle Kalibrierung

Fallstudie	beste AC	schlechteste AC	Trail & Error
Seiersberg	0,58	0,66	1,40
Hart bei Graz	0,27	0,34	0,85

Eine gute Datenqualität und eine gewissenhafte Vorkalibrierung sind die Voraussetzung für die Erzielung dieser Ergebnisse. Insbesondere die richtige Lokalisierung der teilweise geschlossenen Schieber hat einen großen Einfluss auf die Güte und Qualität der Ergebnisse. Bei der Anwendung der AC ist die Gruppierung der Modellparameter die wichtigste Aufgabe. Es wurden die Parameter sowohl nach Metadaten (Material, Durchmesser, Verlegejahr, Einbautendichte), als auch nach geographischen Zonen gruppiert. Bei der Fallstudie Seiersberg hat sich gezeigt, dass bei der Verwendung von Metadaten zur Gruppierung auch unplausible Ergebnisse auftreten, vermutlich aufgrund der Überlagerung des Einflusses von Rohrrauheiten und teilweise geschlossenem Schieber auf die Hydraulik des Netzes.

Da die Ergebnisse der AC bei der Gruppierung nach Zonen in keinem Fall signifikant schlechter waren, sollten in Zukunft auch verschiedene Zonierungen in Betracht gezogen werden. In der vorliegenden Arbeit wurden die Zonengrenzen aus einer Trail & Error-Kalibrierung übernommen oder händisch erstellt. Für zukünftige Untersuchungen könnte eine automatische Zonierung beispielsweise mit Clustering-Algorithmen durchgeführt und der Einfluss der verschiedenen Zonie-

rungen verglichen werden. Da Trail & Error-Kalibrierungen oft ebenfalls nach Zonen durchgeführt werden, könnte die Implementierung einer automatischen Zonierung die Akzeptanz der AC in der praktischen Anwendung steigern.

Zur Festlegung der Abbruchkriterien müssen mehrere Kalibrierungen durchgeführt werden, bei denen die optimale Lösung gefunden wird. Dafür kann ein aus Erfahrungswerten abgeleitetes Maximum-Kriterium verwendet werden. Es können dann aber sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Steht ein solches nicht zur Verfügung, muss auf ein normiertes Abbruchkriterium zurückgegriffen werden. Das normierte Epsilon-Kriterium kann zwischen 0 und 1 gewählt werden. Das Verhalten dieses Kriteriums hängt jedoch von der Komplexität des Optimierungsproblems ab. Die Komplexität kann aus Erfahrungswerten oder aus dem zugrundeliegenden Netz abgeschätzt werden. Insbesondere die Abschätzung eines Epsilon-Kriteriums aus dem Netz, beispielsweise mittels Graphentheorie oder hydraulischen Parametern, könnte näher untersucht werden.

Die Streuung der kalibrierten Parameter einer Population des Differential Evolution Algorithmus zur Evaluierung der Modellgüte und der Robustheit heranzuziehen ist möglich. Beim Vergleich der Reihung der Ergebnisse nach Robustheit wurde eine Übereinstimmung von 81 Prozent zwischen der Streuung der kalibrierten Parameter einer Population von DE und der Streuung der Ergebnisse mehrerer AC-Runs erzielt. Diese Übereinstimmung konnte ohne zusätzlichen Zeit- oder Rechenaufwand erreicht werden. Die Streuung der Parameter einer Population von Differential Evolution zusätzlich zur Evaluierung heranzuziehen ist daher auf jeden Fall zu empfehlen.

Der nächste Schritt in der Modellkalibrierung wäre eine Methodik zur Verbrauchskalibrierung zu entwickeln und diese in die AC zu implementieren. Damit wäre der zweite wichtige Modellparameter abgedeckt. Da beispielsweise bei der von Sanz & Pérez (2015) entwickelten Verbrauchskalibrierung auch die Verwendung von evolutionären Algorithmen vorgeschlagen wird, sollte die Verwendung von Differential Evolution möglich sein. Damit könnten die in dieser Arbeit beschriebenen Methoden auch zur Kalibrierung von Verbräuchen angewendet werden.

Literaturverzeichnis

- DVGW (2016) Arbeitsblatt GW 303-1 Berechnung von Gas- und Wasserrohrnetzen.
- E. Lansey K. & Basnet C. (1991) Parameter Estimation for Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **117**(1), 126–144.
- GitHub (2019) Tom's Obvious, Minimal Language. Contribute to toml-lang/toml development by creating an account on GitHub. [online] <https://github.com/toml-lang/toml> (Zugegriffen 29. Jänner 2019).
- Google Maps (2018) Google Maps. [online] <https://www.google.at/maps/@47.0392067,15.431155,18665m/data=!3m1!1e3> (Zugegriffen 30. Dezember 2018).
- Haestad M., Walski T., Chase D., Savic D., Grayman W., Backwith S., & Koelle E. (2004) *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, Haestad Press, Waterbury, CT.
- Jenkins (2019) Jenkins User Documentation. Jenkins User Documentation. [online] <https://jenkins.io/doc/index.html> (Zugegriffen 29. Jänner 2019).
- Lippacher J. P. (2018) *Methoden der Kalibrierung von Trinkwasserverteilnetzen und deren Einfluss auf die modellbasierte Leckagelokalisierung*, Masterarbeit, Technische Universität Graz.
- Lippacher J. P., Steffelbauer D. B., Arbesser-Rastburg G., & Fuchs-Hanus D. (2019) *The impact of hydraulic model calibration on model-based leak localization accuracy: conclusions drawn from a real-world case study*, accepted EWRI, Pittsburgh, US.
- Ormsbee L. & Lingireddy S. (1997) Calibrating hydraulic network models. *Journal American Water Works Association - J AMER WATER WORK ASSN*, **89**, 42–50.
- 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.
- Reddy P. V. N., Sridharan K., & V. Rao P. (1996) WLS Method for Parameter Estimation in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **122**(3), 157–164.
- Rossman L. A. (2000) *EPANET 2 Users Manual*, United States Environmental Protection Agency.
- Sanz G. & Pérez R. (2015) Comparison of Demand Calibration in Water Distribution Networks using Pressure and Flow Sensors. *Procedia Engineering*, **119**, 771–780.

- SAS Styrian Aqua Service GmbH (2015) *Hydraulische Rohrnetzrechnung - Wasserversorgungsanlage der Gemeinde Seiersberg-Pirka - Messkampagne Seiersberg*.
- Savic D. A., Kapelan Z. S., & Jonkergouw P. M. R. (2009) Quo vadis water distribution model calibration? *Urban Water Journal*, **6**(1), 3–22.
- Schrotter S. (2016) *Hydraulische Rohrnetzrechnung - Wasserversorgungsanlage der Gemeinde Seiersberg-Pirka*, SAS Styrian Aqua Service GmbH.
- Steffelbauer D. B. (2018) *Model-Based Leak Localization in Water Distribution Systems*, PhD Thesis, Graz University of Technology.
- Steffelbauer D. & Fuchs-Hanusch D. (2015) OOPNET: An object-oriented EPANET in Python. *Procedia Engineering*, **119**, 710–718.
- Steffelbauer D., Günther M., Neumayer M., & Fuchs-Hanusch D. (2017) *AZM - Aktives Zustandsmonitoring von Trinkwasserverteilnetzen*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. [online] https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/media/umweltfoerderung/Dokumente_Betriebe/Wasser_Betriebe/Studien_Wasserwirtschaft/AZM_Endbericht_FINAL.pdf (Zugegriffen 12. März 2019).
- Storn R. & Price K. (1995) Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report: International Computer Science Institute, **95**(12).
- Storn R. & Price K. (1997) Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, **11**, 341–359.
- Tucciarelli T., Criminisi A., & Termini D. (1999) Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**(3), 277–285.
- US EPA O. (2014) EPANET. US EPA. [online] <https://www.epa.gov/water-research/epanet> (Zugegriffen 29. Jänner 2019).
- What is Python? Executive Summary (2018) Python.org. [online] <https://www.python.org/doc/essays/blurb/> (Zugegriffen 30. Dezember 2018).

